

Stian Morthaug Thollefsen

Geologiske parameteres betydning for injeksjonsprosedyrer i utfordrende bergmasseforhold ved Fornebuibanen

Masteroppgave i Tekniske geofag
Veileder: Kristin Hilde Holmøy
Juni 2023

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for geovitenskap og petroleum



Stian Morthaug Thollefsen

Geologiske parameteres betydning for injeksjonsprosedyrer i utfordrende bergmasseforhold ved Fornebubanen

Masteroppgave i Tekniske geofag
Veileder: Kristin Hilde Holmøy
Juni 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for geovitenskap og petroleum



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

I tunnelprosjekter i Norge er det et økende fokus på vannkontroll, for å unngå skader på naturmiljø, grunnvannsenkning og setningsutvikling. I urbane områder er den vanligste tilnærmingen for vanntetting, ved systematisk forinjeksjon av sement. Injeksjonsarbeidet utgjør en stor kostnadsandel av tunnelprosjekter, og det settes av store ressurser for å avdekke hydrogeologiske forhold. Norsk injeksjonspraksis er i stor grad erfaringsbasert, der det ikke er definerte rammer for utforming av vanntetting. Prosjektering og utførelse av injeksjonsarbeider er en komplisert og sammensatt problemstilling ved driving av tunnel. Oppnådd tetthet avhenger av stedlige geologiske forhold, prosjektets kompleksitet, erfaring, injeksjonsutforming og utførelse av injeksjon. I tilknytning til prosjektering og utførelse av injeksjon, vil det være nødvendig å utvikle kompetansen for betydningen av geologiske parametere. Litteraturen beskriver i liten grad hvordan prosjektering og utførelse av injeksjon bør foretas, i tilknytning til utfordrende bergmasseforhold. Liten bergoverdekninger, gangbergarter og svakhetssoner, kan gi betydelig økning av injeksjonsinnsats og følgelig økte kostnader.

Studien har tatt for seg injeksjon og geologiske parametere i forbindelse med utbyggingen av Fornebubanen. T-banetunnelen vil bli i underkant av 8 km lang, og vil utvide kollektivforbindelsene mellom Majorstua og Fornebu. Tunnelprosjektet beskrives som svært teknisk og komplekst, der store deler av traseen er under bebygde områder og eksisterende infrastruktur, med liten bergoverdekning. Tunnelen er per 2023 under driving, og vil etter planen settes i drift i 2029. Strekningen gjennomgår hovedsakelig kalkstein, skifer og knollekalk i veksling, med hyppig opptreden av svakhetssoner og gangbergarter. Tunnelen er underlagt svært strenge tetthetskrav, og det utføres omfattende systematisk injeksjon for alle strekninger. For å relatere injeksjon og geologi ved Fornebubanen, har studien analysert geologiske data og injeksjonsdata for totalt fem delstrekninger. Fire av strekningene beskrives fra prosjektering ved utfordrende bergmasseforhold, ved tilknytning til svakhetssoner, gangbergarter og liten bergoverdekning. De geologiske dataene som er gjennomgått innebefatter forundersøkelser med tilhørende rapporter, BIM-modell, ingeniørgeologisk kartlegging i tunnel og lidarscanning. Injeksjonsdata er analysert i detalj ved injeksjonslogger, borerapporter, injeksjonsprosedyrer og rapporter fra prosjektert vanntetting. En utstrakt datasammenstilling er foretatt for alle delstrekningene. Kvantitative undersøkelser er foretatt for å utforske sammenhenger mellom geologiske parametere og injeksjonsmengder. I tillegg er det foretatt kartlegging av fukt- og drypp i tunnel, for å vurdere oppnådd tetthet. Kvalitative undersøkelser for prosjektering av vanntetting og injeksjonsprosedyrer ved Fornebubanen, er gjort ved intervju. Geologiske parameters betydning for prosjektert og utført injeksjon ved Fornebubanen blir diskutert.

Resultatene viser at injeksjonsmengdene øker betydelig i tilknytning til gangbergarter og svakhetssoner. Økningen injiserte mengder per m tunnel er henholdsvis 150% og 186%, og knyttes i liten grad til tilpasning av injeksjonsgeometri. Resultatene tilsier at det er sammenhenger knyttet til økning av antall bormeter og injeksjonsmengder, ved reduserende overdekning. Sammenstillingen av kvalitative data ved Fornebubanen viser at tilpasning av injeksjon, til geologiske parametere, praktiseres i noen grad. Erfaringer ved tettearbeidet som utføres i anleggsfasen, er styrende for tilpasning av injeksjonsprosedyrer og utførelse av injeksjon. Overordnet er det knyttet gode erfaringer ved bruk av poretrykksdata som aktivt tiltak for tilpasning av vanntetting. Det konkluderes med at tilpasninger av injeksjonsprosedyrer og injeksjonsinnsatsen ved Fornebubanen, har gitt tilfredsstillende oppnådd tetthet.

Abstract

There is an increasing emphasis regarding water control in norwegian tunneling projects in Norway, to prevent damage to the natural environment, groundwater depletion and settlements. Systematic pre-grouting is regarded the most common approach for waterproofing in urban areas. The grouting efforts constitutes a significant portion of the costs in tunneling projects, and substantial resources are allocated to assess hydrogeological conditions. Norwegian grouting practice is largely based on experience, with no defined framework for waterproofing design. The design and execution of grouting work pose complex challenges during construction. The achieved tightness depends on geological conditions, project complexity, experience, grouting design, and execution. In regards of the design and execution of grouting, it is necessary to develop knowledge regarding the understanding of the significance of geological parameters. The literature has limited coverage on the design of grouting, in relation to challenging rockmass conditions. Shallow rock cover, dikes, and weakness zones can significantly increase grouting efforts and consequently lead to higher costs.

This study focuses on grouting and geological parameters at the Fornebu Line project. This i will be an 8 km long subwaytunnel, between Majorstua and Fornebu. The tunnel project is described as highly technical and complex, with several sections passing beneath built-up areas, infrastrucatur, and limited rock cover. As of 2023, the tunnel is under construction and scheduled to be operational in 2029. The region primarily consists of alternating limestone, slate, and nodular limestone, with frequent occurrence of weakness zones and dikes. The project is subject to stringent requirements regarding water inflow, and systematic pre-grouting is carried out for all parts of the tunnel. To describe relations between pre-grouting and geological parameters at the Fornebu Line, an in depth analyses of geological data and grouting data was carried out. The study considers a total of five sections of the tunnel. Four sections are described in terms of challenging rock mass conditions, such as weakness zones, dikes and shallow rock cover. Geological data consists of preliminary investigations with associated reports, BIM-model, engineering geological mapping and lidar scanning of the tunnel face. Grouting data was analysed in detail, and includes grouting logs, drill-reports and grouting procedures. An extensive data compilation was carried out for all selected sections of tunnel. Quantitative assessments was made in regard to geological parameters and grout consumption. In addition, mapping of moisture and seepage was conducted to assess achieved watertightness. Qualitative assessments of the waterproofing design and grouting procedures at the Fornebu Line was carried out. The significance of geological parameters for the designed and executed grouting efforts at the Fornebu Line is discussed.

The results indicate a significant increase in grout consumption associated with dikes and weakness zones. The relative increase in consumptions are 150% and 186% respectively, and is not due to adjustments of the grout curtain. The results implies that there are some correlation of an increase in the number of drilled meters and grout consumption, when rock cover is reduced. The compilation of qualitative data from the Fornebu Line project, shows that some degree of adaptation is practiced, in regards of grouting and geological parameters. Experiences regarding grouting procedures and the excecution of grouting when tunneling, are highly emphasized when adaptations of grouting procedures and execution of grouting are made. There is an overall contentment associated to the use of pore pressure data as an active measure for waterproofing adaptation. The adaptations of grouting procedures and efforts at the Fornebu Line, has given sufficient leakage reduction.

Forord

Masteroppgaven er utarbeidet våren 2023 i forbindelse med emnet TGB4945 Ingeniørgeologi masteroppgave, som avslutning av studieprogrammet Tekniske geofag ved NTNU Trondheim. Oppgaven er utarbeidet ved samarbeid med Multiconsult Norge AS, Prosjekteringsgruppen Fornebubanen og Fornebubanen. Studien hadde ikke vært mulig å gjennomføre uten tilgang til deres data og verktøy. Jeg er også svært takknemlig for at det også har gitt meg masse god innsikt i ingeniørgeologi i praksis, og for all hjelp jeg har fått underveis.

Jeg vil gjerne rette en stor takk til min veileder Kristin H. Holmøy, ved Institutt for Geovitenskap og petroleum, for god veiledning, kompetanseutveksling, samt å være behjelpelig og tilgjengelig under hele prosessen.

Jeg ønsker også å takke Oddbjørn Aasen, Bruce Ashcroft og Kjetil Moen ved Multiconsult Norge AS, for å være til hjelp og tilrettelegge for arbeid og undersøkelser på anlegg og arbeid i forbindelse med oppgaven. I tillegg ønsker jeg å takke Martin Hovda Haugsand og Ola Woldmo ved Fornebubanen for erfaringsutveksling og befaringer i tunnel. Samtlige har bidratt stort til masteroppgaven ved faglig engasjement og veiledning.

Til slutt ønsker jeg å vise min takknemlighet for min samboer Marit Mjøsund, som har vært tålmodig og forståelsefull gjennom hele semesteret. I tillegg har din støtte, faglig utveksling og korekturlesning vært uvurderlig.

Stian Morthaug Thollefsen

Trondheim, 10, juni 2023

Innhold

Figurliste	VIII
Tabelliste	VIII
	1
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Formål med studien	1
1.3 Begrensninger av studien	3
2 Metodebeskrivelse	4
2.1 Forstudie	4
2.2 Systematisering av eksisterende data	4
2.2.1 Forundersøkelser og geologiske data innhentet under driving	4
2.2.2 Injeksjonsdata	5
2.2.3 Boredata	5
2.2.4 Prosedyredata	6
2.3 Analysering av geologi og injeksjon	6
2.4 Intervju og erfaringsutveksling	6
2.5 Feltstudie	7
3 Hydrogeologi og vann i grunnen	8
3.1 Hydrogeologi og løsmasser	9
3.2 Hydrogeologi og bergmasse	10
3.2.1 Spenningstilstand	10
3.2.2 Sprekkeorientering, sprekkeutholdenhet og sprekkefrekvens	12
3.2.3 Sprekkeåpning, sprekkeruhet og sprekkefylling	12
3.2.4 Forkastningssoner og gangbergarter	13
3.2.5 Teoretisk tilnærming	14
3.3 Innlekkasje i tunnel	15
4 Bergmasseklassifisering og forundersøkelser	19
4.1 RQD	19
4.2 Q-systemet	19
4.3 Bergmassetyper	20
4.4 Forundersøkelser	21
5 Vanntetting	23
5.1 Injeksjonsutforming	23
5.2 Injeksjonsutførelse og utstyr	25
5.3 Injeksjonsmaterialer	26
5.3.1 Sementbaserte injeksjonsmaterialer	26
5.3.2 Kjemiske og ikke-sementbaserte injeksjonsmidler	27
6 Prosedyrebestemmelser og injeksjonsstrategi	29
6.1 Tetthetskrav	29
6.2 Vann-sement forhold	33
6.3 Injeksjonsmetoder	34
6.4 Prosjektering av injeksjon med hensyn til geologi	35
7 Fornebubanen	36
7.1 Generell beskrivelse	36
7.2 Geologi og grunnforhold	38
7.2.1 Regionalgeologi og bergmassebeskrivelse for prosjektområdet	38
7.2.2 Strukturgeologi og oppsprekking	40
7.2.3 Svakhetssoner og gangbergarter	41

7.2.4	Kvartærgeologi og løsmasser	41
7.2.5	Overdekning og spenningsforhold	41
7.2.6	Forundersøkelser og kartlegging	42
7.2.7	Hydrogeologi, grunnvannsovervåkning og poretrykkmålinger	43
7.3	Tettestrategi	44
7.3.1	Generell metode for vanntetting	44
7.3.2	Tiltaksklasser	45
7.3.3	Etterinjeksjon og vanntett utstøpning	46
7.3.4	Overvåkning og lekkasjekontroll	46
8	Valgte områder	48
8.1	Tverrslag Lilleaker	48
8.2	Hovedløp Lysaker vest	49
8.3	Dyprenne E18	49
8.4	Hovedløp Fornebuporten nord	50
8.5	Flytårnet	50
9	Resultater og analyse	52
9.1	Geologiske forhold ved Fornebubanen	52
9.2	Resultater fra injeksjonsdata og geologiske parametere ved Fornebubanen	54
9.2.1	Bergoverdekning	54
9.2.2	Geologiske strukturer	56
9.2.3	Innlekkasje ved injeksjonsboring	58
9.3	Resultater fra overvåking og oppnådd tetthet	58
9.4	Prosjektering av vanntetting og prosedyrebestemmelser ved Fornebubanen	59
9.4.1	Resultater fra intervju - Prosjektering av vanntetting ved Fornebubanen	59
9.4.2	Resultater prosedyresammenstilling	60
9.4.3	Vurdering av tiltaksklasser	62
9.5	Tverrslag Lilleaker	63
9.5.1	Geologiske beskrivelser	63
9.5.2	Geologisk beskrivelse ved lidarscanning med fotogrammetri	65
9.5.3	Prosjektert og utført vanntetting	67
9.5.4	Oppnådd tetthet og bemerkninger	68
9.6	Hovedløp Lysaker Vest	71
9.6.1	Geologiske beskrivelser	71
9.6.2	Prosjektert og utført vanntetting	71
9.6.3	Oppnådd tetthet og bemerkninger	73
9.7	Dyprenne E18	74
9.7.1	Geologiske beskrivelser	74
9.7.2	Prosjektert og utført vanntetting	75
9.7.3	Oppnådd tetthet og bemerkninger	77
9.8	Hovedløp Fornebuporten Nord	79
9.8.1	Geologiske beskrivelser	79
9.8.2	Prosjektert og utført vanntetting	79
9.8.3	Oppnådd tetthet og bemerkninger	81
9.9	Flytårnet	83
9.9.1	Geologiske beskrivelser	83
9.9.2	Prosjektert og utført vanntetting	84
9.9.3	Oppnådd tetthet og bemerkninger	86
10	Diskusjon	89
10.1	Kvalitetsvurdering av studien	89
10.2	Geologiske parametere og grunnlagsdata ved Fornebubanen	89
10.3	Evaluering av prosjektering av vanntetting, injeksjonsprosedyrer og oppnådd tetthet ved Fornebubanen	92
10.3.1	Prosjektering av vanntetting i utfordrende bergmasseforhold	92
10.3.2	Tilpasning av injeksjon ved utfordrende bergmasseforhold	93
10.3.3	Oppnådd tetthet	94
10.4	Evaluering av geologiske parametere og injeksjon ved Fornebubanen	94

11 Konklusjon	97
11.1 Geologiske parametere og valg av injeksjonsprosedyrer	97
11.2 Geologiske parameteres betydning for injeksjoninnsatsen og injeksjonsmengder	97
12 Videre arbeid	98
Referanser	103
Vedlegg	104
A BERGGRUNNSKART - FORNEBUBANEN	104
A.1 Berggrunnskart K2A	104
A.2 Berggrunnskart K2B	105
B LØSMASSEKART - FORNEBUBANEN	106
B.1 Løsmassekart K2A	106
B.2 Løsmassekart K2B	107
C KJERNEBOREHULL - FORNEBUBANEN	108
C.1 Kjerneborehull K2A	108
C.2 Kjerneborehull K2B	109
D TILTAKSKLASSE - FORNEBUBANEN	110
D.1 Tiltaksklasse K2A	110
D.2 Tiltaksklasse K2B	110
E RESULTATER FRA INTERVJU	111
F INJEKSJONSPROSEDYRER - K2A	113
F.1 IP-2-K2A - TILTAKSKLASSE 1 OG 2	113
F.2 IP-3-K2A - TILTAKSKLASSE 3	115
F.3 IP-4-K2A - TILTAKSKLASSE 4	117
F.4 IP-FLYTÅRNET - TILTAKSKLASSE 4	119
G INJEKSJONSPROSEDYRER - K2B	120
G.1 IP-2-K2B OG IP-3-K2B - TILTAKSKLASSE 2 OG 3	120
G.2 MODIFISERT IP-2-K2B OG IP-3-K2B	121
H BEVERMAPPING - EKSEMPEL FRA K2A	123
I INJEKSJONSRAPPORT K2A - EKSEMPEL	124
J INJEKSJONSRAPPORT K2B - EKSEMPEL	126
K Q-SYSTEMET - KARTLEGGINGSSKJEMA	133

Figurer

1.1 Prosjektoversikt	2
3.1 Hydraulisk konduktivitet i løsmasser og berg	9
3.2 Hydraulisk konduktivitet og overdekning	11
3.3 Sprekkegeometri	12
3.4 Forkastningssone	14
3.5 Kubiske lov	15
3.6 Gravitasjonell innstrømning i tunnel	16
3.7 Relativ forskjell for eksakt løsning av El Tani	16
4.1 Lugeonmåling	22
5.1 Injeksjonsgeometri - Tverrsnitt	24

5.2	Injeksjonsgeometri - Lengdesnitt	24
5.3	Rheologisk beskrivelse	27
5.4	Partikkelstørrelse av injeksjonsmidler	28
6.1	Skjematisk illustrasjon av poretrykk- og grunnvannssenkning	30
6.2	Horisontal influensavstand	31
6.3	Tunneldatabasen i Norge - Influensavstand	32
6.4	Tunneldatabasen i Norge - Innlekkasje	32
6.5	Målemetode for innlekkasje	33
6.6	GIN kurver	34
7.1	Tunnelgeometri	37
7.2	Regionalgeologi Oslofeltet	39
7.3	Sprekkekarakteristikk ved Fornebuporten	41
7.4	Poretrykksmålere - plassering	47
8.1	Oversikt valgte områder	48
9.1	Frekvensplot bergmasseklasser	52
9.2	Frekvensplot Q-parametere - Valgte områder av K2A og K2B	53
9.3	Gjennomsnittlige injeksjonsmengder - Overdekning	55
9.4	Injeksjonsmengder mot overdekning	55
9.5	Gjennomsnittlige injeksjonsmengder - Geologisk beskrivelse	57
9.6	Injeksjonsmengder mot geologisk beskrivelse	57
9.7	Medgåtte mengder og borhullsinnlekkasje	58
9.8	Frekvensplot tiltaksklasser - Valgte områder av K2A og K2B	63
9.9	Tverrslagstunnel Lysaker - Geologisk oversikt	64
9.10	Tverrslagstunnel Lilleaker - Geologisk lengdesnitt	64
9.11	Tverrslagstunnel Lilleaker - Stuff 21	65
9.12	Tverrslagstunnel Lilleaker - Stuff 82	66
9.13	Tverrslagstunnel Lilleaker - Stuff 113	66
9.14	Tverrslagstunnel Lilleaker - Stuff 141	67
9.15	Tverrslagstunnel Lilleaker - Injeksjonsmengder	68
9.16	Tverrslag Lilleaker - Oppnådd tetthet	69
9.17	Tverrslag Lilleaker - Fukt- og dryppregistrering	69
9.18	Tverrslag Lilleaker - Poretrykksdata	70
9.19	Tverrslag Lilleaker - Lokasjon poretrykksmåler	70
9.20	Hovedløp Lysaker vest - Geologisk oversikt	71
9.21	Hovedløp Lysaker vest - Lengdesnitt	72
9.22	Hovedløp Lysaker vest - Injeksjonsmengder	72
9.23	Hovedløp Lysaker vest - Fukt- og dryppregistrering	73
9.24	Hovedløp Lysaker vest - Poretrykksdata	74
9.25	Hovedløp Lysaker vest - Lokasjon poretrykksmåler	74
9.26	Dyprenne E18 - Geologisk oversikt	75
9.27	Dyprenne E18 - Lengdesnitt	76
9.28	Dyprenne E18 - Injeksjonsmengder	76
9.29	Dyprenne E18 - Fukt- og dryppregistrering	77
9.30	Dyprenne E18 - Poretrykksdata	78
9.31	Dyprenne E18 - Poretrykksplassering	78
9.32	Hovedløp Fornebuporten nord - Geologisk oversikt	79
9.33	Hovedløp Fornebuporten nord - Lengdesnitt	80
9.34	Hovedløp Fornebuporten nord - Geologi og injeksjon	81
9.35	Hovedløp Fornebuporten nord - Fukt- og dryppregistrering	82
9.36	Hovedløp Fornebuporten nord - Poretrykksdata	82
9.37	Hovedløp Fornebuporten nord - Poretrykksdata	83
9.38	Hovedløp Fornebuporten nord - Poretrykksplassering	83
9.39	Flytårnet - Geologisk oversikt	84
9.40	Flytårnet - Lengdesnitt	85
9.41	Flytårnet - Injeksjonsmengder	86
9.42	Flytårnet - Oppnådd tetthet	87
9.43	Flytårnet - Fukt- og dryppregistrering	87
9.44	Flytårnet - Poretrykksdata	88

9.45 Flytårnet - Poretryksplassering	88
--	----

Tabeller

1.1 Valgte delstrekninger av Fornebubanen	3
1.2 Entrepriiseoversikt	3
3.1 Detaljoppsprekking	11
3.2 Beregning av innlekkasje	17
5.1 Borparametre	25
5.2 Sementegenskaper	27
5.3 Tilsetningsstoffer	28
6.1 Vurderingsgrunnlag - Tetthetskrav	30
6.2 Kategoriserte tetthetskrav	31
7.1 Aktøroversikt - Fornebubanen	36
7.2 Tunnelgeometri - Fornebubanen	37
7.3 Bergarter - Fornebubanen	39
7.4 Oppsprekking - Fornebubanen	40
7.5 Spenningsmålinger - Fornebubanen	42
7.6 Gjennomsnittlig hydraulisk ledningsevne for prosjekter i Oslo-feltet	43
7.7 Prosjektert injeksjonsprosedyre	45
7.8 Tiltaksklasser ved Fornebubanen	46
7.9 Poretrykksmålere - Alarmnivå	47
8.1 Tverrslaget Lilleaker - Grunnlag for vanntetting	49
8.2 Hovedløp Lysaker vest - Veiledende grunnlag for vanntetting	49
8.3 Dyprenne E18 - Veiledende grunnlag for vanntetting	50
8.4 Hovedløp Fornebuporten nord - Veiledende grunnlag for vanntetting	50
8.5 Flytårnet - Veiledende grunnlag for vanntetting	51
9.1 Prosjekterte og kartlagte Q-parametere	52
9.2 Resultater fra lugeonmålinger	54
9.3 Injeksjonsmengder - Geologiavhengig	56
9.4 Vurderingskategorier for grad av geologisk betydning	60
9.5 Tolkede resultater av geologisk betydning	60
9.6 Eksempelprosedyre K2A	61
9.7 Mengdeforbruk - Materialavhengig	62
10.1 Hullfylling - eksempel	95

Forkortelser

d_{95}	Mål for partikkelstørrelse
BEFO	Stiftelsen Bergteknisk Forskning
BeverMapping	Digitalt kartleggingsverktøy utsedt av Bevercontrol AS
bm	Bormeter
c/c	Hullavstand [m] ved skjermboring
CSV	Comma-separated values: filformat i tabellformat
GIN	Grout Intensity Number
IP	Injeksjonsprosedyre
KS	Kolloidal silika
lidar	L ight D etection A nd R anging
LRIR	Limit Residual Inflow Rate [l/min/100 m tunnel]
MFC	Mikrofin sement
MWD	Measure While Drilling
NFF	Norsk forening for fjellsprengningsteknikk
PGF	Prosjekteringsgruppen Fornebubanen
PU	Polyuretan
SP	Superplastiserende tilsetningsstoff
SVV	Statens Vegvesen
UFC	Ultrafin sement
W/C	Vann-sement forhold

Symboler

μ	Dynamisk viskositet [$Pa \cdot s$]
ν	Kinematisk viskositet [m^2/s]
σ	Spenning [MPa]
e	Fysisk sprekkeåpning [m]
K	Permeabilitet [m^2]
k	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
L	Lugeonverdi
N	Antall

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I urbane tunnelprosjekter utarbeides det omfattende vurderinger tilknyttet vanninntrengning og potensielle negative følgekonsekvenser (SVV 2004). Tunneldriving er en forstyrrende faktor for vannets naturlige opptreden i løsmasser og bergmasser, ved at vannet settes i bevegelse og strømmer inn mot tunnelen (NFF 2002). Dette kan føre til endring av grunnvannsstand og poretrykk, som potensielt gir setninger. Drenering av brønner og tjern, påvirkning av lokal fauna, setnings-skader på infrastruktur, er eksempler på konsekvenser av innlekkasje i tunnel. Vanninntrengning har også en forringende effekt på arbeidsforholdene på stuff, inndrift og utførelse, bergsikring, tekniske installasjoner og operativ sikkerhet. Urbane tunnelprosjekter er underlagt en rekke begrensninger med hensyn til samspill mellom eksempelvis eksisterende infrastruktur, operativ anleggsdrift, grunnverv, reguleringsplaner, samt tilgjengelighet og funksjonskrav. Følgelig er ofte tunneltraseen bestemt i tidlig fase, der ingeniørgeologiske utfordringer kommer i andre rekke.

Den mest benyttede løsningen for å håndtere vanninntrengning og forhindre grunnvannssenkning, er i dag forinjeksjon (NFF 2011). Dette gjøres ved å injisere vannførende sprekker, med typisk sementbaserte injeksjonsmasser, som danner en tett sone utenfor tunnelperiferen. I prosjekter med strenge krav til tetthet, kan opp mot 30% av drivekostnader relateres til vanntetting og injeksjon (Grøv, Strømsvik og Haugsand 2020). Ved optimalisering av injeksjonsprosesser og vanntetting, kan utviklingen bidra til reduserte kostnader. Sement og sementproduksjon antas å utgjøre over 7% av verdens CO_2 -utslipp, og vil være en betydelig del av fremtidens tunnelprosjekt (Andrew 2019).

På begynnelsen av 2000-tallet gikk hele tunnelbransjen sammen om et forsknings- og utviklingsprosjekt; "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler", i regi av "Statens vegvesen". Hensikten var å heve kompetansen relatert til utilsiktet grunnvannssenkning tilknyttet tunneldriving. En sammensetning av rapporter og utredninger fra tidligere tunnelprosjekt, ga et større teoretisk grunnlag for arbeid med forundersøkelser, vanntetting og injeksjon (SVV 2004). Dette har i nordisk sammenheng blitt videreført gjennom en rekke fag- og forskningsartikler. I 2020 ble forskningsprosjektet "TIGHT" sluttført, der en rekke rapporter sammenfatter ny kunnskap vedrørende injeksjonsmaterialer, injeksjonsutførelse, numerisk modellering av injeksjon, trykk og strømning (Grøv, Strømsvik og Haugsand 2020).

1.2 Formål med studien

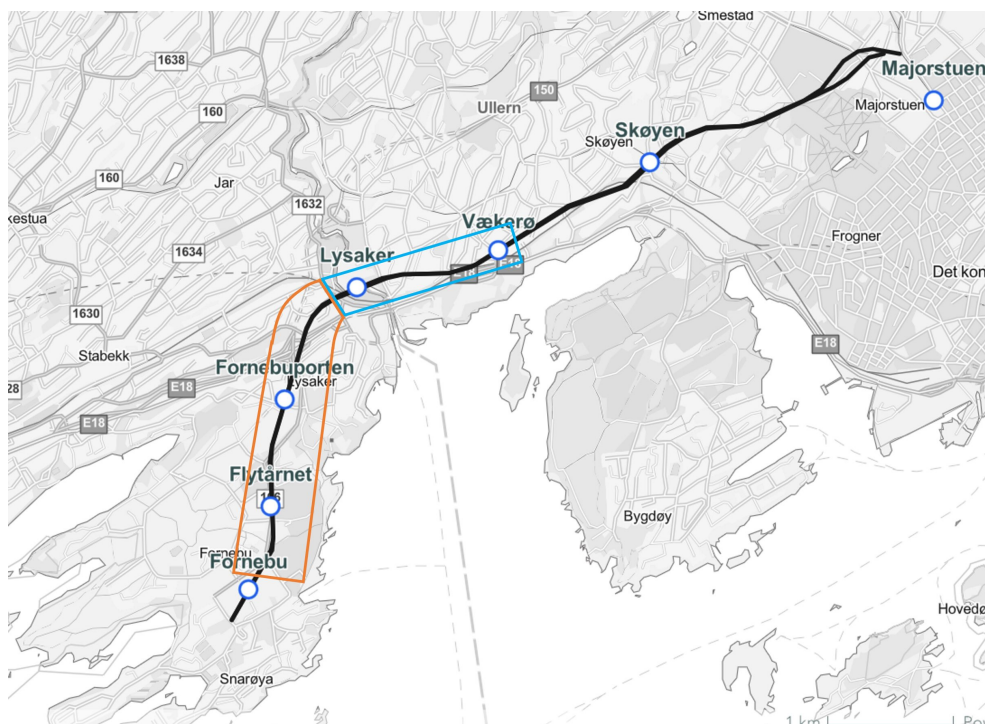
Når en betrakter vanntetting i tunnel, er det mange samtidige faktorer tilknyttet geologi og innlekkasje, som er styrende for inngående valg av utførelse av injeksjon frem til endelig oppnådd tetthet. Ulike bergartstyper innehar ulike egenskaper, som kan knyttes til bergmassekvalitet og sprekkekaraktistikk. Geologiske parametere som bergoverdekning, spenningsforhold, svakhetssoner, gangbergarter, løsmassemektighet, løsmassetyper og bergartstyper, kan videre relateres til innlekkasje i tunnel. Kombinasjonen av de geologiske parametrene og innlekkasje, vil nødvendigvis definere behovet for vanntetting langs tunneltraseen. Varierende utforming av tunnelgeometri og utstrekning, med skiftende geologiske forhold, vil kunne gi store lokale forskjeller i påtruffet innlekkasje og tettebehov. Veien fra beskrivelse av stedlige geologiske forhold, påtruffet innlekkasje, tilstrekkelig vanntetting og injeksjon, er følgelig relativt kompleks. Studien dekker en rekke tema tilknyttet geologiske parameteres betydning for utførelse og ufor-

ming av injeksjon. Formålet med studien har vært å redegjøre for valg og endringer ved utforming av vanntetting i krevende geologiske forhold ved Forneubanen. For å belyse problemstillingen er en rekke grunnlagsdata tilknyttet geologiske forhold, vanntetting og injeksjonsstrategi blitt bearbeidet. I denne studien er det sett på hvordan man tar hensyn til geologiske parametere ved prosjektering av tiltaksklasser og forslag til injeksjonsprosedyrer. Basert på de interessante temaene som dekkes i studien, er det utarbeidet to forsknings spørsmål:

Hvilke geologiske parametere har påvirket valg av injeksjonsprosedyre ved utfordrende bergforhold ved Forneubanen?

Kan studien si noe om hvilke geologiske parametere som er av størst betydning, med hensyn til å predikere behov for ekstra injeksjonsinnsats i fremtidige tunnelprosjekt?

Masteroppgaven er skrevet i samarbeid med Multiconsult, og omhandler T-baneprosjektet ved Forneubanen, vest for Oslo. Figur 1.1 gir en oversikt over prosjektets omfang, der studien omhandler to av entreprisene. Disse vil videre bli betegnet som K2A og K2B, og illustreres ved henholdsvis oransje og blå rektangel i figur 1.1. Kvalitative vurderinger er blitt gjort for fem utvalgte delstrekninger av K2A og K2B, der det er prosjektert utfordrende bergmasseforhold. Stedlig geologi, utførte forundersøkelser, injeksjonsbestemmelser, utført injeksjon og spesielle utfordringer beskrives for alle delstrekningene. Informasjon vedrørende geologi, forundersøkelser og injeksjon er blitt sammenstilt, systematisert ved hjelp av regneark og presenteres hovedsaklig som tabeller, figurer og grafer. Mengder injeksjonsmasser, bergmassekvalitet, overdekning, innlekkasje og lugeonmålinger er blitt vurdert spesielt. Delmålene for studien innebærer å beskrive injeksjonsprosedyrene i detalj, og utdype de erfaringer som er gjort vedrørende prosjektering og utførelse av injeksjon. Det er også foretatt egne registreringer av oppnådd tetthet i tunnel. Registreringene for alle delstrekningene, ble gjort ved drypp- og fuktkartlegging den 31.03.2023.



Figur 1.1: Oversikt over prosjektområdet for hele Forneubanen med entreprisinnstilling K2A (oransje) og K2B (blå) (Forneubanen 2023)

De ulike delstrekningene er valgt med bakgrunn i overdekning, grunnforhold og spesielle geologiske strukturer. Området "Hovedløp Lysaker Vest" er valgt som sammenligningsgrunnlag, med større overdekning og ingen kartlagte svakhetssoner eller intrusivganger. Samtlige områder oppsummeres i tabell 1.1 og figur 8.1, der det bemerkes at område "Dyprenne E18" og "Hovedløp Fornebuporten Nord" er overlappende. Dette er grunnet problematisk sone og omfattende injeksjonsarbeid, utført fra pelenummer 8006 - 8026.

Tabell 1.1: Valgte delstrekninger av Fornebubanen

Navn	Pelenummer	Lengde [m]	Entreprise
Tverrslag Lilleaker	0 - 190	190	K2B
Hovedløp Lysaker Vest	7600 - 7800	200	K2A
Dyprenne E18	7800 - 8000	200	K2A
Hovedløp Fornebuporten Nord	7985 - 8200	215	K2A
Flytårnet	9100 - 9200	100	K2A

1.3 Begrensninger av studien

Grunnet Fornebubanens omfang og størrelse, er studien begrenset til å omhandle geologi og vanntetting ved to utvalgte entrepriser. Ytterligere begrensning er gjort ved å velge ut fem delstrekninger av entreprisene, på bakgrunn av geologiske parametere. I tabell 1.2 er hovedandelen av hovedløpets utstrekning, av dagsoner og tunneler, listet opp kronologisk fra Majorstua til Fornebulandet. Studien tar utgangspunkt i eksisterende prosjektrapporter, prosjektdata og produksjonsdata fra tidligere anleggsarbeid ved Fornebubanen. Grunnlagsdataen som er benyttet fra de ulike entreprisene er nærmere beskrevet i metodekapittelet. På grunn av at bergrommet umiddelbart sikres med sprøytebetong etter rensk, har det ikke vært mulig å kontrollere stedlige bergmasseforhold ved egen ingeniørgeologisk kartlegging. En utfordring vedrørende databehandling og datasammenstilling, har vært å kategorisere de mange variablene ved injeksjonsarbeider. På grunn av kompleks tunnelgeometri, geologiske forhold og varierende skjermgeometri, er det ikke funnet tilfeller av eksakt like forutsetninger for sammenligning.

Tabell 1.2: Entrepriseoversikt for hovedløpets dagsoner og tunnelarbeider, listet geografisk fra Majorstua mot Fornebu. Aktuelle entrepriser er uthevet. Tabellen modifisert fra (PGF 2020a)

Entreprise	Beskrivelse [Lengde]	Planlagt oppstart	Område
K1A	Påhugg og dagsone [0.3 km]	10.2022	Majorstua
K1B	Tunnel [1.9 km]	10.2022	Majorstua til Skøyen
K1C	Løsmassetunnel [0.1 km]	11.2021	Madserud
K2D	Tunnel [1.5 km]	10.2022	Skøyen til Vækerø
K2C	Tunneltverrslag [0.8 km]	05.2021	Skøyen
K8	Stasjonshall [0.15 km]	10.2024	Skøyen
K7	Stasjonshall [0.55 km]	10.2024	Vækerø og Lysaker
K2F	Forberedende arbeid	09.2021	Lysaker
K2B	Tunnel [1.7 km]	03.2022	Vækerø til Lysaker
K2A	Tunnel [2.2 km]	04.2021	Lysaker til Fornebu base
K2E	Påhugg og forberedende arbeider	08.2020	Fornebuporten
K6	Stasjonshall [0.9 km]	08.2023	Fornebuporten og Flytårnet
K5	Fornebu stasjon og base	12.2021	Fornebulandet
K4	Grunnarbeid Fornebu stasjon og base	10.2022	Fornebulandet

2 Metodebeskrivelse

For å forstå geologiens betydning for prosjektering og utførelse av injeksjon og vanntetting, er en rekke grunnlagsdata, prosjektdata og rapporter blitt sammenstilt og analysert. Det er funnet få forskningsartikler og litteratur som beskriver føringer for detaljprosjektering av injeksjon i norsk praksis. Spesielt gjelder dette injeksjonsutforming i krevende geologiske forhold. Analyser og resultater er utført for å sammenligne geologiens innvirkning på prosjektering og utførelse av injeksjon. Det tas utgangspunkt i kvalitative vurderinger og erfaringer som er formidlet under prosjektering og drivefasen, samt egne vurderinger på bakgrunn av injeksjonsdata og eksisterende geologiske data. Data fra Tverrslag Lilleaker, tilhørende entreprise K2B, ble analysert innledningsvis. Videre ble analysen utvidet til utvalgte delstrekninger av K2A. Ettersom prosjektets utforming er fordelt mellom mange aktører og plattformer, er resultatene forsøkt sammenstilt og forklart ved bruk av regneark og figurer. Metoden innebærer å beskrive geologiske forhold, injeksjonsutforming og oppnådd tetthet, på bakgrunn av eksisterende data ved Fornebubanen. Eventuelle sammenhenger mellom geologiske parametere, utførelse av injeksjon og prosedyrer, vil bli presentert.

2.1 Forstudie

I forbindelse med emnet ”TGB4570 Ingeniørgeologi, fordypningsprosjekt”, er det utarbeidet en litteraturstudie innledende mot denne masteroppgaven. Overordnet er det meste av teorien hentet fra en rekke forskningsartikler og tidsskrifter, deriblant Statens Vegvesen sine håndbøker, BEFO og NFF sine publikasjoner. Teorien i studien omhandler utførelse av injeksjon, injeksjonsteknikk, forundersøkelser og geologiske parametere sin betydning for innlekkasje i tunnel. Prosjektoppgaven beskriver teorien bak prosedyrene i større detalj enn slik det fremkommer i teoridelen av denne masteroppgaven. I tillegg til ny litteratur, vil det i stor grad henvises til prosjektoppgaven, se Thollefsen (2022) for detaljerte beskrivelser.

2.2 Systematisering av eksisterende data

Sammenstilling og systematisering av data er blitt utført ved hjelp av *Microsoft PowerQuery*. Dette er et funksjonsverktøy innebygget i programvaren *Microsoft Excel for Microsoft 365 MSO*, som kan lese inn og sammenstille flere dokumenter til tabellformat. Dette foregår ved gjenkjenning av tabelloppsett fra eksempelvis injeksjonslogger, og videre sammenstille enkeltrapper til et samlet datasett. Eksempel på injeksjonslogg er vedlagt, se vedlegg I og G.2. Datasettet har blitt utvidet ved å tilknytte geologiske parametere og injeksjonsdata, til seksjoner av tunnelen. Datainnsamlingen var tidskrevende ettersom de ulike aktørene benytter ulike praksiser, fildatabaser og systemer.

Kommende delkapitler vil redegjøre for hvilke grunnlagsdata som er benyttet i studien og hvordan de er prosessert i studien. Flere av ressursene som har blitt gjort tilgjengelig, eksempelvis samordningsmodellen og BeverMapping, er sammensatt av en rekke

2.2.1 Forundersøkelser og geologiske data innhentet under driving

Geofysiske målinger, kartlegging i dagen, kjernelogger og lugeonmålinger, tolkede bergartslag, svakhetssoner, intrusivganger og bergoverdekning fra prosjekteringsfasen, er sammensatt i prosjektets 3D samordningsmodell eller BIM-modell. Ingeniørgeologiske rapporter og tilhørende fagspesifikke detaljrapporter, samt BIM-modellen, utgjør

grunnlaget for de prosjekterte geologiske beskrivelsene som presenteres. Geologiske oversiktsfigurer, som videre blir presentert i oppgaven, er sammensatt fra BIM-modell, data fra BeverMapping og kartlegging utført av Weren-skiold (1911).

For K2A er geologisk stuffkartlegging og MWD-data hentet fra BeverMapping gjennom Bever Team Online. Her registreres sprekkeorientering, bergartstyper, bergmassekvalitet, boredata, sikring og spesielle observasjoner, av ingeniørgeologer på anlegget. BeverMapping tillater også nedlasting av kartlagt bergmassekvalitet med tilhørende pelenummer, i ”CSV”-filformat.

Ved entreprise K2B er geologisk stuffkartlegging utført av ingeniørgeologer utsted av byggherre. Dette utgjør eksterne regneark, samt lidarscanning ved fotogrammetri av enkelte tunnelstuffer. Ingeniørgeolog Martin H. Haugsand, ved ”Fornebubanen”, har regelmessig foretatt 3D scanning av tunneloverflate og stuff. Scanning utføres med mobiltelefon, appen PolyCam, som videre har blitt korrigert til rett orientering og himmelretning. Ved å benytte ”open source”-programvaren CloudCompare er illustrasjonene digitalisert, visualisert og omgjort til punktskyer (*Cloud-Compare V2.12.4* 2023). Tilleggsfunksjoner i CloudCompare, ”Compass”, gjør det mulig å registrere strøk og fall for flater av tunnelen (Thiele mfl. 2017). Ved å registrere flere synlige sprekkeflater og lineasjoner, produseres ”CSV” filer med tabellistet data. DIPS, fra Rocscience, ble benyttet for å plote sprekkeroser og polplott fra nevnte data. Formålet har vært å tilegne ny kunnskap og utprøve funksjoner ved digital kartlegging, samt visualisere lokale variasjoner. Utnyttelse av programvare og 3D-verktøy, som en ressurs til prosjektering og tilpasning av injeksjon, ble ikke omfattende testet. Utover visuell beskrivelse av geologi, ble dette i mindre grad implementert i denne studien.

2.2.2 Injeksjonsdata

Fra entreprisene K2A og K2B er injeksjonsrapporter og injeksjonslogger fra rigg sammenstilt for å beskrive mengde forbruk ved valgte strekninger. Rapportene er lastet ned og samlet i egne filmapper, der injiserte mengder er sammenstilt til tabellformat ved bruk av *Microsoft PowerQuery*. Tabellene har så blitt gjennomgått for eventuelle feil ved innlasting, samt at flere av injeksjonsloggene ikke var digitalisert. Dette ble korrigert ved manuell inntasting av verdier for enkeltskjermer, som ikke ble riktig sammenstilt i tabellen. For K2A er PDF gjeldene filformat, slik som vist i vedlegg I. For K2B logges flere injeksjonsparametere, eksempelvis trykkforløp ved hvert borhull, i filformatet excel-regneark.

2.2.3 Boredata

I dagens anleggspraksis stilles det krav til logging og bokføring av drive-parametere. Injeksjonsboring er blitt prosessert for forenevnte injeksjonsskjermer. Data vedrørende hullengde, hullantall, bormeter, påtruffet lekkasje, MWD-data er også benyttet for å beskrive stedlige geologiske og hydrogeologiske forhold. Beskrivelser av skyllevannsfarger, borestans og andre komplikasjoner, er blitt sporadisk kontrollert for enkelte injeksjonsskjermer. Boredata er integrert med hensyn til pelenummer, på lik linje som.

2.2.4 Prosedyredata

Utførte og planlagte injeksjonsprosedyrer er beskrevet ved parametrene; Skjerm lengde, c/c, stikning, overlapp, maksvolum, stopptrykk, metode, injeksjonsmaterialer og resepter. Prosedyrebeskrivelser ved K2B er gitt ved egne dokument i prosjekt databasen. Disse er detaljprosjektet for ulike faser og soner av tunnelen, på bakgrunn av tiltaks-klasser. For K2A er prosedyrene innhentet fra prosjektets saksregister. Her beskrives skjermgeometri og utførelse ved gitte pelenummer, og eventuelle endringer. Alle prosedyrene er sammenstilt i egne regneark.

2.3 Analysering av geologi og injeksjon

Injeksjonsmengder blir presentert ved mengde per bormeter og mengde per meter tunnel, for hver injeksjonsskjerm. Førstnevnte hensyntar faktorer tilknyttet skjermgeometri og sprengningsprofil, som vist i likning 2.1 og 2.2. Totale mengder sement og kolloidal silika per skjerm, utgjør injeksjonsmengdene som fordeles over antall tunnelmeter fram til neste injeksjonsskjerm. Der det er utført flere injeksjonsskjermer ved samme pelenummer, er hver injeksjonsmengdene fordelt som vist ved formel 2.3. Eksempelvis vil to omganger tilsvare en halvering av avstanden til neste skjerm. Injeksjonsmengder per m per skjerm vil bli presentert i punktdiagram. Sammenstillingen er gjort for å ta hensyn til avstanden mellom injeksjonsskjermer og fordelingen av massene i tunnelen.

$$\text{Bormeter } [bm] = \text{Hullantall} \cdot \text{hullengde } [m] \quad (2.1)$$

$$\text{Mengde } [kg/bm] = \text{Total mengde per skjerm } [kg] / \text{Bormeter } [bm] \quad (2.2)$$

$$\text{Mengde } [kg/m \text{ tunnel}] = \frac{\text{Total mengde per skjerm } [kg]}{\left[\frac{\text{Skjermavstand } [m]}{N} \right]} \quad (2.3)$$

Gjennomsnittlig injiserte mengder MFC og KS over totale delstrekninger er blitt vurdert spesielt. For delstrekninger er eksempelvis mengdene presentert for 20 m intervall, i relasjon til Q-parametere. Mengdene summeres, med hensyn til pelenummer, og utgjør bestemte lengder av tunnelen. På denne måten er injeksjonsmengdene relatert til seksjonsvis endring av overdekning, tunnelorientering og bergmassekvalitet, samt inndelinger avhengig av prosedyrebestemmelser.

2.4 Intervju og erfaringsutveksling

For å beskrive grunnlaget for valg av injeksjonsparametere i prosjekterings- og anleggsfasen, har det blitt foretatt intervjuer. Formålet var å redegjøre informasjon vedrørende prosjektering av injeksjon og vannetting ved Fornebu-banen, utover det som er beskrevet i litteratur og tilgjengelig data. Erfaringsutveksling vil kunne forklare lokale variasjoner, grunnlag for injeksjonsutforming og metode, samt prosedyreendringer. Det ble utført ett fysisk møte, ved Prosjekteringsgruppen Fornebu sine lokaler, samt ett digitalt intervju ved bruk av Teams. Alle intervjuobjektene fikk oversendt spørsmålene i forkant av intervjuet, og hvert intervju varte i overkant av to timer. Referatet fra intervjuet gjennomgått og korrigerert i felleskap. Befaringer og personlig kommunikasjon har også gitt et utvidet grunnlag for å forstå bestemmelser og inngående valg.

2.5 Feltstudie

I forbindelse med studien er det foretatt befaringer i tunnel for å bedre forstå de anleggstekniske delene av tunneldriving og vanntetting. Befaringene har blitt utført sporadisk i perioden 15. - 26. januar 2023 og 21. - 31. mars 2023. Det har blitt gjort observasjoner av utførelse av injeksjon i tunnel ved flere anledninger, samt delt erfaringer vedrørende injeksjon og geologi ved Fornebubanen. Fuktkartlegging og dryppregistrering for alle delstrekningene, ble utført 31. mars 2023. Kartlegging foregikk ved registrering av pelenummer, antall drypp over 10 s, beskrivelse og bilder av fukt og drypp, for 10 - 20 m seksjoner. Verktøyene ArcGIS Field Maps og ArcGIS Pro ble benyttet til feltarbeidet.

3 Hydrogeologi og vann i grunnen

Vannets kretsløp og bevegelse i grunnen, utgjør de største usikkerheten knyttet til prosjektering av injeksjon. Kompende delkapitler sammenfatter geologiske beskrivelser som kan relateres til vannføring i grunnen. Teorien er i stor grad hentet fra forskningsrapporter og sammenfatter mye av det teoretiske grunnlaget i ”TGB4570 Ingeniørgeologi, prosjektoppgave” (Thollefsen 2022).

Kompleksiteten ved beskrivelse av vann i grunnen, har bakgrunn i prosessene som foregår kontinuerlig og simultant, der vann infiltreres, fordampes og magasineres. Til enhver tid vil vannbalansen variere med hensyn på forhold som nedbør, avrenning, magasinering og evapotranspirasjon. Hovedprinsippet besitter at vannet ikke forsvinner, men er i bevegelse (Karlsruud, Erikstad og Snilsberg 2003). Grunnvann utgjør så lite som 8 % av alt tilgjengelig vann i det hydrologiske kretsløpet, der mesteparten befinner seg i dypereliggende akviferer i berg og løsmasser (Karlsruud, Erikstad og Snilsberg 2003). I tillegg vil menneskelige inngrep i naturen påvirke balansen i systemet, som vil være styrende for oppholdstiden til grunnvannet og hvilke strømningsveier som benyttes (Karlsruud, Erikstad og Snilsberg 2003).

Strømning og strømningsmediets egenskaper er i geologisk sammenheng definert av blant annet porøsitet, hydraulisk konduktivitet og spesifikk permeabilitet. Alle disse parametrene beskriver avhengighetsfaktorene innen hydrogeologi og vannstømning i berg, og er gitt av formlene 3.1, 3.2 og 3.3 (Holmøy 2008; NBG 1999).

$$n = \frac{V_p}{V_{tot}} \implies n'_b = \frac{V_{met}}{V_{tot}} \quad (3.1)$$

n = Porøsitet

V_p = Volum av porer

V_{total} = Totalvolum

n'_b = Effektiv porøsitet til bergmasse

V_{met} = Volum av vannmettede porer

V_{tot} = Totalvolum bergmasse

$$Q = -\frac{dH}{dL} \cdot A \cdot k \longleftrightarrow v = \frac{Q}{A} = k \cdot \frac{dH}{dL} \quad (3.2)$$

Q = Strømningsrate [m^3/s]

k = Hydraulisk konduktivitet [m/s]

v = Strømningshastighet [m/s]

A = Strømningsarealet [m^2]

$\frac{dH}{dL}$ = Hydraulisk gradient

$$K = k \cdot \frac{\nu}{g} = k \cdot \frac{\mu}{\rho \cdot g} \quad [m^2] \quad (3.3)$$

k = hydraulisk konduktivitet [m/s]

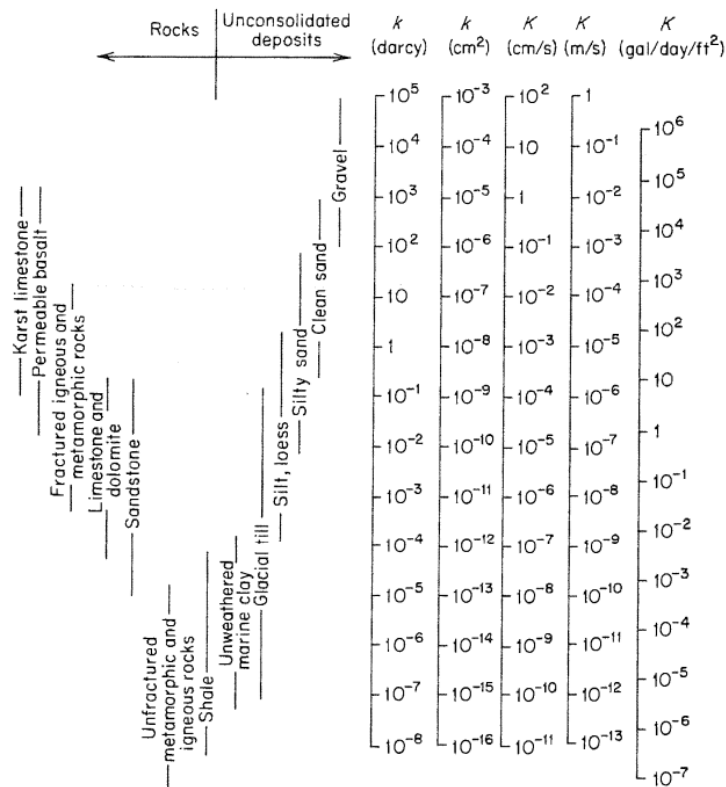
$\nu = 1.3 \cdot 10^{-6}$ = vannets kinematiske viskositet ved 10°C [m^2/s]

$g = 9.81$ = Tyngdeakselerasjonen [m/s^2]

ρ = Væskens tetthet [kg/m^3]

$\mu = 1.3 \cdot 10^{-3}$ = Væskens dynamiske viskositet $Pa \cdot s$

Typiske verdier for hydrauliske ledningsevne i løsmasser og bergmasser, ligger mellom 10^{-4} 10^{-9} . Eksempler presenteres er vist i figur 3.1 (Freeze og Cherry 1979).



Figur 3.1: Sammenhenger med hydraulisk konduktivitet for ulike løsmasser og bergmasser. Hentet fra (Freeze og Cherry 1979)

3.1 Hydrogeologi og løsmasser

Vannbalansen beskriver vannets opptreden på jorda, i en syklus av ulike fysiske tilstander. Parametrene som er styrende for vannbalansen er nedbør og avrenning, som også er med på å definere infiltrasjon i grunnen. Dette er blant annet vegetasjons-, klima- og topografisk bestemt, og avhenger av infiltrasjonskapasiteten, løsmassemengde, nedslagsfeltet, nedbørsintensitet og årstidsvariasjoner (SVV 2004). Løsmassenes permeabilitet, magasinering og eventuelle åpne grunnvannsmagasiner i interesseområdet, er avgjørende for vannbevegelsen og opptreden i grunnen (Karlsrud, Erikstad og Snilsberg 2003; NFF 2010). Grunnvannsstanden vil avgrense området der bergmassen eller løsmassen er umettet og fullstendig mettet. I den umettede sonen foregår infiltrasjon, der vannbevegelsen er gravitativt styrt og retningen er som oftest vertikal. Fritt bevegelig vann opptre i sonen ved fullstendig metning finner, og vil bevege seg mot lavere trykspotensial (Nilsen 2016). Ved grunnvannspeilet vil vanntrykket tilsvare det

atmosfæriske trykket. Dette benyttes til å definere poretrykket [kN/m^2] i et vilkårlig punkt under grunnvannsspeilet (SVV 2004). Det totale trykkpotensialet h_t i et gitt punkt i bakken, uttrykkes normalt med meter stighøyde, og er avhengig av vannets densitet ρ_w , poretrykket u og kotenivået ved punktet h (Karlsrud, Erikstad og Snilsberg 2003).

$$h_t = h + \frac{u}{\rho_w} \quad (3.4)$$

Det er nær sammenheng mellom stabilitet i løsmasser og poretrykksvariasjoner. For løsmasser er det sammenheng mellom jordarters skjærstyrke, effektivspenninger i grunnen og poretrykket (Osipov 2015). Et vannmettet porøst medie vil ha en opplevd effektivspenning slik Terzaghi beskriver ved formel 3.5.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3.5)$$

3.2 Hydrogeologi og bergmasse

Vannstrømning i bergmasse beskrives ved porøsitet og permeabilitet (NBG 1999). For de fleste bergarter i Norge, er forbindelsen mellom porene neglisjerbar, og følgelig er en vanlig tilnærming at bergmassen er impermeabel. Bergmassens hydrauliske egenskaper er derfor definert av oppsprekking og sprekkekarakter, og beskrives i teorien ved at vann i berg beveger seg parallelt med sprekker (Goel og Singh 2011). Sprekkene i bergmassen er som regel induert som følge av kjemiske, mekaniske og termiske prosesser over lang tid (Goel og Singh 2011). Bergmassens oppsprekingsgrad, sprekkeåpning og type sprekker er i stor grad definert av den stedlige spenningssituasjonen og de bergmekaniske egenskapene. Duktile bergmasser vil normalt tilsi mindre sprekkeåpning, grunnet deformasjon fra ytre laster og eventuell forvitring (Barton 1978). Til sammenligning er ofte sprø bergarter bestående av utholdende, mer åpne og sammenhengende sprekkesett. Oversikt over detaljoppsprekking er gjengitt i tabell 3.1, som er modifisert fra NBG (1999). Sprekkenes orientering, utholdenhet, frekvens og komplementerende egenskaper, er avgjørende for i hvilken grad vann og injeksjonsmasser, vil ledes i kanaldannelser og i bergmassen (Barton og Quadros 2019; Holmøy 2008; R. Olsson og Barton 2001). I tillegg vil regionale og lokale spenningsforhold, i kombinasjon med bergmekaniske egenskaper, være essensielle faktorer ved sprekkenes opptreden og karakterisering.

3.2.1 Spenningstilstand

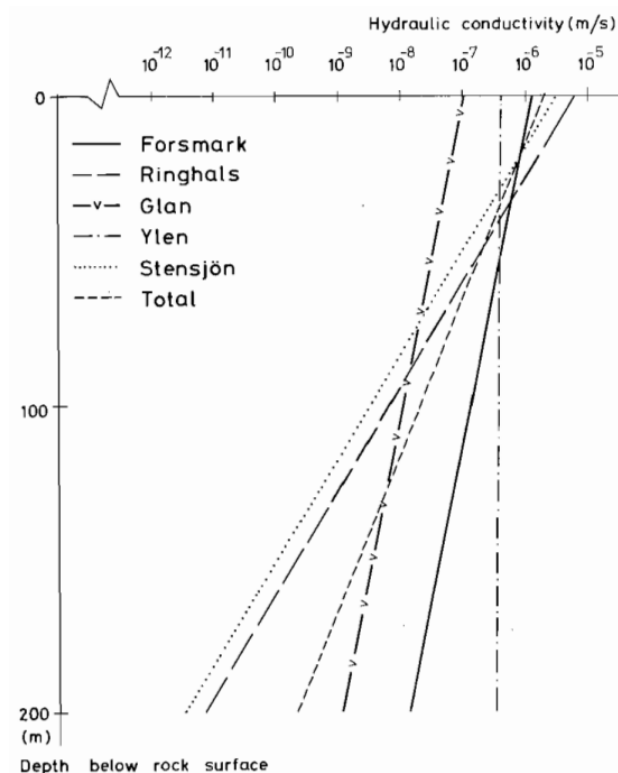
Sprekkenes opptreden er nært tilknyttet lokale og globale spenningsforhold. Spenningstilstanden i Norge er hovedsakelig styrt av residualspenninger etter isavsmeltingen og av tektonisk bevegelse (Holmøy 2008; B. Klüver og Kveen 2004; NFF 2010. Barton, Bandis og Bakhtar (1985) finner i sin studie en tett sammenheng mellom skjærbrudd i sprekker, sprekkeåpning og bergmassens evne til å lede vann. Åpne sprekker tenderer til å lukkes ved økte spenninger, samt for sprekkeorienteringen normalt til største hovedspenning (Zoback, Barten og Moos 1995). Omvendt gjelder for sprekker som er parallellorientert til største hovedspenning. I nyere studier er det også funnet en sammenheng mellom vannføringen i sprekker som går subparallelt med største horisontale hovedspenning $\sigma_H \pm 30^\circ$ (Holmøy 2008). For denne orienteringen vil det være størst sannsynlighet for skjærbrudd avhengig av sprekkefastheten, størrelsen på hovedspenningen, vanntrykket, vannstrømmen, sprekkekontaktflater og sprekkeruhet.

Tabell 3.1: Detaljoppsprekking modifisert fra (Nilsen 2016; Thollefsen 2022)

Betegnelsen	Dannelse	Beskrivelse
Stikk	Primær	Små, ru bruddflate, i massivt berg
Riss	Sekundær	Små, ru, eks: bergtrykks- eller sprengningsriss, preger ofte bergromskontur
Sprekker	Primær og sekundær	Gjennomsettende, uten mineralfylling. Eksempelvis foliasjons-, bergtrykks-, eksfoliasjons-, lagdelingssprekker
Slepper	Primær og sekundær	Gjennomsettende med mineralfylling. Eksempelvis kloritt, kalkspat, leirsleppe. Kan inneholde svellende materialer
Søyleoppsprekking	Primær	Ikkemetamorf basalt som følge av avkjøling
Romboedrisk	Primær	Metamorfe bergarter utsatt for strekk- og skjærspenning i kombinasjon, ved eksempelvis fjellkjedefolding
Rettvinklet og kubisk	Primær og sekundær	Tilfeller for noen magmatiske bergarter uten bestemt mineralorientering. Sedimentære og folierte metamorfe bergarter, parallelt og vinkelrett til lagdeling eller foliasjon
Sporadiske sprekker	Sekundær eller videre	Indusert av temperatur- og spenningsvariasjoner. Inngår ikke i systematiske sprekkesett

Spenningen som tilføres av overliggende masser, vil ofte definere vertikalspenningene. En tilnærming kan forenkles og beskrives ved formel 3.6, der σ_v , ρ , g og d er henholdsvis; vertikalspenning, massetetthet, gravitasjonsakselerasjonen og overdekning. Carlsson og T. Olsson (1978)

$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot d \quad (3.6)$$



Figur 3.2: Beregnet hydraulisk konduktivitet, fra lugeonmålinger, mot overdekning i prekambrisk grunnfjell (Carlsson og T. Olsson 1978)

Spenningsstilstanden vil normalt påvirke vanntrykket i bergmassen, og vil være styrende for valget av injeksjons-

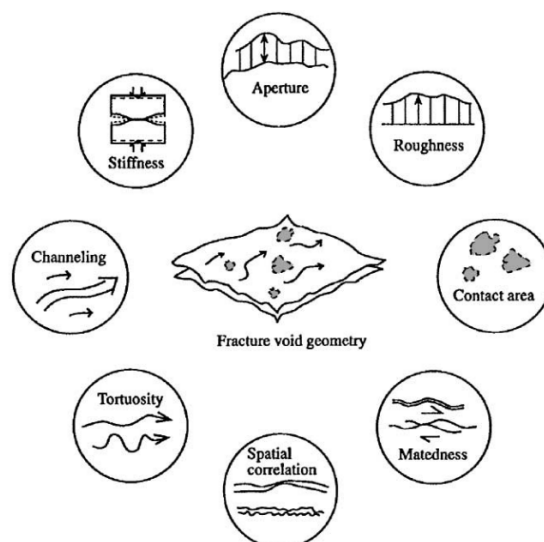
metode, valg av injeksjonstrykk og injeksjonsmaterialer NFF 2011; Rafi, Stille og Johansson 2017; Strømsvik og Gammelsæter 2020. Topografien vil også påvirke spenningene, og det er viktig å ta hensyn til den relative spenningsorienteringen mot tunnelens lengderetning (B. Klüver og Kveen 2004).

3.2.2 Sprekkeorientering, sprekkeutholdenhet og sprekkefrekvens

Som nevnt over vil sprekkenes orientering relateres til spenninger i bergmassen, bergmassens oppbygning og mekaniske egenskaper. Bergartstrukturer som foliasjon, lineamenter og lagdeling vil også kunne indusere sprekke-dannelse, som følge av forvitring. Orientering av sprekker og lagdeling, benevnes som oftest i fall og fallretning eller ved strøk og fall (Barton 1978). Kartlegging av sprekker gjøres normalt under planfasen og prosjekteringsfasen, hvor dataen som oftest sammenstilles grafisk. Dette kan eksempelvis være ved sprekkeroser eller polplott, der sprekkenes orientering og sprekkeantallet presenteres. Varierende sprekkeorientering øker sannsynligheten for grunnvannstrømning, ettersom konnektiviteten mellom sprekkene vil lede vann langs flere flater (SVV 2004). Studier har også vist at steilstående sprekker ofte er mer vannførende enn langsgående sprekker (Selmer-Olsen 1981; NBG 1999). Sprekkenes utholdenhet kan variere fra noen få *mm* til flere hundre *m* (Bienaiwski 1984; NBG 1999). Sprekkenes orientering og utholdenhet er egenskaper som i hovedsak definerer enkeltsprekker eller enkelte sprekkesett. Sprekkesett vil være parallellorienterte sprekker som antas å ha samme opphav, og antas å være gjennomgående i interesseområdet som studeres (Hobbs 1993; Nilsen 2016). Sprekkefrekvensen beskrives av avstanden mellom sprekker med lik orientering (Hobbs 1993). Sprekkesettene skiller og isolerer som oftest intakte blokker av berg. I sprø bergarter kan sprekkesettene forme rektangulære blokker av intakt berg, med tilnærmet lik sprekkefrekvens i alle retninger (NBG 1999). For duktile og skifrige bergarter, kan sprekkeavstanden og sprekkefrekvensen variere i ulike retninger (Barton 1978; Singh og Goel 2011).

3.2.3 Sprekkeåpning, sprekkeruhet og sprekkefylling

Sprekkenes geometriske form og egenskaper, avhenger av en rekke parametere. Disse oppsummeres i figur 3.3.



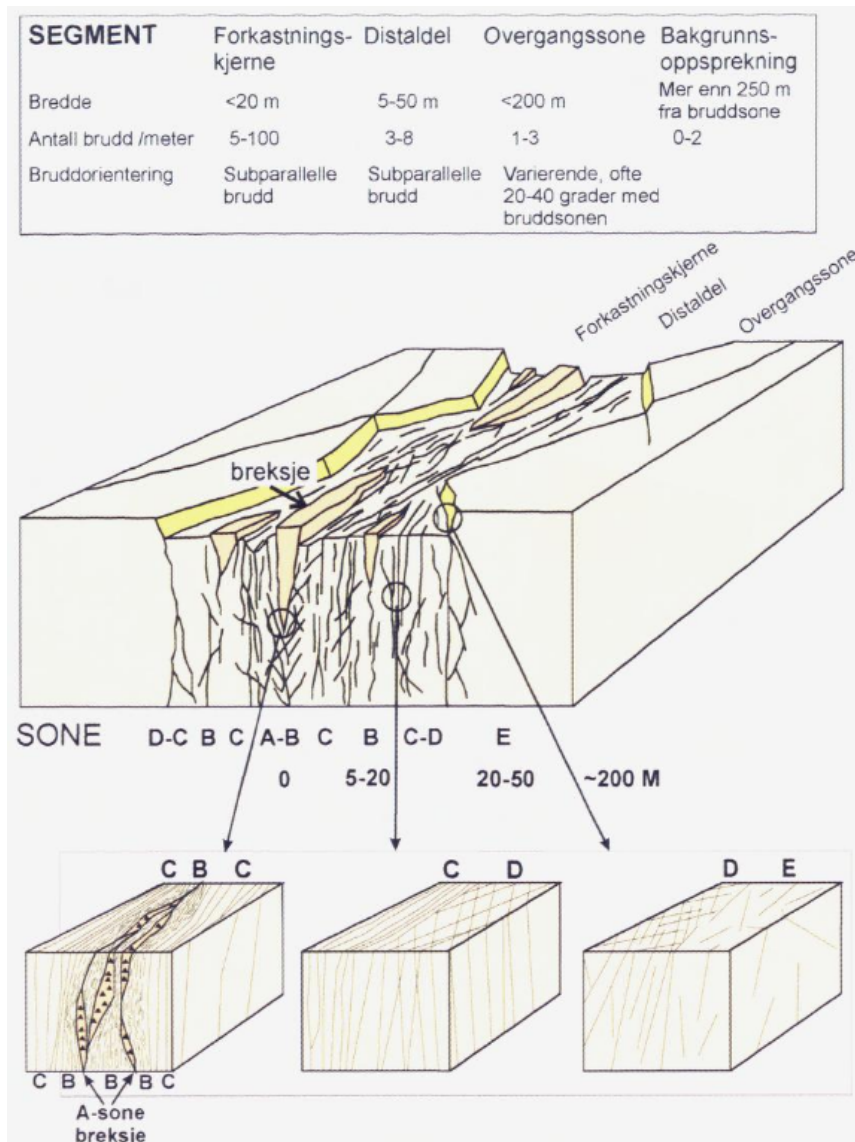
Figur 3.3: Sprekkegeometriske avhengigheter (R. Olsson og Barton 2001)

Sprekkeruhet og sprekketryll er blant annet beskrivelser som kartlegges innledende og under utførelse av prosjekter gjennom eksempelvis Q-systemet. Førstnevnte beskrives hvorvidt sprekketryllens overflate bølger eller er glatt, og er gitt av forholdet mellom sprekkens amplitude og målt lengde (NBG 1999). Sprekketryllfylling skjer ved mekaniske og hydrotermale prosesser, som mineralutfelling eller ved transport av overliggende løsmasser (NFF 2002; R. Olsson og Barton 2001). Likevel vil kompliserte sammensetninger knyttet til sprekketryllgeometri, kanaldannelse og type mineralinnfylling kunne åpne for vanngjennomstrømning (Holmøy 2008).

3.2.4 Forkastningssoner og gangbergarter

Noen geologiske fenomener har stor innvirkning på vannføringen i grunnen. Eksempelvis kan forkastnings- og knusningssoner, avhengig av oppsprekking og forvitningsgrad, gi kanaldannelse. Grunnet forskyvning dannes soner av mer og mindre oppknust materiale, avhengig av nærhet til forkastningskjernen. Braathen og Gabrielsen (2000) beskriver hvordan sprekketryllens opptreden og utstrekning fordeles med hensyn til bruddsett, i figur 3.4, hvordan sprekketryllens opptreden og utstrekning fordeles med hensyn på bruddsett, bruddkomplekser eller forkastningsbergarter. I selve forkastningskjernen, sone A og B, er bergmassen svært oppsrukket og har normalt utstrekning fra noen få *cm*, opp til 20 *m*. I figur 3.4 består Sone A som oftest av breksje eller sekundærminerale, med lav permeabilitet, som kan opptre som hydraulisk barriere. Sone B innehar tett oppsprekking, høy porøsitet, men lav permeabilitet. Vann kan dermed magasineres, og kan gi større innlekkasje ved punktering. Sone C beskrives ved parallell oppsprekking med større utholdenhet, kombinert med sone D med to bruddsett, utgjør dette distaldelen. I henhold til funnene, vil Sone C være området der permeabiliteten er størst, og der det potensielt kan være komplisert med trykkoppbygging ved injeksjon. Den ytre delen av en forkastning, benevnes av Braathen og Gabrielsen (2000) som overgangssonen, og kan være opp mot 200 *m* i utstrekning. Der varierer bruddintensiteten med en til tre brudd per snittmeter.

Tilsvarende er grunnvannstrømmen i tilknytning til gangbergarter stor, spesielt i overgangssoner mellom gangbergarter og sedimentære bergarter (Holmøy 2008). Dette er relatert til de bergmekaniske egenskapene, herunder bergmassens elastisitet og bruddstyrke (NBG 1999). Studier har vist nær sammenheng mellom opptreden av magmatiske bergarter og innlekkasje, spesielt i syenitt og syenittporfyr (Holmøy 2008; B. H. Klüver 2000).



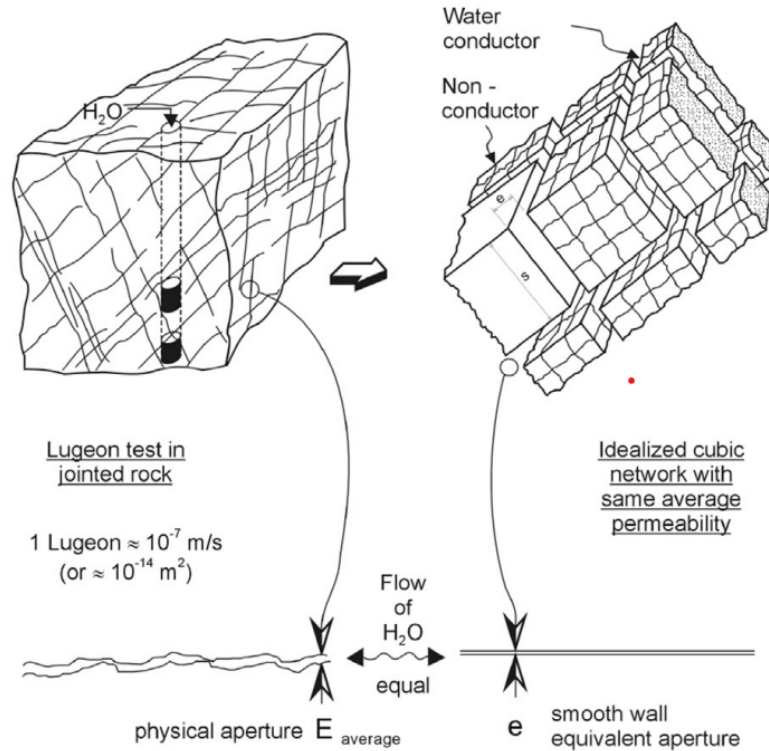
Figur 3.4: Soneinndeling av forkastningssoner, hentet fra (Braathen og Gabrielsen 2000)

3.2.5 Teoretisk tilnærming

En teoretisk beskrivelse av sprekkeplanets konduktivitet, kan forenkles til strømming mellom to parallelle plater. Med utgangspunkt i Darcys beskrivelse for strømming, defineres sprekkekonduktiviteten fra strømmingen per tid, ved tverrsnittsarealet A og den hydrauliske gradienten dh/dl . Dette kan videre relateres ved tilnærming av laminær strømming mellom to friksjonsløse plater, også kjent som den kubiske lov, se formel 3.7 og figur 3.5 (Snow 1969, Barton 2011; Holmøy 2008; Vaskou mfl. 2019).

$$k = \frac{g \cdot e^3}{12 \cdot \nu_w \cdot S} \quad (3.7)$$

Denne tilnærmingen er mye brukt for å forenkle strømmingssituasjonen i bergmassen, som kan benyttes til å beregne eksempelvis sprekkeåpning. Barton og Quadros (2019) trekker også frem sammenheng mellom estimert fysisk



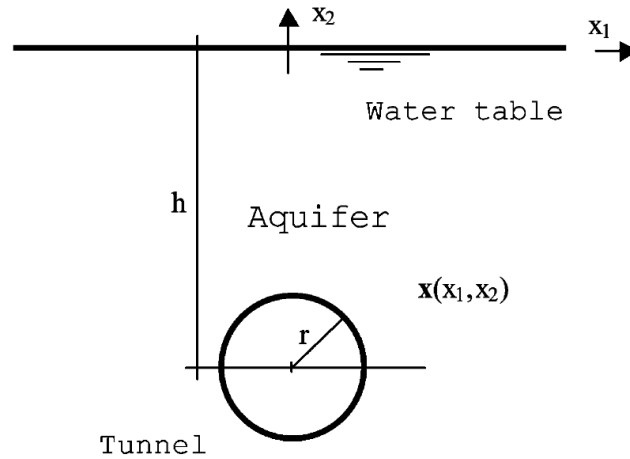
Figur 3.5: Illustrasjon av kubiske lov, ved teoretisk og fysiske sprekkeåpninger, hentet fra (Barton og Quadros 2019)

sprekkeåpning e og målt lugeonverdi i formel 3.8

$$k \simeq \frac{2e^3}{12S} \Rightarrow e \approx \sqrt[3]{L \cdot S \cdot 6 \cdot 10^{-8}} \quad (3.8)$$

3.3 Innlekkasje i tunnel

Det eksisterer metoder for å beregne innlekkasje i tunnel basert på geometriske, hydrologiske og geologiske parametere. I hovedsak deles det inn metodene i numerisk modellering, empiriske og semi-empiriske, samt teoretisk-analytiske metoder (Barton 2011; Karlsrud, Erikstad og Snilsberg 2003). Mange av tilnærmingene som brukes i norsk praksis i dag er erfaringsbaserte og empiriske. Hovedårsaken er de mange usikkerhetene tilknyttet inngangsparametrene som beskrives i modeller, og den kompliserte sammensetningen av å beskrive strømningsmediet og strømmeretning. Ved åpning av bergrom, vil grunnvannstrømningen og grunnvannsstanden forstyrres, og vannet søker til likevekt. Vannet settes da i bevegelse inn mot det åpne bergrommet, og det etableres en senkningstrakt inn mot tunnelen. El Tani (2003) beskriver en eksakt løsning for tilnærmingen av en sirkulær tunnel. Løsningen forutsetter homogen, isotropisk akvifer, som vist i formel 3.9 og figur 3.6.

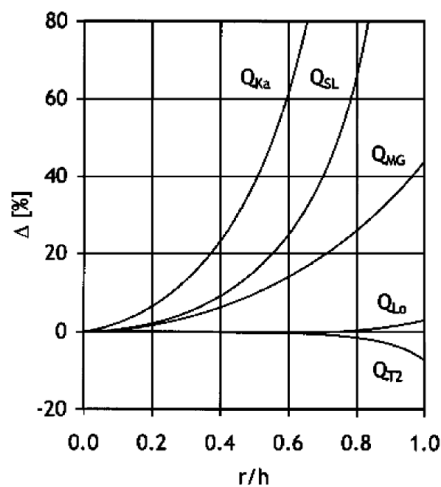


Figur 3.6: Illustrasjon av gravitasjonell innstrømning til en idealisert, sirkulær tunnelåpning. Figuren relateres til likning 3.9. Figur hentet fra (El Tani 2003)

$$Q = 2\pi k \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2 + 1} \frac{h}{\ln \gamma} [m^2/s] \quad (3.9)$$

$$\gamma = \frac{h}{r} - \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1} \quad (3.10)$$

Denne tilnærmingen er videre gitt av avstanden fra tunnelsenter til grunnvannsspeilet h , tunnelradius eller ekvivalentradius r og akviferens hydrauliske konduktivitet k . Parameteren γ er gitt av sammenhengen i formel 3.10. El Tani trekker også frem sammenhengen ved vannmagasinerings ved infiltrasjon, forutsatt at den hydrauliske ledningsevnen i mediet er tilstrekkelig lav. Flere empiriske metoder er gjengitt i samme rapport, og sammenfalt med den eksakte løsningen. Formlene er beskrevet i tabell 3.2, der den relative forskjellen til den eksakte løsningen er presentert i figur 3.7. En bemerkning som trekkes frem er forholdet $\frac{r}{h}$, som tilsier økende avvik ved redusert overdekning. Sammenligningen i 3.7 er med utgangspunkt i formel 3.11.



Figur 3.7: Relativ forskjell til eksakt løsning for formlene i tabell 3.2 (El Tani 2003)

$$\Delta = \frac{Q_{beregnet} - Q}{Q} \quad (3.11)$$

Tabell 3.2: Ulike estimeringer av gravitasjonell vannstrømning, modifisert fra El Tani 2003

Muskat (1937), Goodman et al. (1965)	$Q_{MG} = 2\pi k \frac{h}{\ln \frac{2h}{r}}$
Karlsrud, Erikstad og Snilsberg (2003)	$Q_{Ka} = 2\pi k \frac{h}{\ln \frac{2h}{r} - 1}$
Schleiss (1988), Lei (1999)	$Q_{SL} = 2\pi k \frac{h}{\ln \frac{h}{r} + \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1}}$
Lombardi (2002)	$Q_{Lo} = 2\pi k \frac{h}{\ln 1 + 0.4 \frac{r^2}{h} \ln \frac{2h}{r}}$
El tani (1999)	$Q_{T2} = 2\pi k h \frac{1 - 3 \frac{r^2}{2h}}{[1 - \frac{r^2}{2h}] \ln \frac{2h}{r} - \frac{r^2}{2h}}$
Brantberger, Stille og Eriksson (2000)	$Q = \pi k h \cdot \frac{2}{\ln \frac{r+t}{r} + \frac{k_i}{k} \cdot \ln \frac{2h}{r+t} + \xi}$

I forbindelse med forskningsprosjektet ”Miljø- og samfunnstjenlige tunneler” ble det predikert innlekkasje beregnet på bakgrunn av kjerneboredata og lugeonmålinger (Holmøy og Lindstrøm 2002). Formel 3.12 tar utgangspunkt i isotrope forhold, og er blitt benyttet som en antagelse på innlekkasje til tunnel før injeksjon (Tokheim og Janbu 1984). Tunnelgeometrien og representativ tunnellengde hensyntas ved geometriske faktorer gitt av formel 3.12 og 3.13.

$$Q_w = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot P \cdot K}{\mu_w \cdot G} \quad (3.12)$$

Q_w = Innlekkasje i tunnel [m^3/s]

L = Lengde av tunnelen [m]

P = Høydepotensialet av vann [Pa]

K = Spesifikk permeabilitet [m^2]

μ_w = Vannets dynamiske viskositet [kg/sm]

$$G = \ln \frac{(2D - r)(L + 2r)}{L \cdot r + 2r(2D - r)} \quad (3.13)$$

D = avstand fra tunnelens lengdeaksen til grunnvannsspeilet [m]

r = ekvivalentradius, radius til en sylinder som gir tilsvarende overflateareal som tunnelen [m]

I norsk injeksjonspraksis benyttes det ofte empiriske tilnærminger for å estimere innlekkasjeverdien Q i forbindelse med kontraktsgrunnlag og prosjektering av vanntetting. For Fornebubanen er eksempelvis gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet fra lugeonmåling, utnyttet for å tilnærme forventet innlekkasje for ulike områder av tunnelen (Karlsruh, Erikstad og Snilsberg 2003; NFF 2011). Formel 3.14 og 3.15 viser henholdsvis innstrømning for en ikke-injisert og forinjisert tunnel (Karlsruh, Erikstad og Snilsberg 2003).

$$Q = \pi k h \cdot \frac{2}{\ln 2 \frac{h}{r}} \cdot \frac{60s \cdot 100m}{0.001m^3} \quad [l/min/100m] \quad (3.14)$$

$$Q_{injisert} = \pi k_i h \cdot \frac{2}{\ln \frac{r+t}{r}} \cdot \frac{60s \cdot 100m}{0.001m^3} \quad [l/min/100m] \quad (3.15)$$

k = Bergmassens hydrauliske konduktivitet

k_i = Injisert hydraulisk konduktivitet

r = Ekvivalent tunnelradius [m]

h = Dybde under grunnvannsspeil [m]

t = Tykkelse for injisert sone [m]

4 Bergmasseklassifisering og forundersøkelser

Det eksisterer en rekke klassifiseringssystemer som systematiserer og kvantifiserer beskrivelsen av bergmasse. Hensikten er å bedre kunne knytte visuelle og målte parametere, opp mot bergmassekvalitet og stabilitet (Goel og Singh 2011). Grunnlaget for hvilke metoder som beskrives i dette underkapittel er med utgangspunkt i de systemene som allerede er benyttet i Fornebuprojektet og relasjoner mellom systemer.

4.1 RQD

”Rock Quality Designation” anvendes blant annet ved kartlegging av borkjerner, der sprekkefrekvensen vurderes basert på summen av lengdene av intakt berg som er lenger enn to ganger kjernediameteren (D. U. Deere 1964). Verdien angis som en prosentandel av hele kjernelengden, og varierer fra 0-100 (NGI 2015; Singh og Goel 2011). Systemet er i utgangspunktet todimensjonalt, men benyttes også til å beskrive sprekkeforhold ved tunnelkartlegging, i relasjon til Q-systemet. Systemet inndeles i kategorier fra svært dårlig til utmerket bergmassekvalitet, fra henholdsvis 0 - 25 og 90 - 100. Dette er beskrevet i detalj i vedlegg K.

4.2 Q-systemet

På 1970-tallet introduserte Barton, Lien og Lunde (1974), estimering av bergmassekvalitet ved Q-systemet. Tilnærmingen er en empirisk metode, som er sammensatt av en rekke definerte bergmasseparametere. Klassifiseringssystemet gir indikasjon på tunnelstabilitet og sikringsbehov, bestemmes av følgende likning (NGI 2015):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (4.1)$$

RQD = Oppsprekkingstall

J_a = Sprekkefylling

J_n = Sprekkesett

J_w = Sprekkevannstall

J_r = Sprekkeruhetstall

SRF = Spenningsfaktor

Noen viktige momenter vedrørende parameterene er sensitivitet til subjektiv vurdering og anleggsteknisk gjennomføring. I tunnelsammenheng vil det være vanskelig å skille naturlige og sprengningsrelaterte sprekker, avhengig av erfaring til den som utfører vurderingen. I relasjon til injeksjonsarbeider vil det også knyttes usikkerhet til Q-parametere, for skifrige bergarter, sementerte- og mineralfyllte sprekker (NGI 2015). Usikkerheten knyttes i større grad av forvitring og type sprekkefylling. For svake og omvandlede bergarter, i eksempelvis svakhetssoner, settes RQD til 10 (NGI 2015). Q-verdiene relateres også til bergmasseklasser, A - G, som blir benyttet i resultatdelen av denne masteroppgaven for å overordnet beskrive bergmassekvaliteten. For en detaljerte parameterbeskrivelser henvises det til NGI (2015) og vedlegg K.

4.3 Bergmasstyper

I forbindelse med forskningsprosjektet "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler" beskrives valg knyttet til injeksjonsutførelse og bergmasse ved ulike bergmasstyper (B. H. Klüver 2000). Bergmasstypene A, B, C og D kategoriseres i henhold til strukturgeologiske og bergmekaniske egenskaper. Eksempler på styrende parametre er bergmassens hardhet, forvittringsgrad, oppsprekking, foliasjon og lagdeling. Hensikten var å utvide injeksjonsbestemmelser med hensyn til de geologiske forutsetningene av typebergarter i norsk berggrunn. Stedlige forhold krever tett oppfølging, samt at prosedyrer og utførelse er nært tilknyttet tetthetskrav. Inndelingen er erfaringsbasert og skilles ved ulike hydrogeologiske egenskaper. Sistnevnte beskrives blant annet ved sprekkekaraktistikk og injeksjonsmasser sin inntrengningsevne. Følgende beskrivelser er modifisert fra B. H. Klüver (2000) og Creütz mfl. (2017).

Type A

Bergmasser med åpne sprekker uten betydelig sprekkefylling, med generelt god inntrengningsevne. Eksempler på bergartstyper kan være sandstein, kvartsitt og enkelte lavabergarter i Oslo-området. Ved gjennomkuttende soner og sjikt av forvitrede lag, bør det gjøres spesiell tilpasning for å sikre tilstrekkelig inntrengning av injeksjonsmasser og forhindre utvasking. Dette forekommer gjerne i svakhetssoner og overgangssoner ved eruptivganger. For bergmasstypen tilstrebes bruk av lave W/C-tall og standard injeksjonssement, samt boring av lengre injeksjonshull. I den sammenheng er det viktig å kontrollere boravvik, i forbindelse med overgangssoner, for å sikre tilstrekkelig massespredning.

Type B

Bergmasser med sprekkefyll, eksempelvis metamorfe bergarter som pre-kambrisk grunnfjell. Sammenlignet med gruppe A er det større forekomst av leiromvandlede sprekkesoner og kanaldannelser. Sprekkeforholdene er varierende, og bergmassen beskrives ved middels inntrengningsevne. Tilpasning av injeksjonsmaterialer gjøres på bakgrunn av grad av sprekkefylling, med industri- eller mikrosement. Leirfylte sprekker bør injiseres ved høyere W/C-tall innledningsvis, og med generelt høyere avsluttende injeksjonstrykk. Økt hullantall og kortere hullengder anvendes for å sikre tilstrekkelig kontakt med vannførende kanaler og sprekker.

Type C

Beskriver bergmasser med svært dårlig inntrengningsevne, ved høy grad av sprekkefylling og generelt liten sprekkeåpning. Fyllitt, leirskifer og grønnstein er eksempler på bergartstyper som faller innunder type C. Innlekkasjen til bergrommet forekommer ofte ved mange, små sprekker, og det er generelt problematisk å oppnå kontakt mellom sprekker og borhull. Dette krever økt hullantall, høyere W/C-tall og høyt avslutningstrykk. Det anbefales bruk av mikrosement og silikabaserte masser, med tett oppfølging på injeksjonsutførelse, kontrollhull og eventuelle lugeonmålinger.

Type D

Beskriver bergmasser som er påvirket av tektoniske bevegelser eller karstfenomener. Kalkstein i Nord-Norge og sentrale deler av Sørøst-Norge utgjør eksempler på områder med slike forhold. Det er ingen spesifikke anbefalinger for injeksjonsmasse på grunn potensiale for store innlekkasjer. Det henvises til erfaringer ved tidligere prosjekter med tilsvarende forhold. Muring og sementmaterialer har blitt brukt med relativt god suksess i flere tilfeller.

Tilsvarende system benyttes i henhold til svensk injeksjonspraksis, på bakgrunn av bergartstyper, hydrauliske egenskaper, tektonisk påvirkning og tetthetskrav (Creütz mfl. 2017). Sistnevnte relateres så til prosjekteringskategorien, med utgangspunkt i sårbarhet og kompleksitet av utførelse. De ulike kategoriene er nært relatert til de norske geotekniske klassene.

Type 1

Bergmasser som beskrives ved middels til lite permeabel, og med liten grad av sprekkefylling og forvitring. Dette gjelder bergmasser med få, åpne, gjennomgående sprekker med en hydraulisk konduktivitet 10^{-7} - 10^{-9} m/s. Dette innebefatter 1 - 2 vannførende sprekkesett, med typisk $Ja < 3$ og sprekkeavstand over 0.6 m. Type 1 samsvarer med Type A, gitt av B. H. Klüver (2000).

Type 2

Gjelder bergmasser med moderat gjennomgående sprekker, og betydelig sprekkefylling som følge av forvitring eller innfylling av sedimenter. Eksempler er sprekkefattige eller skifrige bergmasser, med typisk sprekkeavstand over 0.2 m. Sprekkenes beskrives som oftest ved en til tre vannførende sprekkesett, og typisk hydraulisk konduktivitet mellom 10^{-8} - 10^{-9} m/s. Bergartstyper som tilhørere Type 2 kan være amfibolitt, glimmerskifer, leirskifer med $Ja > 3$. Klassifiseringen tilsvarer en kombinasjon av type B og C ved B. H. Klüver (2000).

Type 3

Bergmasser med høy oppsprekkingsgrad, høy sprekkefrekvens og liten grad av innfylling. Bergmassen beskrives ved høy til middels permeabilitet, ved to eller flere vannførende sprekkesett. Herunder skifrige bergarter, vekslende bermasse eller svakhetssoner uten leiromvandling med typisk sprekkeavstand under 0.6 m. $Ja < 4$ og hydraulisk konduktivitet tilsvarende 10^{-5} - 10^{-7} m/s.

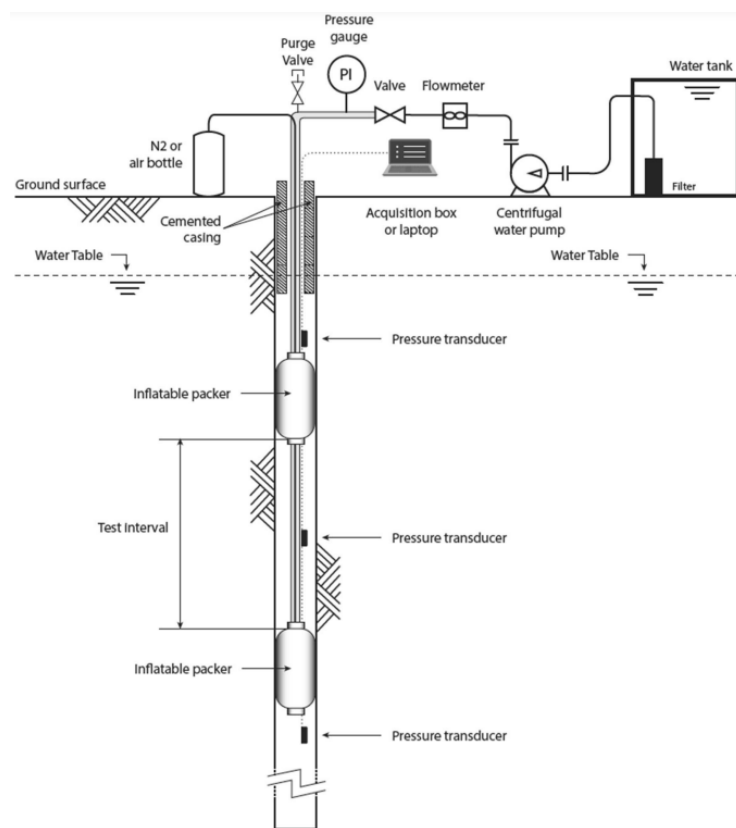
4.4 Forundersøkelser

For å etablere en detaljert beskrivelse av stedlige bergmasseforhold, utføres det normalt et varierende omfang av grunnundersøkelser. Karlsrud, Erikstad og Snilsberg (2003) redegjør for en rekke anbefalinger av relevante forundersøkelser, i relasjon til injeksjon og vanntetting. Undersøkelsene skal i størst mulig grad beskrive geologiske forhold som har innvirkning på utførelsen og oppnådd tetthet. I tillegg gir det grunnlag for blant annet fastsettelse av tetthetskrav, omfang av injeksjon, overvåking og grunnlag til videre undersøkelser. Noen eksempler på forundersøkelser kan være:

- Regionalgeologi og kartundersøkelser
- Tidligere prosjekter
- Lineamentstudier
- Geofysiske undersøkelser
- Optiske undersøkelser

- Infiltrasjon og permeabilitetstester
- Borehullsundersøkelser
- Simulering og modellering

Permeabilitetstesting er mye benyttet for å beskrive bergmassens vannledningsevne, der infiltrasjon- og lugeonmåling er av de mest benyttede. Lugeonmåling utføres ved å estimere evnen til å fortrenge vann, over bestemte lengdeintervall av borehullet. I prosjekteringsfasen utføres det som oftest i relasjon til kjerneboring og kjernelogging. Et typisk oppsett er beskrevet i figur 4.1, og testintervallet vil som oftest være 1.5 - 6 m. Vann pumpes inn i testintervallet med overtrykk, og en trykksensor registrerer trykktapet. Normalt testes det ved ulike trykk, tilpasset overdekningen ved testdypet (Vaskou mfl. 2019).



Figur 4.1: Lugeonmåling med to pakkere og automatisk trykk- og strømningsregistrering (Vaskou mfl. 2019)

Resultater fra lugeonmålinger oppgis ved enheten Lugeon. En lugeon tilsvarer vanntapet [l/min] per borhullsmeter, ved 1 [MPa] overtrykk, og beskrives av formel 4.2. Flere empiriske sammenhenger beskrives blant annet ved omregning fra Lugeon til hydraulisk konduktivitet og transmivitet (Vaskou mfl. 2019). I norsk praksis er erfaringstall og formlene 4.3 og 4.4, av henholdsvis Hoek and Bray (1981) og Nonveiller (1989), ofte benyttet i prosjekteringsfasen for estimering av forventet vanninntrengning (Holmøy 2008; PGF 2019; Vaskou mfl. 2019).

$$L = \frac{Q \cdot 10bar}{l \cdot P_{test}} \quad (4.2)$$

$$k = \frac{1.4 \cdot Q}{l \cdot H} \quad (4.3)$$

$$k = 1.5 \cdot 10^{-7} \cdot L, \quad r = 46\text{mm} \quad \text{og} \quad k = 1.3 \cdot 10^{-7} \cdot L, \quad r = 76\text{mm} \quad (4.4)$$

Q = Vannstrømsrate ved konstant overtrykk [l/min]

P_{test} = Testtrykk [Bar]

l = Lengde av testintervall [m]

10bar = 1MPa = Normalisert overtrykk

H = Hydrostatisk overtrykk [m]

L = Lugeonverdi

r = Borhulldiameter

5 Vanntetting

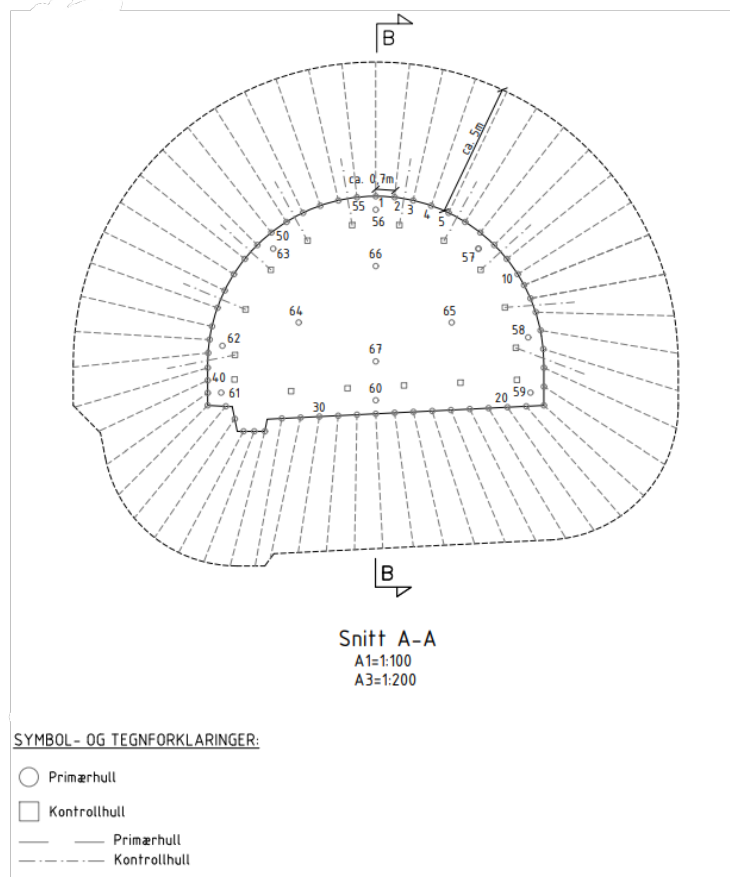
Vanninntrengning i tunnel og underjordsanlegg håndteres i hovedsak ved vanntett utstøpning, injeksjon både foran og bak stuff, samt ved dreneringssystemer (NFF 2002). Førstnevnte er den mest inngripende og kostnadsstyngede løsningen som benyttes i Norge. Dersom injeksjon ikke ansees tilstrekkelig etter utførelse, eller krevende geologiske og geometriske forhold tilsier utilstrekkelig tetting ved injeksjon, kan det benyttes vanntett utstøpning av betong (Luciani og Peila 2019). Dette vil normalt tilsi urbane og svært sårbare områder, der små poretrykksvariasjoner har stor innvirkning i overflaten. I områder der det ikke stilles krav til poretrykksendringer eller grunnvannssenkning, kan dreneringssystemer vurderes. Normalt sett har anleggets omgivelser, funksjonskrav og praktiske forutsetninger ved driving, innvirkning på valg av tettestrategi. I dagens praksis innebærer dette i de aller fleste tilfeller injeksjon foran stuff, i eventuell kombinasjon med etterinjeksjon og vanntett utstøpning. Injeksjonsteknikk og utførelse er i stor grad erfaringsbasert og beskrives til dels som ikke-eksakt vitenskap i praksis. Tetteresultatet avhenger av en rekke variabler, blant annet geologiske forhold, utforming og den anleggstekniske utførelsen. Kommende delkapitler har til hensikt å oppsummere de viktigste momentene ved injeksjon. For detaljert beskrivelse av injeksjon utførelse i norsk praksis, henvises det til Statens Vegvesen sine håndbøker og veiledere, samt prosesskoder og rapporter utstedt av NFF og Statens Vegvesen, samt TGB4570 Ingeniørgeologi prosjektoppgave (NFF 2010; NFF 2018; SVV 2004; SVV 2018; Thollefsen 2022).

5.1 Injeksjonsutforming

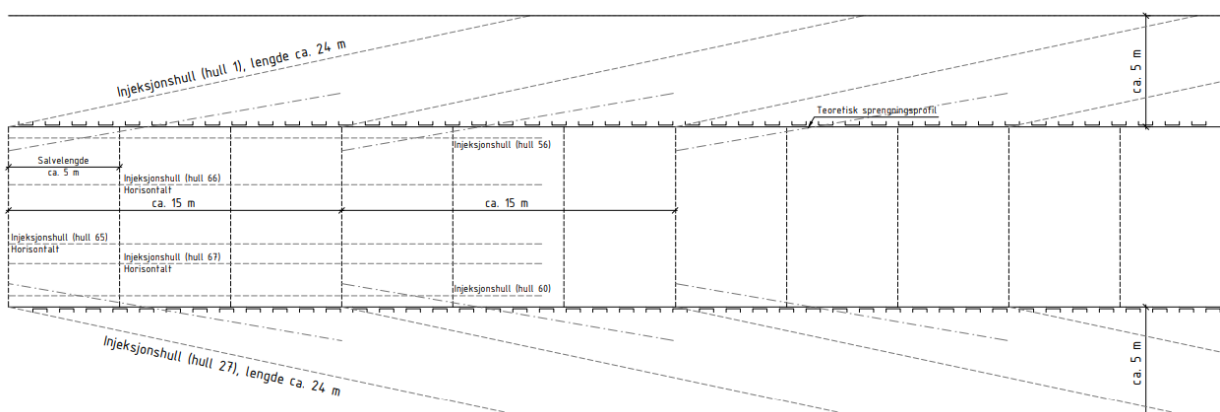
Normalt skiller det mellom systematisk- og behovsprøvd injeksjon, der valget avhenger av forarbeidet, underjordsanleggets funksjonskrav, grunnundersøkelser og sårbarhetsanalyser (NFF 2010). Ved systematisk injeksjon inngår prosedyren som en del av salvesyklusen ved konvensjonell tunneldriving, og omtales gjerne som en stegvis prosess. Ved behovsprøvd injeksjon, utføres det regelmessige vurderinger underveis i drivingen. I områder der en forventer større innlekkasje, eller kan avdekke innlekkasje ved eksempelvis sonderboring, vurderes vanntettingen spesielt. Ved systematisk injeksjon utføres det kontinuerlig injisering av skjermes, med forhåndsdefinerte avstander (Garshol 2011). Dette kan typisk være to til tre salvelengder, der hver salvelengde er rundt 2 - 6 m.

Det første steget i en injeksjonsprosess innebærer injeksjonsboring, som oftest ved topperhammerbor på tunnelrigg. Avhengig av tunnelvernsnitt opereres én til flere tunnelrigger parallelt, som hver kan operere én til tre bomber

samtidig. Boringen foregår med et bestemt mønster i konturen, subparallelt til tunnelretningen, slik som illustrert ved figur 5.1 og 5.2. En injeksjonsskjerm består av en rekke borehull med en gitt borediameter, hulllengde, stikning og hullavstand. Samtlige parametere tilpasses bergmassen, slik at det oppnås best mulig kontakt med vannførende sprekker. Tilpasningen avhenger eksempelvis av sprekkeorientering og overdekning, som vil innvirke på boravvik og overlapp mellom skjermene. Tabell 5.1 illustrerer normale parameterverdier for skjermgeometri og injeksjonsboring.



Figur 5.1: Injeksjonsgeometri; tverrsnitt av systematisk forinjeksjon, prosjertert for Forneubanen (PGF 2019)



Figur 5.2: Injeksjonsgeometri; lengdesnitt av systematisk forinjeksjon, prosjertert for Forneubanen (PGF 2019)

Det andre steget av prosedyren innebærer injisering av bergmassen, og utføres etter boring og kontroll. Injeksjons-

Tabell 5.1: Typiske borparametre ved topphammerboring. Modifisert NFF og prosjektoppgave (NFF 2010; Thollefsen 2022)

Parameter	Dimensjon	Begrensende faktorer
Borsynk pr. borhammer	1.5 - 3 [m/min]	Boreavvik, borrigg og utstyr
Borkapasitet	60 - 90 [bormeter/time]	Operatørerfaring og borsynk
Hulldiameter	45 - 64 [mm]	Kraft på pakker er proporsjonal med D^2 . For liten hulldiameter kan lede til betydelig boreavvik.
Hullengde	15 - 32 [m]	Boravvik, bergartstype og innlekkasje
Hullavstand [c/c]	0.5 - 3.0 [m]	Tetthetskrav, sprekkeåpning og bergmassens konduktivitet
Hullantall	10 - 100	Hullavstand, tverrsnittsareal og bergmassens injiserbarhet
Stikning/vinkel	3 - 7 [m] / 6 - 14 °	Overdekning, stabilitetssikring, hullavstand, hullengde og sprekkeorientering
Pakkerdybde	1.5 - 2.5 [m]	Bergmassekvalitet, bergmekaniske egenskaper og innlekkasje
Krav til boreavvik	< 5%	Bordiameter og hullengde. Bergmassens sprekkefrekvens og foliasjon
Salvelengde	2.0 - 5.5 [m]	Bergmassekvalitet og innlekkasje
Overlapp	6 - 10 [m]	Tetthetskrav, hullengde og avstand til neste skjerm

materialet blandes og pumpes fra injeksjonsriggen, videre gjennom slanger og pakkere (B. Kløver og Kveen 2004). Pakkere er på forhånd montert 2 - 3 m inn i borehullet, og vil forhindre injeksjonsmassene fra å strømme inn i tunnelen. Injeksjonsmassene strømmer ved overtrykk, og vil fortrenge vann i borhull og sprekker, og fylles med herdende materialet. Hensikten er å etablere en tett sone, radielt til tunnelkonturen, og på den måten forhindre vanninnstrømning til tunnelen (Garshol 2011).

I områder med større innlekkasje eller strenge tetthetskrav, kan det være nødvendig å tilpasse injeksjonsutformingen. Eksempler på tilpasning er ved å øke antall borehull, redusere skjerm lengden og skjermavstand, injisere stuff og aktivt bruke kontrollboring. Sistnevnte benyttes for å påse at ønsket tetthet er oppnådd. Dersom injeksjonsarbeidet viser seg vellykket eller en beveger seg ut av det problematiske området, kan en gradvis justere injeksjonsutformingen. Et annet tiltak er å injisere i flere omganger, ved utilstrekkelig tetting eller ved problematisk trykkoppbygning. Dette kan gjøres ved å etablere en indre og ytre skjerm, der den indre skjermen har redusert stikning (NFF 2011). Ved prosjektet Fornebu-banen er dette prosjektert ved sårbare områder, og med bruk av kolloidial silika for indre skjerm. Et alternativ til indre og ytre skjerm, er "split-spacing". Da bores og injiseres det først med dobbelt hullavstand, dermed et redusert antall hull. Deretter bores og injiseres det en påfølgende omgang på samme stuff, med mellomliggende hullavstand. På den måten fordeles én injeksjonsskjerm, og tilhørende hullavstand, over to injeksjonsrunder.

5.2 Injeksjonsutførelse og utstyr

Utførelsen av injeksjon påbegynnes så fremt bergrommet er rensket, ryddet og sikret. Under borearbeid styrer boreoperatøren hver bom manuelt, og påser at det blir riktig ansett og inndrift i henhold til borplanen. Dagens tunnelrigger er elektrisk og hydraulisk drevet, med en rekke sensorer som registrerer prosessen. Borparametere som mate- og rotasjonstrykk, slagtrykk, borsynk, rotasjonshastighet, spyletrykk, skyllevannstrykktap, bomplassering, boret lengde og tilhørende avvik, samt lekkasje fra borhull registreres kontinuerlig (NFF 2018). For å unngå gjen-

værende borkaks og finstoff i borehull og sprekker, benyttes det normalt spyling ved 15 bar trykk (NFF 2010). Dette tilpasses dersom bergmassekvaliteten eller overdekningen er redusert, i fare for kollaps av borehullet.

Etter boring vil injeksjonsriggen plasseres like foran stoff. Den er sammensatt av opp til to sementsiloer, to blandere og fire pumper som kontinuerlig logges digitalt av styringsenheten (Andersens Mekaniske Verksted 2022). Pakkene, koblinger og slanger er alltid tilpasset det maksimale injeksjonstrykket som benyttes, og det skilles som regel mellom over og under 60 bar (NFF 2010). Injisering starter som regel i liggen, og fortsetter suksessivt videre rundt konturen. Ved større innlekkasje fra enkelthull påbegynnes disse først.

5.3 Injeksjonsmaterialer

Sammensetningen av materiale som injiseres igjennom borehullene og ut i bergmassen består normalt av vann, injeksjonsmiddel og tilsetningsstoffer (NFF 2002). Overordnet skilles det mellom sementbaserte og ikke-sementbaserte injeksjonsmasser. Ved valg av injeksjonsmateriale evalueres spesielt massens inntrengningsevne. For sementbaserte midler avhenger inntrengningsevnene av partikkelstørrelse, partikkelfordeling, injeksjonstrykk og bergmassens sprekkeegenskaper (Garshol 2011). Injeksjonsmaterialet har til hensikt å best mulig redusere den fysiske sprekkeåpningen, slik at en forhindrer innlekkasje i tunnel. Injeksjonsmassens bestandighet, flyteegenskaper og tidligfasthet er også avgjørende for materialvalg og injeksjonsutførelse (NFF 2002).

5.3.1 Sementbaserte injeksjonsmaterialer

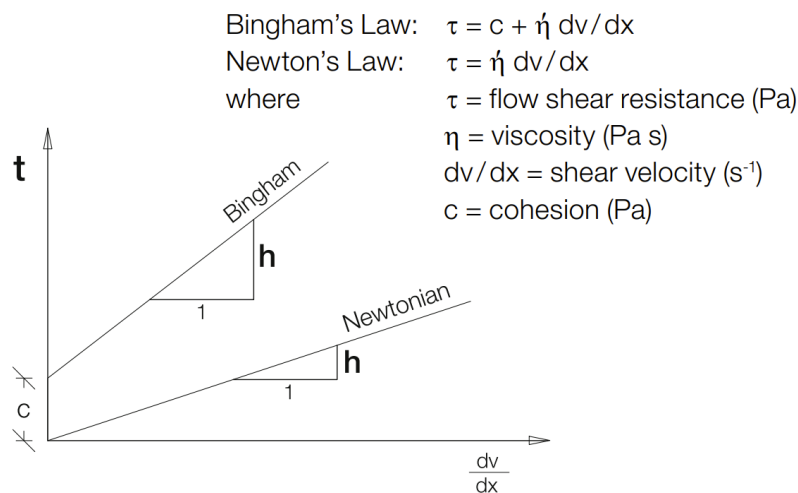
Sementbaserte injeksjonsmidler skilles gjerne av krav til største partikkelstørrelse, d_{95} og Blaine-verdi [m^2/kg]. Sistnevnte beskrives av den gjennomsnittlige fordelingen av partikkelstørrelser gitt fra spesifikt overflate areal per sementvekt (Garshol 2011). Vanlige typer sement til injeksjonsarbeider, med tilhørende egenskaper og materialkrav, er listet opp i tabell 5.2. Teorien baserer seg blant annet på injeksjonsmassenes kornstørrelse relativt til sprekkeåpning. Materialet kan eksempelvis velges slik at den minste åpningen som forventes å måtte tettes av injiserte masser, tilsvarer $3 \cdot d_{95}$. Materialsammensetningen av sementbaserte injeksjonsmidler benevnes en resept, og består av tørrsement, vann og eventuelle tilsetningsstoffer (NFF 2011). Norsk injeksjonspraksis tar utgangspunkt i tilpasning av rheologiske parametere som skjærmotstand, flytevne og inntrengningsevne ved hjelp av blant annet dispergerende tilsetningsstoffer (NFF 2002).

Sementens flyt- og deformasjonsegenskaper beskrives som Bingham-væske, som vil si at den opptrer med både kohesjon og viskositet (Bohloli mfl. 2019; Garshol 2011; NFF 2011). Til forskjell fra Newtonske væsker, settes ikke Bingham væsker i umiddelbar bevegelse ved kraftpåføring. Tregheten etableres grunnet internfriksjon og kohesjon i kontakt med bergmassen. I figur 5.3 fremstilles relasjonen grafisk, med tilhørende formler. For å motvirke disse egenskapene, ved å øke grad av tiksotropi, benyttes det tilsetningsstoffer i injeksjonsmassene. Superplastiserende stoffer er eksempel på dette, der det normalt benyttes 1 - 2% av blandeforholdet.

Mikrosementer betegner flere typer sement, med d_{95} mindre enn 25 mikrometer. Dette kan være standard injeksjonssement som er videre prosessert, til mindre partikkelstørrelser. Sammenlignet med standard injeksjonssement er det spesifikke overflatearealet større, og følgelig er mikrosement mer kjemisk aktivt (Garshol 2011). Blandeprosessen

Tabell 5.2: Sementtyper, tilhørende egenskaper og forslag til materialkrav modifisert fra Garshol (2011), Neby og Woldmo (2022), NFF (2002) og SVV (2018)

Egenskaper	Standard injeksjons-sement	Mikrosement	Ultrafin sement	Spesial mikrosement
Type	CEM I	CEM I eller CEM II A-V	CEM I/CEM II A-V	CEM I eller CEM II A-V
d_{95}	< 40 mikron	< 25 mikron	< 13 mikron	< 15 mikron
Blaine [m^2/kg]	300-350			
Avbindingstid $v / 10^\circ c$	< 480 min/8t	< 240 min/4t		< 120 min/2t
Vannseparasjon $v / 20^\circ c$	< 3%	< 3%		< 3%
Marshconetid $v / 20^\circ c$	32 - 35 sek	32 - 35 sek	32 - 35 sek	32 - 35 sek
Prisestimat	2 kr/kg	4 kr/kg	6,5 - 14 kr/kg	6 kr/kg

**Figur 5.3:** Rheologisk oppførsel av henholdsvis Newtonske- og Binghamvæsker (Garshol 2011)

er tilpasses nøye, for å unngå at sementer agglomerer. Tidligfastheten og herdetiden varierer for ulike typer mikrosementer, og styrende for utførelsen av injeksjon (NFF 2010). Dette avhenger blant annet av sementens overflateareal og blandingens vanninnhold (Grøv, Strømsvik og Haugsand 2020). Det er ønskelig med rask nok herdetid for å oppnå trykkoppbygging, redusert masseforbruk og unngå utvasking av massene. I tillegg vil forsinket herding øke tidsbruken og eventuell igangsettelse av kontrollhullsboring. Lave temperaturer er også forsinkende for herdetiden (Neby og Woldmo 2022). Hydratiseringen reduseres, og det er derfor viktig å ta hensyn til prosjektering og kontrakt. Tabell 5.3 er hentet fra prosjektoppgaven, og oppsummerer tilsetningsstoffer som er vanlig å benytte i industrien.

5.3.2 Kjemiske og ikke-sementbaserte injeksjonsmidler

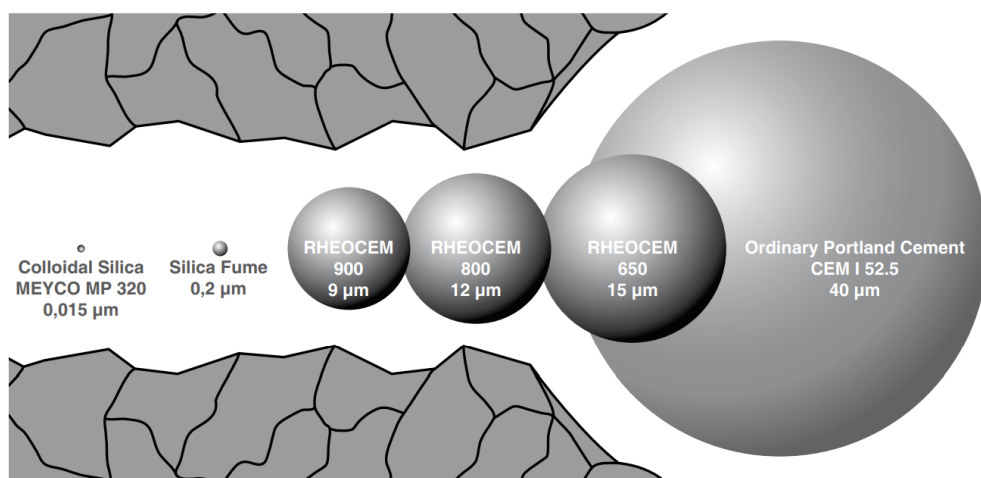
Der sementbaserte injeksjonsmidler ikke oppnår tilfredsstillende tetthet eller det påtreffes svært vannførende soner, benyttes det som oftest kjemiske injeksjonsmidler. Disse er i motsetning til sementbaserte materialer uten partikler, og intrenghingsevnen i sprekker og bergmassen avhenger av injeksjonstrykk og viskositet (NFF 2002). Det endelige sluttproduktet av kjemiske og ikke-sementbaserte injeksjonsmidler, kan være i form av skum, faste stoffer eller gel. Det eksisterer mange ulike kjemiske midler, med ulik sammensetning og funksjoner. De to hovedgruppene

Tabell 5.3: Eksempel på tilsetningsstoffer ved sementbasert injeksjon (Bohloli mfl. 2019; Grøv, Strømsvik og Haugsand 2020; NFF 2010)

Tilsetningsstoff	Funksjon	Dosering
Superplastiserende	Dispergerende middel som øker flyteevnen ved å hindre sammenklumping av partikler. Blandes i injeksjonsriggen	1 - 2%
Akselerator	Fremskynding av herding eller størkning, og påmonteres ved utløp utenom injeksjonsriggen	1 - 5 %
Retarder	Forsinker sementens kjemiske reaksjon	
Stabilisator	Tilsetning for å unngå separasjon og forsinke herding. Silikaslurry er vanligste varianten i Norge	5 - 10%

kjemiske injeksjonsmidler er en eller flerkomponent herdeplast eller gelbaserte midler (Garshol 2011). Disse skiller i hovedsak ved at førstnevnte enten blandes ved stoff, med en gitt kjemisk herdetid, eller injiseres i borehullene og herdingen påbegynner i kontakt med vann. Det injiserte, herdede materialet, vil da fullstendig fortrenge vann i berget. Disse midlene er som oftest en- eller to-komponent aktiv, der polyuretan ofte benyttes ved etterinjeksjon. Hovedfordelen er produktets fleksibilitet og mulighet å skreddersy resepten til stedlige vann- og bergmasseforhold. Gelbaserte midler injiseres i kombinasjon med akselerator, ved relativt lav konsentrasjon. Vann i berg vil så bindes sammen med blandingen, som vil omslutte og oppta vannet. Det foregår ikke en kjemisk binding, men vannet tilbakeholdes av polare krefter (NFF 2002).

Kolloidial sillika er et ikke-sementbasert injeksjonsmiddel som er mer og mer benyttet i norsk praksis. Materialets viskositet er kun $5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, og med partikkelstørrelser ned til $0.015 \mu\text{m}$, har den evnen til å trenge inn små sprekkeåpninger (Garshol 2011; Hognestad og Holter 2012). Kolloidial silika har også liten til ingen påvirkning på omgivelsene, til sammenligning med andre kjemiske injeksjonsmidler (Garshol 2011). Suspensjonen av kolloidial silika består av to komponenter. Den ene bestandelen er en saltløsning, som fungerer som herdeakselerator, og den andre av silika i suspensjon. Herdetiden eller geltiden kan styres ved dosering av akselerator, eksempelvis 10-25 vektprosent, og er normalt 10-120 minutter (Hognestad og Holter 2012). Bruken av kolloidial silika er økende i norsk tunnelbransje, spesielt i bergmasser der den hydrauliske ledningsevnen er lav og sementbaserte injeksjonsmidler ikke operer tilstrekkelig. Se figur 5.4 for sammenligning av partikkelstørrelser for ulike typer injeksjonsmaterialer.

**Figur 5.4:** Relativ sammenlikning av partikkelstørrelser til injeksjonsmidler, hentet fra (Garshol 2011)

Generelt kan kjemiske midler oppsummeres ved å være svært egnet for tilpasning, der enkelte har negative miljømessige konsekvenser for naturomgivelser. Et viktig aspekt ved bruk av kjemiske injeksjonsmidler, er økte kostnader per *kg* sement. Det er også knyttet farer ved HMS for operatørene ved stuff, da mange av de kjemiske komponentene av injeksjonsmidlene er mer eller mindre giftige (NFF 2002). Utnyttelse og bruk av polyuretan er utbredt for etterinjisering og punktlekkasjer, der vannførende sprekker tettes lokalt.

6 Prosedyrebestemmelser og injeksjonsstrategi

I all hovedsak er metodene og bestemmelsene styrt av prosjektets rammer, betingelser og krav til tetthet. Ofte er disse kontraktsbundet, der type kontrakt også er regulerende for hvem som står til ansvar for gjennomføringen, prosjekteringen og utformingen av vanntetting (NFF 2011). Det skilles eksempelvis mellom totalentreprise og utførelsesentreprise, der førstnevnte innebærer at totalentreprenøren bestemmer utførelsen og eier risikoen. Arbeidet og vurderingene som gjøres i tidligfase, blant annet sårbarhetsanalyser, tidligere erfaringer og nærliggende prosjekter, er ofte styrende for parameter- og metodevalg (Karlsruud, Erikstad og Snilsberg 2003). Prosedyrene baseres også på anleggets levetid, praktiske gjennomføring, operatørfaring og stedlige geologiske forhold. I forbindelse med forskningsprosjektet ”Miljø- og samfunnstjenlige tunneler, ble det utført en rekke sammenstillinger og vurderinger av hvordan injeksjonsprosessen påvirker omgivelsene (Karlsruud, Erikstad og Snilsberg 2003). Her beskrives også veiledninger for hva som bør hensyntas ved prosjektering og etablering av underjordsanlegg, slik at skadepotensialet reduseres.

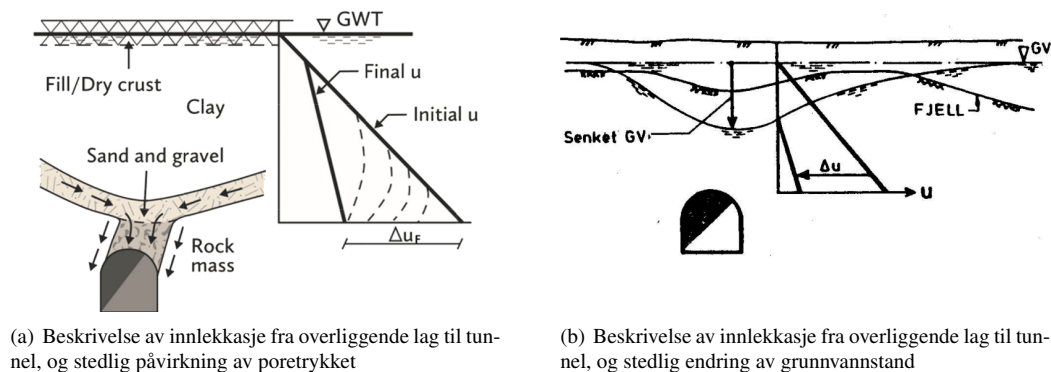
6.1 Tetthetskrav

Sårbarhetsanalyser av områder over og rundt tunnelaksen, i kombinasjon med stedlige geologiske og hydrogeologiske forhold, er som oftest grunnlag for fastsettelse av tetthetskrav. For å befestede de stedlige forholdene etableres det grunnvannsbrønner og poretrykksmålere nær tunnelen. Grunnvannsnivået og poretrykket endres naturlig ved årstidsvariasjoner, det er derfor viktig å skille disse fra endringer grunnet anleggsdriften. Poretrykksovervåking er normalt på plass senest ett år før drivestart, og monitoreres aktivt før, under og etter injeksjonsarbeid (NFF 2010; SVV 2004). Vurderinger rundt kravspesifikasjoner avhenger blant annet av faktorer som listet opp i tabell 6.1 (NFF 2002).

Reduksjon av poretrykket kan skape store utfordringer for omkringliggende fauna og bebyggelse. En rekke løsmasser kan være setningsømfintlige, og små endringer i grunnvannstand eller poretrykk kan forårsake betydelige skader. Figur 6.1 illustrer skjematisk, påvirkning av poretrykksreduksjon og grunnvannssenkning. Ved tunnelprosjekt i urbane områder settes det følgelig strenge tetthetskrav. Tillat innlekkasje benevnes ved målt innstrømning av vann i $l/min/100m$ tunnel. Internasjonalt betegnes dette ved forkortelsen LRIR, ”Limit of Residual Inflow Rate”. Karlsruud, Erikstad og Snilsberg (2003) presenterer erfaringsdata som tilsier at en med relativt god sikkerhet kan unngå omfattende poretrykksreduksjon hvis innlekkasjen etter injeksjon er mindre enn $3 - 7 l/min/100m$ (Karlsruud, Erikstad og Snilsberg 2003).

Tabell 6.1: Vurderingsgrunnlag av tillate inn- og utlekkasjer, modifisert fra NFF 2002

Omgivelser	<ul style="list-style-type: none"> - Påvirkning på fauna, herunder skog, jordbruk, råtedannelse - Senkning av grunnvannsspeil og setninger i løsmasser - Drenering av brønner, tjern og andre grunnvannsmagasiner - Forurensning ved utlekkasje - Svelling av alunskifer
Anleggsdrift	<ul style="list-style-type: none"> Pumpekapasitet og tilhørende kostnader - Arbeidsmiljø - Konflikt ved boring, sikring og lading - Stabilitet og overdekning
Permanent anlegg	<ul style="list-style-type: none"> - Korrosjon - Kostnader knyttet til pumping av vann - Påvirkning på elektrisk anlegg - Miljø, luftfuktighet, isdannelse i tunnel, m.fl - Sikkerhet ved samferdselstunneler



Figur 6.1: Illustrasjon av tunnelanleggets påvirkning på henholdsvis poretrykk (a) og grunnvannssstand (b). Figur (a) er hentet fra (Langford mfl. 2022) og (b) fra NFF 2002

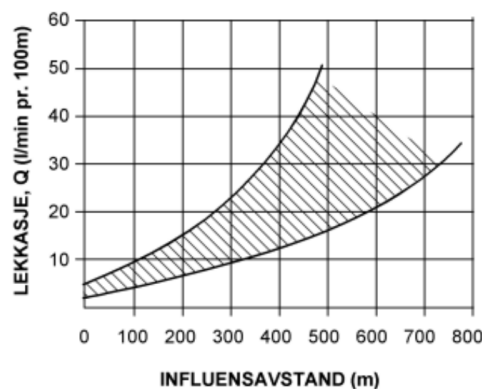
I denne sammenhengen ble det også utarbeidet en prosedyre for etablering av tetthetskrav i urbane områder, som oppsummeres under (Karlsruud, Erikstad og Snilsberg 2003).

1. Største aksepterte setnings langs tunnelen bestemmes
2. Produsere løsmassekart som følger tunneltrasé
3. Beregning av setninger med hensyn på poretrykksreduksjon for ulike løsmasseområder
4. Kartlegging av infrastruktur som er mest utsatt, og beregne største tillate poretrykksendring
5. Beregning av største tillate poretrykksreduksjon over tunnel, belyst av tidligere erfaringer vedrørende poretrykksfall og avstand til tunnel
6. Etablering av tetthetskrav basert på beregninger, erfaring og kartlegging for tillat poretrykksvariasjon rett over tunnel

Tetthetskravene kan deles inn som vist i tabell 6.2. Karlsrud, Erikstad og Snilsberg (2003) beskriver hvordan influensavstanden avtar med redusert innlekkasje. Med utgangspunkt i den horisontale avstanden fra tunnelen og målt innlekkasje, viser figur 6.2 hvordan korrelasjonen til innsynkning i overflaten (B. Klüver og Kveen 2004; NFF 2010). Fastsettelse av tillatt innlekkasje bør baseres på konsekvensene for omgivelsene, anleggsdriften og den permanente anlegget (NFF 2010). For urbane områder er setningspotensialet og følgekonsekvensene er store, spesielt for infrastruktur som er fundamentert i løsmasser eller der en finner bløt marin leire.

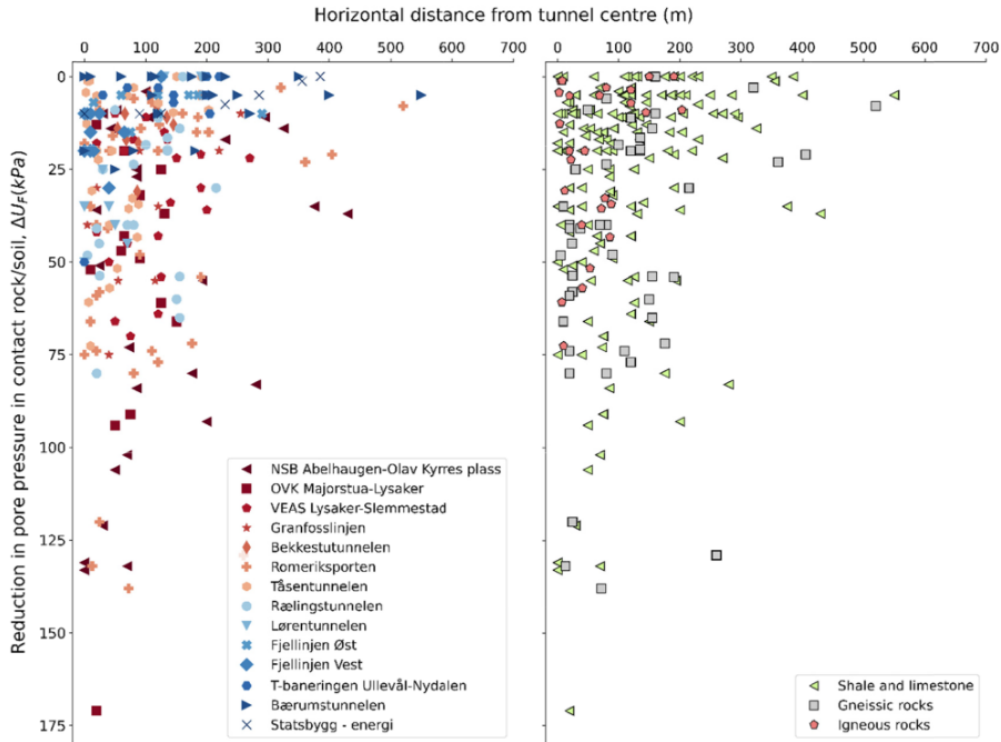
Krav	Liter/min/100m tunnel	Poretrykksreduksjon [m]	Maksimal influensavstand [m]
Normale	> 15	> 7	> 600
Middels strenge	7 - 15	5-7	400 - 600
Strenge	< 3 - 7	2 - 5	200 - 400
Ekstremt strenge	< 1 - 3	0 - 2	0 - 200

Tabell 6.2: Tetthetskrav for T8.5 tunnel med tilnærmede verdier for poretrykksreduksjon og influensavstand med fra prosjekter sør-øst i Norge, modifisert fra (B. Klüver og Kveen 2004)



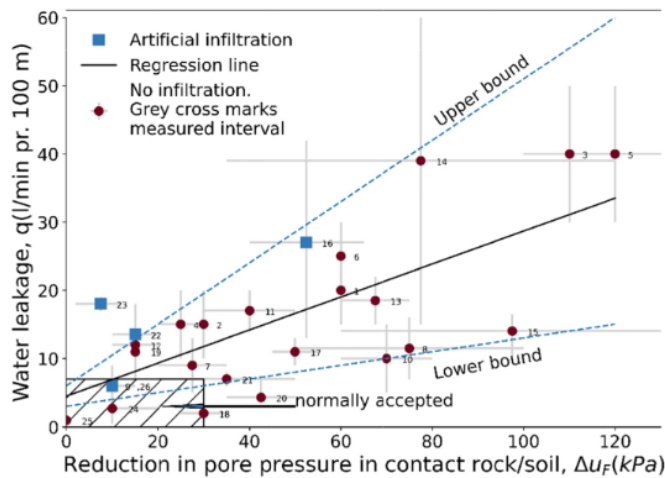
Figur 6.2: Horisontal influensavstand mot innlekkasje i tunnel (Karlsrud, Erikstad og Snilsberg 2003)

Sentrale områder av sør-øst Norge og i Trøndelag preges av utbredt forekomst av marine avsetninger. I forskningsprosjektet "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler" ble en rekke tunnelprosjekt i Norge, hovedsakelig i Osloområdet, kartlagt og dokumentert med fokus på injeksjon og tettarbeid. Det ble kartlagt informasjon vedrørende blant annet innlekkasje, injeksjonsutforming- og utførelse, type injeksjonsmaterialer, bergoverdekning, injiserte mengder, boremeter og oppnådd tetthet (B. Klüver og Kveen 2004). Samlingen består av prosjekter fra 1975, og er senest oppdatert i 2022 av Langford mfl. (2022). Dette betegnes videre i oppgaven som Norsk tunneldatabase. Dagens praksis for injeksjon er i stor grad relatert til poretrykksmålinger og brønndata. Figur 6.3 sammenstiller registreringer fra målt poretrykksreduksjon for samtlige tunneler, relatert til influensavstand. Samme datasett presenterer også sammenhengen mellom målt innlekkasje og poretrykksreduksjon, som vist i figur 6.4. Datasettet trekker også frem tilbakeberegnet hydraulisk konduktivitet, som overordnet indikerer at det er mulig å oppnå en så lave verdier som $2 \cdot 10^{-9}$ m/s i injisert sone.



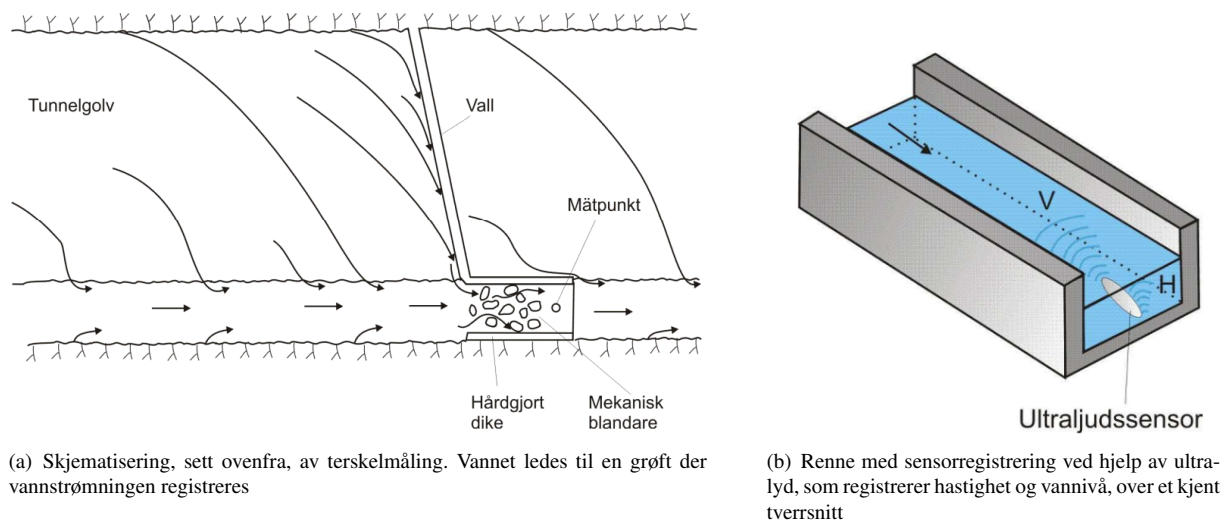
Figur 6.3: Influensavstand mot poretrykksreduksjon fremstilt fra måledata fra tunneldatabasen for tunnelprosjekter i Norge. Originalt utarbeidet av Karlsrud, Erikstad og Snilsberg (2003) og revidert av Langford mfl. (2022)

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1: NSB - Stortinget stasjon (1975) | 14: Romeriksporten, Hellerud (1997) |
| 2: NSB - Arbiensgt. (1979) | 15: Romeriksporten, Ellingsrud (1997) |
| 3: NSB - Parkvn. (1979) | 16: Tåsentunnelen (1998) |
| 4: NSB - Gyldenløvesgt. (1979) | 17: Rælingstunnelen (1997) |
| 5: NSB - Frogner (1979) | 18: Bekkestutunnelen, Gjønes (1994) |
| 6: NSB - Erling Skjalgsonsgt. (1979) | 19: Bekkestutunnelen, Egne hjem (1994) |
| 7: OVK Majorstua- Kirkeveien (1977) | 20: Lørentunnelen (2013) |
| 8: OVK Lysaker-Majorstua (1982) | 21: T-baneringen Ullevål-Nydalen (2002) |
| 9: Fjellinjen Øst (1989) | 22: Fjellinjen Vest (1989) |
| 10: Granfoss, Lysaker (1991) | 23: Nye Nationaltheatret st. (1997) |
| 11: Granfoss, Ullern (1991) | 24: Bærumstunnelen Lysaker-Sandvika (2009) |
| 12: Romeriksporten, Bryn (1997) | 25: NSB - Nat. - Skøyen (post grouting) (1979) |
| 13: Romeriksporten, Godlia (1997) | 26: Statsbygg-energy (2020) |



Figur 6.4: Måledata for poretrykksendring og LRIR fra tunneldatabasen for tunnelprosjekter i Norge. Originalt utarbeidet av Karlsrud, Erikstad og Snilsberg (2003) og revidert av Langford mfl. (2022)

Digitale verktøy kan benyttes for å simulere prosjektområdets nedbørsfelt og vannpotensiale, for å bedre kunne beskrive magasineringen (Grøv, Funehag og Janson 2014; Karlsrud, Erikstad og Snilsberg 2003). Dette er likevel komplisert og krever som oftest en del inngangsparametere og informasjon vedrørende strømmingen i grunnen. For å blant annet kvantifisere bergmassens konduktivitet, samt kontroll og dokumentasjon av innlekkasje, utføres det permeabilitetstesting og terskelmålinger (Garshol 2011; Holmøy 2008; SVV 2022). Terskelmålinger etableres seksjonsvis med definerte avstander, eksempelvis 250m, og er som oftest tilknyttet grøft og avrenning på en side av liggen. De ulike målemetodene utføres enten manuelt, ved pumper eller ved sensorer ved terskler (Creütz mfl. 2017; Hansson mfl. 2010). Figurene 6.5 (a) og (b), illustrerer eksempler på metoder for å utføre terskelmålinger i forbindelse med anleggsfasen. Registrering og avlesning er kontraktsfestet, og skal utføres regelmessig. Et forbehold er at mange av arbeidsoperasjonene under drift krever større eller mindre mengder vann, som vil forurense de faktiske hydrologiske forholdene. Måling av terskler og innlekkasje utføres derfor i forbindelse med planlagte driftsstanser, eksempelvis rett etter fellesferier (Hansson mfl. 2010).



Figur 6.5: Målemetoder for innlekkasje beskrevet av (Hansson mfl. 2010). a) Illustrerer prinsipp for terskelmåling sett ovenfra, der vannstrømmen ledes til sidegrøft og måleterskel. Figur b) er et eksempel på hvordan overløpsrenne kan utformes, der registrering foregår ved ultralydsensor og estimering av vannhøyde

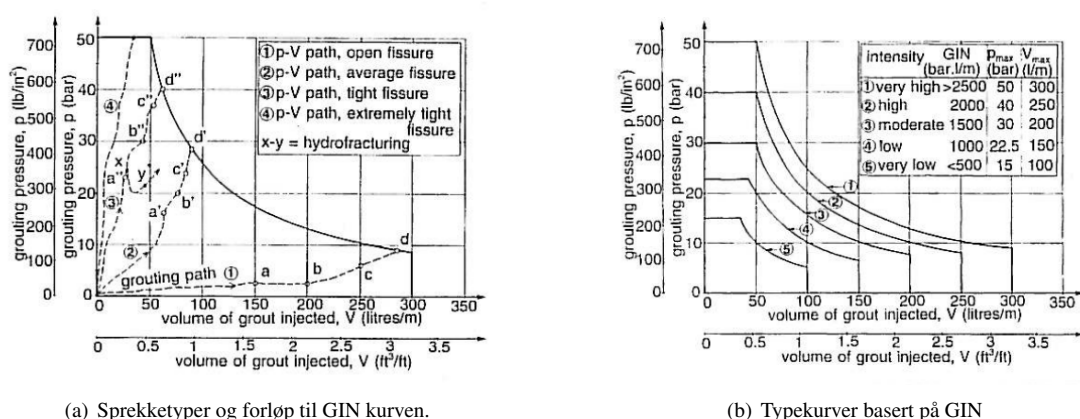
6.2 Vann-sement forhold

Ved utarbeiding av injeksjonsprosedyrer er det vanlig å definere ulike resepter, på bakgrunn av vektforholdet mellom vann og tørrsement. I oppgaven benevnes dette W/C, og er typisk verdier mellom 0.5 og 1.2 (NFF 2010). Parametere er styrende for injeksjonsmassens flyteevne, rheologiske egenskaper, herdetid, stabilitet, midlertidig og endelig styrke. Ved grovere partikkelstørrelse av sement, benyttes som oftest lavere W/C-tall enn for finere partikler, for å unngå vannseparasjon (NFF 2010). Et høyt W/C-tall vil gi økt inntrengning, men reduserer blant annet herdetid og kompressiv styrke etter herding. Mange av de nevnte parametrene kan styres ved bruk av tilsetningsstoffer, der en endelig resept ofte kategoriseres på bakgrunn av W/C-tall.

6.3 Injeksjonsmetoder

Overordnet skilles det gjerne mellom systematisk og behovsprøvd injeksjon. Førstnevnte er injeksjonsarbeidet en integrert del av anleggsyklusen. Behovsprøvd injeksjon avhenger av tett oppfølging av innlekkasje i tunnel og poretrykkssenkning i overflaten (Garshol 2011; NFF 2011). Sonderboring ved kontrollhull benyttes aktivt, og geologien er som oftest styrende i den prosjekterende fasen. I urbane områder praktiseres det i all hovedsak ved systematisk injeksjon (Grøv og Woldmo 2012). I sammenheng med utøvelse av injeksjon er det ulike metoder, ofte beskrevet ved stoppkriterier. Aktiv injeksjon er en metode som benytter trykk og mengde, som avsløsende kriterie for tilfredsstillende injeksjon (B. Klüver og Kveen 2004). Metoden er i stor grad erfaringsbasert, og tilpasses kontinuerlig i løpet av driveprosessen. Normalt benyttes høyere W/C-tall ved oppstart av borhullspumping, der det tilstrebes jevn trykkoppbygging. Dersom stopptrykket nåes, forflyttes pumpingen til neste borhull. Ved ikke tilfredsstillende trykkoppbygging, justeres resept etter et definert maksimalt volum eller mengde per resept. Injeksjonen fortsetter ved lavere W/C, med tilsvarende kriterie (NFF 2010). En injeksjonsprosedyre kan eksempelvis bestå av tre ulike resepter, på bakgrunn av W/C-tall. Vedvarende problematisk trykkoppbygging kan løses ved å la borhullet hvile, samt bruk av herdeakselerator. Avslutningstrykket er i stor grad styrt av berg- og spenningsforholdene, samt resulterende innlekkasje. I norsk praksis er det ofte benyttet høye avslutningstrykk, med bakgrunn i å tette de minste sprekkeåpningene. Dette forutsetter også at det kontrolleres for pumping ut i dagen og jekking av bergmassen (B. Klüver og Kveen 2004).

På tidlig 90-tallet ble GIN-metoden utviklet for å i større grad kontrollere injeksjonsutførelsen, i forbindelse med vanntetting av dammer. Lombardi og D. Deere (1993) utviklet et teoretisk grunnlag for valg av trykk og volum av injeksjonsmasse, for å bedre beskrive påvirkningen på bergmassen. "Grouting Intensity Number" beregnes som produktet av volum per borhullslengde og sluttrykket. Verdien beskriver energien som påføres bergmassen, og vil være veiledende for ukontrollert oppløfting eller splitting av bergmassen. Tallet relateres så til en begrensende kurve som er styrende for tillat trykk og volum, vist i figur 6.6. Metoden forutsetter én stabil resept, med ett W/C-tall.



(a) Sprekketyper og forløp til GIN kurven.

(b) Typekurver basert på GIN

Figur 6.6: Horisontalaksen representerer volum injeksjonsmasse per borehullslengde og vertikalaksen beskriver trykket i [Pa]. a) Beskrivelse av injeksjonsforløp basert på sprekkebeskrivelser og b) eksempelkurver for ulike GIN-verdier, hentet fra Lombardi og D. Deere 1993

Ved fornebu-prosjektet er det også forsøkt benyttet en modifisert GIN-metode, der det tilstrebes avgrensede tryk-

kurve, tilsvarende GIN metoden. Trykkforløpet justeres slik at det stegvis, konstant, følger avgrensingskurven. På denne måten er trykket kontrollert iforhold til forventet jekketrykk og strømning. Beskrivelse av trykkforløp og resept er beskrevet i vedlegg G.2.

Det finnes også andre empiriske metoder som avhenger av bergoverdekning og spenningsforhold, fra blant annet Sverige og USA (Grøv, Funehag og Janson 2014; Rafi, Stille og Johansson 2017). Analytiske metoder er også utviklet i nyere tid, blant annet "Real Time Grouting Control" eller RTGC som tilnærmer en- og to dimensjonal strømning ved massespredning (Kobayashi mfl. 2008). Disse legger større vekt på kontroll av spredning av injeksjonsmasse, basert på sammenhenger tilknyttet sementens egenskaper, tid og trykk. Disse er i liten grad implementert i norsk injeksjonspraksis, men i sterk utvikling i takt med ny teknologi. RTGC vil ikke bli videre utdypet i masteroppgaven.

6.4 Prosjektering av injeksjon med hensyn til geologi

I Norsk praksis er det i liten grad definerte føringer og regler for prosjektering av injeksjon. Ofte er utredningene og forundersøkelsene knyttet til vanntetting, valgt på bakgrunn av prosjektets- og allmennhetens interesser. Med dette menes at arbeidet bør i størst mulig grad tilegne kunnskap om omgivelsene, slik at en forhindrer skader og uforutsette hendelser relatert til vanntetting. Dagens praksis, er i stor grad tilknyttet arbeidet ved forskningsprosjektet "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler" (SVV 2004). I den forbindelse er det redegjort for anbefalinger vedrørende fastsettelse av tettekrav, anbefaling av typer og omfang av grunnundersøkelser, rammebetingelser for sårbarhetsanalyser, modellering og prosjektering av innlekkasje i tunnel, mm (Karlsrud, Erikstad og Snilsberg 2003).

Prosjekteringen innebærer i stor grad å redegjøre for stedlige berg- og løsmasseforhold, potensielle sårbare miljøer og omgivelser, og tilhørende risiko og konsekvens ved innlekkasje. Videre vektlegges aktive måter å kontrollere, overvåke og dokumentere hydrogeologiske forhold under driveprosessen. Eksempelvis blir inngående valg av injeksjonsstrategi, materialvalg, tiltak og kontrollverktøy som infiltrasjon og poretrykksmålere, integrert i kontraktgrunnlaget for prosjektene. Kontraktene er i liten grad detaljorienterte med hensyn til valg av utførelse, og fungerer i større grad som en verktøykasse, for alle risikosituasjoner. Det foregår liten grad av detaljprosjektering av injeksjon i innledende faser av bergarbeid, men igangsettes når en er nært til eller i anleggsfasen. Underveis i anleggsfasen utvides også erfaringsgrunnlaget, slik at injeksjonsprosedyrer og injeksjonsutførelse kontinuerlig tilpasses stedlige forhold (B. Klüver og Kveen 2004; PGF 2019).

7 Fornebubanen

Dette kapitlet vil gi en oversikt over prosjektets omfang og utstrekning, der tyngden av beskrivelsene vil være tilknyttet de prosjekterte geologiske forhold og vannetting ved prosjektet. Informasjonen som presenteres er hentet fra ingeniørgeologiske rapporter og konkurransegrunnlag for henholdsvis K2A og K2B, samt rapport om tettestrategi (PGF 2019; PGF 2020b; PGF 2021). Prosjektbeskrivelsen vil i hovedsak omhandle strekningen fra Fornebu til Vækerø, videre betegnet som entreprisene K2A og K2B, med tilhørende stasjonshaller og tverrslagstunneler.

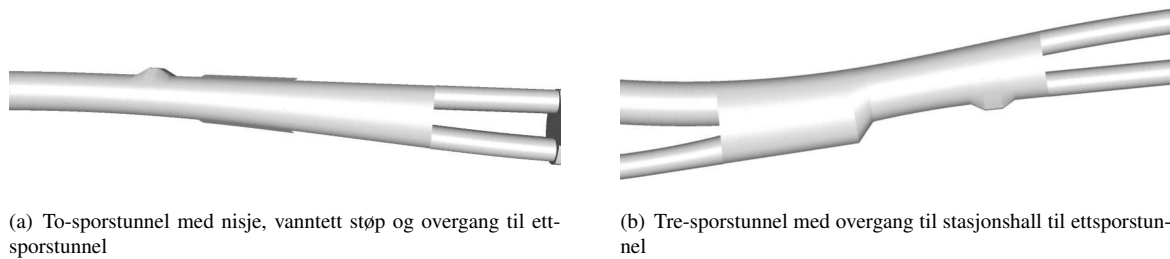
7.1 Generell beskrivelse

Fornebubanen er et storskala samferdselsprosjekt som har til hensikt å utbedre knutepunktene inn og ut av sentral-Oslo. Initiativtakere er Oslo kommune og Viken fylkeskommune, og grunnet prosjektets størrelse og omfang, er utbygger samlokalisert under én prosjekt-etat, "Fornebubanen". For å realisere gjennomføringen og øke konkurranse-nivået, ble det bestemt å dele inn prosjektet i ulike entrepriser. Disse er geografisk og funksjonsmessig avgrenset, og består av en rekke forberedende grunnarbeid, etterinstallasjoner, dagsoner, tverrslag, tunneler og stasjonshaller. Prosjektet utgjør en forlengelse av t-banenettet og vil utvide kollektivnettverket i områdene sørvest for Oslo ut til Fornebulandet. I forbindelse med prosjektering og utførelse, er det mange involverte aktører og etater. I tabell 7.1 beskrives den overordnede inndelingen av de valgte entreprisene og tilhørende prosjektfunksjon.

Tabell 7.1: Oversikt over involverte aktører for valgte områder og strekninger av Fornebubanen

Prosjektfunksjon	Selskap/Etat	Entreprise	Bemerkning
Byggherre	Fornebubanen	Alle	Samarbeid mellom Oslo kommune og Viken fylkeskommune
Prosjektering	Prosjekteringsgruppen Fornebubanen [PGF]	Alle	Samarbeid mellom Multiconsult og COWI
Entreprenør	Implenia	K2A & K2D	
	Veidekke	K2B	
	HAB Construction	K2E	

Prosjektets geometri er komplisert grunnet mange ulike funksjonskrav og arkitektonisk utforming. I hovedsak ble det i konseptfasen prosjektert for to-sporstunnel for forbindende strekninger mellom stasjonshaller, med overganger til ettsporstunneller inn mot stasjoner. Stasjonshallene er utformet med midtstilt plattform, med varierende overdekning og tverrsnittareal. Det forekommer også soner der det er planlagt vannrett støp, som krever spesiell utforming. Eksempler på geometri og utstrekning er gjengitt i figur 7.1 og tabell 7.2. For områder med enkeltspor er det forutsatt pilarer med minimumsbredde på 5m, som vurderes og sikres spesielt, i henhold til in-situ bergmasseforhold.



Figur 7.1: Geometrisk utforming av hovedløp for a) hovedløpstunnel inn mot Lysaker stasjon og b) Flytårnet stasjonshall. Hentet fra ingeniørgeologisk rapport (PGF 2020b)

Tabell 7.2: Oversikt over tunnelprofiler og geometri for entreprisene K2A og K2B ved Fornebu banen (PGF 2020b; PGF 2021). Det bemerkes at drenert løsning tilsvarer tetting uten vanntett støy, ved omfattende injeksjonsinnsats

Entreprise	Tunnelprofil	Vannsikring	Tunneltverrsnitt	Tunnelbredde	Tunnellengde
K2A	2 spor standard	Drenert	84.3 m ²	12.5 m	715 m
		Vanntett utstøpning	116.9 m ²	12.5 m	80 m
	2 spor utvidet	Drenert	94.9 m ²	13.7 m	230 m
		Drenert	124.2 m ²	17.0 m	930 m
	2 spor variabelt	Vanntett utstøpning	141.9 m ²	16.1 m	30 m
		Drenert	51.2 m ²	7.7 m	230 m
	1 spor x 2	Vanntett utstøpning	64.3 m ²	7.8 m	60 m
		Drenert	196.1 m ²	25.2 m	40 m
	3 spor variabelt Tverrslag og rømmning	Drenert	78.4 m ²	11.7 m	550 m
Vanntett utstøpning		93.9 m ²	11.7 m	40 m	
K2B	2 spor standard	Drenert	84.3 m ²	12.5 m	356 m
		Vanntett utstøpning	116.9 m ²	12.5 m	30 m
	2 spor variabelt	Drenert	84.3-157 m ²	12.5-20 m	422 m
		Vanntett utstøpning	132-162 m ²	13.7-20 m	30 m
	1 spor x 2	Drenert	51.2 m ²	7.7 m	200 m
		Vanntett utstøpning	64.3 m ²	7.8 m	70 m
	Tverrslag	Drenert	78.4 m ²	11.7 m	178 m

Innledende grunnarbeid ble påbegynt i desember 2020, og oppstart av driving og injeksjonsarbeider var for K2A i november 2021. Gjennomslag mellom Fornebu base og Fornebuporten var 16 mars 2023, hvor det var drevet 2.5km tunnel. K2B hadde oppstart av injeksjonsarbeider 15.09.2022 og drivestart 03.10.2022, ved tverrslagstunnelen på Lysaker. All driving vil ferdigstilles innen 2027, i henhold til prosjekteringsgrunnlaget, og per 05.05.2023 er over 90% av K2A fullført. Dette var første tunnelentreprise som ble startet, og har blitt drevet parallelt ved tre angrepspunkt. Det ene angrepspunktet er fra område Fornebu base, i sør, retning Lysaker. De to andre angrepspunktene ble drevet fra tverrslagstunnelen ved Fornebuporten, henholdsvis retning sør mot Fornebu base og nord mot Lysaker. Driving og berguttak av sjakter og oppganger fra stasjonshall utføres etter tunnellop, for alle områder av prosjektet. Dette er for å forhindre forurensning i form av støy, støv, gass, samt luftkvalitet under jord.

Prosjektets omgivelser og utforming ansees som svært teknisk og komplisert. Med utgangspunkt i Eurokode 7 er prosjektet fastsatt til geoteknisk kategori 3, med henholdsvis konsekvensklasse/pålitlighetsklasse 3, prosjekteringsklasse 3 og utførelseskontrollklasse 3. Kortfattet beskrives dette ved stor konsekvens i form av tap av menneskeliv, samt svært store økonomiske, sosiale eller miljømessige konsekvenser. Sårbarhetsanalyser for traseen, forutsetter grundige undersøkelser, og det beskrives nødvendig med tett oppfølging mellom entreprenør og byggherre. Vurdering av bergmassekvalitet, sikring og vanntetting baseres på forundersøkelser, Statens vegvesens håndbok N500, Q-systemet, samt utførte erfaringer fra prosjekter med samme geologiske og ikke-geologiske forutsetninger. Spesielle ingeniørgeologiske utfordringer oppsummeres i konkurransegrunnlaget ved:

- Massehåndtering
- Sikring og driving av sjakter og store bergrom i tilknytning til stasjonshaller
- Driving i forholdsvis svake bergarter og i dagberg
- Strekninger og stasjonshaller med liten eller ingen bergoverdekning
- Passering av svakhetssoner
- Passering av eksisterende bebyggelse og infrastruktur i drift
- Mulige setninger som følge av poretrykksenkning, og følgelig strenge krav til grad av tetthet
- Behov for omfattende systematisk forinjeksjon, stedvis supplert med vanntett utstøpning
- Injisering i områder under Lysaker elva
- Etablering og drift av setningsforebyggende infiltrasjon fra overflaten og tunnel

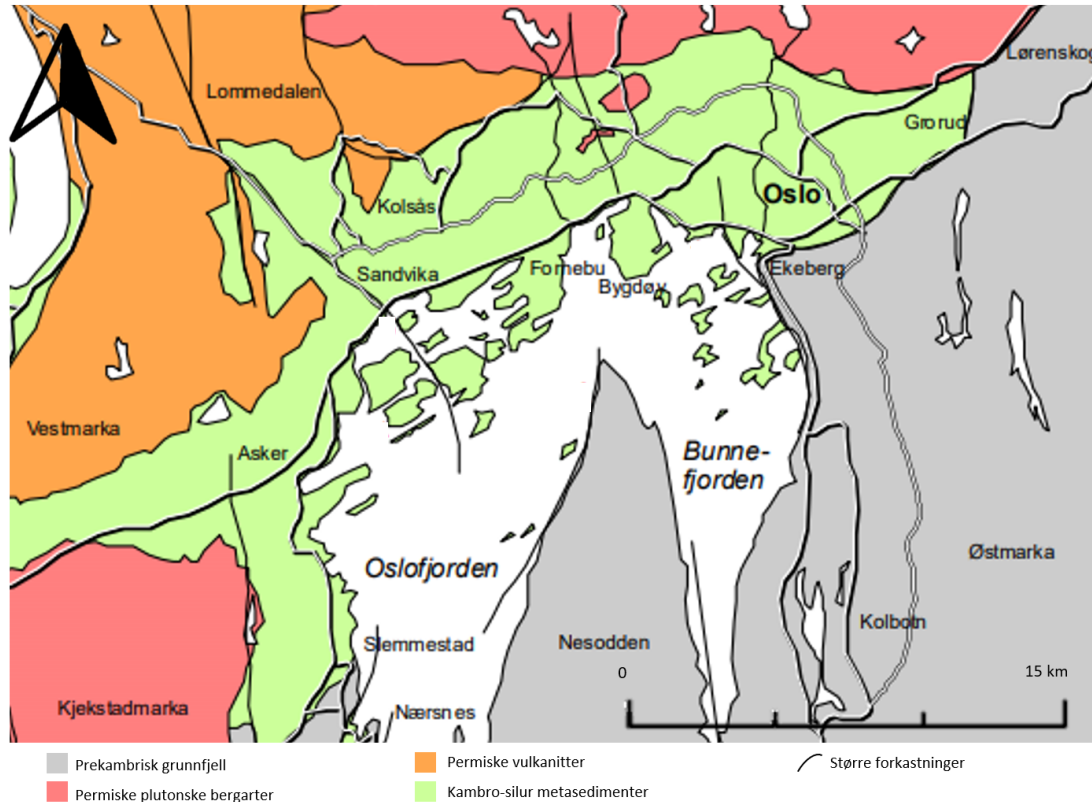
7.2 Geologi og grunnforhold

I forbindelse med anbuds- og prosjekteringsgrunnlag, er det foretatt en rekke grunnundersøkelser langs traseen. Disse utgjør det meste av beregningsgrunnlagene som inngår i bergmassebeskrivelsene, numeriske modeller, injeksjonsbeskrivelser, mm. Tilgjengelig data og kartlegging er blitt digitalisert og fremstilt i en 3D samarbeidsmodell, heretter benevnt BIM-modellen. Dette kapittelet sammenfatter en generell beskrivelse av geologien i området og de forundersøkelser som er foretatt, analysert og fremstilt igjennom individuelle rapporter. Datagrunnlaget er hentet fra de ingeniørgeologiske rapportene for strekningene mellom Fornebu stasjon og Vækerø stasjon, dersom ikke annet er sitert (PGF 2020b; PGF 2021).

7.2.1 Regionalgeologi og bergmassebeskrivelse for prosjektområdet

Oslofeltet består i hovedsak av sedimentære bergarter fra tidsperiodene kambrosilur og magmatiske bergarter fra periodene karbon-perm, se figur 7.2 (Bjørlykke 2004; Ramberg mfl. 2013). Pre-kambrisk berg omslutter oslofeltet, og utfolder seg fra Brumunddal i nord til Langesund i sør. Traseen gjennomgår for det meste knollekalk, kalkstein og leirskifer i veksling. Vekslingen gjør det gjennomgående vanskelig å knytte sprekkarakteristikk og bergmasse-

beskrivelser til spesifikke bergartstyper i området. Kartlegging av nevnte bergarter resulterer også i diffuse skiller mellom eksempelvis skifer og knollekalk og skifer og kalkstein. Det er hyppig forekomst av syenitt, mænaitt og diabas, stort sett i form av gjennomkuttende gangbergarter. I tabell 7.3 oppsummeres kartlagte bergartstyper for strekningen Fornebu base til Vækerø. Området påtreffes også av større forkastninger med varierende utstrekning og mektighet.



Figur 7.2: Regionalgeologi over Oslo, med overordnede bergartstyper. Figuren er modifisert fra Bjørlykke (2004)

Tabell 7.3: Oversikt over bergarter, kartlagt ved kjerneoglogging, i området Fornebu base - Vækerø. Modifisert fra ingeniørgeologisk rapport K2A og K2B (PGF 2020b; PGF 2021).

Bergartstype	Beskrivelse	Område
Knollekalk	Tettstilte, lyse knoller eller linser av kalkstein i skifermasse	K2A & K2B
Kalkstein	Lys grå til grå farge med skallfragmenter fra koraller	K2A
Leirskifer	Lys til mørk grå farge, finkornet, stedvis med pyrittorn	K2A
Skifer og kalkstein	Grålig, skifrig stein med linser og lag av kalkstein av ulik mektighet	K2B
Hornfels	Mørk brungrå, tett, finkornet bergart dannet ved kontaktmetamorfose	K2B
Mænaitt	Gangbergart: Lys, svært finkornet, med tilsvarende sammensetning som syenitt	K2A & K2B
Syenitt	Gangbergart: Lys rosa, middels til grov kornstørrelse med mørke mineraler	K2A & K2B
Syenittporfyr	Gangbergart: Lys rosa, finkornet matriks med mørke mineraler og større enkeltkorn	K2A & K2B
Diabas	Gangbergart: Lys grå til sort, finkornet med mørke mineraler	K2A & K2B
Diabasporfyr	Gangbergart: Lys grå til sort, finkornet med mørke mineraler og større enkeltkorn	K2B

Kambrosilur

Samtidig som Iapetushavet lukket seg, og dannelsen av kaledonidene påbegynte, var dagens Osloområdet sterkt påvirket av det globalt stigende havnivået (Ramberg mfl. 2013). Sedimentasjonen i og rundt dagens Oslo økte, som følge av kontinentenes forflytning og fremskuddet av organismer med mineralisert skall i forlandet. Idag finner en

sporene av de skiftende avsetningsmiljøene, i form av vekslende og godt bevarte lag av sedimentære bergarter (Ramberg mfl. 2013). Oslofeltet omtales også Oslograben, og gjør området spesielt unikt grunnet innsynkning i permisk tidsalder. Langs nord-nordøstlig- og sør-sørvestlige forkastninger, med en betydelig spranghøyde, ble avsetningene av de kambrosiluriske lagene godt bevart og unngikk den påfølgende erosjonen i nyere tid. Inndelingene av lagrekken er med utgangspunkt i ulike avsetningsmiljø, basert på fossilfunn, bergartstyper og beskrivelser (Ramberg mfl. 2013). Lagrekken ligger tiltet og kan noen steder i dagen suksessivt følges etasje for etasje, parallelt med forkastningenes strøkretning. Traseen Fornebu-Lysaker og Lysaker-Vækerø befinner seg i hovedsak i etasje 4, med knollekalk og leirskifer i veksling. I henhold til ingeniørgeologisk rapport er bergartene henholdsvis lite til noe oppsprukket, og foldet om en nordøstlig-sørvestlig akse.

Sen-karbon og perm

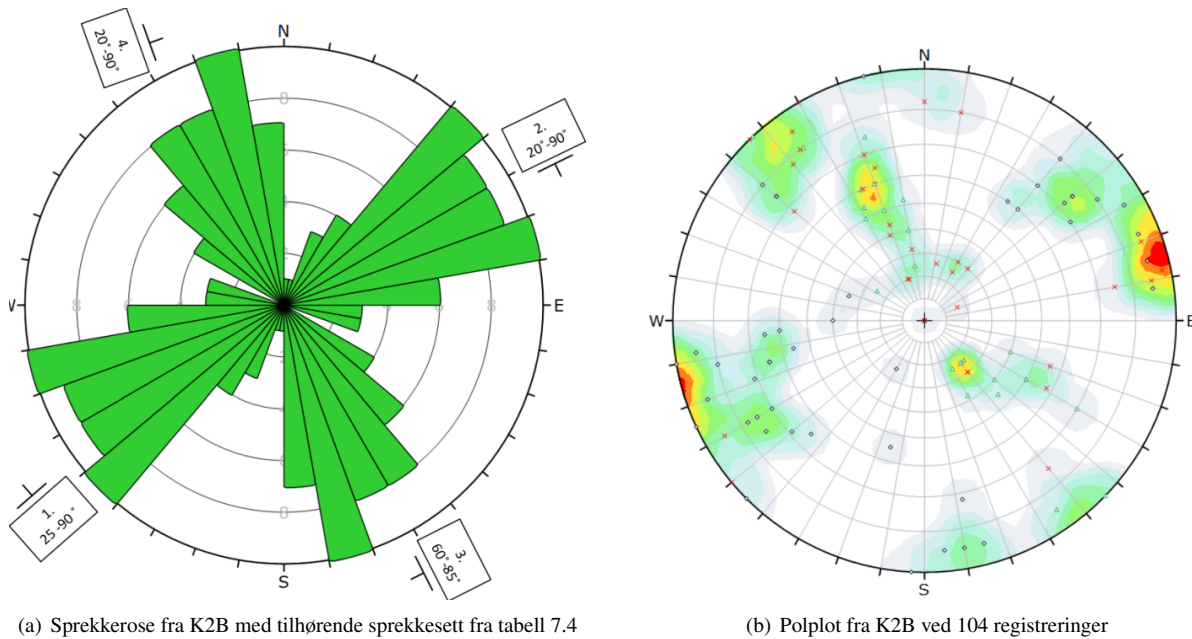
Etter en lengre periode med nedbryting og erosjon i devon, endrer forholdene seg drastisk i Oslofeltet eller Oslograben. Riftdannelsen ledet til store oppspring av magmatisk og vulkansk aktivitet, i sen-karbon og perm, som i dagen utgjør en viktig del av geologien i området (Ramberg mfl. 2013). Dannelse av forkastninger førte til oppknusing og omdanning av sidebergarter. I sonene er det ofte oppknust og delvis leiomvandlet bergmasse, som generelt krever ytterligere stabilitets- og vanntettingstiltak. Det forekommer både regionale og lokale forkastninger eller knusningssoner langs traseen. Disse forekommer ofte i kombinasjon med dyprenner, som følge av erosjon og forvitring langs forkastningsplanet. Samtidig er det hyppig opptreden av vulkanske bergarter i dagen, samt gangbergarter. Avhengig av de ulike dannelsesprosessene og sammensetning, vil egenskapene og utstrekningen variere. Eksempler på type gangbergarter langs fornebutraseen er diabas, syenitt, syenittporfyr og mænaitt (Werenskiold 1911). Gangbergartene har en varierende mektighet fra noen få desimeter til titals *m*, mens forkastningssonene er av større mektighet (Werenskiold 1911).

7.2.2 Strukturgeologi og oppsprekking

I henhold til konkurransegrunnlaget og ingeniørgeologisk rapport, beskrives oppsprekkingen generelt av 2, 3 og 3 pluss sporadiske sprekesett. Grunnet lav overdekning er det stor sannsynlighet for å påtreffte dagberg og større sprekeåpninger. Sprekker parallelt til den sedimentære lagdelingen og foldeaksen, opptrer som oftest med strøkretning NØ-SV og varierende fallretning. Variasjonen er både mot NV og SØ, med fall mellom 30° til 90°. Subvertikale sprekker fremkommer i NV-SØ strøkretning, normalt til foldeaksen. Gangbergarter, forkastninger og sprekker av permisk alder, har typisk N-S retning, med typisk sprekeavstand mellom 0.1-0.3 *m*. Kartleggingen i felt kombinert med kjerneologing viser større oppsprekking i og nært gangbergarter. I tillegg er det observert kalkspat-, kloritt- eller leirfyllte sprekker. De dominerende sprekesettene er gjengitt i figur 7.3 a) og b), samt i tabell 7.4.

Tabell 7.4: Oversikt over feltkartlagte og dominerende sprekeretninger fra Fornebu base til Lysaker. Modifisert fra ingeniørgeologisk rapport (PGF 2020b; PGF 2021)

Sprekesett	Strøk	Fall	Bemerkning
1	210° - 240°	25° - 90° NV/SØ	Dominerende lagdeling knollekalk & skifer
2	40° - 70°	20° - 90° NV/SØ	Lagdeling knollekalk & skifer
3	310° - 340°	60° - 85° SV	
4	310° - 350°	20° - 90° NØ	
5	150° - 160°	75° - 90° SV	



Figur 7.3: Sprekkerose og polplot for strekningen mellom Lysaker-Vækerø. Hentet fra (PGF 2021). Data samsvarer med tilsvarende sprekkerose og polplott som for entreprise K2A

7.2.3 Svakhetssoner og gangbergarter

Gangbergarter fra permisk tid opptrer hyppig i de sedimentære bergartene i Oslo-området (Nordgulen 1998; Werenskiold 1911). Gangbergartene er ofte harde og sprø, sammenlignet med sidebergarten, og derfor ofte mer oppsprukket og vannførende. På Fornebulandet er plassering av gangbergarter og forkastninger, med utgangspunkt i kartleggingen utført av Werenskiold (1911). I tillegg har justering og tilpasning blitt gjort i BIM-modellen basert på seismiske undersøkelser, kjerneboring, lineamentstudie og modellering av bergoverflaten. Grunnet foldning, veksler lagdelingen mellom å opptre steilt og horisontalt. Dette vil da gjøre at svake plan, eksempelvis bentonittlag, veksler i heng, vederlag og vegger.

7.2.4 Kwartærgeologi og løsmasser

Løsmassekart fra NGU tilsier at hovedandelen av løsmasstypene i området er forvittringsmateriale, med moderat til liten mektighet, marine strand- og havavsetninger og fyllmasser. Fra sonderboringer er det også påvist dyprenner som krysser traseen flere steder, i hovedsak er leirfyllte, med grovere konsoliderte masser i grensen mellom berg. Laboratorieundersøkelser og sonderboringer fra dyprennene ved Fornebuporten og Flytårnet stasjon, tilsier lommer med sensitiv leire og kvikkleire. I områdene mellom Fornebu base og Flytårnet er det gjenværende fyllmasser fra etablering og utvidelse av Fornebu flyplass.

7.2.5 Overdekning og spenningsforhold

I den ingeniørgeologiske rapporten og BIM-modellen er overdekningen tolket og sammensatt ved triangulering av grunnboringene og seismiske undersøkelser. De seismiske dataene viser en lavere-liggende bergoverflate, sammenlignet med grunnboringene, som er tolket til å skyldes de anisotrope egenskapene til knollekalken og leirskiferen.

Dermed får en ulike resultater, med noe usikkerhet, grunnet innfallsvinkelen til de seismiske bølgene og støy fra annen infrastruktur. Fra Fornebu til Vækerø er det gjennomgående liten til moderat bergoverdekning, rundt 10 - 40 m, med få strekninger der bergoverdekningen er over 40 m. I områdene Fornebu base til Flytårnet stasjoner det liten til ingen bergoverdekning. I tillegg vil det være ned mot 2 - 8 m ved enkelte deler av hovedtunnel og i tverrslags- og rømningstunneler ved Lysaker og Vækerø.

Terrenget på Fornebulandet er relativt flatt, med varierende bergoverdekning. Variasjonen er stedvis betydelig over korte avstander, spesielt i tilknytning til dyprenner. Nord for Fornebuporten er det en forhøyning på hver side av E18, samt stigende terreng nord for traseen fra Lysaker mot Vækerø. Generelt er løsmassemekktigheten langs traseen mellom 0-20 m, men større i enkelte dyprenner og svakhetssoner. Grunnet den lave overdekningen forventes det lav innspenning, som også bekreftes av spenningsmålinger utført i 2022 av SINTEF ved Fornebuporten stasjonshall. Overordnede retninger og verdier er gjengitt i tabell 7.5. Det er knyttet en del usikkerhet til faktiske spenningsverdier etter vurderinger av E-modul ved laboratorieundersøkelser. Dette er delvis korrigert ved intervall i tabell 7.5.

Tabell 7.5: Oversikt over beregnede hovedspenninger og retninger ved Fornebuporten hentet fra internrapport (Haugsand 2022)

	Gjennomsnittlig [MPa]	Retning [0 - 360°]	Vinkel fra horisontal [0 - 90°]
Sigma 1	1 - 2	247	50
Sigma 2	0.14 - 0.28	119	28
Sigma 3	-0.63 - (-1.26)	14	27

7.2.6 Forundersøkelser og kartlegging

Grunnet prosjektets kompleksitet og sårbarhet for omgivelsene, er det utført en rekke forundersøkelser. Disse er utført både under reguleringsplanfase, forprosjektphase og detaljprosjektphase. Flere av kartlegging og undersøkelsesområdene er overlappende for K2A og K2B, og kan oppsummer slik:

1. Ingeniørgeologisk kartlegging langs hele traseen
2. Refraksjonsseismikk langs hele traseen
3. 7 + 6 kjerneboringer med logging og lugeonmålinger
4. Borehullslogging med optisk televiewer
5. Laboratorieundersøkelser av løsmasser og bergmasser
6. 22 bergbrønner
7. 12 + 4 hydrogeologiske testbrønner i berg for geofysisk og hydraulisk borehullstesting
8. Totalsonderinger, dreietrykksonderinger og bergkontrollboringer

Feltkartlegging ble utført sommeren 2018 og våren 2019 ved 9 lokaliteter, der resultatene samsvarer med berggrunnskart fra NGU, se vedlegg A. Seismiske undersøkelser ble benyttet til å påvise bergoverflate, grunnvannstand, svakhetssoner og løsmassetyper. "Impakt geofysikk" utførte refraksjonsseismiske målinger høsten 2018, med sup-

plerende målinger i området ved Lysaker stasjon. Totalt utgjorde målingene, fordelt på 8 soner, 38 linjer av 12 000m ved bruk av akselererende hammer og vertikolgeofoner. Dataen ble også fremstilt ved tomografisk inversjon, og videre integrert til BIM-modellen.

I tillegg er det utført kjernelogging og lugeontesting av borehull. Plassering og retning er vist i vedlegg C. 7 borehull i forbindelse med K2A og 6 borehull i tilknytning til K2B. Kjernelogging viser relativt god bergmassekvalitet med varierende grad av oppsprekking og sprekkefyll. I henhold til bergmasseparametere varierer gjennomsnittlig Q mellom 11 og 20, samt RQD fra 68 til 93. Gjennomsnittlig J_n mellom 4 og 9, J_r mellom 1.7 til 2.5 og J_a mellom 1.1 til 3.0. Dette beskriver generelt god bergmasse, med enkelt knusningssoner av svært dårlig kvalitet. Dette utgjør sjeldent mer enn 10% av enkeltkjerner, og er eksempelvis overgangssoner mellom gangbergarter og sedimentære lag. Permeabilitet ble målt ved lugeonmåling, med 6m pakkeravstand, 1m overlapp og 10 bar overtrykk. Resultatene fra måling er oppsummert i resultatdelen av oppgaven, i tabell 9.2.

Kartlegging av stoff utføres etter hver salve, ved bruk av verktøyet Bevermapping ved entrepris K2A. Verktøyet tillater manuell sprekkekartlegging, bergmassevurdering ved Q-systemet, registrering av bergartstyper og sikring, kombinert med tolkede MWD data. For K2B var det per 03.02.2023 ikke fastbestemt tilsvarende kartleggingsverktøy, men registrert parametere og innsamlet bordata ved samme grunnlag og hyppighet. Ved entrepris K2B har ingeniørgeolog Martin H. Haugsand utført lidarscanning av flere stuffer, som benyttes som til supplerende geologisk beskrivelse.

7.2.7 Hydrogeologi, grunnvannsovervåkning og poretrykkmålinger

Bergartene i området og langs traseene har lav primærporøsitet og er forholdsvis tette. Vannstrømmen og innlekkasje vil dermed i hovedsak bevege seg langs kanalerdannelser og sprekker. Fra tidligere prosjekter med samme geologiske forhold, er det funnet større vanninntrengning i tett oppsprukkede bergmasser, gjerne parallelt med overganger til gangbergarter. I tillegg bemerkes inn- og utgående soner i forbindelse med regionale og lokale forkastninger som mer vannførende.

Tabell 7.6: Gjennomsnittlig hydraulisk ledningsevne fra prosjekteringsgrunnlag ved Fornebu og nærliggende tunnelprosjekter. * Kun hydrauliske resultater for uspesifisert, intakt berg (PGF 2021).

	Hydraulisk konduktivitet [m/s]				
	Fornebu	VEAS	Bærum	Tåsen	Tanum
Kalkstein & leirskifer	$2.5 \cdot 10^{-7}$ *	$4.6 \cdot 10^{-7}$	$1.2 \cdot 10^{-7}$		$3 \cdot 10^{-7}$
Knollekalk & kalkstein	$1.2 \cdot 10^{-7}$			$7.8 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Skifer	$2.4 \cdot 10^{-7}$			$6.9 \cdot 10^{-7}$	
Oppsprukket kalkstein		$2.3 \cdot 10^{-7} - 2.3 \cdot 10^{-5}$			
Gangbergarter [maksverdi]		$3.2 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$1.9 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Svakhetssoner	$2.8 \cdot 10^{-6}$				

De hydrogeologiske løsmasseforholdene er undersøkt ved totalsonderinger langs hele traseen og ved laboratorieundersøkelser. Løsmassetypene leire, silt og sand viser en hydraulisk konduktivitet på henholdsvis $10^{-9} m/s$, $10^{-8} m/s$ og $10^{-4} - 10^{-5} m/s$. Grunnvannsnivå og poretrykk overvåkes kontinuerlig ved poretrykksmålere eller piezometere og testbrønner, som benyttes aktivt til vurdering av vanntetting. Dette blir mer diskutert i delkapittel

7.3.4 Overvåking og lekkasjekontroll.

7.3 Tettestrategi

I forbindelse med prosjektering av injeksjon er det utarbeidet en egen rapport for utforming av vanntetting (PGF 2019). Dette kapittelet sammenfatter beskrivelsene og vurderingene som legges til grunn for vanntetting. Hovedandelene for rapporten gjelder generelt alle entreprisene, stasjonshaller, tverrslagstunneler og hovedtunneltraseer. Dataene er utarbeidet fra forundersøkelser, ingeniørgeologiske og hydrogeologiske rapporter, risikovurderinger og erfaringsdata, som er blitt utarbeidet i forbindelse med konkurransegrunnlag frem til høsten 2019. Overordnet kan rapporten deles inn ved:

1. Grunnlagsdata og tetthetskrav
2. Risiko og sårbarhetsområder
3. Tiltak og utførelse
4. Overvåking

Kravene som stilles til tetthet er bestemt med utgangspunkt i å unngå skader på eksisterende bebyggelse, natur og infrastruktur. I tillegg stilles det krav til at tunnelen oppnår tilfredsstillende stabilitet og funksjonskrav, samt i størst mulig grad redusere pumpekostnader under drift og ved ferdigstilling. Prosjektområdet befinner seg i all hovedsak under eksisterende bebyggelse og infrastruktur, og tetthetskravet er følgelig satt til $4 \text{ l/min}/100\text{m}$. Kravet gjelder per tunnelstrekning og er uavhengig av tverrsnittet eller antall løp. I den sammenhengen er det etablert ulike tiltaksklasser for ulike strekninger av tunnelen. I figur 7.8 er de prosjekterte tiltakene listet opp, med tilhørende beskrivelse

7.3.1 Generell metode for vanntetting

Tetting med injeksjon utføres ønskelig ved én omgang, lave v/c tall og forsvarlig høyest mulig trykk. Trykket tilpasses bergoverdekning, samt eventuelle observasjoner av utganger i dagen. Kontrollhull etableres i områder der krevende geologiske forhold eller lav bergoverdekning tilsier at det er behov for mer enn én injeksjonsskjerm. Det skal følgelig kontrolleres, ved kontrollhull, for tilstrekkelig tetting etter endt injeksjon. Det er forventet at injeksjonsskjerm bør oppnå en gjennomsnittlig permeabilitet på $1 - 2 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$, for å tilfredsstillende tetthetskravene. Generelt er de foreslåtte og prosjekterte inkesjonsprosedyrene, som illustrert i tabell 7.7. De er kun veiledende og behøver tilpasning etter faktiske forhold, samt respons fra poretrykksregistreringer og innlekkasjemål. Anleggstekniske forutsetninger for å nå tetthetskravene, presiseres ved riktig utrustning, utstyr og gjennomføring. Herunder tilstrebes tilstrekkelig kapasitet ved blande-, pumpe- og registreringsutstyr, samt injeksjonsboring, organisering, opplæring og samhandling mellom operative aktører. Bergsikring, herunder boltelengder og tyngre sikring, krever nøye planlegging og gjennomføring i samspill med vanntetting. Det er utbredt fare for punktlekkasjer gjennom bolter, ved bruk av lange radielle bergbolter i kombinasjon med lav overdekning.

Det tilrettelegges for utnyttelse av kunstig infiltrasjon fra overflaten og tunnel, for å løse kritiske poretrykksreduk-

Tabell 7.7: Prosjekterte injeksjonsprosedyrer for ulike stedlige forhold, modifisert fra (PGF 2019)

Programtype	Grovtetting	Fintetting	Høyrisiko-områder
Bergoverdekning [m]	>30	<30	<10-20
Antall skjermer	1+	1+	2
Skjerm lengde [m]	18-24	21-24	15-21
Hullavstand c/c [m]	0.7	0.7-1	0.5
Overlapp	Minimum tunnelbredde	Minimum tunnelbredde	Minimum tunnelbredde
Injeksjonsmiddel	Industri- og mikrosement	Mikrosement	Mikrosement og kolloidal silika
Maks trykk [Bar]	30-50	20-30	10-20
Kontrollhull	Ja	Ja	Ja

sjoner i anleggsfasen. Grunneiertillatelser og avtale med boreentreprenør, kompliserer prosesser ved infiltrasjon fra terreng. Utgangspunktet er derfor infiltrasjon i berg fra tunnel eller en kombinasjon av terreng og overflate ved kompleks geometri og stasjonshaller.

7.3.2 Tiltaksklasser

Tiltaksvurderinger er utført seksjonsvis for delstrekninger ved både K2A og K2B, i forbindelse med prosjektering, og inndelt slik som vist i tabell 7.8 og vedlegg D. Det bemerkes at dette er veiledende tiltaksbehov, med forbehold om endringer og tilpasninger ved oppstart av anleggsdrift. Under driving vil in-situ forhold og oppnådd tetthet gi større erfaringsgrunnlag for detaljprosjektering av vanntetting. En viktig faktor ved Fornebubanen er overdekning langs traseen. For alle strekninger utgjør 67% av lengden en bergoverdekning under 30 m og 23% med bergoverdekning under 15 m. Bakgrunnen for soneinndelingen er utarbeidede sårbarhetsanalyser og nærliggende forundersøkelser, parallelt til traseen. Overordnet er sårbarhetsvurderinger utført ved vektlegging av følgende punkter:

1. Omfang av eksisterende infrastruktur
2. Løsmassemeknighet og setningsømfintlige masser
3. Bergoverdekning og bergmassekvalitet
4. Omfang av svakhetssoner og gangbergarter
5. Forventet grad av nydannelse av grunnvann

Kombinasjonen av overnevnte faktorer er styrende for hvorvidt områder betegnes lite sårbart, sårbart eller meget sårbart. Vanntett utstøpning vurderes spesielt i områder med stor sårbarhet, følgelig økt risiko og konsekvens ved eventuell innlekkasje i tunnel. Herunder gjelder spesielt overvåking og oppfølging av poretrykks- og setningsutviklingen i anleggsfasen og over tid.

Tabell 7.8: Prinsipp for klassifisering av tiltaksklasser ved Fornebubanen og prosjekterte utstrekning for K2A og K2B, modifisert fra internrapport (PGF 2019)

Tiltak	Tiltaksklasse	K2A	K2B
Systematisk forinjeksjon med industrisement og mikrosegment	1	495 m	185 m
Systematisk forinjeksjon med mikrosegment, 1-2 injeksjonsrunder per sted	2	1726 m	1338 m
Meget omfattende forinjeksjon, minst 2 injeksjonsrunder per sted med mikrosegment i første runde og mikrosegment eller kolloidal silika i påfølgende runde	3	491 m	277 m
Meget omfattende forinjeksjon, minst 2 injeksjonsrunder per sted med mikrosegment første runde og mikrosegment eller kolloidal silika i påfølgende runde, etterfulgt av vanntett støp hvis nødvendig	4	211 m	282 m
Prosjektert vanntett støp	4.1	211 m	130 m

7.3.3 Etterinjeksjon og vanntett utstøpning

Dersom innlekkasjemålinger tilsier at forinjeksjon ikke var tilstrekkelig, utføres tetting ved etterinjisering av punkt-lekkasjer og vannførende sprekker. Tetting utføres ofte manuelt, ved løfteplattform, og det benyttes en-komponent polyuretan. Metoden er lite ønsket da den er tids- og kostnads ineffektiv, og det etterstrebtes grundig kontroll ved for-injisering.

For områder av traseen der bergoverdekningen og avstanden til løsmasser begrenser injeksjonsutførelsen, er det prosjektert for vanntett støp. Oppsummert gjelder dette der tverrsnittets størrelse og geometri, i kombinasjon med overdekning, er blitt vurdert økt risiko for å ikke tilfredsstille tetthetskravene. Tilsammen utgjør dette 1000 m av traseen, med utgangspunkt i vurderinger, risikoanalyser og simuleringer gjort i forbindelse med konkurransegrunnlag for flere av entreprisene. Prosjektert teoretiske sprengningsprofil legger til grunn for tilstrekkelig plass til etablering av vanntett støp, foruten sålen som må utvides. Etablering av vanntett støp gjøres etter at injeksjonsarbeid er fullført, og vurderes på bakgrunn av tre parametere. Poretrykksendring og grunnvannssenkning i målere nærliggende området, samt registrert innlekkasje ved terskelmålinger. Det er per 05.05.2023 ikke etablert vanntett støp for noen av strekningene, ettersom driving av tunnel og sjakter fortsatt pågår.

7.3.4 Overvåking og lekkasjekontroll

I forbindelse med tettearbeidet er det etablerte metoder for kvantifisering av innlekkasje i forbindelse med anleggs- og driftsfasen. Vannmengdemålinger utføres ved terskelmålinger, med V-overløp, som er plassert med maksimal avstand på 200m. Målingene utføres før oppstart av driving og tunnelarbeid, i forbindelse med driftstans over 24 timer. Måleverdiene indikerer grad av innlekkasje for ulike tunnelstrekninger etter endt injeksjon. Måltallene benyttes i hovedsak til dokumentasjon, men benyttes ikke som en aktiv parameter for justering av injeksjon og tettestrategi.

Grunnet de strenge tetthetskravene og kontinuiteten ved driving, er det blitt besluttet å bruke poretrykks- og vannstandsmålinger for å aktivt tilpasse injeksjonsinnsatsen. Ved kontinuerlig overvåking på gitte målepunkter langs tunneltraseen, vil poretrykksendringer indikere vannstrømning og setningspotensial omkring tunnelen. Poretrykk-smålere er plassert i overgangen mellom løsmasser og bergmasse. I tillegg er enkelte målere plassert nært til og i sårbare løsmasseområder, samt infrastruktur. Målingene påbegynte høsten 2018 og justeres for naturlige årstids-

variasjoner. Alle poretrykksmålere og tilhørende plassering, er blitt vurdert individuelt opp mot maksimalt tillatt respons. Dette betegnes varselnivå og alarmnivåer som overholdes ved daglig kontroll og overvåking på anlegget. Eksempler på gitte alarmnivåer er listet opp i tabell 7.9 og eksempler på plassering er gitt i figur 7.4 (PGF 2020b; PGF 2023).

Tabell 7.9: Eksempler på poretrykksmålere og tilhørende alarmnivå hentet fra internrapport. Terrengkote tilsvarer målerens fysiske plassering. Resterende verdier er gitt av poretrykksnivå ved stighøyde (PGF 2023)

Måler	Terrengkote [m]	Gjennomsnittnivå [m]	Varselnivå [m]	Alarmnivå [m]
BB1-18	12.48	11.36	10.32	9.32
PZ1-36	12.99	12.54	11.44	10.44
170PZ-1	13.47	12.47	11.74	10.74
172PZ-1	15.44	11.41	10.51	9.51
PZ1-34	14.55	12.41	11.34	10.34
PZ1-33	20.37	16.85	13.02	12.02
BB1-17	22.43	15.44	12.82	11.82
PZ1-32	29.67	27.83	25.17	24.17



Figur 7.4: Eksempler på plassering av poretrykksmålere (blå firkant) og brønner (rød sirkel), relativt til tunneltrasé (PGF 2023)

8 Valgte områder

Det er valgt ut fem delstrekninger mellom Fornebu base og Vækerø, der kommende kapittel vil redegjøre for de prosjekterte geologiske forholdene, prosjektert injeksjon, feltobservasjoner og spesielle utfordringer. Prosjektert injeksjon baserer seg på kapittel 7.3.2, vedrørende tiltaksklasser. Data er hentet fra konkurransegrunnlag, saksregister ved prosjektdatabaser, samt BIM-modellen. Sistnevnte fungerer i praksis som et prosjekteringsverktøy og grunnlagsdatabase i både innledende og utførende fase av prosjektet. Oppsprekingskarakteristikk beskrives med utgangspunkt fra prosjektering, fra figur 7.3, og gjelder generelt alle delstrekninger. Lagdeling og foldeakse følger NØ-SV strøkretning og dominerende sprekker i NNV-SSØ retning. Totalt er det kartlagt 5 sprekesett i prosjekteringsfasen.



Figur 8.1: GIS-kart - Valgte delstrekninger fra Vækerø til Fornebu base

8.1 Tverrslag Lilleaker

Tverrslagstunnelen befinner seg like ved Lysakerelva, og fungerer som adkomst til driving av hovedløpet fra omtrent pelenummer 6900. Tunneldriving ble påbegynt i september 2022, og utgjør oppstarten av drivingen og vanntetting av entreprisen K2B. Påhugget har blitt prosjektert spesielt, grunnet et 22 m langt eksisterende stoll, med tverrsnitt $6m^2$. Stollen er igjen støpt fra pelenummer 8 - 24. I tillegg er det sårbar infrastruktur tett til traseen, ved eksisterende vei, vann- og avløpsledninger og bebyggelse. Bergoverdekningen fra det eksisterende bergrommet til Lilleakerveien

er prosjektert til 3 m. Fra pelenummer 2 - 8 er stollen en del av sprengningsprofilen. For strekningen fra pelenummer 6.5 til 27 er det montert gitterbuer med utvidet sprengningsprofil. Oppsummert ble det utført tre innledende injeksjonsrunder før videre driving. Tverrsnittsarealet er 78 m² og utstrekningen forløper med 14.5% helning, med varierende horisontalkurvatur mot hovedløpstunnelen. Driverretningen pågår ved stigende pelenummer. Der tverrslagstunnelen påtreffer hovedløpstunnelen, er bergoverdekningen omtrent 30 m. Injeksjonsarbeidet fra påhugget til pelenummer 4 - 50, ble utført i to faser. Første fase omhandlet tverrslagstunnelen, før det i andre fase ble drevet en omlastestasjon. Omlastestasjonen ble etablert av anleggstekniske årsaker, og går vinkelrett ut fra tverrslagstunnelen ved mellom pelenummer 40 - 60. Omlastestasjonen er ikke videre analysert i oppgaven. Overordnet er bergartstypene i området kalkstein og skifer i vekslings.

Tabell 8.1: Tverrslaget Lilleaker - Grunnlag for vanntetting

Pelenummer	Tiltaksklasse	Styrende parametere	Overvåking	Tilknyttede kjerne hull
0 - 70	3	• Infrastruktur	15 poretrykks-	K102
70 - 190	2	• Bebyggelse	målere eller	K101
		• Injeksjon med mikrosegment og kolloidal silika	grunnvannsbrønner innen	K100
		• Kompleks geometri	200 m radius	K7
		• Svakhetsone og gangbergart sør for påhugg, svakhetsone i hovedløp	fra pelenummer 0	

8.2 Hovedløp Lysaker vest

Delstrekningen vil bli benyttet som referanse til andre valgte områder, med hensyn til geologi, injeksjon og oppnådd tetthet. Tunnelløpet er to-spor standard tunnel, med 84 m² tverrsnitt. Tunnelens driveretning er ved synkende pelenummer, og kurver moderat fra nordlig retning mot øst, inn mot Lysaker stasjonshall. Per 26. mars 2023 foregikk det injeksjonsarbeid ved pelenummer 7560, og kontraktentreprise K2A møter K2B omtrentlig ved pelenummer 7450. Tunneltraseen mellom pelenummer 7600 - 7800 forløper hovedsakelig i kalkstein og skifer, uten kartlagte svakhetssoner eller gangbergarter. I henhold til oppsummerte forundersøkelser i BIM-modell, er bergoverdekningen mellom 35 - 48 m, med liten løsmasseoverdekning.

Tabell 8.2: Hovedløp Lysaker vest - Veiledende grunnlag for vanntetting

Pelenummer	Tiltaksklasse	Styrende parametere	Overvåking	Tilknyttede kjerne hull
7500 - 7600	1	• Infrastruktur	5 poretrykks-	K5
7600 - 7850	2	• Bebyggelse	målere eller	K6
		• Injeksjon med mikrosegment	grunnvannsbrønner innen	
		• Økende løsmasseoverdekning	200 m radius fra pelenummer 7700	

8.3 Dyprenne E18

Strekningen fra pelenummer 7800 - 8000 tilsvarer to-spor standard tunnel, prosjektert for både drenert og vanntett utstøpning, ved henholdsvis 84 m² og 117 m² tverrsnitt. Tunnelen er prosjektert med jevnt fall mot lavbrekket ved pelenummer 7800, der det er etablert pumpestasjon. Driveretning er nordgående, ved synkende pelenummer, og

krysser E18 Drammensveien med varierende bergoverdekning. I henhold til BIM-modell påtreffes to svakhetssoner ved pelenummer 7900, og minste bergoverdekning er estimert til 8 m. Dette er antatt å være en dyprenne med større løsmassemektighet, og følgelig prosjektert for vanntett utstøpning mellom 7850 - 7920. Det ble også etablert hydrogeologisk testbrønn V2, vest for pelenummer 7890, der permeabiliteten ble beregnet til $2.7 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Tabell 8.3: Dyprenne E18 - Veiledende grunnlag for vanntetting

Pelenummer	Tiltaksklasse	Styrende parametere	Overvåking	Tilknyttede kjerne hull
7850 - 7882	3	• Infrastruktur	12 poretrykks-	K5
7882 - 7962	4	• Vanntett støp	målere innen	V2
7962 - 8000	3	• Injeksjon med mikrose- ment og kolloidal silika	200 m radius fra	
		• Svakhetssoner	pelenummer	
		• Redusert bergoverdek- ning	7900	
		• Løsmassemektighet		

8.4 Hovedløp Fornebuporten nord

Påfølgende tunneltrase fra pelenummer 8000 - 8300 går inn mot Fornebuporten stasjon. Løsmassemekigheten er mellom 0 - 10 m, samt at topografien øker over en ås, omtrent fra pelenummer 8200 - 8250. Geometrien er overordnet to-spor standardtunnel, med tverrsnittsareal på 84 m^2 . Fra pelenummer 8050 - 8070 er det prosjektert for utvidelse ved nisje på den vestlige siden av tunnelen. Fra BIM-modell og Werenskiold (1911), er det to subparallele svakhetssoner på den vestlige og østlige siden av tunnelen ved pelenummer 8200. Førstnevnte er estimert til å være omtrent 15 m utenfor tunnelveggen og sistnevnte 50 m. Diabas og syenittporfyr opptrer parallelt til hovedsprekkesretningene. Diabasgangene er prosjektert til NNV-SSØ strøkretning, og syenittporfyrgangene i NØ-SV strøkretning. Grunnet omfattende for- og etterinjeksjonsarbeid fra pelenummer 8006 - 8026, er det vurdert nyttig å utvide strekningen ved analysen til og med pelenummer 7985. I den sørlige delen av strekningen påtreffer hovedløpstunnelen en sjakt og et tverrslag, omtrent ved pelenummer 8250. I tillegg er det gradvis utvidelse av tverrprofilen inn mot stasjonshallen, mellom pelenummer 8200 - 8300. Strekningen av undersøkelsesområdet er derfor begrenset til området mellom 7980 - 8200.

Tabell 8.4: Hovedløp Fornebuporten nord - Veiledende grunnlag for vanntetting

Pelenummer	Tiltaksklasse	Styrende parametere	Overvåking	Tilknyttede kjerne hull
7962 - 8000	3	• Infrastruktur	7 poretrykks-	K5
8000 - 8100	2	• Injeksjon med mikrose- ment	målere innen	V1
8100 - 8345	1	• Moderat til liten løs- massemektighet	200 m radius fra	
		• Fire kartlagte gangbergar- ter	pelenummer	
		• Svakhetsone krysser i den sørlige delen av strek- ningen	8100	

8.5 Flytårnet

Det valgte området strekker seg fra pelenummer 9100 - 9200, og vil i anleggsfasen tilsvare en ettsporstunnel med tverrsnittsareal 51 m^2 . Ved ferdigstilling av uttak av sjakt og adkomst, vil strekningen 9100 - 9140 utgjøre ett-

sporstunnel og 9140 - 9330 utgjøre Flytårnet stasjon. Stasjonens tverrsnittsareal vil være 232 m^2 , og plasseringen av stasjonshallen ligger like under hovedvegen, retning Snarøya, og tett opp mot Snarøyveien 30 i øst. Adressen består av store kontorlokaler, samt at like nord for Flytårnet stasjon passerer tunnelen det som betegnes som Telenorddammen. Denne tilknytningen stiller ekstra store krav til vanntetting grunnet rødlistede dyrearter, pumping ut i dagen og setningspotensialet. Fra pelenummer 9110 - 9140 er det kartlagt svakhetsone som sammenfaller med dyprenne, og forventet liten til ingen bergoverdekning. Løsmasseprøver som er testet i laboratoriet, tilsier sensitiv siltig leire i dyprenna. Tettearbeidet er, i henhold til konkurransegrunnlaget, ventet å være krevende og følgelig eventuelt behov for vanntett støp. Under dyprenna er det blitt montert omfattende sikring i form av gitterbuer og rørskjerm, som videre kompliserer injeksjonsarbeidet. Prosedyren består derfor av redusert stikning innledende og utgående sonen, horisontale og radielle injeksjonsskjermer, samt injeksjon fra dagen. Hovedmomentene vedrørende prosjekteringsgrunnlag for injeksjon av strekningen 9100 - 9200, vises i tabell 8.5.

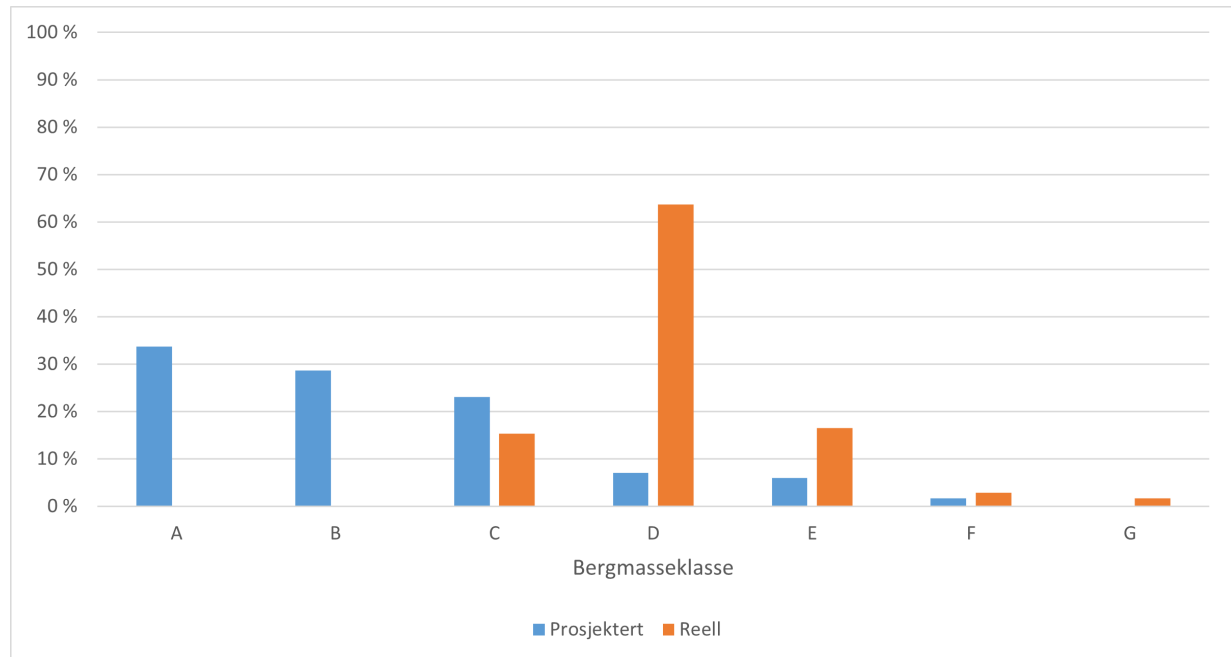
Tabell 8.5: Flytårnet - Veiledende grunnlag for vanntetting

Pelenummer	Tiltaksklasse	Styrende parametere	Overvåking	Tilknyttede kjerne hull
8750 - 9080	2	• Infrastruktur	11 poretrykks-	K2
9180 - 9105	3	• Bebyggelse	målere innen	V1
9105 - 9135	4	• Vanntett støp	200 m radius	
9135 - 9140	3	• Overgang fra stasjonshall	fra	
9140 - 9320	2	• Natur	pelenummer	
		• Injeksjon med mikrosegment, ultrafin sement og kolloidal silika	9100	
		• Bergoverdekning		
		• Svakhetsone og dyprenne		
		• Kryssende gangbergart		

9 Resultater og analyse

9.1 Geologiske forhold ved Fornebubanen

Prosjekterte og reelle bergmasseforhold langs traseen er sammenstilt i figur 9.1 og tabell 9.1. Prosjekterte bergmasseklasser, utarbeidet av PGF, i forbindelse med konkurransegrunnlag. Klasseinndelingen baserer seg på forventet og kartlagt Q-verdi, i henhold til Q-systemet, vist i vedlegg K. I figur 9.1 er søylene sammensatt av gjennomsnittlige verdier for alle valgte områder, og presentert ved prosentvis andel av tunnelengden. Reelle verdier er representert av 176 registreringer, ved ingeniørgeologisk kartlegging utført av byggherre.



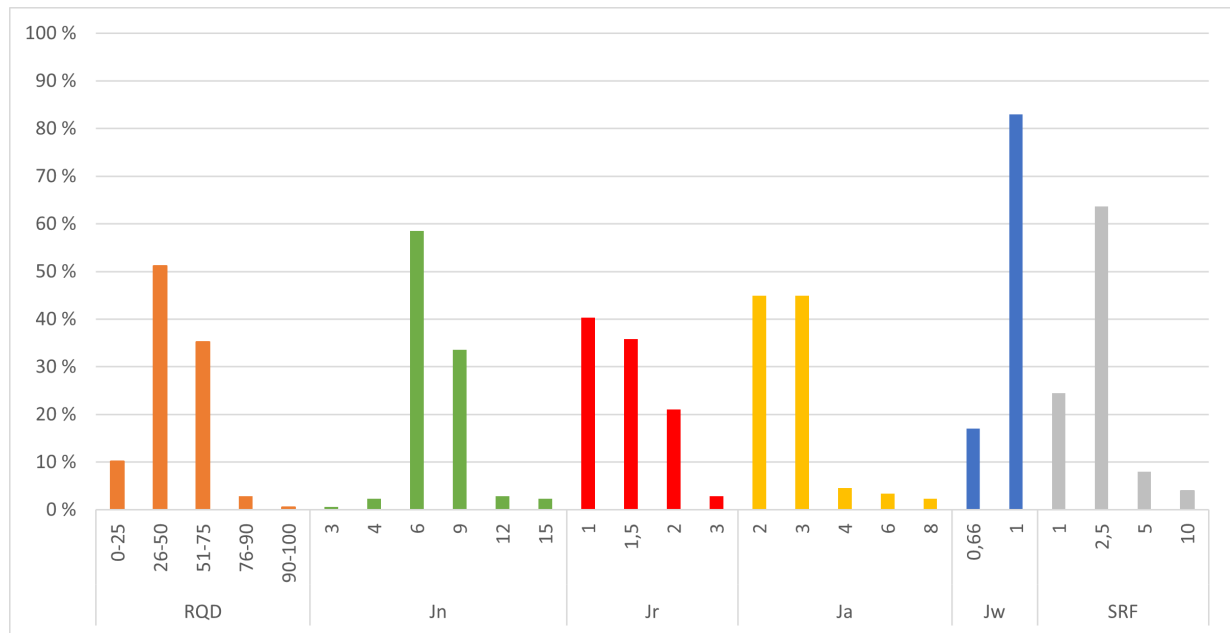
Figur 9.1: Prosentvis fordeling av prosjektert og reelle bergmasseklasser, på bakgrunn av Q-verdier.

I tabell 9.1 sammenlignes gjennomsnittlige Q-parametere som er blitt registrert før og under driving. Registreringene i dagen er utført under prosjekteringsfasen, ved 20 lokasjoner fra Fornebu base til Vækerø, i avstand 0 - 130 m til traseen.

Tabell 9.1: Gjennomsnittlig prosjektert og kartlagt bergmassekvalitet av valgte områder. Kartlagte data er hentet fra henholdsvis konkurransegrunnlag og Bevermappning

Parameter	Prosjekteringsgrunnlag	Kartlagt i tunnel
Q		0.1 - 8
Q'	11 - 20	1 - 10
RQD	68 - 93	26 - 75
Jn	4 - 9	6 - 9
Jr	1.7 - 2.5	1 - 2
Ja	1.1 - 3.0	2 - 3
Jw		0.66 - 1
SRF		1 - 2.5

Det presiseres at prosjekterte verdier utgjør blotninger i dagen, for utvalgte punkter langs tunneltraseen. Registreringene er utført i et begrenset tidsrom og fysisk begrenset av eksisterende bebyggelse og infrastruktur. Detaljert beskrivelse av kartlagte Q-parametere etter driving er gjengitt i figur 9.2.



Figur 9.2: Prosentvis fordeling av kartlagte Q-parametere i tunnel, for valgte områder mellom Vækerø - Fornebu base. Data hentet fra interne dokumenter og fra BeverMapping

Sprekkekartlegging hentet fra BeverMapping, er visualisert ved sprekkeroser og polplot DIPS av Rocscience. Resultatene var forenelig med ingeniørgeologisk kartlegging i dagen. For strekningene av Fornebulandet; Flytårnet, Fornebuporten Nord og Dyprenne E18, er det overveiende kartleggingsfrekvens av sprekkeseett 3 - 5. Ved delstrekning Hovedløp Lysaker vest er sprekkeseett 1 - 2 mest fremtredende. Dette følger naturlig fra tunnelens lengdeorientering, relativt til sprekker og lagdeling. Beskrivelsene kommenteres for enkelte delstrekninger, relatert til tunnelorientering, i underkapitlene 9.5, 9.6, 9.7, 9.8 og 9.9. Ettersom det ikke er foretatt egen sprekkkartlegging for delstrekninger, er det ikke valgt å gå videre ved detaljert analyse av sprekkeorientering og tilhørende resultater.

For å beskrive bergmassens hydrauliske egenskaper, er det gjort beregninger med bakgrunn i lugeonverdier fra permabilitetstesting. Sammenstillingen i tabell 9.2 utgjør både kjerneborhull fra prosjektering og tre lugeonmålinger utført på stoff. Sistnevnte er utført i hovedløpstunnelen ved pelenummer 6900, 6893 og 6884, like etter Tverrslagstunnel Lilleaker. Fra dette kan ulike områder relateres til beregnet hydrauliske konduktivitet. Dessverre er det ikke tilgjengelig data som i større grad relaterer verdiene til spesifikke bergartstyper. Dette gjør analysen noe mer komplisert, ettersom det ikke kan relateres til erfaringstall for tilsvarende bergartstyper i Oslo-området. Data fra lugeonmålinger i tunnel, er gjort tilgjengelig for entreprisen K2B. Det er utført lugeonmålinger i forbindelse med driving gjennom krevende soner ved K2A, men dataen har ikke vært tilgjengelig for videre analyse.

Tabell 9.2: Gjennomsnittlig og median Lugeonverdi og hydraulisk konduktivitet av borehull ved Fornebubanen. Hydraulisk konduktivitet er beregnet fra formel 4.2, 4.3 og 4.4. Modifisert fra konkurransegrunnlag Fornebubanen - Lysaker (PGF 2020b) og Lysaker - Vækerø (PGF 2021)

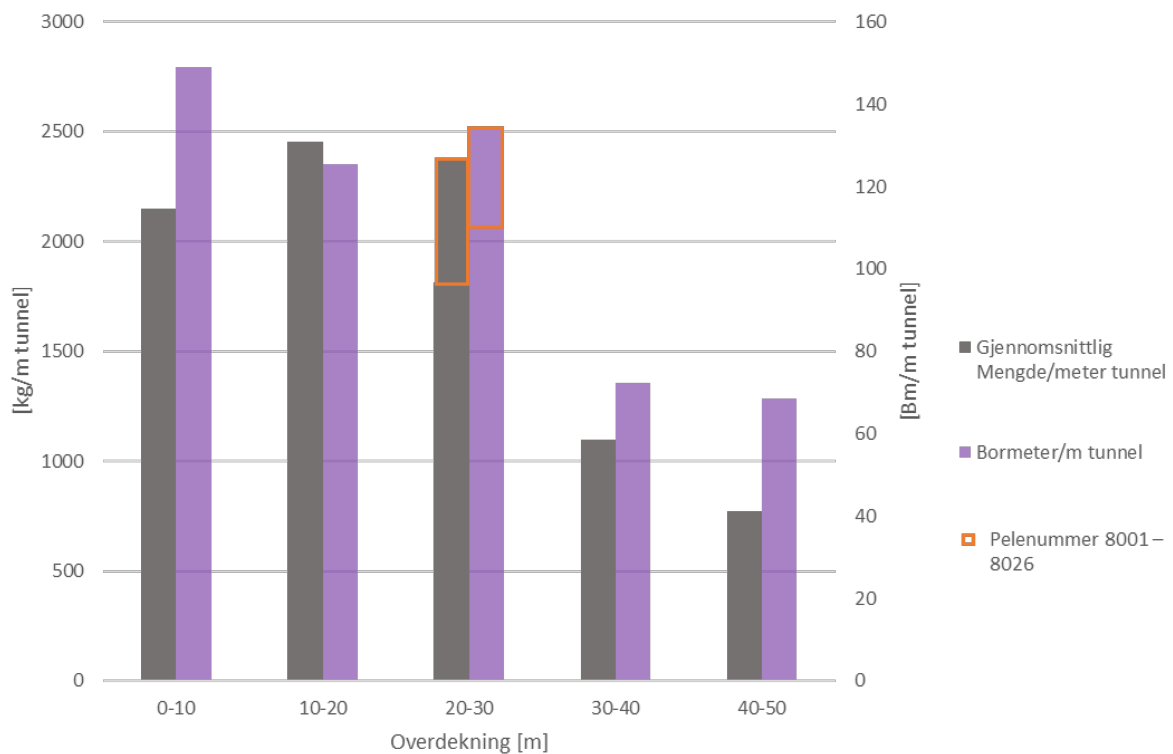
Borehull	Lugeon		k [m/s]	
	Median	Gj.snitt	Median	Gj.snitt
K2	0.67	0.85	$0.9 - 1.5 \cdot 10^{-7}$	$1.1 - 2.0 \cdot 10^{-7}$
K4	0.60	1.13	$0.8 - 1.4 \cdot 10^{-7}$	$1.5 - 2.6 \cdot 10^{-7}$
K5	0.67	0.73	$0.9 - 1.5 \cdot 10^{-7}$	$0.9 - 1.7 \cdot 10^{-7}$
K6	0.17	0.38	$2.2 - 3.9 \cdot 10^{-8}$	$4.9 - 8.7 \cdot 10^{-8}$
K7	0.33	0.87	$4.3 - 7.6 \cdot 10^{-8}$	$1.1 - 2.0 \cdot 10^{-7}$
K100	2.93	5.32	$3.8 - 6.7 \cdot 10^{-7}$	$0.7 - 1.2 \cdot 10^{-6}$
K101	7.00	6.65	$0.9 - 1.6 \cdot 10^{-6}$	$0.9 - 1.5 \cdot 10^{-6}$
K102	4.7	4.96	$0.6 - 1.1 \cdot 10^{-6}$	$0.6 - 1.1 \cdot 10^{-6}$
6900		0.41		$9.4 \cdot 10^{-8}$
6893		0.56		$1.3 \cdot 10^{-7}$
6884		0.71		$1.6 \cdot 10^{-7}$

9.2 Resultater fra injeksjonsdata og geologiske parametere ved Fornebubanen

For å bedre forstå geologiens påvirkning av injeksjon, er ulike geologiske beskrivelser og injeksjonsparametere sammensatt. Datasettet muliggjør å knytte en rekke sammenstillinger, og kommende delkapitler vil dekke utvalgte parametere. Injeksjonsparametere tilknyttet geometri, herunder hullengder, hullantall, c/c , stikning, salvelengde er ikke blitt direkte sammenlignet, ettersom de i aller høyest grad styres av prosedyrene.

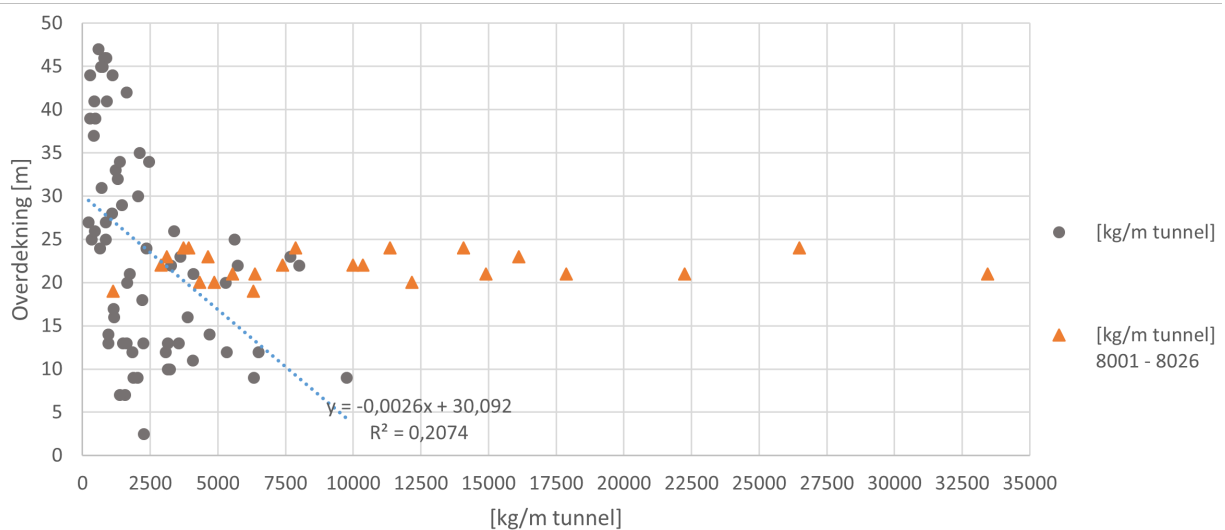
9.2.1 Bergoverdekning

Figur 9.3 illustrerer gjennomsnittlig injeksjonsmengder og bormeter per m tunnel, for alle delstrekningene, med hensyn til bergoverdekning. Det er registrert et betydelig bidrag fra injeksjonsinnsatsen ved strekningen 8000 - 8026, som er illustrert spesielt. Resultatene tenderer til en relasjon mellom overdekning og gjennomsnittlig bormeter per m tunnel ved Fornebubanen. Gjennomsnittlig mengder injeksjonsmasse synker i takt med økende overdekning, foruten der overdekningen er ti m eller mindre. Injeksjonsmengder mot overdekning, for hver enkelt injeksjonsskjermer ved de valgte områdene, er gjengitt i figur 9.4. Syenittsonen mellom pelenummer 8001 - 8026 er symbolisert ved oransje trekant, resterende ved grå sirkler. Ettersom det er utført omfattende etterinjeksjon med MFC og KS i syenittsonen, er det valgt å spesifisere data fra området. Det har ikke vært mulig å skille injeksjonslogger fra opprinnelig driving og etterinjeksjonsarbeidet. Følgelig får en korte avstander mellom injeksjonsskjermer, og kunstig høye injeksjonsmengder per m tunnel. Det henvises her til detaljert beskrivelse av injeksjonsinnsatsen i området delkapittel 9.8 *Hovedløp Fornebuporten nord*.



Figur 9.3: Gjennomsnittlige injeksjonsmengder og bormeter per m tunnel for alle studieområdene. Økningen av bormeter og mengder per m tunnel som knyttes til strekningen 8001 - 8026 er vist ved oransje kontur

Regresjonslinjen i punktdiagrammet er gitt av formel i diagrammet og inneholder ikke data fra syenittsonen. Hvert punkt i diagrammet representerer mengder injeksjonsmasse per m tunnel for hver injeksjonsskjerm. Figur 9.4 viser overordnet tegn til mindre spredning av injeksjonsmengder, ved økende overdekning. Determinasjonskoeffesienten indikerer at det ikke er en tydelig lineær sammenheng mellom injeksjonsmengder og lavere overdekninger.



Figur 9.4: Injeksjonsmengder per injeksjonsskjerm, plottet mot overdekning. Grunnet omfattende etterinjeksjon og følgelig svært redusert avstand fra injeksjonsskjerm til den neste, er det valgt å skille data fra området pelenummer 8001 - 8026. Dette er symbolisert ved oransje trekanter i diagrammet, og er ikke medregnet i den lineære regresjonslinjen.

9.2.2 Geologiske strukturer

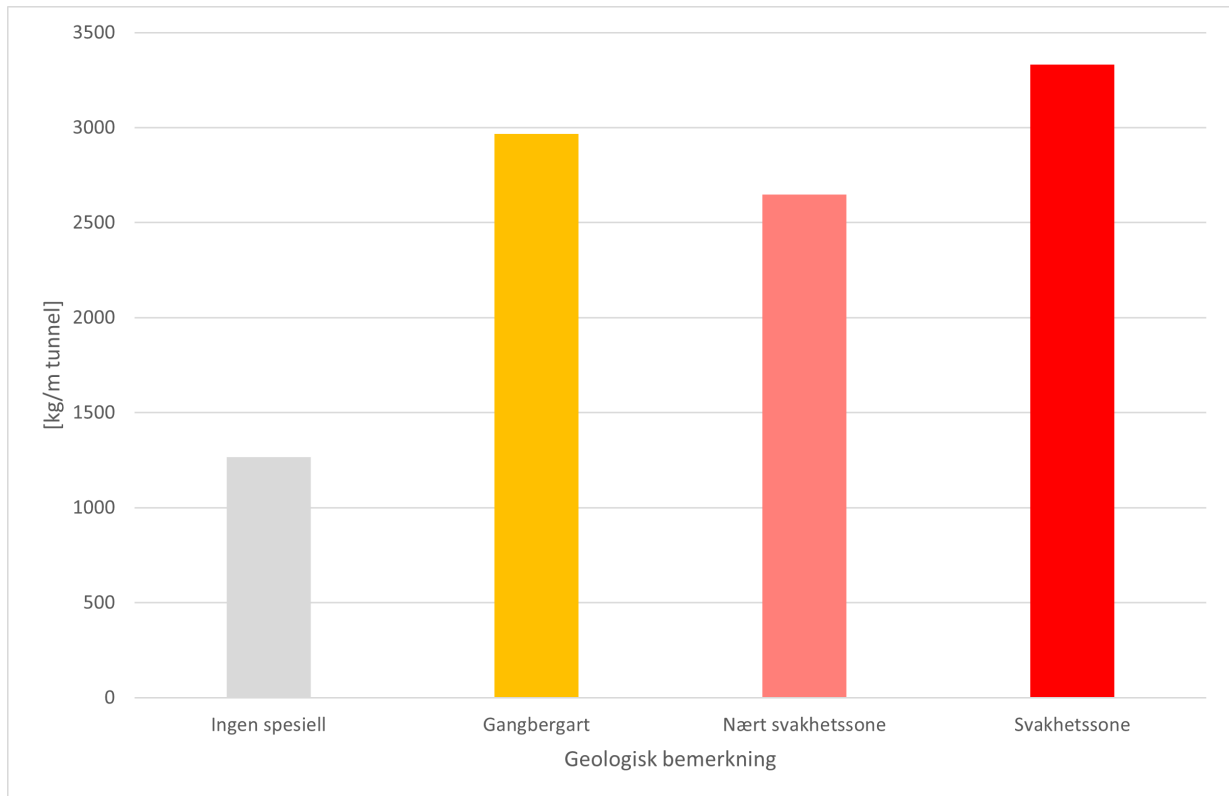
Mengder injiserte masser i soner av spesiell geologisk karakter, er sammenlignet med soner uten spesielle bemerkninger. På bakgrunn av BIM-modell, snittegninger, BeverMapping og ingeniørgeologiske rapporter, er injeksjonsskjermer tilknyttet en av følgende kategorier:

- Ingen spesiell
- Gangbergart
- Nært svakhetszone
- Svakhetszone

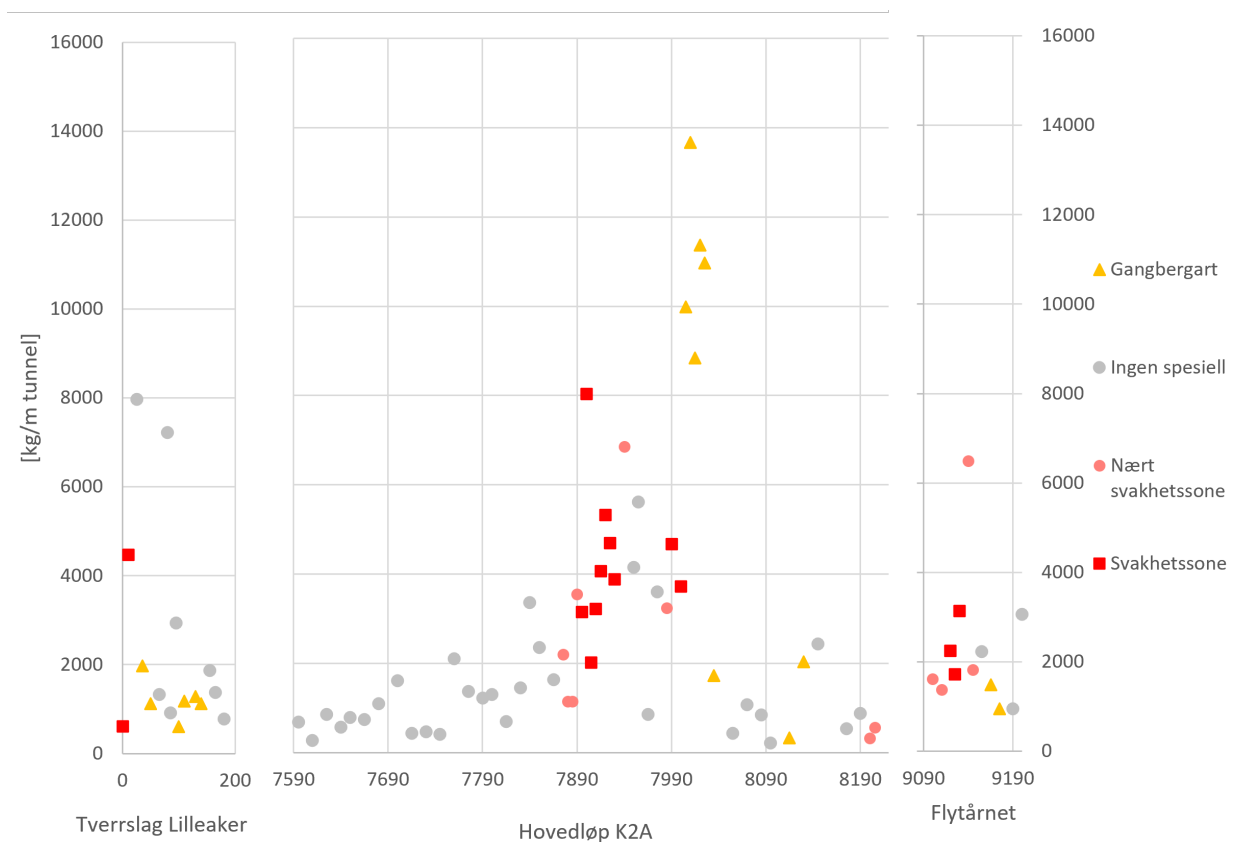
Den ingeniørgeologiske beskrivelsen avhenger av pelenummer ved injeksjonsskjerm, hullengde og geologiens plassering langs traseen. Herunder gjelder der injeksjonsskjermen er i kontakt med områder uten spesielle bemerkninger, prosjekterte svakhetssoner eller gangbergarter. Det er valgt å skille mellom områder i svakhetssoner og der drivingen foregår inn mot svakhetssoner. Typisk gjelder dette henholdsvis tiltaksklasse 3 og 4, og følgelig prosedyreendringer. Dette blir diskutert i større detalj for hver delstrekning. Oppsummering av mengdebeskrivelser, gitt av tabell 9.3, sammenstiller alle valgte områder. Totalt er 84 injeksjonsskjermer vurdert for 890 m tunnel. Underkant av 50% av skjermene er vurdert til ingen spesiell bemerkning, fordelt på 62% av tunnelstrekningen. Den relative økningen injeksjonsmengder per injeksjonsskjerm i tilknytning til svakhetssoner og gangbergarter er henholdsvis 30% og 51%. Sistnevnte er i stor grad påvirket av forenevnte syenittsone. Sammenstillingen av mengder per m tunnel er videre presentert i figur 9.5. I punktdiagrammet, figur 9.6, er injeksjonsmengder for hver enkelt injeksjonsskjerm sammenstilt på bakgrunn av område. Sonene ved Tverrslag Lilleaker og Flytårnet er adskilt fra Hovedløp Lysaker vest, E18 dyprenne og Hovedløp Fornebuporten nord ved å sette sammen ulike diagram, med like vertikallakser.

Tabell 9.3: Oppsummering av registrerte parametere for delstrekninger med utgangspunkt i geologisk bemerkning. Mengder per skjerm og per meter tunnel, er gitt av totale mengder sement og kolloidal silika

Geologisk struktur	Ingen spesiell	Gangbergart	Nært svakhetszone	Svakhetszone	Totalt
Antall skjerm	41	16	12	15	84
Meter tunnel [m]	555	140	95	100	890
Total sement [kg]	699 620	291 332	251 419	333 217	1 575 588
Totale KS [kg]	3863	123 907	-	-	127 770
[kg/skjerm]	17 158	25 952	20 951	22 214	-
[kg/m tunnel]	1267	2965	2647	3332	-



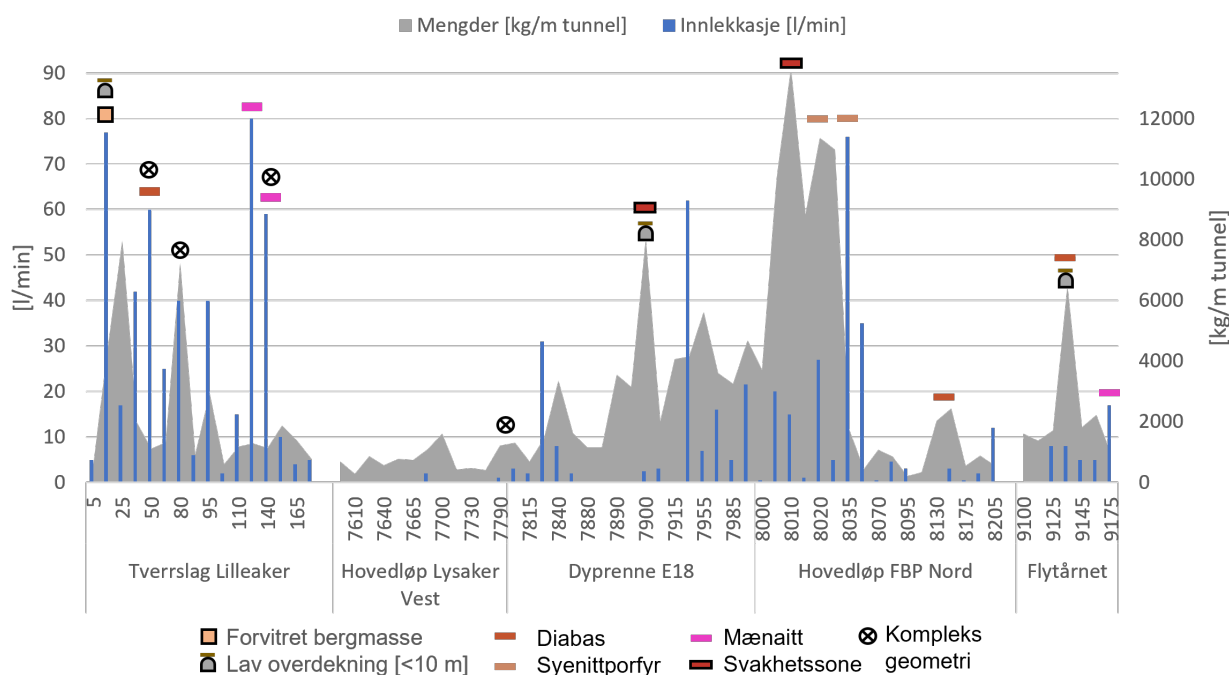
Figur 9.5: Gjennomsnittlige injeksjonsmengder per m tunnel med utgangspunkt i stedlig geologisk beskrivelse



Figur 9.6: Injeksjonsmengder per injeksjonsskjerm, ved område og tilhørende pelenummer. Ulike delstrekninger er ikke overlappende, og skilles ved blank diagramområde, ettersom figuren er sammensatt av tre diagram med lik vertikalakse

9.2.3 Innlekkasje ved injeksjonsboring

Registrert innlekkasje under injeksjonsboring og injeksjonsmengder av MFC og KS, er gjengitt i figur 9.7. Innlekkasje vurderes av operatør på stuff, med bakgrunn av estimert lekkasje fra hvert enkelt borhull. Data er innhentet fra borehullsrapporter, som for K2B finnes digitalisert og K2A ved håndskrevne rapporter. Sistnevnte er følgelig gjennomgått og implementert i egne regneark for samlede mengder innlekkasje per skjerm. Hensikten er ikke å analysere mengdene, men å overordnet illustrere områder av strekningene som er opplevd mer og mindre vannførende. Dette er videre relatert til svakhetssoner, gangbergarter, forvitret bergmasse, kompleks tunnelgeometri og overdekning, ved symboler. Kompleks tunnelgeometri er knyttet til endring av tverrsnittsareal eller lengdeorientering, nisjer eller pumpestasjoner.



Figur 9.7: Innlekkasjedata fra borehullslogging ved søyler og venstre vertikale akse, samt medgåtte mengder per mtunnel ved arealdiagram og høyre vertikale akse. Symbolforklaringen illustrerer ulike geologiske parametere, relatert til område og pelenummer

9.3 Resultater fra overvåking og oppnådd tetthet

Fornebubanen besitter et stort register av poretrykksmålere og brønner, som daglig kontrolleres i forbindelse med driving. Varsel- og alarmnivåer monitoreres automatisk, og benyttes aktivt til å justere injeksjonsinnsatsen. Overordnet er det gjort gode erfaringer ved bruk av poretrykksmålere som verktøy for tilpasning av injeksjon. For K2A er det utarbeidet en egen rapport vedrørende setninger og poretrykksregistrering for områder som er drevet per 23.04.2023. Fra denne er det oppsummert få tilfeller der alarmnivå er nådd, og at overskridelsene maksimalt har vedvart få dager. Poretrykksnivået for samtlige målere, har i ettertid tilbakevendt til normalnivå. Samme rapport beskriver også at det ikke er registrert setninger i forbindelse med anleggsarbeidet, ved nivåeringsmåling og inSAR data.

Registreringer av terskelmålinger er også bemerket i samme rapport. For valgte områder er det kun tilgjengelig

data fra 8080. Ved årsskiftet 2022 - 2023 viste innmåling $3.5 \text{ l/min}/100\text{m}$, som er under fastsatt tetthetskrav på $4 \text{ l/min}/100\text{m}$. Fra målingen er tilbakeberegnet hydraulisk konduktivitet beregnet ved formel 3.15 (Karlsruh, Erikstad og Snilsberg 2003). Estimering er gjort ved ekvivalentradius r_e lik 5 m, injisert sone lik 7 m og innmålt høyde under grunnvannsnivå lik 26 m. Resultatene gir en gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet av den injiserte sonen, k_i , lik $3.2 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$.

Terskelmålinger for alle valgte delstrekninger har i studien ikke vært tilgjengelig for videre analyse, utover slik det er beskrevet i rapporten. Det er derfor i mindre grad vektlagt for analyser og resultat av oppnådd tetthet. Mye av teorien, vedrørende innlekkasje, belager seg på resulterende innlekkasje. Resultatene for delstrekninger, har følgelig tatt utgangspunkt i poretrykksdata og egen kartlegging av drypp og fukt. Fra befaring 31.03.2023, ved fukt- og dryppkartlegging, ble det generelt observert lite fukt og drypp. Dette blir beskrevet i større detalj for hver enkelt delstrekning, fra og med delkapittel 9.5 "Tverrsnitt Lilleaker".

9.4 Prosjektering av vanntetting og prosedyrebestemmelser ved Fornebubanen

9.4.1 Resultater fra intervju - Prosjektering av vanntetting ved Fornebubanen

For å i større grad beskrive inngående valg for prosjektering av injeksjon og vanntetting ved Fornebubanen, ble det utført to semistrukturerte intervju. Intervjuobjektene i denne forbindelse var Oddbjørn Aasen, Senior ingeniørgeolog og fagansvarlig ved Prosjekteringsgruppen Fornebubanen. Bruce Ashcroft, tunnelingeniør og entrepriskoordinatør K2B, ved Prosjekteringsgruppen Fornebubanen. Fagleder for berginjeksjon Ola Woldmo på vegne av etaten Fornebubanen. Spørsmålene har tatt for seg parametere ved injeksjon som omhandler utforming av injeksjonsgeometri, utførelse av injeksjon og materialvalg. Spørsmålene har vektlagt geologiens betydning for valg og justering av injeksjon i prosjekteringsfasen og anleggsfasen. Resultatene viser at geologi vektlegges, både under prosjektering og driving, for valg av ulike injeksjonsparametere. Betydningen av geologien ved detaljprosjektering, er likevel av varierende grad. Hovedsakelig er bestemmelsene i innledende fase på bakgrunn av erfaringstall fra tidligere prosjekter. I prosjekteringsfasen integreres resultater fra forundersøkelser. Lugeonmålinger benyttes i stor grad for å betegne styrende for blant annet materialvalg.

I anleggsfasen tilpasses injeksjonsprosedyrene med hensyn til erfaringer ved injeksjon for andre delstrekninger. Ettersom tunnelen drives fra flere angrepspunkt, er det gjort erfaringer av deler av tunnelen som er viderført til andre områder. Det økende erfaringsgrunnlaget er en svakhet i studien, ettersom prosedyreendringer for deler av de valgte strekningene, ikke kommer av fysisk tilpasning. Anleggstekniske løsninger, praktiske utfordringer og hensyn til forutsigbarhet ved utførelse, fremkommer som en viktig del av injeksjonsutformingen. Faktorende begrenser tilpasningen av injeksjon til stedlige geologiske forhold. Tilpasning av ulike parametrene ved utførelse av injeksjon og skjermgeometri, oppsummeres i vedlegg E.

Tabell 9.4: Vurderingskategorier for tolkning av geologiske parameteres betydning ved valg og justering av injeksjonsgeometri og utførelse av injeksjon ved Fornebubanen

Geologisk betydning for injeksjon	Symbol
I større grad	✓
I noen grad	—
I liten grad	✗

Tabell 9.5: Tolket grad av geologiske parameteres betydning, for valg og justering av injeksjonsgeometri og utførelse av injeksjon ved Fornebubanen

Parameter	Prosjekteringsfase	Anleggsfase
Hullavstand (c/c) [m]	✗	—
Stikning [m]	✗	—
Hullengde [m]	✗	—
Overlapp [m]	✗	—
Salvelengde [m]	✗	✓
Antall omganger	—	—
Antall kontrollhull	—	—
Sement	✓	✓
Kolloidal silika	✓	✓
Trykk	—	—
Volum	✗	—

9.4.2 Resultater prosedyresammenstilling

Injeksjonsprosedyrer utarbeides kontinuerlig ved driving av Fornebubanen, og justeres etterhvert som erfaringsgrunnlaget øker. Injeksjonsarbeidet ved Fornebubanen er byggherrestyrt, som vil si at utformingen og de endelige avgjørelsene bestemmes av byggherre. Sammenstilling av injeksjonsprosedyrer er blitt foretatt ved gjennomgang av prosjektets informasjonssystemer og injeksjonslogger fra valgte områder. Geometrisk utforming av injeksjonsskjermer kommuniseres ved meldinger fra byggherre til entreprenør. Beskrivelsene for utførelse av injeksjon og krav til dokumentasjon, er som oftest vedlagt i byggherremeldingene i egne dokument. Overordnet beskriver prosedyrene krav til utførelse ved fastsatte kriterier for trykk og injisert volum. Med utgangspunkt i ulike resepter med ulike W/C-tall, defineres en stegvis utførelse av injeksjon. En typisk injeksjonsprosedyre er beskrevet i tabell 9.6.

Tabell 9.6: Typisk beskrivelse gitt ved injeksjonsprosedyre for K2A. Hentet fra prosjektets informasjonssystem, ved K2A

Resept 1: w/c = 1.0, max 8 % silika-slurry

- Heng/øvre del av vegger: Masseinngang inntil ca 500 liter og/eller stopptrykk er oppnådd
- Såle/nedre del av vegger: Masseinngang inntil ca 750 liter og/eller stopptrykk er oppnådd
- Hvis stopptrykk ikke oppnås byttes det til resept 2

Resept 2: w/c = 0.8, max 8 % silika-slurry

- Masseinngang inntil ca 400 liter og/eller stopptrykk er oppnådd
- Hvis inngang 200 liter uten trykkoppbygging settes hullet på pause ca 10 min før pumping gjenopptas med ytterligere 200 liter og/eller stopptrykk er oppnådd.
- Hvis stopptrykk ikke oppnås byttes til resept 3.

Resept 3: w/c = 0.6, uten silika-slurry

- Hullet avsluttes med så tykk masse som mulig. Masseinngang inntil 200 liter og/eller trykk er oppnådd

Totalt mengde ca. 800 kg/hull

Pumpeflow 15-20 liter/minutt ved jevne trykkoppbygging.

Det skal tas hyppige kopptester for å kontrollere avbindingstiden for alle resepter

Hvis det registreres plutselig trykkfall under pumping, skal pumpingen stanses og hullet settes på pause; videre pumping på hullet vurderes på stedet i samråd med kontrollør.

Ved gradvis trykkoppbygging mot stopptrykk aksepteres at mengden økes; tilpasses og avklares med kontrollør på stedet. Hvis utgang i stuff settes hull på pause/byttes til tykkere masse/brukes kiler og drev.

Såle: 30 bar

Vegg: 25 bar

Heng: 20 bar

Sammenstillingene er gjort på bakgrunn av tiltaksklasser, og er forsøkt generalisert for alle områder av entreprisene K2A og K2B. Enkelte tilnærminger er gjort for prosedyrer og tilhørende resepter, på bakgrunn av tidspunkt for driving. Ettersom erfaringen fra vanntetting og driving utvikles i anleggsfasen, er det funnet enkelte justeringer som ikke er betinget av geologiske forhold eller utførelse av injeksjon i sin helhet. I enkelte områder er det hyppige tilpasninger av prosedyrer, over korte avstander. Resultatene av prosedyresammenstilling er beskrevet detaljert i vedlegg F og G, for henholdsvis K2A og K2B. Det er valgt å skille mellom entreprisene, ettersom de har ulikt tidspunkt for oppstart og ulike entreprenører.

Resultatene viser at det er relativt liten endring av injeksjonsparametere for tiltaksklassene 1 og 2. En bemerkning er gjort vedrørende makstrykk, som kontraktsmessig er begrenset til 100 bar. Makstrykket ble satt til 30 bar, etter at det ble utført spenningsmålinger ved Fornebuporten stasjonshall.

For tiltaksklasse 3 er det større variasjon av injeksjonsparametere, for ulike delstrekninger. Eksempelvis er det benyttet 18 m hullengder for strekningen mellom pelenummer 7950 - 7985, mot 21 m for resterende områder med tiltaksklasse 3. Hullantallet varierer mellom 35 og 58, trolig innvirket av tunneltverrsnittet og økning i antall hull i stuff. Sistnevnte benyttes i områder der det den samlede observerte innlekkasjen er stor. Trykket, i vegg og heng, reduseres ved lavere overdekning. Stikningen er i enkelte områder tilpasset spesielle geometriske utforminger, som nisjer og pumpestasjoner.

De største variasjonene av prosedyrer gjelder for tiltaksklasse 4. Det er i stor grad utført stedlige tilpasninger, på bakgrunn av observert innlekkasje på stuff, bergmassekvalitet og overdekning. Generelle bemerkninger ved injeksjonsparametere er redusert c/c og hullengder. Parametrene er henholdsvis 0.5 m og ned mot 12 m for delstrekning Hovedløp Fornebuporten. Dette vil bli presentert spesielt for strekningen i delkapittel 9.8.

Ved Flytårnet er det blitt utarbeidet en særskilt prosedyre, betegnet IP-Flytårnet, for å oppnå tilstrekkelig vanntetting ved eksepsjonelt lav bergoverdekning. Ved pelenummer 9120 er det prosjektert for 2.5 m bergoverdekning og større løsmassemektighet. Det er følgelig ikke mulig å utføre normal skjermgeometri, uten å komme i direkte kontakt med løsmasser. Løsningen har innebefattet horisontale injeksjonshull, ved et større hullantall i stuff. Salvelengden er også redusert til 1.5 m gjennom svakhetssonen.

En overordnet sammensetning av injeksjonsmengder for valgte delstrekninger, er vist i tabell 9.7. Tabellen viser omfanget av injeksjonsmengder, på bakgrunn av ulike injeksjonsmaterialer som er benyttet.

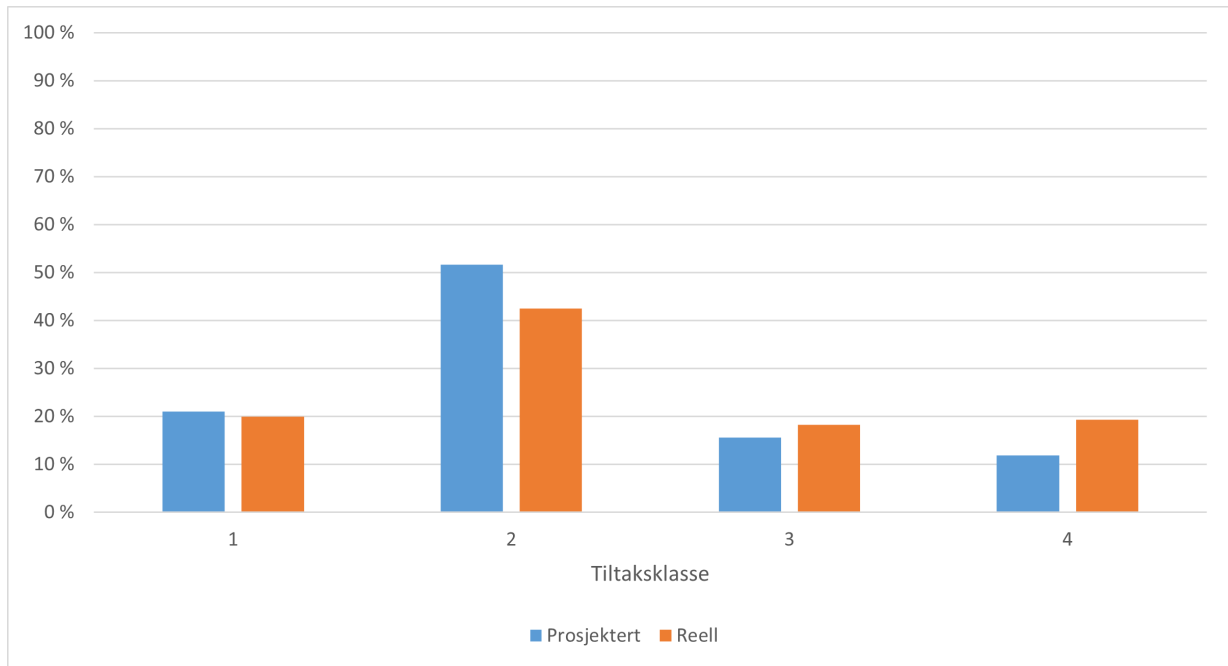
Tabell 9.7: Oppsummering av registrerte injeksjons-og geologiske parametere for ulike delstrekninger med utgangspunkt i injeksjonsmaterialer

Entreprise	K2B	K2A	K2A	K2A	K2A	K2A	K2A
Pelenummer	0-190	7600-7830	7830-7953	7953-8040	8040-8200	9100-9145	9145-9200
Materialer	MFC + KS	MFC	UFC	MFC + KS	MFC	UFC	MFC
Q-verdi	0.05 - 8.3	0.9 - 6.3	1 - 2.8	0.16 - 5.2	1.3 - 3.8	0.2 - 2.7	0.2 - 3.0
Overdekning [m]	3 - 30	28 - 49	9 - 29	18 - 25	18 - 41	3 - 12	12 - 14
Innlekkasje fra boring [l/min]	487	39	85	187	61	16	17
Total sement [kg]	250 318	235 785	468 671	286 193	151 456	133 702	107 296
Total KS [kg]	10 476		3863	113 431			
[kg/m tunnel]	1373	1025	3842	4593	947	3343	1788
[kg/bm]	11.4	12.4	27.3	20.5	12.6	16.2	29.1

9.4.3 Vurdering av tiltaksklasser

Med utgangspunkt i tiltaksklassene, slik beskrevet i kapittel 7.3.2, er sammenstilling av strekninger for valgte områder oppsummert ved figur 9.8. Data utgjør seksjoner av 5 m tunnel, der de reelle tiltaksklassene er vurdert på bakgrunn av utført injeksjon og tilhørende injeksjonsprosedyrer. Prosedyrene er beskrevet i detalj, i vedlegg F og G. Inndelingen av prosedyrene er gjort med på bakgrunn av injeksjonsparametere relatert til geometrisk utforming og utførelse av injeksjon.

Resultatene illustrerer at det er påtruffet mer krevende soner langs tunneltraseen, sammenlignet med prosjektering. Overordnet er det relativt moderat til liten endring av tiltaksklassedeling. Dette indikerer at prosjektering av delstrekningene, har vært relativt optimal. Likevel er det en endring, sett for tiltaksklasse 2 og 4. Dette er funnet til å skyldes sonen mellom pelenummer 7985 - 8026. Prosjektering for sonen 8000-8100 tilsa behov for injeksjon ved én til to omganger, ved tiltaksklasse 2. Utført injeksjonsinnsats tilsvarer tiltaksklasse 4 eller over, ved omfattende etterinjeksjon ved bruk av MFC og KS. Totalt sett er skjermavstanden for strekningen ned mot én til to m. Dette vil i større grad bli redegjort, i delkapittel 9.8.

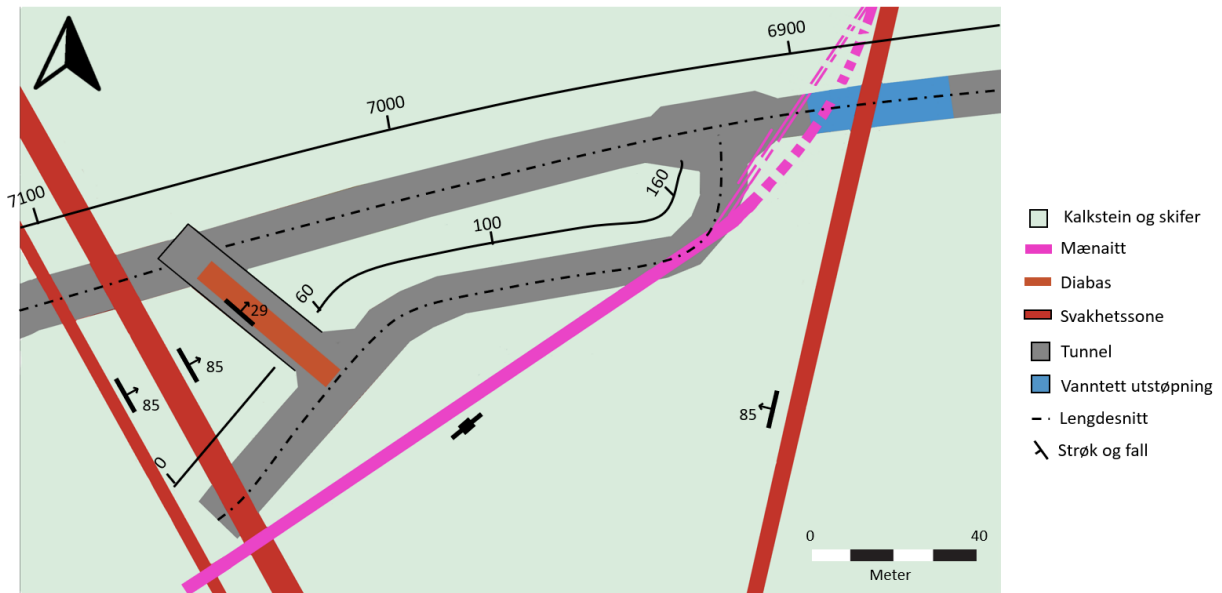


Figur 9.8: Prosentvis fordeling av prosjektert og registrerte tiltaksklasser, på bakgrunn av injeksjonsprosedyrer. Registreringer gjelder for valgte områder mellom Vækerø - Fornebu base

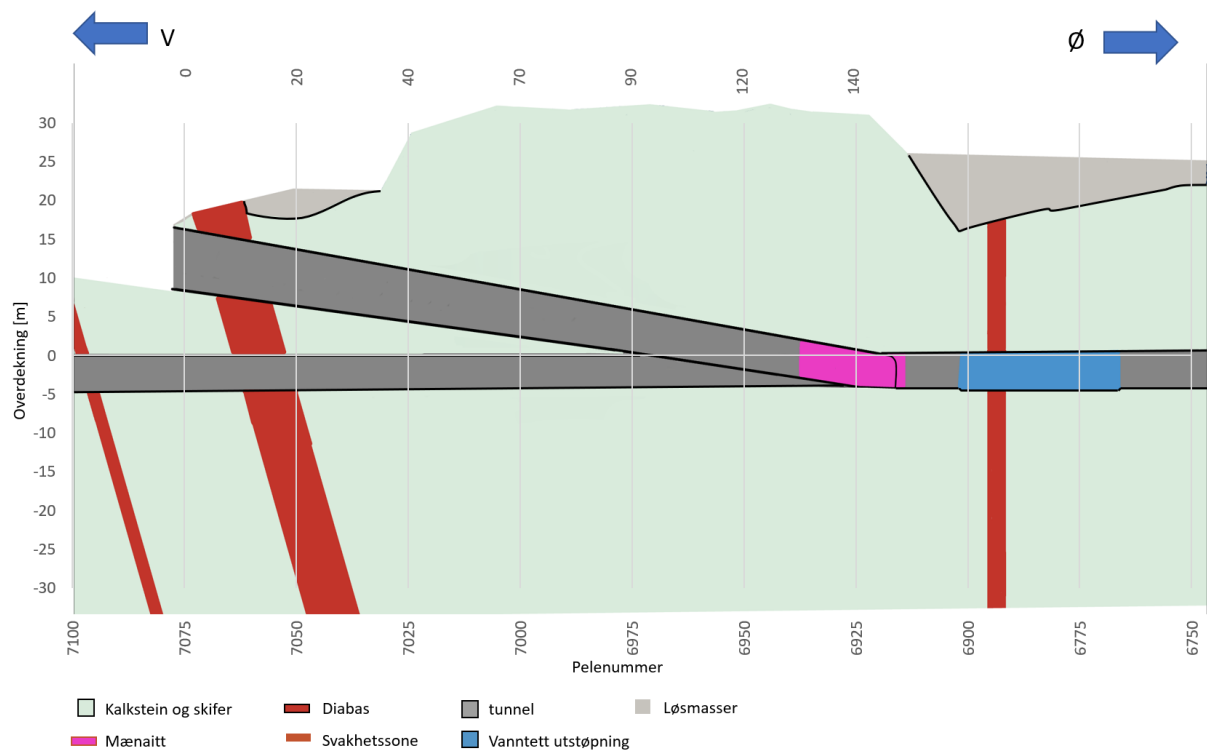
9.5 Tverrslag Lilleaker

9.5.1 Geologiske beskrivelser

Området er i hovedsak bestående av kalkstein og skifer veksling, med opptreden av svakhetssoner og gangbergarter. I figur 9.9 og 9.10 er tunneltrasé, gjeldende bergartstyper og svakhetssoner gjengitt fra BIM-modellen. Ved prosjektering ble mænaittgangen inntegnet sør-vest for tverrslagstunnelen. Strøkretingen var tilsvarende som figur 9.9, men lineamentet ble ikke videreført forbi ca. pelenummer 10 av tverrslagstunnelen. Etter oppstart av driving ble mænaitt påtruffet ved omtrent pelenummer 140, i høyre del av heng. Forlengelsen av mænaittgangen forbi pelenummer 160 i tverrslagstunnelen er delvis tolket til å følge svakhetssonen i øst. I hovedløpstunnel, omtrent pelenummer 6905 og t-kryss, ble mænaitt observert i høyre vegg og heng. Diabas er også påtruffet sporadisk, ved pelenummer 113 og i omlastestasjonen. Gangene er funnet til å være fra 0,4 - 1 m bred, og opptrer parallelt til hovedsprekkesett 1 og 3. Grunnet tverrslagets helning og ovenliggende topografi, er det gradvis økende bergoverdekning fra pelenummer 25 - 190. Tilnærming for gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet er gjort på bakgrunn av permeabilitetstesting i borehull. Nærliggende kjerneborhull K100, K101 og K102 viser relativt høye Lugeonverdier mellom 4 - 7. Forventet innlekkasje, ved formel 3.14 og 3.9, blir henholdsvis 430 - 590 l/min/100m og 394 - 538 l/min/100m. Dette tilsier et stort tettebehov i anleggsfasen. Beregningene er i stor grad sensitiv til bergmassens hydrauliske konduktivitet og registrert høyde under grunnvannsnivå.



Figur 9.9: Geologisk oversikt over hovedløpstunnel og tverrslagstunnel i området Lilleaker. Bergartstype, svakhetssoner og tunneltrase er hentet på bakgrunn av prosjektering og BIM-modell. Mænaitt- og diabasgang er inntegnet med utgangspunkt i ingeniørgeologisk kartlegging fra byggherre og studering av fotogrammetri og 3D visualisering. Figuren er modifisert fra BIM-modell og BeverMapping



Figur 9.10: Geologisk snitt av tverrslagstunnel i området Lilleaker. Illustrasjonen er en simplifisert grunnet kompleks geometri, men illustrerer kryssningen av svakhetssoner og mænaittgang. Overdekning er i all hovedsak tilnærmet tverrslagstunnelen, og vil ikke være representativ for hovedløpstunnel; grunnet perspektiv. Pelenummer i figur er relatert til BIM-modell, men forsøkt tilpasset for tverrslagstunnelen grunnet kombinasjon av horisontal- og vertikalkurvatur inn mot hovedløpstunnelen. Figuren er modifisert fra BIM-modell og BeverMapping

Områdebetinget bergmassebeskrivelse er sammenstilt, på bakgrunn av Q-kartlegging, og gjengitt i figur 9.15. Dataen

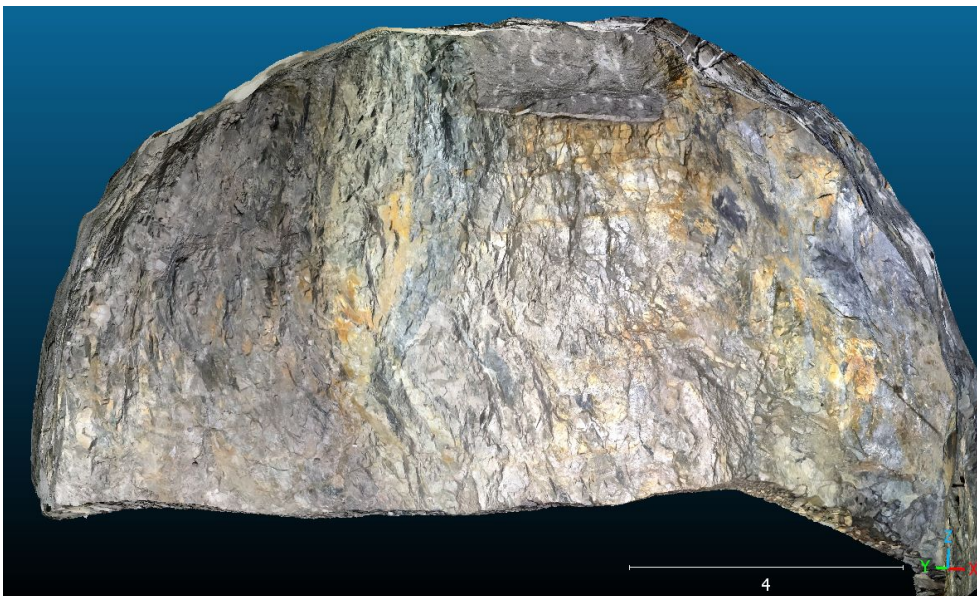
er gjeldende fra pelenummer 1-160, per 27.03.2023. Bergmassekvaliteten er skiftende for hele strekningen varierer fra god til svært dårlig, samt at påhuggsområdet beskrives ved ekstremt til usedvanlig dårlig berg. Fra påhugget til pelenummer 51 og i omlastestasjonen, er gjennomsnittlig Q-verdi 1.0, og varierer mellom 0.01 - 3. Bergmassen beskrives forvitret, leiromvandlet bergmasse og oksiderte sprekkeflater. En slags bergmekanisk grense sees i relasjon til diabasgangen som gjennomgår omlastestasjonen. Gangen krysser fra venstre vederlag, slakt over mot høyre ligg for innledende og midtre del av tunneltverrsnittet. Fra pelenummer 51 til 135 er det jevnt økende bergmassekvalitet med overdekning. Ved pelenummer 140 reduseres kartlagt RQD betraktelig og Jn øker. Her er tunnelens orientering relativt parallell til sprekkesett 3 - 5.

9.5.2 Geologisk beskrivelse ved lidarscanning med fotogrammetri

Detaljbeskrivelse av stedlig geologi ved Tverrslag Lilleaker er visualisert fra lidarscanning med mobiltelefon, og fremstilt som tredimensjonal visualisering i programvaren CloudCompare. Metoden registrer både avstand til objekt ved refleksjon av laser i kombinasjon med registrering av farger ved fotografi. Resultatene illustrerer fremtredende geologiske forhold ved Fornebubanen. Datagrunnlaget er sammensatt av egen tolkning av lidarscanning og ingeniørgeologisk kartlegging utført av byggherre.

Stuff 21 - Forvitret bergmasse ved påhugg

Utsnittet i figur 9.11 visualiserer skifrig og tett oppsprukket bergmasse, med økt grad av forvitring. Bergoverflaten fremstår oksidert og stedvis omvandlet, i sentrale deler av stoffen. Pelenummer 21 er nært tilknyttet påhuggsområdet, og den igjenstøpte stollen er synlig i øvre del av heng. Bergoverdekningen i området er omtrentlig 12 m. Q-verdien for gjeldende stoff er satt til 0.2.

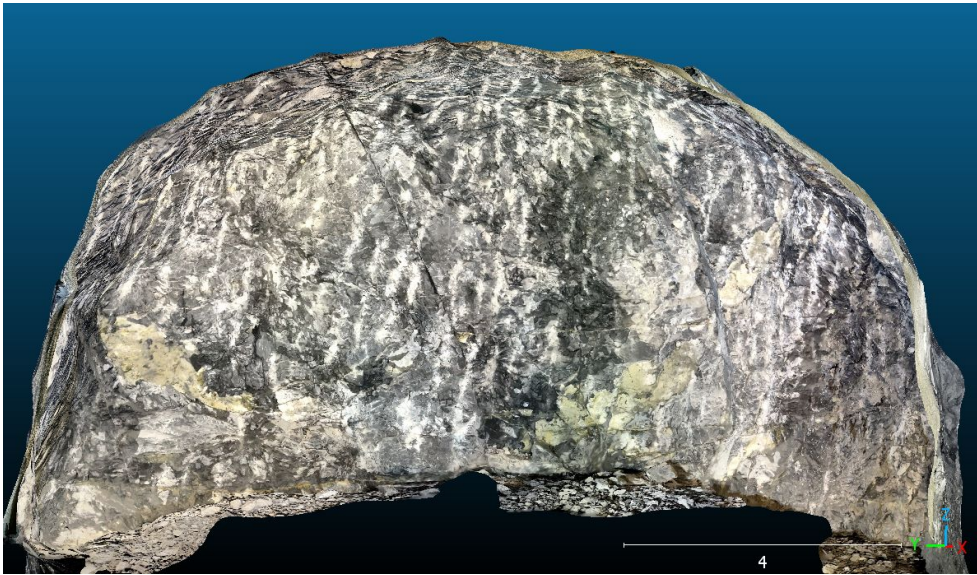


Figur 9.11: Resultat fra scanning av stoff ved pelenummer 21. Scanning og visualisering er fremstilt av Martin H. Haugsand

Stuff 82 - Knollekalk og gjennomgående sprekker ved moderat bergoverdekning

Stuff ved pelenummer 82 er fremstilt i figur 9.12, der bergoverflaten fremstår betydelig mindre forvitret enn stoff 21. Stoffen domineres av hvite linser av kalkstein, som er tolket til å indikere knollekalk. Sentralt i stoffen er det

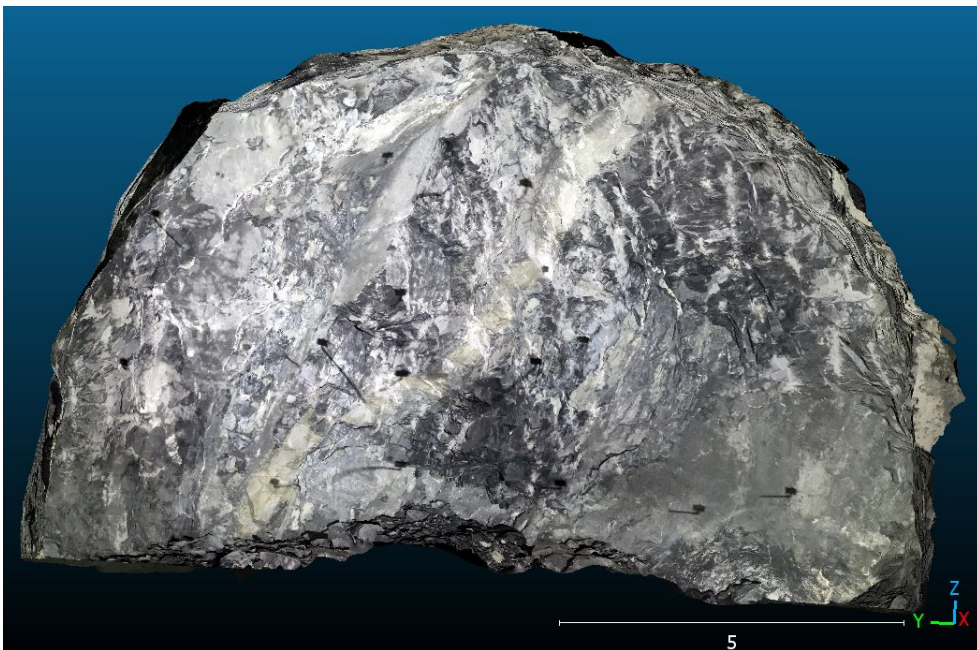
en fremtredende sprekk med steilt fall, NØ-strøkretning og moderat sprekkåpning. Bergoverdekningen er 25 m i området. Brungrå flater i nedre venstre og høyre side av stoff er i modellen synlige sprekkeflater. Fargen er tolket til å være injeksjonsmasser fra foregående injeksjonsskjerm fra pelenummer 14.



Figur 9.12: Visualisert resultat fra scanning av stoff ved pelenummer 82. Scanning og visualisering er fremstilt av Martin H. Haugsand

Stoff 113 - Skifrig bergmasse med linser av kalkstein og fremtredende diabasgang

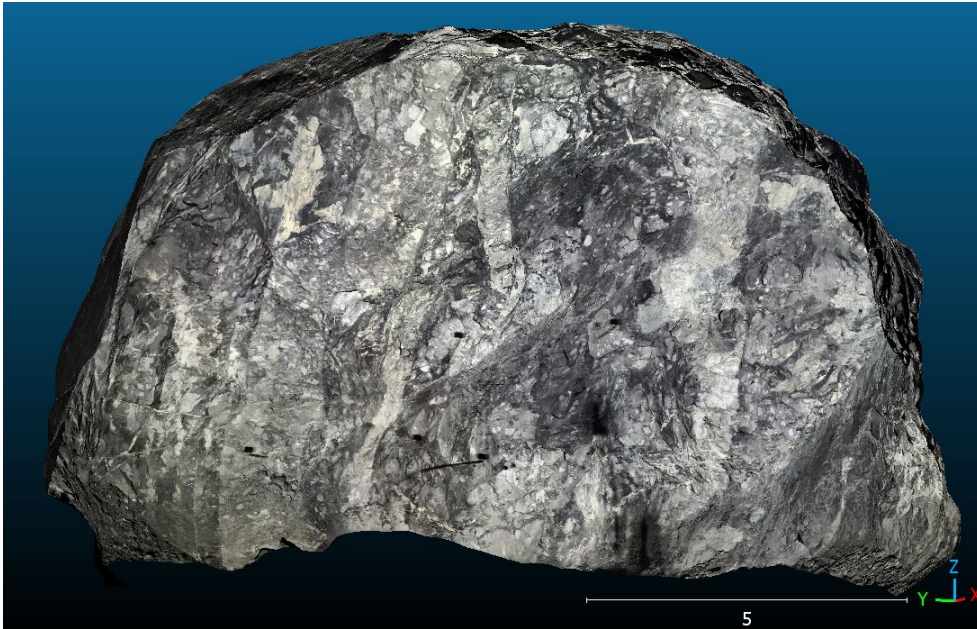
Lineasjoner i bergmassen indikerer foldning, og bergartstypen for gjeldende stoff er ikke tolket. Sprekkeflater i øvre venstre vederlag og sentralt-venstre i stoff, fremstår plane. Fra venstre del av liggen til høyre del av heng er det en gjennomgående diabasgang, NØ-strøkretning, med distinkt farge. Skygge fra mobiltelefon og teleskopstang er synlig flere steder i visualiseringen, og må ikke forveksles med skygge i bergmassen.



Figur 9.13: Visualisert resultat fra scanning av stoff ved pelenummer 113. Scanning og visualisering er fremstilt av Martin H. Haugsand

Stuff 141 - Skifrig og foldet bergmasse med linser av kalkstein og fremtredende mænaittganger

Tilsvarende bergartsbeskrivelse som foregående stuff, med synlig foldning sentralt i stuff. Bergmassen fremstår mer oppsprukket i venstre vederlag. Fra ingeniørgeologisk kartlegging fra byggherre ligger mænaittgangen parallelt til tunnel i høyre vegg. Q-verdien er vurdert til 1.0. Stoffen beskrives også ved tre ulike soner i profilet.



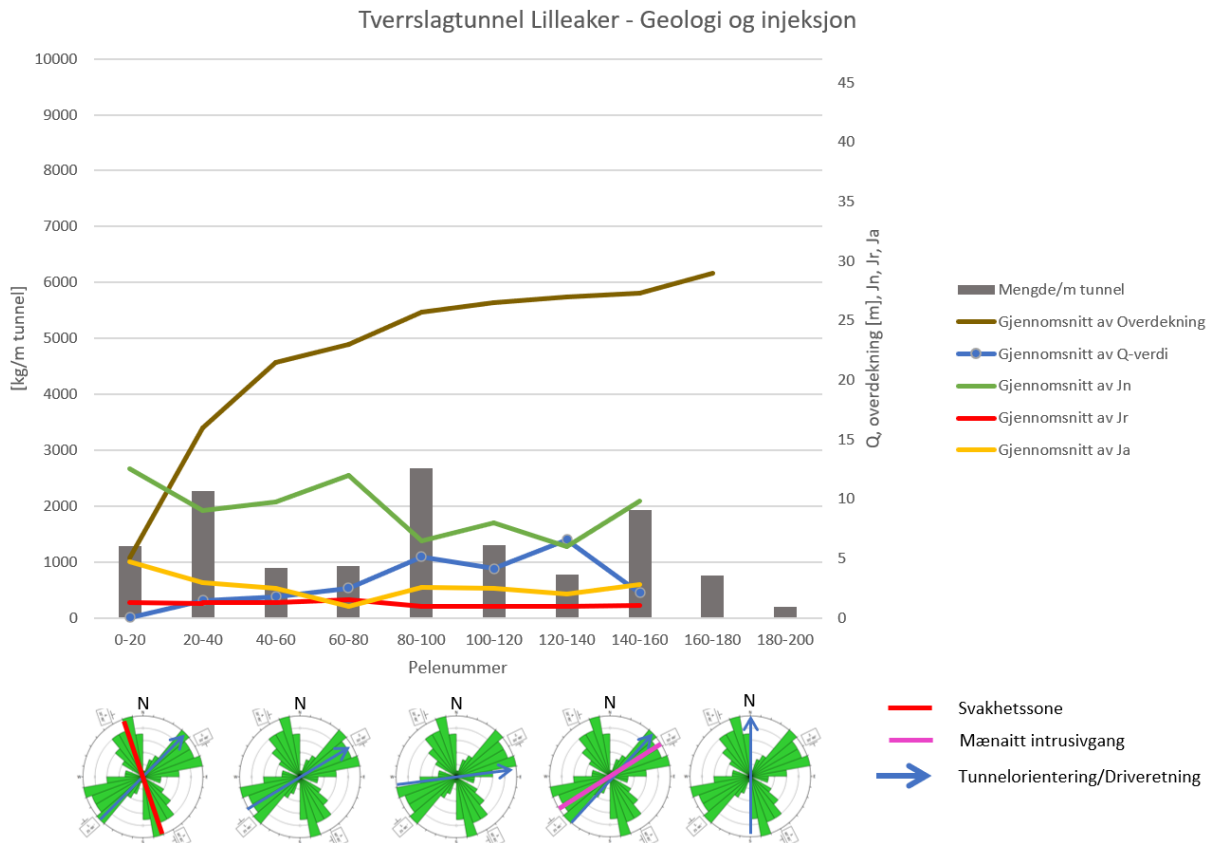
Figur 9.14: Visualisert resultat fra scanning av stuff ved pelenummer 141. Scanning og visualisering er fremstilt av Martin H. Haugsand

9.5.3 Prosjektert og utført vannetting

Strekningen er prosjektert til henholdsvis tiltaksklasse 2 og 3, med prosedyrebeskrivelse IP-2-K2B og IP-3-K2B gitt av vedlegg G.1. Fra prosjektering vektlegges bruk av MFC og KS, og tilstrebes injeksjon over én til to omganger. Dette vurderes fortløpende basert på målt innlekkasje fra kontrollhull og poretrykksendringer. Injeksjon fra pelenummer 4 - 26 er spesielt prosjektert, med hensyn til det eksisterende bergrommet og påhugg. Fra pelenummer 4 ble første injeksjonsrunde, utført i nedre halvdel av tunneltverrsnittet. Videre ble det drevet 5 salver med 2 m salvelengde. Andre og tredje injeksjonsrunde ble utført i hele tverrsnittet ved 3 injeksjonsomganger, ved pelenummer 14 og 25. Skjerm lengden for nevnte strekning var 24 m. Deretter er det drevet 5-6 m salver, 27 m hullengde med enkelte geometriske tilpasninger, og gjennomsnittlig hullantall lik 49. Injeksjonsutførelsen ble endret ved pelenummer 169, fra aktiv injeksjon til en GIN-basert metode, i henhold til prosedyre Modifisert IP-2-K2B i vedlegg G.2. Dette ble gjort for å kunne operere alle pumper til samme tid, og følgelig øke effektiviteten av injeksjonsarbeidet. Metoden tar utgangspunkt i én resept, ett w/c tall, og tilpasning av injeksjon foregår ved reduksjon av trykk. Trykktilpasningen justeres fra et bestemt forhold av injisert volum og trykk, for å begrense masseinnngang og unngå jekking. Datagrunnlaget ved nevnte prosedyreendring, er kun 2 injeksjonsskjermer, og derfor ikke videre sammenlignet med foregående metode.

Injiserte mengder ved tverrslagstunnelen er sammenstilt i figur 9.15, for 20 m seksjoner. Inndata er sensitiv til inndeling av seksjoner, med hensyn til injeksjonsskjermens pelenummer. Fra grafen kan kompleks geometri i stor

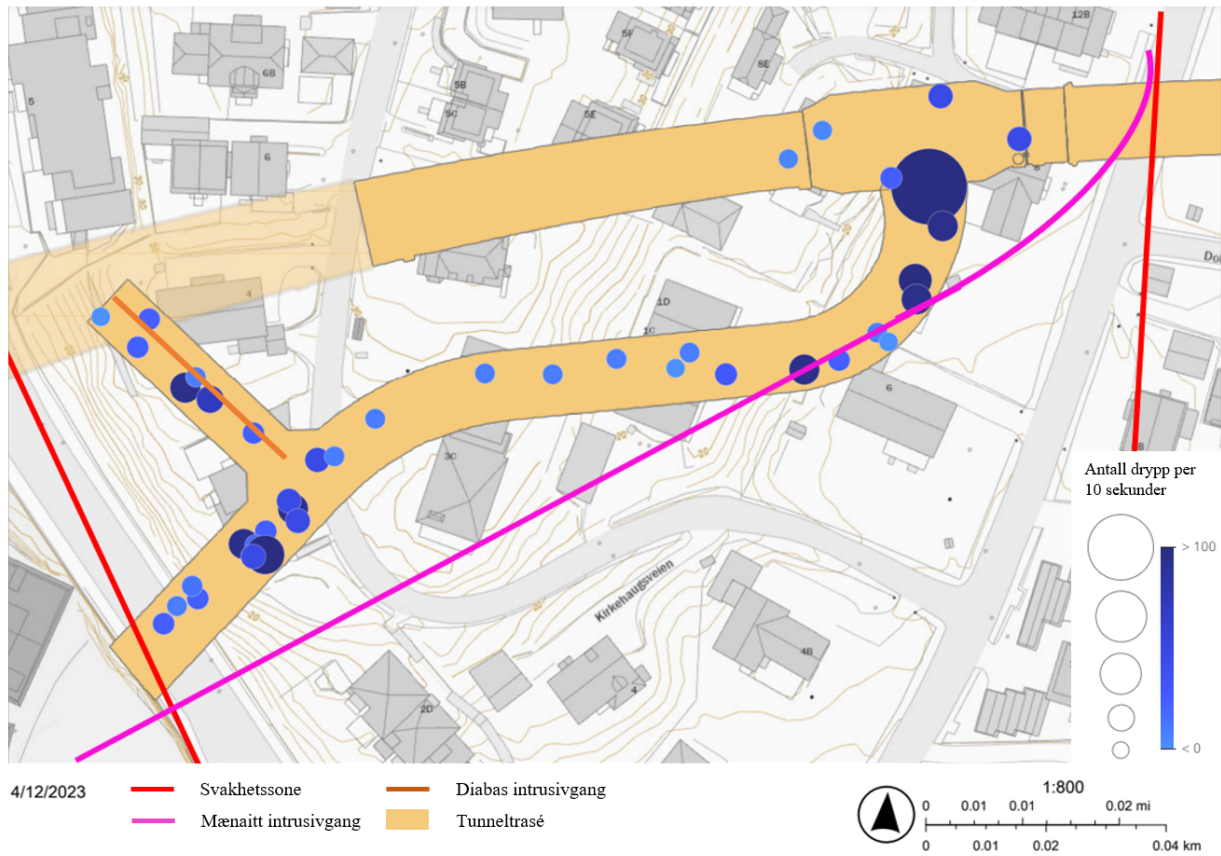
grad knyttes til økning av medgåtte mengder.



Figur 9.15: Sammenstilling av Injeksjonsmengder, geologiske parametere og tunnelorientering ved Tverrslag Lilleaker. Linjene er relatert til den høyre aksen og søylene til den venstre

9.5.4 Oppnådd tetthet og bemerkninger

Visuell observasjon og kartlegging av drypp i tunnel samstemmer godt med de seksjonsvise geologiske beskrivelsene. I figur 9.16 illustreres resultater fra fukt- og dryppkartlegging, ved observasjon av drypp per 10 sekunder, for 10 - 20 m intervall av tunnelstrekning. Sirklene symboliseres i henhold til tegneforklaring, der økende størrelse og mørkere farge tilsier fler drypp. Geologiske strukturer er inntegnet med bakgrunn i geologisk oversiktstegning, figur 9.9. Resultatene viser tegn til økt innlekkasje og fukt, i områder tilknyttet gangbergarter. Herunder diabasgang i omlastestasjon og mænaittgang som krysser tverrslagtunnelen ved pelenummer 140. Største innlekkasje i dette området ble observert i sammenheng med bergsikring; bolter og overgangen fra gitterbuer med utvidet tverrsnitt. I tillegg innvirker tunnelorientering, og følgelig injeksjonsskjermens orientering, relativt til prosjekterte sprekkeretninger vist i figur 7.3. Skjermbooring sub-parallelt til lagdeling og sprekkesett 1 og 2, tenderer til mindre lekkasje. I områdene omlastestasjon og overgang til hovedløpstunnel, er tunnelorientering sub-parallell til sprekkesett 3 og 4, og registrert moderate mengder drypp. Eksempler på fukt er også vist i figur 9.17



Figur 9.16: Kartlegging av fukt og drypp for strekningen Tverrslag Lilleaker, med illustrasjon av geologiske strukturer og oppsprekking. Fuktkartlegging er utført ved ArcGIS Field maps og presentert ved antall drypp per 10 sekunder for 10 m strekning



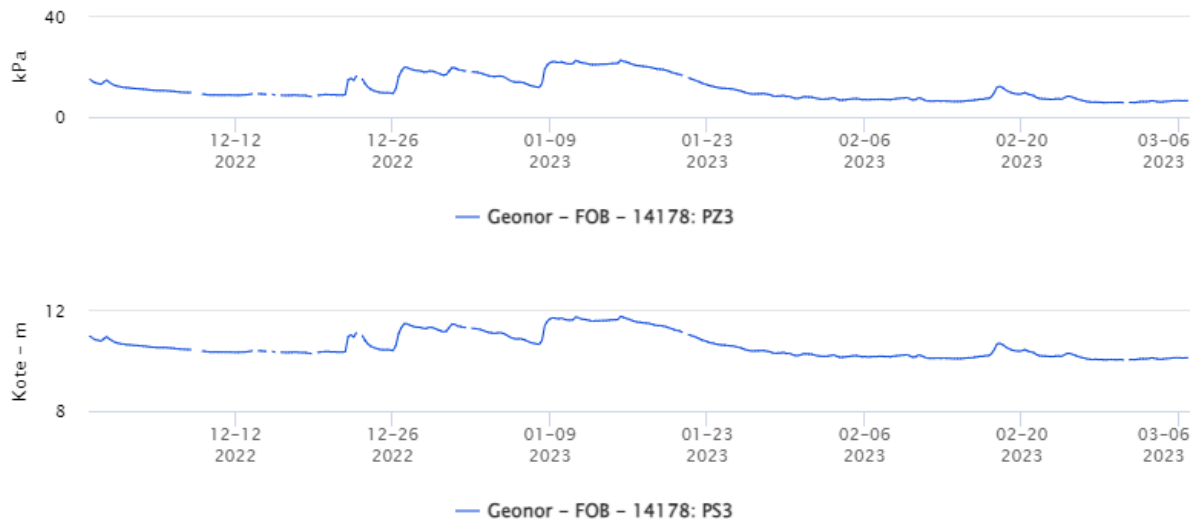
(a) Fuktkartlegging pelenummer 25



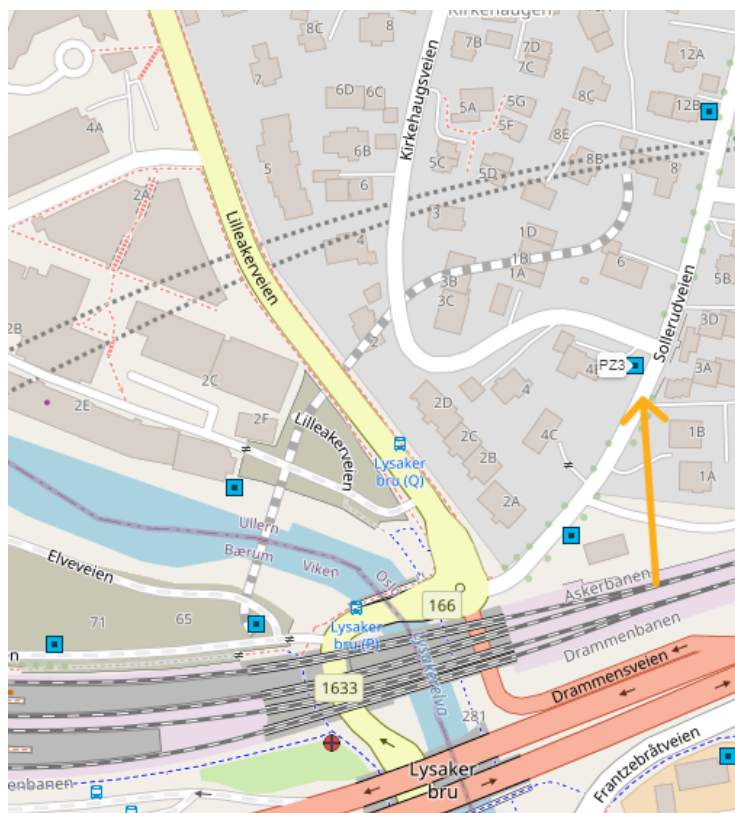
(b) Fuktkartlegging pelenummer 140

Figur 9.17: Fukt- og dryppregistrering ved henholdsvis a) pelenummer 25 i retning omlastestasjon og b) høyre vegg og vederlag ved pelenummer 140, retning hovedløpstunnel. Foto: Stian Thollefsen, 31.03.23

Poretrykksdata fra nærliggende poretrykksmålere, er illustrert ved figur 9.18. Dataen er gjeldende for hele driveperioden av tverrslagstunnelen. Utslagene i desember 2022 til begynnelsen av februar 2023 er i forbindelse med driving av påhugget, omlastestasjonen og tunnel frem til pelenummer 113. Poretrykket stabiliserer til normale nivå etter endt driving. Plassering av poretrykksmålere for gjeldende data er vist i figur 9.19.



Figur 9.18: Poretrykksdata fra piezometer, ved henholdsvis kPa og m stighøyde. Hentet 20.05.2023 fra prosjektets poretrykk-database Vista Data Vision - Fornebu banen



Figur 9.19: Beskrivelse av plassering av Poretrykksmåler PZ3 blå rektangel sentralt-høyre i bildet, relativt til tverrslagstunnel. Data er hentet 20.05.2023 fra Vista Data Vision - Fornebu banen

9.6 Hovedløp Lysaker Vest

9.6.1 Geologiske beskrivelser

Med utgangspunkt i BIM-modell og kartlegging ved Bevermapping, kan et sammensatt bilde av geologien langs traseen, illustreres som vist i figur 9.20. Data gir kun grunnlag for å beskrive geologiske forhold i tunneltraseen, og eksempelvis retning og utstrekning av bergartslag er egen tolkning. Foldning vil også innvirke i området, og ikke forsøkt gjenskapt i figur 9.20 eller 9.21. De kartlagte bergmekaniske forholdene for strekningen samstemmer i stor grad med data fra forundersøkelser, men det er stedvis lavere RQD og mindre gunstige spenningsforhold. Q-verdi øker ved synkende pelenummer. Antall sprekkesett varierer mellom to og tre, samt at Ja og Jr jevnt ligger rundt 2 - 3. Dette kan indikere svakt omvandlede sprekker med moderat sprekketryll, og glatt til ru, bølgete sprekkelflater. Jw for strekningen er 1.0, som tilsier tørt bergrom. Påtruffet innlekkasje ved injeksjonsboring er hovedsaklig ikke målbar, foruten 3 l/min ved pelenummer 7800. Tunnelorienteringen er gunstig i den sørlige delen av strekningen, men kurver gradvis parallelt til hovedsprekkesett 1 og 2. Basert på nærliggende borehull K6, er gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet beregnet til $8.5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. Fra formel 3.14 og 3.9, gir dette estimert innlekkasje 40-42 l/min/100m før injeksjon.

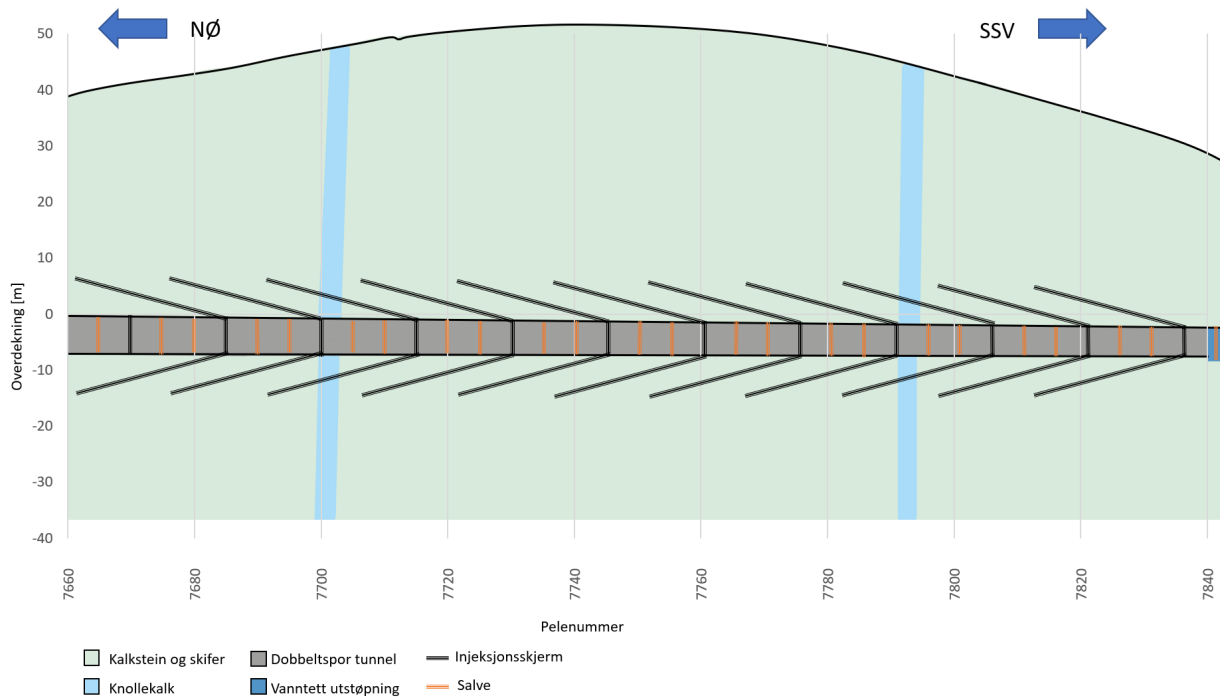


Figur 9.20: Geologisk oversikt over Hovedløp Lysaker vest med utgangspunkt i BIM-modell og bevermapping. Bergartsretning og utstrekning er tolket på bakgrunn av prosjektert lagdeling og vil ikke representere faktiske forhold utover tunnelløpet. Figuren er modifisert fra BIM-modell og BeverMapping

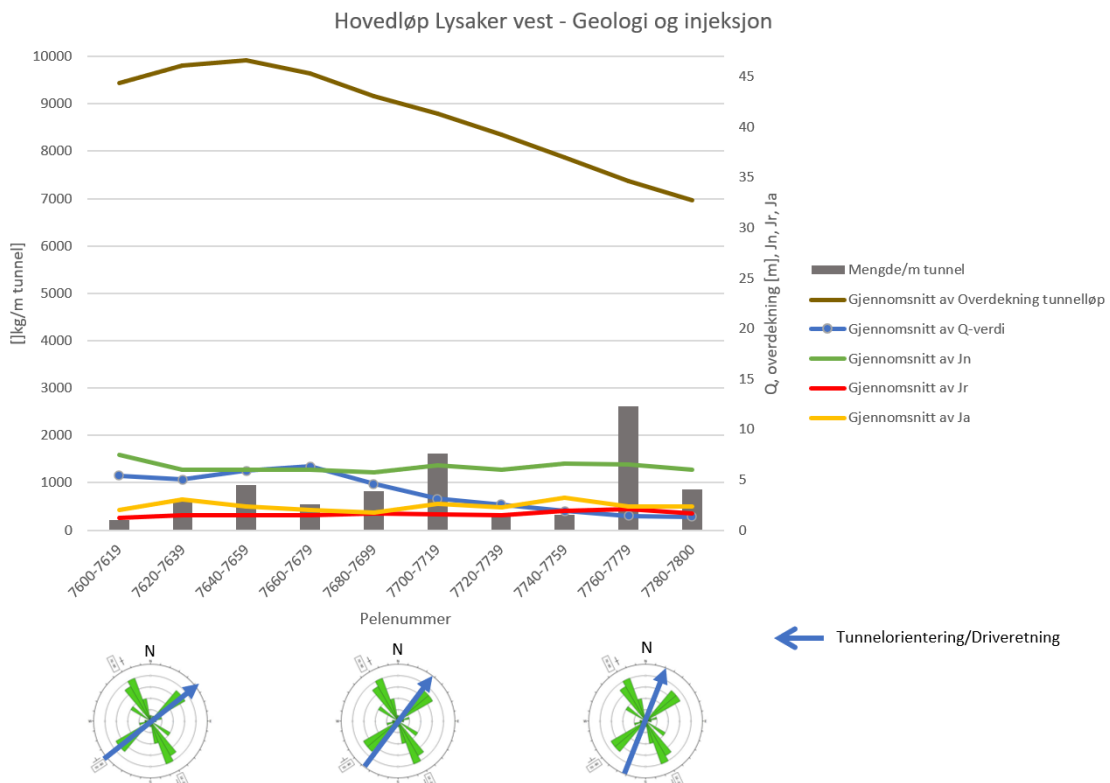
9.6.2 Prosjektert og utført vanntetting

Overdekning, tolkede bergartsgrenser og utført injeksjon er illustrert ved lengdesnittet i figur 9.21. I henhold til prosjektets saksregister, samt bore- og injeksjonslogger, er det ingen spesielle endringer av prosedyren i området. Fra prosjektering gjelder tiltaksklasse 2 fra pelenummer 7850 frem til 7600, og videre tiltaksklasse 1. Injeksjonsprosedyre IP-2-K2A gjelder hele strekningen og er beskrevet i vedlegg F.1. Totalt forbruk injeksjonsmasse per m tunnel,

for strekningen 7600 - 7800 er presentert ved søyler i figur 9.22. I samme figur er gjennomsnittlige Q-parametere og overdekning gitt av linjer relatert til seksjoner av 20 m tunnel.



Figur 9.21: Geologisk snittegning og utført injeksjonsgeometri ved Hovedløp Lysaker vest. Figuren er modifisert fra BIM-modell og BeverMapping



Figur 9.22: Sammenstilling av injeksjonsmengder, geologiske parametere og tunnelorientering ved Hovedløpstunnel Lysaker vest. Linjene er relatert til den høyre aksen og søylene til den venstre

Prosedyren innebærer c/c lik 0.9 m, stikning 5 m, 24 m hullengde og to salver mellom hver injeksjonsskjerm. Dette gir omtrentlig overlapp på 9 m, og hele strekningen er injisert med mikrosegment over én omgang. Prosedyren og delstrekningen vil i videre sammenligning betegnes som injeksjon ved normale geologiske forhold eller ingen geologiske bemerkninger. Ved pelenummer 7880 er det etablert en 20 m lang pumpestasjon, ut fra hovedløpet.

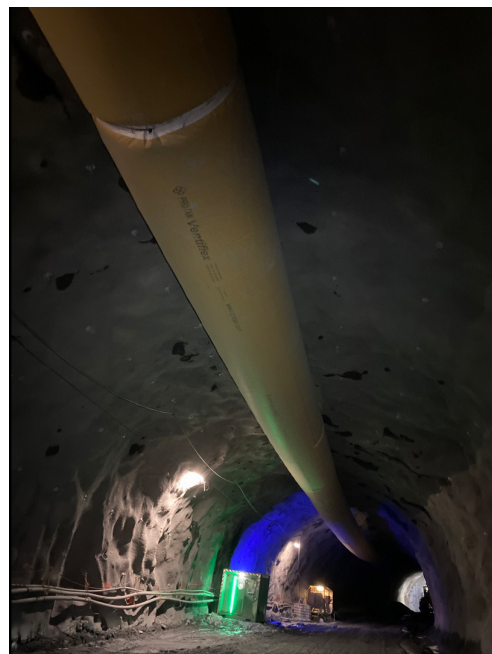
Injeksjonsarbeidet utført i pumpestasjonen er spesielt prosjektert, og ikke medregnet i injiserte mengder. Det er en svak trend til økt bergmassekvalitet, samt reduserte injeksjonsmengder, ved økende overdekning. Overordnet er mengden per m tunnel under 2000 kg, i tråd med det prosjekterte grunnlaget for Fornebu-banen og erfaringstall fra Bærumstunnelen mellom Sandvika og Lysaker. Det bemerkes økte injeksjonsmengder mellom pelenummer 7750-7800, trolig relatert til kompleks geometri i forbindelse med pumpestasjonen. Her er hullantallet økt fra 45 til omtrent 60, uten andre justeringer. Ved pelenummer 7700 og 7780 er det også registrert knollekalk ved stoffkartlegging, som vist i figur 9.21.

9.6.3 Oppnådd tetthet og bemerkninger

Fra befarings-, drypp- og fuktkartlegging, ble det observert lite til ingen drypp langs hele strekningen. Det var mer observasjoner av fukt i områdene før og etter pelenummer 7800, samt enkelt punklekkasje fra bolter. Eksempler fra kartlegging er vist i figur 9.23. Overordnet fremstår bergrommet tørt, og injeksjonsarbeidet tilstrekkelig. Poretrykksdata er presentert i figur 9.24 og 7.4. Intervallet er gjeldende for driving av tunnelstrekningen 7600 - 7800. Utslaget som vises omtrent 20. februar 2023 er trolig relatert til injeksjonsboring ved skjerm 86, ved pelenummer 7715. Ellers forholder poretrykket seg stabilt etter at driving har passert.

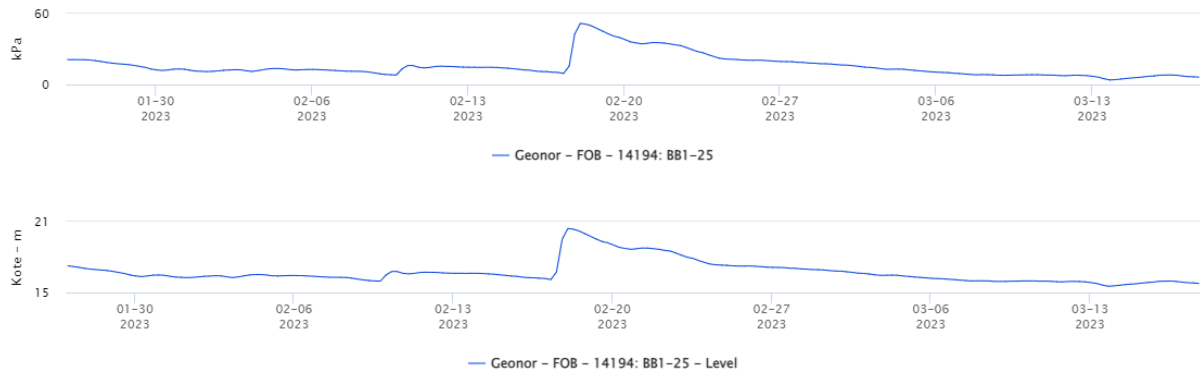


(a) Fuktkartlegging pelenummer 7620

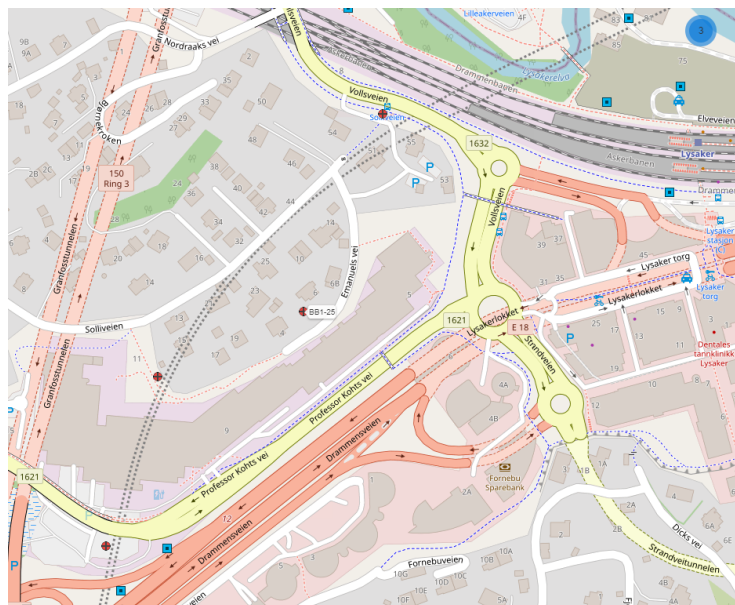


(b) Fuktkartlegging pelenummer 7700

Figur 9.23: Fukt- og dryppregistrering - 7600 - 7800. Foto: Stian Thollefsen, 31.03.23



Figur 9.24: Poretrykksdata fra bergbrønn, uttrykket ved m stighøyde. Hentet fra prosjektets poretrykksdatabase Vista Data Vision - Fornebubanen



Figur 9.25: Beskrivelse av plassering av brønnmåler BB1-25 rød sirkel sentralt i bildet, relativt til tunnel i stiplede linje. Data er hentet fra Vista Data Vision - Fornebubanen

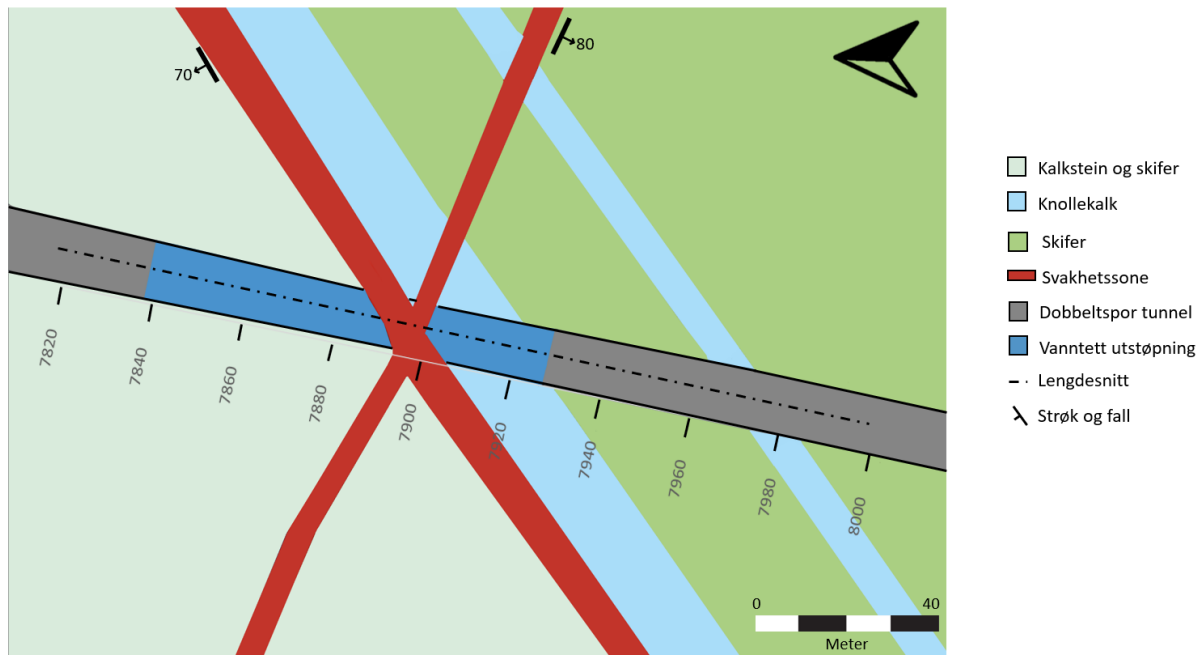
9.7 Dyprenne E18

9.7.1 Geologiske beskrivelser

Fra prosjektering, defineres strekningen hovedsakelig ved to kryssende svakhetssoner, som vist i figur 9.26. Hele kartutsnittet beskrives i BIM-modellen ved bergartstyper kalkstein og skifer. Områdene øst for svakhetssonen, med soner av knollekalk og skifer er, implementert fra BeverMapping. Det presiseres at det ikke er utført egen kartlegging for å bekrefte eller avkrefte faktiske forhold. Antagelsen om parallellorientert lagdeling, er en egen tolkning, og det er ikke hensyntatt foldning i illustrasjonen. Med utgangspunkt i kartlagte Q -parametere er det liten indikasjon på redusert bergmassekvalitet i forbindelse med svakhetssonen i området 7900. Fra MWD-data er det registrert tydelig indikasjon til hard bergmasse fra pelenummer 7920 til 7900, med NØ-strøkkretning, potensielt indikasjon på forkastningskjernen. Overordnet kategoriseres bergmasseklassen til D for hovedandelen av strekningen. Bergmassekvaliteten synker betraktelig i den sørlige delen av strekket, der Q -verdien ved pelenummer 7995 er kartlagt til å

være 0,16. I dette området er det registrert en svakhetszone i hengen, parallell til tunnelretning, som strekker seg fra pelenummer 7975 - 8000. Se utdrag fra BeverMapping i vedlegg G.2 for detaljert beskrivelse.

Nærliggende kjerneborhull K5 ble boret vest for målt til gjennomsnittlig lugeonverdi lik 0.73. I henhold til formel 4.4 og 4.3 gir dette en hydraulisk konduktivitet lik $0.9 - 1.7 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$. Forventet innlekkasje før injeksjon er estimert til 65 - 70 l/min/100m ved formel 3.14 og 3.9.

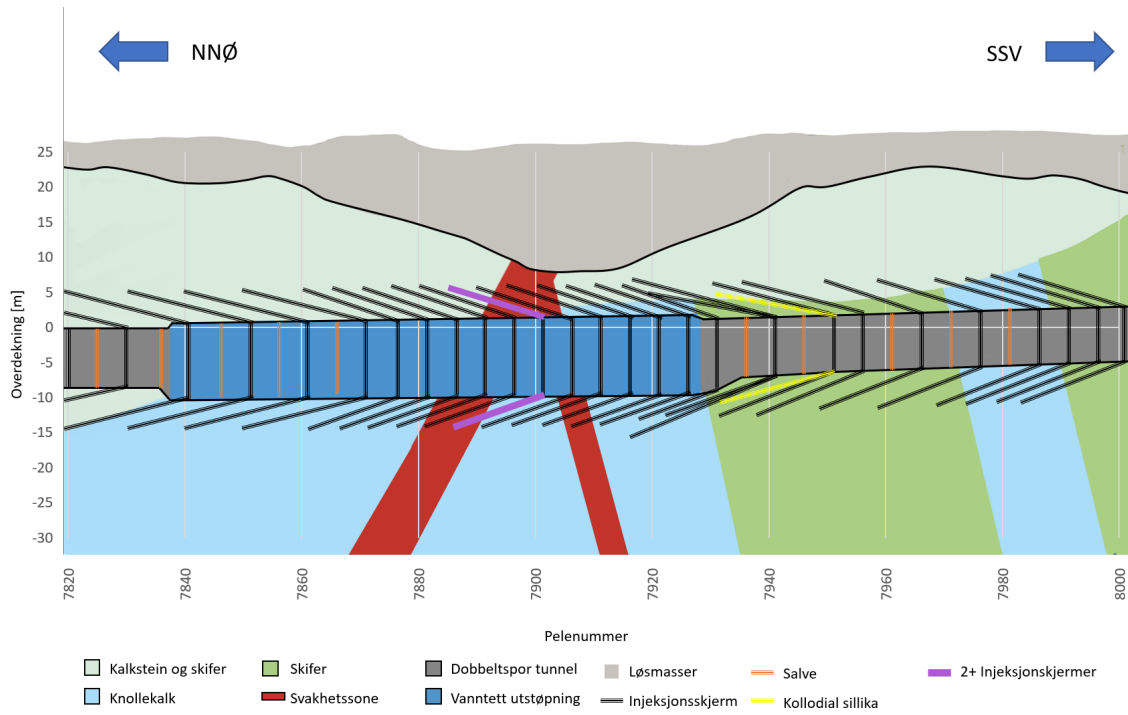


Figur 9.26: Geologisk oversikt over Dyprenne E18, viser kryssende svakhetszone og tunnel med stedlige bergarter. Figuren er modifisert fra BIM-modell og BeverMapping

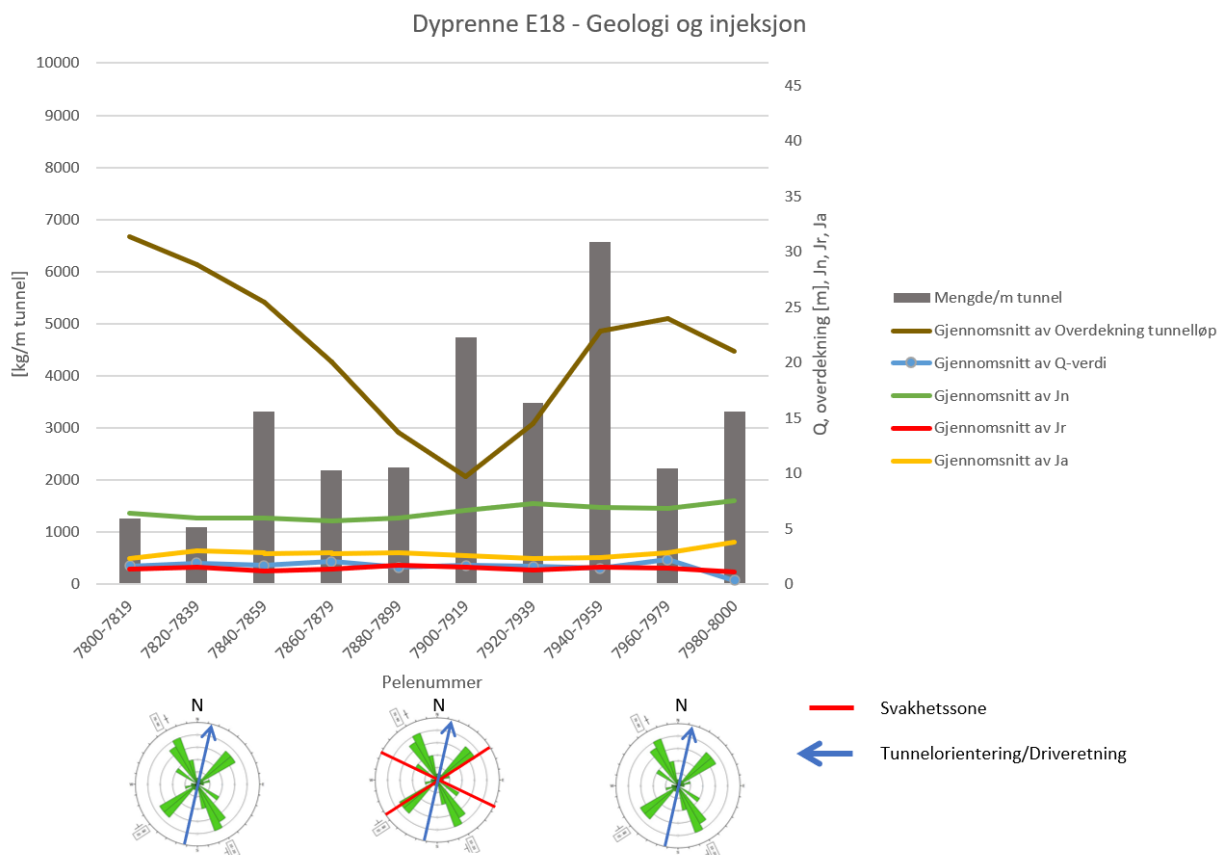
9.7.2 Prosjektert og utført vannetting

Strekningen er prosjektet til tiltaksklasse 3 og 4, og tilhørende prosedyrer IP-3-K2A og IP-4-K2A er beskrevet i vedlegg F.2 og F.3. Det tilsvarer omfattende forinjeksjon ved bruk av mikrosement og eventuelt kolloidal silika, over minst to omganger. I henhold til konkurransegrunnlaget gjelder tiltaksklasse 4 for strekningen 7882 - 7962, men etter tilpasning og med bakgrunn i BIM-modell er plassering av vannnett støp fra pelenummer 7840 - 7920. Ettersom skjerm lengdene varierer, er det forsøkt å illustrere hvordan tilpasning av injeksjonsutformingen har blitt utført inn mot svakhetssonen i figur 9.27. Ved pelenummer 7958 ble det iverksatt tiltak inngående mot vannnett støp ved 21 m MFC-skjerm og 24 m KS-skjerm, begge med 6 m stikning. Detaljprosjekteringen tilsa injeksjon etter hver salve, med MFC og KS annenhver skjerm. Lugeonmålinger ble utført før og etter injisering, samt i kontrollhull. Etter første injeksjonsrunde med KS, ble det observert utvasking grunnet innlekkasje, og det ble besluttet å benytte ultrafin sement for alle skjermene. Hull lengden ble satt til 15 m gjennom sonen og justert til 21 m ved pelenummer 7875, grunnet økt bergmassekvalitet. Injiserte mengder langs strekningen er presentert ved søyler og verdier ved den venstre aksene, i figur 9.28. Q-parametere og overdekning er representert ved linjer, og tilhører den høyre vertikalksene. Injiserte mengder er gitt ved gjennomsnittlig mengde injeksjonsmasse per m tunnel, for seksjoner av 20 m tunnel. Tunnelorientering og svakhetssonene fremstilt i henhold til prosjektet oppsprekking, i figur 9.28. Resultatene viser

økt forbruk inn mot og gjennom området ved dyprenna, men ingen klar korrelasjon til bergmassekvalitet.



Figur 9.27: Geologisk lengdesnitt og utført injeksjonsgeometri fra strekningen gjennom dyprenne E18. Figuren er modifisert fra BIM-modell og BeverMapping



Figur 9.28: Sammenstilling av injeksjonsmengder (søylor), geologiske parametere (linjer) ved hovedløpstunnelen gjennom Dyprenna E18

9.7.3 Oppnådd tetthet og bemerkninger

Ved observasjon og kartlegging av oppnådd tetthet, fremsto injeksjonsinnsatsen tilstrekkelig for store deler av tunnelen. I den nordlige delen av tunnelen var det forholdsvis tørt, med enkelte fuktflekker som illustrert i figur 9.29. I den sørlig del av strekningen, omkring pelenummer 8000, ble det observert større områder med fukt og drypp. Dette blir nærmere utdypet i neste delkapittel. Det er ikke kjent om det er utført infiltrasjon i samme tidsperiode.



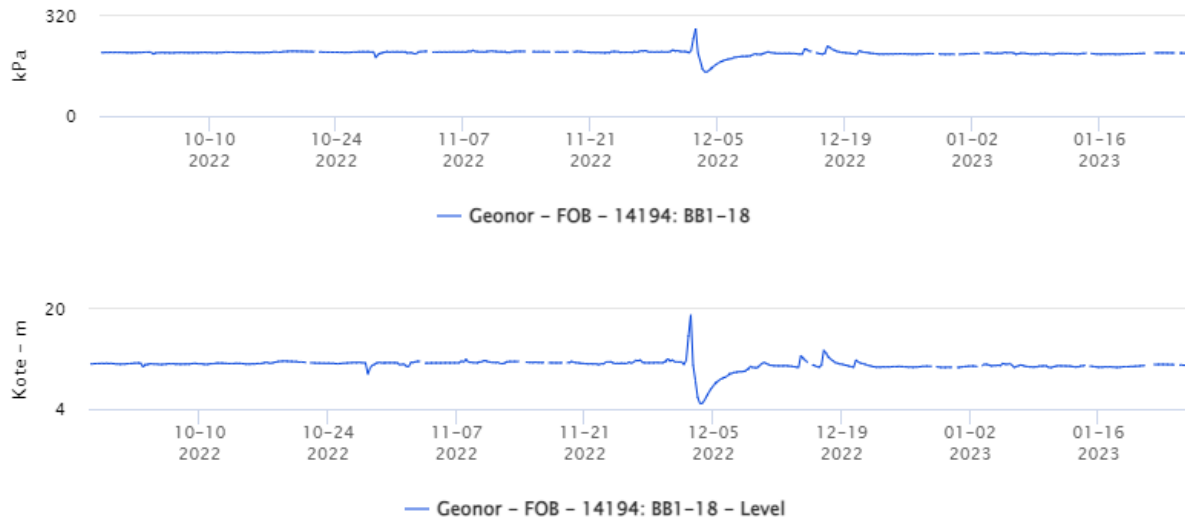
(a) Fuktkartlegging pelenummer 7830



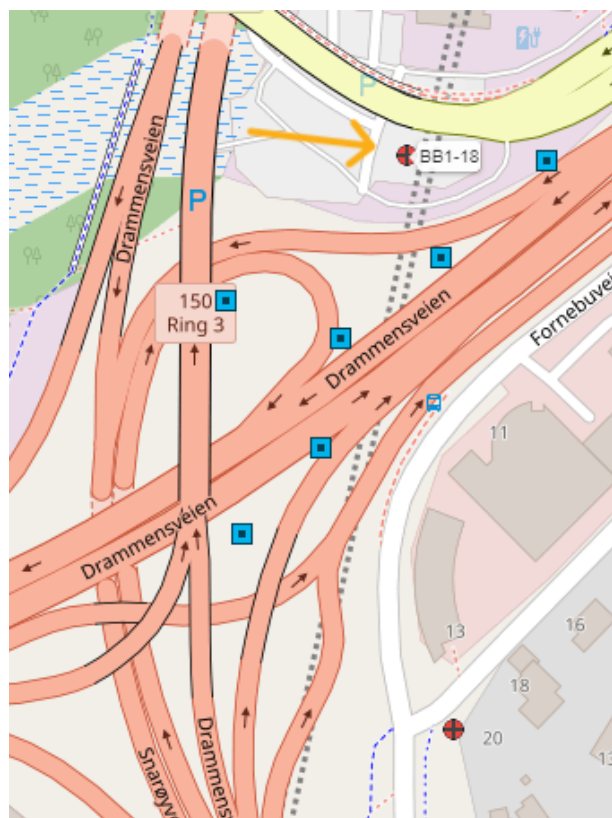
(b) Fuktkartlegging pelenummer 7855

Figur 9.29: Fukt- og dryppregistrering - 7800-8000. Foto: Stian Thollefsen, 31.03.23

Poretrykksnivå er hentet fra utvalgt brønnmåler BB1-18, ved figur 9.30. Data er gjeldende for tidsperioden ved drifing av strekningen 7800 - 8000. Nivået fremstår stabilt frem til poretrykksøkning i begynnelsen av desember 2022. Videre faller poretrykket før det normaliseres, trolig etter passering. Poretrykksfallet kan relateres til injeksjonsboring ved pelenummer 7912. Poretrykksnivået er i ettertid stabilt, som indikerer tilstrekkelig tetting.



Figur 9.30: Poretrykksdata fra bergbrønn, uttrykket ved m stighøyde. Hentet 20.05.2023 fra prosjektets poretrykksdatabase Vista Data Vision - Fornebubanen

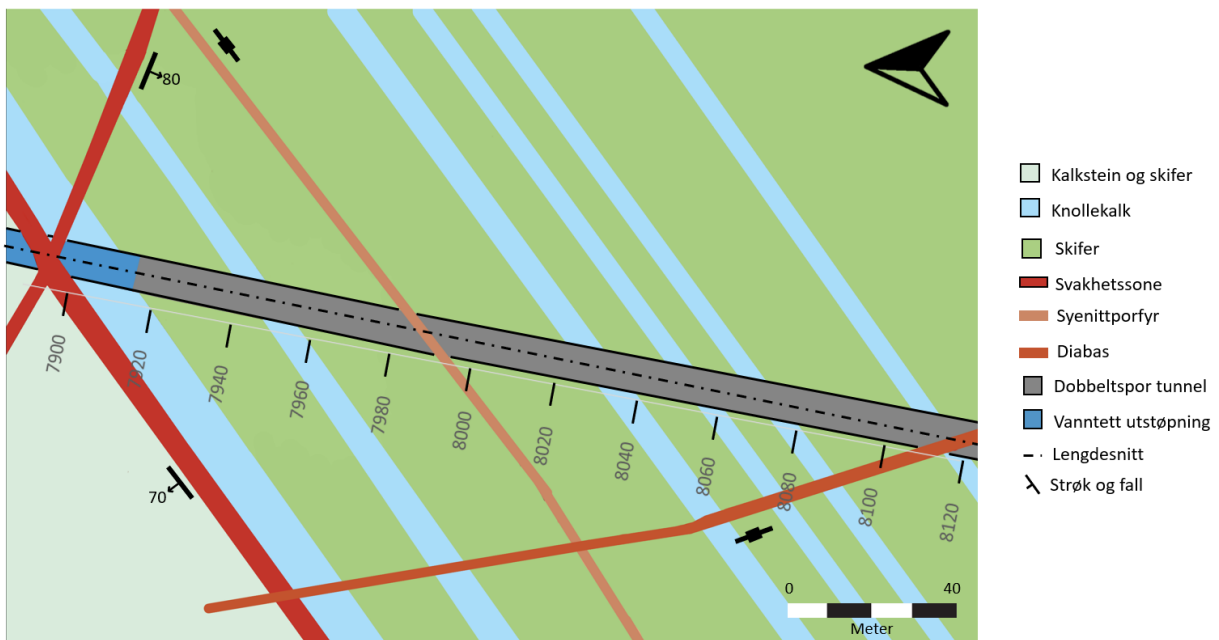


Figur 9.31: Oversikt over poretrykksplassering og plassering for BB-18 relativt til tunneløp i stiplet linje. Hentet fra prosjektets poretrykksdatabase Vista Data Vision - Fornebubanen

9.8 Hovedløp Fornebuporten Nord

9.8.1 Geologiske beskrivelser

Hovedløpstunnelen forlenges fra Dyprenna E18 til Fornebuporten nord, som illustrert ved figur 9.32. Grunnlagsdata fra BIM-modell og BeverMapping, gir utgangspunkt for å beskrive geologien nært til og i tunneltraseen. Utstrekning og orientering av bergartslag, samt bergartsgrenser er tolket, og en forenkling av faktiske forhold. Figuren viser gjennomkuttende syenittgang ved pelenummer 8000, steilt fall og NØ-strøkretning. Fra BeverMapping er det registrert en langsgående svakhetszone, parallelt til tunneløpet, som nevnt i forrige delkapittel. Bergmassen i området er tett oppsprukket, og det er registrert høy sprekkefyllingsgrad og slepper. Svakhetssonen opptrer ved samme pelenummer som syenittgangen, og ga komplikasjoner under injeksjonsarbeid. I den sørlige delen av figur 9.32, er det prosjektert en kryssende diabasgang med NNV-strøkretning ved pelenummer 8110. Fra borrhapport er det bemerket høyere innlekkasje ved pelenummer 8038 og 8055, henholdsvis 76 og 35 l/min.



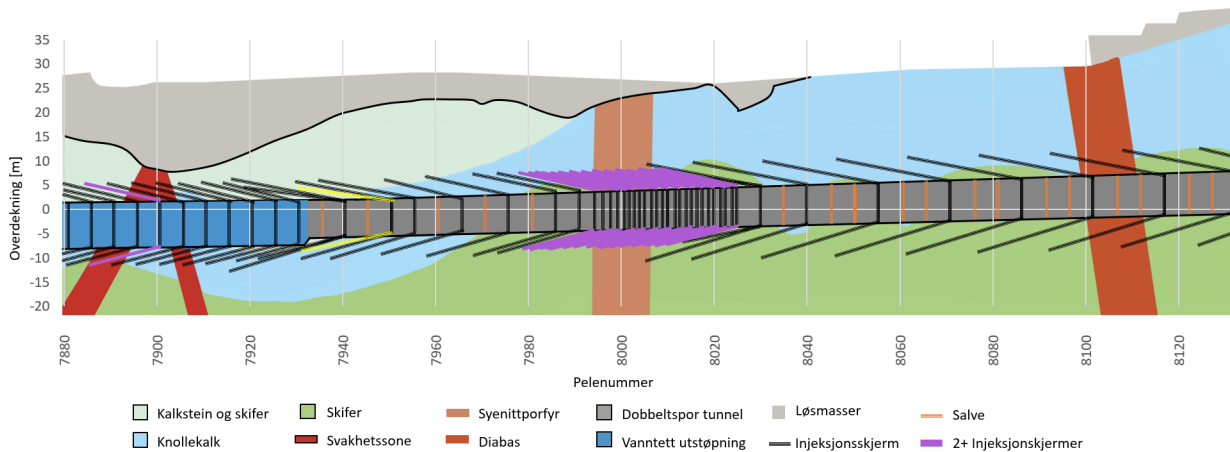
Figur 9.32: Geologisk oversikt over Hovedløpstunnel nord for Fornebuporten. Figuren er modifisert fra BIM-modell og BeverMapping

Bergmassekvaliteten langs strekningen er seksjonsvis beskrevet ved linjer, i figur 9.34. For strekningen er gjennomsnittlig Q-verdi lik 1.8, og hovedandelen av strekningen beskrives ved bergmasseklasse D. Overdekningen synker jevnt mot den nordlige enden av strekningen, i takt med redusert Q-verdi og økt Jn og Ja. Ved pelenummer 7995 er det registrert Q-verdi lik 0.16, og fra bevermapping er det kartlagt en parallellorientert svakhetszone mellom pelenummer 7980 og 8000. Se vedlegg G.2, for detaljert beskrivelse.

9.8.2 Prosjektert og utført vanntetting

Fra prosjektering er tiltaksklassene ved strekningen fra 7985 til 8200, henholdsvis 3, 2 og 1, slik som beskrevet i tabell 8.4. Dette innebærer injeksjon med mikrosegment og kolloidal silika, som beskrevet i vedlegg F.1 og F.2.

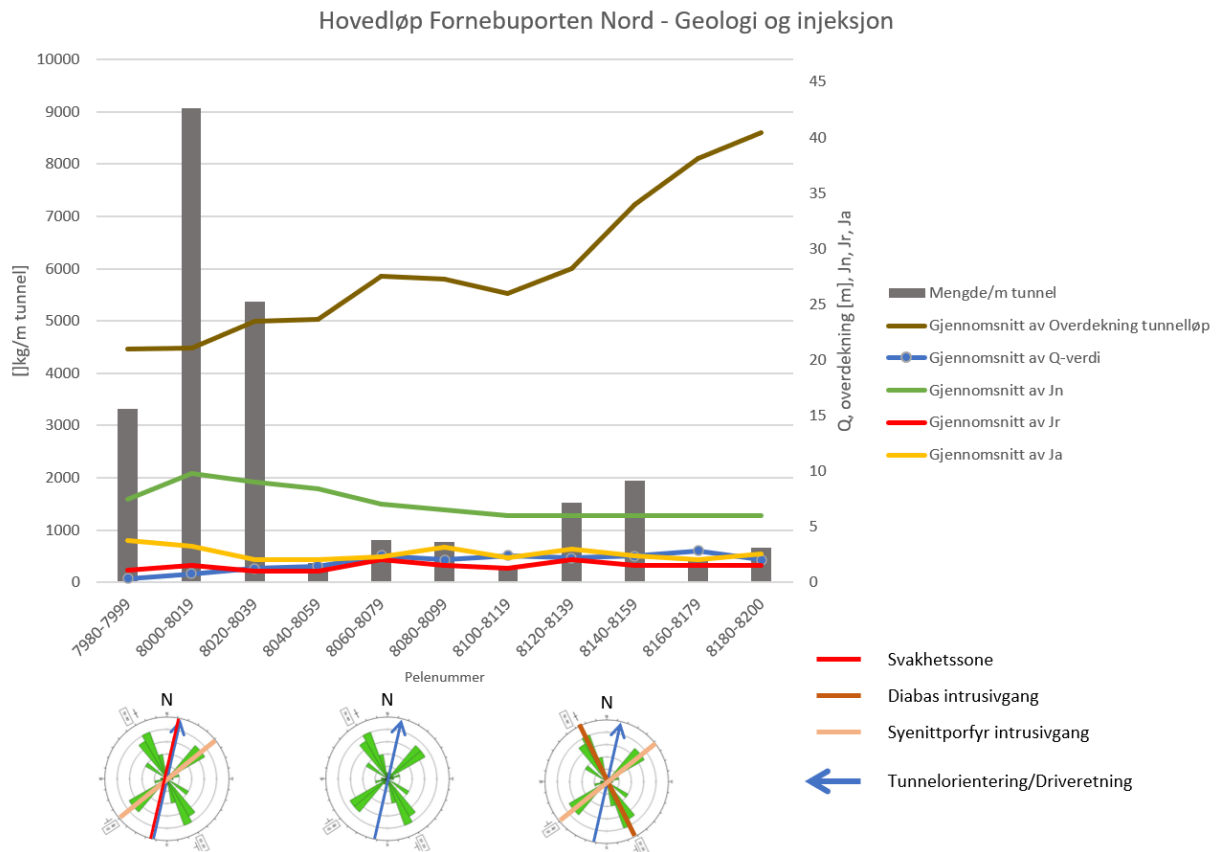
På bakgrunn av injeksjonslogger, samt kommunikasjon fra saksregister mellom byggherre og entreprenør, er injeksjonsgeometrien for strekningen 7880 - 8120 illustrert i figur 9.33. Driveretningen er ved synkende pelenummer.



Figur 9.33: Geologisk lengdesnitt og utført injeksjonsgeometri fra område mellom dyprenne E18 og Fornebuporten. Figuren er modifisert fra BIM-modell og BeverMapping

Innledende mot pelenummer 8006 er det injisert mikrosegment ved 24 m skjerm lengde, c/c lik 0.9 m og tre salver á 5 m mellom hver skjerm. Prosedyre IP-2-K2A og tiltaksklasse 2 er gjeldende frem til driving stanset ved pelenummer 8006, grunnet større innlekkasjer. Omfattende etterinjeksjon ble igangsatt fra pelenummer 8026 mot 8006. Dette innebar injeksjon ved mikrosegment og kolloidal silika i mellom foregående skjermer. Hullengden ble satt til 12 m, c/c lik 0.5 m og 60 grader vinkel fra horisontal. Totalt er det registrert 23 injeksjonslogger fra pelenummer 8026 til 8006. Etter nøye etterkontroll og måling av innlekkasje fra kontrollhull og terskel, ble det besluttet å drive videre fra pelenummer 8006 ved 3 m salvelengde og 18 m hullengde. Dette tilsvarer tiltaksklasse 3 og prosedyre IP-3-K2A

Injiserte mengder er presentert for 20 m seksjoner, i figur 9.34. Verdiene langs strekningen er sterkt preget av området ved syenittgangen, ved pelenummer 8000. Det er ingen tydelig relasjon mellom injeksjonsmengder og overdekning langs strekningen, med generelt lave injeksjonsmengder frem til pelenummer 8026. Pelenummer 8160 mangler injeksjonsdata, grunnet feil i filformatering. Derav er ikke verdier og søylen for intervallet 8160 - 8179, eksakt.



Figur 9.34: Sammenstilling av injeksjonsmengder for hovedløpstunnelen vist ved søyler, tilhørende den venstre akse. Q-parametere og overdekning er gitt av linjer og den høyre akse

9.8.3 Oppnådd tetthet og bemerkninger

Under fukt- og dryppkartlegging, utført 31.03.2023, ble det observert lite fukt og få punktlekkasjer langs hele strekningen. I område rundt pelenummer 8060, var det utført etterinjeksjon av punktlekkasjer med PU. Foto tatt fra pelenummer 8117, vist i figur 9.35 (b) i sørgående retning, viser tilsvarende tørt bergrom. Det ble observert noe mer fukt og drypp ved en tidligere befaring 18.01.2023, se figur 9.35 (a). Da foregikk injeksjonsarbeider ved pelenummer 7840. Poretrykk- og stighøyde fra nærliggende poretrykks- og brønnumåler, er illustrert i figur 9.36 og 9.37. Data er gjeldende for tidsperioden ved driving mellom pelenummer 7985 - 8200. PS1-35 viser poretrykksfall 8. August 2022, da stoffen sto på pelenummer 8006. Det omfattende tettearbeidet virker å ha vært tilfredsstillende, og måleren viser et tilbakevendende nivå. Data fra BB1-17, figur 9.37, viser større variasjon, men tenderer til å normalisere seg ved endt driving. Det er ikke kjent om det er utført infiltrasjon i samme tidsperiode, som har grunnlag for økningene. Oversikt over plassering av utvalgte målere er gjengitt i figur 9.38.



(a) Fuktkartlegging pelenummer 8025 - Nordgående retning.
Dato: 18.01.2023



(b) Fuktkartlegging pelenummer 8117 - Sørgående retning.
Dato: 31.03.2023

Figur 9.35: Fukt- og dryppregistrering - 7985 - 8200. Foto: Stian Thollefsen



Figur 9.36: Poretrykksdata fra piezometer PS1-35, illustrert ved m stighøyde. Hentet 20.05.2023 fra prosjektets poretrykks-database Vista Data Vision - Fornebuporten Nord



Figur 9.37: Poretrykksdata fra brønn BB1-17, illustrert ved m stighøyde. Hentet 20.05.2023 fra prosjektets poretrykksdatabase Vista Data Vision - Fornebuibanen



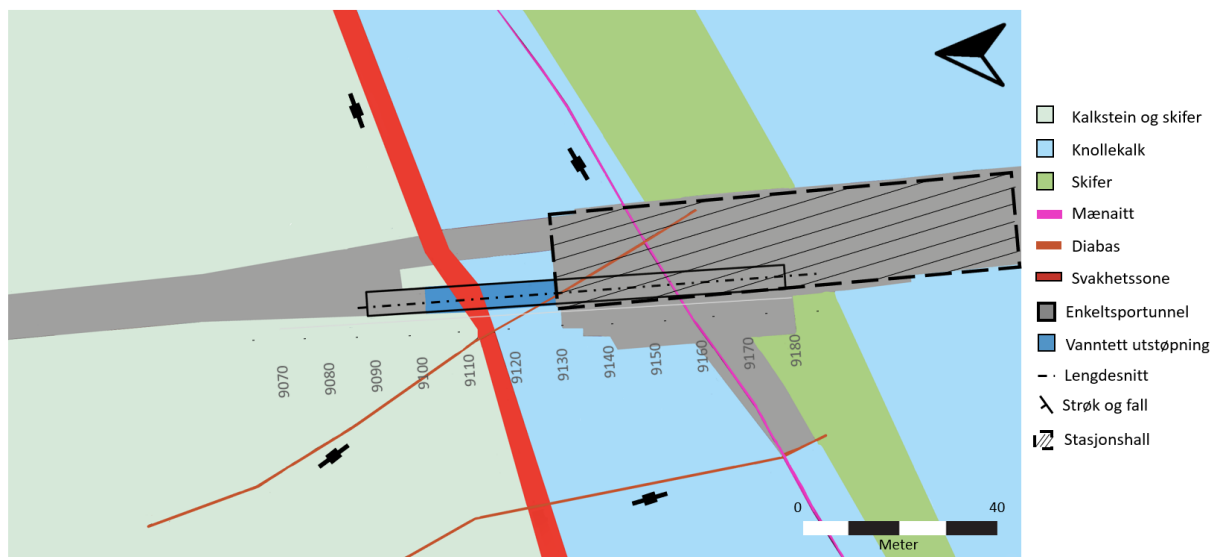
Figur 9.38: Oversikt over plassering av målere, til PS1-35 (blå firkant) og BB1-17 (rød sirkel), relativt til tunneløp i stiplet linje. Hentet 20.05.2023 fra prosjektets poretrykksdatabase Vista Data Vision - Fornebuibanen

9.9 Flytårnet

9.9.1 Geologiske beskrivelser

Prosjektering har tatt utgangspunkt i generelt overveiende forekomst av skifer og knollekalk, med gjennomkuttende gangbergarter og svakhetssone. Geologien illustreres i figur 9.39, sammensatt fra BIM-modell og ingeniørgeologisk kartlegging i tunnel. Plasseringen av gangbergarter og svakhetssonen er på bakgrunn av Werenskiold (1911), og justert med hensyn til grunnundersøkelser i prosjekteringsfasen. Fra geofysiske målinger ble svakhetssonen be-

tegnet som en dyprene, med minimal bergoverdekning og stort setningspotensial. Utstrekning og orientering av bergartsgrenser er inntegnet med utgangspunkt i BeverMapping, og vil kunne gjelde i og nært til tunneltraseen. Bergmassekvaliteten over strekningen er vurdert til gjennomsnittlig 1,4 i Q verdi, og laveste verdi til 0,18 ved pele-



Figur 9.39: Geologisk oversikt over utgående spor ved Flytårnet stasjon, med utgangspunkt i BIM-modell og BeverMapping. Valgt område er vist ved heltrukken rektangel og gjelder for det utgående løpet, retning Fornebu base. Figuren er modifisert fra BIM-modell og BeverMapping

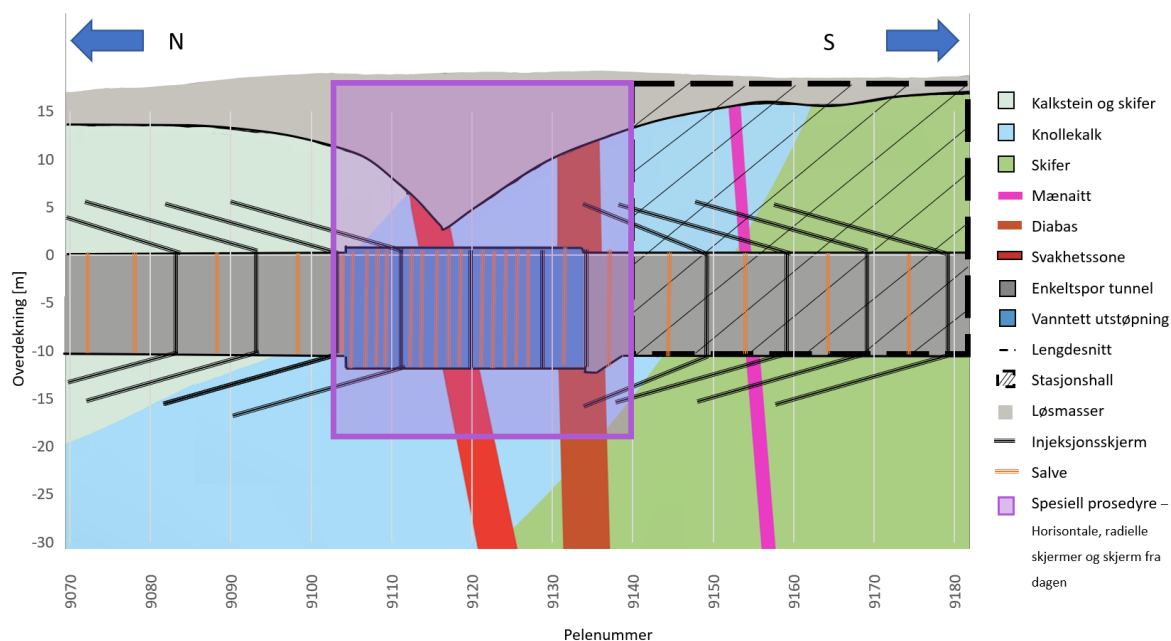
nummer 9120. Tolkede MWD data viser svake lag fra strekningen 9145 - 9155 samt 9185 - 9195. Hard bergmasse er registrert ved pelenummer 9120 - 9125 og 9175 - 9180. Parametere J_n og J_a , viser to til tre sprekkesett og økt sprekketryll i den prosjekterte svakhetssonen og området ved pelenummer 9190. Bergoverdekningen er gjengitt i figur 9.40, og er omtrent 2.5 m på det laveste. Gjennomsnittlig bergoverdekning for strekningen er 10 m, og flatt terreng.

Kjerneboring K2 er utført under prosjektering, nordvest for stasjonen, retning øst, gjennom området 9100-9120 av traseen. Resultatene fra permeabilitetsmåling utført i borhullet viser en gjennomsnittlig Lugeonverdi på 0.85, medianverdi 0.67 og maksimalverdi på 5. Beregnet hydraulisk konduktivitet er med utgangspunkt i de empiriske tilnærmingene gitt av formel 4.3 og 4.4. Basert på dette er den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten estimert til $1 - 2 \cdot 10^{-7}$ m/s. Fra dette er den forventede innlekkasjen beregnet ved formel 3.14 og 3.9 (El Tani 2003; Karlsrud, Erikstad og Snilsberg 2003; Tokheim og Janbu 1984). Resultatene viser at forventet innlekkasje vil være mellom 74 - 80 l/min/100m før injeksjon, for de to forenevnte. Det er benyttet samme grunnlag for parameterene h , høyde over grunnvannsnivå og r , ekvivalent tunnelradius.

9.9.2 Prosjektert og utført vanntetting

Driverretningen for tunnel er ved synkende pelenummer. Tiltaksklasse 2 gjelder hele stasjonshallen, fra pelenummer 9200 til 9140. Fra pelenummer 9140 til 9100 ble det prosjektert for tiltaksklasse 3 og 4. Det er lagt opp til tiltaksklasse 4 og potensielt vanntett støp fra pelenummer 9150 - 9180 i henhold til prosjekteringsgrunnlaget. Fra BIM-modell er samme sone justert etter drivestart, til 9105 - 9135. Gjeldende prosedyrebeskrivelser er gjengitt i vedlegg F.1, F.2

og F.3.

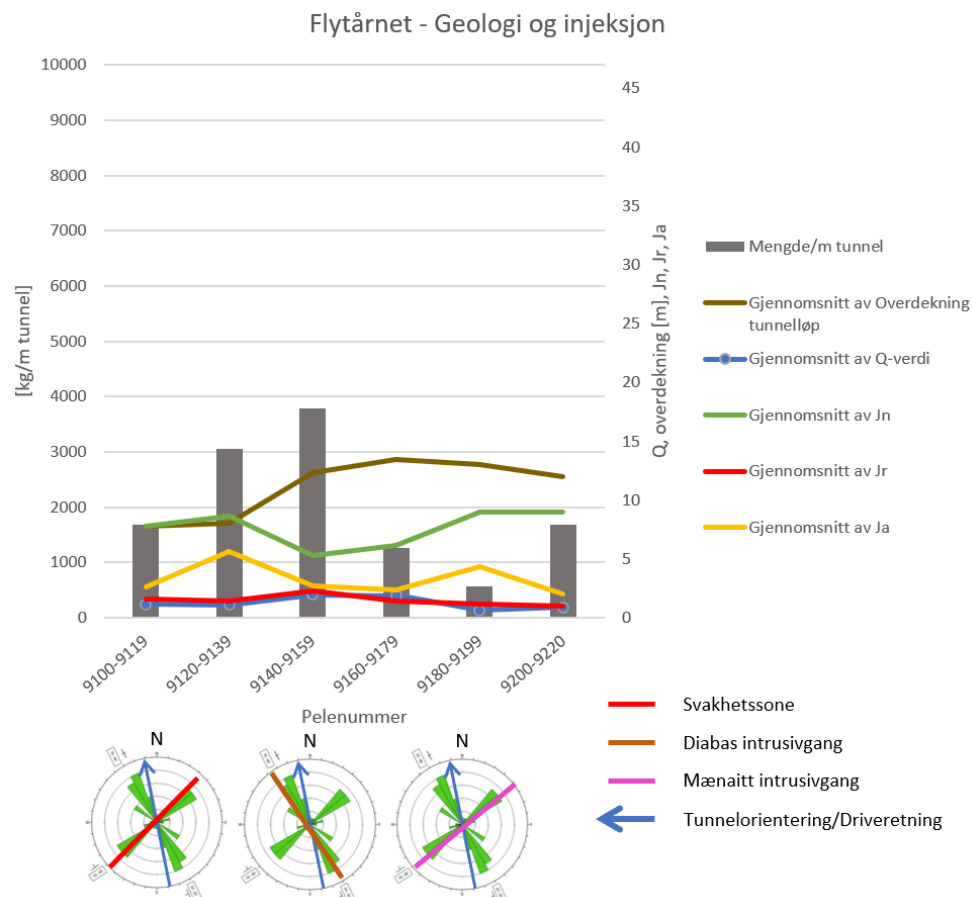


Figur 9.40: Lengdesnitt med beskrivelse av utført injeksjonsgeometri, hentet fra injeksjonslogger. Figuren er modifisert fra BIM-modell og BeverMapping

Informasjon vedrørende utførte prosedyrer for strekningen 9140 - 9200, er innhentet fra borelogger og internkommunikasjon. Strekningen er prosjektert for tiltaksklasse 2, men ble gjennomført i henhold til prosedyre IP-3-K2A og tiltaksklasse 3. Skjerm lengden ble satt til 21 m og det ble injisert med MFC etter hver andre salve.

Detaljprosjektering for strekningen mellom pelenummer 9105 - 9140, beskrives i detalj i vedlegg F.4. Prosedyren er utarbeidet på bakgrunn av erfaringer gjort ved injeksjon av Dyprenne E18. For å minimere risiko for utvasking av KS, ble det besluttet å benytte ultrafin sement. Fra pelenummer 9140 til 9128 ble det injisert med gradvis nedjustert stikning, inn mot svakhetssonen. Enkelte skjerm er det injisert opp mot 30 hull i stuff. Fra pelenummer 9126 er salvelengden nedjustert til 1.5 m. Hull lengden varierer mellom 6 - 21 m, og det er boret både horisontale og radielle injeksjonshull. I figur 9.40, gjelder følgende for det lille feltet. Det er også utført injeksjon ved sperreskjermer fra dagen, i nærhet til stasjonshallen. Mengder og prosedyrer fra injeksjon i dagen er ikke medregnet i grunnlaget eller videre beskrevet i studien. Fra pelenummer 9105 og videre i nordgående retning, er salvelengden og stikning gradvis tilbakeført. I henhold til injeksjonslogger er det benyttet MFC med silikaslurry, frem fra pelenummer 9105. Prosedyrebeskrivelsene er i henhold til tiltaksklasse 3 og prosedyre IP-3-K2A som vist i vedlegg F.2.

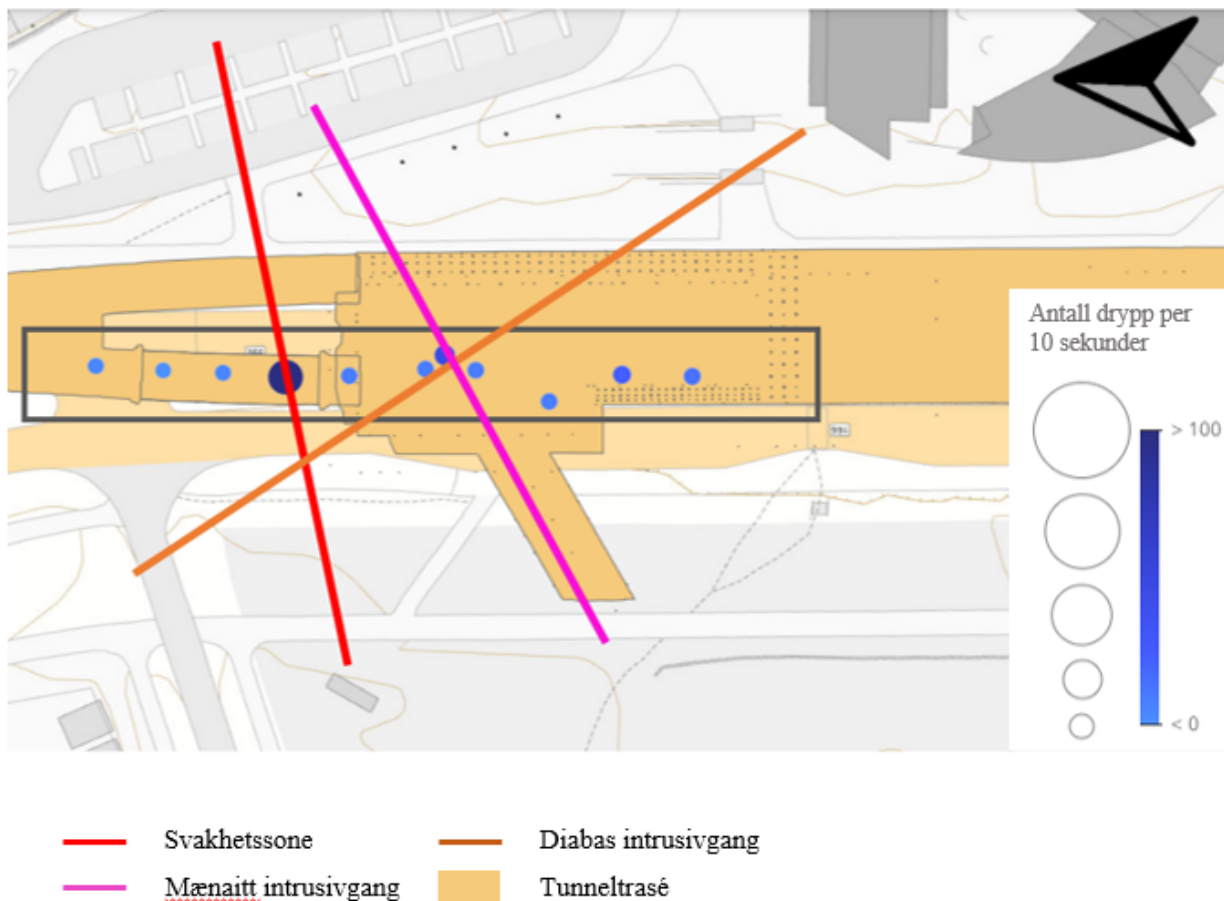
Injeksjonsmengder og stedlig, kartlagt geologi, er sammenstilt ved 20 m strekninger i figur 9.41. Resultatene viser en økning av injiserte mengder inn mot og i den kartlagte svakhetssonen. Gjennomsnittlig injeksjonsmengder er over 3000 kg/m tunnel, gjennom sonen.



Figur 9.41: Sammenstilling av injeksjonsmengder (søyler), geologiske parametere (linjer) ved Flytårnet stasjonshall og enkelt-sportunnel

9.9.3 Oppnådd tetthet og bemerkninger

Oversikt fra kartlegging er gitt av figur 9.42. Resultatene fra kartlegging av drypp og fukt viser i moderate mengder drypp i forbindelse med installerte bergbolter og rørskjerm. Hovedsakelig gjelder dette ved pelenummer 9125 - 9140. Figur 9.43 illustrerer et utdrag fra nevnte områder, og var ved tidspunkt for kartlegging, planlagt for etterinjeksjon med PU.



Figur 9.42: Kartlegging av fukt og drypp for strekningen ved Flytårnet, med illustrasjon av geologiske strukturer og oppsprekking. Fuktkartlegging er utført ved ArcGIS Field maps og presentert ved antall drypp per 10 s for 10 m strekning

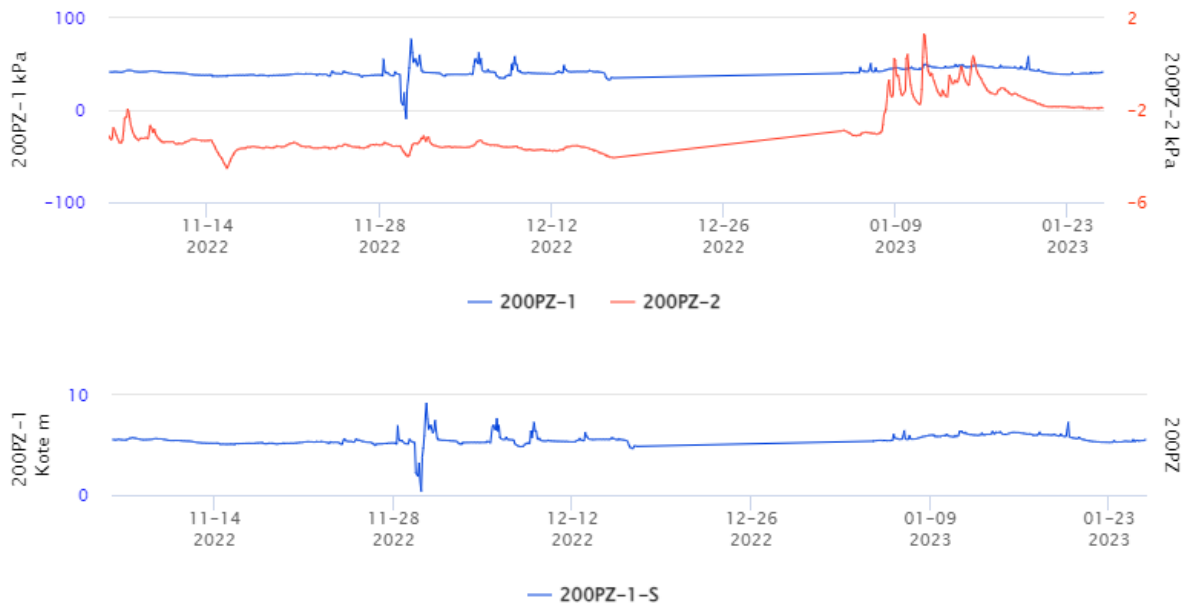


(a) Fuktkartlegging pelenummer 9120 retning nord

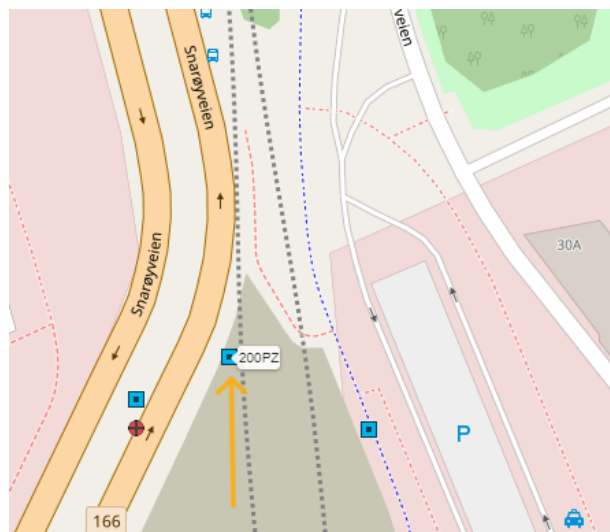


(b) Fuktkartlegging pelenummer 9130 rørskjerm

Figur 9.43: Fukt- og dryppregistrering - 9100 - 9200. Foto: Stian Thollefsen, 31.03.23



Figur 9.44: Poretrykksdata fra piezometer, illustrert ved P_a og m stighøyde. Hentet 20.05.2023 fra prosjektets poretrykksdatabase Vista Data Vision - Fornebubanen



Figur 9.45: Oversikt over poretrykksplassering og plassering til 200PZ (blå firkant), relativt til tunneløp i stiplet linje. Hentet 20.05.2023 fra prosjektets poretrykksdatabase Vista Data Vision - Fornebubanen

10 Diskusjon

Kommende kapittel vil redegjøre for de viktigste funnene fra resultater og analyser av Fornebubanen. Innledende vurderes datagrunnlag for oppgaven. Deretter vil resultatene fra valgte delstrekninger knyttes til overordnede funn ved relasjonen mellom injeksjon og geologiske parametere. Videre vil prosedyrebestemmelser, prosjektering av injeksjon og oppnådd tetthet vurderes på bakgrunn av geologiske data.

10.1 Kvalitetsvurdering av studien

Studien er utført på bakgrunn av tilgjengelig data, og tilknyttet utfordrende bergmasseforhold ved Fornebubanen. Delstrekningene er avgrenset for å beskrive utfordringer relatert til vanntetting, for ulike geologiske parametere. Datagrunnlaget er svært omfattende, og beskrives ved et relativt høy detaljnivå. Dette er ansett som positivt for de analyser som er blitt foretatt. Analyseringen av flere delstrekninger har gitt et større grunnlag for å kunne beskrive de faktiske bergmasseforholdene. De prosjekterte og kartlagte geologiske forholdene er utarbeidet av erfarne ingeniørgeologer, på bakgrunn av en rekke forundersøkelser og erfaringer fra tidligere prosjekter. Studien legger vekt på lugeonmåling og ingeniørgeologisk kartlegging i dagen, for å beskrive de prosjekterte geologiske forholdene. All data har ikke vært tilgjengelig for analysering, dette gjelder blant annet lugeon- og terskelmålinger i tunnel. For å beskrive oppnådd tetthet er poretrykksdata blitt vurdert, i kombinasjon med ekstensiv fukt- og dryppkartlegging i tunnel.

Injeksjonsdata er representert av prosjektert og utført vanntetting, for 84 injeksjonsskjermer. Det er i stor grad redegjort for skjermgeometrier og prosedyreendringer. En generell bemerkning ved analyse og tolkning av injeksjonsdata, relatert til geologiske parametere, er å redegjøre for alle variablene som innvirker samtidig. Skjermgeometri, utførelse av injeksjon, bergoverdekning, bergmassekvalitet, svakhetssoner, geotekniske faktorer, overvåking, tyngre bergsikring, spenningsforhold og sprekkekarakteristikk er eksempler på samspillende faktorer.

For sammenstillinger av geologi og injeksjonsmengder, er det valgt å benytte gjennomsnittlige verdier. Dette kan gjøre at ekstremverdier blir neglisjert, men overordnet injeksjonsinnsats og geologi beskrives for valgte områder. Ved å benytte regneark, har det vært mulig å kvantifisere og sammenligne geologiske parametre mot injeksjon.

Injeksjonstrykk og trykkforløp for enkelte borehull, er ikke blitt analysert i denne studien. Det ble besluttet å ikke analysere dette i detalj, ettersom det ville gitt enda større datamengder som må prosesseres og sammenstilles. Derfor er det ikke grunnlag for å utelukke at økte injeksjonsmengder kan skyldes eksempelvis hydraulisk jekking, og således gi utslag for resultatene i denne oppgaven.

10.2 Geologiske parametere og grunnlagsdata ved Fornebubanen

Prosjektet Fornebubanen innehar en omfattende database for stedlige geologiske forhold, fra en rekke forundersøkelser og erfaringer gjort under driving. I studien har det vært fokus på å redegjøre for stedlige geologiske forhold langs valgte delstrekninger av traseen, og prosjektet i sin helhet. Resultatene viser vesentlig forskjell i forventet og påtruffet bergmassekvalitet, for alle valgte områder. Fra ingeniørgeologisk kartlegging er det ingen registreringer av bergmasseklasse A og B, som tilsvarer Q-verdier over 10. Fra prosjektering utgjør bergmasseklasse A - C, omtrent

80% av de totale strekningene mellom Fornebu base og Flytårnet, Fornebuporten og Lysaker og i Tverrslagstunnel Lilleaker. Til sammenligning er 90% av strekningene som er kartlagt i tunnel, klassifisert til C - E.

Prosjektet bergmassekvalitet, beskrives hovedsakelig av kartlegging i dagen og kjernelogging av borehull. Undersøkelsene er utført på et begrenset antall punkter, som representerer de overordnede bergmasseforholdene langs tunneltraseen. Kartlegging i dagen begrenses naturlig av at tunneltraseen befinner seg i urbane omgivelser. Store deler av strekningen er lokalisert under eksisterende bebyggelse og infrastruktur. Det er rimelig å anta at data går tapt i undersøkelsesfasen, ved kartlegging av bergmasse i dagen og kjernelogging. Registreringer er i stor grad muliggjort for bedre bevarte blotninger og intakt berg, der det ikke er eksisterende infrastruktur. Svakhetssoner og knusningssoner observeres ofte ved kjernetap eller påvirkes under uttak av kjerner (NGI 2015). Detaljert beskrivelse av forvitrede eller tett oppsprukkede soner, blir følgelig med komplisert.

Q-systemet er i prosjektet benyttet til vurdering av stedlige bergmasseforhold og for å bestemme sikring. Gjennomgang av data og kartleggingsskjema fra BeverMapping gir ikke grunnlag for å knytte kartlagte Q-parametere til spesifikke bergartstyper. Det er derimot mulig å vurdere bergmassekvaliteten som beskrives for de valgte delstrekningene av Fornebubanen. Generelt bemerkes det at kartlegging i dagen og kjernelogging har vist bedre bergmassekvalitet, enn den som er påtruffet under driving. Overordnet samstemmer verdiene Jr, Ja og Jn fra prosjektering, med registreringer gjort i BeverMapping. Parametrene Q' og RQD er derimot betraktelig forskjellig. En sammenheng kan knyttes til at vurdering av bergmassekvalitet i BeverMapping, trolig påvirkes av konvensjonell tunneldriving. Sprengningsinduserte sprekker vil kunne innvirke på endelig Q-verdi og bestemmelse av sikringklasse. Q-systemet er en empirisk tilnærming og praktiseres i stor grad ved visuelle observasjoner og vurderinger av bergoverflaten. Kartleggingen utføres i et begrenset tidsrom og ved en gitt sikkerhetsmessig avstand fra stuff. Dette kan generelt lede til mer konservative vurderinger, med økt hensyn til sikringsbehov. Dette kan forklare de store forskjellene i eksempelvis prosjektet og kartlagt Q-verdi og RQD. En studie fra 2017 beskriver utfordringer og usikkerhet ved vurderinger av RQD (Pells mfl. 2017). Undersøkelsen vurderte differansen i RQD-bestemmelse for samme blotning ved tre ulike lokasjoner. Resultatene viste svært spredte målinger og variansen av RQD-verdi, utført av 13 erfarne geologer, varierte fra 40 - 60% for de samme områdene (Pells mfl. 2017). Usikkerhet knyttes også til vurdering av RQD for skifrig bergmasse (NGI 2015). Ved Fornebubanen påtreffes det i stor grad vekslende bergartstyper, herunder skifer og kalkstein, med enkelte soner av knollekalk. Kombinert med at bergmassen er omsatt av mindre til betydelig foldning, vil det fremkomme ulike bergmasseforhold lokalt på stuff. Soner av flere bergartstyper kan gi ulike bergmasseforhold for deler av tverrsnittsarealet. Følgelig vil en soneinndelt stuff kreve tilnærminger for vurdering av bergmassen. Tunnelstabilitet er av stor betydning ved fastsettelse av Q-verdi, ettersom bergsikring normalt vurderes for hele seksjoner av 5 m tunnel. Ingeniørgeologisk kartlegging vil følgelig beskrives av de minst gunstige bergmasseforholdene. Enkelte vurderinger av parametrene Jr og Ja påvirkes av tidligere injeksjonsarbeid. Injeksjonsmasser vil tette diskontinuiteter, og mulig fortrenge eksisterende sprekkefyll. I praksis vil det derfor være vanskelig å skille naturlige sprekker, injiserte sprekker, samt sprengningsinduserte sprekkeflater i tunnel.

Bergoverdekningen ved Fornebubanen er et sentralt tema i denne studien, og har stor innvirkning på stedlig geologi. Nært overflaten vil det være økende grad av forvitring og lavere innspenning (NBG 1999). I studien er kartlagte Q-parametere, bergoverdekning, tunnelorientering, svakhetssoner og gangbergarter tilknyttet pelenummere for alle

delstrekninger. Resultatene indikerer økende grad av oppsprekking og sprekkefylling, ved reduserende bergoverdekning. Gjennomsnittlig Q-verdi er for de fleste delstrekningene omvendt korrelert til parametrene Jn og Ja. Parameteren Jr varierer hovedsakelig mellom 1 og 2, og er ikke funnet til å korrelere med forenevnte Q-parametrene. For delstrekningene med svakhetssoner er det også registrert generelt lavere bergoverdekning. I prosjektet betegnes enkelte svakhetssoner som dyprenner, med større overliggende løsmassemekktighet. Her vil det kreve betydelig innsats til overvåking og utførelse av injeksjon, for å unngå poretrykkssenkning.

Detaljbeskrivelser fra lidarscanning har gjort det mulig å visualisere geologiske forhold etter endt driving. Det har kun vært tilgjengelig for delstrekningen Tverrslag Lilleaker, men illustrerer godt hvordan bergmassekvaliteten varierer med hensyn til bergoverdekning. Resultatene bekrefter at reduserende bergoverdekning gir økt grad av oppsprekking og forvitring. Visualiseringene illustrerer også hvordan de vekslende bergmasseforholdene ved Fornebubanen kan endres over korte avstander og lokalt på stoff. Det har også vært mulig å beskrive gangbergarter sin opptreden i større detalj. Nytteverdien av visualiseringen har vært stor, for å bedre forstå geologien i området.

Vurderinger av forventet innlekkasje er utført for ulike delstrekninger, basert på estimert hydraulisk konduktivitet fra lugeonmåling i nærliggende kjerneborehull. Den høyeste målte verdien er ved kjerneborehull K101, som krysser under Lysakerelva, nært Tverrslag Lilleaker. Overordnet er den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten for valgte områder, funnet til variere mellom 10^{-6} m/s og 10^{-8} m/s. Resultatene fra estimering av innlekkasje til tunnel, bekrefter at det forventes større innlekkasje i områder med utfordrende bergmasseforhold. Dette kan styrke viktigheten av lugeonmålinger i tidligfase.

Beregninger gjort av forventet innlekkasje i tunnel forutsetter enkelte antagelser, ved blant annet tilnærming av målt lugeonverdi og hydraulisk konduktivitet. I tillegg knyttes det usikkerhet til eksakt høyde under grunnvannsstand. Resultatene for beregninger av forventet innlekkasje ved Karlsrud, Erikstad og Snilsberg (2003) sin formel 3.14, og El Tani (2003) sin formel 3.9, viser relativt sammenfallende verdier for samme borehull. Variasjonene mellom borehullene er mer betydelig, trolig grunnet enkelte vannførende soner i testintervallene. I studien er det benyttet gjennomsnittlige lugeonverdier for hele kjerneborehullslengden, som varierer mellom noen titalls *m* til et noen hundre *m*. Grunnet foldning og vekslende bergartstyper, har det i liten grad vært mulig å knytte stedlige bergartstyper i tunnel til registrerte bergartstyper fra kjerneborelogging. Foldning, vekslende bergmasseforhold og gangbergarter kan også gi variasjoner for ulike testintervall i samme borehull. Gjennomsnittlige verdier kan følgelig gi enkelte forhøyde verdier eller utelate ekstremverdier. Dette behøver ikke å tilsvare det som er mest representativt for stedlig geologi. Det har derfor ikke blitt vektlagt å knytte beregningene til enkelte seksjoner av hullengden for spesifikke bergartstyper. Enkelte kjerneboreboringer befinner seg ikke i direkte kontakt med tunneltraseen, men krysser tunnelen ved enkelte områder. Borehullenes plassering er i stor grad styrt av grunnverv i prosjekteringsfasen, og videre tilpasset ved orientering og boring på synk. Det er rimelig å anta at resultatene fra kjerneboreboringen er overordnet representativ for bergmassen og bergartstypene i området, men vanskelig å tilknytte spesifikke delstrekninger av tunnelen.

10.3 Evaluering av prosjektering av vanntetting, injeksjonsprosedyrer og oppnådd tetthet ved Fornebubanen

Norsk praksis for prosjektering av vanntetting, belager seg i stor grad på erfaringstall og forundersøkelser. Denne studien har vektlagt geologiske parameteres betydning for valg ved vanntetting i innledende faser av prosjektet og tilpasning under driving. Kommende delkapitler vil redegjøre for funnene ved Fornebubanen og videre relateres til generell praksis. Resultatene fra bearbejdede prosjektdata og intervju, viser at geologien i noen grad er styrende for enkelte injeksjonsparametere. Det vil videre skilles mellom prosedyrebestemmelser ved prosjekteringsfasen og tilpasning av injeksjon under driving. Geologiens betydning ved de ulike fasene er med ulike forbehold, som videre vil bli diskutert.

10.3.1 Prosjektering av vanntetting i utfordrende bergmasseforhold

Bestemmelse av injeksjonsutforming og nødvendig tetteiltak, er en sammensatt problemstilling av geologiske, injeksjonstekniske og samfunnstjenlige hensyn. Ved Fornebubanen har hensikten med vanntetting vært delt inn i fire hovedkategorier (PGF 2019):

- Unngå uakseptable skader på bebyggelse og annen infrastruktur
- Unngå uakseptable skader på natur
- Tilfredsstille tunnelens funksjonskrav som byggverk
- Redusere pumpekostnader

De to første punktene er nærliggende relatert til vanntetting og injeksjonsinnsatsen. I oppstartsfasen har Fornebubanen benyttet et utstrakt erfaringsgrunnlag fra tidligere prosjekter, lugeonmålinger, poretrykksdata som benyttes til prosjektering av vanntetting. Et av bestemmelsene som er utarbeidet i tidligfase er tetthetskrav. Kravet er fastsatt på bakgrunn av tidligere erfaringer fra nærliggende prosjekter og anbefalinger gitt av forskningsarbeidet ”Miljø- og samfunnstjenlige tunneler”. Det er i tillegg utført sårbarhetsanalyser der risiko og konsekvens av setningsutvikling er vurdert, som følge av poretrykkssenkning. Måltallet for tetthetskrav i norsk injeksjonspraksis bestemmes likevel ikke av poretrykksverdier, men av innlekkasje gitt ved $l/min/100m$ tunnel. Under driving registreres verdien fra måleterskler, som oftest i sidegrøft, og benyttes som dokumentasjon for oppnådd tetthet. Fornebubanen har svært strenge tetthetskrav ved $4 l/min/100m$ for alle strekninger av tunnelen, uavhengig av antall tunnellop og geometri. Dette stiller høye krav til arbeidet med vanntetting, overvåking og kontroll.

Ved Fornebubanen betegnes geologien for flere delstrekninger av lav bergoverdekning, større løsmassemektighet, gjennomkuttende gangbergarter og svakhetssoner. Spesielt kombinasjoner av nevnte parametere er erfart å gi større innlekkasje i tunnel, og følgelig økt potensiale for skade på omgivelsene. Fornebuprojektet har derfor benyttet sårbarhetsanalysene som et av grunnlagene for etableringen av tiltaksklasser. Resultatene i denne studien har vist at det er gjort gode erfaringer ved prosjektering av tiltaksklasser. Tiltaksklassene beskriver kun generelle tilpasninger av injeksjonsprosedyrer. Nødvendig tetteinnsats i form av injeksjon og eventuelt vanntett støp, har hatt til hensikt å være veiledende for ulike delstrekninger. Ved gjennomgang av alle delstrekningene er det vist at det

er foretatt få endringer av tiltaksklasser for de valgte delstrekningene. Generelt sammenfaller utført prosjekterte og reelle tiltaksklasser. Sistnevnte beskrives i denne studien på bakgrunn av injeksjonsprosedyrer, og sammenfallende tiltaksklasse. Unntakene knyttes hovedsakelig til områder med kompleks geometri og til delstrekninger i tilknytning til gangbergarter. I Oslo-feltet er det hyppig forekomst av eksempelvis diabas- og syenittganger, med varierende grad av mektighet. Tilpasning av injeksjon gjøres derfor i liten grad, på bakgrunn av gangbergarter alene.

I vedlegg E og i delkapittel 9.4.1 "Resultater fra intervju", har de kvalitative vurderingene blitt sammenfattet i tabellformat. Resultatene viser at valg av injeksjonsmaterialer i stor grad bestemmes med hensyn til geologi. Tidligere erfaring ved ulike geologiske forhold og resultater fra lugeonmålinger, er styrende for valg av type injeksjonsmaterial. En tilnærming som benyttes i praktiske sammenhenger av injeksjon, er at d_{95} bør maksimalt være 1/3 av sprekeåpningen. Ved Fornebubanen ble det tidlig bestemt bruk av mikrosement, ultrafin sement og kolloidal silica. Tunneltraseen gjennomgår hovedsakelig kalkstein og skifer i veksling, der det forventes mindre åpne sprekker med varierende sprekeinnfylling (Bøe 2020). I kombinasjon med økt forvittringsgrad ved lave overdekninger, er det erfart at sprekekaraktistikken og sprekefylling er styrende for å utføre tilstrekkelig vanntetting. Resultatene fra fukt- og drypp kartlegging tilsier at det er oppnådd tilfredsstillende resultat ved bruk av MFC, UFC og KS. Fornebuprojektet er totalentreprise, og forbeholder byggherre å bestemme og utforme vanntetting. Med det i betraktning, tilrettelegges det i stor grad for aktiv tilpasning av injeksjon. De inngående delene for prosjektering av injeksjon og injeksjonsparametere, fungerer i større grad som etablering av prosjektets verktøykasse for vanntetting. Følgelig kan erfaringer som tilegnes i anleggsfasen gi større frihet til å styre tilpasning av injeksjon. Utover seksjonsvis beskrivelse ved tiltaksklasser og eksempelprosedyrer, er det ikke detaljprosjektert prosedyrer for ulike delstrekninger ved prosjektering av Fornebubanen.

10.3.2 Tilpasning av injeksjon ved utfordrende bergmasseforhold

Ved Fornebubanen har det i tidligfase blitt etablert et stort antall poretrykksmålere og brønner, langs tunneltraseen. Dette har gitt grunnlag for aktiv styring av vanntetting i anleggsfasen. En gjennomgang av poretrykksdata viser at det forekommer relativt umiddelbar respons, i tilknytning til enkelte injeksjonsskjermer. Ved Hovedløp Fornebuporten nord er det eksempelvis gjort endringer i prosedyrer, som følge av registrert innlekkasje på stuff og poretrykksreduksjon. Dataen for samtlige delstrekninger, tilsier at der målere har gitt utslag, har endringen kun vært midlertidig. Poretrykksnivået har videre normalisert seg, som indikerer at injeksjonsinnsatsen har vært tilstrekkelig.

Resultatene fra intervju og gjennomgang av prosedyreendringer og injeksjonslogger, viser at det gjøres enkelte tilpasninger av injeksjonsutforming med hensyn til geologi. Beslutningene gjøres normalt med utgangspunkt i erfaring ved utførelse av injeksjon og eventuelle lekkasjer fra kontrollhull. Tilpasninger kan være redusering av hullengder, hullantall, anvending av KS, injeksjonshull i stuff, injeksjon over flere omganger i områder der innlekkasje tilsier at tilfredsstillende tetthet ikke er nådd etter én injeksjonsrunde. Videre justeres prosedyrene for flere deler av prosjektet med hensyn til erfaringer og vurderinger knyttet til oppnådd tetthet, materialforbruk og utvidede grunnundersøkelser. Sistnevnte innebærer for eksempel spenningsmålinger, som har gitt grunnlag for å tilpasse maksimalt pumpetrykk med hensyn til hydraulisk jekking. Hydraulisk jekking er ikke dekket av studien, men er et aspekt som bør adresseres i relasjon til geologiske parametere og injeksjonsmengder.

Sammenstillingen av prosedyreendringer har gitt innsikt i hvordan utførelse av injeksjon tilpasses geologiske parametere i anleggsfasen. Materialvalg er en av injeksjonsparametrene som aktivt tilpasses under driving. Tilpasningen vurderes blant annet på bakgrunn av oppnådd tetthet. I områder som krysser gjennom svakhetssoner, eksempelvis ved Dyprenne E18 og Flytårnet, har det blitt besluttet å benytte UFC for hele strekningen. Prosedyreendringene ble initert som følge av utvasking av KS, under injeksjonsarbeider ved pelenummer 7958 i område Dyprenne E18. UFC ga tilfredsstillende tetteresultat, og ble videre benyttet ved forsering av svakhetssonen ved Flytårnet. Der bergmassekvaliteten er betydelig redusert, ved lav bergoverdekning eller ved forsering av svakhetssoner, tilstrebes det redusert hullengde, c/c, salvelengde, skjermavstand og injeksjonstrykk. Antall omganger og hull i stuff, øker dersom kontrollhull avdekker utilstrekkelig tetting. Ved Flytårnet er det gjort spesiell tilpasning av injeksjon, grunnet særskilt liten bergoverdekning i form av en dyprenne. Løsningen innebærer utstrakt bruk av horisontale skjermmer i stuff, samt gradvis reduserende stikning inn mot dyprenna. Løsningen betrakter også utfordringer ved injeksjonsarbeider, som følge av tyngre sikring. Det er etablert rørskjerm i området, og fukt- og dryppkartlegging har vist at det er vanskelig å oppnå tilstrekkelig tetting. Rørene ble injisert etter installering, men det ble observert enkelte punktlekkasjer og drypp.

Lugeonmålinger er benyttet i enkelte områder med utfordrende bergmasseforhold. Målingene er utført i borehull på stuff, før og etter injeksjon, og har blitt benyttet for indikasjon av oppnådd tetthet. Studien har ikke besittet tilstrekkelig datagrunnlag for å avdekke redusert hydraulisk konduktivitet. Verdiene som presenteres innledende i resultatdelen, ved tabell 9.2, gir likevel moderat indikasjon på redusert hydraulisk konduktivitet for område ved Tverrslag Lilleaker.

10.3.3 Oppnådd tetthet

Overordnet viser resultatene fra gjennomgang av poretrykksdata og fuktkartlegging, tilfredsstillende tetthet. Det er funnet enkelte fuktområder på sprøytebetongen og drypp fra bergbolter og rørskjerm, ved delstrekningene for Tverrslag Lilleaker og Flytårnet. Delstrekningene viser likevel at poretrykksnivået normaliseres etter at driving er passert. Dette bekreftes blant annet i en internrapport fra mars 2023, der det ikke er vist tegn til vedvarende poretrykkssenkning eller noen form for setninger i måleområder av Fornebubanen.

For å tallfeste graden av oppnådd tetthet bør lekkasjeverdier fra terskelmålinger benyttes som analysegrunnlag. I oppgaven det ikke vært tilgjengelig data for alle delstrekninger, og derfor ikke vært mulig å sammenligne. For delstrekningen Dyprenne E18 har det blitt gjort en sammenligning av estimert innlekkasje før injeksjon og resulterende målt innlekkasje fra terskelmåling. Resultatene viser en reduksjon fra estimert verdi, i underkant av 70 $l/min/100m$, til målt verdi lik 3.5 $l/min/100m$. Dette er under tetthetskravet på 4 $l/min/100m$, og indikerer at injeksjonsinnsatsen er tilfredsstillende.

10.4 Evaluering av geologiske parametere og injeksjon ved Fornebubanen

Ved vurdering av geologiske parameteres betydning for valg av injeksjonsutførelse, har det blitt valgt å se på injeksjonsmengdene for ulike delstrekninger. Sammenhengen mellom utførelse av injeksjon, geologi og oppnådd tetthet er sammensatt, og har ledet til en omfattende datasammenstilling og analyse. Resultatene indikerer at det er en

sammenheng mellom injeksjonsmengder og geologiske parametere. I soner ved tiltaksklasser 3 og 4, er spesielt hyppigheten av injeksjonsskjermer en viktig faktor. En beregning ved to ulike tiltaksklasser for en vilkårlig strekning av 100 m tunnel, er vist i tabell 10.1. Videre forenkles injeksjonsprosedyren til at alle skjermene benytter et W/C-tall lik 0.5, der spesifikk egenvekt til MFC er 3130 kg/m^3 . Da vil hullfylling utgjøre i underkant av 220 kg/m tunnel for tiltaksklasse 1 og 470 kg/m tunnel for tiltaksklasse 4. Den relative økningen av injeksjonsmengder per m tunnel vil da bli 150% og 186% for henholdsvis gangbergarter og svakhetssoner, sammenlignet med områdene uten spesiell geologisk beskrivelse. Det presiseres at det i denne studien ikke er tatt hensyn til utførelse og eventuell jekking av bergmassen, som også kan resultere i økt forbruk av injeksjonsmasser (Rafi, Stille og Johansson 2017; Strømsvik 2019).

Tabell 10.1: Sammenlikning av hullfylling for ulike injeksjonsprosedyrer for en vilkårlig strekning av 100 m tunnel

Parameter	Tiltaksklasse 1	Tiltaksklasse 4
Hullengde [m]	24	15
Hullantall	50	50
Hulldiameter [m]	0.05	0.05
Salvelengde [m]	5	5
Antall salver mellom skjerm	3	1
Skjermavstand [m]	15	5
Antall skjermene per 100 m tunnel	6	20
Total volum hullfylling [m^3]	14	30

Sammenstilling av injiserte mengder og boremeter per m tunnel for alle injeksjonsskjermer, er illustrert ved punkt-diagram ved figur 9.4. Det er ikke funnet en lineær sammenheng mellom injiserte mengder per injeksjonsskjerm. Plottet indikerer likevel mindre spredning av injeksjonsdata for økt bergoverdekning. For sammenstillingen av gjennomsnittlige mengder og boremeter av alle delstrekninger, som vist i figur 9.3, indikerer verdiene derimot en klar trend til reduisering i antall boremeter og injeksjonsmengder, med hensyn til overdekning. Unntaket er for de laveste overdekningene, der injeksjonsmengdene går ned. En sammenheng kan være at områder langs strekningene der overdekningen er under 10 m, hovedsakelig er tilknyttet påhugg eller svakhetssoner. Høy forvittringsgrad og sprekkefyllingsgrad er nærliggende relatert til områder med lav bergoverdekning. En annen sammenheng kan knyttes til at datagrunnlaget i denne studien, er betydelig mindre for strekninger av tunnel der bergoverdekningen er under 10 m.

I geologisk sammenheng er det nærliggende at bergmassekvalitet og innspenning, reduseres ved lavere bergoverdekning. I studien er det ikke forsøkt å korrelere Q-parametere og injiserte mengder eksplisitt, ved eksempelvis punkt-diagram. Tidligere studier viser svak til ingen tydelig korrelasjon, mellom Q-parametere og injiserte mengder injeksjonsmasse (Davik, Bhasin og Kveldsvik 2002). Det er følgelig valgt å fremstille de ulike delstrekningene grafisk, for seksjoner av 20 m tunnel. Fra grafene er det ikke funnet sammenheng mellom Q-verdi og injiserte mengder, foruten en moderat sammenheng for delstrekning Hovedløp Lysaker vest. Tverrslag Lilleaker, Dyprenne E18, Hovedløp Fornebuporten nord og Flytårnet, viser en trend mot at reduserende J_n -verdi, gir reduserte injeksjonsmengder. Med dette menes det ikke der J_n er lav, men der verdien minker med hensyn til driveretning. Dette kan relateres til at det er forsøkt tilpasning av injeksjonsprosedyre i tilfeller ved økende bergmassekvalitet.

For å beskrive nødvendig injeksjonsinnsats, prosjekteres det normalt med hensyn til vurderinger vedrørende forven-

tet innlekkasje. Under driving benyttes blant annet kontrollboring og injeksjonsboring, til bestemmelse av hvorvidt det er oppnådd tilfredsstillende tetthet. Sammenstillingen av innlekkasje fra injeksjonsboring og injiserte mengder er beskrevet i delkapittel 9.2.3 Innlekkasje ved injeksjonsboring. Resultatene fra figur 9.7 viser at det ikke er nærliggende sammenheng mellom større påtruffet innlekkasje og økte injeksjonsmengder. For strekningen Tverrslag Lilleaker, virker det å være sammenfallende at det er økt innlekkasje i tilknytning til gangbergarter, svakhetssoner og lavere bergoverdekning.

I forbindelse med datasammenstilling og gjennomgang av rapporter fra injeksjonsboring, er det registrert generelt høyere innlekkasje for entrepris K2B. En forklaring kan relateres til ulike praksis for lekkasjeregistrering mellom entreprenørene, samt erfaringer gjort fra foregående strekninger av entrepris K2A. Tverrslag Lilleaker er i den innledende delen av entrepris K2B, og danner erfaringsgrunnlaget for videre driving av hovedløpstunnel og stasjonshaller. Det kan også knyttes noe usikkerhet ved datasammenstilling av borerapportene ved entrepris K2A. Rapportene er sammenstilt manuelt, fra håndskrevne notater, og derfor ikke kontrollert av tredjepart. I studien er det tilstrebet å skille mellom rapporter fra injeksjonsboring og kontrollboring.

Enkelte områder av Dyprenne E18, Hovedløp Fornebuporten Nord og Flytårnet, viser større innlekkasje ved injeksjonsboring. Etter gjennomgang av geologiske oversiktstegninger for samtlige delstrekninger, er det funnet at de største lekkasjene er registrert i tilknytning til mænaitt- og syenittporfyrganger. Strøkretningen til nevnte gangbergarter er NØ-SV retning, og følger hovedsprekkesett 1 og 2. I Tverrslagstunnel Lilleaker er mænaittgangen parallell til tunnelorienteringen, og er blitt funnet i høyre vegg og vederlag, ved gjennomgang av lidarscanning. Den største registrerte lekkasjen er tilknyttet det som i studien er blitt betegnet som syenittsonen, omkring pelenummer 8000. Fra ingeniørgeologisk kartlegging i tunnel, vist i vedlegg G.2, er det registrert en mindre svakhetszone, i samme område som den kryssende syenittgangen. Svakhetssonen er parallell til driveretningen, med NNW-SSØ retning, og ingeniørgeologisk kartlegging viser svært redusert bergmassekvalitet i området. Resultatene har vist at kombinasjonen av gangbergart og svakhetszone er svært utfordrende med hensyn til innlekkasje og vanntetting. Det er i denne sammenhengen også registrert en betydelig økning i injiserte mengder.

For strekningen Dyprenne E18 viser injeksjonsboring en større innlekkasje inn mot svakhetssonen ved pelenummer 7900. Dersom det er beviselig at svakhetssonen er en forkastningssone, vil dette sammenfalle godt med Bjørlykke (2004) sin beskrivelse av sone C. Videre driving, ved synkende pelenummer, viser ikke tegn til betydelig påtruffet lekkasje. Det ble i denne overgangen besluttet å bruke UFC, som følgelig har gitt tilstrekkelig tetting foran stuff.

Enkelte områder ved Dyprenne E18, Hovedløp Fornebuporten nord og Flytårnet, viser økte mengder injeksjonsmasse uten betydelig påtruffet innlekkasje ved injeksjonsboring. De høyeste injeksjonsmengdene kan til i stor grad relateres til områder med lav overdekning og i tilknytning til svakhetssoner.

En oppsummering fra de analyserte dataene viser at det er registrert større påtruffet lekkasje i forbindelse med gangbergarter med NØ-SV strøkretning, uten at det nødvendigvis har ledet til økning av injiserte mengder. Unntaket gjelder syenittsonen der det også er påtruffet en svakhetszone parallell til tunnelorientering. Generelt er det registrert økning av injeksjonsmengder i områder med lavere bergoverdekning og i tilknytning til svakhetssoner.

11 Konklusjon

Studien har sett på prosjektering og utførelse av injeksjon, i utfordrende bergmasseforhold ved Fornebubanen. Målet med studien var å redegjøre for hvilke geologiske parametere som har påvirket valg ved injeksjonsprosedyrer. I tillegg er det sett på hvordan geologiske parametere har innvirket på prosjektering og utførelse av injeksjon ved utfordrende bergmasseforhold ved Fornebubanen. Til slutt er det sett på sammenhenger mellom geologiske parametere og injeksjonsmengder.

11.1 Geologiske parametere og valg av injeksjonsprosedyrer

På bakgrunn av foregående analyse og diskusjon, er hovedfunnene fra studien at geologiske parametere har en større betydning for valg av injeksjonsprosedyrer ved Fornebubanen. Tunneltraseen strekker seg hovedsakelig igjennom kalkstein og skifer i veksling, og påtreffer svært varierte bergmasseforhold med hyppig opptreden av gangbergarter, svakhetssoner og minimal bergoverdekning. Fornebubanen innehar et omfattende datagrunnlag og det er utført en rekke forundersøkelser i forbindelse med bestemmelse av vanntetting. Sammenstilling av prosjekteringsdata, intervju og kvantitativ analyse, viser at injeksjonen tilpasses områder med lav bergoverdekning og i svakhetssoner. Dette innebefatter reduksjon av hullengder, skjermavstand og salvelengder, samt injeksjon over flere omganger og bruk av finere injeksjonsmidler. Det er vist at tilfredstillende tetthet er oppnådd ved utstrakt injeksjonsinnsats og enkelte unike tilpasninger i områder der bergoverdekningen er lav, og i tilknytning til svakhetssoner. Målinger fra tunnel viser at de strenge tetthetskravene er oppnåelig ved aktiv overvåking av poretrykksutviklingen i forbindelse med driving.

Resultatene fra studien har belyst viktigheten av forundersøkelser i tunnelprosjekter ved utfordrende bergmasseforhold. Lugeonmålinger, kjernelogging og kartlegging i dagen har lagt føringer for prosjektering av injeksjon. Prosjektet benytter i all hovedsak mikrosegment og kolloidal silika, samt noe bruk av ultrafin sement. Erfaringsgrunnlaget fra tidligere prosjekter har gitt gode føringer for nødvendig injeksjonsinnsats, samt at erfaringer i anleggsfasen har gitt ytterligere optimalisering av injeksjonsprosedyrene. I prosjekteringsfasen har stedlige geologiske forhold lagt til grunn for bestemmelse av ulike tiltaksklasser. Tiltaksklassene beskriver nødvendige tettetiltak, med utgangspunkt i sårbarhetsanalyser for skader på naturmiljø og setningsutvikling. Dette har gitt forutsigbarhet vedrørende vanntetting.

11.2 Geologiske parameteres betydning for injeksjoninnsatsen og injeksjonsmengder

Funn i studien viser at injeksjonsmengdene øker betydelig i tilknytning til gangbergarter og svakhetssoner. Økningen av gjennomsnittlige injiserte mengder per m tunnel er henholdsvis 150% og 186%, og knyttes i liten grad til tilpasning av injeksjonsgeometri. Resultatene tilsier at det er enkelte sammenhenger knyttet til økning av antall bor-meter og injeksjonsmengder, ved reduserende bergoverdekning. Kombinasjoner av svakhetssoner og gangbergarter har hatt størst betydning for injeksjonsmengder og innlekkasje. Studien har ikke funnet en tydelig sammenheng mellom påtruffet innlekkasje i tunnel og økning av injeksjonsmengder. Resultatene fra fukt- og dryppkartlegging viser at det i utfordrende bergmasseforhold er krevende å gjennomføre injeksjonsarbeider i forbindelse med tyngre sikring.

12 Videre arbeid

I denne oppgaven er det lagt vekt på de geologiske aspektene ved utførelse av injeksjon, samt prosjektering av vanntetting i utfordrende bergmasseforhold. Gjennom arbeidsprosessen har det vært mye fokus på detaljert beskrivelse av stedlige variasjoner langs Fornebubanen. Dette er gjort for å i større grad kunne knytte utfordringer og løsninger til stedlig geologi. I tillegg vil dette i større grad redegjøre for de rent injeksjonstekniske utfordringene, som ikke er styrt av geologiske parametere. Grunnet mange variabler i relasjon til en injeksjonsrunde, er det funnet krevende å illustrere eksempler der forutsetningene for spesifikke injeksjonsparametere eller geologiske parametere, er like. Dette vil i større grad kunne gjøres ved et mer spisset studieområde, der vurdering av enkeltprosedyrer og tettearbeid kan foretas i detalj. I studien er det gjort gode erfaringer ved bruk av lidarscanning, for detaljerte geologiske beskrivelser. Etterhvert som teknologien utvikles, vil det være interessant å knytte 3D modeller til geologi, injeksjonsutforming og utførelse av injeksjon.

I områder med lav bergoverdekning, redusert bergmassekvalitet og generelt utfordrende bergmasseforhold er tunnelstabilitet også et viktig aspekt ved vanntetting. Etablering av tyngre sikring som sprøytebetongbuer, gitterbuer og rørskjermer vil komplisere den praktiske gjennomføring for utførelse av injeksjon. Behovet for tyngre sikring er ikke nødvendigvis avdekket for alle strekninger av et tunnelprosjekt, og det gjøres aktive tilpasninger på bakgrunn av de geologiske forholdene på stoff. Ettersom vanntetting foregår 10 - 30 m foran stoff, vil ikke nødvendigvis injeksjonsgeometrien være godt tilpasset tyngre sikring. Tunnelverrsnittet er normalt fastsatt for de prosjekterte forholdene, og ved uforutsett lav bergmassekvalitet, utvides nødvendigvis sprengningsprofilen til å passe den tyngre sikringen. Følgelig vil den injiserte sonen bli redusert, og kan punkteres ved installering av sikringen. Kompetansen rundt gode løsninger for vanntetting og tyngre sikring bør utforskes. Dette belyser også viktigheten av forutsigbarhet ved tunneldriving, gjennom grundige forundersøkelser og kompetanseutvikling.

Referanser

- Andersens Mekaniske Verksted (2022). *AMV Grouting Unit Container Based*. URL: <https://www.amv-as.no/grouting-unit-container-based>.
- Andrew, R. M. (2019). «Global CO_2 emissions from cement production, 1928–2018». I: *Earth System Science Data* 11.4, s. 1675–1710.
- Barton, N., S. Bandis og K. Bakhtar (1985). «Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints». I: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 22.3, s. 121–140. ISSN: 0148-9062. DOI: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)93227-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)93227-9).
- Barton, N. (1978). «Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses: International Society for Rock Mechanics». I: 15, s. 319–368.
- (2011). «An Engineering Assessment of Pre-Injection in Tunnelling». I: *INDOROCK 2011: Third Indian Rock Conference by ISRM*.
- Barton, N., R. Lien og J. Lunde (des. 1974). «Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support». I: *Rock Mechanics Felsmekanik Mecanique des Roches* 6, s. 189–236. DOI: [10.1007/BF01239496](https://doi.org/10.1007/BF01239496).
- Barton, N. og E. Quadros (2019). «Understanding the need for pre-injection from permeability measurements: What is the connection?» I: *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11.3, s. 576–597. ISSN: 1674-7755. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.12.008>.
- Bjørlykke, K. (2004). *Geologien i Oslo-området*. Manuscript.
- Bohloli, B. mfl. (2019). «Cements for tunnel grouting – Rheology and flow properties tested at different temperatures». I: *Tunnelling and Underground Space Technology* 91, s. 103011. DOI: [10.1016/j.tust.2019.103011](https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103011).
- Brantberger, M., H. Stille og M. Eriksson (2000). «Controlling grout spreading in tunnel grouting — analyses and developments of the GIN-method». I: *Tunnelling and Underground Space Technology* 15.4, s. 343–352. ISSN: 0886-7798.
- Braathen, A. og R. Gabrielsen (2000). *Bruddsoner i fjell*. Gråsteinen. NGU. ISBN: 0807-4801.
- Bøe, S. (2020). «Ingeniørgeologisk kartlegging og numerisk modellering i UDEC og RS2, med parameterstudier, for Fornebubanen». Norwegian. Masteroppg. NTNU.
- Carlsson, A. og T. Olsson (1978). «Variations of hydraulic conductivity in some swedish rock types». I: *Storage in Excavated Rock Caverns: Rockstore 77*. Red. av M. Bergman. Pergamon, s. 301–307. ISBN: 978-1-4832-8406-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-8406-4.50058-0>.
- CloudCompare V2.12.4* (2023). <http://www.cloudcompare.org/> (hentet 20.04.2023). GPL software. Åpen kildekode utviklet for å visualisere og bearbeide tre-dimensjonale element.

- Creütz, M. mfl. (2017). «Unified Design Approach for Rock Grouting – Basis report». I: 167. ISSN: 1104-1773.
- Davik, K. I., R. Bhasin og V. Kveldevisvik (2002). *Frøyatunnelen - vurdering av injeksjon i forhold til Q-parametre*. Research report 2261. Vegdirektoratet, s. 42.
- Deere, D. U. (1964). «Technical description of rock cores for engineering purpose». I: *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1.1, s. 17–22.
- El Tani, M. (2003). «Circular tunnel in a semi-infinite aquifer». I: *Tunnelling and Underground Space Technology* 18.1, s. 49–55. ISSN: 0886-7798. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00102-5](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00102-5).
- Freeze, R. A. og J. A. Cherry (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall. ISBN: 0133653129.
- Garshol, K. (2011). *Pre-Excavation Grouting in Rock Tunneling*. Electronic Book.
- Goel, R. K. og B. Singh (2011). *Engineering Rock Mass Classification: Tunnelling, Foundations and Landslides*. Saint Louis: Saint Louis: Elsevier Science og Technology. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385878-8.00001-X>.
- Grørv, E., J. Funehag og T. Janson (mar. 2014). «Rock mass grouting in Sweden and Norway A matter of cultural differences or factual causes?» I: *Geotechnical News* 32, s. 41–51.
- Grørv, E., H. Strømsvik og M. H. Haugsand (2020). *Sementbasert berginjeksjon. Sluttrapport fra prosjektet TIGHT*. norsk. Rapport. SINTEF Community.
- Grørv, E. og O. Woldmo (2012). «Modern pre-grouting technology in Norway». I: *4th International Conference on Grouting and Deep Mixing 2012, February 15, 2012 - February 18, 2012*. Geotechnical Special Publication. American Society of Civil Engineers (ASCE), s. 805–815.
- Hansson, K. mfl. (2010). *MÄTNING AV INLÄCKANDE VATTEN TILL BERGTUNNLAR*. Rapport. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Haugsand, M. H. (2022). *Beskrivelse og vurdering av injeksjonsinnsatsen i K2A tverrslagstunnel per mars 2022*. Rapport. Fornebubanen.
- Hobbs, B. (1993). «The significance of structural geology in rock mechanics». I: *Comprehensive rock engineering*. Vol. 1, s. 25–62.
- Hognestad, H.-O. og K.-G. Holter (2012). «Modern pre-injection in underground construction with rapid-setting microcements and colloidal silica – applications in conventional and TBM-tunnelling». I: DOI: 10.1002/geot.201200001.
- Holmøy, K. (2008). «Significance of geological parameters for predicting water leakage in hard rock tunnels». Thesis.
- Holmøy, K. og M. Lindstrøm (2002). *Oppsummering av utførte undersøkelser og prognose for innlekkasje ved Grualiatunnelen*. Report. NTNU.

- Karlsrud, K., L. Erikstad og P. Snilsberg (2003). «Publikasjon 103 - Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø». I.
- Klüver, B. og A. Kveen (2004). «Berginjeksjon i praksis». I: ISSN: 0803-6950.
- Klüver, B. H. (2000). *Intern rapport nr. 2151 - Delprosjekt C: Tetteteknikk*. Rapport. Statens Vegvesen.
- Kobayashi, S. mfl. (2008). «Real Time Grouting Control Method». I: ISSN: 1402-3091.
- Langford, J. mfl. (2022). «Analysis of water ingress, grouting effort, and pore pressure reduction caused by hard rock tunnels in the Oslo region». I: *Tunnelling and Underground Space Technology* 130, s. 104762. ISSN: 0886-7798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104762>.
- Lombardi, G. og D. Deere (1993). «Grouting design and control using the GIN principle». I: *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* 30.6, s. 372. ISSN: 0148-9062. DOI: 10.1016/0148-9062(93)91546-U.
- Luciani, A. og D. Peila (2019). «Tunnel Waterproofing: Available Technologies and Evaluation Through Risk Analysis». I: *International Journal of Civil Engineering* 17.1, s. 45–59. ISSN: 2383-3874. DOI: 10.1007/s40999-018-0328-6.
- NBG (1999). *Engineering geology and rock engineering manual*. Bd. 12. Oslo. ISBN: 82-91341-33-8.
- Neby, A. og O. Woldmo (2022). «Tiltak for effektivisering av injeksjonsarbeidene gjennom skjerpet krav til egenskaper for sementbaserte injeksjonsmaterialer». Upublisert arbeid.
- NFF (2002). «Berginjeksjon». I: bd. 2. Oslo: Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk, s. 116. ISBN: 82-91341-65-6.
- (2010). *Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg*. Bd. nr. 6. Håndbok (Norsk forening for fjellsprenningsteknikk). Oslo: Norsk forening for fjellsprenningsteknikk. ISBN: 9788292641200.
 - (2011). «Rock Mass Grouting in Norwegian Tunnelling». I: 20, s. 108.
 - (2018). «Kort innføring i borparametertolkning for anleggsdrift - Teknisk rapport nr. 18». I: 18, s. 21.
- NGI (2015). «Bruk av Q-systemet». I: s. 56.
- Nilsen, B. (2016). *Ingeniørgeologi-berg grunnkurskompendium*. Trondheim: Akademika.
- Nordgulen, Ø. (1998). *Geologisk og strukturgeologisk kartlegging for Jernbaneverket Utbygging i Asker og Bærum*. Rapport 0800-3416. NGU.
- Olsson, R. og N. Barton (2001). *An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints*. Artwork. 38. DOI: 10.1016/S1365-1609(00)00079-4.

- Osipov, V. I. (2015). «The Terzaghi Theory of Effective Stress». I: *Physicochemical Theory of Effective Stress in Soils*. Red. av V. I. Osipov. Cham: Springer International Publishing, s. 35–37. ISBN: 978-3-319-20639-4. DOI: 10.1007/978-3-319-20639-4_2.
- Pells, P. mfl. (2017). «Rock quality designation (RQD): time to rest in peace». I: *Canadian Geotechnical Journal* 54.6, s. 825–834.
- PGF (2019). *Tettestrategi*. Rapport.
- (2020a). *Enterpriseoversikt*. Teknisk tegning.
 - (2020b). *Ingeniørgeologi - Konkurransgrunnlag Lysaker til Fornebu base og stasjon*. Rapport.
 - (2021). *Ingeniørgeologisk rapport - Konkurransgrunnlag Vækerø til Lysaker*. Rapport PF-U-660-RB-0011.
 - (2023). *Vurdering av behov for vanntett støp K2A*. Rapport.
- Rafi, J. Y., H. Stille og F. Johansson (2017). *Jacking of rock fractures during pre-grouting in scandinavian tunneling projects – a study of the effects from chosen grouting pressure*. Rapport 1104-1773. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Ramberg, I. mfl. (2013). *Landet blir til - Norges geologi*. Bd. 2. Trondheim: Norsk Geologisk Forening, s. 656.
- Singh, B. og R. K. Goel (2011). «Chapter 4 - Rock Quality Designation». I: *Engineering Rock Mass Classification*. Red. av B. Singh og R. K. Goel. Boston: Butterworth-Heinemann, s. 21–31. ISBN: 978-0-12-385878-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385878-8.00004-5>.
- Strømsvik, H. (2019). «The significance of hydraulic jacking for grout consumption during high pressure pre-grouting in Norwegian tunnelling». I: *Tunnelling and Underground Space Technology* 90, s. 357–368. ISSN: 0886-7798.
- Strømsvik, H. og B. Gammelsæter (2020). «Investigation and assessment of pre-grouted rock mass». I: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 79.5, s. 2543–2560. ISSN: 1435-9537. DOI: 10.1007/s10064-019-01722-9.
- SVV (2004). *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler : sluttrapport*. Rapport.
- (2018). «Prosesskode 1 - Standard beskrivelse for vegkontrakter». I: s. 256.
 - (2022). «V521 - Geologi og bergsikring i tunnel». I: s. 86.
- Thiele, S. T. mfl. (2017). «Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data». I: *Solid Earth* 8.6, s. 1241–1253. DOI: 10.5194/se-8-1241-2017.
- Thollefsen, S. (2022). «Dagens praksis for tilpasning av forinjeksjon til geologiske parametere». Upublisert arbeid. Trondheim.
- Tokheim, O. og N. Janbu (1984). *Flow rates of air and water from caverns in soil and rock*. Konferanse artikkel.

Vaskou, P. mfl. (2019). *ISRM Suggested Method for the Lugeon Test*. Artwork. 52. DOI: 10.1007/s00603-019-01954-x.

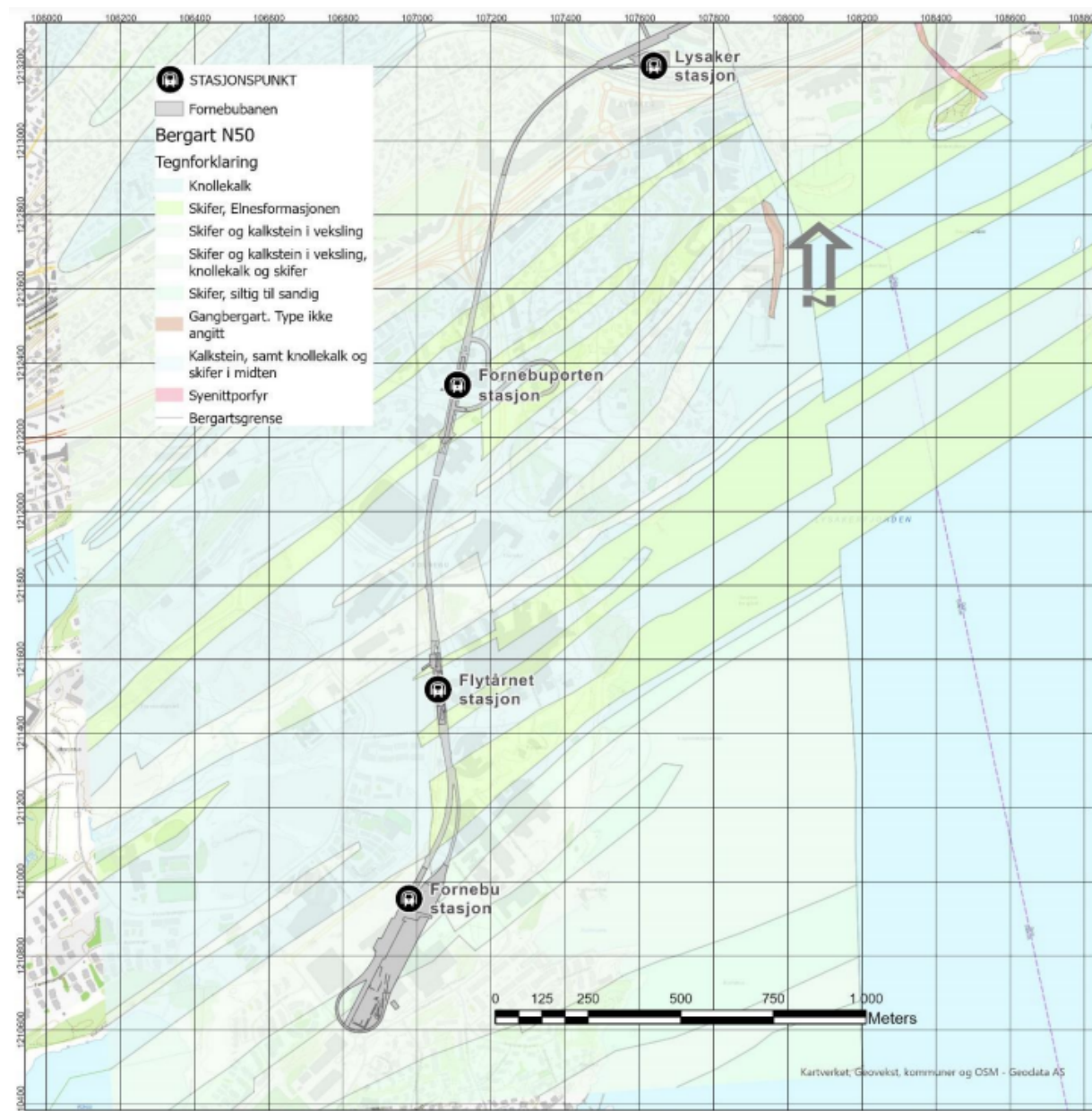
Werenskiold, W. (1911). *Fornbolandet og Snarøen i Østre Bærum nr. 58*. Rapport. Norges Geologiske Undersøkelse.

Zoback, M., C. A. Barten og D. Moos (1995). «Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock». I.

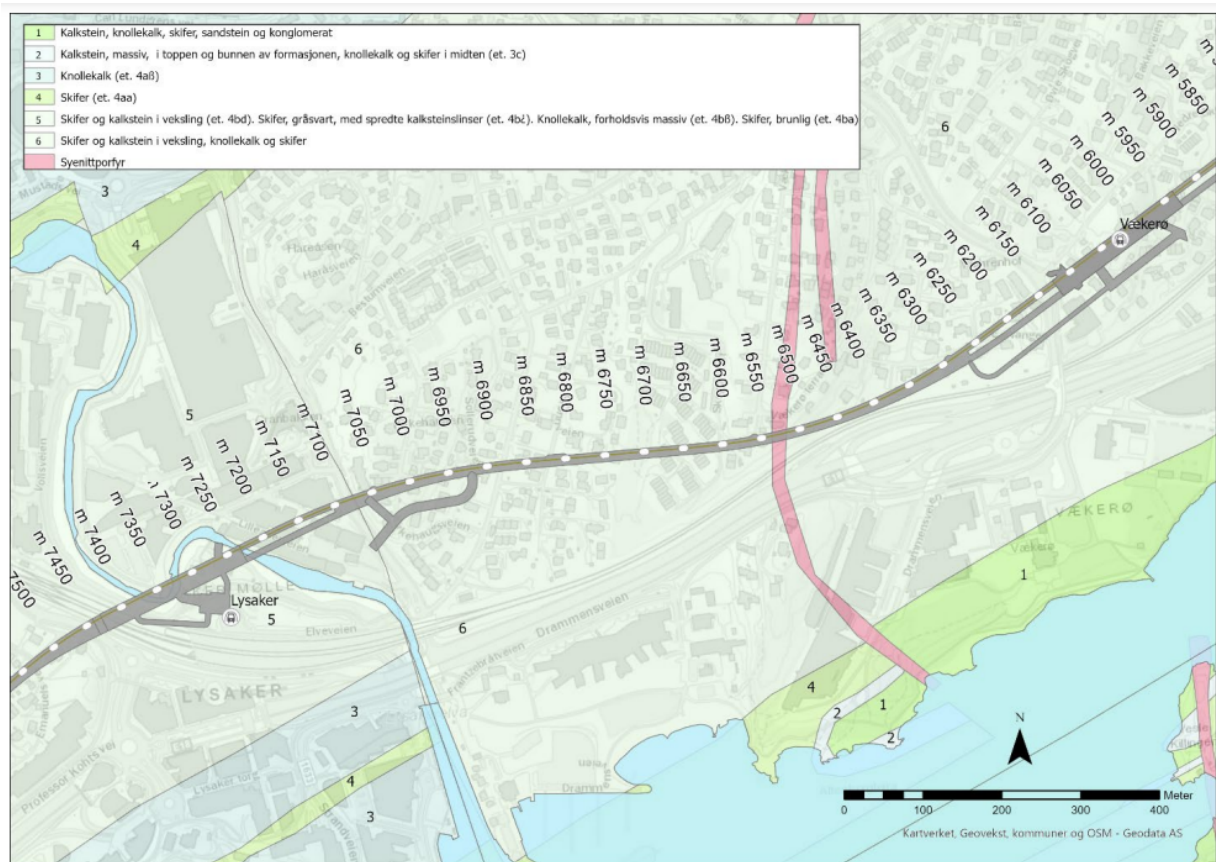
VEDLEGG

A BERGGRUNNSKART - FORNEBUBANEN

A.1 BERGGRUNNSKART OVER STREKNINGEN MELLOM FORNEBU-LYSAKER, HENTET FRA INGENIØRGEOLOGISK RAPPORT

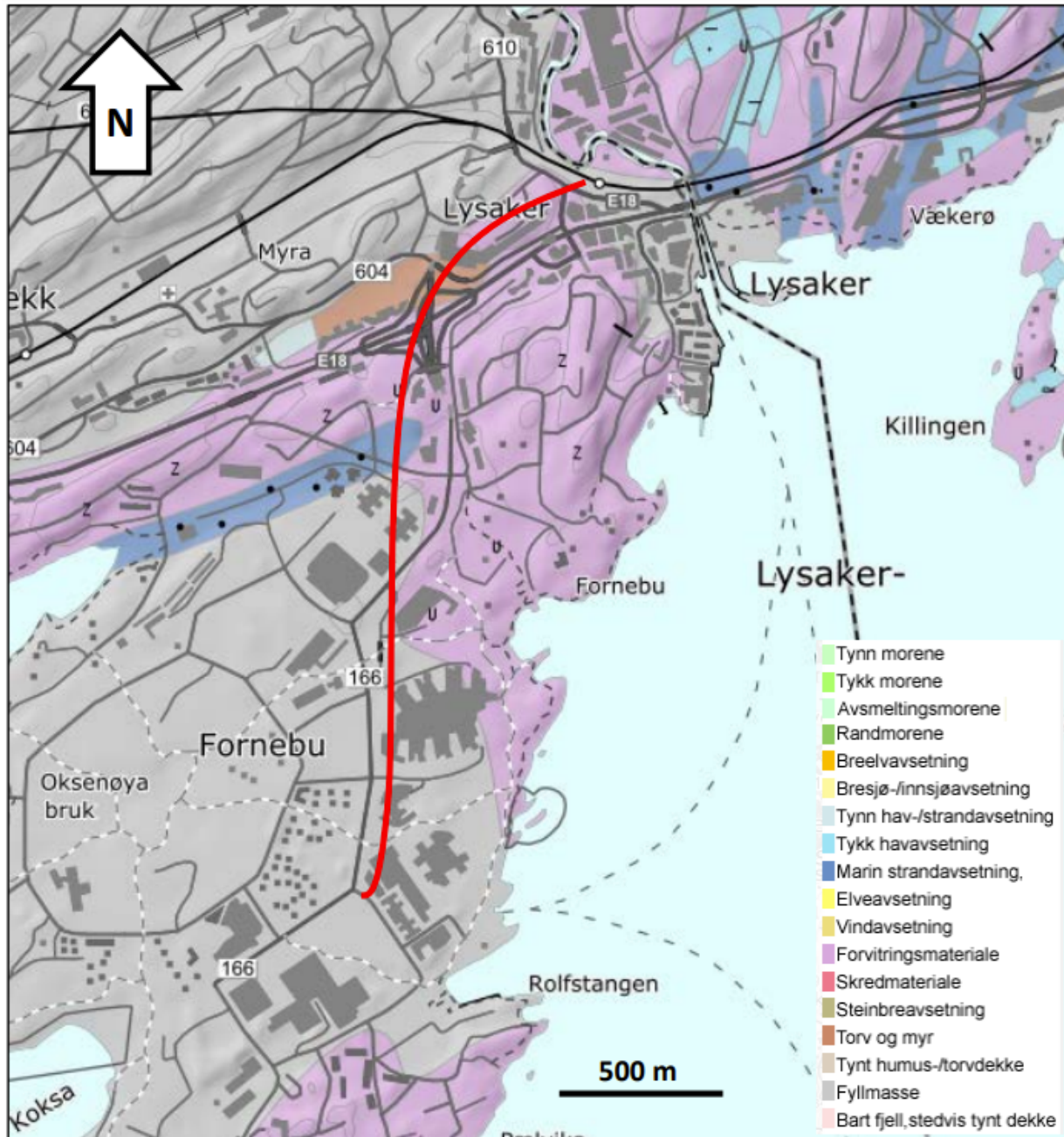


A.2 BERGGRUNNSKART OVER STREKNINGEN LYSAKER - VÆKERØ, HENTET FRA INGENIØRGEOLOGISK RAPPORT



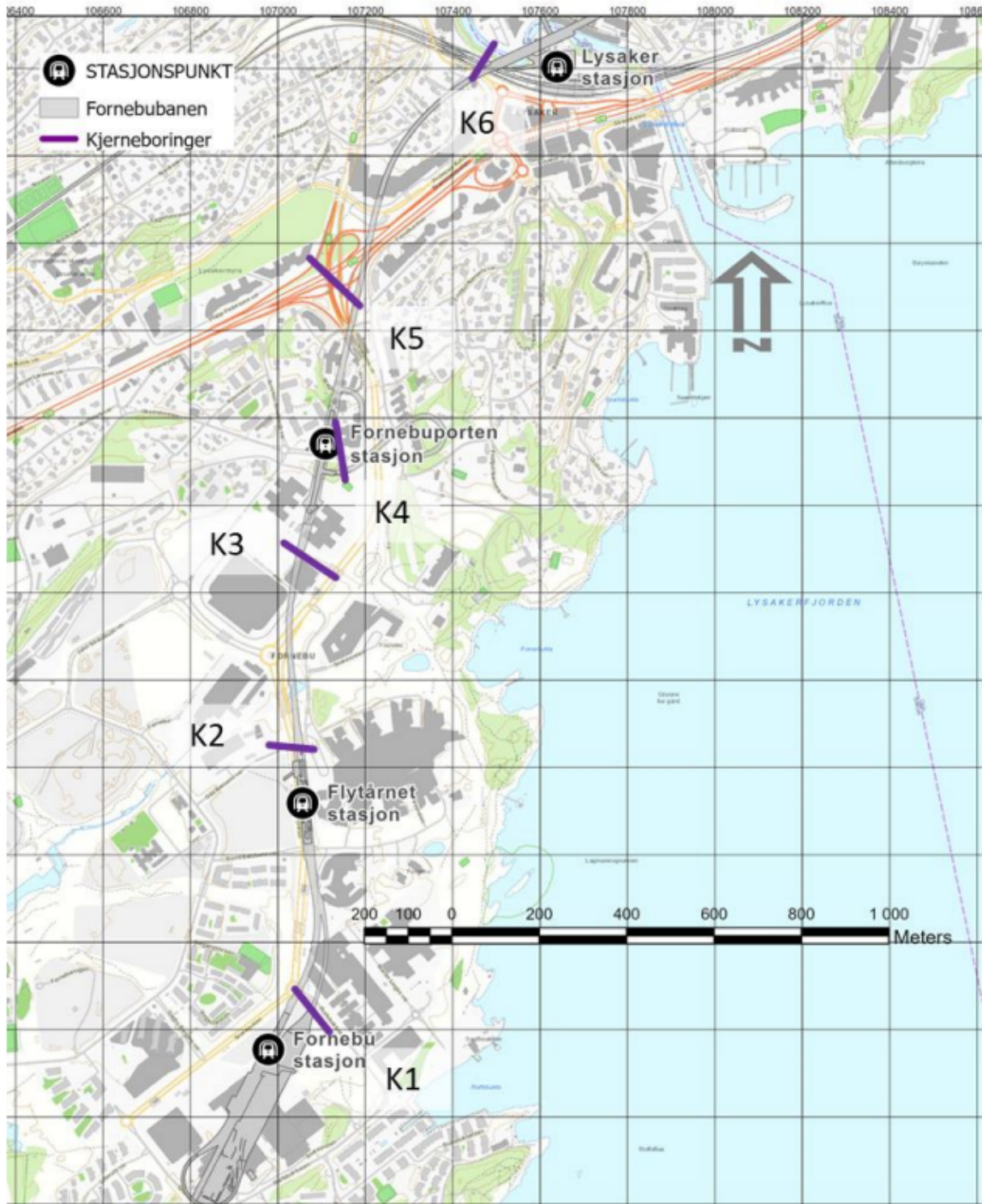
B LØSMASSEKART - FORNEBUBANEN

B.1 LØSMASSEKART OVER STREKNINGEN FORNEBU - LYSAKER, HENTET FRA INGENIØRGEOLOGISK RAPPORT

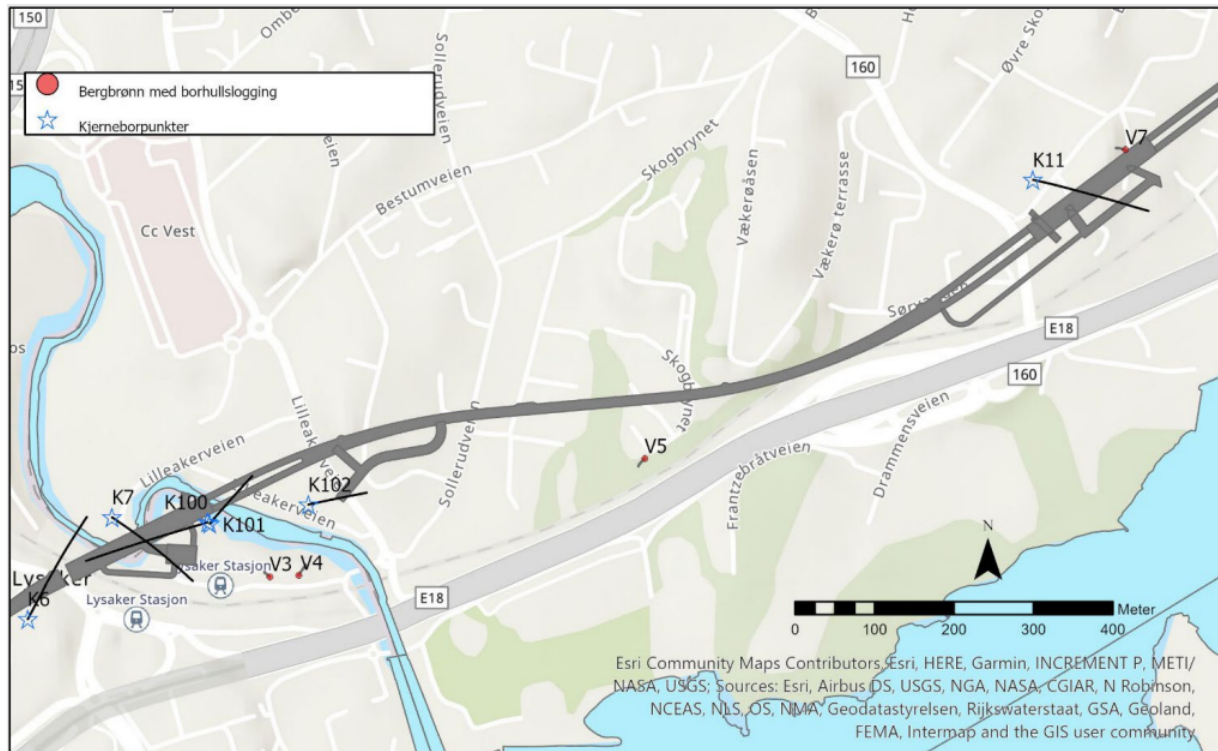


C KJERNEBOREHULL - FORNEBUBANEN

C.1 PLASSERING AV KJERNEBOREHULL VED FORNEBU-LYSAKER, HENTET FRA INGENØRGEOLISK RAPPORT



C.2 PLASSERING AV KJERNEBOREHULL PLASSERING FOR LYSAKER-VÆKERØ HENTET FRA INGENIØRGEOLOGISK RAPPORT

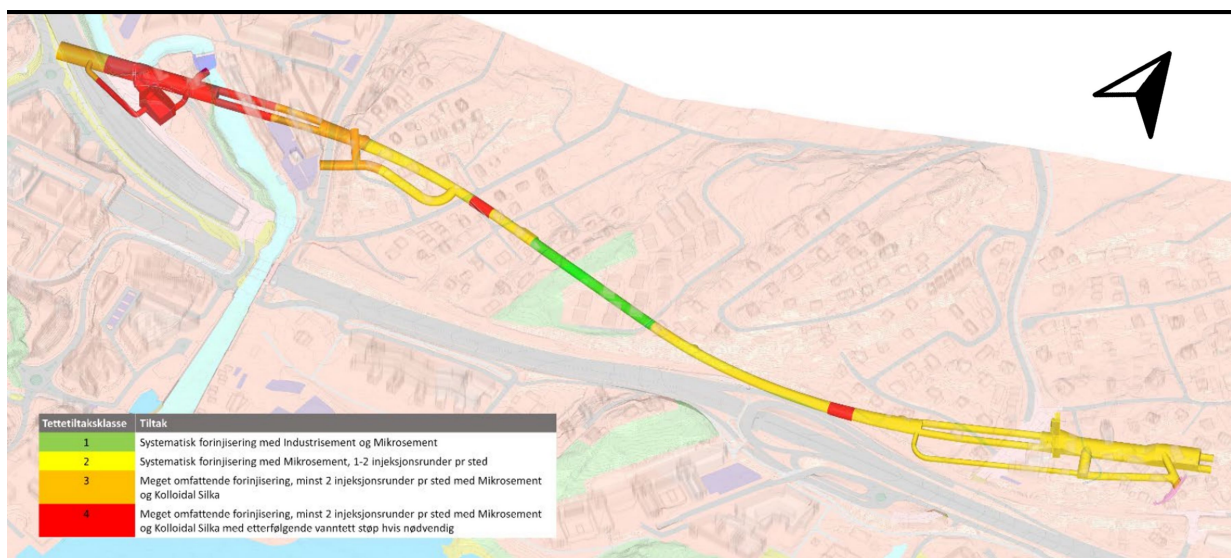


D TILTAKSKLASSER - FORNEBUBANEN

D.1 TILTAKSKLASSER OG INNDELING FOR STREKNINGEN MELLOM FORNEBU BASE OG LYSAKER MED HENSYN TIL SÅRBARHET, RISIKO, GEOLOGI OG VANNTETTING. HENTET FRA INTERNRAPPORT ”TETTESTRATEGI”



D.2 TILTAKSKLASSER OG INNDELING FOR STREKNINGEN MELLOM FORNEBU BASE OG LYSAKER MED HENSYN TIL SÅRBARHET, RISIKO, GEOLOGI OG VANNTETTING. HENTET FRA INTERNRAPPORT ”TETTESTRATEGI”



E RESULTATER FRA INTERVJU

Parameter	Tiltak	Hvorfor
Hullavstand (c/c) [m]	Økes	- Erfaring - Tids-og kostnadsfaktorer
	Reduseres	- Tett oppsprekking - Skifrig bergmasse - Krav til tetthet - Kryss og unik geometri
Stikning [m]	Økes	- Boltelengde og tyngre sikring - Erfaringstall
	Reduseres	- Lav overdekning - Tid-og kostnadsfaktorer - Begrensning av injisert sone
Hullengde [m]	Økes	- Foregående skjerm, salvelengde og overlapp - Erfaring - Tid-og kostnadsfaktorer
	Reduseres	- Hullavstand - Boravik - Bergartstype: Skifrig bergmasse relatert til boravik - Svakhetssoner
Overlapp [m]	Økes	- Krav til tetthet - Foregående skjermengde - Salvelengde - Påtruffet lekkasje
	Reduseres	- Foregående skjermengde
Salvelengde [m]	Økes	- Tids-og kostnadsaspekt - Overlapp - Økende bergmassekvalitet
	Reduseres	- Påtruffet lekkasje - Bergmassekvalitet - Svakhetssoner - Stabilitet
Antall omganger	Økes	- Krav til tetthet - Bergoverdekning - Påtruffet lekkasje
	Reduseres	- Tids-og kostnadsaspekt - Resultat fra kontrollhull

Antall kontrollhull	Økes	<ul style="list-style-type: none"> - Krav til tetthet og tiltaksklasse - Kontraktsmessige forhold - Påtruffet lekkasje og antall omganger
	Reduseres	<ul style="list-style-type: none"> - Gode bergmasseforhold, og tiltaksklasse
Sement typer	Grovere	<ul style="list-style-type: none"> - Krav til tetthet, tiltaksklasse og prosedyre - Kostnadsaspekt - Mengdeforbruk - Kontraktsmessige forhold
	Finere	<ul style="list-style-type: none"> - Krav til tetthet, tiltaksklasse og prosedyre - Sprekkeåpning og bergartstype - Erfaring - Materialeegenskaper: Herdetid, vannseparasjon - Påtruffet innlekkasje
Kolloidal silika	Anvendes	<ul style="list-style-type: none"> - Krav til tetthet, tiltaksklasse og prosedyre - Fintetting ved liten sprekkeåpning - Som ekstra skjerm
	Anvendes ikke	<ul style="list-style-type: none"> - Større innlekkasje, fare for utvasking - Der sementbasert injeksjon gir tilstrekkelig tetting
Trykk	Økes	<ul style="list-style-type: none"> - Gode spenningsforhold - Stedlig vanntrykk - Erfaring
	Reduseres	<ul style="list-style-type: none"> - Lav bergoverdekning - Utgang i dagen - Bergmekaniske egenskaper – for å unngå jekking
Volum	Økes	<ul style="list-style-type: none"> - Erfaring - Metode - Forventet sprekkeåpning og volum som må fylles - Økt innlekkasje og svake tetteresultat
	Reduseres	<ul style="list-style-type: none"> - Kostnad-og tidsaspekt - W/C forhold

F INJEKSJONSPROSEDYRER - K2A

F.1 IP-2-K2A - TILTAKSKLASSE 1 OG 2

Prosedyrebeskrivelse K2A – tiltaksklasse 1 og 2 for valgte strekninger

Parameter	Beskrivelse	Bemerkning
c/c [m]	0,9	Ansett på stuff
Hullantall	45 - 65	Fra borelogger
Hullengde [m]	24	Justert ned fra opprinnelig 27m grunnet avvik
Stikning [m]	5 – 6	Justeres ved nisjer og bergsikring
Overlapp [m]	9	
Salvelengde [m]	5	Injeksjonsskjerm etter tre salver
Antall omganger	1-2	Vurderes etter innlekkasje
Kontrollhull	5	Som del av injeksjonsskjerm eller etter første salve
Materialer	Mikrosement	5 – 6% silikaslurry 0,5 – 2% SP
Resept	MFC 1	
Metode	Systematisk Aktiv injeksjon	
Flow [l/min]	15 – 20	Hvis plutselig trykkfall under pumping settes hull på pause. Videre pumping vurderes i samråd med kontrollør
Makstrykk [Bar]	Heng Vegg Såle 30 30 30	Varighet: Stabilt trykk i 120 sekunder Nedjustert fra [30 – 35 – 40 Bar] etter spenningsmåling og masseinnngang

Reseptbeskrivelse K2A – MFC 1

Resept	Stoppkriterer	W/C	Maks volum
1	Masseinngang eller stopptrykk	0,9	Øvre del: 500 L Nedre del: 750 L
2	Masseinngang eller stopptrykk	0,6	400 L
3	Avsluttes ved tykkes mulig masse	0,5	200 L

F.2 IP-3-K2A - TILTAKSKLASSE 3

Prosedyrebeskrivelse K2A – tiltaksklasse 3 for valgte strekninger

Parameter	Beskrivelse	Bemerkning
c/c [m]	0,7 - 0,9	Ansett på stoff
Hullantall	35 - 58	Fra borelogger
Hullengde [m]	18 - 21	Spesielt prosjektert
Stikning [m]	5 - 7	Spesielt prosjektert
Overlapp [m]	9	Avhenger av foregående skjerm
Salvelengde [m]	3 - 5	Injeksjonsskjerm etter en til to salver
Antall omganger	1 - 2	Vurderes etter innlekkasje
Boreprosedyre	Split-Spacing	Første skjerm bores med c/c 1,0 – 1,5 m, neste skjerm bores mellom forrige ansett i kontur
Kontrollhull	5	Som del av injeksjonsskjerm og etter første salve
Materialer	Mikrosement Ultrafinsement Kolloidal silika	<i>Standard:</i> Første skjerm MFC, andre skjerm KS <i>7840 – 7950:</i> Første skjerm UFC, andre skjerm UFC. Grunnet utvasking av KS 8% silikaslurry
Resept	MFC 1 UFC 1 KS 1	
Metode	Systematisk injeksjon Aktiv injeksjon	
Flow [l/min]	15 – 20	Hvis plutselig trykkfall under pumping settes hull på pause. Videre pumping vurderes i samråd med kontrollør
Makstrykk [Bar]	Heng Vegg Såle 15 20 30	Varighet: Stabilt trykk i 120 sekunder Justert ned fra [30 – 30 – 30 Bar]

Reseptbeskrivelse K2A – KS 1

Resept	Stoppkriterer	Åpentid	Maks volum
1	Masseinngang Makstrykk: 25 [bar]	20 min	500 L

Reseptbeskrivelse K2A – UFC 1

Resept	Stoppkriterer	W/C	Maks volum
1	Masseinngang eller stopptrykk	1,0	Øvre del: 500 L Nedre del: 750 L
2	Masseinngang eller stopptrykk	0,8	400 L
3	Avsluttes ved tykkes mulig masse	0,6	200 L

F.3 IP-4-K2A - TILTAKSKLASSE 4

Prosedyrebeskrivelse K2A – tiltaksklasse 4 for valgte strekninger

Parameter	Beskrivelse	Bemerkning	
c/c [m]	0,5 - 0,7	Ansett på stuff	
Hullantall	50 - 55	Per skjerm. Hentet fra borelogger	
Hullengde [m]	12 - 15	Spesielt prosjektert	
Stikning [m]	5 - 6	Spesielt prosjektert	
Overlapp [m]	9	Avhenger av foregående skjerm	
Salvelengde [m]	3 - 5	Injeksjonsskjerm etter hver salve	
Antall omganger	1 - 3	Vurderes etter innlekkasje. Området dyprenne E18 er det blitt utført ny omgang etter én salve. Området 7996 – 8026 er det utført nye injeksjonsrunder, som utdypes spesifikt	
Boreprosedyre	Split-Spacing	Første skjerm bores med c/c 1,0 – 1,5 m, neste skjerm bores mellom forrige ansett i kontur	
Kontrollhull	5	Som del av injeksjonsskjerm og etter første salve	
Materialer	Mikrosement	<i>Standard:</i> Første skjerm MFC, andre skjerm	
	Ultrafinsement	KS	
	Kolloidal silika	7840 – 7950: Første skjerm UFC, andre skjerm UFC. Grunnet utvasking av KS	
Resept	MFC 1	Resept for sone 8006 – 8026 er MFC 2	
	MFC 2		
	UFC 1		
	KS 1		
Metode	Systematisk injeksjon		
	Aktiv injeksjon		
Flow [l/min]	15 – 20	Hvis plutselig trykkfall under pumping settes hull på pause. Videre pumping vurderes i samråd med kontrollør	
Makstrykk [Bar]	Heng	Varighet: Stabilt trykk i 120 sekunder	
	Vegg		
	Såle		
	15	20	30

Reseptbeskrivelse K2A – «Svakhetssoner» - MFC 2

Resept	Stoppkriterer	W/C	Maks volum	Bemerkning
1	Masseinngang eller stopptrykk	1,0	800 L	Opp til 1200 L ved jevn trykkoppbygging Neste resept etter 500 L uten trykkoppbygging
2	Masseinngang eller stopptrykk	0,8	800 L	Opp til 2000 L, deretter hvile Neste resept etter 500 L uten trykkoppbygging
3	Masseinngang eller stopptrykk	0,7	200 L	
4	Vurderes spesielt	0,6	800 L	Tykkere masse etter 500 L uten trykkoppbygging

F.4 IP-FLYTÅRNET - TILTAKSKLASSE 4

Prosedyrebeskrivelse K2A – Flytårnet

Parameter	Beskrivelse	Bemerkning
c/c [m]	0,7	Ansett på stoff
Hullantall	20 - 80	Per skjerm. Hentet fra borelogger
Hullengde [m]	21	Spesielt prosjektert
Stikning [m]	0 – 5	Spesielt prosjektert. Horisontale hull i stoff og tilpasset stikning til og fra svakhetssone grunnet overdekning < 4m
Overlapp [m]	-	Avhenger av foregående skjerm
Salvelengde [m]	1,5 - 5	Injeksjonsskjerm etter hver salve
Antall omganger	1 - 2	Vurderes etter innlekkasje.
Boreprosedyre	Split-Spacing	Første skjerm bores med c/c 1,0 – 1,5 m, neste skjerm bores mellom forrige ansett i kontur
Kontrollhull	5	Som del av injeksjonsskjerm og etter første salve
Materialer	Mikrosement	8% silikaslurry
	Ultrafinsement	<i>Standard:</i> Første skjerm MFC, andre skjerm
	Kolloidal silika	KS <i>9100 - 9140:</i> UFC
Resept	MFC 1	
	UFC 1	
	KS 1	
Metode	Systematisk injeksjon Aktiv injeksjon	
Flow [l/min]	15 – 20	Hvis plutselig trykkfall under pumping settes hull på pause. Videre pumping vurderes i samråd med kontrollør
Makstrykk [Bar]	Heng	Varighet: Stabilt trykk i 120 sekunder
	Vegg	
	15	20
		30

G INJEKSJONSPROSEDYRER - K2B

G.1 IP-2-K2B OG IP-3-K2B - TILTAKSKLASSE 2 OG 3

Prosedyrebeskrivelse K2B – tiltaksklasse 2 og 3

Parameter	Beskrivelse	Bemerkning
c/c [m]	0,7	Ansett på stuff. (1,8 m ved hullenden)
Hullantall	36 - 55	Per skjerm. Fra borelogger
Hullengde [m]	24 - 27	Hullengde tilpasses mellom 12 – 28 m, eksempelvis for omlastestasjon og lekkasje.
Stikning [m]	6	Justert fra K2A grunnet boltelengder
Overlapp [m]	9	
Salvelengde [m]	5,5	Injeksjonsskjerm etter en til tre salver
Antall omganger	1 - 3	Vurderes etter innlekkasje
Boreprosedyre	Indre og ytre skjerm	Andre skjerm bores med ansett én meter innenfor forrige skjerm
Kontrollhull	5 – 8	Stikning 2m utenfor tunnelprofil
Materialer	Mikrosement Kolloidal silika	<i>Standard:</i> Første skjerm MFC, andre skjerm KS 5 – 8% silikaslurry
Resept	MFC 3 KS 2	
Metode	Systematisk injeksjon Aktiv injeksjon	
Maks flow [l/min]	20 – 25	
Stoptrykk [Bar]	Klasse 2: 20 – 25 Klasse 3: 15 – 20	Henholdsvis 10 og 15 bar for KS Varighet: Stabilt trykk i 120 sekunder. Omtrent 1 bar per meter overdekning

Reseptbeskrivelse K2B – MFC 3

Resept	Stoppkriterer	W/C	Maks mengde
1	Masseinngang eller stopptrykk	0,9	Klasse 2: 0 – 400 L Klasse 3: 0 – 300 L
2	Masseinngang eller stopptrykk	0,7	Klasse 2: 400 – 800 L Klasse 3: 300 – 600 L
3	Avsluttes ved tykkes mulig masse	0,5	Klasse 2: 800 – 1200 L Klasse 3: 600 – 900 L

Reseptbeskrivelse K2B – KS 2

Resept	Stoppkriterer	Åpentid	Maks volum
1	Masseinngang. Makstrykk:		(Per hull)
	Klasse 2: 15 [bar]	30 – 40 min	350 L
	Klasse 3: 10 [bar]	20 – 30 min	250 L

G.2 MODIFISERT IP-2-K2B OG IP-3-K2B

Prosedyrebeskrivelse K2B – tiltaksklasse 2 og 3 **modifisert**

Parameter	Beskrivelse	Bemerkning
Geometri	Tilsvarende som foregående prosedyre	
Materialer	Mikrosement Kolloidal silika	<i>Standard:</i> Første skjerm MFC, andre skjerm KS 5 – 6% silikaslurry 0,5 – 2% SP
Resept	MFC 4 KS 3	
Metode	Systematisk injeksjon Modifisert GIN-metode	Samme W/C tall, reduserende trykk

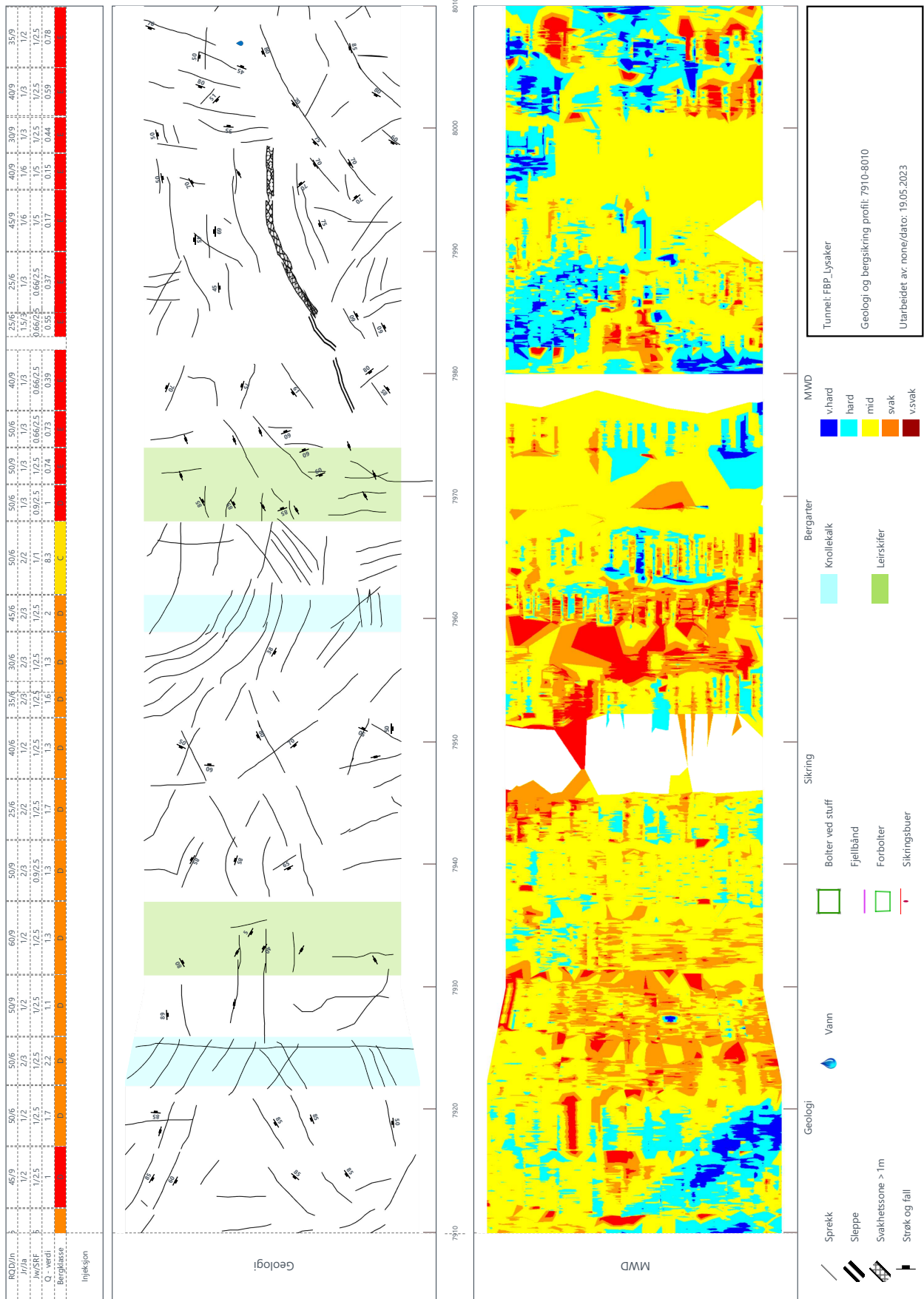
Reseptbeskrivelse K2B – MFC 4

Trykk [Bar]	35	30	25	20	15	>1500 L ,
W/C	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	egen
Mengde [L]	0 – 200	200 – 400	400 – 600	600 – 1000	1000 - 1500	tilpasning

Reseptbeskrivelse K2B – KS 3

Trykk [Bar]	25	20	15	10
Mengde [L]	0 – 100	100 – 200	200 – 300	300 - 400

H BEVERMAPPING - EKSEMPEL FRA K2A



I INJEKSJONSRAPPORT K2A - EKSEMPEL



Oppsummeringsrapport - Injeksjonslogg - Datastyrt injeksjon

Anlegg:	Fornebubanen K2A
Tunnel:	lysaker
Pelnummer:	8020
Skjerm:	34-35
Antall hull:	37

Start pumpetid:	27.08.2022 16:27:54
Stopp pumpetid:	29.08.2022 16:24:31
Pausetid:	35:45:03
Total pumpetid:	47:56:37
Netto pumpetid:	12:11:34
Korrektur:	
Kommentar:	Bruke oppveide mengde til vekt kalkula:

Hull Nr.	Oppnådd Trykk [bar]	Maks Trykk [bar]	Mengde [l]	Slurry [kg]	Tilsats 1 [kg]	Colloidal silica [kg]	Colloidal akselerato [kg]	Stopp ved
1	30	30	15	0	0	17	28	Trykk 3
2	45	94	723	0	0	804	1364	Trykk 4
3	38	38	140	161	26	0	0	Trykk 3
4	41	41	836	962	154	0	0	Trykk 4
5	42	43	1069	869	139	349	592	Trykk 4
6	66	66	1646	1358	218	518	879	Trykk 3
7	41	58	668	572	92	190	323	Trykk 4
8	43	48	600	0	0	667	1132	Trykk 3
9	39	42	16	0	0	18	30	Trykk 4
10	6	6	1660	0	0	2061	3497	
11	50	45	1843	0	0	2288	3883	Trykk 4
12	34	36	37	0	0	46	78	Trykk 4
13	28	31	324	0	0	402	683	Trykk 4
14	28	38	19	0	0	24	40	Trykk 4
15	27	28	542	0	0	673	1142	
16	32	32	45	0	0	56	95	Trykk 4
17	28	29	277	0	0	344	584	Trykk 4
18	33	34	1812	0	0	2250	3817	Trykk 4
19	39	39	12	0	0	15	25	Trykk 3
20	30	51	13	0	0	16	27	Trykk 3
21	30	31	41	0	0	51	86	Trykk 3
22	30	34	66	0	0	82	139	Trykk 3
23	27	28	57	0	0	71	120	Trykk 3
24	27	28	114	0	0	142	240	Trykk 3
25	27	29	240	0	0	298	506	Trykk 3
26	33	35	55	0	0	68	116	Trykk 3
27	27	29	79	0	0	98	166	Trykk 3
28	27	28	35	0	0	43	74	Trykk 3
29	28	29	217	0	0	269	457	Trykk 3
30	39	40	48	0	0	60	101	Trykk 3

31	34	34	39	0	0	48	82	Trykk 3
32	34	35	14	0	0	17	29	Trykk 3
33	30	30	49	0	0	61	103	Trykk 3
34	34	35	692	0	0	859	1458	Trykk 3
35	47	47	2147	0	0	2663	4519	Trykk 3
36	26	27	42	0	0	52	88	Trykk 3
99	3	3	29	0	0	36	61	
Summer:		16261	3921	629	15656	26565		
Oppveide mengde ved automatisk batching per skjerm [kg]				0	0	15656	26565	
Korrektur mengde [kg]:				0	0	0	0	
Summer Sement [kg]:				0	0	15656	26565	
Mauring mengde [kg]:								

J INJEKSJONSRAPPORT K2B - EKSEMPEL

Injeksjonsrapport

Prosjekt	K2B Lysaker - Vækerø
Tunnel	Tverrslog Lilleaker
Pelnummer	67
Skjerm	1
Dato	09.12.2022
Injeksjonstype	Forinjeksjon



Øvrige spesifikasjoner	
Vannlekkasje før	25
Injeksjonsskjerm	46 hull x 27 m = 1242 m
Pakkerplassering	Ca 2,5 m
Pakkere	49
Ekstrapakkere	
Gjenstående staver	
Pumpe start/stopp	21:20 09.12.2022 / 10:35 10.12.2022
Pumpetid	13,25
Full stans	Nei
Injeksjonsmateriale	18 541 kg mikrosement
Bestilt sluttrykk	20 bar i ligg/15 bar resterende
Utgang/gjennomgang	
Start boring	12.12.2022 07:30
Kommentar	

Testresultater					
v/c-tall	Marsh-cone	Egenvekt	Vannutskillelse	Avbinding stuff	Avbinding 20°C
0,7	48,6	1,69	1,0 %		

Setup information

Setup table

TimeStamp	PumpID	StopPressure	StableTime	StopAmountLitre	StopAmountCemKg	MaxFlow
09.12.2022 19:24	1	15	0	500	1000	25
09.12.2022 21:33	1	20	0	500	1000	25
10.12.2022 11:27	1	0	0	0	0	0
09.12.2022 19:24	2	15	0	500	1000	25
09.12.2022 21:33	2	20	0	500	1000	25
10.12.2022 11:27	2	15	0	500	1000	25
10.12.2022 11:41	2	0	0	0	0	0
10.12.2022 11:41	2	0	0	0	0	0
09.12.2022 19:24	3	15	0	500	1000	25
09.12.2022 21:34	3	20	0	500	1000	25
10.12.2022 11:41	3	0	0	0	0	0
09.12.2022 19:24	4	15	0	500	1000	25
09.12.2022 21:34	4	20	0	500	1000	25
10.12.2022 11:41	4	0	0	0	0	0

Recipe table

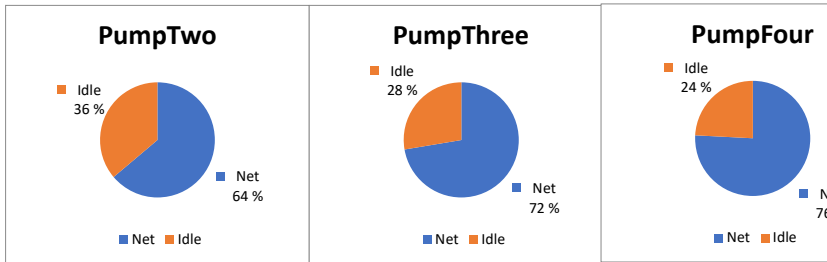
TimeStamp	RecipeID	RecipeName	VC	Volume
09.12.2022 19:24:±	1	micro vc09	0,88	481
09.12.2022 19:24:±	2	micro vc07	0,68	401
09.12.2022 19:24:±	3	micro vc05	0,51	331
09.12.2022 19:24:±	4	Recipe	0	0

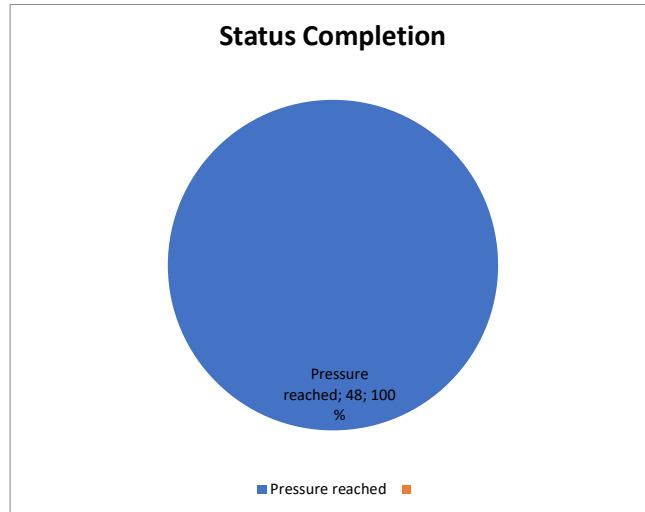
Sequence table

RecipeID	SequenceNo	MaterialName	MixingTime	Amount
1	1	groutech 5000	0	350
1	2	mapel micro	0	4
1	3	gruot tech system w	120	400
2	1	groutech 5000	0	270
2	2	mapel micro	0	4
2	3	gruot tech system w	120	400
3	1	groutech 5000	0	200
3	2	mapel micro	0	4
3	3	gruot tech system w	180	400

Pump information table

DataHeader	PumpOne	PumpTwo	PumpThree	PumpFour	TotalPumpTime
Start	09.12.2022 21:26:38	09.12.2022 21:23:25	09.12.2022 21:2	09.12.2022 21:	
Stop	10.12.2022 08:28:13	10.12.2022 08:23:08	10.12.2022 09:4	10.12.2022 10:	
Total	11:01:35	10:59:43	12:26:26	13:27:50	47:55:34
Net	7:02:00	7:01:00	8:59:53	10:12:40	33:15:32
Idle	3:59:35	3:58:43	3:26:33	3:15:10	14:40:02



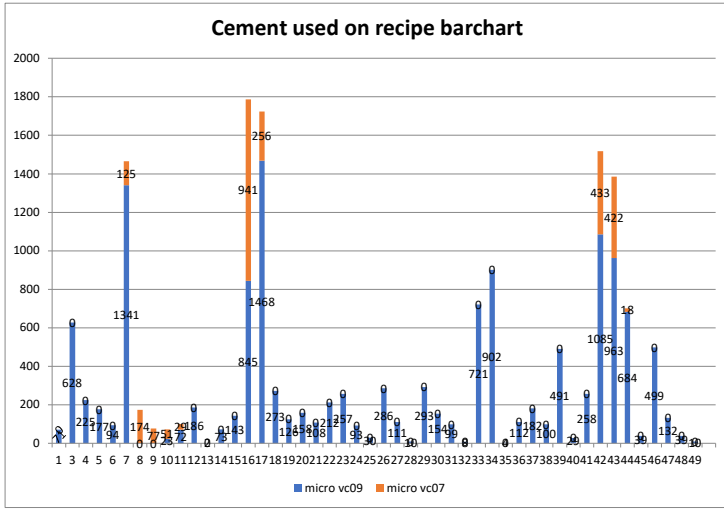


Status completed table

Status	Completed
Pressure reached	48

Status table

HoleNo	Status	Volume	StartTime	StopTime	TotalTime
1	Pressure reached	85	10.12.2022 02:28:01	10.12.2022 02:39:52	00:11:50
3	Pressure reached	742	10.12.2022 02:45:41	10.12.2022 03:50:15	01:04:33
4	Pressure reached	274	10.12.2022 03:28:20	10.12.2022 04:13:20	00:44:59
5	Pressure reached	211	10.12.2022 03:28:48	10.12.2022 04:17:17	00:48:28
6	Pressure reached	106	10.12.2022 04:15:23	10.12.2022 04:26:12	00:10:48
7	Pressure reached	1771	10.12.2022 04:23:50	10.12.2022 06:59:53	02:36:02
8	Pressure reached	174	10.12.2022 07:03:09	10.12.2022 07:18:41	00:15:32
9	Pressure reached	77	10.12.2022 07:15:01	10.12.2022 07:20:47	00:05:46
10	Pressure reached	79	10.12.2022 07:20:28	10.12.2022 07:30:31	00:10:02
11	Pressure reached	111	10.12.2022 07:22:01	10.12.2022 07:36:22	00:14:20
12	Pressure reached	216	10.12.2022 07:32:25	10.12.2022 07:54:18	00:21:52
13	Pressure reached	3	10.12.2022 07:38:49	10.12.2022 07:41:00	00:02:11
14	Pressure reached	82	10.12.2022 07:52:04	10.12.2022 11:41:42	03:49:38
15	Pressure reached	168	10.12.2022 07:55:38	10.12.2022 11:41:42	03:46:04
16	Pressure reached	1949	10.12.2022 07:25:19	10.12.2022 11:41:43	04:16:24
17	Pressure reached	2037	10.12.2022 06:32:00	10.12.2022 11:41:44	05:09:43
18	Pressure reached	326	10.12.2022 05:55:07	10.12.2022 06:30:52	00:35:45
19	Pressure reached	153	10.12.2022 05:35:04	10.12.2022 05:50:26	00:15:22
20	Pressure reached	174	10.12.2022 04:37:14	10.12.2022 05:02:35	00:25:20
21	Pressure reached	129	10.12.2022 04:21:15	10.12.2022 04:34:36	00:13:20
22	Pressure reached	252	10.12.2022 03:50:34	10.12.2022 04:16:35	00:26:01



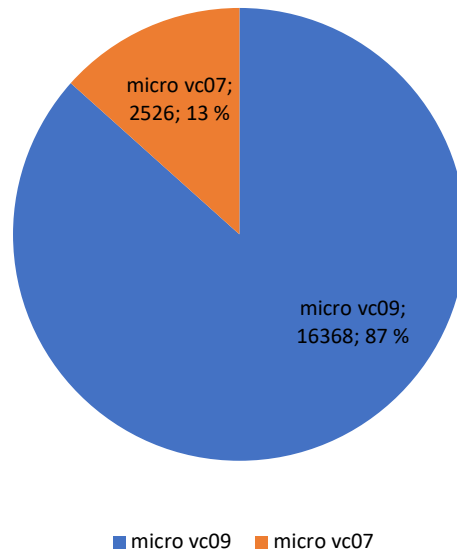
Cement used on recipe barchart

HoleNo	micro vc09	micro vc07
1	71	0
3	628	0
4	225	0
5	177	0
6	94	0
7	1341	125
8	0	174
9	0	77
10	23	51
11	72	29
12	186	0
13	2	0
14	73	0
15	143	0
16	845	941
17	1468	256
18	273	0
19	126	0
20	158	0
21	108	0
22	212	0
23	257	0
24	93	0
25	30	0
26	286	0
27	111	0
28	10	0
29	293	0
30	154	0
31	99	0
32	8	0
33	721	0
34	902	0
35	4	0
36	112	0
37	182	0
38	100	0
39	491	0
40	29	0
41	258	0
42	1085	433
43	963	422
44	684	18
45	39	0
46	499	0
47	132	0
48	39	0
49	10	0

Material weighted table

TotalCement	TotalAdditive	TotalAdditiveTwo	TotalAdditiv	TotalColloidal	TotalColloidal	TotalWater
18541	0	150	0	0	0	15774

Volume used on recipe



Recipe total overview

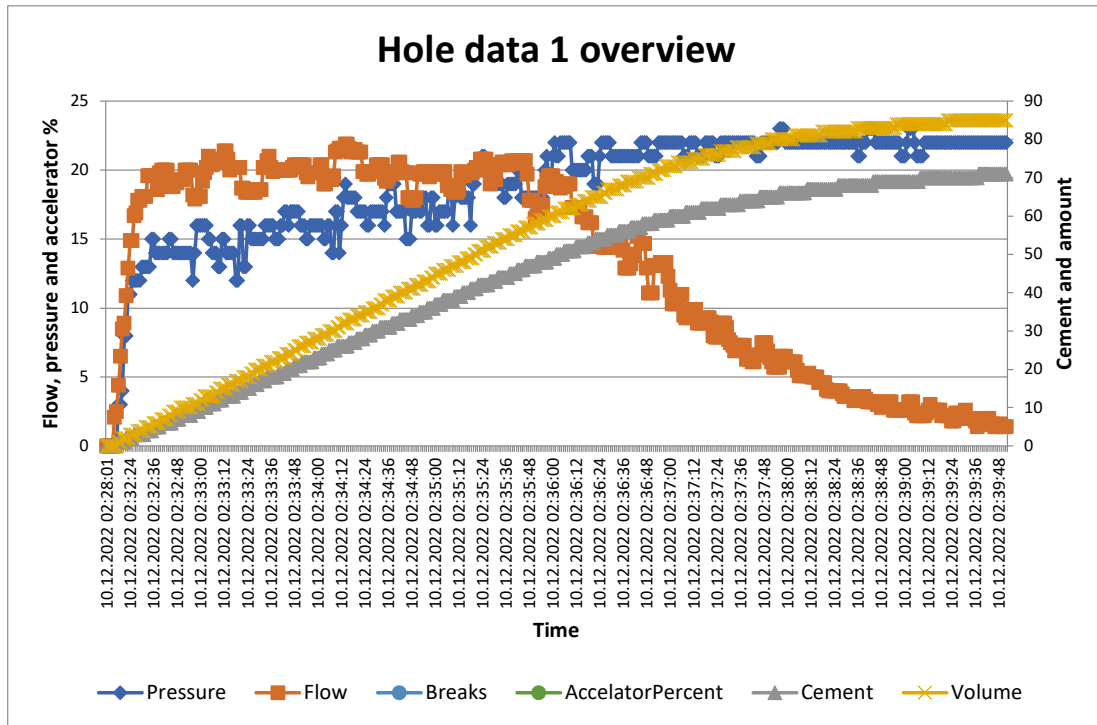
RecipeName	Volume
micro vc09	16368
micro vc07	2526

Recipe information table

HoleNo	RecipeName	StartTime	StopTime	TotalTime
1	micro vc09	10.12.2022 02:28:01	10.12.2022 02:39:52	00:11:50
3	micro vc09	10.12.2022 02:45:41	10.12.2022 03:50:15	01:04:33
4	micro vc07	10.12.2022 03:28:20	10.12.2022 03:28:20	00:00:00
4	micro vc09	10.12.2022 03:45:00	10.12.2022 04:13:20	00:28:20
5	micro vc07	10.12.2022 03:28:48	10.12.2022 03:28:48	00:00:00
5	micro vc09	10.12.2022 03:45:01	10.12.2022 04:17:17	00:32:15
6	micro vc09	10.12.2022 04:15:23	10.12.2022 04:26:12	00:10:48
7	micro vc09	10.12.2022 04:23:50	10.12.2022 06:47:48	00:00:00
7	micro vc07	10.12.2022 06:48:47	10.12.2022 06:59:53	00:11:06
8	micro vc07	10.12.2022 07:03:09	10.12.2022 07:18:41	00:15:32
9	micro vc07	10.12.2022 07:15:01	10.12.2022 07:20:47	00:05:46
10	micro vc07	10.12.2022 07:20:28	10.12.2022 07:26:44	00:00:00
10	micro vc09	10.12.2022 07:26:45	10.12.2022 07:30:31	00:03:45
11	micro vc07	10.12.2022 07:22:01	10.12.2022 07:26:44	00:00:00
11	micro vc09	10.12.2022 07:26:45	10.12.2022 07:36:22	00:09:36
12	micro vc09	10.12.2022 07:32:25	10.12.2022 07:54:18	00:21:52
13	micro vc09	10.12.2022 07:38:49	10.12.2022 07:41:00	00:02:11
14	micro vc09	10.12.2022 07:52:04	10.12.2022 08:15:30	00:23:25

Recipe data 1 overview

RecipeID	OnRecipeVolume	VC	StartTime	StopTime
1	85	0,88	10.12.2022 02:39:52	



Hole data 1 overview

TimeStamp	Pressure	Flow	Cement	Volume
10.12.2022 02:28:01	0	0	0	0
10.12.2022 02:32:13	0	0	0	0
10.12.2022 02:32:14	0	0	0	0
10.12.2022 02:32:15	0	0	0	0

3 Q-systemet

Q-verdien beskriver bergmassens stabilitet i en tunnel eller bergrom. Høye Q-verdier indikerer god stabilitet mens lave verdier betyr dårlig stabilitet. Q-verdien beregnes ut fra 6 parametere ved hjelp av denne ligningen:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

De seks parametere er:

RQD = Oppsprekkingsfaktor (Rock Quality Designation)

J_n = Tall for sprekkesett

J_r = Sprekkeruhetstall

J_a = Tall for sprekkefylling

J_w = Sprekkevannstall

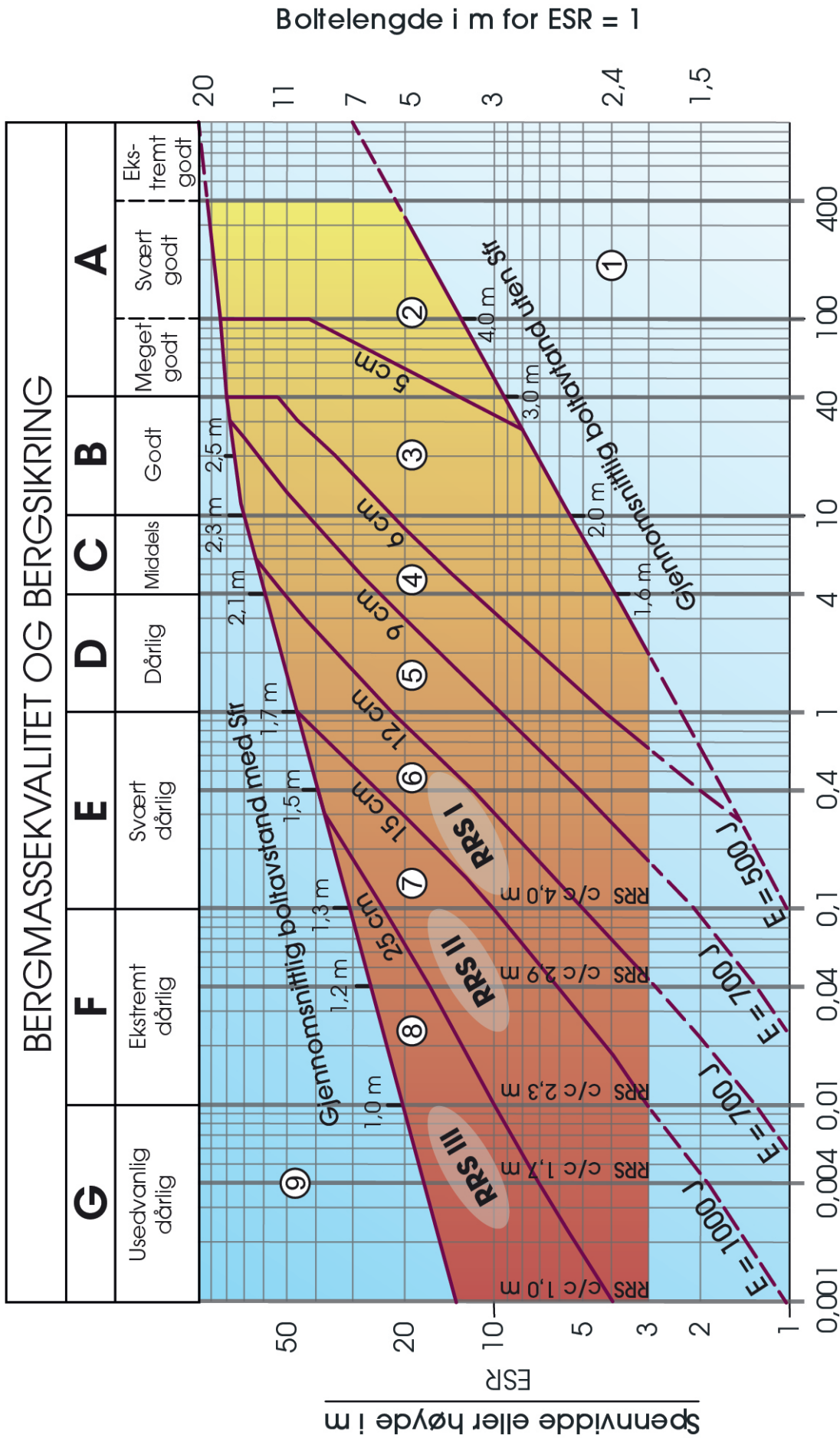
SRF = Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)

De enkelte parametere bestemmes gjennom geologisk kartlegging med tabeller som gir numeriske verdier som blir bestemt ut fra en beskrevet situasjon. Hvert ledd i formelen uttrykker de tre hovedfaktorene som beskriver stabiliteten i tunneler og bergrom:

$$\frac{RQD}{J_n} = \text{Oppsprekkingsgrad (eller blokkstørrelse)}$$

$$\frac{J_r}{J_a} = \text{Bergmassens minimale skjærfasthet}$$

$$\frac{J_w}{SRF} = \text{Opptredende spenning}$$



Bergmassekvalitet $Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$

Sikringskategorier

- ① Usikkert eller spredt bolting
- ② Spredt bolting, **SB**
- ③ Systematisk bolting, fiberforsterket sprøytebetong, 5-6 cm, **B+Sfr**
- ④ Fiberforsterket sprøytebetong og bolting, 6-9 cm, **Sfr (E500)+B**
- ⑤ Fiberforsterket sprøytebetong og bolting, 9-12 cm, **Sfr (E700)+B**
- ⑥ Fiberforsterket sprøytebetong og bolting, 12-15 cm + forsterkede ribber med sprøytebetong og bolting, **Sfr (E700)+RRS I +B**
- ⑦ Fiberforsterket sprøytebetong > 15 cm + forsterkede ribber med sprøytebetong og bolting, **Sfr (E1000)+RRS II+B**
- ⑧ Støpt betongforing, **CCA** eller **Sfr (E1000)+RRS III+B**
- ⑨ Spesiell vurdering

Boltavstand er hovedsaklig basert på Ø20 mm

E = Energiabsorpsjon i fiberforsterket sprøytebetong

ESR = Utgravings sikringsgrad

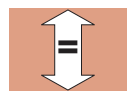
Områder med prikkede linjer har ingen empiriske data

RRS - avstand relatert til Q-verdi



Si30/6 Ø16 - Ø20 (spennvidde 10m)

D40/6+2 Ø16-20 (spennvidde 20m)



Si35/6 Ø16-20 (spennvidde 5m)

D45/6+2 Ø16-20 (spennvidde 10m)

D55/6+4 Ø20 (spennvidde 20m)



D40/6+4 Ø16-20 (spennvidde 5 m)

D55/6+4 Ø20 (spennvidde 10 m)

Spesiell vurdering (spennvidde 20 m)

Si30/6 = Enkelt lag med 6 armeringsjern,
30 cm tykkelse med sprøytebetong

D = Dobbel lag med armeringsjern

Ø16 = Armering diameter er 16 mm

c/c = RSS avstand, senter - senter

Figur 7 Anbefaling for permanent sikring basert på Q-verdier og spennvidde/ESR.

Tabell 1 RQD-verdier og antall sprekker per m³.

1 RQD = Oppsprekkingsfaktor (Rock Quality Designation)			RQD
A	Svært dårlig	(> 27 sprekker per m ³)	0-25
B	Dårlig	(20-27 sprekker per m ³)	25-50
C	Middels	(13-19 sprekker per m ³)	50-75
D	God	(8-12 sprekker per m ³)	75-90
E	Utmerket	(0-7 sprekker per m ³)	90-100

Merk: i) Der RQD er rapportert eller målt til ≤ 10 (inklusive 0), brukes verdien 10 for å bestemme Q-verdien
 ii) RQD-intervaller på 5, dvs. 100, 95, 90, osv., er tilstrekkelig nøyaktige

Tabell 2 J_n-verdier.

2 J _n = Tall for sprekkesett		J _n
A	Massivt, ingen eller få sprekker	0,5-1,0
B	Ett sprekkesett	2
C	Ett sprekkesett pluss tilfeldige sprekker	3
D	To sprekkesett	4
E	To sprekkesett pluss tilfeldige sprekker	6
F	Tre sprekkesett	9
G	Tre sprekkesett pluss tilfeldige sprekker	12
H	Fire eller flere sprekkesett, tilfeldig og sterkt oppsprukket "sukkerbitberg", osv.	15
J	Knust berg, jordaktig	20

Merk: i) For tunnelkryss, bruk $3 \times J_n$
 ii) For påhug, bruk $2 \times J_n$

Tabell 3 J_r - verdier.

3 $J_r =$ Sprekkeruhetstall		J_r
a) Bergveggkontakt, og b) Bergveggkontakt før skjærbevegelsen har gått 10 cm		
A	Diskontinuerlige sprekker	4
B	Ru eller ujevn, bølgete	3
C	Glatt, bølgete	2
D	Glidespeil, bølgete	1,5
E	Ru, ujevn, plan	1,5
F	Glatt, plan	1
G	Glidespeil, plan	0,5
Merk: i) Beskrivelse henviser til småskalaegenskaper og mellomskalaegenskaper, i den rekkefølgen		
c) Ingen bergkontakt ved skjærbevegelse		
H	Sone som inneholder leirfylling tykk nok til å forhindre bergkontakt ved skjærdeformasjon	1
Merk: ii) Legg til 1 hvis gjennomsnittlig avstand i det relevante sprekkesettet er mer enn 3 m (avhenger av størrelsen på tunnelåpningen) iii) $J_r = 0,5$ kan brukes for plane glidespeil med lineasjon, forutsatt at lineasjonen er orientert i sannsynlig bevegelsesretning		

Tabell 4 J_a -verdier.

4 J_a = Tall for sprekkefylling		Φ_r	J_a
a) Bergkontakt (ingen mineralfylling, bare belegg)			
A	Sammenvokste sprekker med harde mineraler som kvarts eller epidot.		0,75
B	Uomvandlede sprekkeflater, bare overflateoksidasjon.	25-35°	1
C	Svakt omvandlede sprekkeflater. Uoppbløtelig mineralbelegg, sandpartikler, oppknust berg uten leir.	25-30°	2
D	Siltig eller sandig sprekkebelegg, litt leir (ikke svellende).	20-25°	3
E	Oppbløtelig leirbelegg med lav friksjon, f.eks. kaolinit eller glimmer. Også kloritt, talk gips, grafit osv. og små mengder svelleleire.	8-16°	4
b) Bergkontakt før 10 cm skjærdeformasjon (tynn mineralfylling)			
F	Sandige partikler, oppknust berg, ikke leir.	25-30°	4
G	Sterkt overkonsolidert, uoppbløtelig fylling av leirmineraler, (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse).	16-24°	6
H	Middels eller litt overkonsolidert fylling av oppbløtelig leirmateriale (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse).	12-16°	8
J	Fylling av svelleleire, dvs. montmorillonitt (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse). J_a -verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	8-12
c) Ingen bergkontakt ved skjærdeformasjon (tykk mineralfylling)			
K	Soner og bånd av desintegrert eller knust berg. Sterkt overkonsolidert, uoppbløtelig fylling.	16-24°	6
L	Soner og bånd av knust eller desintegrert berg og leir. Middels til litt overkonsolidert uoppbløtelig fylling.	12-16°	8
M	Soner og bånd av leir eller knust eller desintegrert berg. J_a -verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	8-12
N	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Sterkt overkonsolidert.	12-16°	10
O	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Middels-til-lav overkonsolidering	12-16°	13
P	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Svelleleire. J_a avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	13-20

Tabell 5 J_w - verdier.

5 $J_w =$ Sprekkevannstall		J_w
A	Tørre bergrom eller mindre innsig (fuktig eller noen få drypp)	1,0
B	Middels innsig, av og til utvasking av sprekkefyllinger (mange drypp/"regn")	0,66
C	Vannstråler eller høyt trykk i kompetent berg med ufylte sprekker	0,5
D	Stort tilsig eller høyt trykk, betydelig utvasking av sprekkefyllinger	0,33
E	Usedvanlig høy innstrømming eller vanntrykket avtar med tid. Forårsaker utvasking av materialer og kanskje utrasinger	0,2-0,1
F	Usedvanlig høy innstrømming eller vanntrykket fortsetter uten merkbar reduksjon. Forårsaker utvasking av materialer og kanskje utrasinger	0,1-0,05
Merk: i) Faktorene C til F er grove estimater. Øk J_w hvis berget dreneres eller det utføres injeksjon ii) Spesielle problemer forårsaket av isdannelse er ikke tatt med i betraktning		

Tabell 6 SRF-verdier.

6 SRF = Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)			SRF	
a) Svakhetssoner som krysser tunnelen eller bergrommet, som kan føre til at bergmasse løsner				
A	Hyppig opptreden av svakhetssoner som inneholder leire eller kjemisk forvitret berg, avspent berg (uansett dybde), eller lange seksjoner med inkompetent (svakt) berg (uansett dybde). For skvising, se 6L og 6M		10	
B	Flere skjærsoner innenfor en kort seksjon i kompetent avspent sideberg (uansett dybde)		7,5	
C	Enkeltstående svakhetssoner med eller uten leire eller kjemisk forvitret berg (dybde ≤ 50 m)		5	
D	Ukonsoliderte, åpne sprekker, mange sprekker eller "sukkerbit", osv. (uansett dybde)		5	
E	Enkeltstående svakhetssoner med eller uten leire eller kjemisk forvitret berg (dybde > 50 m)		2,5	
Merk: i) Reduser disse SRF-verdiene med 25-50 % hvis svakhetssonene bare påvirker men ikke krysser den underjordiske åpningen				
b) Kompetent, hovedsakelig massivt berg, spenningsproblemer		σ_c / σ_1	σ_θ / σ_c	SRF
F	Lave spenninger, nær overflaten, åpne sprekker	>200	<0,01	2.5
G	Middels spenninger, gunstige spenningsforhold	200-10	0,01-0,3	1
H	Høye spenninger, svært tett struktur. Vanligvis gunstig for stabiliteten. Kan også være ugunstig for stabiliteten, avhengig av retningen på spenningene sammenliknet med sprekkdannelse/svakhetsplan*	10-5	0,3-0,4	0,5-2 2-5*
J	Moderat avskalling etter > 1 time i massivt berg	5-3	0,5-0,65	5-50
K	Avskalling og bergslag etter noen minutter i massivt berg	3-2	0,65-1	50-200
L	Intens bergslag og umiddelbar dynamisk deformasjon i massivt berg	<2	>1	200-400
Merk: ii) For sterkt anisotropiske urørte spenningsfelt (om målt): når $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$, reduser σ_c til $0,75 \sigma_c$. Når $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reduser σ_c til $0,5 \sigma_c$, der σ_c = fri trykkfasthet, σ_1 og σ_3 er de primære og sekundære spenningene, og σ_θ = maksimum tangential spenning (estimert fra elastisk teori)				
iii) Når dybden av hengeet under overflaten er mindre enn spennet; foreslås det at SRF økes fra 2,5 til 5 for slike tilfeller (se F)				
c) Skviseberg: plastisk deformasjon i ikke kompetent berg under påvirkning av høyt trykk		σ_θ / σ_c	SRF	
M	Moderat skvisende bergtrykk	1-5	5-10	
N	Intens skvisende bergtrykk	>5	10-20	
Merk: iv) For bestemmelse av skvisende bergforhold henvises til relevant litteratur (dvs. Singh et al., 1992 og Bhasin og Grimstad, 1996)				
d) Svellende berg: kjemisk svelleaktivitet ved tilgang på vann			SRF	
O	Moderat svelling		5-10	
P	Intens svelling		10-15	

Tabell 7 ESR-verdier.

7 Type underjordsanlegg		ESR
A	Midlertidige gruveåpninger osv.	ca. 3-5
B	Vertikale sjakter*: i) sirkelformede seksjoner ii) rektangulær / firkantet seksjon * Avhenger av formålet. Kan være lavere enn angitte verdier.	ca. 2,5 ca. 2,0
C	Permanente gruveåpninger, vanntunneler for vannkraft (unntatt fallrør med høyt trykk), vannforsyningstunneler, pilottunneler, drivinger og innganger til store bergrom.	1,6
D	Mindre vei- og togstasjoner, trykkammer, tilkomsttunneler, kloakktunneler, osv.	1,3
E	Kraftstasjoner, lagringsrom, vannbehandlingsanlegg, større vei- og togstasjoner, sivilforsvarkammer, portaler, krysninger, osv.	1,0
F	Underjordiske atomkraftverk, togstasjoner, offentlige anlegg og sportsanlegg, fabrikker osv.	0,8
G	Svært viktige bergrom og tunneler med lang levetid, ≈ 100 år, eller uten tilgang for vedlikehold.	0,5

Tabell 8 Omregning av faktiske Q-verdier til Q-verdier for dimensjonering av veggsikring.

I bergmasser med god kvalitet	$Q > 10$	Multipliser Q-verdiene med en faktor på 5.
I bergmasser med middels kvalitet	$0,1 < Q < 10$	Multipliser Q-verdiene med en faktor på 2,5. I tilfeller med høye spenninger i berget, bruk den faktiske Q-verdien.
I bergmasser med dårlig kvalitet	$Q < 0,1$	Bruk faktisk Q-verdi.

