

Jørund Bratheim

Injeksjon i urbane tunneler

Analyse av utført injeksjon i Mossetunnelen og Carlbergtunnelen

Masteroppgave i Tekniske Geofag

Veileder: Kristin Holmøy

Medveileder: Kenneth Haraldseth

Juni 2023

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



Jørund Bratheim

Injeksjon i urbane tunneler

Analyse av utført injeksjon i Mossetunnelen og
Carlbergtunnelen

Masteroppgave i Tekniske Geofag
Veileder: Kristin Holmøy
Medveileder: Kenneth Haraldseth
Juni 2023

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



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Denne masteroppgaven presenterer prosjektet Sandbukta-Moss-Såstad, som er en del av InterCity utbyggingen på Østlandet. I dette prosjektet bygges det to tunneler, Mossetunnelen og Carlbergtunnelen. Disse tunnelene går delvis under Moss by, derfor er det strenge krav til innlekkasje i begge tunnelene. Særlig i Mossetunnelen har det vært utfordrende å oppfylle disse kravene, og derfor har både aktiv injeksjon og split-spacing blitt testet som injeksjonsmetoder i Mossetunnelen.

Denne oppgaven presenterer injeksjonen som har blitt utført i de to tunnelene, med tanke på blant annet antall injeksjonshull, antall bormeter, injeksjonstrykk, forbruk av injeksjonsmasse, forbruk av tilsetningsstoffer og pumpetid. I tillegg blir bergoverdekningen og Q-verdiene i de to tunnelene presentert.

For å kunne sammenligne ulike deler av tunnelene er utført injeksjon per løpemeter tunnel beregnet. Ut ifra disse resultatene er det tydelig at det er en svakhetssone i Mossetunnelen, kalt Circle K svakhetssonen, som har krevd mye injeksjon. Omfanget av utført injeksjon i denne svakhetssonen er så stort at det påvirker resultatet for hele Mossetunnelen. En annen observasjon er at det er utført signifikant mer injeksjon i Mossetunnelen enn i Carlbergtunnelen, selv om de to tunnelene har en del fellestrekk. Forskjellen mellom Mossetunnelen og Carlbergtunnelen kan ikke forklares av kun Circle K svakhetssonen, men kan skyldes at det er flere svakhetssoner som krysser Mossetunnelen og at det er mer tilgang på vann i nærheten av Mossetunnelen.

I tillegg er to strekninger i Mossetunnelen sammenlignet, hvor den ene strekningen er blitt injisert med aktiv injeksjon, mens den andre strekningen har blitt injisert med split-spacing. Strekningen hvor det har blitt utført aktiv injeksjon kommer best ut av denne sammenligningen, den har riktignok litt mer innlekkasje, men det har blitt utført betydelig mindre injeksjon langs den strekningen. Problemet med denne sammenligningen er at strekningen hvor det har blitt injisert ved split-spacing delvis krysses av Circle K svakhetssonen, og dette har tydelig påvirket hvor mye injeksjon som har vært nødvendig. Siden de geologiske forholdene langs de to strekningene ikke er like, gir ikke sammenligningen noe godt svar på hvilken metode som har vært best egnet.

Abstract

This master's thesis presents the Sandbukta-Moss-Såstad project, which is part of the InterCity development in Eastern Norway. In this project, two tunnels are being built, the Moss Tunnel and the Carlberg Tunnel. Both of these tunnels partially pass under the city of Moss, which is why both tunnels have strict requirements for water ingress. Meeting these requirements has been particularly challenging in the Moss Tunnel, and therefore both active grouting and split-spacing have been tested as grouting methods in the Moss Tunnel.

This thesis presents the grouting that has been carried out in the two tunnels, considering factors such as the number of grouting holes, meters drilled, grouting pressure, consumption of grouting material, consumption of additives, and pumping time. In addition, the rock cover and Q-values in the two tunnels are presented.

To compare different sections of the tunnels, grouting per meter of tunnel is calculated. Based on these results, it is evident that there is a weakness zone in the Moss Tunnel, called the Circle K weakness zone, which has required a significant amount of grouting. The extent of grouting performed in this weakness zone is so large that it affects the overall result for the entire Moss Tunnel. Another observation is that significantly more grouting has been performed in the Moss Tunnel, compared with the Carlberg Tunnel, even though the two tunnels share several similarities. The difference between the Moss Tunnel and the Carlberg Tunnel cannot be explained solely by the Circle K weakness zone, but may be caused by the fact that twice as many weakness zones cross the Moss Tunnel compared to the Carlberg Tunnel, or the volumes of available water near the Moss Tunnel.

Furthermore, two sections in the Moss Tunnel are compared, where the first section has been grouted using active grouting and the other section has been grouted using split-spacing. The section where active grouting has been performed fares better in this comparison, although it has slightly more water ingress, but significantly less grouting has been required along that section. The issue with this comparison is that the section where split-spacing grouting has been performed is partially crossed by the Circle K weakness zone, which has clearly influenced the amount of grouting required. Therefore, the geological conditions along the two sections are not similar, making it difficult to compare the two methods.

Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på fem år som student ved Tekniske geofag på NTNU, og er skrevet i faget *TGB4945 Ingeniørgelogi, masteropppgave*.

Uten god hjelp fra en rekke personer ville denne oppgaven aldri sett dagens lys. Først og fremst ønsker jeg derfor å takke veilederen min, Kristin Holmøy, for god hjelp, støtte og innspill underveis i skrivingen. I tillegg vil jeg takke medveilederen min, Kenneth Haraldseth, for at jeg fikk muligheten til å skrive om prosjektet i Moss. Jeg har lært utrolig mye av å skrive om et prosjekt som bygges samtidig som jeg skrev oppgaven. Alle hos Bane NOR i Moss fortjener også en stor takk for all hjelpen, alle innspillene og all gjestfriheten jeg har blitt vist det siste året. Spesielt vil jeg takke Arne Joar Selliseth, Markus Nytun Wilhelmsen, Leiv Rødseth Sanden og Ignacio Tauroni, som har vist meg rundt på anlegget og svart på omtrent alt jeg har hatt av spørsmål.

I tillegg vil jeg takke foreldrene mine, som har støttet meg gjennom fem år som student. Jeg har også satt stor pris på den luksusen det er å kunne bo hjemme og låne bil hver gang jeg har besøkt anlegget i Moss.

Helt til slutt ønsker jeg å takke gjengen jeg har studert sammen med de siste fem årene. Livet som student hadde ikke vært det samme uten dem, og jeg er takknemlig for alle opplevelsene vi har hatt sammen, både faglige og ikke-faglige. Stian fortjener i tillegg en ekstra takk for alle samtaler, diskusjoner og deling av frustrasjon om temaet injeksjon vi har hatt det siste halvåret.

Jørund Bratheim

11. juni 2023

Innhold

Figurliste	XV
Tabelliste	XVI
1 Innledning	1
2 Teori	3
2.1 Injeksjonsmasse	3
2.1.1 Sement	3
2.1.2 Tilsetningsstoffer	4
2.1.3 Kolloidal silika	5
2.2 Injeksjonstrykk	5
2.2.1 Konsekvenser av deformasjon	6
2.2.2 Høyt injeksjonstrykk i Norge	7
2.3 Aktiv injeksjon	7
2.3.1 Injeksjonsmasse	7
2.3.2 Injeksjonstrykk	8
2.3.3 Forbruk av injeksjonsmasse	9
2.4 Split spacing	10
2.4.1 Filosofi	10
2.5 Normalisert borlengde og injeksjonsforbruk	12
3 Om prosjektet	14
3.1 Mossetunnelen	14
3.1.1 Bergarter	16
3.1.2 Oppsprekking	16
3.1.3 Svakhetssoner	17
3.2 Carlbergtunnelen	20
3.2.1 Bergarter	22
3.2.2 Oppsprekking	22
3.2.3 Svakhetssoner	23
3.3 Kritiske områder for innlekkasje av vann	24
3.4 Kontraktskrav til injeksjon	28
3.4.1 Innlekkasjekrav	28
3.4.2 Måling av innlekkasje	29
3.4.3 Utførelse	29
4 Metode	31
4.1 Valg av strekninger	31
4.2 Innsamling av data	31
4.3 Samtaler	32
4.4 Bearbeiding av data	32

4.4.1	Fordeling på løpemeter	32
4.4.2	Forbruk av injeksjonsmasse i persentiler	33
4.5	Bergoverdekning og Q-Verdi	34
4.6	Pearsons korrelasjonskoeffisient	34
5	Resultater	35
5.1	Mossetunnelen	35
5.1.1	Utført injeksjon	35
5.1.2	Innlekkasje	44
5.1.3	Geologiske parametre	51
5.1.4	Fordeling av sementforbruk	53
5.2	Carlbergtunnelen	55
5.2.1	Utført injeksjon	56
5.2.2	Innlekkasje	61
5.2.3	Geologiske parametre	63
5.2.4	Fordeling av sementforbruk	65
5.3	Sammenligning	66
5.3.1	Sammenligning av Mossetunnelen og Carlbergtunnelen	66
5.3.2	Normalisert borlengde og forbruk av injeksjonsmasse	67
5.4	Injeksjonsprosedyrer i Mossetunnelen sør	68
5.4.1	Gruppe 1	69
5.4.2	Gruppe 2	69
5.4.3	Gruppe 3	70
5.4.4	Gruppe 4	71
5.4.5	Gruppe 5	72
5.5	Sammenligning av injeksjonsprosedyrer	73
6	Diskusjon	80
6.1	Sammenligning av ulike tunneler	80
6.1.1	Sammenligning internt i prosjektet	80
6.1.2	Sammenligning med andre prosjekter	80
6.1.3	Mulige forklaringer	81
6.2	Sammenligning av aktiv injeksjon og split-spacing	83
6.3	Mulige forbedringer i prosjektet	84
6.3.1	Bedre tolkning av Circle K svakhetssonen	84
6.3.2	Mer testing underveis i drivingen	85
6.3.3	Andre typer injeksjonsmasse	85
6.3.4	Hyppigere målinger av innlekkasje	86
6.4	Feilkilder	87
6.4.1	Innsamling av data	87
6.4.2	Datamengder	88
6.4.3	Manglende data	88

6.4.4 Kunstig overlapp ved fordeling per løpometer	88
7 Konklusjon	90
Vedlegg	93

Figurer

2.1	Normalisert borlengde plottet mot tilbakeberegnet hydraulisk konduktivitet	12
2.2	Normalisert injeksjonsforbruk plottet mot tilbakeberegnet hydraulisk konduktivitet	13
3.1	Kart over Mossetunnelen	15
3.2	Sprekkerose for Mossetunnelen	17
3.3	Geologisk profil for Circle K svakhetssonen	19
3.4	Utførte forundersøkelser og tolkning av svakhetssonen ved Circle K	20
3.5	Kart over Carlbergtunnelen	21
3.6	Sprekkerose for Carlbergtunnelen	23
3.7	Kvartærgeologisk kart over området	25
3.8	Setningssensitive områder langs Mossetunnelen	26
3.9	Bebyggelse ved Circle K bensinstasjonen	26
3.10	Setningssensitive områder langs Carlbergtunnelen	27
3.11	Typisk bebyggelse i det setningssensitive området over Carlbergtunnelen	27
5.1	Antall hull per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen	35
5.2	Bormeter per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen	36
5.3	Gjennomsnittlig sluttrykk per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen	37
5.4	Median sluttrykk per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen	37
5.5	Forbruk av mikrosegment per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen	38
5.6	Forbruk av tilsetningsstoffer per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen	39
5.7	Forbruk av tilsetningsstoffer per injeksjonsskjerm for pelnummer 58,500-58,800 i Mossetunnelen	40
5.8	Netto pumpetid per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen	41
5.9	Bormeter per løpemeter tunnel for Mossetunnelen	42
5.10	Forbruk av mikrosegment per løpemeter tunnel for Mossetunnelen	43
5.11	Netto pumpetid per løpemeter tunnel for Mossetunnelen	44
5.12	Innlekkasjemålinger for pel 56,726-57,170	45
5.13	Innlekkasjemålinger for pel 57,170-57,570	45
5.14	Innlekkasjemålinger for pel 57,570-57,685	46
5.15	Innlekkasjemålinger for pel 57,685-58,155	47
5.16	Innlekkasjemålinger for pel 58,155-58,555	49
5.17	Innlekkasjemålinger for pel 58,555-58,730	50
5.18	Bergoverdekning for Mossetunnelen	52
5.19	Q-verdier for Mossetunnelen	53
5.20	Sammenhengen mellom sluttrykk og sementforbruk for Mossetunnelen nord	54
5.21	Sammenhengen mellom sluttrykk og sementforbruk for Mossetunnelen sør	54
5.22	Andel sementforbruk fordelt på andel hull	55
5.23	Antall hull per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen	56
5.24	Bormeter per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen	56
5.25	Gjennomsnittlig sluttrykk per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen	57

5.26	Median sluttrykk per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen	57
5.27	Forbruk av mikrosement per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen	58
5.28	Netto pumpetid per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen	58
5.29	Bormeter per løpemetertunnel for Carlbergtunnelen	59
5.30	Forbruk av mikrosement per løpemetertunnel for Carlbergtunnelen	59
5.31	Netto pumpetid per løpemetertunnel for Carlbergtunnelen	60
5.32	Innlekkasjemålinger for pel 61,990-61,580	61
5.33	Innlekkasjemålinger for pel 61,580-61,145	62
5.34	Innlekkasjemålinger for pel 61,145-60,770	62
5.35	Innlekkasjemålinger for pel 60,770-60,300	63
5.36	Bergoverdekning for Carlbergtunnelen	64
5.37	Q-verdier for Carlbergtunnelen	64
5.38	Sammenhengen mellom sluttrykk og sementforbruk for Carlbergtunnelen nord	65
5.39	Plassering av injeksjonshull i en av spesialprosedyrene i Mossetunnelen sør	72
5.40	Innlekkasje for strekning 1 og 2 i Mossetunnelen	74
5.41	Sementforbruk per løpemetertunnel for strekning 1 og 2	75
5.42	Netto pumpetid per løpemetertunnel for strekning 1 og 2	76
5.43	Bergoverdekning for strekning 1 og 2	77
5.44	Q-verdier for strekning 1 og 2	78

Tabeller

2.1	Ulike typer sement som brukes til injeksjon	3
3.1	Teoretisk utsprengt tverrsnitt for Mossetunnelen	15
3.2	Sprekkesett og sprekkeegenskaper for Mossetunnelen nord	16
3.3	Sprekkesett og sprekkeegenskaper for Mossetunnelen sør	17
3.4	Forhåndskartlagte svakhetssoner langs Mossetunnelen	18
3.5	Tolkning av dybde til fjell og løsmasser i Circle K svakhetssonen	20
3.6	Tunnelspenn for de ulike strekningene i Carlberg tunnelen	22
3.7	Sprekkesett og sprekkeegenskaper for Carlberg tunnelen nord	23
3.8	Forhåndskartlagte svakhetssoner langs Carlberg tunnelen	24
3.9	Innlekkasjekrav i Mossetunnelen og Carlberg tunnelen	28
3.10	Innlekkasjekrav for kontrollhull	29
5.1	Terskelmålinger for pelnummer 58,555 til 58,730	51
5.2	Sammenligning av utført injeksjon og bergartsparametre i Mossetunnelen og Carlberg tunnelen	66
5.3	Sammenligning av aktiv injeksjon og split-spacing	79
6.1	Normalisert borlengde og forbruk av injeksjonsmasse i Mossetunnelen og Carlberg tunnelen	80

1 Innledning

I dag drives det flere tunneler under og i nærheten av urbane strøk i Norge. Kravene til disse tunnelene er ofte høyere enn for andre tunneler, siden konsekvensene av tunneldriften er større i urbane strøk. Derfor vil disse tunnelene ofte kreve høyere kompetanse, mer forundersøkelser og være dyrere å bygge enn andre tunneler. I tillegg vil det i fremtiden sannsynligvis bli mer bruk av undergrunnen i byer, som en del av strategien for å fortette byene. Derfor er det behov for mer kunnskap om hvordan tunneler i urbane strøk bør drives, og hva konsekvensene av tunneldringen kan være.

For tunneler i urbane strøk stilles det ofte strenge krav til innlekkasje av vann. Årsakene til dette er at innlekkasje til tunnelen kan føre til senkning av grunnvannsspeilet over tunnelen, behov for større pumpekapasitet i tunnelen og problemer for driften av tunnelen. Senkning av grunnvannsspeilet er spesielt kritisk i urbane strøk, siden dette kan føre til setningsskader på bygninger og påvirke stabiliteten i løsmassene som befinner seg over tunnelen.

For å begrense innlekkasjen til tunneler er den klart mest effektive, og dermed også den mest brukte metoden i Norge, å utføre forinjeksjon under driften av tunnelen. Forinjeksjon kan imidlertid være en dyr og tidkrevende prosess, siden forinjeksjonen utføres på stoff, og derfor stopper driften av tunnelen opp. I tunneler med strenge krav til innlekkasje kan injeksjonsarbeidet derfor utgjøre 20% til 30% av drivekostnadene (Grøv mfl. 2020).

I tillegg til at forinjeksjon kan utgjøre mye av tidsbruken og kostnadene ved driften av tunneler kan dårlig utført forinjeksjon føre til negative konsekvenser for miljøet. En av grunnene er at nesten all injeksjon i Norge utføres med sementbaserte injeksjonsmasser. Produksjon av sement fører til store utslipp av CO₂, og dermed vil et høyt forbruk av injeksjonsmasse også føre til et høyere utslipp av klimagasser fra tunnelbyggingen. Dårlig utført injeksjon kan også føre til stor innlekkasje til tunnelen, noe som påvirker miljøet over tunnelen. Et av de mest kjente eksemplene på dette er Romeriksporten, hvor stor innlekkasje til tunnelen førte til at vannstanden sank i flere vann i Østmarka.

For å spare tid og penger er det derfor viktig med en god fremgangsmåte for injeksjon, men det er en rekke ulike faktorer som påvirker resultatet av injeksjon. Blant annet vil geologien, oppsprekkingen, sprekkenes egenskaper og bergoverdekningen påvirke resultatet. Av den grunn kan den beste fremgangsmåten variere fra prosjekt til prosjekt, og også i ulike deler av samme prosjekt. Fremgangsmåten bør derfor kontinuerlig tilpasses resultatene av injeksjonen, men siden det er mange ulike faktorer som påvirker resultatet kan det være vanskelig å finne den optimale fremgangsmåten.

Fordi det er mange faktorer som påvirker resultatet av injeksjon finnes det også mange ulike metoder og filosofier for hvordan injeksjon skal utføres. Fordypningsoppgaven «Injeksjon i bergrom - Med fokus på injeksjonsmetoder» beskrev en del av de ulike filosofiene og metodene for forinjeksjon. Denne masteroppgaven er delvis en fortsettelse av

den oppgaven, men masteroppgaven fokuserer på injeksjonen som er utført på prosjektet Sandbukta-Moss-Såstad.

Prosjektet Sandbukta-Moss-Såstad er en del av Intercity-utbyggingen på Østlandet, og oppgaven er skrevet i samarbeid med Bane NOR. I prosjektet drives det to tunneler, Mossetunnelen og Carlbergtunnelen. Begge disse tunnelene går delvis under Moss by, og har derfor strenge krav til innlekkasje. Særlig for Mossetunnelen har det vært utfordringer med å oppnå innlekkasjekravene, og det har blitt utført mange runder med injeksjon for å prøve å oppnå kravene. På grunn av problemene med innlekkasje av vann stoppet tunneldrivingen i Mossetunnelen nesten helt opp i en lengre periode, og dette har hatt negative konsekvenser for prosjektet.

2 Teori

Som nevnt innledningsvis er denne oppgaven en fortsettelse av fordypningsoppgaven «Injeksjon i bergrom - Med fokus på injeksjonsmetoder» (Bratheim 2022). Fordypningsoppgaven var en litteraturoppgave, hvor mye teori om injeksjon og injeksjonsmetoder ble gjennomgått. Mye av den generelle teorien ble derfor behandlet i fordypningsoppgaven, og av den grunn vil dette kapittelet fokusere på teori som er spesielt relevant for prosjektet Sandbukta-Moss-Såstad.

2.1 Injeksjonsmasse

Det finnes mange ulike typer med injeksjonsmasse, og de ulike typene har forskjellige egenskaper.

2.1.1 Sement

I Norge er sement den mest brukte injeksjonsmassen, men sement er igjen delt opp i flere ulike typer, avhengig av kornstørrelse. I tabell 2.1 er de ulike sementtypene som brukes til injeksjon presentert, sammen med inndelingen etter kornstørrelse. Verdien d_{95} i tabellen er definert som den filterstørrelsen 95% av kornene i sementen passerer. Eklund og Stille (2007) testet penetrasjonsevnen til sementbasert injeksjonsmasse, og fant ut at de minste sprekkeinjeksjonsmasse basert på grovkornet sement kan trenge inn i, har en sprekkeåpning som er cirka tre ganger så stor som d_{95} . For mer finkornete sementer vil forholdet mellom minste sprekkeåpning og d_{95} være større enn tre, og forholdet vil øke med minkende d_{95} . Dette skyldes at finkornete sementer flokkulerer lettere enn grovkornete sementer.

Tabell 2.1: Ulike typer sement som brukes til injeksjon. Basert på NS-EN 12715 (Norsk Standard 2020)

Navn:	$< d_{95}$
Fin sement	40 μm
Mikrosement	20 μm
Ultrafin sement	10 μm

v/c-tall

En av parametrene som har mest å si for egenskapene til sementbaserte injeksjonsmasser er v/c-tallet (H. O. Hognestad mfl. 2010). V/c-tallet er vektforholdet mellom vann og sement, og påvirker blant annet viskositeten, inntrengningsevnen, herdetiden og slutfastheten til injeksjonssementen. Jo høyere v/c-tallet er, jo lavere viskositet og bedre inntrengningsevne vil injeksjonsmassen ha, men til gjengjeld vil herdetiden bli lengre og slutfastheten bli mindre.

Når v/c -tallet til injeksjonsmassen bestemmes må faren for «bleeding» vurderes. Bleeding er at vannet separeres ut fra injeksjonsmassen, noe som fører til at det blir liggende fritt vann på toppen av sementen. Hvis det oppstår bleeding i injeksjonsmasse som er pumpet inn i en sprekk vil det bli dannet vannførende kanaler. Disse vannførende kanalene er vanskelige å tette, og gjør at det kan oppstå restlekkasjer. Faren for bleeding er større jo høyere v/c -tallet er.

2.1.2 Tilsetningsstoffer

For å forbedre egenskapene til sementbasert injeksjonsmasse kan det tilsettes en rekke ulike stoffer.

Stabiliserende stoffer

For å gjøre injeksjonsmassen mer stabil og forhindre bleeding tilsettes det vanligvis et stabiliserende stoff til injeksjonsmassen. I Norge er det vanligste stabiliserende stoffet silikaslurry (H. O. Hognestad mfl. 2010). Silikaslurry er en suspensjon av små silisiumdioksidpartikler løst i vann. Vanligvis utgjør dosen av silikaslurry 5% til 10% av vekten til sementen.

Hvis det tilsettes stabiliserende stoffer til injeksjonsmassen kan det brukes et høyere v/c -tall uten at det oppstår bleeding. Økt v/c -tall vil igjen redusere viskositeten og forbedre inntrengningsevnen til injeksjonsmassen. Fordi de stabiliserende stoffene tilsettes for å kunne øke v/c -tallet, og dermed redusere viskositeten, er det viktig at stabiliserende stoffene selv ikke øker viskositeten. Samtidig må de stabiliserende stoffene kun inneholde partikler som er mindre enn partiklene i resten av injeksjonsmassen, hvis ikke vil tilsetningen av stabiliserende stoffer forverre inntrengningsevnen til injeksjonsmassen. Uavhengig av dette vil stabiliserende stoffer retardere størkningsprosessen, noe som vil føre til økt størknetid.

Superplastiserende stoffer

Superplastiserende stoffer, ofte kalt SP-stoffer, er stoffer som tilsettes for at sementkornene skal dispergere, og dermed forhindre at kornene henger sammen i klumper (H. O. Hognestad mfl. 2010). Ved tilsetning av SP-stoffer vil sementblandingen oppføre seg som en mer finkornet blanding og inntrengningsevnen vil øke, fordi klumpene i sementblandingen løser seg opp. Mer finkornet injeksjonsmasse og økt inntrengningsevne er nesten alltid ønskelig, derfor tilsettes det vanligvis SP-stoffer til injeksjonsmassen. Normal dosering av SP-stoffer er 1,5% til 2% av sementvekten. Ved bruk av silikaslurry er det spesielt viktig at det tilsettes SP-stoffer, hvis ikke vil ikke partiklene bli dispergert tilstrekkelig (Klüver og Kveen 2004).

Akselerator

For at injeksjonsmassen skal størkne raskere kan det tilsettes akselerator til blandingen (H. O. Hognestad mfl. 2010). Akselerator blir tilsatt til injeksjonsmassen samtidig som

den pumpes inn i bergmassen, fra en slange koblet til injeksjonsstaven. Akseleratoren tilsettes helt til slutt i prosessen for å forhindre at injeksjonsmassen størkner før den er pumpet ut i bergmassen. For at forholdet mellom akselerator og injeksjonsmasse skal være konstant er det viktig at tilsetningen av akselerator følger pumperaten til injeksjonsriggen. Tilsetning av akselerator kan gjøre at det pumpes inn mindre injeksjonsmasse, noe som også reduserer pumpetiden. Ulempen med tilsetning av akselerator er at raskere størkning kan gjøre at injeksjonsmassen ikke rekker å trenge inn i alle sprekkene, og dermed vil innlekkasjen bli høyere.

2.1.3 Kolloidal silika

Kolloidal silika er et alternativ til sement som injeksjonsmasse (Holter og H.-O. Hognestad 2012). Kolloidal silika består av SiO_2 -partikler, med en typisk størrelse på cirka $16 \mu\text{m}$, som er kolloidalt løst i vann. Viskositeten til kolloidal silika er mye lavere enn viskositeten til tradisjonell, sementbasert injeksjonsmasse, derfor kan kolloidal silika være et alternativ hvis sementbasert injeksjonsmasse ikke gir tilfredstillende resultater. Typisk viskositet for kolloidal silika er mellom 5 og 6 mPa.s, noe som kun er fem til seks ganger høyere enn viskositeten til vann. En annen fordel med kolloidal silika, sammenlignet med mange av de andre alternativene til sementbasert injeksjonsmasse, er at kolloida silika ikke er giftig.

For at kolloidal silika skal størkne, og dermed fungere som injeksjonsmasse, må det tilsettes en saltvannsløsning (H. O. Hognestad mfl. 2010). Partiklene i kolloidal silika er negativt ladet, og tilsetning av saltvannsløsning tilfører positivt ladede natriumpartikler. Natriumpartiklene vil gjøre at de negativt ladede partiklene kolliderer og danner en gel. Størkningstiden til denne gelen kan justeres ved å justere volumet av saltvannsløsning som tilsettes, og størkningstiden kan varieres mellom cirka 10 minutter og 2,5 timer.

2.2 Injeksjonstrykk

Hva som er riktig injeksjonstrykk er et tema det er stor diskusjon om i bransjen, og det kan både være fordeler og ulemper ved å utføre injeksjon med høyt trykk. I dette delkapittelet presenteres derfor noen av effektene injeksjonstrykket kan ha.

En mulig konsekvens av høyt injeksjonstrykk er at sprekkene i bergmassen kan deformeres (J. Rafi og Stille 2015). Sprekkene i bergmassen deformeres kun hvis injeksjonstrykket er høyere enn det kritiske trykket. Det kritiske trykket er definert som in-situ spenningene som virker på sprekkene. Det finnes to ulike typer deformasjon, elastisk og plastisk deformasjon. Elastisk deformasjon er reversibel, og skjer umiddelbart etter at injeksjonstrykket overstiger det kritiske trykket. Plastisk deformasjon er ikke reversibel, men oppstår ikke før injeksjonstrykket er signifikant høyere enn det kritiske trykket.

Hvis injeksjonstrykket økes over det kritiske trykket er deformasjonen som oppstår avhengig av E-modulusen til bergmassen, injeksjonstrykket og spredningsdistansen til injeksjonsmassen (J. Rafi og Stille 2015). Årsaken til at deformasjonen er avhengig av

spredningsdistansen er at en økning i spredningsdistansen fører til en økning i arealet injeksjonstrykket virker på. Av den grunn kan deformasjonen i en sprekk øke, selv om injeksjonstrykket ikke forandres.

2.2.1 Konsekvenser av deformasjon

Økende penetrasjonsevne

Deformasjon av sprekker kan være positivt fordi deformasjon gjør at injeksjonsmassens evne til å penetrere bergmassen øker (J. Rafi og Stille 2015). For enhver injeksjonsmasse finnes det en sprekkåpning, b_{min} , som er minste sprekkåpning injeksjonsmassen kan penetrere. b_{min} er avhengig av egenskapene til injeksjonsmassen, som igjen avhenger av blant sementtypen og tilsetningsstoffene som brukes. Det finnes også en sprekkåpning, b_{crit} , som 100% av injeksjonsmassen kan penetrere. I mellom b_{min} og b_{crit} er det et intervall hvor kun en gitt prosentandel av injeksjonsmassen vil penetrere sprekken. Hvis sprekkåpningen er mindre enn b_{crit} vil deformasjon og utvidelse av sprekkåpningen føre til at en større prosentandel av injeksjonsmassen kan trenge inn i sprekken, og sprekken vil bli bedre tettet. I følge J. Rafi og Stille (2015) er b_{crit} cirka to ganger større enn b_{min} , derfor har det ingen hensikt å øke sprekkåpningen til mer enn to ganger b_{crit} .

Økende konduktivitet i bergmassen

Fordi vannet i norsk bergmasse primært følger sprekkeene i bergmassen vil konduktiviteten til bergmassen hovedsakelig avhenge av sprekkekonduktiviteten (J. Rafi og Stille 2015). Sprekkekonduktiviteten er igjen proporsjonal med sprekkåpningen opphøyd i tredje. Deformasjon gjør at sprekkåpningene øker, og derfor kan deformasjon øke konduktiviteten i bergmassen. Hvis sprekkeene deformeres elastisk kan deformasjonen reverseres etter at injeksjonen er fullført, under den forutsetning at injeksjonsmassen presses ut før den herder. I de fleste tilfellene vil derimot ikke injeksjonsmassen presses ut, noe som gjør at sprekkåpningene permanent vil bli større. I den injiserte sonen vil injeksjonsmassen tette sprekkeene, noe som gjør at den økte sprekkåpningen ikke fører til økt konduktivitet.

Når injeksjonstrykket deformerer sprekkeene vil deformasjonen forplante seg i bergmassen, og deformasjonen forplanter seg lengre enn spredningsdistansen til injeksjonsmassen. Effekten er at sprekkeene utenfor den injiserte sonen vil få større sprekkåpning. Større sprekkåpning fører igjen til større konduktivitet, og dermed vil konduktiviteten i sonen utenfor den injiserte sonen øke.

Økende injeksjonstid/injisert volum

Som nevnt ovenfor vil konduktiviteten i den injiserte sonen ikke øke som en følge av at injeksjonstrykket øker sprekkåpningene, fordi sprekkeene blir tettet med injeksjonsmasse. Ulempen er at for å tette sprekkeene må mer injeksjonsmasse injiseres, og dermed vil det totale injiserte volumet øke. Dette vil igjen øke injeksjonstiden, fordi pumpekapasiteten til injeksjonsriggen er begrenset. Fordi sprekkeene utvider seg vil volumet som trengs for å fylle en gitt lengde av sprekkeene øke. Deformasjonen av sprekkeene vil i tillegg øke ved

økende spredningsdistanse. Konsekvensen er at spredningshastigheten til injeksjonsmassen vil synke, siden deler av injeksjonsmassen som pumpes inn vil brukes til å fylle den økte sprekkeåpningen, istedenfor å spre seg utover i bergmassen.

2.2.2 Høyt injeksjonstrykk i Norge

I følge Strømsvik (2019) er hydraulisk jekking vanlig når det utføres injeksjon i Norge, og som oftest blir det ikke utført tiltak for å unngå hydraulisk jekking. Blant prosjektene som Strømsvik (2019) undersøkte ble mellom 40% og 60% av det totale injiserte volumet brukt i kun 10% av injeksjonshullene. Undersøkelser av de samme 10% av injeksjonshullene indikerte at hydraulisk jekking hadde skjedd i 50% til 75% av dem, basert på data fra injeksjonen. Dette betyr at det er en sammenheng mellom injeksjonshull med stort forbruk av injeksjonsmasse og injeksjonshull hvor det har skjedd hydraulisk jekking.

Konsekvensene av hydraulisk jekking er avhengig av hvilken sementtype som brukes til injeksjonen (Strømsvik 2019). I hull hvor det har skjedd hydraulisk jekking vil den relative økningen i totalt injisert volum være høyere hvis det brukes mikrosement, sammenlignet med fin sement. Det samme gjelder injeksjonstiden, hvis det oppstår hydraulisk jekking vil den relative økningen i injeksjonstid være høyere for mikrosement enn for fin sement.

Endringen i strømningshastighet som en følge av hydraulisk jekking kan bestemmes ved å sammenligne den relative økningen i totalt injisert volum med den relative økningen i injeksjonstid. Hvis den relative økningen i totalt injisert volum er høyere enn den relative økningen i injeksjonstid har strømningshastigheten til injeksjonsmassen økt. Resultatene til Strømsvik (2019) viser at for mikrosement fører hydraulisk jekking til en økning i strømningshastighet, mens hydraulisk jekking fører til at strømningshastigheten reduseres hvis det brukes fin sement. Når det gjelder forekomsten av hydraulisk jekking viser resultatene at hydraulisk jekking oftere oppstår ved bruk av fin sement, sammenlignet med mikrosement. Til gjengjeld er konsekvensene ofte større hvis det brukes mikrosement.

Anbefalingen til Strømsvik (2019) er at det blir tatt mer hensyn til hydraulisk jekking i norske prosjekter, siden hydraulisk jekking kan føre til lengre injeksjonstid og høyere forbruk av injeksjonsmasse.

2.3 Aktiv injeksjon

Aktiv injeksjon er en injeksjonsmetode hvor målet er å oppnå kontinuerlig stigning i injeksjonstrykket, samtidig som injeksjonen avsluttes med høyest mulig trykk etter forholdene på prosjektet, opp til 100 bar (Klüver og Kveen 2004).

2.3.1 Injeksjonsmasse

Klüver og Kveen (2004) undersøkte en rekke prosjekter, og fant ut at det var mulig å oppnå gode resultater ved å kun bruke sementbasert injeksjonsmasse i alle prosjektene

de undersøkte. Aktiv injeksjon baserer seg derfor på sement som injeksjonsmasse, men egenskapene til injeksjonsmassen er allikevel viktige.

For å oppnå god inntrengning av injeksjonsmasse er det viktig at den har gode flyteegenskaper. Det er også viktig at injeksjonsmassen er stabil, for å unngå bleeding. Bleeding vil gjøre at vann skilles ut fra injeksjonsmassen, og injeksjonsmassen vil derfor bli tykkere. Tykkere injeksjonsmasse vil gjøre at inntrengningen blir dårligere, og dermed vil tetteeffekten også bli dårligere. Et alternativ for å oppnå bedre flyteegenskaper er å bruke injeksjonsmasse med høyt v/c -tall. Et høyt v/c -tall fører imidlertid til uønskede effekter som økt fare for bleeding, lengre herdingstid, lavere styrke etter herding og økt fare for hydraulisk jekking/splitting. Derfor blir det som oftest brukt tilsetningsstoffer som silika og superplastiserende stoffer for å forbedre flyteegenskapene uten å øke v/c -tallet.

Hvilken sementtype som er best egnet på prosjektet er avhengig av blant annet bergartstype og bergmassens egenskaper, men for store deler av Norges berggrunn vil industrisement være tilstrekkelig (Klüver og Kveen 2004). I praksis vil industrisement være mulig å bruke oftere enn finhetsgraden til sementen skulle tilsi. Hvis bergmassen har høy innspenning eller lukket sprekkstruktur, særlig hvis sprekkene har mye leirfylling, vil det allikevel ofte kreves mikroement for å oppnå god tetting. Uansett hvilken sementtype som blir valgt innledningsvis bør resultatene fra injeksjonen evalueres, og sementtypen byttes hvis det er behov for det.

I aktiv injeksjon bør v/c -tallet justeres underveis i injeksjonen (Klüver og Kveen 2004). I hvert injeksjonshull starter man med injeksjonsmasse med et høyt v/c -tall, opp mot 1,0 til 1,3. Årsaken er at et høyt v/c -tall sikrer god inntrengning i starten av injeksjonen. Så lenge det er tilfredstillende trykkoppbygging i injeksjonshullet fortsettes injeksjonen med samme v/c -tall, men hvis trykkoppbyggingen går for sakte senkes v/c -tallet. Når v/c -tallet senkes vil kohesjonen og friksjonen i injeksjonsmassen øke, noe som fører til raskere oppbygging av trykk. Hvis det brukes aktiv injeksjon kan masseforbruket i et typisk injeksjonshull se slik ut:

- 800 L med injeksjonsmasse med v/c -tall på 1,0.
- 600 L med injeksjonsmasse med v/c -tall på 0,8.
- 232 L med injeksjonsmasse med v/c -tall på 0,6.

2.3.2 Injeksjonstrykk

For at aktiv injeksjon skal være vellykket er en av de viktigste forutsetningene at det injiseres med så høyt trykk som forholdene i prosjektet tillater (Klüver og Kveen 2004). I tillegg må trykkoppbyggingen ha riktig hastighet. Hvis trykkoppbyggingen går sakte vil det som oftest bety at spredningsdistansen til injeksjonsmassen er for lang, og forbruket av injeksjonsmasse vil være unødvendig høyt. Hvis trykkoppbyggingen derimot er for rask kan dette redusere eller ødelegge injeksjonshullets evne til å ta i mot mer masse. Trykkutviklingen styres hovedsakelig ved å forandre på v/c -tallet til injeksjonsmassen.

Hvis trykkoppbyggingen er for rask bør v/c -tallet økes, hvis trykkoppbyggingen er for treg bør v/c -tallet senkes.

I følge Klüver og Kveen (2004) er faren for redusert stabilitet i tunnelen som en følge av hydraulisk jekking/splitting liten, forutsatt at det brukes riktig v/c -tall. Årsaken er at injeksjonstrykket raskt avtar med økende avstand fra injeksjonshullet. Hvis bergmassen har dårlig kvalitet eller pakkerne ikke plasseres langt nok inn i injeksjonshullet, kan stabiliteten i tunnelen allikevel bli negativt påvirket av hydraulisk jekking/splitting, selv om det brukes riktig v/c -tall.

Hva som er høyt nok injeksjonstrykk avhenger blant annet av poretrykket, spenningene i bergmassen og motstand mot masseinntrengning som en følge av begrenset sprekkeåpning, sprekkeruhet og sprekkefylling. Vanligvis trengs det et injeksjonstrykk som er minst 10 bar høyere enn in-situ poretrykk for å åpne sprekker og omlagre spenningene i bergmassen. Injeksjonstrykket bør være høyt nok til å kontrollert åpne sprekke i en meget begrenset radius rundt hvert injeksjonshull. I tillegg bør injeksjonstrykket være så høyt at det oppnås kommunikasjon mellom injeksjonshullet og sprekke i bergmassen og internt mellom sprekke, for å sørge for at det tettes flere sprekke enn kun de som som befinner seg rett i nærheten av injeksjonshullet. Derfor bør injeksjonstrykket være høyt nok til at det oppstår hydraulisk jekking/splitting i bergmassen rundt hullet. Hvis injeksjonstrykket ikke er høyt nok til at det oppstår hydraulisk splitting/jekking vil injeksjonen sannsynligvis ikke oppfylle de strengeste innlekkasjekravene.

2.3.3 Forbruk av injeksjonsmasse

Forbruket av injeksjonsmasse styres av bergmassens egenskaper, egenskapene til injeksjonsmassen, injeksjonstrykk, pumpetid og hvordan injeksjonsskjermen ser ut (Klüver og Kveen 2004). Ved å justere på v/c -tallet kan derimot både injeksjonstrykket og pumpetiden styres. Hvis det pumpes injeksjonsmasse med et lavt v/c -tall og høy pumperate kan injeksjonsmassen spre seg langt bort fra tunnelen, og masseforbruket vil være unødvendig høyt.

Som oftest vil sprekkevolumet utgjøre en liten andel av det totale bergmassevolumet. I tillegg vil det ikke være mulig å injisere alle sprekke, sånn at injisert volum vil være mindre enn det totale sprekkevolumet. Nært injeksjonshullene vil derimot prosentandelen av sprekke som lar seg injisere øke på grunn av høyt injeksjonstrykk.

For en veitunnel med et spenn på 8,5 m vil et typisk forbruk av injeksjonsmasse være mellom 340 og 1750 kg per løpemeter tunnel. Forbruket kan imidlertid være høyere i deler av tunnelen, for eksempel hvis bergmassen er sterkt oppsprukket eller har åpne sprekke med lite fylling.

2.4 Split spacing

Split-spacing er injeksjonsmetode som går ut på at injeksjonsskjermen bores og injiseres i flere omganger (J. Y. Rafi 2013). Det vanligste er å dele skjermen opp i tre omganger, men det finnes også metoder med to eller fire omganger. Filosofien bak denne metoden er å gradvis tette «minste motstands vei», slik at injeksjonsmassen trenger inn i mindre og mindre sprekker (Intervju med K. Garshol mars 2023).

Den første omgangen med injeksjonshull som bores kalles primærhull. Primærhullene bores med stor avstand mellom hvert hull, typisk 3 meter i c/c -avstand. Etter at primærhullene er ferdig boret injiseres de, og deretter venter man inntil injeksjonsmassen har størknet.

Neste steg er å bore sekundærhullene, som bores mellom primærhullene. Avstanden mellom sekundærhullene vil også typisk være 3 meter, med mindre det kun brukes to omganger med injeksjon. Ved to omganger vil sekundærhullene bores på samme måte som tertiærhullene. Etter at sekundærhullene er ferdig boret og injisert, og injeksjonsmassen har størknet, bores tertiærhullene. Tertiærhullene bores mellom primær- og sekundærhullene, og avstanden mellom tertiærhullene er vanligvis mindre enn for primær- og sekundærhullene. Typisk c/c -avstand for tertiærhullene er 1 til 1,5 meter. Etter at alle tertiærhullene er ferdig boret injiseres de også, og når injeksjonen av tertiærhullene er ferdig er skjermen ferdig injisert.

I utgangspunktet er det ikke noen begrensninger i antall omganger injeksjonen kan utføres i, men siden det er en tidkrevende å utføre injeksjon i flere omganger er det ytterst sjeldent at det brukes mer enn fire omganger. Hvis det bores fire omganger med injeksjonshull er som oftest avstanden mellom tertiærhullene lengre, siden det bores kvartærhull etter at tertiærhullene er ferdig injisert. Kvartærhullene vil derfor fungere mer som tertiærhullene beskrevet ovenfor, med kort avstand mellom hvert hull.

2.4.1 Filosofi

Årsaken til at injeksjonsskjermen bores i flere omganger er at split-spacing bygger på en filosofi om at vannet til enhver tid følger den letteste veien i bergmassen (Intervju med K. Garshol mars 2023). I Norge vil dette som oftest bety at vannet følger kanaler i bergmassen, det er kun unntakvis at vannet følger sprekkeoverflater. Fordi vannet følger kanaler i bergmassen, vil det ofte være store kontraster i konduktivitet i et enkelt injeksjonshull, avhengig av størrelsen til og antall kanaler som krysser injeksjonshullet. Det finnes heller ikke noen metoder for å bestemme hvor innlekkasjen i injeksjonshullene stammer fra. Innlekkasjen kan stamme fra noen få, store kanaler, eller mange, små kanaler, uten at det er noen forskjell i den totale innlekkasjen til hullet. Derfor fungerer ikke tommelfingerregelen om at injeksjonen skal utføres med tykk injeksjonsmasse hvis det er mye innlekkasje av vann og tynn injeksjonsmasse hvis det er lite innlekkasje av vann.

Målet med å bore og injisere injeksjonsskjermen i flere omganger er at de mest vannføren-

de kanalene skal tettes først, og så skal hver omgang tette kanaler med mindre vannføring enn forrige omgang. Årsaken til denne effekten er at det er en sammenheng mellom vannføringen i en kanal og injeksjonsmassens inntrengningsevne i kanalen. Injeksjonsmassen trenger lettere inne i kanaler med stor vannføring, og dermed vil kanaler med stor vannføring bli fylt før kanaler med mindre vannføring.

Siden primærhullene er de første hullene som blir boret er formålet med disse å tette de største kanalene i bergmassen. Etter at primærhullene er ferdig injisert, og injeksjonsmassen har størknet vil alle de største kanalene i bergmassen være tettet. Derfor vil injeksjonsmassen som pumpes inn i sekundærhullene fylle de mellomstore kanalene i bergmassen, siden det er disse som er lettest å fylle nå som alle de store kanalene er tettet. Når sekundærhullene er ferdig boret og injisert vil det kun være de minste kanalene i bergmassen som ikke er tettet. Formålet med tertiærhullene vil dermed være å tette de minste kanalene i bergmassen, og dette er mulig å oppnå fordi alle kanalene som er større er tettet i de tidligere injeksjonsgangene.

En annen fordel med å bore og injisere hullene i flere omganger er at det kan forhindre at injeksjonsmassen sprer seg langt avgårde fra tunnelen, hvor den ikke har noen effekt på innlekkasjen til tunnelen. Hvis alle hullene bores og injiseres samtidig, vil mesteparten av injeksjonsmassen følge de store kanalene i bergmassen, siden det er her inntrengningsevnen til injeksjonsmassen er størst. Hvis injeksjonsmassen da pumpes inn uten et stoppkriterium for volum, vil injeksjonsmassen spre seg langt av gårde langs de største kanalene, samtidig som de minste kanalene nesten ikke blir tettet. Dette fører til høyt forbruk av injeksjonsmasse, uten at man oppnår god tetting av bergmassen.

Ved å injisere i flere omganger, med et stoppkriterium på volum for hver omgang unngås dette scenarioet. Siden injeksjonen stoppes i det et gitt volum med injeksjonsmasse er pumpet inn vil spredningsdistansen til injeksjonsmassen være begrenset. I tillegg vil det at injeksjonsmassen størkner mellom hver omgang gjøre at injeksjonsmassen trenger inn i de minste kanalene, siden de største kanalene er injisert og fylt igjen med størknet injeksjonsmasse i de tidligere omgangene.

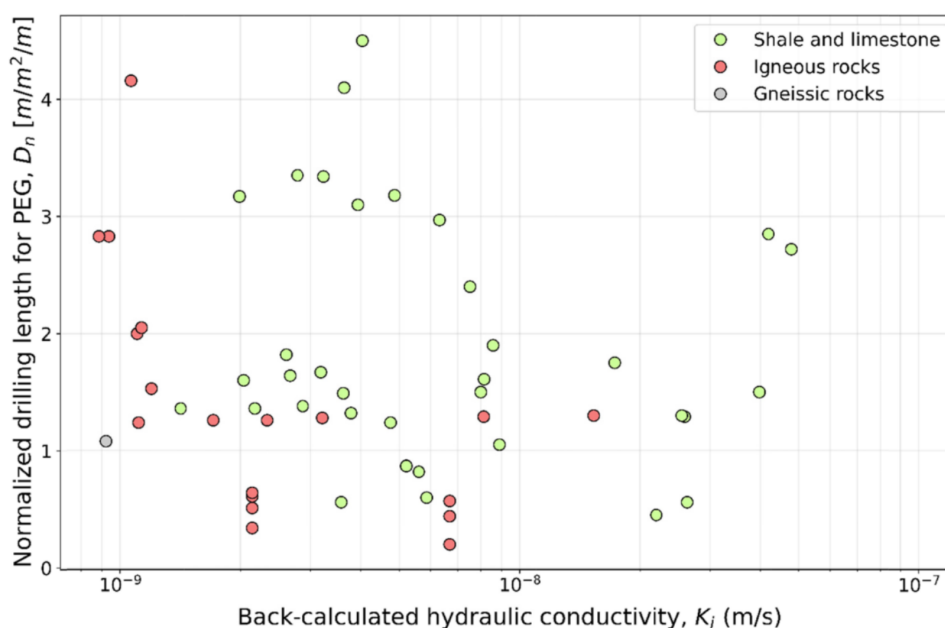
Filosofien bak injeksjon med split-spacing stammer opprinnelig fra injeksjon av damfundamenter. Ved injeksjon av damfundamenter er det vanlig å dele et injeksjonshull opp i flere seksjoner, og injisere hver seksjon for seg selv. Et injeksjonshull på 24 meter kan for eksempel deles inn i 8 seksjoner på 3 meter hver. Hver seksjon blir deretter injisert for seg selv, ved å sette pakkere på toppen og bunnen av hver seksjon. Forskjellen på injeksjon av damfundamenter og injeksjon i tunnel er at i en tunnel stopper all driften opp under injeksjonen, siden injeksjonen utføres fra stuff. For damfundamenter er det mulig å gjøre andre ting samtidig som fundamentene injiseres, derfor er ikke tiden en like kritisk faktor. Denne tidsfaktoren gjør at injeksjon i tunnel krever mindre omfattende prosedyrer, og færre omganger med injeksjon, for å holde kostnadene ved injeksjonen nede.

2.5 Normalisert borlengde og injeksjonsforbruk

Langford mfl. (2022) har undersøkt sammenhengen mellom utført injeksjon og innlekkasje for 44 tunneler i Norge, flesteparten av de fra Oslo-området. I denne prosessen har de definert to parametre, normalisert borlengde og normalisert forbruk av injeksjonsmasse.

Normalisert borlengde definerer de som antall bormeter per løpemeter tunnel, delt på tverrsnittsarealet av tunnelen. Normalisert forbruk av injeksjonsmasse er definert på tilsvarende måte, bare at bormeter er byttet ut med forbruket av injeksjonsmasse. Dermed blir formelen for normalisert forbruk av injeksjonsmasse forbruket av injeksjonsmasse i kg per løpemeter tunnel, delt på tverrsnittsarealet av tunnelen.

Figur 2.1 viser normalisert borlengde plottet mot tilbakeberegnet hydraulisk konduktivitet. Som vist i figuren varierer normalisert borlengde mellom 0 og 4,5 m/(m² m), mens typisk normalisert borlengde er mellom 1 og 2 m/(m² m).



Figur 2.1: Normalisert borlengde plottet mot tilbakeberegnet hydraulisk konduktivitet. Figuren hentet fra Langford mfl. (2022)

I figur 2.2 er normalisert injeksjonsforbruk plottet mot tilbakeberegnet hydraulisk konduktivitet for de 44 tunnelene. Som vist i figuren varierer normalisert injeksjonsforbruk mellom 0 og 120 kg/(m² m), men flertallet av tunnelene har et normalisert injeksjonsforbruk mellom 20 og 60 kg/(m² m).

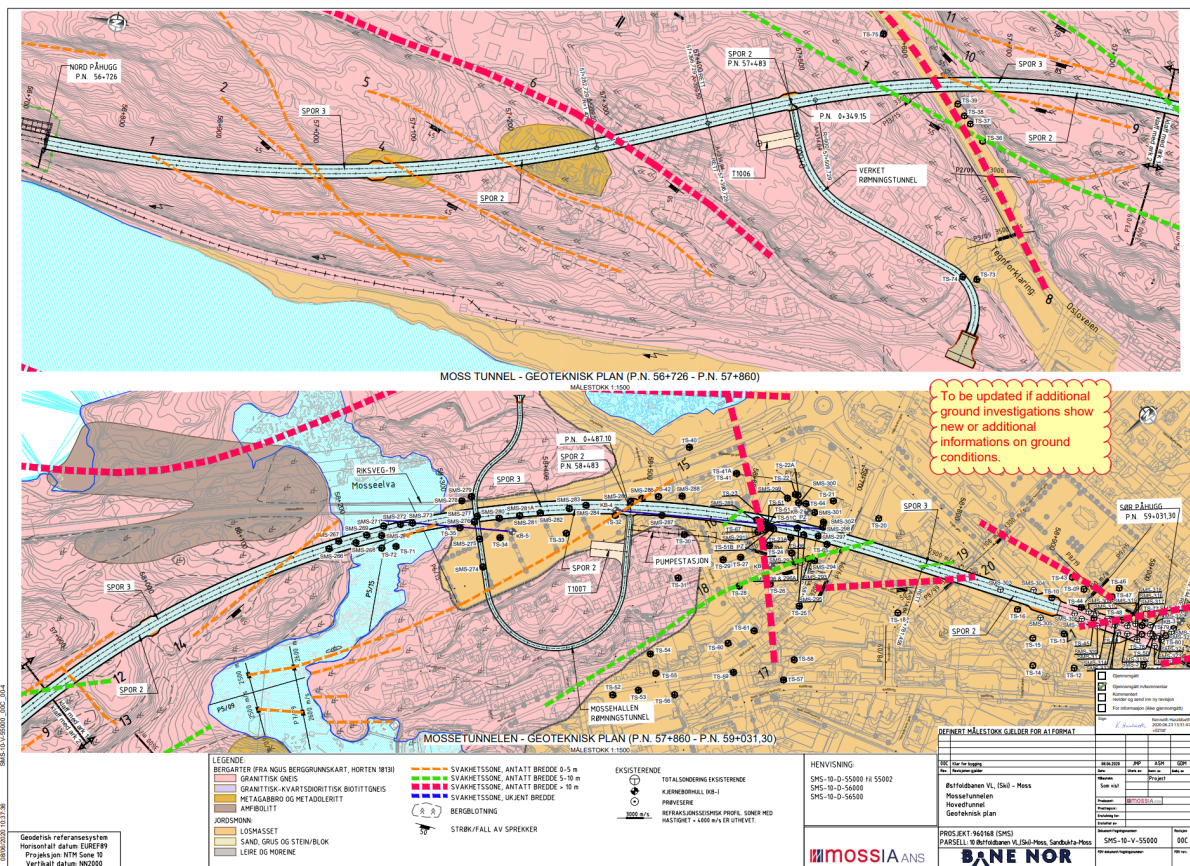
3 Om prosjektet

Prosjektet Sandbukta-Moss-Såstad er en del av InterCity utbyggingen på Østlandet, og innebærer byggingen av 10 kilometer med dobbeltspor på strekningen fra Sandbukta til Såstad, med et nytt stasjonsområde i Moss sentrum. Det er Bane NOR SF som er byggherre for prosjektet, og hele prosjektet ble opprinnelig utlyst som en totalentreprise. På grunn av uforutsett store forekomster av kvikkleire i området rundt stasjonen i Moss sentrum, ble derimot den delen av kontrakten som inkluderte arbeidet i Moss sentrum klippet ut, og lyst ut på nytt (Bane NOR 2022). Resten av strekningen er fortsatt en del av den opprinnelige totalentreprisen, og denne entreprisen er det MossIA som har.

I prosjektet skal det bygges to tunneler, Mossetunnelen i nord og Carlbergtunnelen i sør. Begge disse tunnelene går delvis under utbygde områder, samtidig som det finnes setningsømfintlige løsmasser i nærheten av traseen. Derfor er det satt strenge krav til innlekkasje i begge tunnelene, maksimal innlekkasje er enten 5 eller 10 L/m per 100 meter, avhengig av strekning i tunnelen. Innlekkasjekravene er presentert i mer detalj i delkapittel 3.4.

3.1 Mossetunnelen

Mossetunnelen er 2305 meter lang, og går fra Sandbukta i nord til Moss sentrum i sør. Tunnelen blir drevet fra et tverrslag på Verket, og fra dette tverrslaget drives det en stoff nordover og en stoff sørover. Tverrslaget på Verket fungerer også som rømningstunnel for tunnelen, og i tillegg blir det drevet en rømningstunnel ved Mossehallen. I figur 3.1 er kartet over tunnelen presentert, med rømningstunneler og tverrslag tegnet inn. Dette kartet finnes i en større versjon i Vedlegg A.



Figur 3.1: Kart over Mossetunnelen. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2020b)

Mossetunnelen skal bygges som en tospors tunnel, men tverrsnittet av tunnelen skal utvides inn mot stasjonsområdet i sør. En oppsummering av planlagt tunneltverrsnitt i Mossetunnelen er presentert i tabell 3.1. Som vist i tabellen avhenger tunneltverrsnittet av både sikringsklassen og pelnummer i tunnelen, men for store deler av tunnelen vil tverrsnittet være cirka 132 m².

Tabell 3.1: Teoretisk utsprengt tverrsnitt for Mossetunnelen. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2020b)

Sikringsklasse	Dobbeltsporet tunnel	Utvidet tunnel (Pelnummer 58,923-59,000)
I	131,11 m ²	
II	131,11 m ²	175,42 m ³ /m
III	131,69 m ²	
IV	133,17 m ²	194,27 m ²
V-a	139,98 m ²	196,03 m ²
V-b	162,83 m ²	214,31 m ²

3.1.1 Bergarter

Som vist i figur 3.1 går Mossetunnelen hovedsakelig gjennom granittisk gneis, som er en prekambrisk bergart. Langs traseen er det også enkelte innslag av metagabbro og amfibolitt, som begge stammer fra metamorfose av gabbro.

3.1.2 Oppsprekking

I tabell 3.2 og 3.3 er sprekkesettene og sprekkeegenskapene for henholdsvis Mossetunnelen nord og Mossetunnelen sør presentert. Det er lite variasjoner i oppsprekking mellom de to områdene, men sprekkenes orientering varierer noe. Som presentert i tabellene er det fem sprekkesett langs Mossetunnelen, hvorav tre hovedsett og to tilfeldige sett. Hovedsettene er J1, som følger foliasjonen, J2 og J3. De tilfeldige sprekkesettene er J4 og J5, og disse er mindre fremtredende i bergmassen.

Generelt er bergmassen i området rundt Moss lite til moderat oppsprukket, med en typisk sprekkeavstand på 0,3 til 1 meter (Sweco Rambøll ANS 2017). Sprekkene har stor utholdenhet, og sprekkeflatene er som oftest ru og bølgete. I dagen har sprekken ingen sprekkefylling, og det er heller ikke observert sprekker med vannsig (MossIA ANS 2020b).

Tabell 3.2: Sprekkesett og sprekkeegenskaper for Mossetunnelen nord. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2020b)

Sett	Strøk/fall			Sprekkeavstand		Utholdenhet		Jr ¹	Ja ²	Jw ³
	Snitt	Intervall fall	Intervall strøk	Snitt	Intervall	Snitt	Intervall			
F/J1	200/50	45-55	190-215	0,8	0,3-1	>20	>20	2-3	1-2	1
J2	020/50	35-80	350-030	1	0,5-2,0	3	1-10	1,5-3,0	1-2	1
J3	090/90	70-90	060-110	2	1,0-4,0	>3	1-10	2	1-2	1
J4	020/25	20-30	020-030	>5	2-10	>10	>10	2-3	1-6	1
J5	345/70	70-80	300-350	5	3,0-10	3	1-10	2-3	1-2	1

¹ Jr - Sprekkeruhet

² Ja - Sprekkefylling

³ Jw - Sprekkevannstall

Tabell 3.3: Sprekkesett og sprekkeegenskaper for Mossetunnelen sør. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2020b)

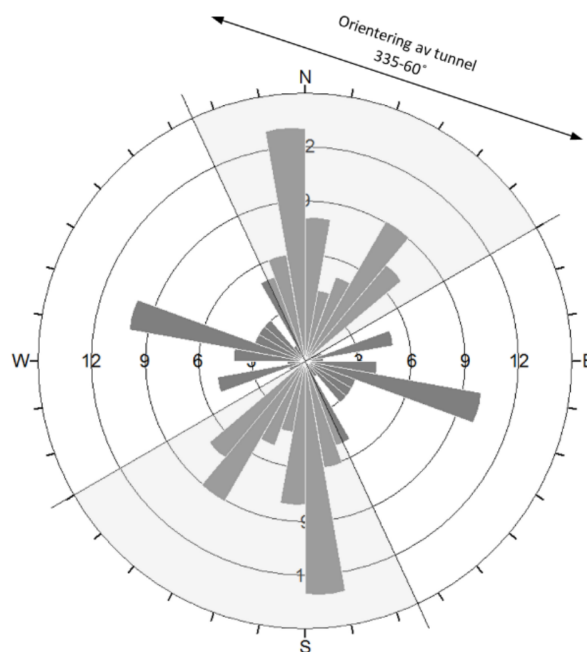
Sett	Strøk/fall		Sprekkeavstand		Utholdenhet		Jr ¹	Ja ²	Jw ³	
	Snitt	Intervall fall	Intervall strøk	Snitt	Intervall	Snitt				Intervall
F/J1	205/50	45-55	190-215	0,8	0,3-1	>20	>20	2-3	1-2	1
J2	030/65	35-80	350-030	1	0,5-2,0	3	1-10	1,5-3,0	1-2	1
J3	090/90	70-90	060-110	2	1,0-4,0	>3	1-10	2	1-2	1
J4	025/25	20-30	020-030	>5	2-10	>10	>10	2-3	1-6	1
J5	330/75	70-80	300-350	5	3,0-10	3	1-10	2-3	1-2	1

¹ Jr - Sprekkeruhet

² Ja - Sprekkefylling

³ Jw - Sprekkevannstall

Under utarbeidelsen av den ingeniørgeologiske rapporten for Mossetunnelen ble det laget en sprekkerose for tunnelen, denne er presentert i figur 3.2.


Figur 3.2: Sprekkerose for Mossetunnelen. Hentet fra den ingeniørgeologiske rapporten (Sweco Rambøll ANS 2017)

3.1.3 Svakhetssoner

Langs med traseen for Mossetunnelen er det kartlagt en rekke svakhetssoner, med en en tykkelse som varierer fra noen få til 35 meter (MossIA ANS 2020b). En fullstendig oversikt over alle svakhetssonene som er kartlagt langs traseen er oppgitt i tabell 3.4. Som vist i tabellen ble det totalt kartlagt 23 svakhetssoner i forkant av drivingen.

Tabell 3.4: Forhåndskartlagte svakhetssoner langs Mossetunnelen. Hentet fra detaljprosjektering til MossIA (MossIA ANS 2020b)

Nr.	Pelnummer	Strøk	Tykkelse (m)	Lengde i tunnelen (m)
1	56,850	N-S	0-5	10
2	56,940	NNØ-SSV	0-5	20
3	57,000	NØ-SV	0-5	10
4	57,025	NNØ-SSV	0-5	10
5	57,140	NNØ-SSV	0-5	15
6	57,300	NNØ-SSV	15	20
7a	57,550	NNØ-SSV	0-5	20
7	57,600	NNØ-SSV	5-10	20
8	57,630	NØ-SV	>10	
9	57,670	N-S	0-5	90
10	57,675	NNØ-SSV	5-10	
11	57,850-57,930	N-S	0-5	80
12	57,800	NNØ-SSV	5-10	30
13	57,885	Ø-V	0-5	10
14	58,050	N-S	0-5	40
15	58,465	NNØ-SSV	0-5	20
16	58,570	N-S	5	10
17	58,620	Ø-V	25	25
18a	58,680	N-S	5-10	20
18	58,700	N-S	5-10	20
19	58,770	NNØ-SSV	5-10	50
20	58,800	NNØ-SSV	>10	
21	58,950	N-S	>10	40

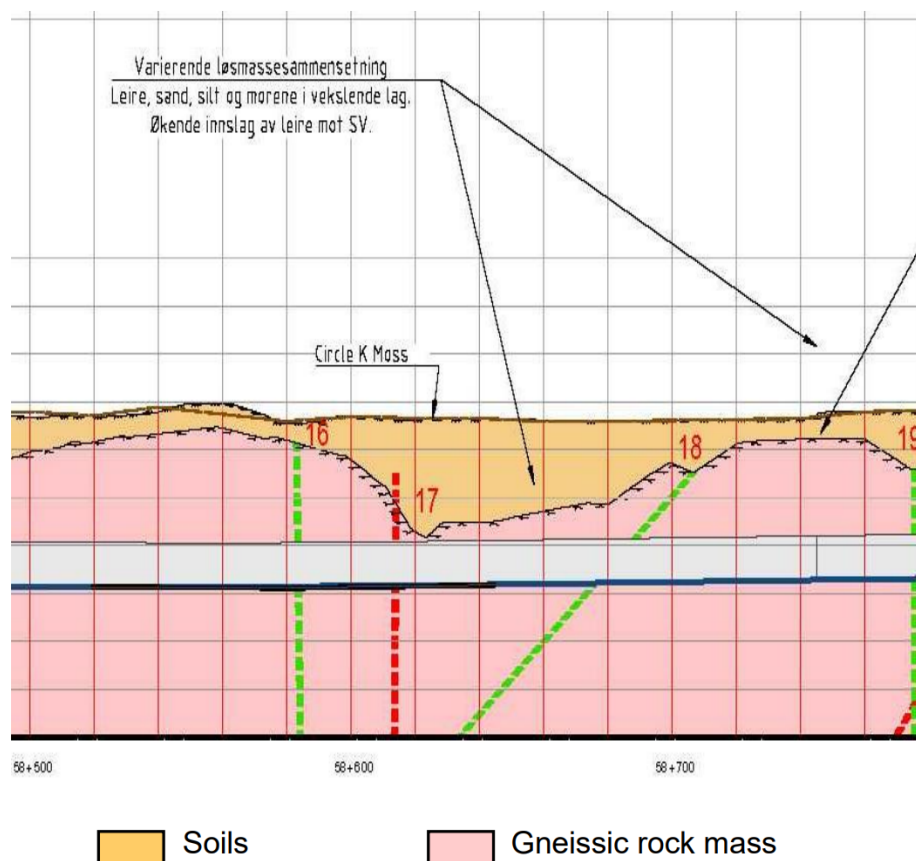
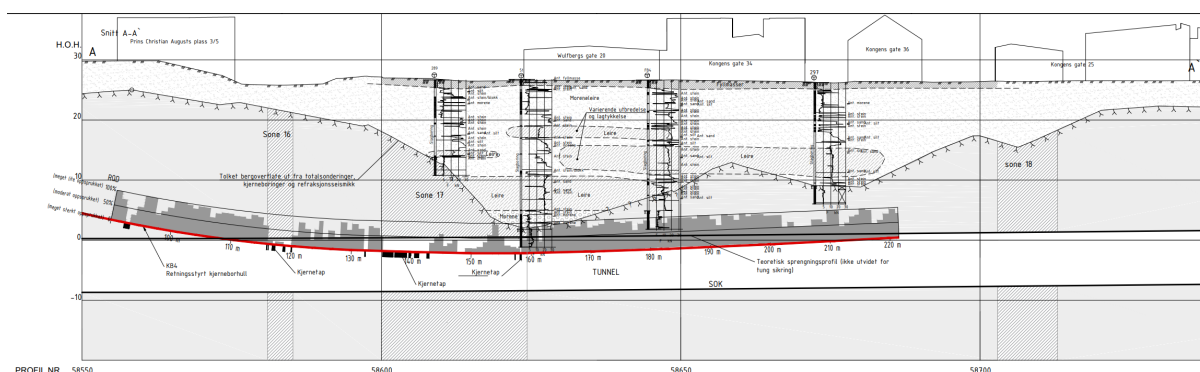


Figure 19. Geological profile 58+300 – 59+030

Figur 3.3: Geologisk profil for Circle K svakhetssonen. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2021c)

Av disse svakhetssonene ble svakhetszone 17 sett på som spesielt kritisk i forkant av drivingen av tunnelen. Denne svakhetssonen er kalt «Circle K svakhetssonen» fordi den befinner seg under en Circle K bensinstasjon. Et profil over denne svakhetssonen er presentert i figur 3.3. Fordi denne svakhetssonen ble sett på som ekstra kritisk ble det utført kjerneboringer, refraksjonsseismikk og totalsonderinger i dette området før drivingen av tunnelen startet. Resultatene fra disse undersøkelsene, og en tolkning av svakhetssonen, er presentert i figur 3.4. Denne figuren finnes også i større versjon i Vedlegg C. Basert på forundersøkelsene ble svakhetssonen tolket som en tilnærmet vertikal svakhetszone.



Figur 3.4: Utførte forundersøkelser og tolkning av svakhetssonen ved Circle K. Hentet fra Bane NOR

Tabell 3.5: Tolkning av dybde til fjell og løsmasser i Circle K svakhetssonen. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2021c).

	58,610	58,625	58,650	58,675
Løsmasse	Dybde(m)	Dybde(m)	Dybde(m)	Dybde(m)
Topplag	0,0 - 1,5	0,0 - 1,5	0,0 - 1,0	0,0 - 1,5
Øvre morene	1,5 - 10,5	1,5 - 17,0	1,0 - 8,0	1,5 - 8,0
Leire	10,5 - 12,0 ¹	17,0 - 22,0	8,0 - 21,0 ²	8,0 - 16,5 ²
Nedre morene	12,0 - 13,0	22,0 - 25,0	-	16,5 - 18,0
Bergoverflate	13,0 ³	25,0	21,0	18,0

¹ 10,5 - 17,0 meter i den vestre delen av tunnelen

² Med lag av sand/grus < 1 m tykke

³ 17,0 meter i den vestre delen av tunnelen

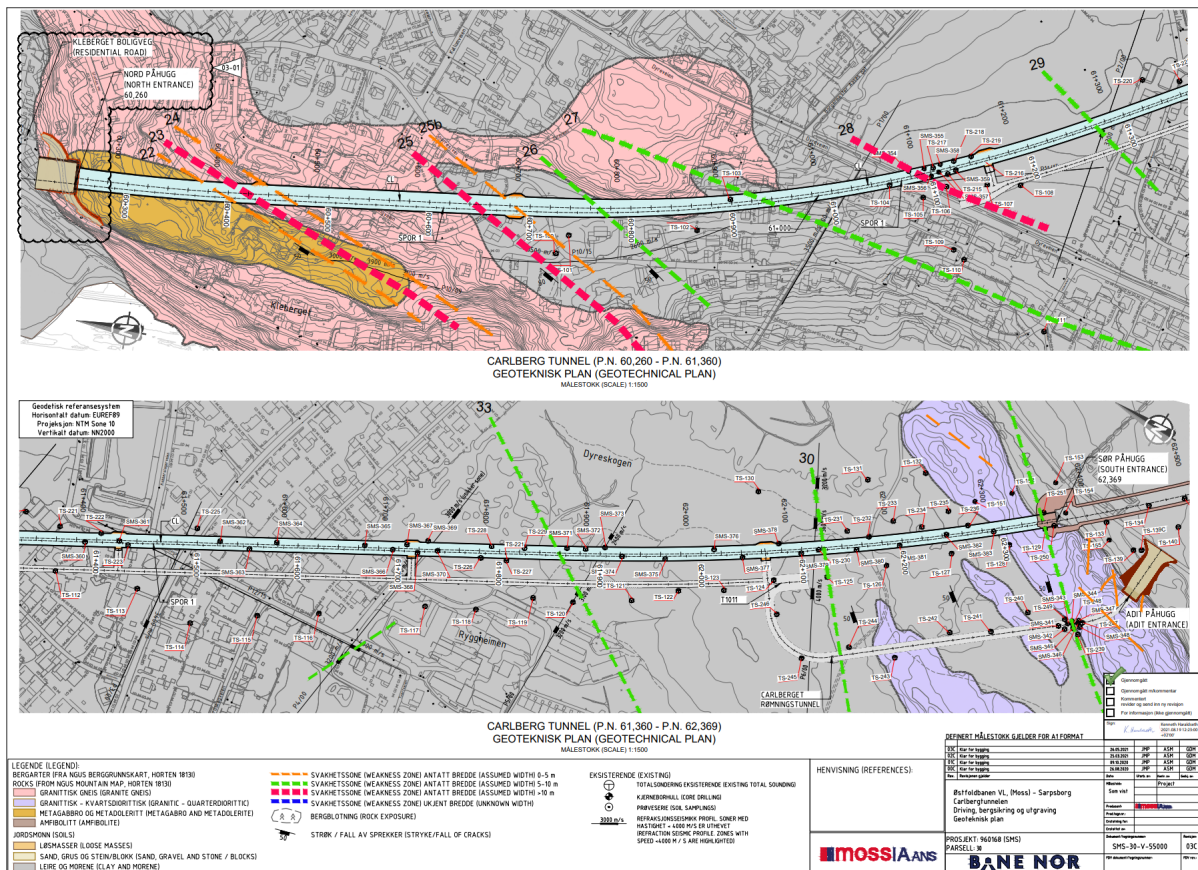
I tillegg utførte MossIA flere forundersøkelser av Circle K svakhetssonen, for å kartlegge løsmassene i området. Tolkningen av disse forundersøkelsene er presentert i tabell 3.5. I tabellen er tykkelsen til løsmassene, samt dybden til fjell oppgitt. Som presentert i tabellen finnes det både leire og morene i svakhetssonen, dermed er det et stort potensiale for setninger. Henget i tunnelen vil befinne seg på en dybde på cirka 26 til 27 meter, noe som gjør at bergoverdekningen på det minste er nede i en meter.

3.2 Carlbergtunnelen

Carlbergtunnelen er 2109 meter lang, og går fra Kleberget i nord til Carlberg gård i sør (MossIA ANS 2021a). Kleberget er navnet på området som befinner seg rett sør for stasjonen i Moss i sentrum.

Hele Carlbergtunnelen blir drevet fra en tverrslagstunnel, og påhugget til denne tverrslagstunnelen er ved Carlberg gård. Fra tverrslagstunnelen blir hovedtunnelen drevet både nordover og sørover, dermed vil det være to delstrekninger i Carlbergtunnelen.

Disse delstrekningene kalles Carlbergtunnelen nord og Carlbergtunnelen sør, hvor Carlbergtunnelen nord er den lengste strekningen. I tillegg til hovedtunnelen vil det drives en parallell rømmingstunnel langs deler av Carlbergtunnelen nord. Et kart over tunnelen, med tverrslagstunnelen og den parallelle rømmingstunnelen tegnet inn, finnes i figur 3.5. En større versjon av dette kartet finnes i Vedlegg D.



Figur 3.5: Kart over Carlbergtunnelen. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2021b)

Fra stasjonsområdet vil det gå tre spor inn i Carlbergtunnelen, før det blir to spor cirka ved pelnummer 60,634. Derfor vil Carlbergtunnelen snevres inn fra tre til to spor et stykke inni tunnelen, og av den grunn vil spennet variere. I tillegg vil spennet avhenge av sikringsklassen. Årsaken er at tyngre sikring tar større plass i tunnelen, derfor vil den tyngste sikringen kreve et større spenn. En oversikt over spennet for de ulike strekningene i Carlbergtunnelen er presentert i tabell 3.6.

Tabell 3.6: Tunnelspenn for de ulike strekningene i Carlbergtunnelen. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2021a)

Pelnummer	Antall spor	Spenn(m)	Lengde i tunnelen (m)
60,265 - 60,490	3	21,5-19,8	225
60,490 - 60,634	3	19,8	251
60,634 - 61,000	2	19,3-14,8	366
61,000 - 61,347	2	17,1-15,4	347
61,347 - 62,349	2	14,3 ¹	1002
62,349 - 62,366	2	14,8	17

¹ For sikringsklasse I til III. Henholdsvis 14,4, 14,9 og 15,6 meter for sikringsklasse IV, V-a og V-b.

Siden spennet i Carlbergtunnelen varierer vil tverrsnittet i tunnelen også variere, og for store deler av Carlbergtunnelen er ikke tverrsnittet oppgitt. På strekningen fra pelnummer 61,347 til 62,359 er derimot tverrsnittet oppgitt. Langs denne strekningen er tverrsnittet for sikringsklasse I til III, IV, V-a og V-b henholdsvis 131 m², 133 m², 140 m² og 161 m².

3.2.1 Bergarter

I likhet med Mossetunnelen går Carlbergtunnelen gjennom granittisk gneis, metagabbro og amfibolitt, men Carlbergtunnelen går i tillegg gjennom granittisk-kvartsdiorittisk gneis. Forskjellen mellom den granittisk gneisen og den granittiske-kvartsdiorittiske gneisen er at feltspaten i den granittiske-kvartsdiorittiske gneisen hovedsakelig er plagioklas og ikke alkalifeltspat (Sweco Rambøll ANS 2017).

3.2.2 Oppsprekking

I tabell 3.7 er sprekkesettene og sprekkeegenskapene for den nordlige delen av Carlbergtunnelen presentert. Det er de samme sprekkesettene som i Mossetunnelen, men orienteringen av sprekkenes er litt annerledes. I tillegg er det noen små forskjeller i sprekkenes egenskaper.

Tabell 3.7: Sprekkesett og sprekkeegenskaper for Carlbergtunnelen nord. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2021b).

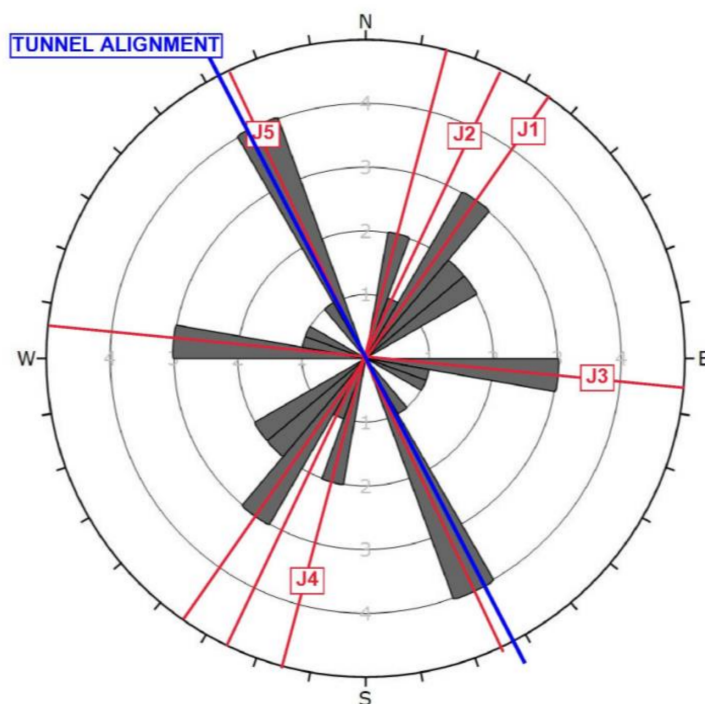
Sett	Strøk/fall			Sprekkeavstand		Utholdenhet		Jr ¹	Ja ²	Jw ³
	Snitt	Intervall fall	Intervall strøk	Snitt	Intervall	Snitt	Intervall			
F/J1	190/55	45-60	190-210	0,8	0,3-1	>20	>20	1,5-3	1-2	1
J2	020/50	35-80	010-050	1	0,5-2,0	3	1-10	1,5-3	1-2	1
J3	095/90	70-90	085-110	2	1,0-4,0	>3	1-10	2	1-2	1
J4	025/30	20-30	020-030	>5	2-10	>10	>10	2-3	1-6	1
J5	330/65	60-75	300-350	5	3,0-10,0	3	1-10	2-3	1-2	1

¹ Jr - Sprekkeruhet

² Ja - Sprekkefylling

³ Jw - Sprekkevannstall

Sprekkerosen for Carlbergtunnelen, med de ulike sprekkesettene tegnet inn, er vist i figur 3.6. Denne sprekkerosen er laget av MossIA, som en del av detaljprosjekteringen av prosjektet.



Figur 3.6: Sprekkerose for Carlbergtunnelen. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2021a)

3.2.3 Svakhetssoner

For Carlbergtunnelen ble det kartlagt 13 potensielle svakhetssoner i forkant av drifvingen av tunnelen, med en tykkelse som varierer fra noen få til 12 meter. Disse svakhetssonene er presentert i tabell 3.8, sammen med antatt tykkelse og lengde i tunnelen.

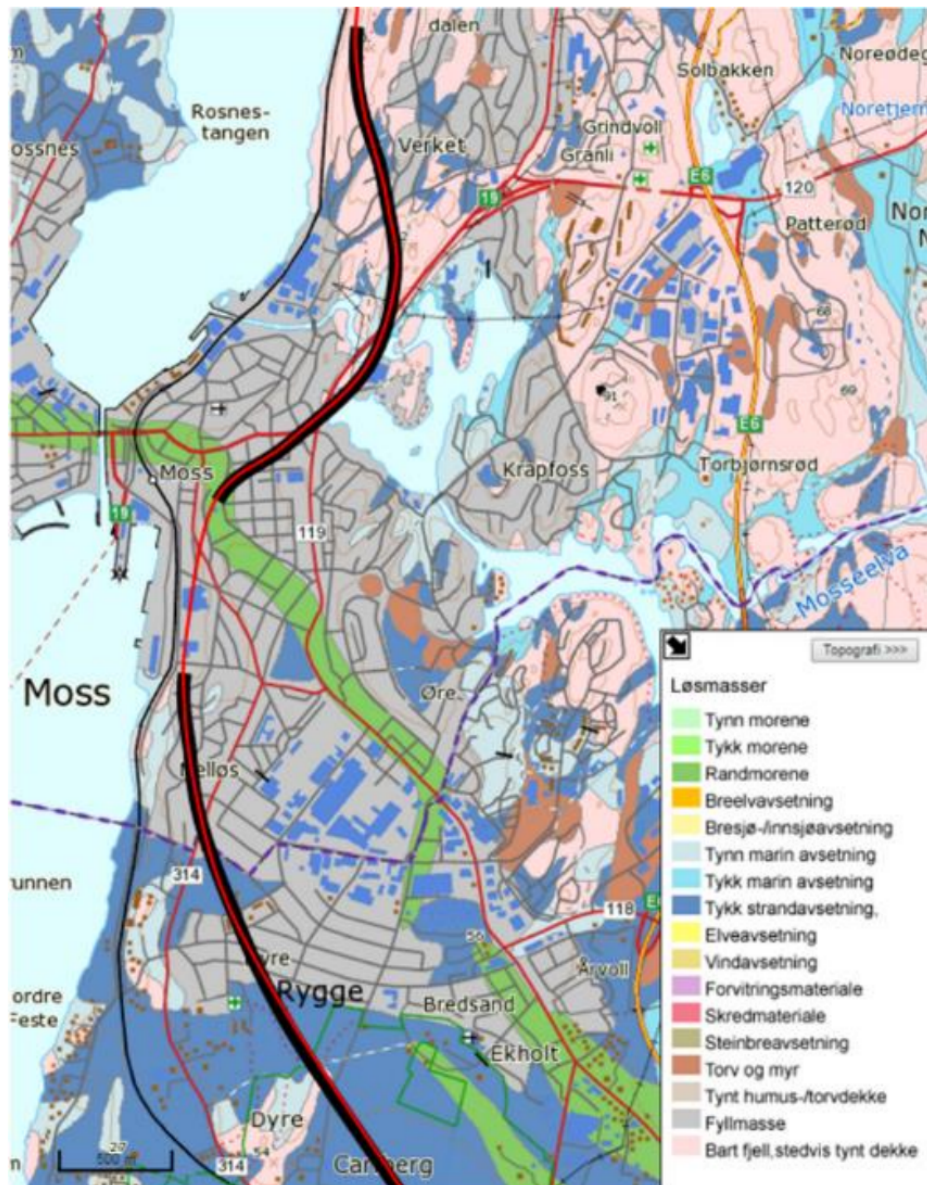
Tabell 3.8: Forhåndskartlagte svakhetssoner langs Carlbergtunnelen. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2021b)

Nr.	Pelnummer	Strøk	Tykkelse (m)	Lengde i tunnelen (m)
22		NØ-SV	5	
23	60,330-60,400		12	70
24			5	
25	60,600	NØ-SV	5-10	30
25b	60,650	NØ-SV	5	10
26	60,720	NØ-SV	1-5	20
27	60,930	NØ-SV	5	20
28	61,090	NØ-SV	>10	30
29	61,270	NØ-SV	5-10	10
30	61,850	NØ-SV	5-10	10
31	62,110	NØ-SV	ukjent	20
32	62,220	NØ-SV	ukjent	-
33	62,335	NØ-SV	5-10	15

3.3 Kritiske områder for innlekkasje av vann

Det finnes flere områder i nærheten av de to tunnelene hvor det er spesielt viktig å begrense innlekkasjen til tunnelen. For de fleste områdene er årsaken at innlekkasje til tunnelen kan føre til setningskader på overflaten. For å vurdere faren for setningskader må både bebyggelsen og løsmassene i området vurderes.

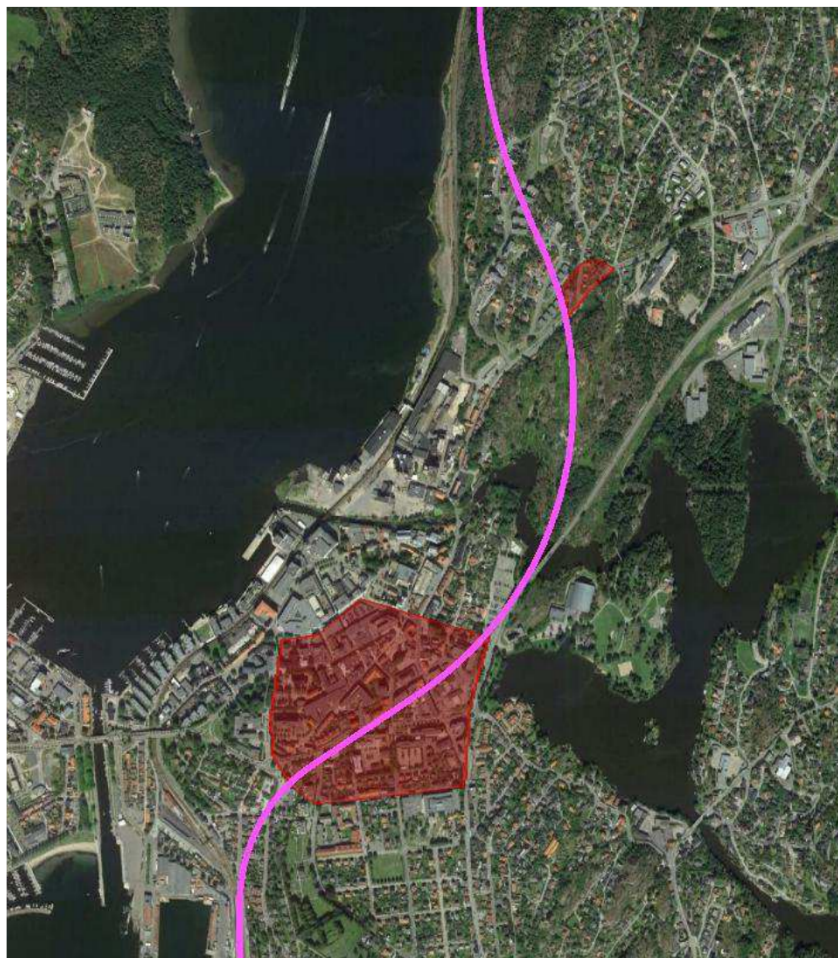
Som vist i figur 3.7 består løsmassene i området av marin leire, morene og fyllmasse, samt noen områder med berg i dagen eller et tynt dekke med løsmasser. Løsmassene i området er i stor grad preget av Raet, som er en randmorene (Sweco Rambøll ANS 2017). Denne randmorenen er vist med grønt på kartet. Da Raet ble avsatt sto havet inn mot sydsiden, og derfor kan det være vekslende lag med leire og morenemateriale på sydsiden av morenen. Nord for Mosseelva ligger berget hovedsakelig i dagen, bortsett fra akkurat under Osloveien. Sør for Mosseelva øker mektigheten av løsmassene, og består av mest sand og silt, med litt leire i dybden. Under stasjonsområdet, mellom Mossetunnelen og Carlbergtunnelen, er dybden til berg i overkant av 30 meter, med gradvis økende innhold av leire og bløte masser under fyllmasser/tørrskorpeleire. Ved Kleberget, som er den nordlige delen av Carlbergtunnelen, er det kun et tynt dekke av løsmasser. Tykkelsen av løsmassedekkene øker derimot sørover, og varierer mellom 5 og 15 meter, hovedsakelig bestående av bløt leire.



Figur 3.7: Kvartærgeologisk kart over området. Hentet fra den ingeniørgeologiske rapporten (Sweco Rambøll ANS 2017)

Som beskrevet er det en del leire i områdene rundt de to tunnelene, og leire er en setningsømfintlig løsmasse. Derfor vil all bebyggelse som er fundamentert på leire kunne få setningsskader hvis grunnvannspeilet senkes. Av den grunn er bebyggelsen langs de to tunnelene også kartlagt, for å kunne si noe om hvilke områder som er setningssensitive.

Figur 3.8 viser de områdene langs Mossetunnelen som er kartlagt som setningssensitive. Som vist i figuren er det to områder, området under Osloveien og området ved Circle K. Ved Osloveien består bebyggelsen av bolighus, med en blanding av eneboliger og flermannsboliger. Ved Circle K er bebyggelsen tettere, og består hovedsakelig av blokker, med noen enkeltstående bygninger. Et bilde av bebyggelsen ved Circle K er vist i figur 3.9.

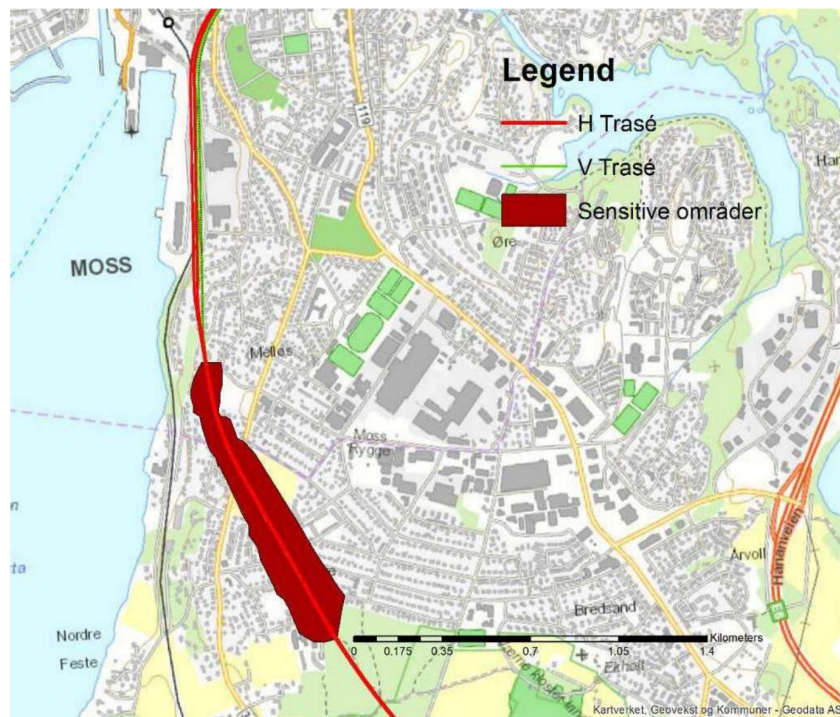


Figur 3.8: Setningssensitive områder langs Mossetunnelen. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2020b)



Figur 3.9: Bebyggelse ved Circle K bensinstasjonen

Områdene langs Carlbergtunnelen som er kartlagt som setningssensitive er vist i figur 3.10. Som vist i figuren er det kun ett område, men dette området er til gjengjeld stort. Bebyggelsen i dette området består for det meste av bolighus, med noen blokker innimellom. I figur 3.11 er et bilde av den typiske bebyggelsen i området vist.



Figur 3.10: Setningssensitive områder langs Carlbergtunnelen. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA (MossIA ANS 2021b)



Figur 3.11: Typisk bebyggelse i det setningssensitive området over Carlbergtunnelen

3.4 Kontraktskrav til injeksjon

Fordi det er flere områder i nærheten av tunnelene hvor innlekkasje til tunnelen kan skape problemer er det en rekke krav til utførelsen av injeksjonarbeider i kontrakten for prosjektet.

Et av kravene i kontrakten er at det skal utføres systematisk forinjeksjon i begge tunnelene, med cirka 15 meter mellom hovedinjeksjonsskjermene og 9 meter med overlapp mellom skjermene (Bane NOR 2019). I tillegg skal det «tilstrebtes å redusere behovet for etterinjeksjon ved at tilstrekkelig forinjeksjon gjøres inntil tetthetskravene er nådd» (Bane NOR 2019, s. 9).

3.4.1 Innlekkasjekrav

Det generelle kravet til innlekkasje er at det ikke skal forekomme skader på bebyggelse, eiendommer, infrastruktur eller naturmiljø som en følge av vanninnlekkasje til tunnelene (Bane NOR 2019). I tillegg til dette kravet er det spesifisert mer konkrete innlekkasjekrav for tunnelene, disse er presentert i tabell 3.9. Ved parallelle tunnellop gjelder innlekkasjekravene i tabell 3.9 samlet for alle tunnellopene.

Tabell 3.9: Innlekkasjekrav i Mossetunnelen og Carlbergtunnelen. Hentet fra Bane NOR (2019)

	Strekning	Innlekkasjekrav (pr. 100 m tunnel)
Mossetunnelen	km 56,726-57,570	10 L/min
	km 56,570-57,685	5 L/min
	km 56,685-58,155	10 L/min
	km 58,155-59,030	5 L/min
	Tverrslag/rømningstunnel Verket	10 L/min
	Rømningstunnel Mossehallen inkl. pumpebasseng	5 L/min
	km 60,260-60,595	10 L/min
Carlbergtunnelen	km 60,595-61,980	5 L/min
	km 61,980-62,373	10 L/min
	Parallelle rømningstunnel km 0-65	10 L/min
	Parallelle rømningstunnel km 65-950	5 L/min
	Tverrslag/rømningstunnel Carlberget	10 L/min

Som presentert i tabell 3.9 har tunnelene innlekkasjekrav på enten 5 eller 10 L/min per 100 meter. Kravet på 5 L/min per 100 meter gjelder de strekningene hvor konsekvensene av innlekkasje er størst, som presentert i delkapittel 3.3. For alle de andre strekningene i tunnelene er kravet 10 L/min per 100 meter.

Kravene for innlekkasje spesifiserer også at en stor enkeltlekkasje ikke kan utjevnes ved å se på en strekning lenger enn 100 meter. I tillegg er det et krav om at det må bores kontrollhull etter hver injeksjonsskjerm hvis det er mistanke om at innlekkasjekravene ikke er oppfylt. Dersom innlekkasjen i kontrollhullene overstiger grensene oppgitt i tabell 3.10 må forinjeksjonen utføres på nytt.

Tabell 3.10: Innlekkasjekrav for kontrollhull. Hentet fra Bane NOR (2019)

Innlekkasjekrav per 100 m (L/min)	5	10
Innlekkasje ett kontrollhull (L/min)	0,5	0,9
Samlet innlekkasje alle kontrollhull (L/min)	0,75	1,5

3.4.2 Måling av innlekkasje

For å måle innlekkasjen av vann skal det etableres måleterskler i tunnelene (Bane NOR 2019). Disse måletersklene skal minimum bygges på følgende steder:

- På grensene mellom områder med ulike innlekkasjekrav.
- Ved nordre påhugg i Carlbergtunnelen.
- I enden av hver rømningstunnel/tverrslag.
- På hver side av lavbrekket i Mossetunnelen.

I tillegg skal det ikke være mer enn 400 meter mellom hver måleterskel.

Måletersklene skal bygges slik at alt vannet ledes gjennom et V-overløp, slik at gjennomstrømningen gjennom dette overløpet kan måles. Dette betyr at måletersklene må være tette, og at fundamentet til måletersklene må injiseres hvis det er behov for det. For at driftsvann ikke skal påvirke målingene skal innlekkasjen til tunnelene kun måles etter at det har vært driftstans på anlegget i minst ett døgn.

3.4.3 Utførelse

Før det bores injeksjonsskjerm skal det utarbeides en borplan, og utformingen av injeksjonsskjermen skal tilpasses bergmassen, innlekkasjekravene og geometrien i tunnelen (Bane NOR 2019). Ved lav bergoverdekning skal det også etableres sperreskjermer hvis det er behov for det.

Injeksjonsmassen som benyttes på prosjektet skal være mikroement eller ultrafin sement av Portlandsementtype (Bane NOR 2019). I tillegg skal all sementen tilsettes superplastiserende stoffer for å forhindre utskillelse av vann.

I tillegg er det en rekke krav til hvordan injeksjonen skal utføres for hver enkelt skjerm, blant annet med tanke på strømningshastighet, v/c-tall, montering av kraner, injeksjonsrigg og stoppkriterier. Mange av disse kravene er derimot veldig generelle, med lite avvik

fra det som er vanlige krav til injeksjon i dag. Derfor er det kun noen av disse kravene som er gjengitt i denne oppgaven.

Et av kravene er at injeksjon skal utføres i alle hull, uavhengig av innlekkasje. I tillegg skal injeksjonen alltid starte i sålen på tunnelen, hvis annet ikke er godtatt av Bane NOR. Det er også viktig at injeksjonen utføres slik at det ikke forekommer utgang av injeksjonsmasse til dagen eller i bygninger over tunnelen. Hvis det er fare for utgang skal det være vakter på oversiden av tunnelen.

Injeksjonstrykket må også tilpasses bergoverdekningen. Hvis bergoverdekningen over det høyeste punktet i injeksjonshullet er mellom 3 og 7 meter er makstrykket 15 bar, hvis bergoverdekningen er mellom 7 og 15 meter er makstrykket 30 bar og hvis bergoverdekningen er mer enn 15 meter er makstrykket 60 bar.

4 Metode

4.1 Valg av strekninger

I denne oppgaven er det kun injeksjonen som er utført i Mossetunnelen nord, Mossetunnelen sør og Carlbergtunnelen nord som er analysert. Det betyr at injeksjon som er utført i alt av tverrslags- og rømningstunneler og Carlbergtunnelen sør ikke er analysert. Denne utvelgelsen er gjort for å begrense omfanget av oppgaven. I tillegg er det lettere å analysere injeksjon i hovedtunneler enn i tverrslags- og rømningstunneler, siden geometrien og driveretningen varierer mindre i hovedtunnelene.

Av de tre strekningene Mossetunnelen nord, Mossetunnelen sør og Carlbergtunnelen nord har fokuset i denne oppgaven hovedsakelig vært på Mossetunnelen, spesielt Mossetunnelen sør. Årsaken er at det har vært mest utfordringer med å oppfylle innlekkasjekravene i Mossetunnelen. Av de to delstrekningene i Mossetunnelen er Mossetunnelen sør lengst, og har også hatt større problemer med innlekkasje. Derfor er det fokusert mer på Mossetunnelen sør enn Mossetunnelen nord.

4.2 Innsamling av data

Store deler av denne oppgaven er basert på dokumenter og data fra Bane NOR, og en del av disse dokumentene har Bane NOR igjen fått fra MossIA. Dokumentene kan grovt deles inn i tre ulike kategorier:

- Dokumenter laget i forkant av anbudskonkurransen. Dette er dokumenter som er laget av Bane NOR eller på oppdrag fra Bane NOR. Eksempler på dokumenter i denne kategorien er blant annet ingeniørgeologisk rapport, og kontraktene som stiller krav til entreprenøren.
- Dokumenter laget av entreprenøren før tunneldrivingen startet. Dette er dokumenter som er laget som en del av detaljprosjekteringen av prosjektet. Disse dokumentene er basert på kravene og informasjonen som finnes i dokumentene Bane NOR lagde før kontraktinngåelse, men det er også en del ny informasjon i dokumentene.
- Dokumenter fra driving av tunnelen. Disse dokumentene inneholder data fra drivingen av tunnelen, og er laget av entreprenøren. Eksempler på dokumenter i denne kategorien er injeksjonsprosedyrer, injeksjonsrapporter og ingeniørgeologisk kartlegging.

I tillegg til data innhentet fra Bane NOR er det utført noe egen kartlegging. Områdene som befinner seg over tunnelene er kartlagt for å kunne si noe om potensialet og konsekvensene av setninger i området, og dermed også behovet for injeksjon. En slik kartlegging gjør det også lettere å koble tegningene over tunnelene med hvordan traseen ser ut i virkeligheten. I tillegg til kartlegging av overflaten er de to tunnelene besøkt flere ganger, hvor formålet var å se hvordan tunnelene drives og injiseres, samtidig som det også gjør det lettere å koble tegninger og beskrivelser med de virkelige tunnelene.

4.3 Samtaler

Under arbeidet med masteroppgaven har oppgaven blitt diskutert med en rekke ulike personer, blant annet fagarbeiderne som jobber med injeksjon i tunnelene og kontrollingeniørene til Bane NOR. Disse samtalene har gitt verdifull informasjon om hva som har blitt gjort og hva som har vært utfordrende i prosjektet, samt gode innspill til hva denne oppgaven burde fokusere på.

I tillegg er det gjort et intervju med Knut Garshol, fordi han har vært inne som rådgiver for MossIA på prosjektet. Som rådgiver har Garshol vært med på å utforme injeksjonsprosedyrene i prosjekter, og målet med intervjuet var derfor å få et bedre innblikk i filosofien bak disse injeksjonsprosedyrene, og høre hans tanker om prosjektet.

4.4 Bearbeiding av data

Denne oppgaven er basert på store mengder med data, noe som har gjort det nødvendig å bruke automatiserte metoder for å analysere og presentere dataene. De to verktøyene som har vært brukt til dette er Excel og Python. Excel har for det meste blitt brukt til plotting av grafer, sortering og filtrering av tabeller og konvertering av pdf-filer til csv-filer. Bruken av Python har vært mer omfattende, og følgende oppgaver er blant annet utført i Python:

- Sammenstilling og filtrering av data fra nesten alle injeksjonsrapportene. Konvertering fra pdf-filer til csv-filer.
- Plotting av grafer som viser utført injeksjon.
- Undersøke sammenhenger mellom ulike injeksjonsparametre.

I Python har bibliotekene *os*, *Numpy*, *csv* og *Matplotlib* blitt brukt for å behandle og analysere data.

4.4.1 Fordeling på løpemeter

For å kunne sammenligne utført injeksjon med andre tunneler og innad i tunnelen er det laget grafer som viser antall bormeter, forbruket av mikrosegment og netto pumpetid per løpemeter tunnel. Disse grafene er laget i Python, og fremgangsmåten har vært som følger:

1. Først er tunnelene delt opp i delstrekningene Mossetunnelen nord, Mossetunnelen sør og Carlbergtunnelen nord.
2. For hver delstrekning er det laget en liste som inneholder pelnumrene som befinner seg på den delstrekningen. Listen for Mossetunnelen nord, Mossetunnelen sør og Carlbergtunnelen nord går henholdsvis fra pelnummer 57,470 til 56,748, 57,490 til 58,784 og 62,065 til 60,309.

3. For hver delstrekning brukes en for-loop til å iterere gjennom listen som inneholder alle pelnumrene, slik at hver iterasjon gir et spesifikt pelnummer.
4. For hver iterasjon finner programmet alle injeksjonsskjermene som befinner seg 25 meter eller mindre bak det gitte pelnummeret.
5. Deretter summeres antall bormeter/forbruket av injeksjonsmasse/netto pumpetid for alle injeksjonsskjermene som er funnet i steg 4.
6. Summen fra steg 5 deles på 25, for å finne verdien per løpemeter tunnel.

Årsaken til at det brukes 25 meter som lengde i denne metoden er at 25 meter er en vanlig lengde på injeksjonsskjermer.

Det som er verdt å merke seg med denne metoden er at hva som er bakover i tunnelen avhenger av hvilken delstrekning som studeres, siden de ulike delstrekningene drives i forskjellige retninger. For Mossetunnelen Sør vil bakover være alle injeksjonsskjermene som befinner seg nord for stoffen, og derfor vil injeksjonsskjermene ha lavere pelnummer enn stoffen. For Mossetunnelen nord vil derimot bakover være injeksjonsskjermene sør for stoffen, og dermed vil injeksjonsskjermene som befinner seg bakover ha høyere pelnummer enn stoffen.

Denne metoden tar heller ikke hensyn til tverrsnittet av tunnelene. Generelt vil mengden injeksjon som kreves øke med økende tverrsnitt, derfor kan tverrsnittet påvirke resultatet av denne metoden. I Mossetunnelen er det lite variasjon i tverrsnittet, derfor vil denne metoden fungere bra. I Carlbergtunnelen er det derimot mer variasjon i tverrsnittet, og dette må tas hensyn til når resultatene fra denne metoden tolkes.

4.4.2 Forbruk av injeksjonsmasse i persentiler

For å kunne si noe om hvordan forbruket av injeksjonsmasse fordeler seg på injeksjonshullene har forbruket blitt delt opp i persentiler. Dette er gjort for hver delstrekning, og fremgangsmåten er som følger:

1. Først er det totale forbruket av injeksjonsmasse langs hele delstrekningen funnet ved å summere forbruket i alle injeksjonshullene.
2. Deretter er alle injeksjonshullene sortert etter forbruk av injeksjonsmasse, i stigende rekkefølge.
3. Ut ifra listen i forrige punkt lages det en liste over det kumulative forbruket av injeksjonsmasse.
4. Deretter deles listen i forrige punkt på det totale forbruket av injeksjonsmasse, for å finne andelen av det totale forbruket.
5. Til slutt plottes andel av det totale forbruket mot andelen av alle injeksjonshullene.

4.5 Bergoverdekning og Q-Verdi

Både bergoverdekning og Q-verdi kan påvirke resultatene og hvilken fremgangsmåte som bør brukes ved injeksjon. Derfor er disse to parametrene presentert for både Mossetunnelen og Carlbergtunnelen.

Tallene for bergoverdekning er hentet fra plantegningene MossIA har laget som en del av detaljprosjekteringen av prosjektet. I disse plantegningene er bergoverdekningene oppgitt for hvert tjuende pelnummer, og dette er derfor også brukt som avstand i grafen over bergoverdekning.

Q-verdien er hentet fra den ingeniørgeologiske kartleggingen som er utført i tunnelene. Den ingeniørgeologiske kartleggingen er utført i etterkant av hver salve, derfor er ikke avstanden mellom hver måling konstant. Den mest brukte salvelengden i prosjektet er derimot fem meter, derfor er dette også den vanligste avstanden mellom Q-målingene.

4.6 Pearsons korrelasjonskoeffisient

For noen av grafene kan det være vanskelig å se hvorvidt det er en sammenheng mellom to parametre. Derfor er Pearsons korrelasjonskoeffisient brukt for å undersøke sammenhengene mellom noen av parametrene i denne oppgaven.

Formelen for Pearsons korrelasjonskoeffisient er oppgitt i ligning 4.1 (Wang 2013). I denne ligningen er PCC Pearsons korrelasjonskoeffisient, $Cov(X, Y)$ kovariansen mellom X og Y , σ_X standardavviket til X og σ_Y standardavviket til Y .

$$PCC = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (4.1)$$

Pearsons korrelasjonskoeffisient vil alltid være et tall mellom -1 og 1. Hvis Pearsons korrelasjonskoeffisient er 1 er det perfekt positiv sammenheng mellom de to parametrene, hvis koeffisienten er -1 er det perfekt negativ sammenheng mellom de to parametrene.

For geologiske parametre mener Holmøy (2008) at en Pearsons korrelasjonskoeffisient på mellom 0 og $|0,2|$ ikke indikerer noen sammenheng mellom parametrene, en koeffisient mellom $|0,2|$ og $|0,3|$ indikerer liten til middels sammenheng, mens en koeffisient på $|0,3|$ eller høyere indikerer en sammenheng.

For å beregne Pearsons korrelasjonskoeffisient er funksjonen `corrcoef` i *Numpy* brukt (*Numpy API reference* 2023).

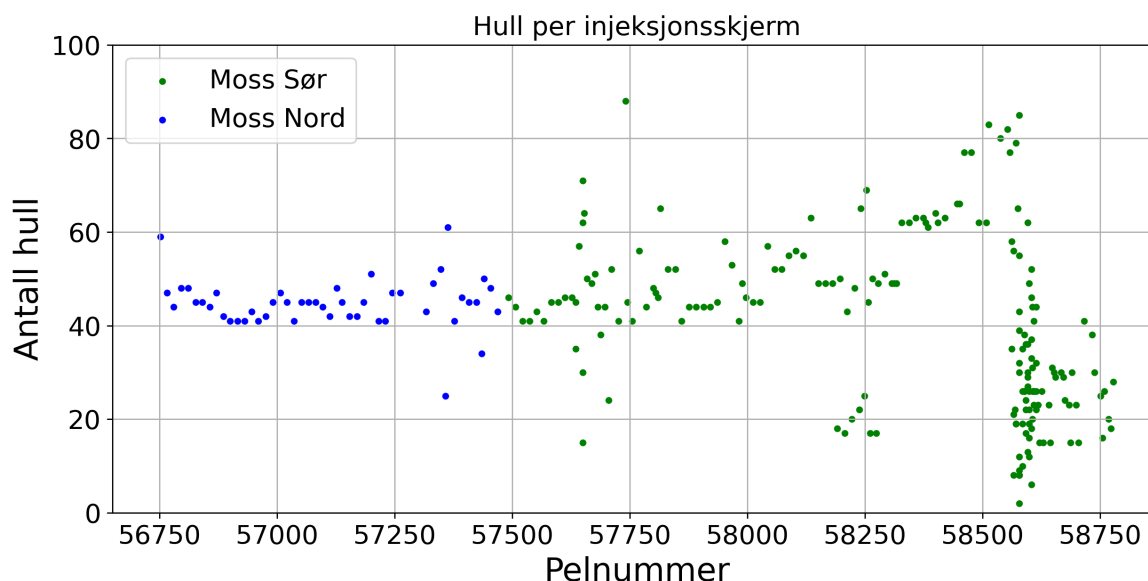
5 Resultater

5.1 Mossetunnelen

Som beskrevet i kapittel 4 er det i denne oppgaven valgt å fokusere på Mossetunnelen nord, Mossetunnelen sør og Carlberg-tunnelen nord. Siden Mossetunnelen sør og nord er to stuffer i samme tunnel er resultatene fra disse to delstrekningene samlet, og presenteres her. Dataene som presenteres for Mossetunnelen nord stammer fra 50 injeksjonsskjermer med totalt 2269 injeksjonshull. For Mossetunnelen sør er tilsvarende tall 194 injeksjonsskjermer, med totalt 8777 injeksjonshull. Dermed er det totale antallet for hele Mossetunnelen 244 injeksjonsskjermer, med til sammen 11 046 injeksjonshull. I realiteten er det både flere injeksjonsskjermer og flere injeksjonshull i Mossetunnelen, men det er ikke alle injeksjonsskjermer eller injeksjonshull som har blitt inkludert i datagrunnlaget for denne oppgaven.

Mossetunnelen sør og nord har begge blitt drevet fra tverrslaget ved Verket, men i ulike retninger. Akkurat der tverrslagstunnelen møter hovedtunnelen, cirka ved pelnummer 57,500 er det derfor ikke data fra noen av stoffene.

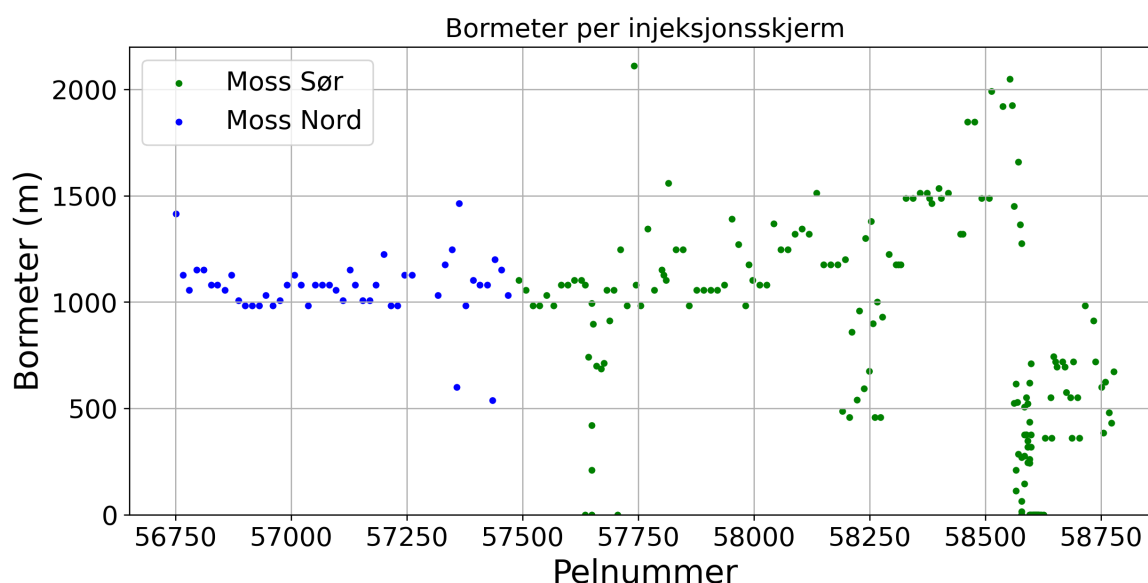
5.1.1 Utført injeksjon



Figur 5.1: Antall hull per injeksjonsskjem i Mossetunnelen

I figur 5.1 er det presentert en oversikt over alle injeksjonsskjemene i Mossetunnelen, og antall hull i hver injeksjonsskjem. Hver prikk i grafen representerer en injeksjonsskjem. Fra pelnummer 56,750 til 58,250 er det lite variasjon i antall hull per injeksjonsskjem, de fleste av injeksjonsskjemene har mellom 40 og 60 hull. Et unntak fra dette er sonen mellom pelnummer 57,500 og 57,750, der er det en del injeksjonsskjermer som har enten færre enn 40 eller flere enn 60 hull.

Fra pelnummer 58,250 til pelnummer 58,750 er det derimot stor variasjon i antall hull per injeksjonsskjerm. På det meste er det er over 80 injeksjonshull på en injeksjonsskjerm, noe som er nesten dobbelt av det som har vært vanlig i resten av tunnelen. På den andre siden er det noen injeksjonsskjermer som har få injeksjonshull, noen av skjermene har under 10 injeksjonshull. I dette området er det også langt tettere mellom injeksjonsskjernene enn det er i resten av tunnelen.

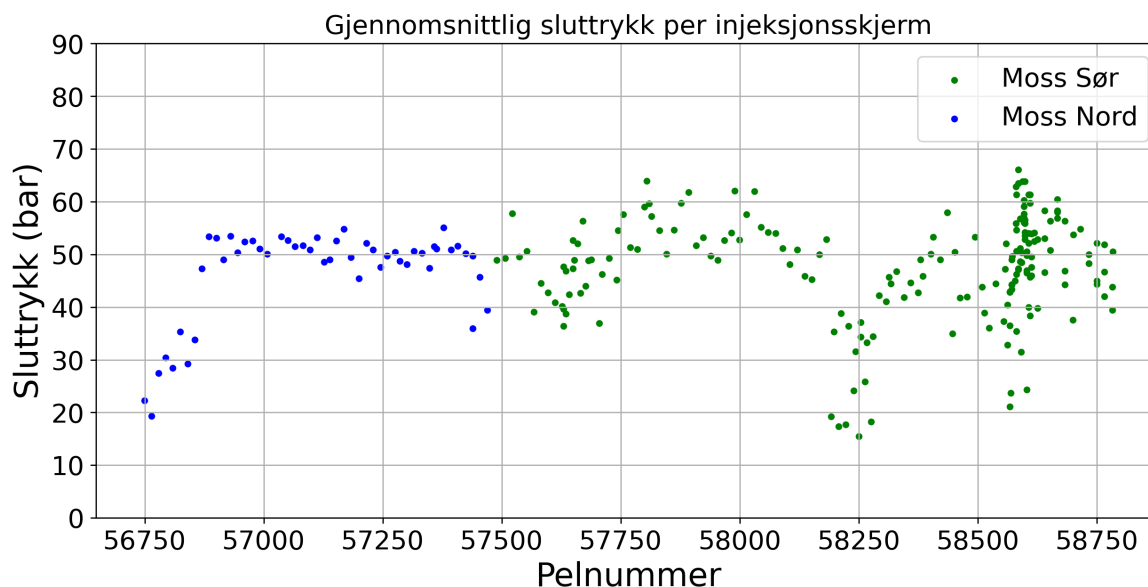


Figur 5.2: Bormeter per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen

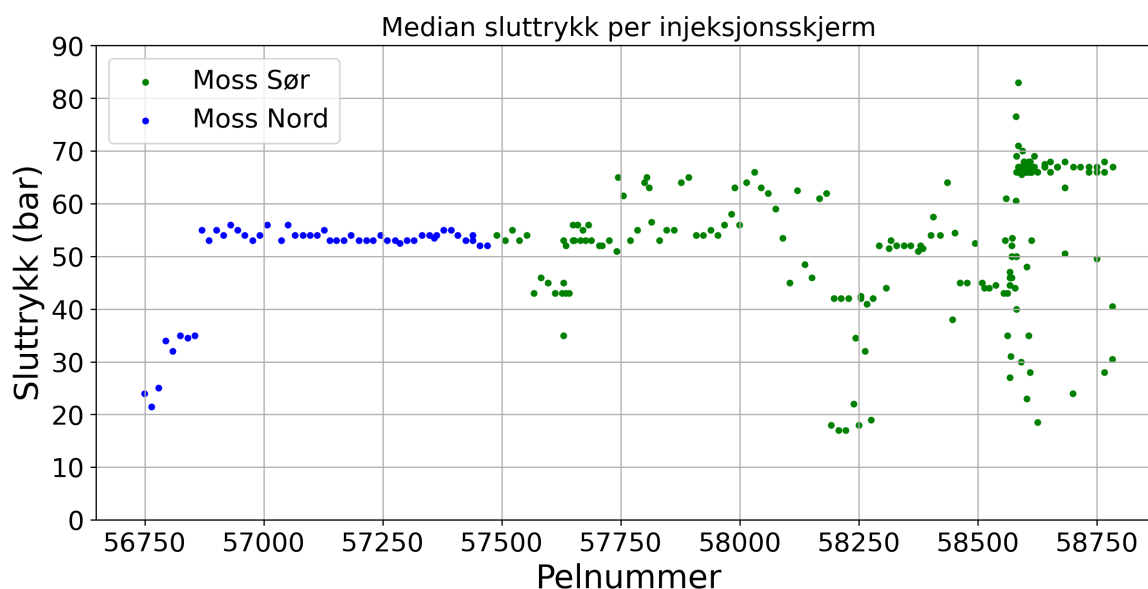
I figur 5.2 er antall bormeter per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen presentert. Denne figuren er nokså lik figur 5.1, noe som er naturlig siden det er lite variasjon i hullengden i Mossetunnelen. Dermed vil bormeter, som beregnes ved å multiplisere antall hull med hullengden, følge antall hull nokså tett.

I sonen mellom pelnummer 57,500 og 57,750 er det derimot litt forskjeller mellom de to figurene. I figur 5.2 er det noen injeksjonsskjermer hvor antall bormeter er lavt, samtidig som figur 5.1 viser at nesten alle skjermene langs strekningen har over 20 hull. Dette betyr at for noen av skjermene på strekningen 57,500-57,750 er det boret korte hull.

I tillegg er det noen forskjeller i de to figurene mellom pelnummer 58,500 og 58,750. I figur 5.1 er injeksjonsskjernene ganske jevnt spredt utover med tanke på antall hull. I figur 5.2 er de fleste injeksjonsskjernene samlet nederst i figuren, noen injeksjonsskjermer er i den øverste halvdel av figuren, men det er få injeksjonsskjermer rundt midten av figuren. Dette skyldes at det også i dette området er boret injeksjonsskjermer med kortere injeksjonshull enn i resten av tunnelen.



Figur 5.3: Gjennomsnittlig sluttrykk per injeksjonsskjem i Mossetunnelen



Figur 5.4: Median sluttrykk per injeksjonsskjem i Mossetunnelen

I figur 5.3 og 5.4 er sluttrykket for hver injeksjonsskjem i Mossetunnelen presentert. Sluttrykket er trykket det pumpes med i det injeksjonen avsluttes. I utgangspunktet er sluttrykket ikke oppgitt for hver injeksjonsskjem, men for hvert injeksjonshull. Siden det er lite hensiktsmessig å presentere sluttrykket i hvert eneste injeksjonshull er alle injeksjonshullene på en skjerm samlet, deretter er gjennomsnitt og median for sluttrykket per injeksjonsskjem regnet ut.

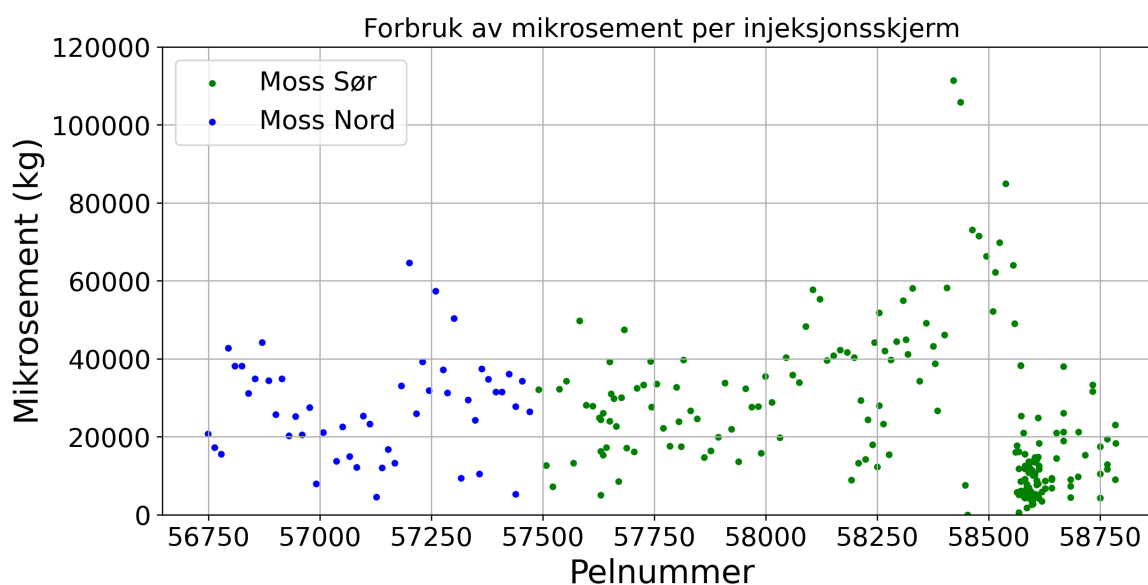
Hvis figur 5.3 sammenlignes med 5.4 er det tydelig at det er større variasjoner i gjennomsnittlig sluttrykk sammenlignet med median sluttrykk. Langs strekningen 56,875-57,500

er median sluttrykk rett i nærheten av 55 bar, mens det er større variasjoner i gjennomsnittlig sluttrykk.

I de to figurene er det tydelig at sluttrykket har blitt redusert i nærheten av portalen nord i Mossetunnelen, som ligger cirka ved pelnummer 56,750. I tillegg er sonen hvor tunnelen krysser Mosseelva, cirka fra pelnummer 57,550 til 56,700, lett å se. I denne sonen har sluttrykket blitt redusert for å minske risikoen for utgang til dagen, og det er mulig å se på grafene.

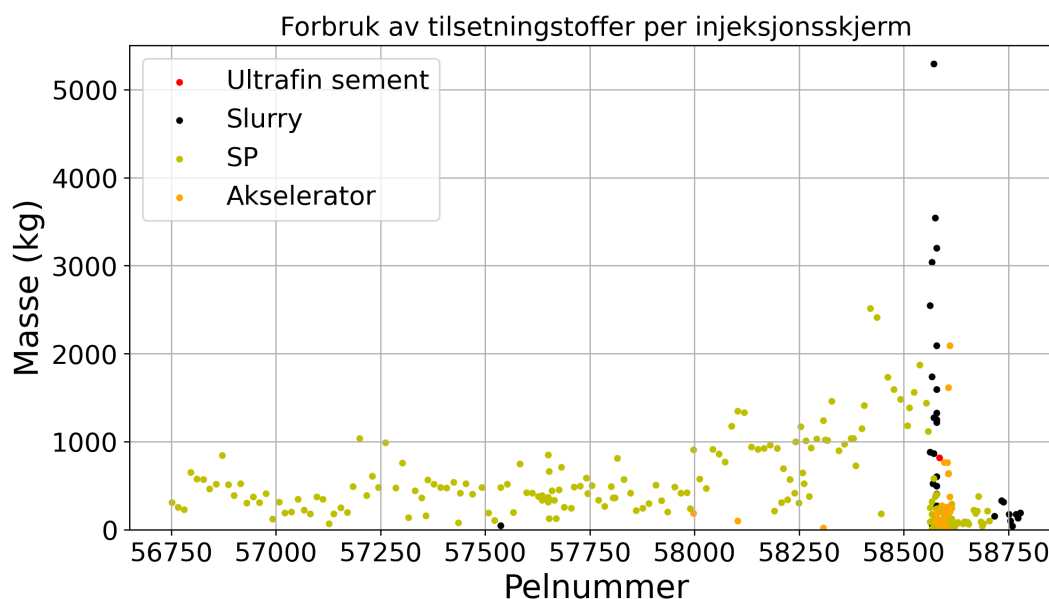
Etter pelnummer 57,750 er det større variasjon i sluttrykket, både med tanke på gjennomsnitt og median, men de fleste skjermene har fortsatt sluttrykk på cirka 55 bar. Fra pelnummer 58,125 til 58,375 er det derimot en sone hvor sluttrykket har blitt redusert, og her er sluttrykket nede under 20 bar for noen av skjermene.

Fra pelnummer 57,500 er det som vist i figur 5.3 og 5.4 utført mange injeksjonsskjermer, med stor variasjon i sluttrykket. Men ut ifra figur 5.4 ser det ut til at injeksjonstrykket for en del av skjermene har vært økt til nesten 70 bar. Denne endringen kommer ikke like tydelig frem i figur 5.3, noe som tyder på at det er en del variasjon i sluttrykket mellom injeksjonshullene i samme injeksjonsskjerm.



Figur 5.5: Forbruk av mikrosement per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen

I figur 5.5 er forbruket av mikrosement for hver injeksjonsskjerm i Mossetunnelen presentert. Som vist i figuren er det en del variasjon i forbruket av mikrosement, men i de fleste skjermene ligger forbruket av mikrosement mellom 10 og 40 tonn. Fra pelnummer 58,250 og utover er det derimot en del skjermene hvor forbruket av mikrosement er over 40 tonn, for to av skjermene er forbruket over 100 tonn med mikrosement.

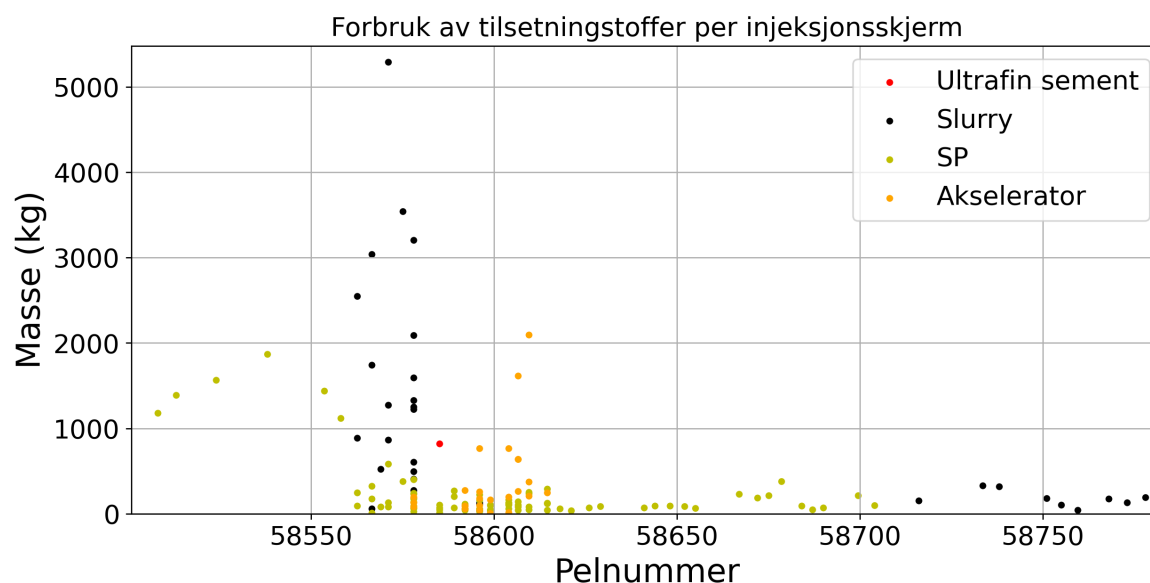


Figur 5.6: Forbruk av tilsetningsstoffer per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen

I Mossetunnelen er det i tillegg til mikrosement brukt fire ulike tilsetningsstoffer i injeksjonen. Forbruket av disse tilsetningsstoffene for hver injeksjonsskjerm er presentert i figur 5.6. I denne figuren er det kun skjermene hvor det er brukt tilsetningsstoffer plottet, dermed er ikke alle skjermene med i figuren.

Ut ifra figur 5.6 ser man at langs strekningen fra pelnummer 56,750 til 58,250 er det nesten kun brukt superplastiserende stoff som tilsetningstoff, og forbruket er under 1000 kg i nesten alle skjermene. I de fleste skjermene ligger forbruket av superplastiserende stoff rundt 500 kg. Fra pelnummer 58,250 til 58,500 øker derimot forbruket av superplastiserende stoff, sammenlignet med resten av Mossetunnelen, her ligger forbruket av superplastiserende stoff rundt 1000 kg for de fleste skjermene.

Fra pelnummer 58,500 til 58,800 blir det mer komplisert, her er det brukt flere ulike typer tilsetningsstoffer, samtidig som forbruket av tilsetningsstoffer øker. Derfor er grafen for denne strekningen forstørret, og presentert i figur 5.7.

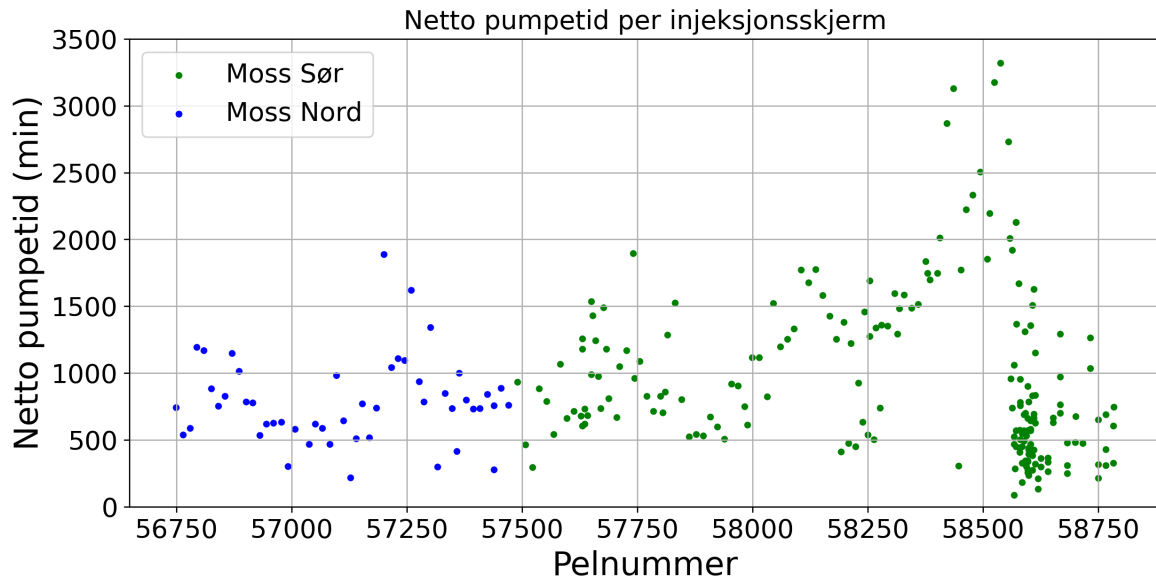


Figur 5.7: Forbruk av tilsetningsstoffer per injeksjonsskjerm for pelnummer 58,500-58,800 i Mossetunnelen

Som vist i figur 5.7 er det fra pelnummer 58,500 til 58,800 brukt ultrafin sement, slurry, superplastiserende stoff og akselerator som tilsetningsstoffer under injeksjon. Spesielt strekningen mellom pelnummer 58,550 og 58,600 skiller seg ut fra resten av tunnelen, her er det brukt opp mot 5000 kg med slurry per injeksjonsskjerm. I tillegg til denne strekningen er det brukt litt slurry på strekningen 58,700-58,800, men her er forbruket nede i under 500 kg per skjerm.

Forbruket av superplastiserende stoffer er nokså likt som resten av Mossetunnelen, i de fleste skjermene er forbruket under 1000 kg. Unntaket fra dette er strekningen 58,500-58,550, men som vist i figur 5.6 økte forbruket av superplastiserende stoffer allerede ved pelnummer 58,250, dermed følger strekningen fra pelnummer 58,500 til 58,550 mønsteret fra strekningen i forkant.

Når det gjelder akselerator er dette brukt i en del skjermene mellom pelnummer 58,550 og 58,650, men i de fleste av skjermene er forbruket under 1000 kg. I tillegg til akselerator er det brukt ultrafin sement som tilsetningsstoff på en skjerm i langs denne strekningen, cirka ved pelnummer 58,580. Dette er dog den eneste skjermen hvor det er brukt ultrafin sement.



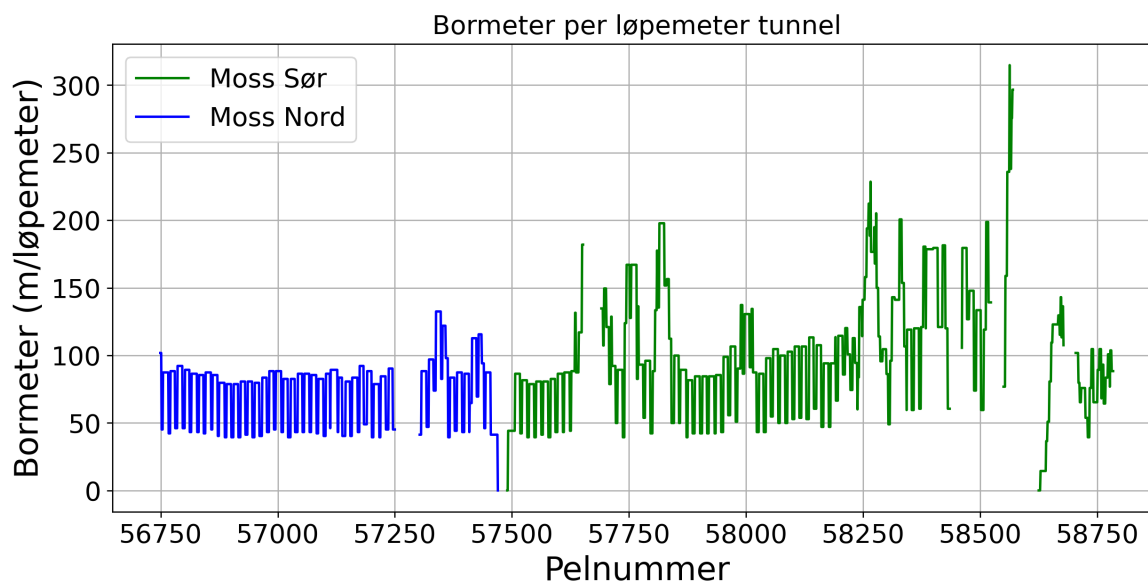
Figur 5.8: Netto pumpetid per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen

I figur 5.8 er netto pumpetid per injeksjonsskjerm i Mossetunnelen presentert. Netto pumpetid er definert som tiden mellom starten av injeksjon og slutten av injeksjon, minus eventuell pausetid til blant annet vasking av pumpene, skifte av injeksjonsmasse og lignende. Dermed er netto pumpetid et mål på hvor mange minutter som har blitt brukt til pumping av injeksjonsmasse.

Som vist i figuren følger netto pumpetid også den samme trenden som forbruket av mikrosegment. Fra pelnummer 56,750 til 58,000 er netto pumpetid per skjerm som oftest mellom 500 og 1500 minutter, og trenden er nokså flat. Etter pelnummer 58,000 øker derimot netto pumpetid, og de fleste skjermene ligger nå rundt 1500 minutter i netto pumpetid.

Fra pelnummer 58,250-58,650 er netto pumpetid per skjerm enda høyere, her ligger de fleste skjermene over 1500 minutter i netto pumpetid. Etter pel 58,580 øker tettheten av skjermene, samtidig som netto pumpetid per skjerm minsker. Fra pelnummer 58,580 til 58,800 er netto pumpetid for de fleste skjermene mellom 0 og 1500 minutter, med tyngdepunktet rundt 500 minutter.

I figurene som foreløpig er presentert er boring, injeksjonsmasse og tidsbruk oppgitt per injeksjonsskjerm. Ut ifra figurene er det derimot tydelig at avstanden mellom hver injeksjonsskjerm ikke er konstant, dermed er det vanskelig å bruke disse figurene til å sammenligne forbruket i ulike deler av Mossetunnelen. For å kunne sammenligne ulike strekninger i Mossetunnelen er det derfor bormeter, forbruket av mikrosegment og netto pumpetid beregnet per løpemeter tunnel. Fremgangsmåten for dette er beskrevet i delkapittel 4.4.1.

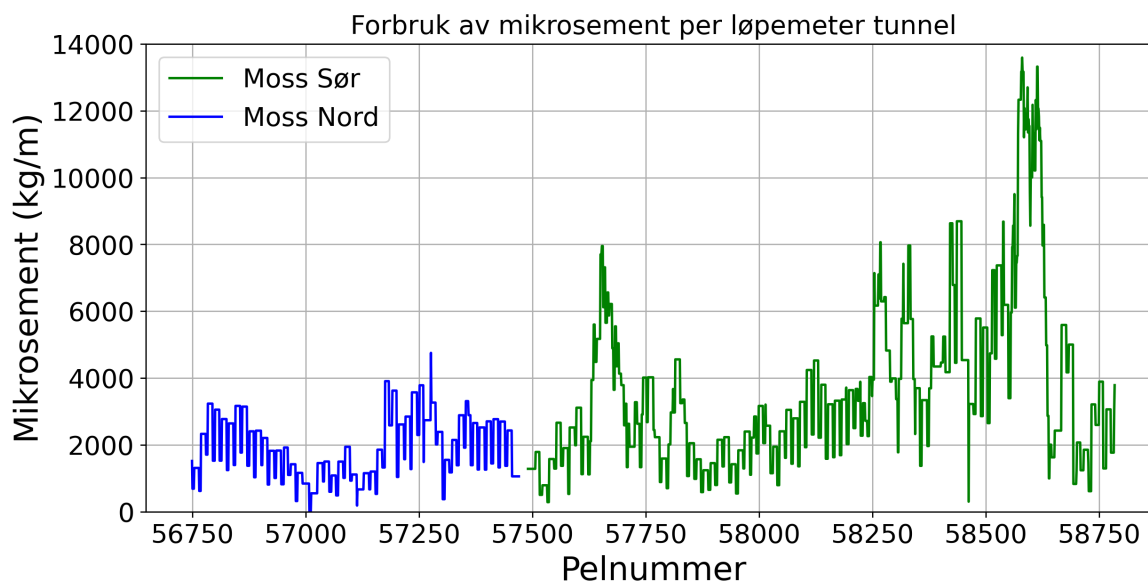


Figur 5.9: Bormeter per løpemetertunnel for Mossetunnelen

I figur 5.9 er bormeter per løpemetert i Mossetunnelen presentert. Den regelmessige fluktuationen i grafen skyldes overlapp mellom injeksjonsskjermer. Siden hver injeksjonsskerm overlapper noen meter med neste skjerm, vil bormeter per løpemetert være høyere der hvor skjermene overlapper. Dermed vil antall bormeter per løpemetert svinge, avhengig av om det er en strekning med overlapp mellom skjermene eller ikke.

Som vist i figuren er det lite variasjon i bormeter per løpemetert i Mossetunnelen nord. Rundt pelnummer 57,500 er det en dupp i grafen for både Mossetunnelen nord og sør, dette skyldes at drivingen av de to stoffene startet herfra. I Mossetunnelen sør er bormeter per løpemetert nokså likt som i Mossetunnelen nord, inntil pelnummer 57,625. Cirka fra pelnummer 57,625 til 57,875 er det en strekning hvor bormeter per løpemetert øker, og er oppe i 150 til 200 bormeter per løpemetert. Etter dette er det igjen en strekning hvor antall bormeter ligger rundt 50-100 meter per løpemetert, og denne strekningen varer helt til pelnummer 58,250.

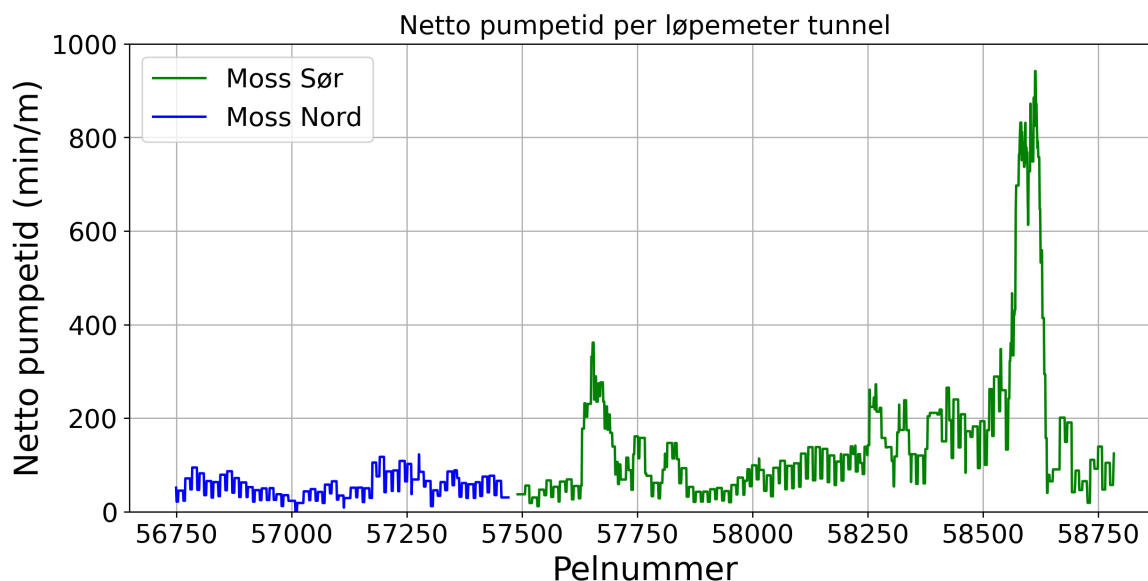
Fra pelnummer 58,250 til pelnummer 58,600 ligger antall bormeter per løpemetert høyere enn for resten av Mossetunnelen, og er på det meste oppe i 300 bormeter. Deretter er det en liten strekning av tunnelen hvor det mangler data over bormeter, derfor er ikke grafen plottet for dette området. Fra pelnummer 58,700 er derimot antall bormeter tilbake igjen til det normale for Mossetunnelen, rundt 50 til 100 bormeter per løpemetert.



Figur 5.10: Forbruk av mikrosement per løpemeter tunnel for Mossetunnelen

Forbruket av mikrosement per løpemeter tunnel er presentert i figur 5.10. Som vist i figuren ligger forbruket av mikrosement i Mossetunnelen rundt 1000 til 4000 kg per løpemeter, med unntak av to strekninger. Den ene av disse strekningene er strekningen mellom pelnummer 57,625 og 57,750, hvor forbruket av mikrosement per løpemeter er høyere enn i resten av Mossetunnelen. Langs denne strekningen er maksimalt forbruk av mikrosement 8000 kg/m, samtidig som forbruket er høyere enn 4000 kg/m for store deler av strekningen.

Den andre strekningen befinner seg mellom pelnummer 58,250 og 58,700. I denne sonen er forbruket av mikrosement stort sett høyere enn 4000 kg/m, og er på det meste oppe i over 12 000 kg/m. Som vist på grafen er det også store variasjoner i forbruket av mikrosement langs denne strekningen, på det minste er forbruket av mikrosement nede i under 1000 kg/m. Hvis området i forkant av denne strekningen studeres er det mulig å se en liten økning i forbruket av mikrosement fra pelnummer 58,000 til 58,250, men sammenlignet med forbruket fra pelnummer 58,250-58,700 er denne økningen liten.



Figur 5.11: Netto pumpetid per løpemeter tunnel for Mossetunnelen

I figur 5.11 er netto pumpetid per løpemeter tunnel presentert. Grafen for netto pumpetid per løpemeter ligner grafen over forbruket av mikrosement per løpemeter, presentert i figur 5.10. For store deler av Mossetunnelen er netto pumpetid mellom 20 og 100 minutter per løpemeter, med unntak av de to samme strekningene som for forbruket av mikrosement.

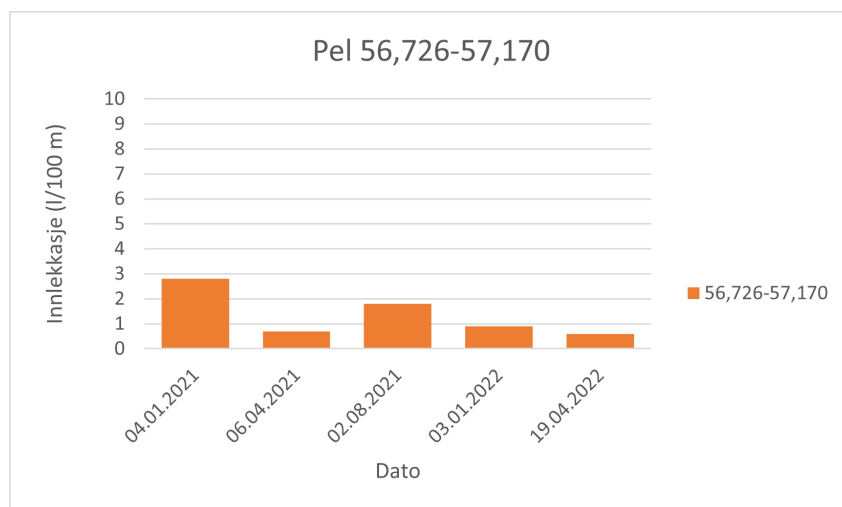
Langs den første strekningen, fra pelnummer 57,625-57,750, er netto pumpetid per løpemeter stort sett over 100 minutter, og er på det meste oppe i 360 minutter.

Fra pelnummer 58,250 til 58,700 ligger netto pumpetid stort sett rundt 100 til 200 minutter per meter, med en topp på cirka 950 minutter per meter rundt pelnummer 58,600. Tilsvarende som for forbruket av mikrosement per løpemeter er det mulig å se en økning i netto pumpetid per meter allerede fra pelnummer 58,000, men økningen langs strekningen 58,000 til 58,250 er mindre enn økningen langs strekningen 58,250 til 58,700.

5.1.2 Innlekkasje

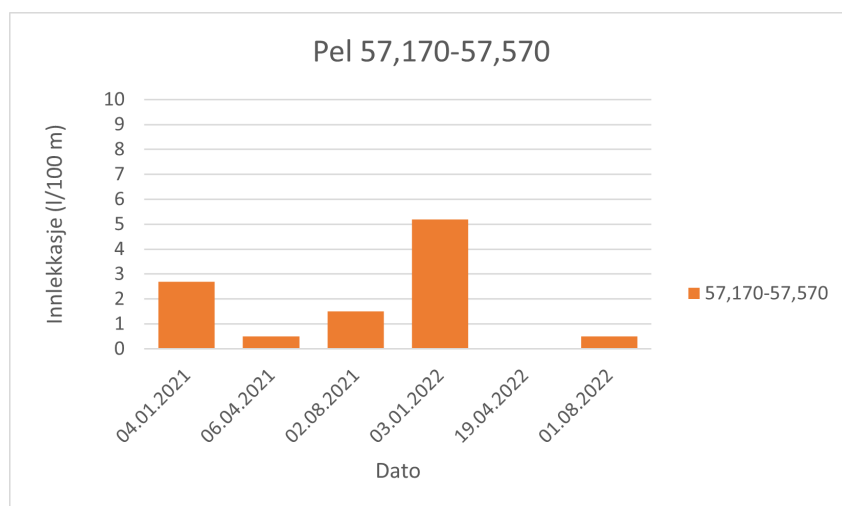
Som beskrevet i delkapittel 3.4.2 er det etablert terskler for å måle innlekkasjen av vann til Mossetunnelen. Resultatet fra disse terskelmålingene blir presentert her. Merk at disse tersklene blir etablert mens tunnelen enda drives, derfor vil en del av terskelmålingene måle innlekkasjen langs andre strekninger enn det som er oppgitt. Noen ganger skyldes dette at tersklene blir bygget før tunnelstussen har blitt drevet helt frem til enden av strekningen som skal måles, og da blir den målte strekningen kortere enn den oppgitte strekningen. Andre ganger skyldes dette at tunnelstussen drives videre, før neste terskel i tunnelen bygges. Dermed vil den målte innlekkasjen gjelde en lengre strekning enn det som er oppgitt. Siden innlekkasjen uansett deles på antall meter vil ikke dette ha stor

innvirkning på resultatet, med unntak av hvis det er store variasjoner i innlekkasje langs strekningen som måles.



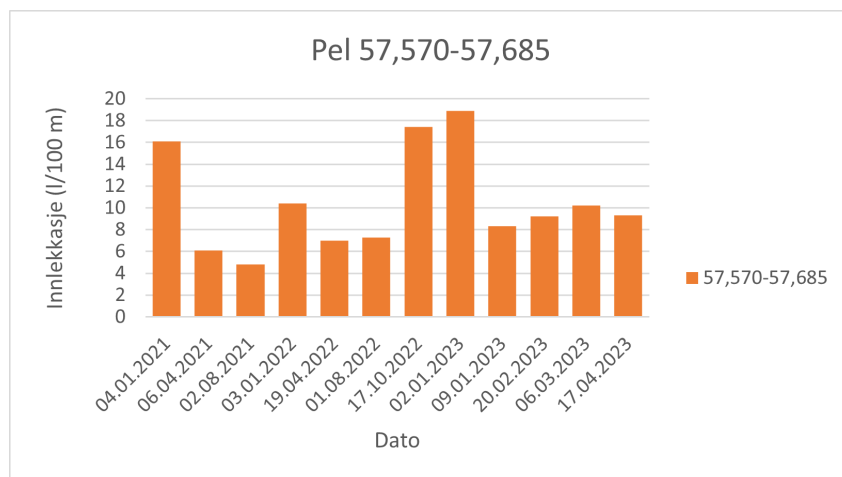
Figur 5.12: Innlekkasjemålinger for pel 56,726-57,170

I figur 5.12 er den målte innlekkasjen langs strekningen fra pelnummer 56,726-57,170 presentert. Langs denne strekningen er kravet til innlekkasje 10 L/min per 100 meter. Som vist i figuren befinner den målte innlekkasjen seg godt under dette kravet.



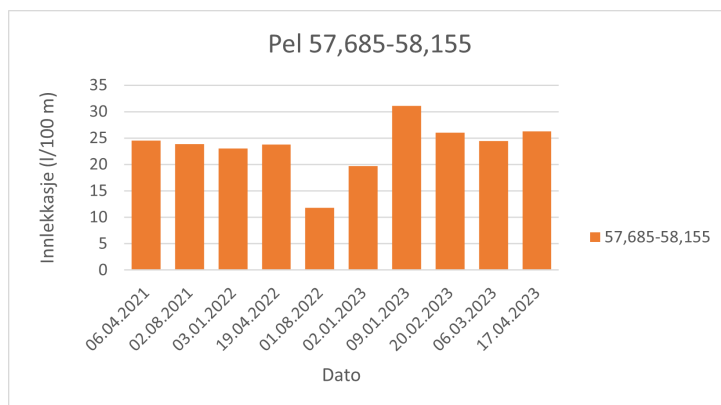
Figur 5.13: Innlekkasjemålinger for pel 57,170-57,570

I figur 5.13 er den målte innlekkasjen langs strekningen fra pelnummer 57,170-57,570 presentert. Langs denne strekningen er kravet til innlekkasje 10 L/min per 100 meter, og som vist i figuren er innlekkasjekravet oppfylt for denne strekningen.

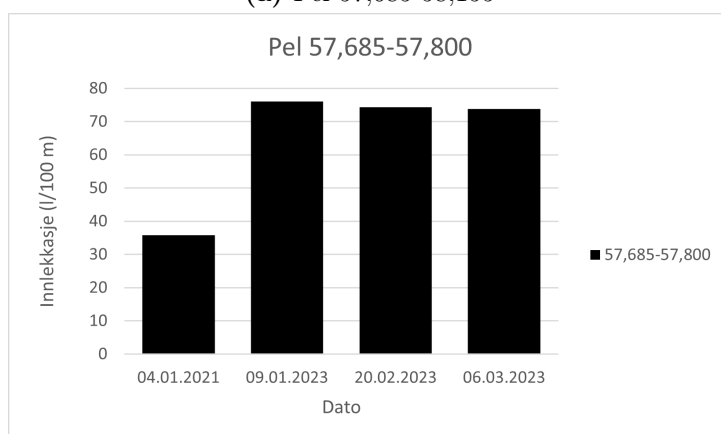


Figur 5.14: Innlekkasjemålinger for pel 57,570-57,685

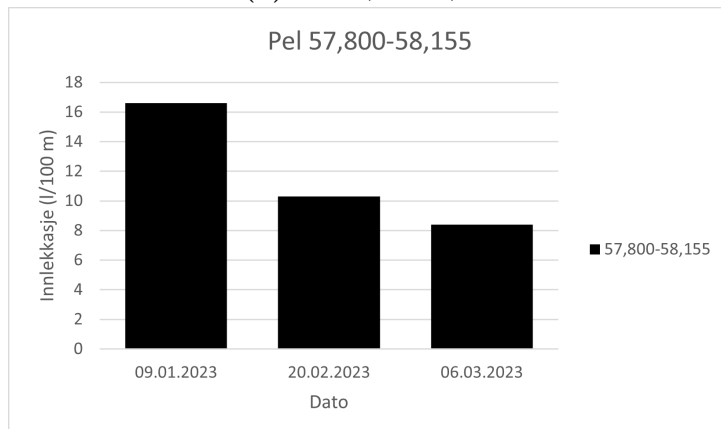
I figur 5.14 er den målte innlekkasjen langs strekningen fra pelnummer 57,570-57,685 presentert. Her er det flere målinger enn i terskelmålingene som er presentert til nå. En av årsakene til at det er flere målinger er at det kun er en av målingene som ligger under innlekkasjekravet på 5 L/min per 100 meter. Ved målingen 2. januar 2023, som er den høyeste målingen, rant terskelen på pelnummer 57,570 over. Derfor er denne målingen av innlekkasje ikke representativ, siden tilførselen av vann fra terskelen ved 57,750 fører til at den målte innlekkasjen blir høyere enn den reelle innlekkasjen.



(a) Pel 57,685-58,155



(b) Pel 57,685-57,800

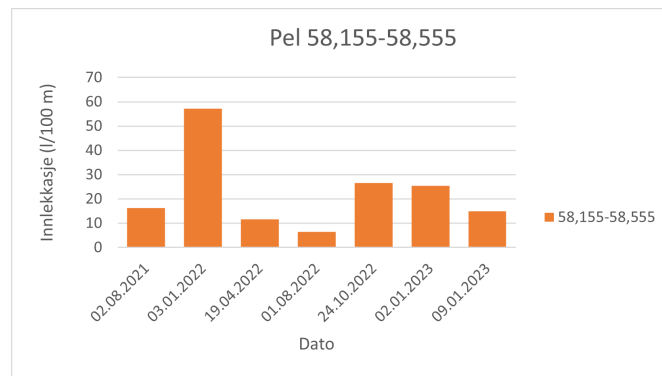


(c) Pel 57,800-58,155

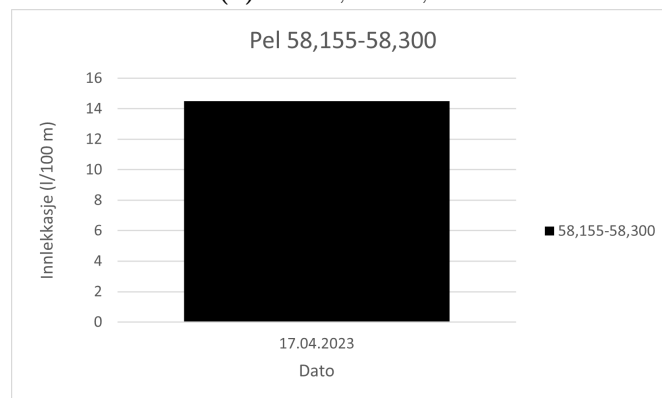
Figur 5.15: Innlekkasjemålinger for pel 57,685-58,155. Denne strekningen er i tillegg delt opp i to delstrekninger

I figur 5.15 er innlekkasjen for pelnummer 57,685 til 58,155 presentert. Som vist i figuren har MossIA valgt å dele denne strekningen opp i to delstrekninger, ved å etablere en ekstra terskel. Langs hele denne strekningen er kravet til innlekkasje 10 L/min per 100 meter. Som vist i figur 5.15a er det ingen målinger som tilfredsstiller dette kravet hvis hele strekningen måles samlet. Ved å sammenligne figur 5.15b og 5.15c ser man derimot at det er store variasjoner i innlekkasje langs denne strekningen. Som vist i figur 5.15b er

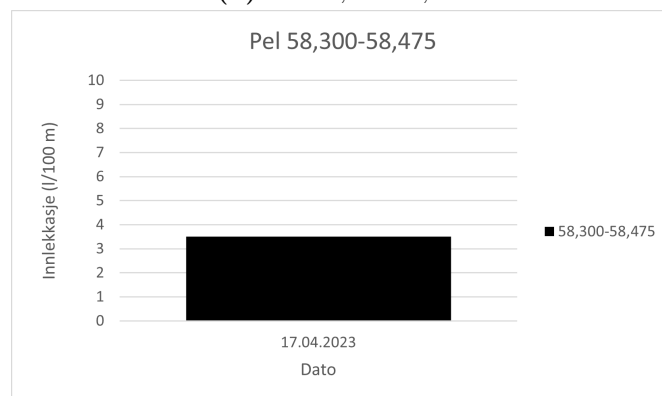
innlekkasjen fra pelnummer 57,685-57,800 nesten 70 L/min for samtlige målinger. Langs delstrekningen 57,800-58,155 er derimot innlekkasjen mellom 8 og 16 L/min. Dette tyder på at det er den første delstrekningen som skaper innlekkasjeproblemene for hele strekningen.



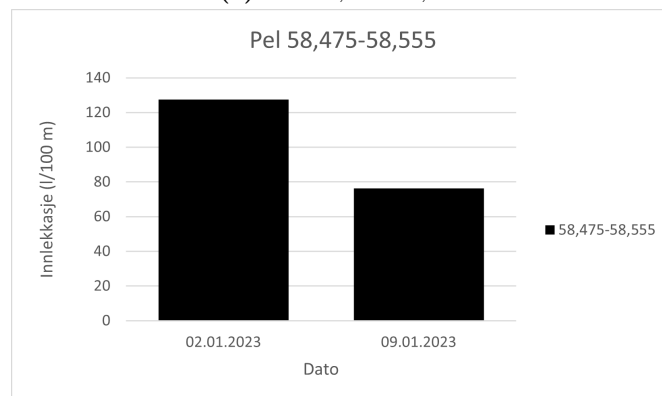
(a) Pel 58,155-58,555



(b) Pel 58,155-58,300



(c) Pel 58,300-58,475



(d) Pel 58,475-58,555

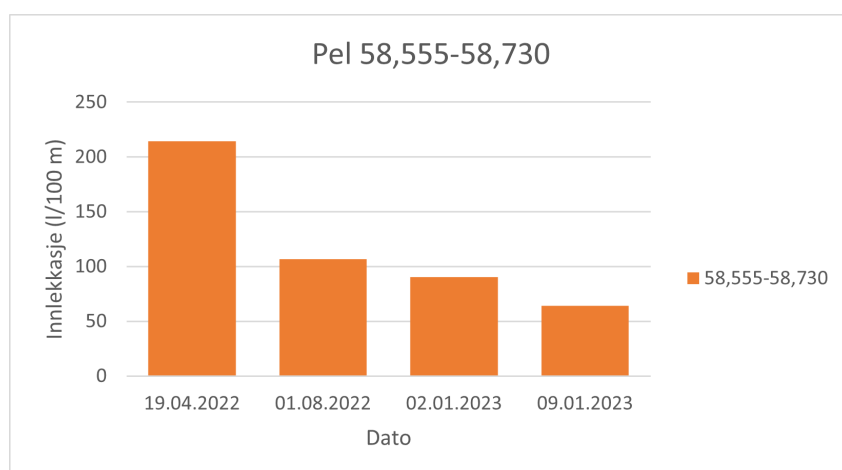
Figur 5.16: Innlekkasjemålinger for pel 58,155-58,555. Denne strekningen er i tillegg delt opp i tre delstrekninger

I figur 5.16 er innlekkasjen fra pelnummer 58,155 til 58,555 presentert. Denne strekningen har MossIA også valgt å dele inn i flere delstrekninger. Langs denne strekningen er det derfor bygget to ekstra terskler, slik at det blir totalt tre delstrekninger på hele strekningen.

Innlekkasjen for hele strekningen er presentert i figur 5.16a. Innlekkasjekravet på strekningen er 5 L/min per 100 meter, og som vist i figuren er det ingen av målingene som ligger under kravet. Som vist i figuren er målingen fra 3. januar 2022 betraktelig høyere enn de andre målingene. Dette skyldes at denne målingen ble påvirket av innlekkasje fra stoffen, siden den ikke var ferdig injisert, samt at terskelen fra Mossehallen rømnings-tunnel ikke var bygget enda. Dermed var det to ekstra kilder til innlekkasje av vann, og denne målingen er derfor ikke representativ. Sett bort fra denne målingen ligger de andre målingene av innlekkasje mellom 6 og 26 L/min.

I figur 5.16b og 5.16c er henholdsvis innlekkasjen for pelnummer 58,155-58,300 og pelnummer 58,300-58,475 presentert. Som vist i figurene er innlekkasjen for pelnummer 58,155-58,300 14 L/min og innlekkasjen for pelnummer 58,300-58,475 3,5 L/min. Disse strekningene har derimot kun blitt målt en gang, derfor er datagrunnlaget ganske lite. I tillegg stammer begge disse målingene fra 17. april 2023, og ble ikke tatt med som en del av denne oppgaven før i slutten av mai. Derfor er det ikke fokusert på disse målingene i resten av oppgaven.

Langs delstrekningen fra pelnummer 58,475-58,555 er innlekkasjen som vist i figur 5.16d mellom 76 og 127 L/min. Dette er betydelig over innlekkasjekravet på 5 L/min, og også betydelig over innlekkasjen for hele strekningen sett under ett. Derfor er det trolig delstrekningen fra pelnummer 58,475-58,555 som bidrar mest til at innlekkasjen på strekningen 58,155-58,555 er såpass høy.



Figur 5.17: Innlekkasjemålinger for pel 58,555-58,730

For strekningen fra pelnummer 58,555-58,730 er innlekkasjen vist i figur 5.17. Som presentert i figuren varierer den målte innlekkasjen langs denne strekningen mye. Årsaken til

dette er at det er ulike strekninger av tunnelen som har blitt målt på de ulike tidspunktene. Hvilke strekninger som har blitt målt på hvilket tidspunkt er presentert i tabell 5.1.

Tabell 5.1: Terskelmålinger for pelnummer 58,555 til 58,730

Dato	Strekning	Lengde(m)	Innlekkasje(L/min)	Innlekkasje per 100 m
19.4.2022	58,555-58,597	42	90	214.3
1.8.2022	58,555-58,614	59	63	106.8
2.1.2023	58,555-58,730	175	157.8	90.2
9.1.2023	58,555-58,730	175	112.3	64.2

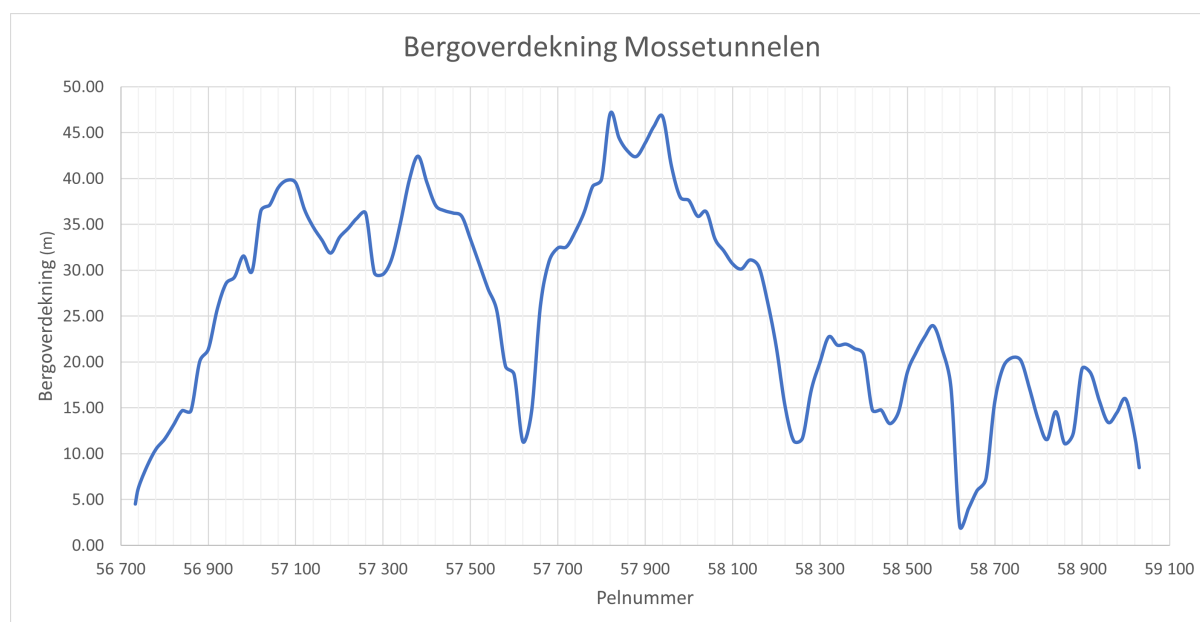
Som vist i tabellen inkluderer den første målingen kun 42 meter av den 175 meter lange strekningen, samtidig som den målte innlekkasjen er 90 L/min. Derfor blir innlekkasjen per 100 meter stor. Målingen som er gjort 1. august 2022 inkluderer 17 meter lengre enn den første målingen, men allikevel er den målte innlekkasjen mindre. Den beregnende innlekkasjen per 100 meter blir dermed 106,8 L/m, nesten halvparten av innlekkasjen beregnet ut ifra måling 1.

De to siste målingene er utført med en ukes mellomrom, og inkluderer begge hele strekningen som skal måles. Allikevel er den målte innlekkasjen i måling nummer 3 157,8 L/min, mens innlekkasjen i måling 4 er 112,3 L/min. Dette betyr at innlekkasjen i måling 4 er cirka 40 % mindre, sammenlignet med måling 3.

Selv om det er stor forskjell mellom de ulike målingene av innlekkasje befinner alle målingene seg over innlekkasjekravet for strekningen, som er på 5 L/min per 100 meter.

5.1.3 Geologiske parametre

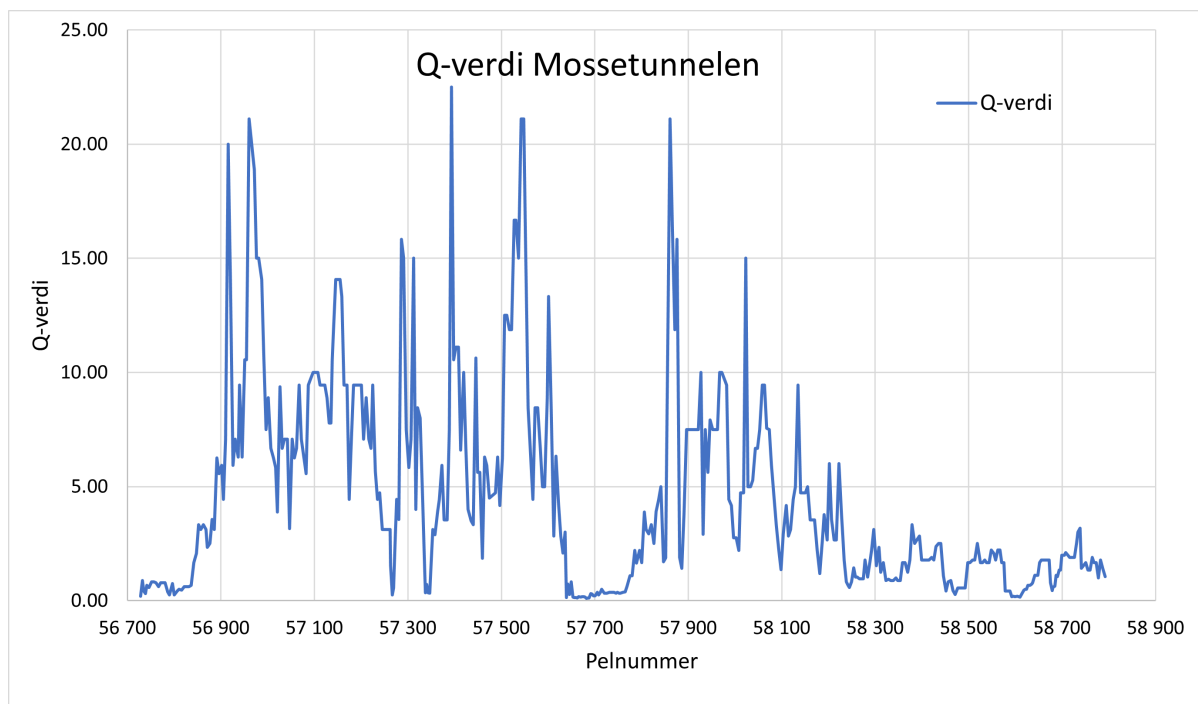
I tillegg til data om utført injeksjon og målt innlekkasje har det også blitt samlet inn data om Q-verdier og bergoverdekning for Mossetunnelen. Disse dataene er presentert her.



Figur 5.18: Bergoverdekning for Mossetunnelen

Figur 5.18 viser bergoverdekningen for Mossetunnelen. Som vist i figuren varierer bergoverdekningen for Mossetunnelen mellom 2 og 45 meter. Ved portalen i nord er bergoverdekningen nede i 5 meter, men overdekningen stiger raskt til rundt 30 meter. Etter dette er bergoverdekningen cirka 30 meter helt frem til pelnummer 58,100, med ett unntak. Dette unntaket er strekningen fra pelnummer 57,500 til 57,700, hvor bergoverdekningen er nede i 10 meter.

Fra pelnummer 58,100 minsker bergoverdekningen jevnt, helt til den er nede i cirka 10 meter ved pelnummer 58,260. Deretter varierer bergoverdekningen mellom 10 og 25 meter, helt til pelnummer 58,600. Ved pelnummer 58,600 er det en sone hvor bergoverdekningen er nede i 2 meter, og denne sonen varer frem til pelnummer 58,720. Fra pelnummer 57,720 varierer bergoverdekningen mellom 10 og 20 meter, før den er nede i 8 meter ved den sørlige portalen til Mossetunnelen.



Figur 5.19: Q-verdier for Mossetunnelen

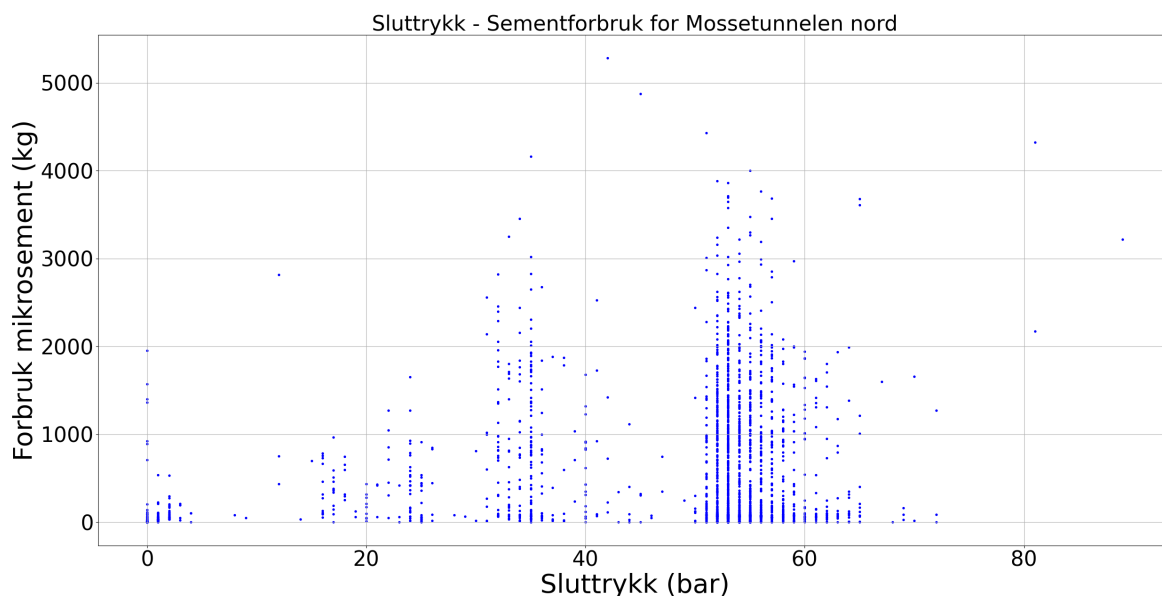
Q-verdier for Mossetunnelen er presentert i figur 5.19. Som vist i figuren er det en del variasjoner i Q-verdi i Mossetunnelen, Q-verdien varierer fra 0.10 til 22.50. Det er særlig to strekninger som skiller seg ut med høyere Q-verdier enn resten av tunnelen.

På strekningen fra pelnummer 56,700 til 56,900 er Q-verdien derimot lav, særlig i starten. Etter hvert øker Q-verdien noe, og ved pelnummer 56,900 er Q-verdien cirka 20. Ved pelnummer 59,100 starter den ene av de to strekningene hvor Q-verdiene er høyere enn i resten av tunnelen, og denne strekningen varer helt frem til pelnummer 57,600.

Ved pelnummer 57,600 går tunnelen inn i en sone med lav Q-verdi, her er Q-verdiene stort sett mindre enn eller lik 1.0. Denne sonen varer til pelnummer 57,850, hvor tunnelen treffer den andre av de to strekningene med høyere Q-verdi. Denne gangen varer strekningen med høy Q-verdi til pelnummer 58,100. Etter pelnummer 58,100 blir Q-verdiene i tunnelen gradvis lavere, helt til Q-verdien flater ut rundt 3 ved pelnummer 58,300. Etter pelnummer 58,300 ligger Q-verdien mellom 0 og 5 frem til pelnummer 58,800, og det er små variasjoner i Q-verdien.

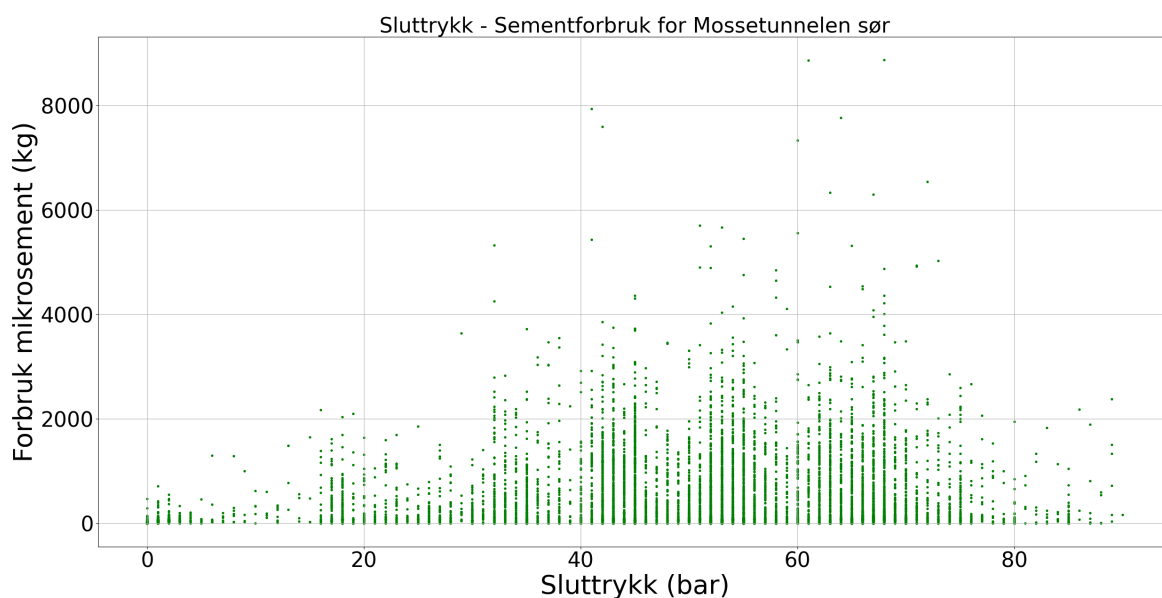
5.1.4 Fordeling av sementforbruk

Som nevnt i delkapittel 2.2 er injeksjonstrykk et av temaene som er mye diskutert i bransjen, og det finnes flere ulike teorier om hva som er riktig injeksjonstrykk. For å undersøke injeksjonstrykket sin påvirkning på sementforbruket i Mossetunnelen er sammenhengen mellom sluttrykket og forbruk av mikroement analysert.



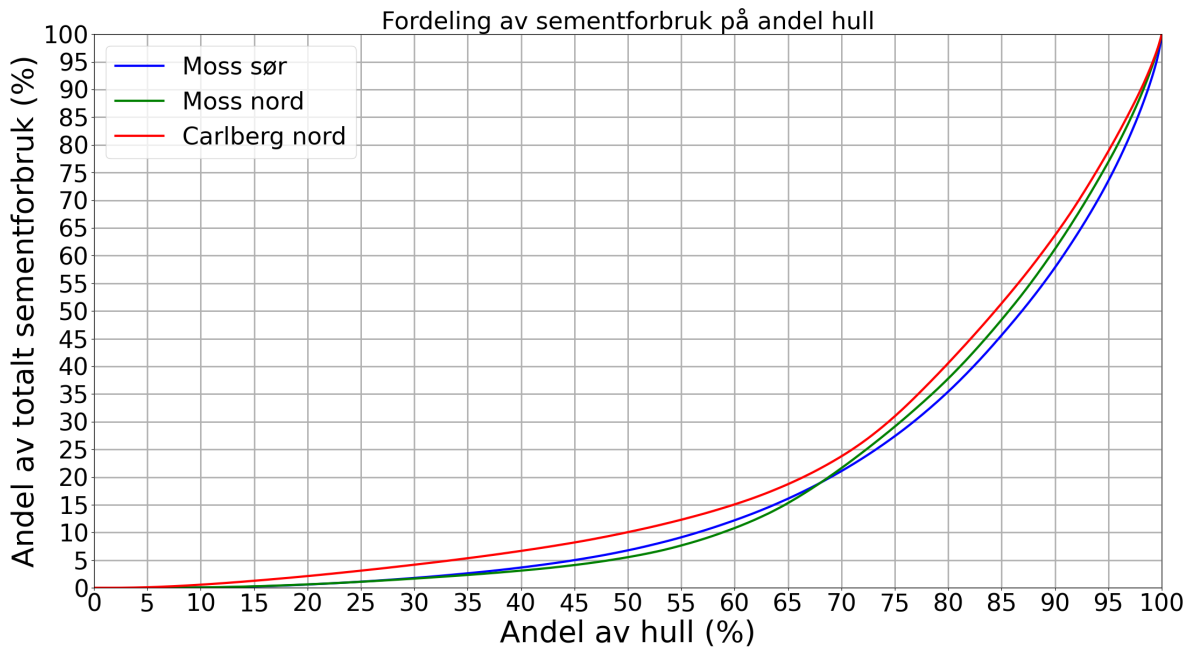
Figur 5.20: Sammenhengen mellom sluttrykk og sementforbruk for Mossetunnelen nord

For Mossetunnelen nord er sammenhengen mellom sluttrykk og forbruk av mikrosement plottet i figur 5.20. Hver prikk i figuren representerer ett injeksjonshull, med sluttrykket i injeksjonshullet plottet på x-aksen og forbruket av mikrosement plottet på y-aksen. Som vist i figuren er det ingen tydelig sammenheng mellom sluttrykk og forbruk av mikrosement. Det eneste mønsteret som er mulig å se er at for injeksjonshullene hvor trykket er under 20 bar er forbruket av mikrosement nesten aldri over 1000 kg. Pearsons korrelasjonskoeffisient for sluttrykk og forbruk av mikrosement i Mossetunnelen nord er 0,170, noe som underbygger påstanden om at det ikke er noe sammenheng mellom de to parametrene.



Figur 5.21: Sammenhengen mellom sluttrykk og sementforbruk for Mossetunnelen sør

I figur 5.21 er sammenhengen mellom sluttrykk og forbruk av mikrosement i Mossetunnelen sør plottet. Som vist i figuren er det heller ikke her noen tydelig sammenheng mellom sluttrykket og forbruket av mikrosement. Det eneste mønsteret som tegner seg er at i injeksjonshullene hvor trykket er enten under 20 eller over 80 bar er forbruket av mikrosement som oftest under 2000 kg. I Mossetunnelen sør er Pearsons korrelasjonskoeffisient for sluttrykk og forbruk av mikrosement 0,166, noe som støtter påstanden om at det ikke er noen sammenheng mellom sluttrykket og forbruket av mikrosement.



Figur 5.22: Andel sementforbruk fordelt på andel hull

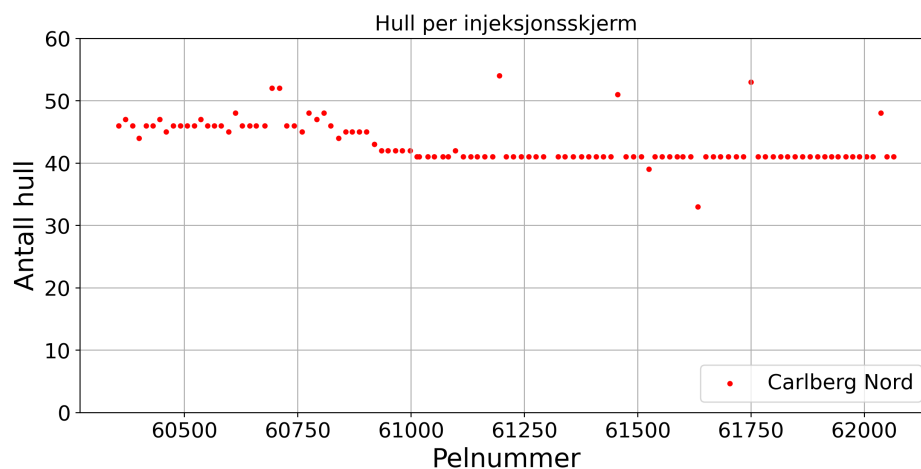
I figur 5.22 er persentilene for sementforbruk presentert. Fremgangsmåten for å lage denne figuren er beskrevet i delkapittel 4.4.2.

Som vist i figuren er det et mindretall av injeksjonshullene som står for mesteparten av forbruket av injeksjonsmasse i alle tunnelene. I Mossetunnelen sør er det for eksempel mindre enn 15% av alle injeksjonshullene som står for halvparten av sementforbruket. For Mossetunnelen nord og Carlbergtunnelen nord er situasjonen nokså lik, i disse tunnelene står henholdsvis litt over 15% og cirka 15% av hullene for halvparten av sementforbruket. Ved å lese av verdien til den 95. prosentilen ser man at i alle tunnelene utgjør 5% av injeksjonshullene mellom 20% og 25% av forbruket av mikrosement.

5.2 Carlbergtunnelen

Tilsvarende som for Mossetunnelen er resultatene fra Carlberg nord presentert her. For Carlberg nord er resultatene basert på data fra 112 injeksjonsskjermer, med til sammen 5517 injeksjonshull.

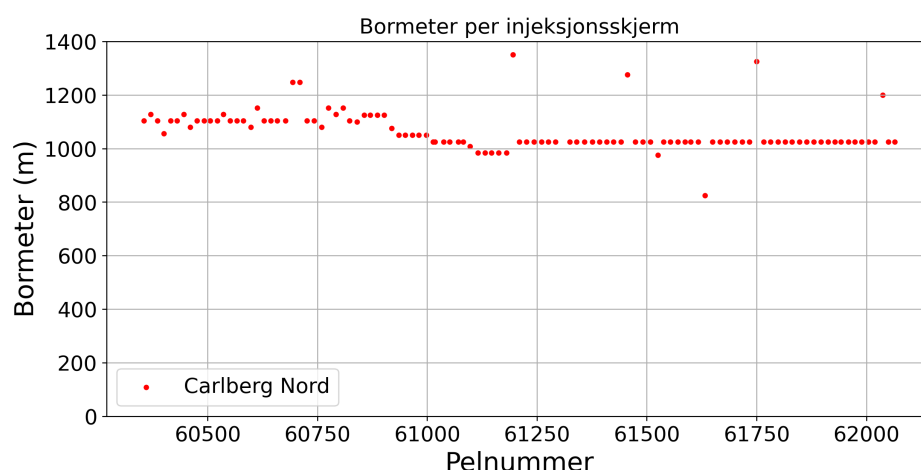
5.2.1 Utført injeksjon



Figur 5.23: Antall hull per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen

I figur 5.23 er antall hull per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen nord presentert. Som vist på figuren er det lite variasjon i antall hull per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen nord, nesten samtlige skjermene har mellom 40 og 50 hull. Det eneste mønsteret som er mulig å se er at antall hull per skjerm øker etter hvert som pelnummeret minsker. Forklaringen på dette er at tverrsnittet i Carlbergtunnelen øker inn mot stasjonsområdet i nord, og derfor øker også antall hull per injeksjonsskjerm.

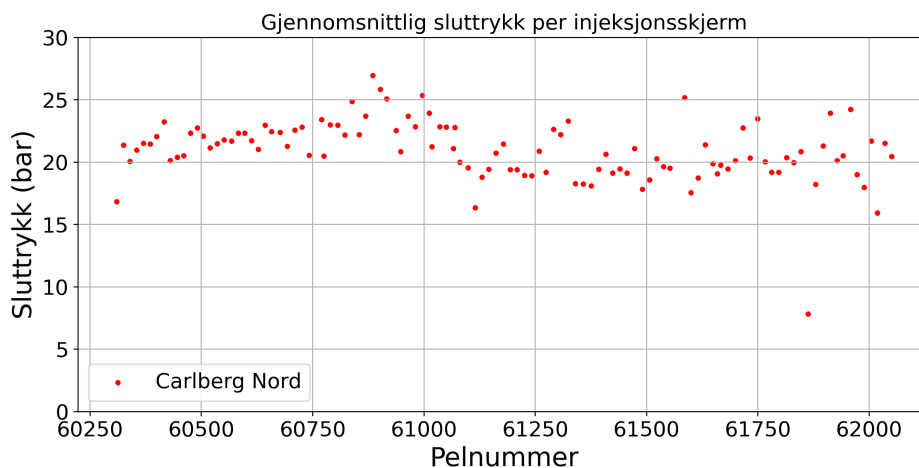
Ut ifra figuren ser man også at avstanden mellom injeksjonsskjermene er nokså konstant, det er ingen områder som skiller seg ut med spesielt få eller spesielt mange injeksjonsskjermene.



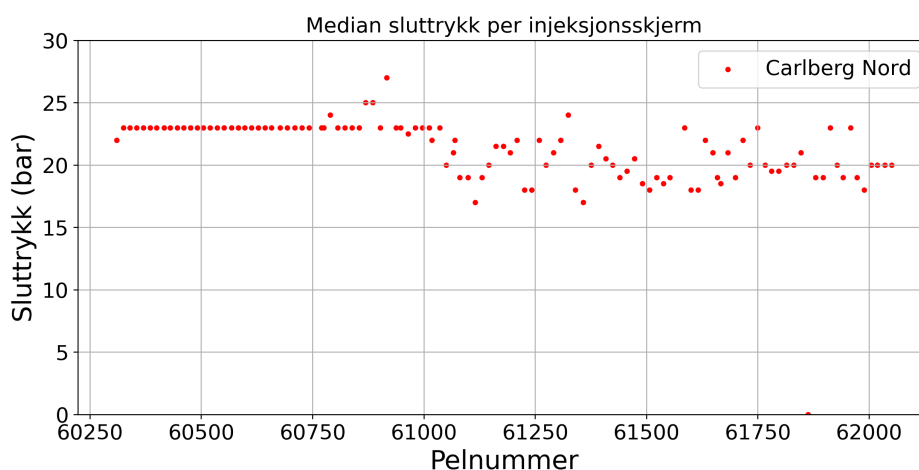
Figur 5.24: Bormeter per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen

Bormeter per injeksjonsskjerm er presentert i figur 5.24. Denne figuren ligner veldig på figuren over antall hull, noe som betyr at det er lite variasjon i hullengden i Carlberg-

tunnelen nord. I den sørlige delen av Carlbergtunnelen nord bores det cirka 1000 meter per injeksjonsskjerm, og i den nordlige delen av tunnelen bores det cirka 1100 meter per injeksjonsskjerm.



Figur 5.25: Gjennomsnittlig sluttrykk per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen

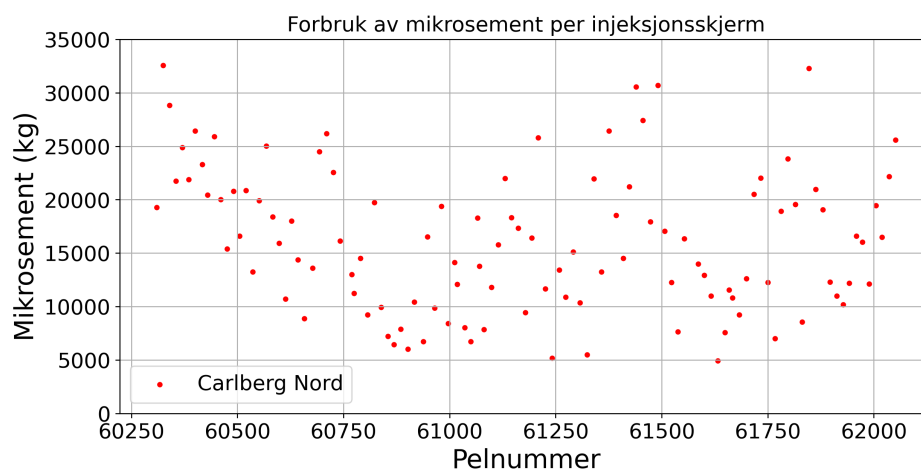


Figur 5.26: Median sluttrykk per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen

Sluttrykket for hver injeksjonsskjerm er presentert i figur 5.25 og 5.26, og figurene viser henholdsvis gjennomsnittlig og median sluttrykk. På samme måte som for Mossetunnelen er sluttrykket ikke oppgitt for hver injeksjonsskjerm, men for hvert injeksjonshull. Sluttrykket for hver injeksjonsskjerm har dermed blitt funnet ved å ta gjennomsnittet eller medianen av sluttrykket i alle injeksjonshullene for hver skjerm.

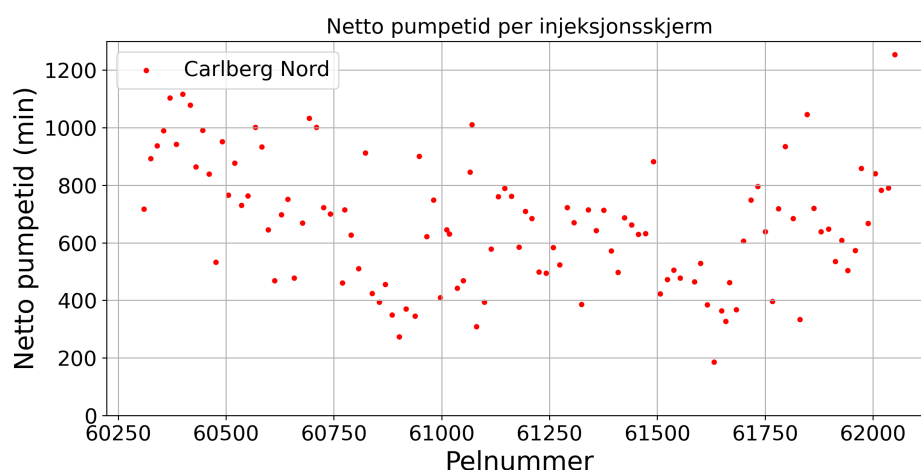
Som vist i figurene er det litt mer variasjon i gjennomsnittlig enn median sluttrykk, men uavhengig av hvilken av figurene som studeres ligger sluttrykket mellom 15 og 25 bar. Ut ifra figuren som viser median sluttrykk ser det ut som sluttrykket i Carlbergtunnelen var rundt 20 bar fra pelnummer 62,100 til 61,000, før det ble økt til 23 bar fra pelnummer

61,000. Denne trenden er ikke like tydelig i figuren som viser gjennomsnittlig sluttrykk, men også i den figuren ser det ut som sluttrykket øker noe etter pelnummer 61,000.



Figur 5.27: Forbruk av mikrosement per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen

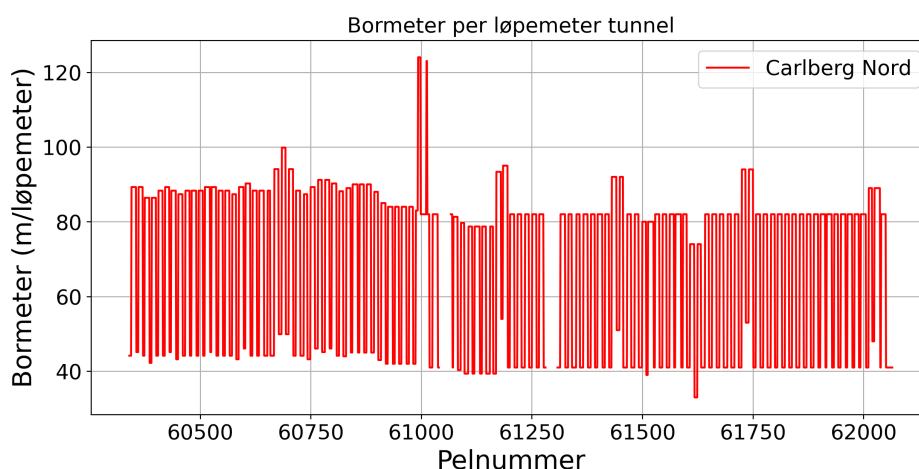
I figur 5.27 er forbruket av mikrosement per injeksjonsskjerm presentert. Ut ifra injeksjonsskjermene som er plottet er det vanskelig å se noe tydelig mønster i forbruket av mikrosement, men det ser ut til at forbruket av mikrosement er litt høyere i den nordlige delen av tunnelen, sammenlignet med resten av tunnelen. Dette stemmer bra med det faktum at tverrsnittet i tunnelen er større i den nordlige delen av tunnelen, og at antall hull per skjerm også er høyere i den nordlige delen. Bortsett fra dette ser det ut til at forbruket av mikrosement ligger mellom 5000 og 30 000 kg for de fleste skjermene i Carlbergtunnelen, med en nokså tilfeldig spredning av forbruket per skjerm.



Figur 5.28: Netto pumpetid per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen

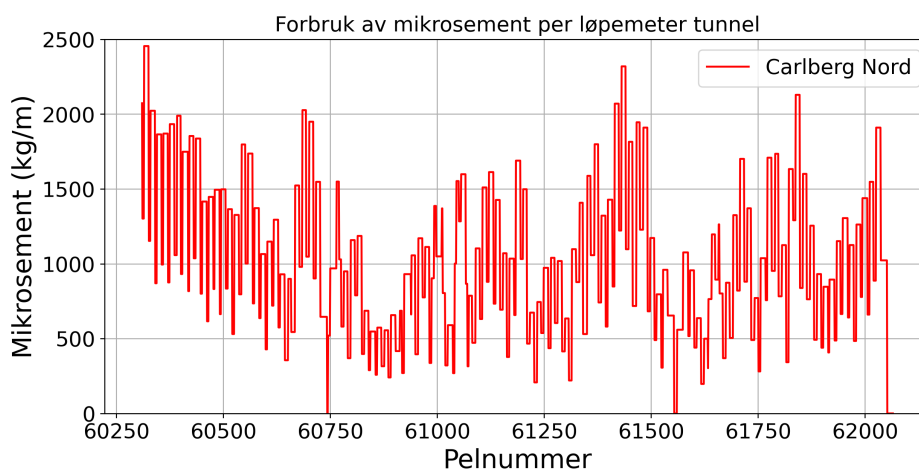
Netto pumpetid per injeksjonsskjerm i Carlbergtunnelen er vist i figur 5.28. På samme måte som forbruket av mikrosement øker netto pumpetid per injeksjonsskjerm i den

nordlige delen av tunnelen. I resten av tunnelen har de fleste skjermene netto pumpetid på mellom 200 og 1000 minutter, uten at det ser ut til å være noe sammenheng mellom pelnummer og netto pumpetid.



Figur 5.29: Bormeter per løpemetertunnel for Carlbergtunnelen

I figur 5.29 er antall bormeter per løpemetertunnel i Carlbergtunnelen plottet. Som beskrevet i delkapittel 5.1.1 skyldes fluktuasjonene i grafen overlapp mellom injeksjonsskjermer. I Carlbergtunnelen nord er det lite variasjon i bormeter per løpemetertunnel. Som vist i figuren er det overlapp mellom injeksjonsskjermene som fører til den største variasjonen i bormeter per løpemetertunnel. Allikevel er det en liten økning i bormeter per løpemetertunnel på strekningen fra pelnummer 61,000 til 60,200. Økningen på denne strekningen skyldes at tverrsnittet i tunnelen utvides.

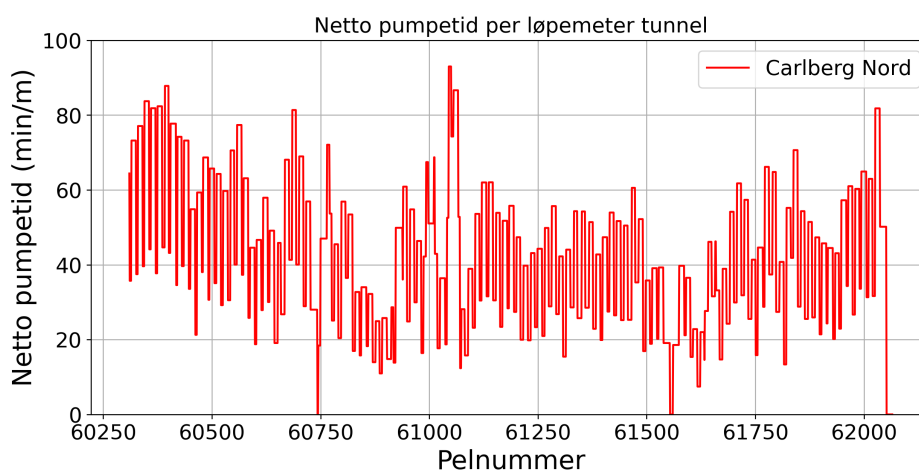


Figur 5.30: Forbruk av mikrosement per løpemetertunnel for Carlbergtunnelen

Forbruket av mikrosement per løpemetertunnel i Carlbergtunnelen er presentert i figur 5.30. I likhet med grafen over bormeter per løpemetertunnel har effekten av overlapp mellom injeksjonsskjermer også en stor betydning for variasjonen i forbruket av mikrosement per

løpemeter. Allikevel er det noen områder som skiller seg ut med et høyere forbruk av mikrosement. Et av disse områdene er strekningen fra pelnummer 62,000 til 61,750, hvor det på det meste er brukt 2000 kg med mikrosement per meter. I tillegg ligger forbruket over 1000 kg per meter for en god del av strekningen.

Fra pelnummer 61,500 til 61,400 er forbruket av mikrosement også over 2000 kg per løpemeter på det meste, samtidig som forbruket ligger mellom 1000 og 1500 kg for resten av strekningen. Den siste strekningen som skiller seg ut med et høyere forbruk er den nordlige delen av tunnelen, fra pelnummer 60,500 til 60,300. Langs nesten hele denne strekningen er forbruket av mikrosement mellom 1000 og 2000 kg per løpemeter, og det maksimale forbruket er nesten 2500 kg/m.



Figur 5.31: Netto pumpetid per løpemeter tunnel for Carlbergtunnelen

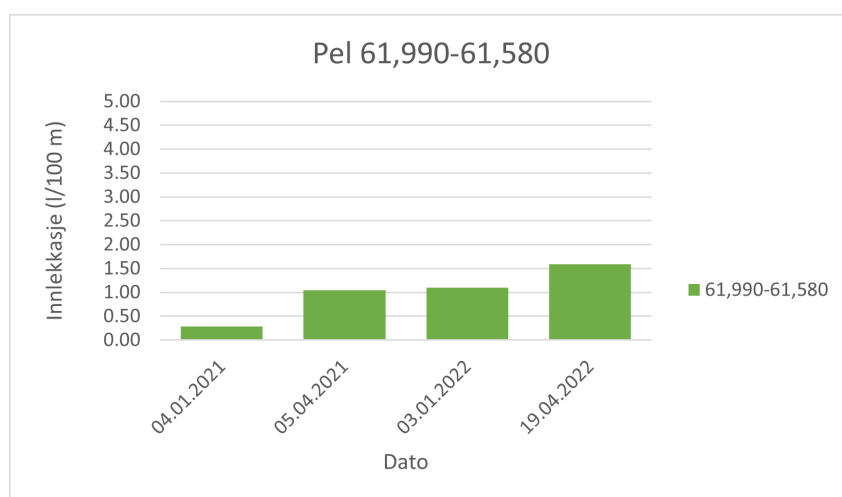
I figur 5.31 er netto pumpetid per løpemeter i Carlbergtunnelen vist. I likhet med de to forrige figurene har overlapp mellom injeksjonsskjermer også en stor effekt på variasjonen i denne figuren.

For netto pumpetid er det to strekninger som skiller seg ut med et lengre pumpetid enn i resten av tunnelen. Den første av disse strekningene ligger mellom pelnummer 62,050 og 61,950. Langs denne strekningen er netto pumpetid per meter stort sett 30 til 65 minutter, og er på det meste over 80 minutter. Den andre strekningen som skiller seg ut er den nordlige delen av tunnelen, fra pelnummer 60,500 til 60,300. Netto pumpetid i den nordlige delen varierer hovedsakelig mellom 40 og 80 minutter per meter, men er på det meste over 80 minutter.

I tillegg til disse strekningene er det en strekning som skiller seg ut med mindre pumpetid enn resten av tunnelen. Fra pelnummer 61,600 til 61,500 er netto pumpetid aldri over 40 minutter per løpemeter, og er helt nede i 0 akkurat ved pelnummer 61,555.

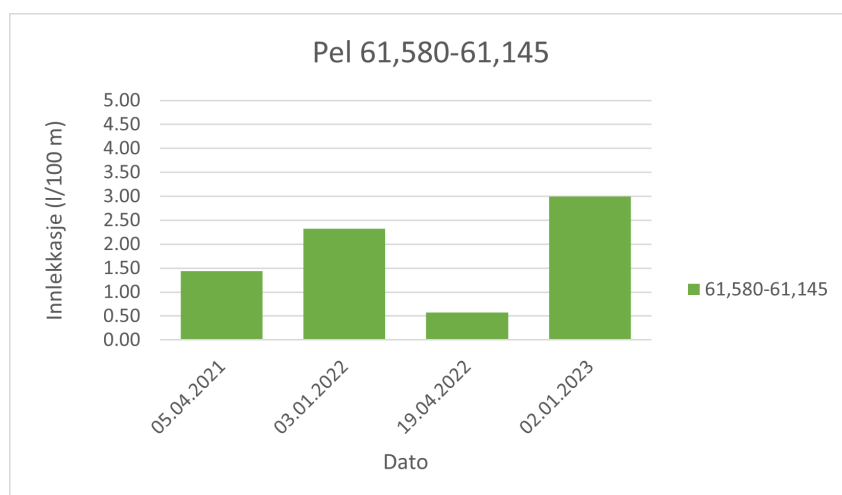
5.2.2 Innlekkasje

For å kunne analysere hvor vellykket injeksjonen i Carlbergtunnelen har vært må innlekkasjen til tunnelen måles. I Carlbergtunnelen nord er innlekkasjen målt i fire ulike områder, som er etablert ved å bygge målesterskler i tunnelen. For den nordlige delen av tunnelen, med utvidet tverrsnitt, er alle innlekkasjemålingene midlertidige målinger. Årsaken er at denne delen av tunnelen sprenges ut i to etapper. I den første etappen sprenges heng, vederlag og en god del av veggen ut, men det blir stående igjen en bunnpall. Bunnpallen blir først sprengt ut etter at toppallen har blitt drevet helt frem til enden av tunnelen. Alle målingene av innlekkasje i den nordlige delen av tunnelen er målt før bunnpallen er sprengt ut, og må derfor måles på nytt etter at hele tunneltverrsnittet er sprengt ut.



Figur 5.32: Innlekkasjemålinger for pel 61,990-61,580

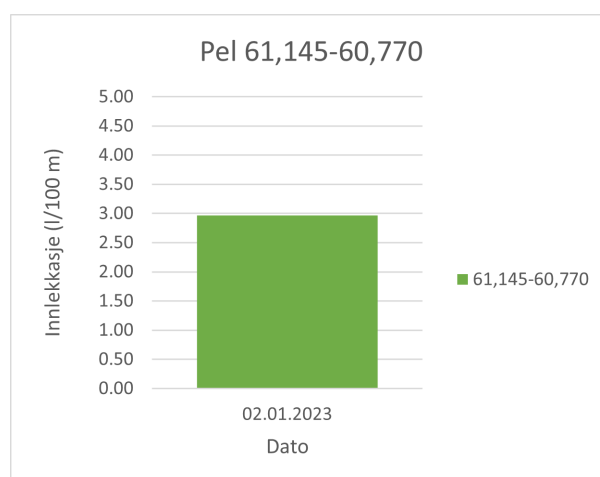
I figur 5.32 er alle innlekkasjemålingene som er utført i område 3 oppgitt. Område 3 er strekningen fra pelnummer 61,990 til 61,580, og inkluderer også deler av rømningstunnelen som går parallelt med hovedtunnelen. Innlekkasjen i dette området er målt ved fire ulike tidspunkt, og som vist i figuren er det ikke store forskjeller i målt innlekkasje. Alle målingene ligger under 1,6 L/min per 100 meter, noe som er godt under innlekkasjekravet på 5 L/min per 100 meter.



Figur 5.33: Innlekkasjemålinger for pel 61,580-61,145

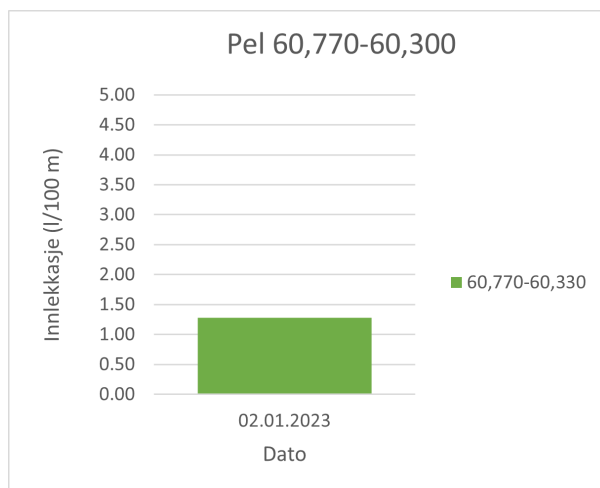
Den målte innlekkasjen for område 4 er oppgitt i figur 5.33. Område 4 er strekningen fra pelnummer 61,580 til 61,145 i hovedtunnelen, pluss alt av rømningstunnelen som befinner seg nord for pelnummer 61,700.

Som vist i figuren er det i dette området målt innlekkasje på fire forskjellige tidspunkt, og forskjellen mellom den største og minste innlekkasjen er ikke mer enn 2,43 L/min per 100 meter. I dette området er innlekkasjekravet 5,0 L/min per 100 meter, og som vist ligger alle innlekkasjemålingene under dette kravet.



Figur 5.34: Innlekkasjemålinger for pel 61,145-60,770

Område 5 i Carlberg-tunnelen er strekningen fra pelnummer 61,145 til 60,770 i hovedtunnelen, og dette området inkluderer ingen deler av rømningstunnelen. Som vist i figur 5.34 er det kun en måling av innlekkasje i dette området, og den målte innlekkasjen er 2,97 L/min per 100 meter. Innlekkasjekravet for dette området er 5,0 L/min per 100 meter, dermed er den ene målingen som er utført innenfor kravene.

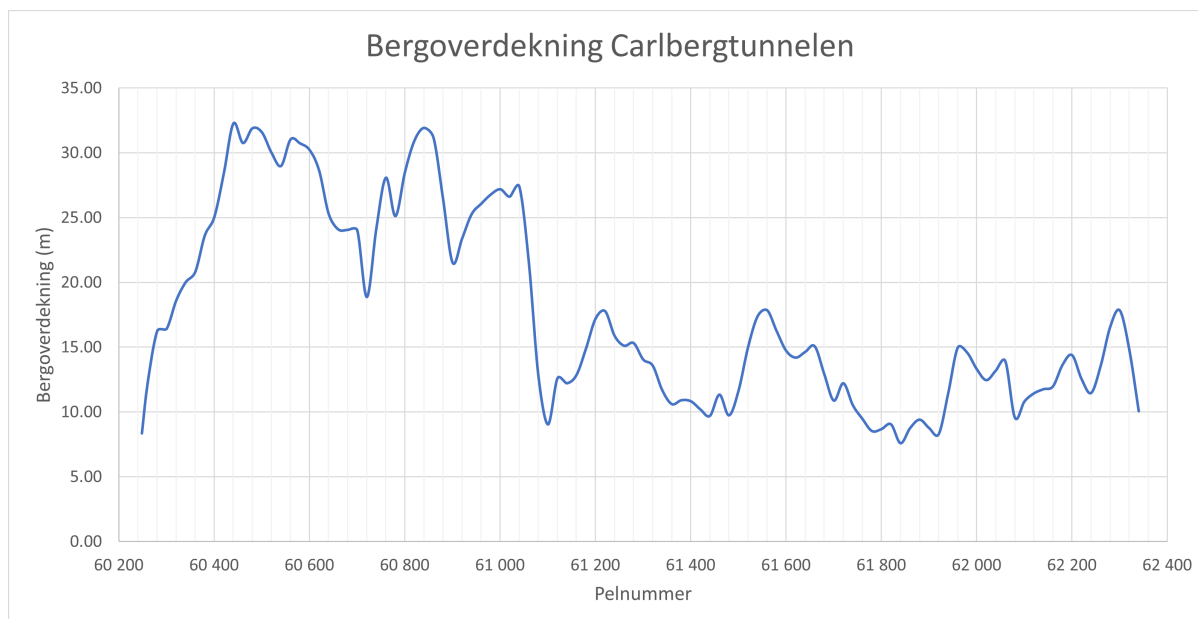


Figur 5.35: Innlekkasjemålinger for pel 60,770-60,300

I figur 5.35 er innlekkasjemålingene for område 6 presentert. Område 6 omfatter kun hovedtunnelen, fra pelnummer 60,770 til 60,300. I dette området er innlekkasjekravet 5,0 L/min for pelnummer 60,770-60,595 og 10,0 L/min for pelnummer 60,595-60,300. Som vist i figuren er innlekkasjen til tunnelen kun målt en gang, og denne målingen viser en innlekkasje på 1,28 L/min per 100 meter. Dermed er innlekkasjen godt under kravet, selv om det brukes et innlekkasjekrav på 5,0 L/min for hele området.

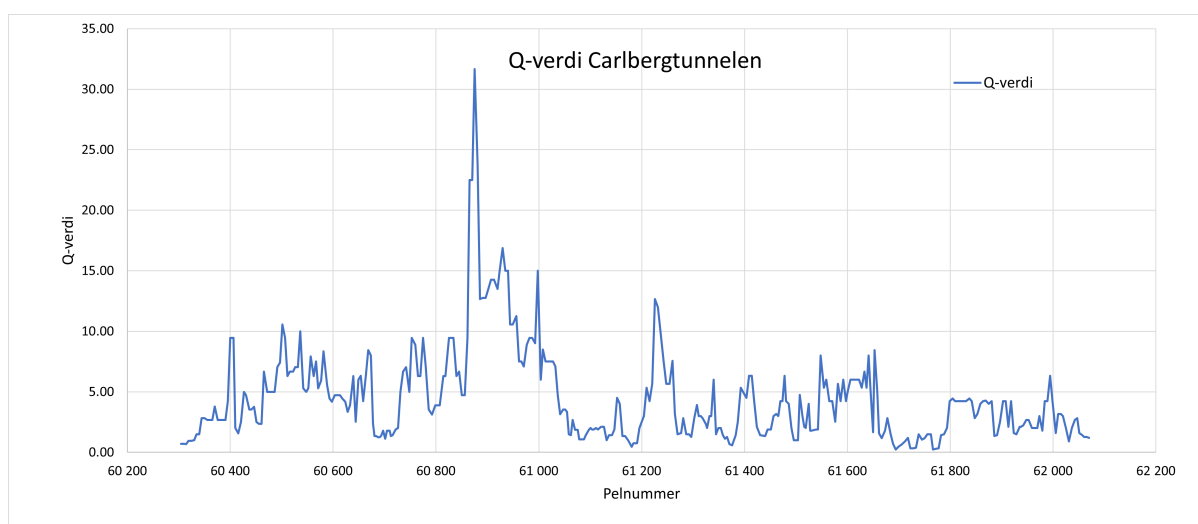
5.2.3 Geologiske parametre

I denne oppgaven er det også samlet inn data om bergoverdekning og Q-verdier for Carlbergtunnelen, i tillegg til data om utført injeksjon og innlekkasje av vann. Både bergoverdekning og Q-verdier er derimot oppgitt for hele Carlbergtunnelen, ikke kun Carlbergtunnelen nord. Derfor vil deler av dataene ikke være relevant for resten av oppgaven.



Figur 5.36: Bergoverdekning for Carlbergtunnelen

Bergoverdekningen i Carlbergtunnelen er presentert i figur 5.36. Som vist i figuren er bergoverdekningen cirka 8 meter ved portalen i nord, før den raskt øker og når 32 meter ved pelnummer 60,440. Fra pelnummer 60,440 til 61,040 varierer bergoverdekningen stort sett mellom 20 og 30 meter, før den minsker til 10 meter fra pelnummer 61,040 til 61,100. Fra pelnummer 61,100 til portalen i sør er bergoverdekningen stort sett mellom 10 og 15 meter, med noen partier hvor bergoverdekningen ligger noen meter utenfor dette intervallet.



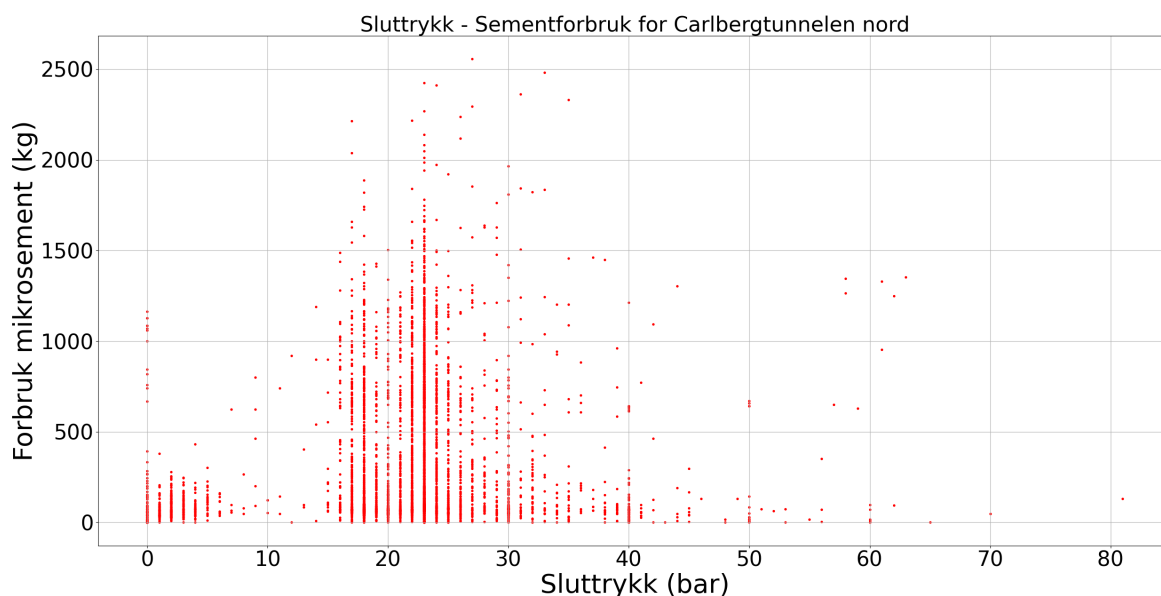
Figur 5.37: Q-verdier for Carlbergtunnelen

I figur 5.37 er Q-verdiene som er kartlagt i Carlbergtunnelen presentert. Som vist i figuren er det en del variasjon i kartlagt Q-verdi i Carlbergtunnelen. Fra pelnummer 60,300 til 60,350 er Q-verdien lav, men øker gradvis fra 0,7 til 2,8. Videre fra pelnummer 60,350

og frem til pelnummer 60,850 varierer Q-verdien mellom 1,8 og 10, men ligger stort sett rundt 5. Fra pelnummer 60,850 til 61,000 er det en strekning med høyere Q-verdier, her er Q-verdien på det høyeste 31, og ligger stort sett over 10. Etter pelnummer 61,000 minsker Q-verdien gradvis til 1,5, og ligger rundt 1,5 helt frem til pelnummer 61,200.

Fra pelnummer 61,200 til 61,650 varierer stort sett Q-verdien mellom 0,5 og 6, med en topp på 12,6 akkurat ved pelnummer 61,226. Deretter er det en strekning fra pelnummer 61,650 til 61,800 hvor Q-verdien er lav, stort sett under 2,0. Fra pelnummer 61,800 øker Q-verdien igjen, og varierer mellom 1,5 og 5 helt frem til pelnummer 62,070.

5.2.4 Fordeling av sementforbruk



Figur 5.38: Sammenhengen mellom sluttrykk og sementforbruk for Carlbergtunnelen nord

Sammenhengen mellom sluttrykk og sementforbruk i Carlbergtunnelen nord er presentert i figur 5.38. Som vist i figuren er det heller ikke i Carlbergtunnelen noen tydelig sammenheng mellom sluttrykk og forbruk av mikrosegment. I Carlbergtunnelen nord er det heller ikke slik at de injeksjonshullene med et sluttrykk på under 20 bar har mindre forbruk av mikrosegment sammenlignet med resten av hullene. For Carlbergtunnelen nord er Pearsons korrelasjonskoeffisient for sluttrykk og forbruk av mikrosegment 0,131, noe som bekrefter det at det er ikke er noe sammenheng mellom forbruket av mikrosegment og sluttrykket.

Fordelingen av mikrosegment plottet mot andelen av injeksjonshull for Carlbergtunnelen nord er presentert sammen med resultatene fra Mossetunnelen, i figur 5.22.

5.3 Sammenligning

5.3.1 Sammenligning av Mossetunnelen og Carlberg tunnelen

Ved å studere figurene i delkapittel 5.1 og 5.2 er det åpenbart at det har blitt utført mer injeksjon i Mossetunnelen enn i Carlberg tunnelen. For å gjøre det lettere å sammenligne de to tunnelene er det i dette delkapittelet regnet ut gjennomsnitts- og medianverdi for antall bormeter per løpemeter tunnel, sluttrykk, sementforbruk per løpemeter tunnel, netto pumpetid per løpemeter tunnel, bergoverdekning og Q-verdi. Resultatene fra disse beregningene er presentert i tabell 5.2

Tabell 5.2: Sammenligning av utført injeksjon og bergartsparametre i Mossetunnelen og Carlberg tunnelen

		Moss	Moss u/CK	CK	Carlberg N
Bormeter (m/m)	Snitt	91,5	82,8	130,7	69,0
	Median	86,4	85,44	126,7	82,0
Sluttrykk (bar)	Snitt	47,3	47,9	46,7	21,0
	Median	52,0	53,0	49,0	23,0
Sementforbruk (kg/m)	Snitt	3032	2272	5671	1049
	Median	2522	2207	5240	995
Netto pumpetid (min/m)	Snitt	82,8	74,0	254,9	43,3
	Median	85,4	63,3	193,4	43,1
Bergoverdekning (m)	Snitt	27,2	30,1	16,3	18,6
	Median	29,7	32,1	18,0	15,9
Q-verdi	Snitt	4,37	5,31	1,30	4,41
	Median	2,75	4,17	1,18	3,44

Som vist i figur 5.10 er det en strekning i Mossetunnelen som skiller seg ut med tanke på forbruk av injeksjonsmasse. Denne strekningen ligger mellom pelnummer 58,250 og 58,700, og er den delen av Mossetunnelen som krysser svakhetssonen ved Circle K. Siden denne strekningen skiller seg markant ut fra resten av Mossetunnelen er det beregnet gjennomsnitts- og medianverdier for tre ulike strekninger i Mossetunnelen. Dermed er det mulig å analysere påvirkningen fra Circle K svakhetssonen på resultatet for hele Mossetunnelen.

Den første strekningen er hele Mossetunnelen, fra og med pelnummer 56,749 til og med 58,784. Denne strekningen er betegnet som «Moss» i tabell 5.2. Den andre strekningen er hele Mossetunnelen, med unntak av strekningen som krysser Circle K svakhetssonen. Denne strekningen blir dermed pelnummer 56,749-58,250 og 58,700-58,784. I tabell 5.2

er denne strekningen betegnet «Moss u/CK». Strekning nummer 3 er kun den delen av Mossetunnelen som krysser svakhetssonen ved Circle K, fra og med pelnummer 58,250 til 58,700. Denne strekningen er betegnet som «CK» i tabell 5.2.

Den siste kolonnen i tabell 5.2 er resultatene fra Carlberg nord, mer eksakt den delen av Carlbergtunnelen som er mellom pelnummer 62,050 og 60,310.

I tabell 5.2 er det tydelig at den delen av Mossetunnelen som krysser svakhetssonen ved Circle K påvirker resultatene for Mossetunnelen som helhet. Både bormeter, sementforbruk og netto pumpetid per løpemeter er markant høyere for hele Mossetunnelen enn for Mossetunnelen uten Circle K. For bergartsparametrene er påvirkningen derimot vanskelig å se, det er liten forskjell mellom bergoverdekning og Q-verdi for de to strekningene.

I den delen av Mossetunnelen som krysser svakhetssonen ved Circle K er bormeter, sementforbruk og netto pumpetid per løpemeter signifikant høyere enn resten av tunnelen, uavhengig om man sammenligner med hele Mossetunnelen eller Mossetunnelen uten CK.

I sluttrykk er det derimot små forskjeller mellom de tre strekningene i Mossetunnelen, sluttrykket ligger rundt 47-53 bar for hele Mossetunnelen, Mossetunnelen uten CK og CK.

Svakhetssonen ved Circle K skiller seg også ut med lavere verdier for bergartsparametre enn resten av Mossetunnelen, bergoverdekningen er nesten halvert sammenlignet med resten av Mossetunnelen og Q-verdien er redusert til cirka en fjerdedel, sammenlignet med resten av tunnelen.

Hvis resultatene fra Carlbergtunnelen nord sammenlignes med resultatene fra Mossetunnelen er det tydelig at det har blitt utført mindre injeksjon i Carlbergtunnelen. Det er færre bormeter per løpemeter tunnel, mindre forbruk av sement og færre minutter med pumping. I tillegg er sluttrykket i Carlbergtunnelen mindre enn halvparten av sluttrykket i Mossetunnelen. Bergoverdekningen i Carlbergtunnelen er derimot lavere enn i Mossetunnelen, faktisk er bergoverdekningen i Carlbergtunnelen og Circle K svakhetssonen ganske like. Q-verdien i Carlbergtunnelen er derimot høyere enn i Circle K svakhetssonen, men ikke høyere enn at den er nokså lik Q-verdien for hele Mossetunnelen.

5.3.2 Normalisert borlengde og forbruk av injeksjonsmasse

I delkapittel 2.5 er normalisert borlengde og normalisert forbruk av injeksjonsmasse for en rekke tunneler presentert. Normalisert borlengde og normalisert forbruk av injeksjonsmasse kan beregnes for Mossetunnelen og Carlbergtunnelen også, ved å dele resultatene i tabell 5.2 på tverrsnittet av tunnelene.

Som beskrevet i kapittel 3 er tverrsnittet 132 m^2 i store deler av Mossetunnelen. For Carlbergtunnelen varierer tunneltverrsnittet mer, men i deler av Carlbergtunnelen er tverrsnittet cirka 131 m^2 . For resten av Carlbergtunnelen er tverrsnittet større enn 131 m^2 .

Hvis det antas at tverrsnittet i Mossetunnelen er 132 m^2 gjennom hele tunnelen gir lig-

ning 5.1 en normalisert borlengde på $0,69 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ m})$ for hele Mossetunnelen. Tilsvarende beregning kan gjøres for Mossetunnelen uten Circle K svakhetssonen og kun Circle K svakhetssonen, da blir sluttresultatet henholdsvis $0,63 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ m})$ og $0,99 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ m})$.

$$\frac{91,5 \text{ m/m}}{132 \text{ m}^2} = 0,69 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ m}) \quad (5.1)$$

For Carlbergtunnelen antas det i beregningen at tverrsnittet i hele tunnelen er 131 m^2 , selv om dette ikke stemmer med realiteten. Årsaken er at 131 m^2 er det minste tverrsnittet i tunnelen, og ved å anta dette tverrsnittet gjennom hele tunnelen får man et konservativt estimat på normalisert borlengde. Normalisert borlengde for Carlbergtunnelen nord er beregnet i ligning 5.2, som vist er resultatet $0,53 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ m})$.

$$\frac{69,0 \text{ m/m}}{131 \text{ m}^2} = 0,53 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ m}) \quad (5.2)$$

For både Mossetunnelen og Carlbergtunnelen mangler det derimot data for utført boring for en del av injeksjonsskjermene. Derfor vil den normaliserte borlengden som presenteres her være lavere enn den reelle, normaliserte borlengden.

Normalisert forbruk av injeksjonsmasse kan også beregnes for de fire delstrekningene på samme måte. Ligning 5.3 viser beregningen for normalisert forbruk av injeksjonsmasse for hele Mossetunnelen. Som vist er normalisert forbruk av injeksjonsmasse for hele Mossetunnelen $23,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ m})$. Hvis samme beregning gjøres for Mossetunnelen uten Circle K svakhetssonen og kun Circle K svakhetssonen blir resultatet henholdsvis $17,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ m})$ og $43,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ m})$.

$$\frac{3032 \text{ kg/m}}{132 \text{ m}^2} = 23,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ m}) \quad (5.3)$$

Beregningen av normalisert forbruk av injeksjonsmasse for Carlbergtunnelen er vist i ligning 5.4. Som vist er normalisert forbruk av injeksjonsmasse i Carlbergtunnelen nord $8,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ m})$.

$$\frac{1049 \text{ kg/m}}{131 \text{ m}^2} = 8,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ m}) \quad (5.4)$$

5.4 Injeksjonsprosedyrer i Mossetunnelen sør

Som beskrevet har MossIA hatt problemer med å oppfylle innlekkasjekravene i Mossetunnelen, særlig Mossetunnelen sør. Som en konsekvens av dette har injeksjonsprosedyren i Mossetunnelen sør blitt forandret ofte, i et forsøk på å finne en injeksjonsprosedyre som fungerer bra. Totalt er det laget 55 ulike injeksjonsprosedyrer for Mossetunnelen sør. Blant disse 55 prosedyrene er det i tillegg fire prosedyrer som finnes i to revisjoner,

dermed er det totalt 59 dokumenter som beskriver injeksjonsprosedyrene i Mossetunnelen sør.

Det er ikke hensiktsmessig å presentere alle de 59 variantene av injeksjonsprosedyrer i denne oppgaven, både fordi dette ville blitt unødvendig detaljert og fordi det er en del likeheter mellom mange av prosedyrene. Derfor er heller alle injeksjonsprosedyrene delt inn i fem grupper, basert på likhetstrekk mellom prosedyrene. De ulike injeksjonsprosedyrene i Mossetunnelen sør kan dermed beskrives ved å beskrive karakteristiske trekk ved de fem gruppene injeksjonsprosedyrene er delt inni. Disse fem gruppene blir grundigere beskrevet nedenfor.

5.4.1 Gruppe 1

Injeksjonsprosedyrene i gruppe 1 baserer seg på teorien bak aktiv injeksjon, som beskrevet i delkapittel 2.3. Prosedyrene i denne gruppen starter injeksjonen med et v/c -tall på enten 0,9 eller 1,2, og reduserer v/c -tallet når gitte volum med injeksjonsmasse er pumpet inn. Et eksempel på prosedyre er oppgitt her (MossIA ANS 2020a):

1. v/c -tall på 0,9, 1000 L i hvert hull.
2. Ved jevn trykkoppbygging kan det fortsettes med inntil 500 L $v/c=0,9$.
3. Dersom stopptrykk ikke er nådd fortsett med $v/c=0,6$. Maks 1000 L i hvert hull.
4. Dersom stopptrykk ikke er nådd settes hullet på hvile i cirka 2 timer.
5. Fortsett med $v/c=0,6$ inntil trykk er oppnådd.
6. Dersom det pumpes inn mer enn 1000 L i forrige punkt skal kontrollingeniør kontaktes.

I denne gruppen bores alle injeksjonshullene samtidig, med en hullavstand på enten 0,9 eller 1,2 meter for alle hullene langs tunnelkonturen. I tillegg bores det fem hull i stoffen, som også injiseres. Alle hullene er 24 meter lange, og bores med et stikk på enten 5 eller 6 meter på odd.

Stopptrykket for injeksjonsprosedyrene i denne gruppen er stort sett 50 eller 60 bar, med samme stopptrykk for alle injeksjonshullene i skjermen. Unntaksvis er det noen av prosedyrene som bruker et stopptrykk på 40 bar.

5.4.2 Gruppe 2

Injeksjonsprosedyrene i gruppe 2 baserer seg også på teorien bak aktiv injeksjon, men prosedyrene tar i tillegg ekstra hensyn i forbindelse med tunneldriving under Mosseelva. For å ta hensyn til Mosseelva forutsetter injeksjonsprosedyrene i denne gruppen at det bores og injiseres en sperreskjerm før selve hovedskjermen bores. Sperreskjermen består av 15 hull som bores i henget av tunnelen, med en hullengde på 29 meter. Disse hullene injiseres deretter etter vanlig fremgangsmåte ved aktiv injeksjon, med en prosedyre som

er ganske lik eksempelprosedyren fra gruppe 1. Forskjellen er at stopptrykket er kun 15 bar.

Etter at sperreskjermen har blitt boret og injisert bores hovedskjermen. Hovedskjermen bores med en hullavstand på 1,2 meter for hullene langs tunnelkonturen, og i tillegg bores det 5 hull i stuffen. Hullengden er 22 meter, og hullene bores med et stikk på enten 4 eller 5 meter på odd, avhengig av hullenes plassering i profilet. Når det gjelder injeksjonsmasse og stoppkriterium for volum er prosedyrene identisk med prosedyrene i gruppe 1. Injeksjonstrykket er derimot redusert for prosedyrene i gruppe 2, sammenlignet med prosedyrene i gruppe 1. I gruppe 2 er stopptrykket 30 bar for vederlag og heng, og 40 bar for såle, vegg og stuff.

Injeksjonsprosedyrene i denne gruppen beskriver alle injeksjonsskjermene som er utført under Mosseelva, som befinner seg cirka mellom pelnummer 58,190 og 58,265 i Mosse-tunnelen.

5.4.3 Gruppe 3

Injeksjonsprosedyrene i denne gruppen baserer seg også hovedsakelig på metoden aktiv injeksjon, men det er mer bruk av sperreskjermer og lavere stopptrykk.

Fremgangsmåten for innpumping av injeksjonsmasse i gruppe 3 har derimot store likheter med fremgangsmåten i gruppe 1. Alle injeksjonsprosedyrene starter med injeksjonsmasse med et v/c -tall på 1,2 eller 0,9, og reduserer gradvis v/c -tallet inn til sluttrykket er nådd. En del av injeksjonsprosedyrene i gruppe 3 tillater derimot at et høyere volum med injeksjonsmasse blir pumpet inn før v/c -tallet reduseres. Stoppkriteriumene for volum kan typisk se slik ut:

1. 3000 L med $v/c = 1,2$.
2. 2000 L med $v/c = 0,9$.
3. 1000 L med $v/c = 0,7$.

En annen forskjell mellom injeksjonsprosedyrene i gruppe 3 og 1 er at injeksjonsprosedyrene i gruppe 3 stort sett har lavere stopptrykk enn injeksjonsprosedyrene i gruppe 1. I gruppe 3 er stopptrykket for de fleste prosedyrene 40-50 bar i såle, vegg og stuff og 30-40 bar i heng. I hengen er det også en del av prosedyrene som bruker et enda lavere stopptrykk, på det minste er stopptrykket i hengen 20 bar.

Som nevnt innledningsvis er det også flere prosedyrer i gruppe 3 som forutsetter at det bores og injiseres en sperreskjerm før selve hovedskjermen injiseres. I sperreskjermene bores det kun hull i hengen, og disse hullene injiseres med et stopptrykk på enten 15 eller 25 bar. Bortsett fra det er fremgangsmåten lik som i hovedskjermene, med tanke på volum av injeksjonsmasse, v/c -tall, hullengde og stikk.

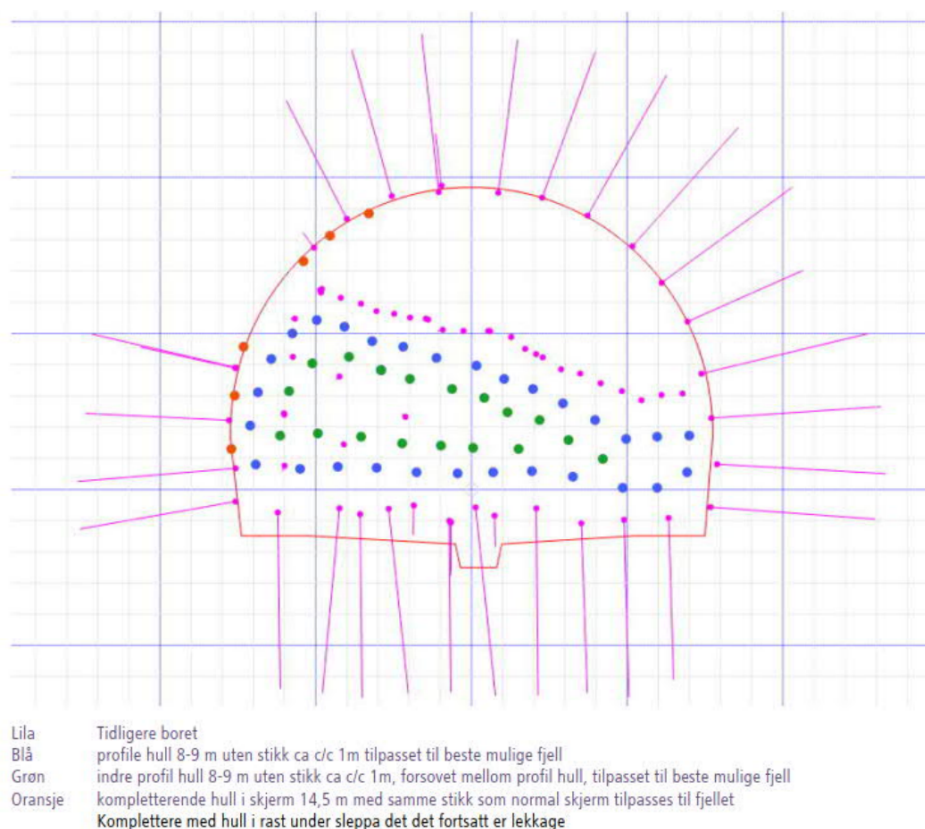
En annen forskjell mellom gruppe 3 og 1 er at injeksjonsprosedyrene i gruppe 3 beskriver

injeksjon som er mer tilpasset forholdene på stoff. I gruppe 1 tilpasses injeksjonen i liten grad forholdene på stoff, men gjennomføres helt likt, uavhengig av forløpet av injeksjonen. I gruppe 3 er det flere faktorer i injeksjonen som tilpasses, avhengig av blant annet innpumpet volum og injeksjonstrykk. Et eksempel på en slik tilpasning er at hvis det registreres tydelige trykkfall og økning i strømningsraten av injeksjonsmasse skal pumpingen settes på pause, og sluttrykket skal reduseres med 2-3 bar før pumpingen starter opp igjen. Et annet eksempel er at det i visse tilfeller tilsettes akselerator til injeksjonsmassen for å oppnå trykkoppbygging. I en av prosedyrene skal det for eksempel tilsettes akselerator hvis det er pumpet inn mer enn 1000 L injeksjonsmasse med v/c -tall 0,7, uten at det er tegn til trykkoppbygging.

5.4.4 Gruppe 4

Gruppe 4 består av injeksjonsprosedyrer som er spesialdesignet for å tette innlekkasje fra bestemte områder i stoffen. De fleste av injeksjonsprosedyrene i denne gruppen gjelder kun for ett pelnummer eller en kort strekning i tunnelen.

Alle injeksjonsprosedyrene i denne gruppen har også færre injeksjonshull sammenlignet med en vanlig injeksjonsskjerm. Dette henger sammen med at disse prosedyrene er laget for å tette innlekkasje fra bestemte områder. Av den grunn bores injeksjonshullene også bare i bestemte deler av stoffen, siden det er der innlekkasjen er. Hvor det bores injeksjonshull varierer fra prosedyre til prosedyre. I noen prosedyrer bores det en rad med hull på tvers, midt over stoffen. I andre prosedyrer bores alle hullene i den venstre siden av tunnelen. I figur 5.39 er et eksempel på plassering av hull i en av injeksjonsprosedyrene presentert. Som vist i figuren er plasseringen av injeksjonshull helt annerledes enn i en vanlig injeksjonsskjerm.



Figur 5.39: Plassering av injeksjonshull i en av spesialprosedyrene i Mossetunnelen sør. Hentet fra MossIA ANS (2020a)

I likhet med hullenes plassering varierer hullengden og stikk også mellom de ulike injeksjonsprosedyrene. I noen av prosedyrene er hullengden 24 meter, i noen er den opp til 15 meter og for noen av prosedyrene er lengden nede i 8 til 9 meter. I mange av prosedyrene skal hullene bores med stikk inn mot svakhetssonene som skal tettes, eller med stikk som er tilpasset hullets plassering. Derfor varer stikket på hullene mye.

Når det gjelder injeksjonsmasse og volum av injeksjonsmasse er det lite fellestrekk mellom prosedyrene i denne gruppen. I noen av injeksjonsprosedyrene er det PU som brukes, mens andre bruker mikrosement. I de prosedyrene hvor det brukes PU er det satt et tak på 150 kg per hull. I de injeksjonsprosedyrene hvor det brukes mikrosement varierer stoppkriteriet for volum. I noen prosedyrer er det ikke oppgitt noe stoppkriterium på volum, noen har satt en grense på 2000 L per hull, mens andre igjen bruker samme fremgangsmåte som i gruppe 3 med gradvis minskende v/c -tall.

5.4.5 Gruppe 5

Alle injeksjonsprosedyrene i gruppe 5 er basert på teorien bak split-spacing, som beskrevet i delkapittel 2.4. Det betyr at alle prosedyrene forutsetter injeksjon i flere omganger. I de fleste prosedyrene er det beskrevet injeksjon i tre omganger, men det er også noen av prosedyrene som beskriver injeksjon i to eller fire omganger. I tillegg er det en del prosedyrene som i utgangspunktet beskriver injeksjon i tre omganger, men hvor det kan

reduseres til to omganger hvis innlekkasjen fra hullene som bores i første omgang er under en gitt grense, som oftest mindre enn 15 L/min. Hvis innlekkasjen er under grensen bores andre omgang før første omgang injiseres, og deretter injiseres første og andre omgang samlet.

Hvis injeksjonsprosedyren er basert på injeksjon i tre omganger bores hullene i første og andre omgang med en hullavstand på 3 meter, mens hullene i tredje omgang bores med 1,5 meters mellomrom. Hvis injeksjonsprosedyren derimot er basert på injeksjon i to omganger bores begge omgangene med en hullavstand på 2 meter.

I gruppe 5 bruker de ulike injeksjonsprosedyrene litt forskjellig lengde på injeksjonshullene. I cirka halvparten av injeksjonsprosedyrene brukes det en hullengde på 24 eller 25 meter, men en hullengde på 14,5 meter brukes også i en del av injeksjonsprosedyrene. I tillegg er det flere injeksjonsprosedyrer hvor hullengden avhenger av innlekkasjen. I disse injeksjonsprosedyrene bores hullene i første omgang med en lengde på 24 meter. Avhengig av innlekkasjen fra første omgang bores deretter andre og tredje omgang med en hullengde på enten 15 eller 24 meter. Hvis den totale innlekkasjen fra første omgang er mer enn 300 L/min bores andre og tredje omgang med 15 meter lange hull, hvis ikke bores andre og tredje omgang med 24 meter lange hull. Når det gjelder stikk på injeksjonshullene bores alle hullene i såle og vegger med 7 meter stikk på odd, mens stikket på hullene i hengen varierer mellom 3 og 7 på odd.

Når det gjelder valg av injeksjonsmasse brukes det mikroement i alle prosedyrene, men v/c -tallet varierer mellom 0,8 og 1,0. I en del av prosedyrene er v/c -tallet også avhengig av innlekkasjen. Hvis innlekkasjen i hullet er mer enn 15 L/min brukes injeksjonsmasse med v/c -tall på 0,8, hvis innlekkasjen er mindre brukes det et v/c -tall på 0,9.

I nesten alle injeksjonsprosedyrene skal injeksjonen stoppes når det har blitt pumpet inn 2000 L med injeksjonsmasse. Stopstrykket i såle, vegg og stoff er 65 bar i alle prosedyrene, mens stopstrykket i hengen varierer mellom 15 og 35 bar.

I tillegg til det som er nevnt ovenfor er det i injeksjonsprosedyrene i gruppe 5 beskrevet to ekstra tiltak for å stoppe innlekkasjer. Det første av disse tiltakene er at en del av injeksjonsprosedyrene krever boring av flere hull i stoffen enn vanlig. I noen av injeksjonsprosedyrene skal det bores 30 hull i stoffen, fordelt på de tre omgangene som bores. Det andre tiltaket er at en del av prosedyrene sier at det ved behov skal bores en sperreskjerm enten før eller etter hovedskjermen.

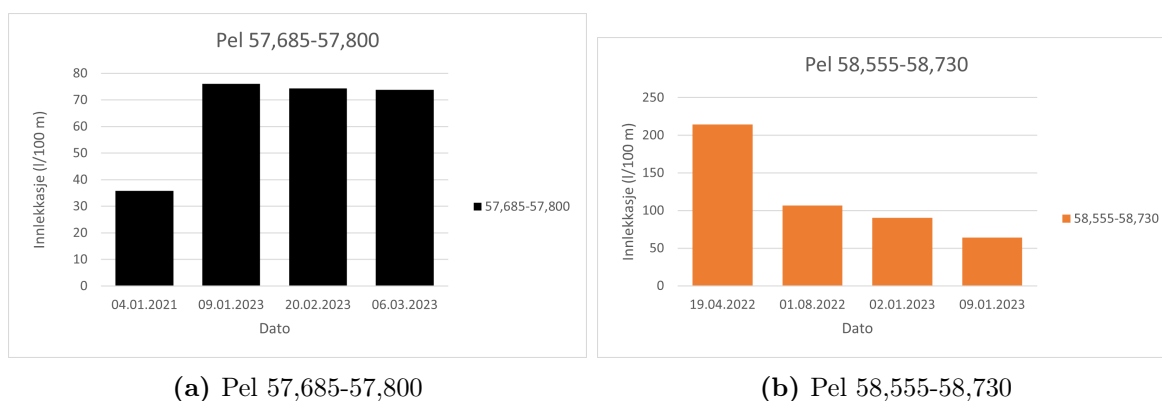
5.5 Sammenligning av injeksjonsprosedyrer

Som beskrevet i delkapittel 5.4 er det i Mossetunnelen sør brukt injeksjonsprosedyrer som stammer fra to ulike teorier om injeksjon, aktiv injeksjon og split-spacing. I dette delkapittelet sammenlignes to strekninger i Mossetunnelen, hvor det er brukt aktiv injeksjon på den første strekningen og split-spacing på den andre strekningen. Målet er å se om det er noen forskjeller mellom de ulike metodene, både med tanke på hvor mye injeksjon

som er utført og resultatene som er oppnådd.

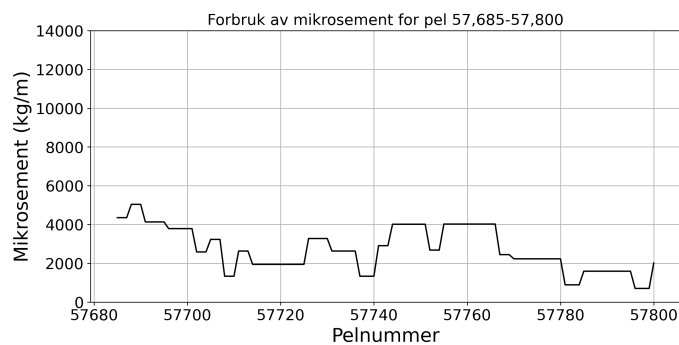
Den første injeksjonsprosedyren i gruppe 5 gjelder fra pelnummer 58,585 i Mossetunnelen. Derfor er split-spacing kun utført fra pelnummer 58,585 og sørover. Strekning nummer 2 må derfor befinne seg sør for pelnummer 58,585. For å kunne analysere innlekkasjen på strekningen er det også et krav om at det må være bygget terskler på strekningen, slik at disse kan brukes til å måle innlekkasjen. Den eneste strekningen i Mossetunnelen sør som oppfyller disse kriteriene er strekningen fra pelnummer 58,555 til 58,730, selv om den starter litt før injeksjonen med split-spacing begynte.

Av de andre strekningene i Mossetunnelen hvor innlekkasjen er målt er strekningen fra pelnummer 57,685-57,800 den strekningen som er mest lik 58,555-58,730 med tanke på geologiske parametre, derfor er det valgt å sammenligne med denne. I resten av dette delkapittelet blir strekningen fra pelnummer 57,685-57,800 kalt strekning 1, mens strekningen fra pelnummer 58,555-58,730 blir kalt strekning 2.

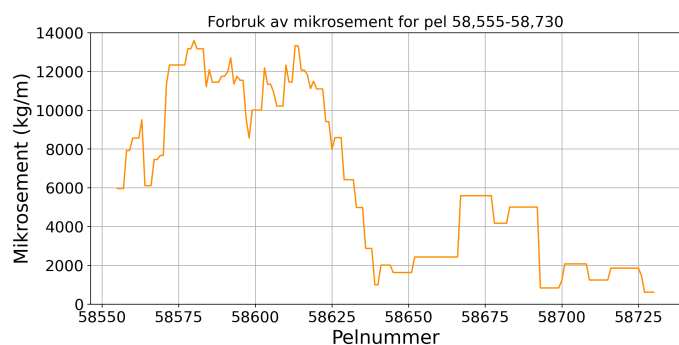


Figur 5.40: Innlekkasje for strekning 1 og 2 i Mossetunnelen

I figur 5.40 er innlekkasjen på de to strekningene presentert. Disse innlekkasjemålingene er allerede presentert i delkapittel 5.1.2. Som beskrevet i delkapittel 5.1.2 er innlekkasjen som er målt 19. april 2022 for strekning 2 kun målt over en kort strekning, og er derfor ikke representativ. Derfor er det kun de tre andre målingene fra strekning 2 som brukes videre, og i disse målingene varierer innlekkasjen mellom 64 og 107 L/min per 100 meter. For strekning 1 varierer den målte innlekkasjen mellom 35 og 76 L/min per 100 meter.



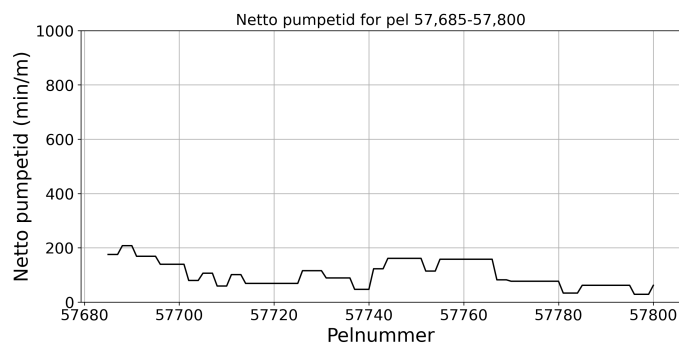
(a) Pel 57,685-57,800



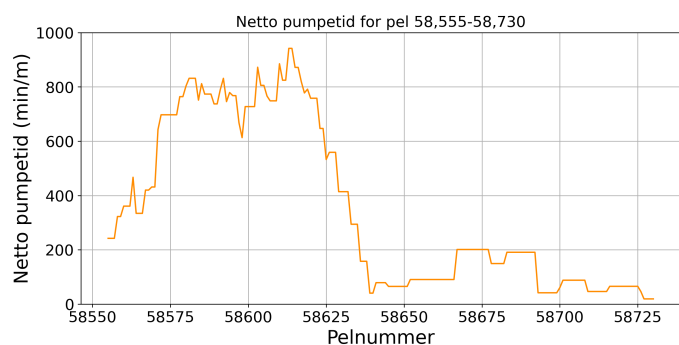
(b) Pel 58,555-58,730

Figur 5.41: Sementforbruk per løpemeter tunnel for strekning 1 og 2

I figur 5.41 er sementforbruket for de to strekningene presentert. Som vist i figur 5.41a varierer sementforbruket for strekning 1 mellom 1000 og 4000 kg per løpemeter. Langs strekning 2 er det større variasjon i sementforbruket, som presentert i figur 5.41b. I den første halvdel av strekningen varierer sementforbruket mellom 6000 og 14 000 kg per løpemeter, før det synker til cirka 2000 kg/meter. Deretter varierer sementforbruket mellom 2000 kg og 6000 kg per løpemeter i den andre halvdel av strekningen.



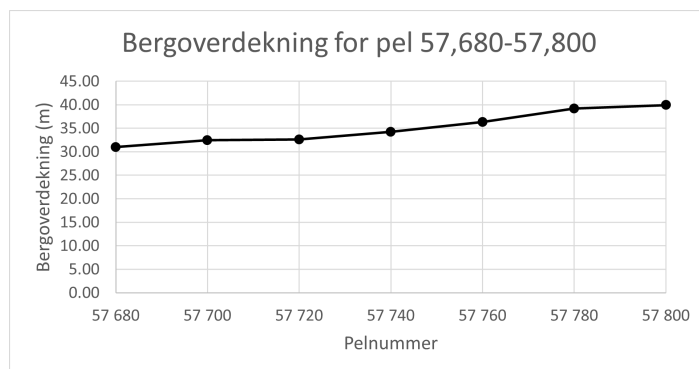
(a) Pel 57,685-57,800



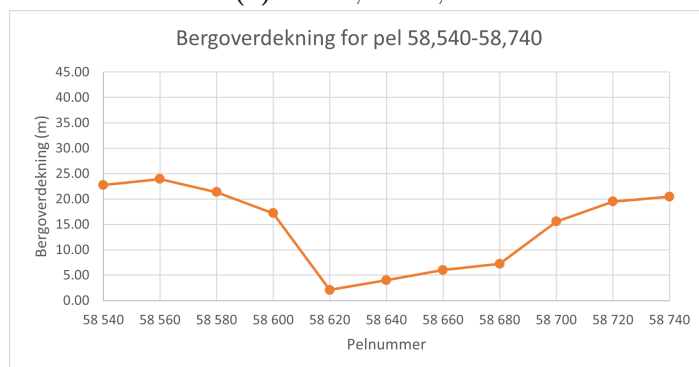
(b) Pel 58,555-58,730

Figur 5.42: Netto pumpetid per løpemeter tunnel for strekning 1 og 2

Netto pumpetid per løpemeter for de to strekningene er presentert i figur 5.42. Som figur 5.42a viser varierer netto pumpetid langs strekning 1 mellom 0 og 200 minutter per meter. Langs strekning 2 er netto pumpetid mellom 200 og 900 minutter per meter i den første halvdel av strekningen. I den andre halvdel av strekning 2 varierer netto pumpetid mellom 0 og 200 minutter per meter.



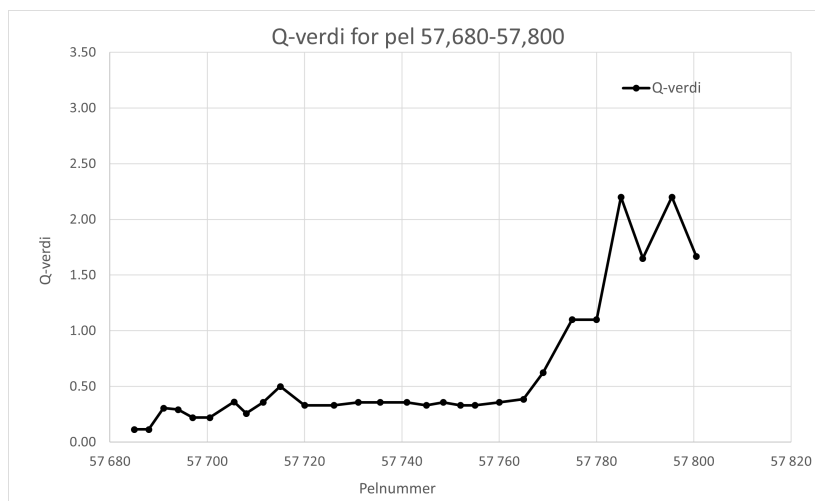
(a) Pel 57,685-57,800



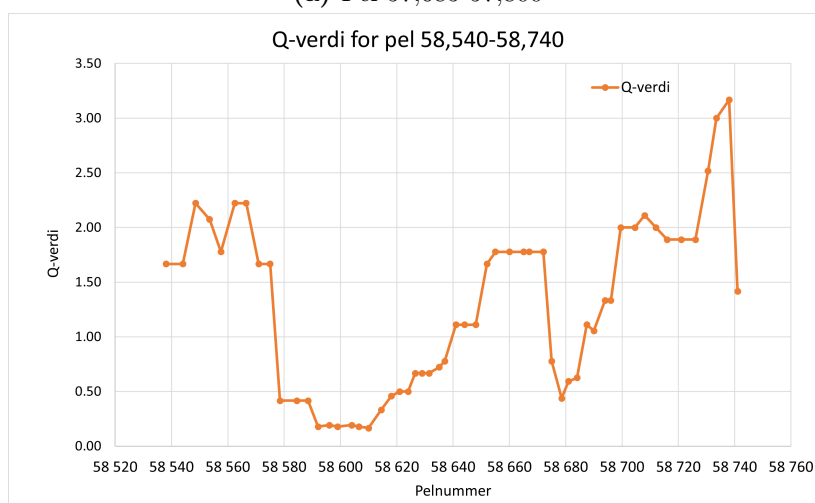
(b) Pel 58,555-58,730

Figur 5.43: Bergoverdekning for strekning 1 og 2. Hentet fra detaljprosjekteringen til MossIA.

I figur 5.43 er bergoverdekningen for de to strekningene presentert. Som presentert i figuren er variasjonen i bergoverdekning større langs strekning 2 enn langs strekning 1. For strekning 1 øker bergoverdekningen jevnt fra 30 til 40 meter. For strekning 2 starter bergoverdekningen på cirka 22 meter, før den synker til 2 meter ved pelnummer 58,620. Fra pelnummer 58,620 stiger bergoverdekningen igjen, inntil den når 20 meter ved slutten av strekningen.



(a) Pel 57,685-57,800



(b) Pel 58,555-58,730

Figur 5.44: Q-verdier for strekning 1 og 2. Hentet fra den ingeniørgeologiske kartleggingen

Q-verdiene for de to strekningene er presentert i figur 5.44. Som vist i figur 5.44a er Q-verdien cirka 0,3 i den første halvdel av strekning 1, før den gradvis stiger til 2,2. Etter dette varierer Q-verdien mellom 1,6 og 2,2 for resten av strekning 1.

Langs strekning 2 er det mer variasjon i Q-verdien, som vist i figur 5.44b. Q-verdien starter med å variere mellom 1,67 og 2,22, før den synker til 0,19. Deretter er Q-verdien cirka 0,19 i 18 meter, før den gradvis stiger til 1,78 igjen. Strekningen med en Q-verdi på 1,78 er kun 17 meter lang, og etter denne strekningen synker Q-verdien til 0,44. Q-verdien stiger derimot umiddelbart opp igjen fra 0,44, helt den når 2,0 ved pelnummer 58,700. Fra pelnummer 58,700 er Q-verdien cirka 2,0 i 26 meter, før den raskt stiger til 3,2, og deretter synker til 1,4.

Tabell 5.3: Sammenligning av aktiv injeksjon og split-spacing

	57,685-57,800	58,555-58,730
Innlekkasje (l/100 m)	73,8	64,2
Gjennomsnittlig sementforbruk (kg/m)	2730	6074
Gjennomsnittlig netto pumpetid (min/m)	103	350
Gjennomsnittlig bergoverdekning (m)	35,10	14,56
Gjennomsnittlig Q-verdi	0,61	1,27

I tabell 5.3 er gjennomsnittlige verdier for innlekkasje, sementforbruk og netto pumpetid per løpemeter, Q-verdi og bergoverdekning for de to strekningene presentert. Som vist i tabellen er forskjellen i innlekkasje mellom de to strekningene cirka 10 L/min. Det er derimot signifikant forskjell i utført injeksjon langs de to strekningene. Netto pumpetid og sementforbruk per løpemeter er mer enn dobbelt så stor langs strekning 2, sammenlignet med strekning 1.

For gjennomsnittlig bergoverdekning er forholdet motsatt, bergoverdekningen for strekning 1 er mer enn dobbelt så stor som bergoverdekningen for strekning 2. Gjennomsnittlig Q-verdi er ganske lik for de to strekningene, men den er litt høyere for strekning 2.

6 Diskusjon

6.1 Sammenligning av ulike tunneler

6.1.1 Sammenligning internt i prosjektet

Ut ifra resultatene er det tydelig at det har blitt utført betydelig mer injeksjon i Mossetunnelen enn i Carlberg tunnelen. Spesielt tydelig er dette ut ifra tallene i tabell 5.2. I tabellen ser man at det i Mossetunnelen er boret 32% mer, injisert 189% mer injeksjonsmasse og brukt 91% mer tid på injeksjon per løpemeter sammenlignet med Carlberg tunnelen.

En av forklaringene på de store forskjellene mellom de to tunnelene er at den delen av Mossetunnelen som krysser Circle K svakhetssonen har krevd mye injeksjon, noe resultatene i tabell 5.2 viser. Allikevel er det slik at hvis Mossetunnelen uten den strekningen som krysser Circle K svakhetssonen sammenlignes med hele Carlberg tunnelen, er det fortsatt boret 20% mer, injisert 116% mer injeksjonsmasse og brukt 71% mer tid på injeksjon per løpemeter i Mossetunnelen. Derfor kan ikke forskjellen mellom de to tunnelene ene og alene forklares av svakhetssonen ved Circle K.

Tallene i tabell 5.2 tar heller ikke hensyn til at tverrsnittet i de to tunnelene ikke er identisk. Som beskrevet i kapittel 3 er tverrsnittet 132 m^2 i store deler av Mossetunnelen. For Carlberg tunnelen varierer tunneltverrsnittet mer, og det er kun deler av Carlberg tunnelen som har et tverrsnitt på cirka 131 m^2 . For resten av Carlberg tunnelen er tverrsnittet større enn 131 m^2 , noe som gjør at Carlberg tunnelen i realiteten kommer enda gunstigere ut av sammenligningen med Mossetunnelen.

6.1.2 Sammenligning med andre prosjekter

I delkapittel 5.3.2 er normalisert borlengde og forbruk av injeksjonsmasse for Mossetunnelen og Carlberg tunnelen beregnet. Disse resultatene er oppsummert i tabell 6.1.

Tabell 6.1: Normalisert borlengde og forbruk av injeksjonsmasse i Mossetunnelen og Carlberg tunnelen

	Moss	Moss u/CK	CK	Carlberg N
Normalisert borlengde ($\text{m}/\text{m}/\text{m}^2$)	0,69	0,63	0,99	0,53
Normalisert forbruk ($\text{kg}/\text{m}/\text{m}^2$)	23,0	17,2	43,0	8,0

Hvis resultatene fra tabell 6.1 sammenlignes med figur 2.1 ser man at alle strekningene ligger i det nedre sjiktet med tanke på normalisert borlengde. Selv Circle K svakhetssonen, som er den strekningen med høyest normalisert borlengde ligger under flertallet av tunnelene i figur 2.1.

Ved å sammenligne resultatene for normalisert forbruk av injeksjonsmasse fra tabell 6.1, med tunnelene i figur 2.2 ser man at hele Mossetunnelen og Mossetunnelen uten Circle

K ligger cirka i midten i forhold til de andre tunnelene. Circle K svakhetssonen, med et normalisert forbruk på $43,0 \text{ kg}/(\text{m m}^2)$, ligger litt over midten i forhold til de andre tunnelene. Carlbergtunnelen ligger derimot godt under de fleste andre tunnelene i figuren.

Sammenligningen med tunnelene fra Langford mfl. (2022) er imidlertid ikke helt ideell, fordi den hydrauliske konduktiviteten til Carlbergtunnelen og Mossetunnelen ikke er beregnet. Hvis den hydrauliske konduktiviteten hadde vært beregnet hadde det vært mulig å analysere forholdet mellom utført injeksjon og innlekkasje, men nå er det kun mulig å analysere utført injeksjon. Årsaken til at den hydrauliske konduktiviteten til tunnelene ikke har blitt beregnet er at denne beregningen krever data om poretrykket, og poretrykket har ikke blitt analysert i denne oppgaven.

Som nevnt i delkapittel 2.3 er et typisk forbruk av injeksjonsmasse for en T8,5-tunnel mellom 340 og 1750 kg per løpemeter tunnel. En T8,5-tunnel har et tverrsnitt på cirka 62 m^2 (Statens Vegvesen 2022). Dette gir et normalisert forbruk av injeksjonsmasse på mellom 5,5 og $28,3 \text{ kg}/(\text{m m}^2)$. Sammenlignet med dette estimatet er normalisert forbruk av injeksjonsmasse i hele Mossetunnelen ganske høyt, mens forbruket i Mossetunnelen uten Circle K svakhetssonen ligger litt over midten. Forbruket i Circle K svakhetssonen er derimot mye høyere enn estimatet til Klüver og Kveen (2004), men som nevnt i delkapittel 2.3 kan forbruket være mye høyere i deler av tunnelen, for eksempel hvis bergmassen er sterkt oppsprukket eller har åpne sprekker med lite fylling. Circle K svakhetssonen er definitivt en sone med mye oppsprekking og dårlig fjell, derfor gir det lite mening å sammenligne forbruket av injeksjonsmasse i sonen med estimatet til Klüver og Kveen (2004).

6.1.3 Mulige forklaringer

Som beskrevet i kapittel 3 er det mange likheter mellom Carlbergtunnelen og Mossetunnelen. Tunnelene ligger nært hverandre, går gjennom mye av de samme bergartene og oppsprekkingen i de to områdene er nokså lik. Som vist i tabell 5.2 er i tillegg den gjennomsnittlige Q -verdien i de to tunnelene nokså lik, mens gjennomsnittlig bergoverdekning er høyere i Mossetunnelen.

Av den grunn ville det vært naturlig å anta at innlekkasjen i de to tunnelene også er ganske lik, og at det derfor kreves omtrent like mye injeksjon i begge tunnelene. Ut ifra resultatene i denne oppgaven er det tydelig at dette ikke er tilfelle. I dette delkapittelet blir derfor mulige forklaringer på forskjellen mellom de to tunnelene presentert og drøftet.

Injeksjonstrykk

Som vist i figur 5.3 og 5.25, samt tabell 5.2, er injeksjonstrykket i Mossetunnelen vesentlig høyere enn i Carlbergtunnelen. Derfor er en mulig forklaring at injeksjonstrykket i Mossetunnelen har ført til mer hydraulisk jekking/splitting enn i Carlbergtunnelen, og at dette har økt forbruket av injeksjonsmasse og netto pumpetid.

Det som taler mot denne forklaringen er at det ikke ser ut til å være noen sammenheng

mellom injeksjonstrykk og forbruk av injeksjonsmasse for hverken Mossetunnelen eller Carlbergtunnelen, som redgjort for i kapittel 5. Derfor skyldes det økte forbruket av injeksjonsmasse i Mossetunnelen sannsynligvis ikke injeksjonstrykket.

Svakhetssoner

Som allerede nevnt har Circle K svakhetssonen påvirket mengden injeksjon som er utført i hele Mossetunnelen, men Circle K svakhetssonen kan ikke alene forklare forskjellen mellom de to tunnelene. En mulig forklaring på forskjellen mellom Mossetunnelen og Carlbergtunnelen er derimot at det er vesentlig flere svakhetssoner som krysser Mossetunnelen. I tabell 3.4 er alle svakhetssonene som er kartlagt langs Mossetunnelen presentert, og som vist er det 23 svakhetssoner som krysser Mossetunnelen. Carlbergtunnelen krysses derimot kun av 13 svakhetssoner, som presentert i tabell 3.8. Antatt lengde av svakhetssonene som krysser Mossetunnelen er cirka 560 meter, mens antatt lengde av alle svakhetssonene som krysser Carlbergtunnelen er cirka 280 meter.

Dermed er det cirka dobbelt så mange svakhetssoner i Mossetunnelen, sammenlignet med Carlbergtunnelen. Siden svakhetssoner ofte krever mer injeksjon enn vanlig kan dette være en forklaring på forskjellen mellom disse tunnelene.

Et moment som taler mot denne forklaringen er at gjennomsnittlig og median Q-verdi i de to tunnelene er nesten lik, som vist i tabell 5.2. Q-verdien i Carlbergtunnelen er faktisk litt høyere enn i Mossetunnelen. Av den grunn virker det lite logisk at det skal være store forskjeller i bergmassekvalitet mellom de to tunnelene. Ulempen med gjennomsnittsverdi og median er at de ikke tar hensyn til variasjonen i Q-verdien. Hvis figur 5.19 sammenlignes med figur 5.37 er det tydelig at det er større variasjon i Q-verdier i Mossetunnelen enn i Carlbergtunnelen. Dermed kan det være flere partier med dårlig bergmasse i Mossetunnelen, som blir utjevnet av at det også er flere partier med god bergmasse. Dermed blir gjennomsnittlig og median Q-verdi for de to tunnelene nokså lik, selv om det er flere svakhetssoner i Mossetunnelen.

Bergoverdekning

På grafen i figur 5.18 er det tre strekninger hvor bergoverdekningen plutselig synker, disse tre strekningene er fra pelnummer 57,500-57,700, 58,150-58,300 og 58,550-58,700. Hvis man studerer de tre samme strekningene på grafen i figur 5.5 ser man at alle disse tre strekningene har høyere forbruk av mikrosement per løpemeter enn områdene rundt. Det samme gjelder hvis man studerer de tre samme strekningene i grafen som viser netto pumpetid, i figur 5.8. Dette tyder på at det er en sammenheng mellom områder hvor bergoverdekningen plutselig synker og områder hvor det er utført mer injeksjon. Denne sammenhengen kan dog skyldes at forsenkninger i bergmassen ofte er skapt av svakhetssoner, og svakhetssoner generelt krever mer injeksjon.

Som presentert i tabell 5.2 er bergoverdekningen i Carlbergtunnelen mindre enn i Mossetunnelen. Allikevel er det utført mer injeksjon i Mossetunnelen. Dette tyder på at det ikke er noen generell sammenheng mellom lav bergoverdekning og mye utført injeksjon.

Derfor er det mer sannsynlig at det er svakhetssoner som skaper disse forsenkningene i bergoverdekningen, og at det også er svakhetssonene som gjør at utført injeksjon øker.

God tilgang på vann

Som vist i kartet over Mossetunnelen, i figur 3.1, går Mossetunnelen under Mosseelva. I tillegg ligger Vansjø, som er en stor innsjø, rett øst for tunnelen. For Carlberg-tunnelen er det ingen vannkilder umiddelbart i nærheten av tunnelen, som vist på kartet i figur 3.5. Derfor kan en av årsakene til at det har vært mer innlekkasje til Mossetunnelen, være at det er mer vann tilgjengelig i nærheten av Mossetunnelen. Denne teorien underbygges av at det har vært størst problemer med innlekkasje av vann i den østlige veggen av Mossetunnelen, og at det flere ganger har blitt utført injeksjon kun i den østlige siden av tunnelen. Dette tyder på at vannet fra Vansjø påvirker innlekkasjen til Mossetunnelen, og siden Vansjø er en stor innsjø betyr det at potensiale for innlekkasje stort.

Leirfylte sprekker

En annen mulig årsak til at injeksjonen i Mossetunnelen har vært krevende er at Mossetunnelen har hatt mye leirfylte sprekker. Leirfylte sprekker er ofte vanskelige å tette, fordi injeksjonsmassen sliter med å penetrere sprekke. Derfor krever leirfylte sprekker ofte høyere injeksjonstrykk, noe som igjen kan skape problemer med hydraulisk jekking/splitting, stor spredning av injeksjonsmasse, lang pumpetid og stort forbruk av injeksjonsmasse.

6.2 Sammenligning av aktiv injeksjon og split-spacing

Som presentert i tabell 5.3 er innlekkasjen til strekning 1, hvor det brukes aktiv injeksjon, cirka 15% større enn innlekkasjen til strekning 2, hvor split-spacing metoden brukes. Forskjellen på to strekningene er derimot at det har blitt utført betydelig mer injeksjon langs strekning 2. Sammenlignet med strekning 1 har det blitt brukt 122 % mer injeksjonsmasse og 240% mer tid på pumping av injeksjonsmasse langs strekning 2. Dermed er den relative reduksjonen i innlekkasje langs strekning 2 mye mindre enn den relative økningen i utført injeksjon.

Ut ifra disse tallene er det naturlig å konkludere med at aktiv injeksjon har vært den beste metoden i Mossetunnelen. Problemet med denne konklusjonen er Circle K svakhetsonen krysser deler av strekning 2. I figur 5.44b ser man at Q-verdien er under 0,5 for en god del av den første halvdel av strekning 2, og dette skyldes at Circle K svakhetsonen krysser den første halvdel av strekning 2. I figur 5.41b og 5.42b er forskjellene mellom utført injeksjon i første og andre halvdel av strekning 2 tydelige. I begge figurene er henholdsvis sementforbruk og netto pumpetid per løpemeter vesentlig høyere i den første halvdel av strekningen, sammenlignet med den andre halvdel.

En interessant observasjon er at Q-verdien er under 0,5 i en god del av strekning 1 også, og som vist i tabell 5.3 er gjennomsnittlig Q-verdi faktisk høyere for strekning 2 enn for strekning 1. Forskjellen mellom de to strekningene er derimot at langs strekning 1 er

bergoverdekningen alltid over 30 meter, mens for strekning 2 er bergoverdekningen under 5 meter i den samme sonen som Q-verdien er lav. Dette kan tyde på at de lave Q-verdiene langs strekning 2 skyldes en markert svakhetszone som krysser tunnelen, mens de lave Q-verdiene langs strekning 1 heller skyldes generelt dårlig bergmasse.

Hvis den utførte injeksjonen langs andre halvdel av strekning 2 sammenlignes med den utførte injeksjonen langs strekning 1 er det relativt små forskjeller. For begge strekningene ligger sementforbruket per løpemet mellom 1000 og 4000 kg, mens netto pumpetid varierer mellom 0 og 200 minutter per løpemet. Hvis det hadde vært mulig å sammenligne innlekkasjen langs andre halvdel av strekning 2 med innlekkasjen langs hele strekning 1 hadde det dermed vært mulig å bestemme hvilken injeksjonsmetode som har egnet seg best i Mossetunnelen. Problemet er at det ikke finnes noen målinger av innlekkasje langs kun andre halvdel av strekning 2, dermed er det heller ikke mulig å sammenligne de to strekningene.

I tillegg til de parametrene som er sammenlignet og kommentert på allerede er det en faktor til som skiller de to injeksjonsmetodene, og det er størkningstiden. I alle injeksjonsskjermene hvor det brukes aktiv injeksjon bores og injiseres alle hullene i en omgang, og dermed er det kun nødvendig å vente på at sementen skal størkne en gang. Ved bruk av split-spacing bores og injiseres derimot injeksjonshullene i flere omganger, som oftest tre. Derfor må man som oftest vente på at sementen skal størkne tre ganger, noe som gjør at den totale ventingen på størkning blir tredoblet. Dette gjør at fremdriften i tunnelen synker, og vil derfor være en ulempe med split-spacing metoden. For å kvantifisere denne ulempen er man derimot avhengig av data om størkningstiden, og det har ikke blitt samlet inn i denne oppgaven.

6.3 Mulige forbedringer i prosjektet

6.3.1 Bedre tolkning av Circle K svakhetssonen

Som redegjort for i kapittel 5 har den delen av Mossetunnelen som krysser svakhetssonen ved Circle K krevd signifikant mer injeksjon enn resten av tunnelen. Svakhetssonen under Circle K var kartlagt før tunneldrivingen startet, og man visste at tunnelen kom til å krysse svakhetssonen. Problemet er at Circle K svakhetssonen ble tolket som en tilnærmet vertikal svakhetszone, som nevnt i delkapittel 3.1. I realiteten faller svakhetssonen slakt mot sør. Denne feiltolkningen gjorde både at svakhetssonen traff tunnelen tidligere enn forventet, og at lengden av svakhetssonen i tunnelen var lengre enn forventet.

Som vist i figur 3.4 har bergoverflaten ved Circle K svakhetssonen bratt helning fra venstre og ned mot svakhetssonen, mens det er en svak helning fra høyre og ned mot svakhetssonen. I tillegg er det mest kjernetap og lavest RQD-verdi til venstre for den dypeste forsinkingen i bergmassen. Begge disse observasjonene er observasjoner som tyder på at svakhetssonen faller slakt mot venstre, derfor burde helningen til svakhetssonen vært undersøkt grundigere.

Hvis helningen til svakhetssonen hadde vært tolket riktig fra begynnelsen av, ville ikke det forandret det faktum at svakhetssonen krevde mye injeksjon. Allikevel ville det vært lettere å utføre injeksjonen i svakhetssonen, fordi man kunne forberedt seg på en annen måte. Innlekkasjen til svakhetssonen var også slik at det var mest innlekkasje i overkant av svakhetssonen, noe som betyr at man traff den sonen med mest innlekkasje før selve svakhetssonen ble truffet. Kombinert med at svakhetssonen krysset tunnelen tidligere enn forundersøkelsene skulle tilsi, skapte det en del ekstra problemer for injeksjonen.

6.3.2 Mer testing underveis i drivingen

For å kunne estimere behovet for injeksjon fremover i tunnelen kunne det vært utført flere tester under drivingen av tunnelen. Et eksempel på slik testing er bruken av MWD-data. I de to tunnelene samles det inn MWD-data fra alt av boring som utføres, men MWD-dataen blir i liten grad brukt til å forutsi behovet for injeksjon foran stoffen. MWD-data sier ikke direkte noe om behovet for injeksjon i tunnelen, men det er ofte mulig å oppdage svakhetssoner og soner med dårlig bergmasse på MWD-data. Slike soner vil ofte kreve mer injeksjon enn vanlig, derfor kan det være nyttig å bruke MWD-data som en del av grunnlaget for å bestemme videre injeksjon i tunnelen.

Lugeon-test er et eksempel på en test som kan gjøres for å bestemme behovet for injeksjon mer direkte. Ut ifra resultatet i Lugeon-testen kan den hydrauliske konduktiviteten i bergmassen estimeres, og informasjon om den hydrauliske konduktiviteten kan være svært nyttig for å bestemme injeksjonsprosedyre. Ulempen med Lugeon-test er at den tar litt tid å gjennomføre. Derfor vil det ikke være hensiktsmessig å utføre Lugeon-tester systematisk gjennom hele tunnelen, men det kan for eksempel gjennomføres Lugeon-tester fra stoff før tunnelen drives inni områder hvor man mistenker at det kan være krevende å utføre injeksjon.

6.3.3 Andre typer injeksjonsmasse

Nesten all injeksjon i dette prosjektet er utført med mikrosement, både i Mossetunnelen og Carlberg tunnelen. Som presentert i kapittel 5 er det flere strekninger i Mossetunnelen hvor innlekkasjekravet ikke er oppfylt, mens innlekkasjen i Carlberg tunnelen er godt under kravene i hele tunnelen. Derfor hadde det muligens vært gunstig å teste andre typer injeksjonsmasse enn mikrosement.

I Carlberg tunnelen kunne vanlig industrisement vært testet. Som beskrevet i delkapittel 2.3 vil industrisement fungere til de aller fleste prosjekter, og vil kunne brukes oftere enn finhetsgraden til sementen skulle tilsi. Industrisement har den fordel at den er billigere enn mikrosement, noe som ville senket kostnaden ved injeksjonen. Hvis industrisement hadde blitt testet på en kort strekning, kunne resultatene fra denne strekningen blitt analysert i etterkant. Hvis innlekkasjen fortsatt er under kravene, uten at det kreves større volum med injeksjonsmasse eller mer pumping er det gunstig å bytte til industrisement. Hvis innlekkasjen derimot er over kravene, eller det kreves vesentlig mer injeksjonsmasse

og pumping ved bruk av industrisement, kan man bare bytte tilbake til mikroement igjen.

Problemet med å bytte til industrisement som injeksjonsmasse er at det er et krav i kontrakten om at all injeksjon skal utføres med enten mikroement eller fin sement, som beskrevet i delkapittel 3.4. Derfor er det ikke mulig for entreprenøren å bytte til industrisement som injeksjonsmasse uten å bryte kontrakten. Dermed er det ikke mulig å oppnå kostnadsbesparelsene ved å bytte til industrisement. Kontraktskravet om mikroement eller fin sement virker i overkant firkantet, og kan bidra til å øke kostnadene for tunnelen.

I Mossetunnelen ville et alternativ vært å teste systematisk injeksjon med kolloidal silika istedenfor sementbasert injeksjonsmasse. Som beskrevet i delkapittel 2.1 er kolloidal injeksjonsmasse et alternativ hvis sementbasert injeksjonsmasse fungerer dårlig. Hvis man hadde valgt seg ut en strekning i Mossetunnelen, og utført systematisk forinjeksjon med kolloidal silika langs denne strekningen, kan resultatene fra denne strekningen sammenlignes med de strekningene hvor det er brukt mikroement. Avgjørelsen om hva slags injeksjonsmasse som skal brukes videre kunne dermed vært tatt basert på denne sammenligningen av strekningene.

Fellesnevneren for både Carlbergtunnelen og Mossetunnelen er at det ikke er sikkert at bytte av injeksjonsmasse ville gitt bedre resultater. Derfor er forslaget å bytte injeksjonsmasse langs en kort strekning av tunnelen, og deretter bruke resultatene fra denne strekningen til å avgjøre videre valg av injeksjonsmasse. Dette krever selvfølgelig en del forberedelser, men den mulige gevinsten er at injeksjonen i Carlbergtunnelen blir billigere og at injeksjonen i Mossetunnelen tetter bergmassen bedre enn tidligere.

6.3.4 Hyppigere målinger av innlekkasje

Som en følge av at de to tunnelene drives med døgntidligere drift, og at innlekkasjen over tersklene kun kan måles etter at det har vært pause i tunneldriften i minimum ett døgn, er det lenge mellom hver gang innlekkasjen til tunnelene måles. I utgangspunktet måles innlekkasjen kun etter jule-, påske og sommerferien, siden det er den eneste periodene hvor det har vært pause i tunneldriften i mer enn ett døgn. I tillegg har innlekkasjen blitt målt noen ganger utenom disse tidspunktene, hvis det har vært behov for det.

Fordi innlekkasjen til tunnelene måles sjeldent er det vanskelig å vite hvor vellykket injeksjonen er. Den nøyaktige innlekkasjen fra all injeksjonen som utføres etter sommeren vet man for eksempel ikke før etter at innlekkasjen har blitt målt etter juleferien. Dermed er det vanskeligere å fortløpende tilpasse injeksjonen til oppnådd tetting av innlekkasje.

En annen ulempe med at innlekkasjen sjeldent måles er at det er vanskelig å følge utviklingen i innlekkasje over tid. Naturlige variasjoner i poretrykket kan føre til at innlekkasjen til tunnelen varierer over tid, og når innlekkasjen måles sjeldent er det vanskelig å vite hva variasjonen i målingene skyldes. I tillegg gjør det at innlekkasjen sjeldent måles at resultatet er sårbart for feilmålinger, siden det er få målinger å basere resultatet på.

Hvis innlekkasjemålingene hadde blitt utført oftere ville man derfor oppnådd flere fordeler. Ulempen med dette tiltaket er at det ville krevd litt flere pauser i tunneldrivingen, men særlig i Mossetunnelen ville nok gevinsten av bedre kontroll over utført injeksjon være verdt ulempen med flere pauser i tunneldriften.

6.4 Feilkilder

6.4.1 Innsamling av data

Som beskrevet i kapittel 4 er denne oppgaven i stor grad basert på data som er fått fra enten Bane NOR eller MossIA. Dette har gjort det mulig å analysere data fra flere år med tunneldrift, noe som ikke hadde vært mulig å gjøre hvis dataen skulle vært samlet inn på egenhånd. I tillegg har det vært tidsbesparende, noe som har gjort det mulig å analysere mer data. På den andre siden fører det til noen negative konsekvenser for oppgaven.

En av disse konsekvensene er at oppgaven må tilpasses hvilke data som er tilgjengelig. Hvis dataen hadde blitt samlet inn på egenhånd hadde det vært mulig å samle inn den dataen som trengs til oppgaven, men dette er ikke mulig når dataen allerede er samlet inn av andre. Derfor er denne oppgaven i stor grad tilpasset dataen som allerede er samlet inn, noe som har påvirket deler av oppgaven. Et eksempel på en slikt tilpasning er analysene som har blitt gjort av innlekkasjen til tunnelene. Som beskrevet i kapittel 5 er innlekkasjen til tunnelene målt over terskler i tunnelen, og målingene er kun gjort etter at det har vært pause i tunneldrivingen. For denne oppgavens del ville det vært vært nyttig med flere målinger av innlekkasje, både hyppigere målinger og målinger over flere strekninger enn det som er gjort. Dette ville gjort det lettere å sammenligne ulike seksjoner av tunnelene og se utviklingen over tid. Allikevel er oppgaven prisgitt de innlekkasjemålingene som er gjort, noe som begrenser analysene som kan gjøres.

En annen ulempe med at nesten all dataen er hentet fra andre er at det er vanskelig å kvalitetssikre dataen, siden man ikke vet noen om metodene som er brukt for å samle den inn. Et eksempel på dette er innsamlingen av data fra utført injeksjon. Som utdypet i kapittel 5 er det i denne oppgaven brukt data fra mer enn 16 000 injeksjonshull, og all informasjon om disse hullene stammer fra injeksjonsriggen. Det er derimot vanskelig å sjekke hvor vidt informasjonen stemmer, eller om den stammer fra reelle injeksjonshull. I de fleste injeksjonsrapportene er for eksempel forbruket av injeksjonsmasse og injeksjonstrykket i de siste hullene unaturlig lavt, typisk er forbruket omtrent 20 kg med mikroement og sluttrykket mindre enn 10 bar. Siden det ikke er oppgitt noe informasjon om hullene i injeksjonsrapportene, er det umulig å vite med sikkerhet hvor disse hullene stammer fra. Sannsynligvis er dette hull som blir lagt til under vasking av injeksjonsriggen eller lignende, men det finnes ikke noe informasjon om dette i injeksjonsrapportene.

6.4.2 Datamengder

Som nevnt i kapittel 5 er det i denne oppgaven brukt data fra mer enn 16 000 injeksjonshull, fordelt på 350 injeksjonsskjermer og tre ulike tunnelstrekninger. Dermed er store mengder data analysert i denne oppgaven. Dette gjør at det ikke er mulig å bearbeide dataen manuelt. Derfor er det i denne oppgaven brukt enten Excel eller Python for å bearbeide og analysere dataen, noe kan føre til flere feilkilder. Hvis dataen bearbeides manuelt er det som oftest mulig å oppdage data som åpenbart er feil, fordi den skiller seg ut fra resten av dataen. Denne muligheten forsvinner når dataen bearbeides av Python eller Excel. I tillegg kan bearbeidingen av dataen også introdusere feil. Nesten alle injeksjonsrapportene er for eksempel i pdf-format, og derfor er Python blitt brukt til å konvertere dataen til csv-filer. I denne konverteringen kan det ha oppstått feil.

Fordelen med at resultatene i denne oppgaven er basert store mengder med rådata er at feil i enkelte av dataene har liten betydning på sluttresultatet. Hvis det for eksempel er noe feil med alle hullene i en injeksjonsskjerm, cirka 70 hull, vil dette utgjøre under 0,5% av alle injeksjonshullene og under 0,3% av alle injeksjonsskjermene. Enkeltfeil i rådataen har dermed liten betydning, fordi feilene vil utgjøre en liten andel av den totale mengden data.

6.4.3 Manglende data

Selv om det i denne oppgaven er brukt data fra mange injeksjonsskjermer og injeksjonshull er det ikke all utført injeksjon som har blitt analysert. En av grunnene er at det mangler injeksjonsrapporter fra riggen for noen av injeksjonsskjermene. I de fleste av disse tilfellene finnes det injeksjonsrapporter som er fylt ut for hånd, men disse er vanskelige og tidkrevende å tyde. Fordi det kun er noen få injeksjonsrapporter som mangler har det derfor ikke vært prioritert å tyde disse. I noen av injeksjonsrapportene som finnes mangler også mye informasjon om den utførte injeksjonen, noe som gjør at det ikke er noe poeng i å inkludere rapporten i resultatene. Allikevel utgjør de manglende eller ufullstendige injeksjonsrapportene kun en liten andel av det totale antallet med injeksjonsrapporter, noe som gjør konsekvensen liten.

Informasjonen om hvor mye boring som er utført i hver injeksjonsskjerm stammer ikke fra injeksjonsrapportene, men fra Bane NOR. Problemet er at for en del av injeksjonsskjermene mangler det data om utført boring. Dette er tydelig i figur 5.9 og 5.29, hvor grafen ikke er tegnet for deler av tunnelen. Årsaken er at det ikke finnes data fra de delene av tunnelen. Av den grunn er det i realiteten utført mer boring for injeksjonshull enn det resultatene i denne oppgaven viser.

6.4.4 Kunstig overlapp ved fordeling per løpemeter

Som beskrevet i delkapittel 4.4.1 er det brukt en spesifikk metode for å komme frem til fordelingen av bormeter, sementforbruk og netto pumpetid per løpemeter. Denne metoden baserer seg på at alle injeksjonsskjermene har en lengde på 25 meter, noe som ikke

stemmer med realiteten. I realiteten er noen av injeksjonsskjermene kortere enn 25 meter, mens noen få er lengre. Som vist i figur 5.29 kan overlappen mellom injeksjonsskjermer påvirke resultatet en god del.

Hvis det for eksempel er 15 meter mellom to injeksjonsskjermer vil det med metoden som er brukt være 10 meter med overlapp mellom injeksjonsskjermene. Hvis den første injeksjonsskjermen derimot er 21 meter, er det i realiteten kun 6 meter med overlapp mellom de to skjermene, noe som vil gi et annet resultat. Årsaken til at det i denne oppgaven er antatt en lengde på 25 meter for alle injeksjonsskjermene er for effektivitetens skyld. De fleste injeksjonsskjermene har en lengde som er nært 25 meter, derfor er 25 meter et godt estimat. Alternativet ville vært å behandle hver injeksjonsskjerm enkeltvis, og dele utført injeksjon på den reelle lengden av injeksjonsskjermen. Dette ville imidlertid vært mer tidkrevende, fordi hver injeksjonsskjerm da må behandles manuelt. I tillegg er det uansett slik at injeksjonsmassen i virkeligheten ikke fordeler seg likt i injeksjonsskjermen. Derfor vil resultatet man får ved å dele det totale forbruket av injeksjonsmasse på lengden av skjermen uansett kun være et estimat på fordelingen av injeksjonsmasse, uavhengig om man bruker den reelle lengden av injeksjonsskjermen eller en lengde på 25 meter.

7 Konklusjon

I dette prosjektet er det store forskjeller mellom tunnelene med tanke på innlekkasje av vann og utført injeksjon. Mens Carlbergtunnelen har hatt minimalt med innlekkasje av vann og krevd lite injeksjon, har Mossetunnelen hatt store problemer med innlekkasje, og det har blitt utført betydelig mer injeksjon. En av forklaringene på at Mossetunnelen har vært mer krevende er at den krysses av Circle K svakhetssonen, som har krevd mye injeksjon. Denne svakhetssonen alene kan imidlertid ikke forklare forskjellen på de to tunnelene, siden den delen av Mossetunnelen som ikke krysser Circle K svakhetssonen også har krevd mer injeksjon og hatt mer innlekkasje enn Carlbergtunnelen.

Andre forklaringer på forskjellen mellom de to tunnelene kan være at det er flere svakhetssoner som krysser Mossetunnelen, at det er mer leirfylling på sprekkene i Mossetunnelen og at det er mer vann tilgjengelig i nærheten av Mossetunnelen. Det at injeksjonstrykket i Mossetunnelen har vært høyere har sannsynligvis ikke påvirket forbruket av injeksjonsmasse i Mossetunnelen.

Hvis de to tunnelene i prosjektet sammenlignes med de 44 tunnelene Langford mfl. (2022) har beskrevet, plasserer Carlbergtunnelen seg i det nedre sjiktet av tunnelene med tanke på utført injeksjon, mens Mossetunnelen plasserer seg cirka i midten. Hvis de to tunnelene derimot sammenlignes med kriteriet til Klüver og Kveen (2004) plasserer Mossetunnelen seg ganske høyt, mens Carlbergtunnelen plasserer seg lavt.

Disse sammenligningene viser at selv om det har vært problematisk å utføre injeksjon i Mossetunnelen, skiller ikke Mossetunnelen seg signifikant fra andre tunneler, særlig ikke andre tunneler i urbane områder. Carlbergtunnelen skiller seg derimot ut sammenlignet med det som er vanlig med tanke på injeksjon, men i Carlbergtunnelen er det utført mindre injeksjon enn vanlig.

Sammenligningen av injeksjonsmetodene aktiv injeksjon og split-spacing gir ingen tydelig konklusjon om hvilken av de to metodene som har vært best egnet i Mossetunnelen. Årsaken er at split-spacing metoden har blitt brukt langs en strekning som delvis krysses av Circle K svakhetssonen, dermed er de geologiske forholdene for ulike til at metodene kan sammenlignes. Årsaken til at det ikke er mulig å sammenligne disse to metodene under like forhold, er at den eneste strekningen hvor det både er brukt split-spacing og det er målt innlekkasje er strekningen som delvis krysses av Circle K svakhetssonen.

Referanser

- Bane NOR (28. jun. 2019). *Kravspesifikasjon grunnarbeider - tunnel Del I*.
- (4. feb. 2022). *Bane NOR har avbestilt arbeidet i Moss sentrum fra MossIA*. URL: <https://www.banenor.no/nyheter-og-aktuelt/nyheter/2022/bane-nor-har-avbestilt-arbeidet-i-moss-sentrum-fra-mossia/> (sjekket 14.03.2023).
- Bratheim, Jørund (21. des. 2022). «Injeksjon i bergrom - Med fokus på injeksjonsmetoder». NTNU.
- Eklund, Daniel og Håkan Stille (28. jun. 2007). «Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts». I: *Tunneling and Underground Space Technology* 23.4, s. 389–398. DOI: 10.1016/j.tust.2007.06.011.
- Grøv, Eivind, Helene Strømsvik og Martin Hovda Haugsand (7. jan. 2020). *Sementbasert berginjeksjon - Sluttrapport fra prosjektet TIGHT*.
- Hognestad, Hans Olav mfl. (jul. 2010). *Praktisk berginjeksjon for undergrunnsanlegg*. Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk. ISBN: 978-82-92641-20-0.
- Holmøy, Kristin (2008). «Significance of geological parameters for predicting water leakage in hard rock tunnels». Ph.d.-avh. NTNU. ISBN: 978-82-471-1284-7.
- Holter, Karl-Gunnar og Hans-Olav Hognestad (13. feb. 2012). «Modern pre-injection in underground construction with rapid-setting microcements and colloidal silica – applications in conventional and TBM-tunnelling». I: *Geomechanics and Tunneling* 5.1, s. 49–56. DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.201200001>.
- Klüver, Bjørn Helge og Alf Kveen (jan. 2004). *Berginjeksjon i praksis*. Statens Vegvesen.
- Langford, Jenny 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>.
- MossIA ANS (2020a). *Injeksjonsprosedyrer laget av MossIA*.
- (21. jul. 2020b). *Mossetunnelen, Hovedtunnel - Geotechnical report, pre-grouting, excavation and support design*.
 - (26. mar. 2021a). *Carlberggtunnelen - Geoteknisk rapport, forinjeksjon, utgraving og bergsikring design, km 60,260-61,000*.
 - (26. mar. 2021b). *Carlberggtunnelen - Geoteknisk rapport, forinjeksjon, utgraving og bergsikring design, km 61,000-62,369*.
 - (8. apr. 2021c). *Mossetunnelen, Dyprenne Circle K - Geoteknisk rapport, grunnstabilisering, forinjeksjon, utgraving og bergsikring design*.
- Norsk Standard (2. des. 2020). *Utførelse av spesielle geotekniske arbeider - Injeksjon (NS-EN 12175)*.
- Numpy API reference* (2023). URL: <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.corrcoef.html#numpy.corrcoef> (sjekket 12.05.2023).
- Rafi, Jalaleddin og Håkan Stille (apr. 2015). «Basic mechanism of elastic jacking and impact of fracture aperture change on grout spread, transmissivity and penetrability». I: *Tunnelling and Underground Space Technology* 49, s. 174–187. DOI: 10.1016/j.tust.2015.04.002.
- Rafi, Jalaleddin Yaghoobi (2013). *Design approaches for grouting of rock fractures; Theory and practice*. Stiftelsen Bergteknisk forskning.
- Statens Vegvesen (31. mar. 2022). *N500 Vegtunneler*. URL: https://store.vegnorm.vegvesen.no/n500_2022 (sjekket 01.06.2023).

- Strømsvik, Helene (aug. 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. DOI: 10.1016/j.tust.2019.05.014.
- Sweco Rambøll ANS (22. sep. 2017). *Østfoldbanen VL, Sandbukta-Moss-Såstad - Ingeniørgeologisk fagrappport*.
- Wang, Jiguang (2013). «Pearson Correlation Coefficient». I: *Encyclopedia of Systems Biology*. Red. av Werner Dubitzky mfl. New York, NY: Springer New York, s. 1671–1671. ISBN: 978-1-4419-9863-7. DOI: 10.1007/978-1-4419-9863-7_372. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9863-7_372.

Vedlegg

Vedlegg A: Kart over Mossetunnelen

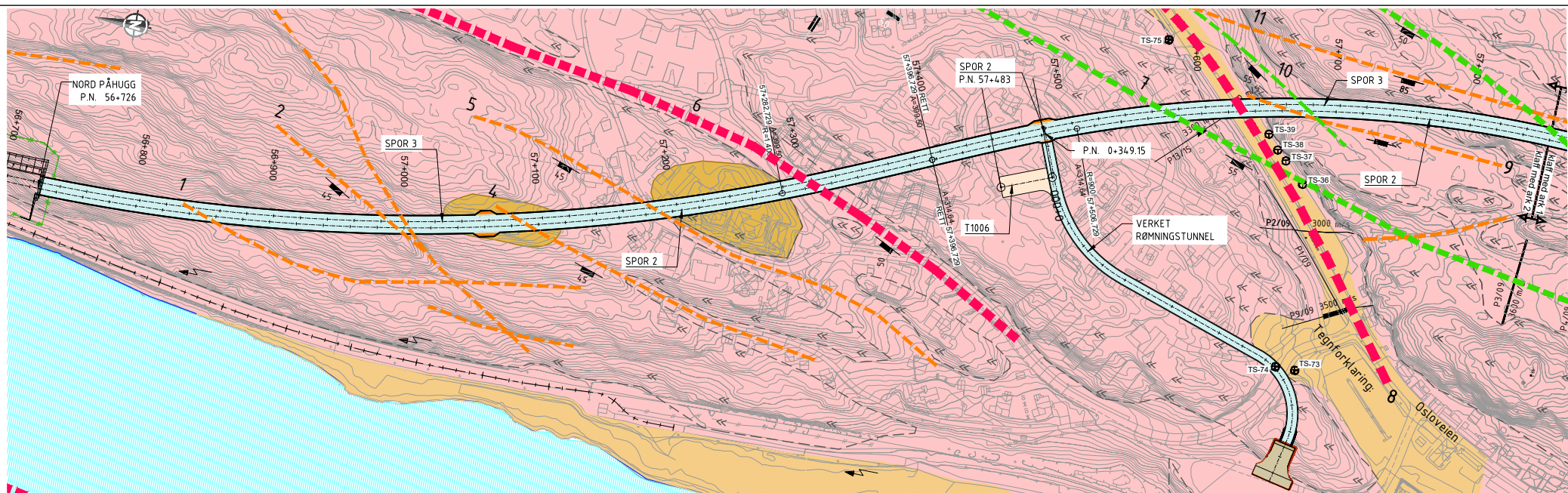
Vedlegg B: Profil av Mossetunnelen

Vedlegg C: Profil av Circle K svakhetssonen, med utførte forundersøkelser

Vedlegg D: Kart over Carlberg tunnelen

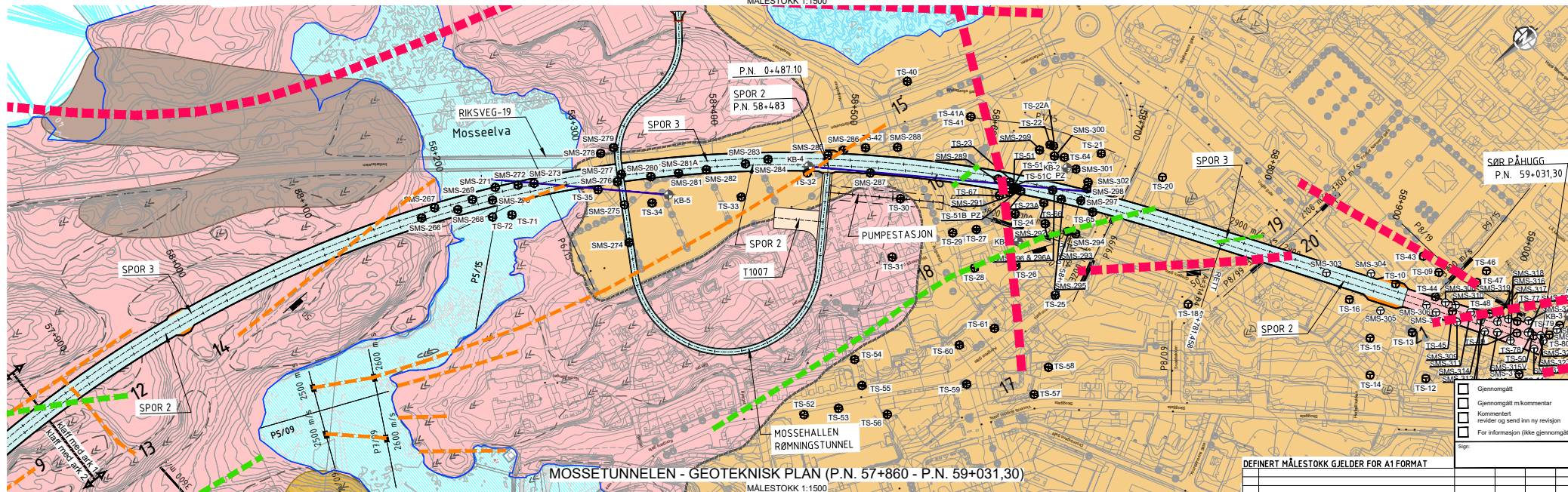
Vedlegg E: Profil av Carlberg tunnelen

Vedlegg A: Kart over Mossetunnelen



MOSS TUNNEL - GEOTEKNISK PLAN (P.N. 56+726 - P.N. 57+860)

MÅLESTOKK 1:1500



MOSSETUNNELLEN - GEOTEKNISK PLAN (P.N. 57+860 - P.N. 59+031,30)

MÅLESTOKK 1:1500

LEGENDE:

BERGARTER (FRA NGUS BERGRUNNSKART, HORTEN 18131)	SVAKHETSSONE, ANTATT BREDD 0-5 m
GRANITISK GNEIS	SVAKHETSSONE, ANTATT BREDD 5-10 m
GRANITISK-KVARTSDIORITISK BIOTITTGNEIS	SVAKHETSSONE, ANTATT BREDD > 10 m
METAGABBRO OG METADOLERITT	SVAKHETSSONE, UKJENT BREDD
AMFIBOLITT	BERGBLOTNING
JORDSMONN:	STRØK/FALL AV SPREKKER
LOSMASSET	
SAND, GRUS OG STEIN/BLOK	
LEIRE OG MORENE	

LEGENDE:

⊕	TOTALSONDERING EKISTERENDE
⊕	KJERNEBORHULL (KB-)
⊕	PRØVESERIE
⊕	REFRAKSJONSEISMISK PROFIL. SONER MED HASTIGHET > 4000 m/s ER UTHEVET.
3000 m/s	

EKSISTERENDE

HENVISNING:

SMS-10-D-55000	til 55002
SMS-10-D-56000	
SMS-10-D-56500	

moSSIA ANS

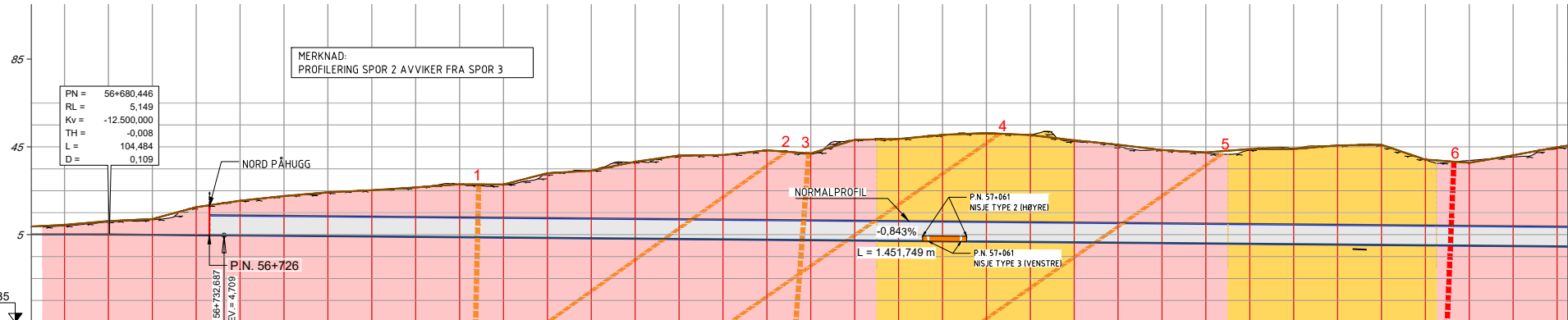
DEFINERT MÅLESTOKK GJELDER FOR A1 FORMAT

DOC	Klar for bygging	08.06.2020	JMP	ASM	GDM
Rev.	Revisjonsgjelder	Dato	Utørk av	Rev. av	Godt av
<p>Østfoldbanen VL, (Ski) - Moss Mossetunnelen Hovedtunnel Geoteknisk plan</p>					
<p>PROSJEKT: 960168 (SMS) PARSELL: 10 Østfoldbanen VL, (Ski)-Moss, Sandbukta-Moss</p>			<p>Dokument/tegningnummer: SMS-10-V-55000</p>		<p>Revisjon: 00C</p>

SMS-10-V-55000_DOC_00-4

Geodetisk referansesystem
 Horisontalt datum: EUREF89
 Prosjeksjon: NTM Sone 10
 Vertikalt datum: NN2000

Vedlegg B: Profil av Mossetunnelen



Profilnummer	56+700	56+800	56+900	57+000	57+100	57+200	57+300	
Tunnelnivå [m.o.h.]	5,171	5,154	5,144	5,129	5,114	5,100	5,086	
Terrengnivå [m.o.h.]	5,45	5,44	5,43	5,42	5,41	5,40	5,39	
Fjelloverdekning [m]	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	
Geologisk formasjon	Gneiss 26.7 / Amphibolite - Metagabbro: 31.1							
Geologisk område	*SBM6	SBM3	SS1	SBM2	SS1	SBM1	SS1	
Lengde [m]	75	45	10	75	20	40	10	
Foliasjon [fall / fallretning]	50 / 290							
Bergmassegenskaper	Styrke	Gneiss 26.7 / Amphibolite - Metagabbro: 31.1						
	Innlekkasje	Gneiss 26.7 / Amphibolite - Metagabbro: 31.1						
Bergmasse	RQD _{un}	90/24	90/12	90/12	90/12	30/12	90/12	
	Jr/Ja	3.0/1.0	3.0/1.0	3/3	3.0/1.0	3/3	3.0/1.0	
	Jw/SRF	1.0/5.0	1.0/5.0	0.66/5	1.0/2.5	0.66/5	1.0/1.0	
	Q (min / maks / hyppigst / mener)	0.42/1.25/1.25/7.95	0.17/5/3.18	*SS1a	0.3/10/10/6.4	*SS1a	0.8/25/25/16	*SS1a
	Young modulus E _m [GPa]	40	40	4.0	40	4.0	40	40
	Friskjonsvinkel Φ _m (°)	45	45	25	45	25	45	45
	Samhold C _m [MPa]	2	2	0.3	2	0.3	2	0.3
	Innelekkasje	-						
	Hydraulisk ledningsevne [m/s]	0-10 ⁻⁶	0-10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁶	0-10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁶	0-10 ⁻⁶
	O Bergmassekvalitet og belastning (%)	A/B Q>10	-	-	17	-	65	-
	C 10>Q>4	-	46	61	-	30	-	
	D 4>Q>1	73	48	20	21	4	20	
	E 1>Q>0.1	27	6	70	1	70	1	
	F 0.1>Q>0.01	-	-	10	-	10	-	
	G 0.01>Q	-	-	-	-	-	-	

*SBM1a = 0.8 / 2.5 / 25 / 16
 *SBM1b = 2.1 / 33.3 / 30 / 23.7
 *SS1a = 0.04 / 2.15 / 0.33 / 0.5
 *SS1b = 1.3 / 12 / 6.7 / 6
 *SBM6 = se tegning SMS-10-V-55021

MOSSETUNNELEN (P.N. 56+726 TIL P.N. 57+345) GEOTEKNISK PROFIL
 MÅLESTOKK 1:1000 / 1:1000

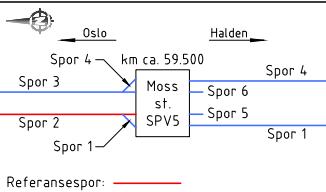
Geodetisk referansesystem
 Horisontalt datum: EUREF89
 Prosjeksjon: NTM Sone 10
 Vertikalt datum: NN2000

MERKNADER:
 • INTERVALLER OG PROSENTANDEL SOM BLE VIST FOR Q-VERDIEN ER VEILEDENDE OG KAN VÆRE FORSKJELLIG FRA DE SOM BLE OPPNÅDD UNDER UTGRAVING.
 • TERRENG OG BERGOVERFLATEN ER REPRESENTERT I PROFILEN SOM FØLGER DEN SENTRALE AKSEN AV TUNNELN. FJELLOVERDEKNING I TVERRRETNINGEN KAN VÆRE MINDRE ENN ANGIT I PROFILEN DENNE FAKTAEN GJENSPEILES I 3D-MODELLEN OG ER ANALYSERT I DETALJ I DESIGNDOKUMENTENE.

LEGNDE:
 BERGARTER
 (FRA NGUS BERGRUNNSKART, HORTEN 1813)
 GRANITITISK GNEIS
 GRANITITISK-KVARTSDIORITISK BIOTITIGNEIS
 METAGABBRO OG METADOLERITT
 AMFIBOLITT

JORDSMONN:
 LOSMASSET
 SAND, GRUS OG STEIN/BLOK
 LEIRE OG MORENE
INNELEKKASJEKRAV:
 5 l/min x 100 m TUNNEL
 10 l/min x 100 m TUNNEL
 SVAKHETSSONE, ANTATT BREDD 0-5 m
 SVAKHETSSONE, ANTATT BREDD 5-10 m
 SVAKHETSSONE, ANTATT BREDD > 10 m
 SVAKHETSSONE, UKJENT BREDD

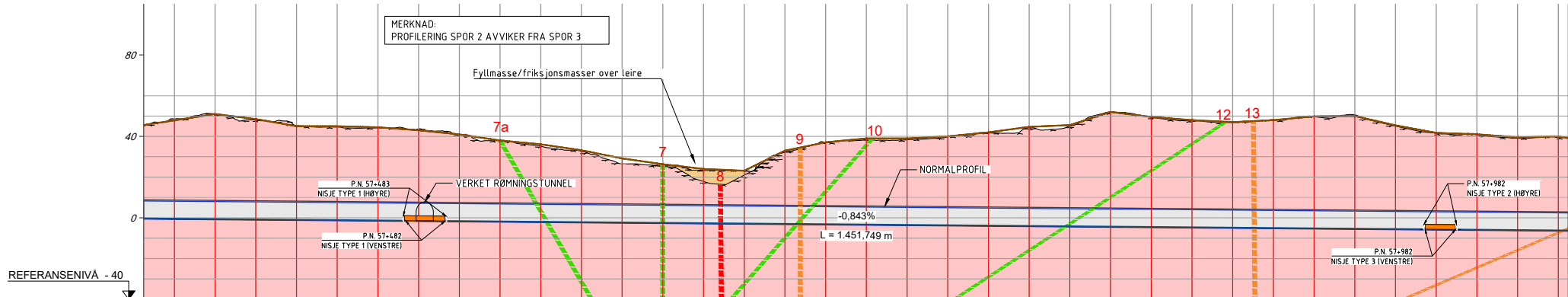
NOMENKLATUR:
 JX = GENERELLE SPREKKER
 TJX = TILFELDIG SPREKKER
 m.o.h. = METER OVER HAVET
 RSP = REFRAKSJONSSSEISMISK PROFIL
 SBM = SUNN BERGMASSE
 SS = SVAKHETSSONE
 TS = TOTALSONDERING



HENVISNING:
 SMS-10-F-55000
 SMS-10-F-55254

DEFINERT MÅLESTOKK GJELDER FOR A1 FORMAT

DDC	Klar for bygging	08.06.2020	JMP	ASM	GDM
Rev.	Revisjonsgjelder	Dato	Utørk av	Rev. av	Godt av
Hovedsak: Mosssetunnelen Saks nr: Project Prosjekt: MOSSIA Prosjekt nr.: Erstatning nr.: Erstatet av:					
Prosjekt: 960168 (SMS) PARSELLE: 10 Østfoldbanen VL, (Ski)-Moss, Sandbukta-Moss SMS-10-V-55001 IDV dokument/tegningsnummer:					
Revisjon:					00C
IDV rev.:					



Geometri	Profilnummer	57+400	57+500	57+600	57+700	57+800	57+900	58+000	
	Tunnelnivå [m.o.h.]	45.9	47.9	49.9	51.9	53.9	55.9	57.9	
	Terrengnivå [m.o.h.]	47.9	49.9	51.9	53.9	55.9	57.9	59.9	
	Fjelloverdekning [m]	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
Geologisk formasjon	Geologisk område	SBM1	SBM4	SBM1	SS1	SBM2	SS1	SBM1	
	Lengde [m]	160	45	35	20	40	20	20	
	Foliasjon [fall / fallretning]	50 / 290							145
Bergmasseegenskaper	Innlekkasje	Gneiss 26.7 / Amphibolite - Metagabbro: 31.1							
		U.C.S. σ_{ci} [MPa]	145	145	145	45	145	45	145
	Young modulus E [GPa]	50	50	50	25	50	25	50	25
	Poisson forhold ν	0.18	0.18	0.18	0.20	0.18	0.20	0.18	0.20
	Orientering [fall / fallretning]	J1=50/290; J2=50/110; J3=90/180; Tilfeldig sprekk J4=25/110; J5= 70/075							
Bergmasse	RQDUn	90/12	90/36	90/12	30/12	90/12	30/12	90/12	30/12
	Jr/Ja	3.0/1.0	3.0/1.0	3.0/1.0	3/3	3.0/1.0	3/3	3.0/1.0	3/3
	Jw/SRF	1.0/1.0	1.0/1.0	1.0/1.0	0.66/5	1.0/2.5	0.66/5	1.0/1.0	0.66/5
	Q [min / maks / hyppigst / mener]	0.8/25/25/16	0.28/3.3/3.3	0.8/25/25/16	*SS1a	0.3/10/10/6.4	*SS1a	0.3/10/10/6.4	*SS1a
	Young modulus E_u [GPa]	40	40	40	40	40	40	40	40
	Friksjonsvinkel ϕ_u [°]	45	45	45	25	45	25	45	25
	Samhold C_u [MPa]	2	2	2	0.3	2	0.3	2	0.3
Hydrologi	Innlekkasje/krav	[Color-coded bar: Green, Yellow, Green]							
	Hydraulisk ledningsevne [m/s]	0-10 ⁻⁶	0-10 ⁻⁶	0-10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁶	0-10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁶	0-10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁶
O Bergmassekvalitet	etog beredelse (%)	A/B Q>10	65	-	65	-	17	-	17
		C 10>Q>4	30	64	30	-	61	-	61
		D 4>Q>1	4	34	4	20	21	20	21
		E 1>Q>0.1	1	2	1	70	1	70	1
		F 0.1>Q>0.01	-	-	-	10	-	10	-
		G 0.01>Q	-	-	-	-	-	-	-

*SBM1a = 0.8 / 25 / 16
 *SBM1b = 2.1 / 33.3 / 30 / 23.7
 *SS1a = 0.04 / 2.15 / 0.33 / 0.5
 *SS1b = 1.3 / 12 / 6.7 / 16

MOSSETUNNELEN (P.N. 57+345 TIL P.N. 58+045) GEOTEKNISK PROFIL
 MÅLESTOKK 1:1000 / 1:1000

Geodetisk referansesystem
 Horisontalt datum: EUREF89
 Prosjeksjon: NTM Sone 10
 Vertikalt datum: NN2000

MERKNADER:

- INTERVALLER OG PROSENTANDEL SOM BLE VIST FOR Q-VERDIEN ER VEILEDENDE OG KAN VÆRE FORSKJELLIG FRA DE SOM BLE OPPNÅDD UNDER UTGRAVING.
- TERRENG OG BERGOVERFLATEN ER REPRESENTERT I PROFILEN SOM FØLGER DEN SENTRALE AKSEN AV TUNNELN. FJELLOVERDEKKNING I TVERRRETNINGEN KAN VÆRE MINDRE ENN ANGITT I PROFILEN. DENNE FAKTAEN GJENSPEILES I 3D-MODELLEN OG ER ANALYSERT I DETALJ I DESIGNDOKUMENTENE.

LEGENDE:

BERGARTER
 (FRA NGUS BERGRUNNSKART, HORTEN 1813)

- GRANITISK GNEIS
- GRANITISK-KVARTSDIORITISK BIOTITGNEIS
- METAGABBRO OG METADOLERITT
- AMFIBOLITT

JORDSMONN:

- LOSMASSET
- SAND, GRUS OG STEIN/BLOK
- LEIRE OG MORENE

INNLEKKASJEKRAV:

- 5 l/min x 100 m TUNNEL
- 10 l/min x 100 m TUNNEL

SVAKHETSSONE, ANTATT BREDDER:

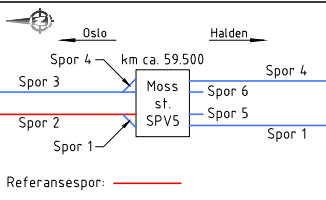
- 0-5 m
- 5-10 m
- > 10 m

UKJENT BREDDER:

- SVAKHETSSONE, UKJENT BREDDER

NOMENKLATUR:

JX = GENERELLE SPREKKER
 TJX = TILFELDIG SPREKKER
 m.o.h. = METER OVER HAVET
 RSP = REFRAKSJONSSPEISK PROFIL
 SBM = SUNN BERGMASSE
 SS = SVAKHETSSONE
 TS = TOTALSONDERING



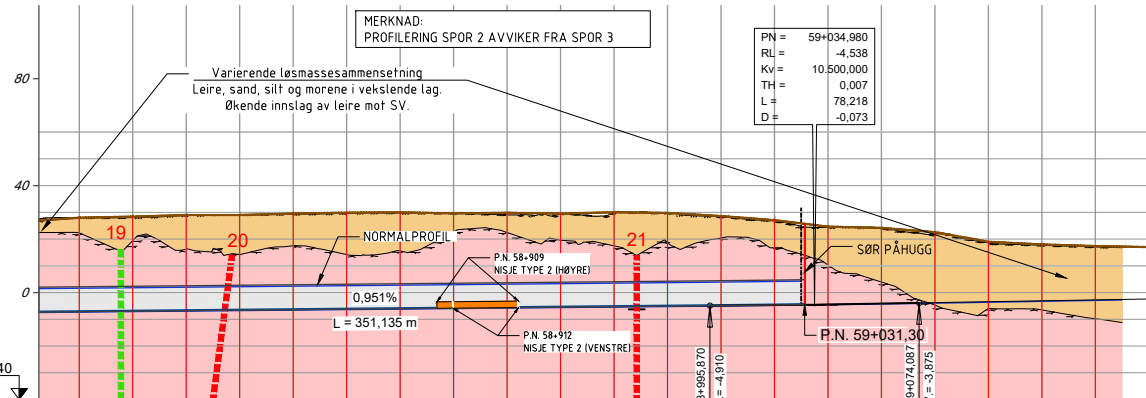
HENVISNING:
 SMS-10-F-55000
 SMS-10-F-55254



DEFINERT MÅLESTOKK GJELDER FOR A1 FORMAT

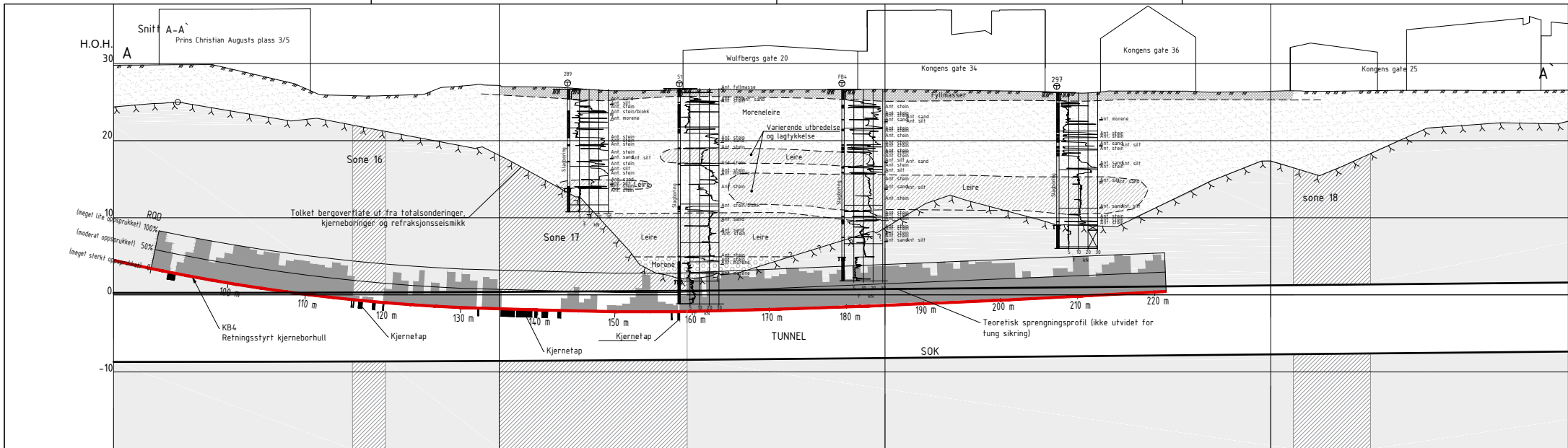
<p>Østfoldbanen VL, (Ski) - Moss Mossetunnelen Hovedtunnel Geoteknisk profil (P.N. 57+345 til P.N. 58+045)</p>	<p>08.06.2020 JHP ASM GDM Date utarbejdet av: JHP ASM GDM Prosjekt: Project Produsent: MOSSIA ANS Prosjektleder: [Blank] Erstatning for: [Blank] Erstatet av: [Blank]</p>	<p>PROSJEKT: 960168 (SMS) PARSELL: 10 Østfoldbanen VL, (Ski)-Moss, Sandbukta-Moss SMS-10-V-55002 00C</p>
---	--	---

Gjennomgått
 Gjennomgått m/kommentar
 Kommentert
 revider og send inn ny revisjon
 For informasjon (ikke gjennomgått)
 Sign:



Geometri	Profilnummer	58+800						58+900						58+100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	Tunnelnivå [m.o.h.]	7.15	6.98	6.77	6.58	6.39	6.20	6.01	5.82	5.63	5.44	5.25	5.06	4.87	4.68	4.49	4.30	4.11	3.92	3.73	3.54	3.35	3.16	2.97	2.78	2.59	2.40	2.21	2.02	1.83	1.64	1.45	1.26	1.07	0.88	0.69	0.50	0.31	0.12	-0.07	-0.26	-0.45	-0.64	-0.83	-1.02	-1.21	-1.40	-1.59	-1.78	-1.97	-2.16	-2.35	-2.54	-2.73	-2.92	-3.11	-3.30	-3.49	-3.68	-3.87	-4.06	-4.25	-4.44	-4.63	-4.82	-5.01	-5.20	-5.39	-5.58	-5.77	-5.96	-6.15	-6.34	-6.53	-6.72	-6.91	-7.10	-7.29	-7.48	-7.67	-7.86	-8.05	-8.24	-8.43	-8.62	-8.81	-9.00	-9.19	-9.38	-9.57	-9.76	-9.95	-10.14	-10.33	-10.52	-10.71	-10.90	-11.09	-11.28	-11.47	-11.66	-11.85	-12.04	-12.23	-12.42	-12.61	-12.80	-12.99	-13.18	-13.37	-13.56	-13.75	-13.94	-14.13	-14.32	-14.51	-14.70	-14.89	-15.08	-15.27	-15.46	-15.65	-15.84	-16.03	-16.22	-16.41	-16.60	-16.79	-16.98	-17.17	-17.36	-17.55	-17.74	-17.93	-18.12	-18.31	-18.50	-18.69	-18.88	-19.07	-19.26	-19.45	-19.64	-19.83	-20.02	-20.21	-20.40	-20.59	-20.78	-20.97	-21.16	-21.35	-21.54	-21.73	-21.92	-22.11	-22.30	-22.49	-22.68	-22.87	-23.06	-23.25	-23.44	-23.63	-23.82	-24.01	-24.20	-24.39	-24.58	-24.77	-24.96	-25.15	-25.34	-25.53	-25.72	-25.91	-26.10	-26.29	-26.48	-26.67	-26.86	-27.05	-27.24	-27.43	-27.62	-27.81	-28.00	-28.19	-28.38	-28.57	-28.76	-28.95	-29.14	-29.33	-29.52	-29.71	-29.90	-30.09	-30.28	-30.47	-30.66	-30.85	-31.04	-31.23	-31.42	-31.61	-31.80	-31.99	-32.18	-32.37	-32.56	-32.75	-32.94	-33.13	-33.32	-33.51	-33.70	-33.89	-34.08	-34.27	-34.46	-34.65	-34.84	-35.03	-35.22	-35.41	-35.60	-35.79	-35.98	-36.17	-36.36	-36.55	-36.74	-36.93	-37.12	-37.31	-37.50	-37.69	-37.88	-38.07	-38.26	-38.45	-38.64	-38.83	-39.02	-39.21	-39.40	-39.59	-39.78	-39.97	-40.16	-40.35	-40.54	-40.73	-40.92	-41.11	-41.30	-41.49	-41.68	-41.87	-42.06	-42.25	-42.44	-42.63	-42.82	-43.01	-43.20	-43.39	-43.58	-43.77	-43.96	-44.15	-44.34	-44.53	-44.72	-44.91	-45.10	-45.29	-45.48	-45.67	-45.86	-46.05	-46.24	-46.43	-46.62	-46.81	-47.00	-47.19	-47.38	-47.57	-47.76	-47.95	-48.14	-48.33	-48.52	-48.71	-48.90	-49.09	-49.28	-49.47	-49.66	-49.85	-50.04	-50.23	-50.42	-50.61	-50.80	-50.99	-51.18	-51.37	-51.56	-51.75	-51.94	-52.13	-52.32	-52.51	-52.70	-52.89	-53.08	-53.27	-53.46	-53.65	-53.84	-54.03	-54.22	-54.41	-54.60	-54.79	-54.98	-55.17	-55.36	-55.55	-55.74	-55.93	-56.12	-56.31	-56.50	-56.69	-56.88	-57.07	-57.26	-57.45	-57.64	-57.83	-58.02	-58.21	-58.40	-58.59	-58.78	-58.97	-59.16	-59.35	-59.54	-59.73	-59.92	-60.11	-60.30	-60.49	-60.68	-60.87	-61.06	-61.25	-61.44	-61.63	-61.82	-62.01	-62.20	-62.39	-62.58	-62.77	-62.96	-63.15	-63.34	-63.53	-63.72	-63.91	-64.10	-64.29	-64.48	-64.67	-64.86	-65.05	-65.24	-65.43	-65.62	-65.81	-66.00	-66.19	-66.38	-66.57	-66.76	-66.95	-67.14	-67.33	-67.52	-67.71	-67.90	-68.09	-68.28	-68.47	-68.66	-68.85	-69.04	-69.23	-69.42	-69.61	-69.80	-69.99	-70.18	-70.37	-70.56	-70.75	-70.94	-71.13	-71.32	-71.51	-71.70	-71.89	-72.08	-72.27	-72.46	-72.65	-72.84	-73.03	-73.22	-73.41	-73.60	-73.79	-73.98	-74.17	-74.36	-74.55	-74.74	-74.93	-75.12	-75.31	-75.50	-75.69	-75.88	-76.07	-76.26	-76.45	-76.64	-76.83	-77.02	-77.21	-77.40	-77.59	-77.78	-77.97	-78.16	-78.35	-78.54	-78.73	-78.92	-79.11	-79.30	-79.49	-79.68	-79.87	-80.06	-80.25	-80.44	-80.63	-80.82	-81.01	-81.20	-81.39	-81.58	-81.77	-81.96	-82.15	-82.34	-82.53	-82.72	-82.91	-83.10	-83.29	-83.48	-83.67	-83.86	-84.05	-84.24	-84.43	-84.62	-84.81	-85.00	-85.19	-85.38	-85.57	-85.76	-85.95	-86.14	-86.33	-86.52	-86.71	-86.90	-87.09	-87.28	-87.47	-87.66	-87.85	-88.04	-88.23	-88.42	-88.61	-88.80	-88.99	-89.18	-89.37	-89.56	-89.75	-89.94	-90.13	-90.32	-90.51	-90.70	-90.89	-91.08	-91.27	-91.46	-91.65	-91.84	-92.03	-92.22	-92.41	-92.60	-92.79	-92.98	-93.17	-93.36	-93.55	-93.74	-93.93	-94.12	-94.31	-94.50	-94.69	-94.88	-95.07	-95.26	-95.45	-95.64	-95.83	-96.02	-96.21	-96.40	-96.59	-96.78	-96.97	-97.16	-97.35	-97.54	-97.73	-97.92	-98.11	-98.30	-98.49	-98.68	-98.87	-99.06	-99.25	-99.44	-99.63	-99.82	-100.01	-100.20	-100.39	-100.58	-100.77	-100.96	-101.15	-101.34	-101.53	-101.72	-101.91	-102.10	-102.29	-102.48	-102.67	-102.86	-103.05	-103.24	-103.43	-103.62	-103.81	-104.00	-104.19	-104.38	-104.57	-104.76	-104.95	-105.14	-105.33	-105.52	-105.71	-105.90	-106.09	-106.28	-106.47	-106.66	-106.85	-107.04	-107.23	-107.42	-107.61	-107.80	-107.99	-108.18	-108.37	-108.56	-108.75	-108.94	-109.13	-109.32	-109.51	-109.70	-109.89	-110.08	-110.27	-110.46	-110.65	-110.84	-111.03	-111.22	-111.41	-111.60	-111.79	-111.98	-112.17	-112.36	-112.55	-112.74	-112.93	-113.12	-113.31	-113.50	-113.69	-113.88	-114.07	-114.26	-114.45	-114.64	-114.83	-115.02	-115.21	-115.40	-115.59	-115.78	-115.97	-116.16	-116.35	-116.54	-116.73	-116.92	-117.11	-117.30	-117.49	-117.68	-117.87	-118.06	-118.25	-118.44	-118.63	-118.82	-119.01	-119.20	-119.39	-119.58	-119.77	-119.96	-120.15	-120.34	-120.53	-120.72	-120.91	-121.10	-121.29	-121.48	-121.67	-121.86	-122.05	-122.24	-122.43	-122.62	-122.81	-123.00	-123.19	-123.38	-123.57	-123.76	-123.95	-124.14	-124.33	-124.52	-124.71	-124.90	-125.09	-125.28	-125.47	-125.66	-125.85	-126.04	-126.23	-126.42	-126.61	-126.80	-126.99	-127.18	-127.37	-127.56	-127.75	-127.94	-128.13	-128.32	-128.51	-128.70	-128.89	-129.08	-129.27	-129.46	-129.65	-129.84	-130.03	-130.22	-130.41	-130.60	-130.79	-130.98	-131.17	-131.36	-131.55	-131.74	-131.93	-132.12	-132.31	-132.50	-132.69	-132.88	-133.07	-133.26	-133.45	-133.64	-133.83	-134.02	-134.21	-134.40	-134.59	-134.78	-134.97	-135.16	-135.35	-135.54	-135.73	-135.92	-136.11	-136.30	-136.49	-136.68	-136.87	-137.06	-137.25	-137.44	-137.63	-137.82	-138.01	-138.20	-138.39	-138.58	-138.77	-138.96	-139.15	-139.34	-139.53	-139.72	-139.91	-140.10	-140.29	-140.48	-140.67	-140.86	-141.05	-141.24	-141.43	-141.62	-141.81	-142.00	-142.19	-142.38	-142.57	-142.76	-142.95	-143.14	-143.33	-143.52	-143.71	-143.90	-144.09	-144.28	-144.47	-144.66	-144.85	-145.04	-145.23	-145.42	-145.61	-145.80	-145.99	-146.18	-146.37	-146.56	-146.75	-146.94	-147.13	-147.32	-147.51	-147.70	-147.89	-148.08	-148.27	-148.46	-148.65	-148.84	-149.03	-149.22	-149.41	-149.60	-149.79	-149.98	-150.17	-150.36	-150.55	-150.74	-150.93	-151.12	-151.31	-151.50	-151.69	-151.88	-152.07	-152.26	-152.45	-152.64	-152.83	-153.02	-153.21	-153.40	-153.59	-153.78	-153.97	-154.16	-154.35	-154.54	-154.73	-154.92	-155.11	-155.30	-155.49	-155.68	-155.87	-156.06	-156.25	-156.44	-156.63	-156.82	-157.01	-157.20	-157.39	-157.58	-157.77	-157.96	-158.15	-158.34	-158.53	-158.72	-158.91	-159.10	-159.29	-159.48	-159.67	-159.86	-160.05	-160.24	-160.43	-160.62	-160.81	-161.00	-161.19	-161.38	-161.57	-161.76	-161.95	-162.14	-162.33	-162.52	-162.71	-162.90	-163.09	-163.28	-163.47	-163.66	-163.85	-164.04	-164.23	-164.42	-164.61	-164.80	-164.99	-165.18	-165.37	-165.56	-165.75	-165.94	-166.13	-166.32	-166.51	-166.70	-166.89	-167.08	-167.27	-167.46	-167.65	-167.84	-168.03	-168.22	-168.41	-168.60	-168.79	-168.98	-169.17	-169.36	-169.55	-169.74	-169.93	-170.12	-170.31	-170.50	-170.69	-170.88	-171.07	-171.26	-171.45	-171.64	-171.83	-172.02	-172.21	-172.40	-172.59	-172.78	-172.97	-173.16	-173.35	-173.54	-173.73	-173.92	-174.11	-174.30	-174.49	-174.68	-174.87	-175.06	-175.25	-175.44	-175.63	-175.82	-176.01	-176.20	-176.39	-176.58	-176.77	-176.96	-177.15	-177.34	-177.53	-177.72	-177.91	-178.10	-178.29	-178.48	-178.67	-178.86	-179.05	-179.24	-179.43	-179.62	-179.81	-179.99	-180.18	-180.37	-180.56	-180.75	-180.94	-181.13	-181.32	-181.51	-181.70	-181.89	-182.08	-182.27	-182.46	-182.65	-182.84	-183.03	-183.22	-183.41	-183.60	-183.79	-183.98	-184.17	-184.36	-184.55	-184.74	-184.93	-185.12	-185.31	-185.50	-185.69	-185.88	-186.07	-186.26	-186.45	-186.64	-186.83	-187.02	-187.21	-187.40	-187.59	-187.78	-187.97	-188.16	-188.35	-188.54	-188.73	-188.92	-189.11	-189.30	-189.49	-189.68	-189.87	-190.06	-190.25	-190.44	-190.63	-190.82	-191.01	-191.20	-191.39	-191.58	-191.77	-191.96	-192.15	-192.34	-192.53	-192.72	-192.91	-193.10	-193.29	-193.48	-193.67	-193.86	-194.05	-194.24	-194.43	-194.62	-194.81	-195.00	-195.19	-195.38	-195.57	-195.76	-195.95	-196.14	-196.33	-196.52	-196.71	-196.90	-197.09	-197.28	-197.47	-197.66	-197.85	-198.04	-198.23	-198.42	-198.61	-198.80	-198.99	-199.18	-199.37	-199.56	-199.75	-199.94	-200.13	-200.32	-200.51	-200.70	-200.89	-201.08	-201.27	-201.46	-201.65	-201.84	-202.03	-202.22	-202.41	-202.60	-202.79	-202.98	-203.17	-203.36	-203.55	-203.74	-203.93	-204.12	-204.31	-204.50	-204.69	-204.88	-205.07	-205.26	-205.45	-205.64	-205.83	-206.02	-206.21	-206.40	-206.59	-206.78	-206.97	-207.16	-207.35	-207.54	-207.73	-207.92	-208.11	-208.30	-208.49	-208.68	-208.87	-209.06	-209.25	-209.44	-209.63	-209.82	-210.01	-210.20	-210.39	-210.58	-210.77	-210.96	-211.15	-211.34	-211.53	-211.72	-211.91	-212.10	-212.

Vedlegg C: Profil av Circle K svakhetssonen, med utførte
forundersøkelser

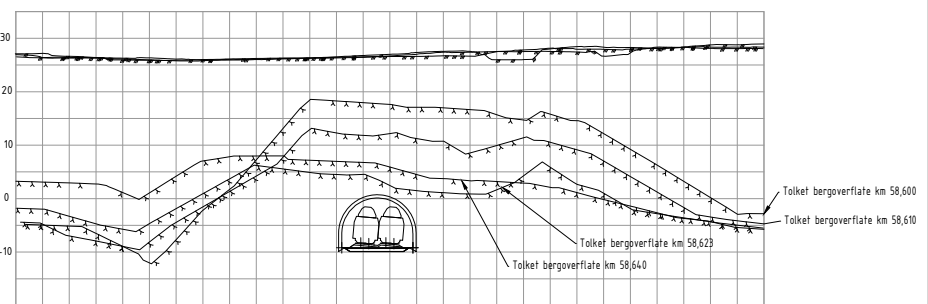
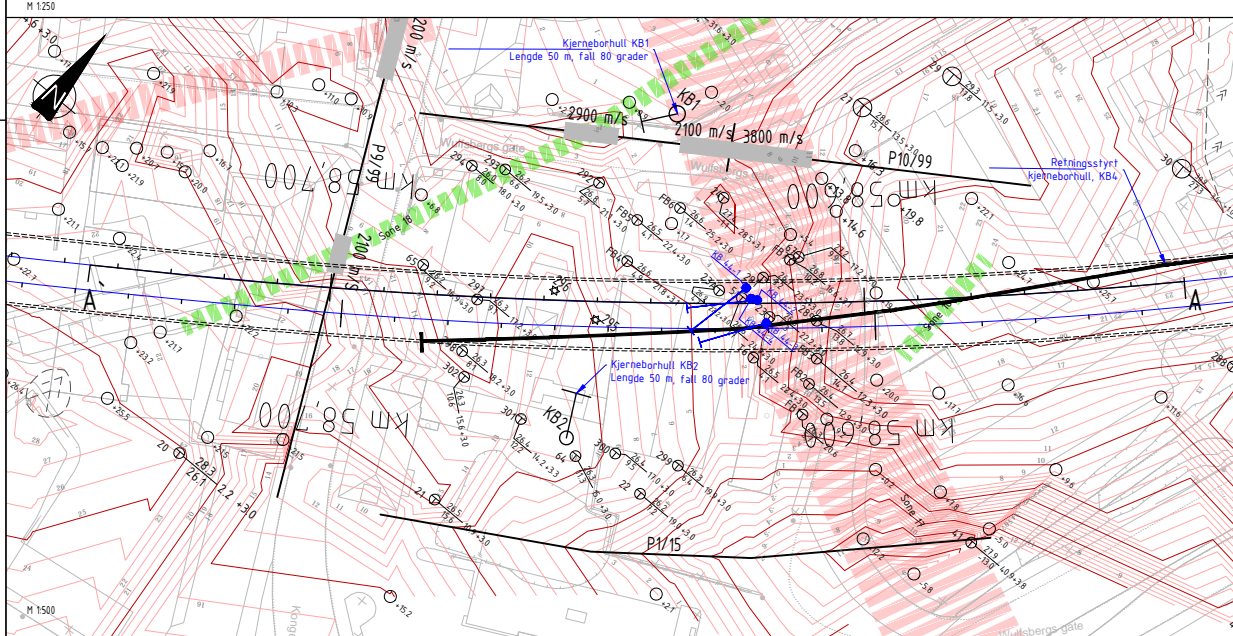


PROFIL NR. 58550

58600

58650

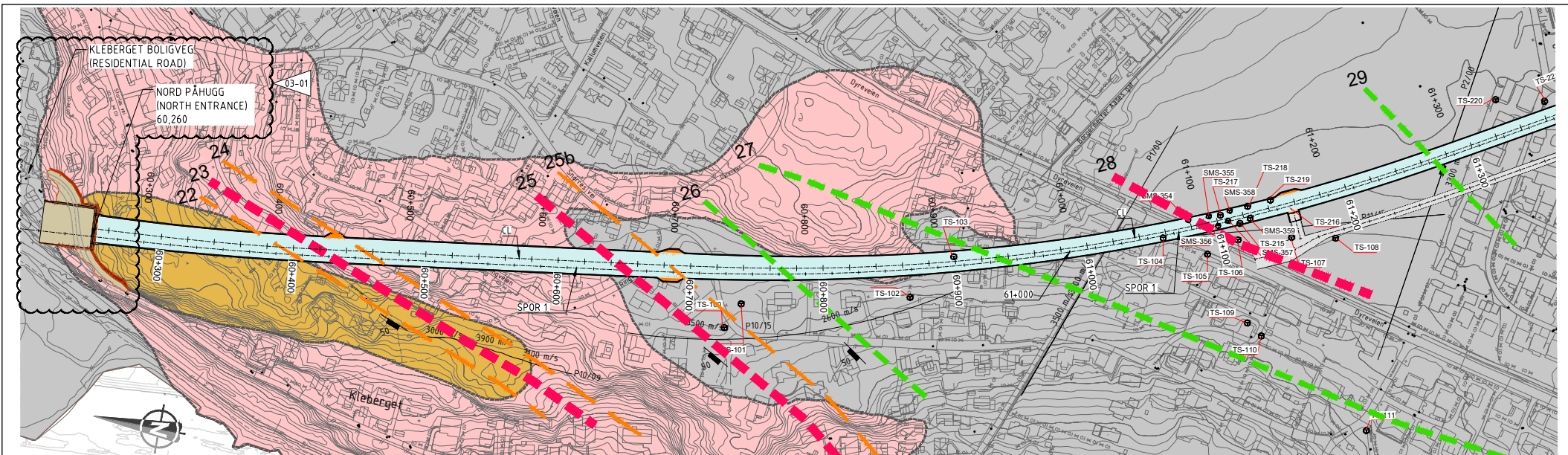
58700



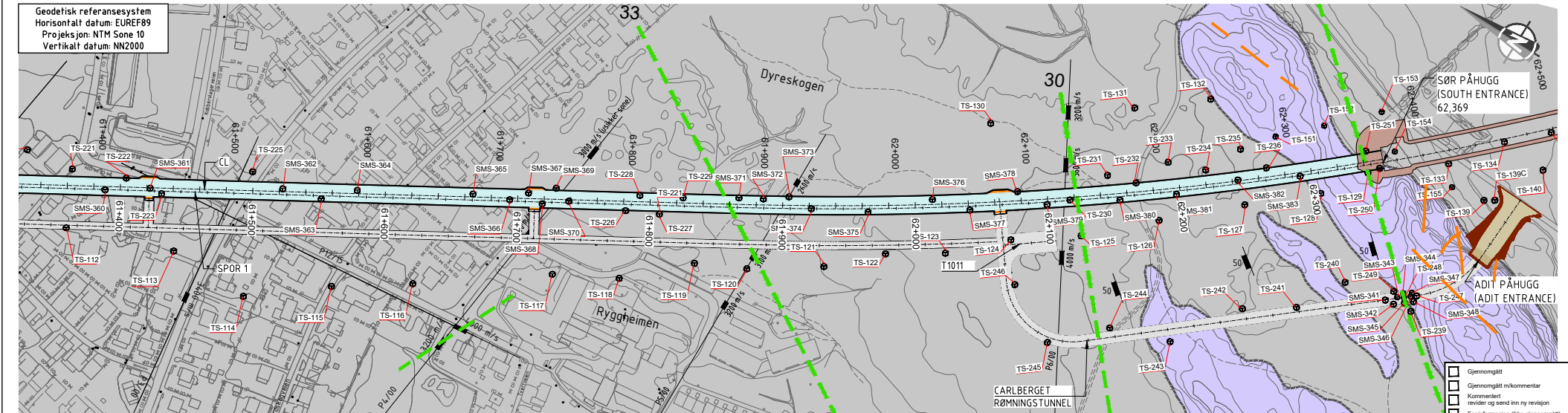
- Tegnforklaring:**
- Svakhetszone, antatt bredde 0-5 m
 - Svakhetszone, antatt bredde 5-10 m
 - Svakhetszone, antatt bredde > 10 m
 - A Berglotning
 - Refraksjonssismisk profil. Soner med hastighet < 4000 m/s er uthevet.
 - Leire
 - Morene
 - Fyllmasser
 - Blanding av sand, morene og stein
 - ⊕ Totalsondering
 - ⊕ Terrengekote
 - ⊕ Boret dybde + boret i fjell
 - ⊕ Antatt fjellkote
 - Angivelse av bergkote fra tidligere boringer
 - Kjerneboring
 - Start borhull
 - Slutt borhull
 - RQD: Rock Quality Designation (oppsprekkingsstall)
 - 10 Bergkoter
 - 9 Bergkoter

Kilde kartdata: Norge digitalt	Geodetisk referanse Horisontal: EUREF89/NTM Sone 10 Vertikal: NNZ2000																																
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">03B</td> <td style="width: 45%;">Ny grunnundersøkningsdata</td> <td style="width: 15%;">22.09.2017</td> <td style="width: 25%;">ANNA</td> <td style="width: 10%;">BENT</td> <td style="width: 10%;">AFL</td> </tr> <tr> <td>03C</td> <td>Revidert detaljan</td> <td>16.02.2018</td> <td>ANNA</td> <td>BENT</td> <td>JØBA</td> </tr> <tr> <td>03D</td> <td>Revidert detaljan</td> <td>16.02.2018</td> <td>ANNA</td> <td>BENT</td> <td>SYL</td> </tr> <tr> <td>03E</td> <td>Første utgåve</td> <td>08.01.2018</td> <td>ANNA</td> <td>BENT</td> <td>SYL</td> </tr> <tr> <td>Rev.</td> <td>Revisjonen gjelder</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		03B	Ny grunnundersøkningsdata	22.09.2017	ANNA	BENT	AFL	03C	Revidert detaljan	16.02.2018	ANNA	BENT	JØBA	03D	Revidert detaljan	16.02.2018	ANNA	BENT	SYL	03E	Første utgåve	08.01.2018	ANNA	BENT	SYL	Rev.	Revisjonen gjelder				
03B	Ny grunnundersøkningsdata	22.09.2017	ANNA	BENT	AFL																												
03C	Revidert detaljan	16.02.2018	ANNA	BENT	JØBA																												
03D	Revidert detaljan	16.02.2018	ANNA	BENT	SYL																												
03E	Første utgåve	08.01.2018	ANNA	BENT	SYL																												
Rev.	Revisjonen gjelder																																
<p>Østfoldbanen VL (ISKI) - Moss Sandbukta - Moss Km 58,450 - 58,800 Ingeniørgeoslogisk detaljtegning, dyprenne i Moss</p>		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Prosjekt:</td> <td style="width: 45%;">960168 (SMS)</td> <td style="width: 15%;">15.09.2016</td> <td style="width: 25%;">ANNA</td> <td style="width: 10%;">BENT</td> <td style="width: 10%;">AFL</td> </tr> <tr> <td>Parcell:</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="6"> <p style="text-align: center;">SMS-10-V-22005</p> </td> </tr> </table>		Prosjekt:	960168 (SMS)	15.09.2016	ANNA	BENT	AFL	Parcell:	10					<p style="text-align: center;">SMS-10-V-22005</p>																	
Prosjekt:	960168 (SMS)	15.09.2016	ANNA	BENT	AFL																												
Parcell:	10																																
<p style="text-align: center;">SMS-10-V-22005</p>																																	
<p>BANE NOR</p>		<p>Rev. 03B</p>																															

Vedlegg D: Kart over Carlbergtunnelen



CARLBERG TUNNEL (P.N. 60,260 - P.N. 61,360)
 GEOTEKNISK PLAN (GEOTECHNICAL PLAN)
 MÅLESTOKK (SCALE) 1:1500



CARLBERG TUNNEL (P.N. 61,360 - P.N. 62,369)
 GEOTEKNISK PLAN (GEOTECHNICAL PLAN)
 MÅLESTOKK (SCALE) 1:1500

- LEGENDE (LEGEND):**
- BERGARTER (FRA NGUS BERGRUNNSKART, HORTEN 1813)
 ROCKS (FROM NGUS MOUNTAIN MAP, HORTEN 1813)
- GRANITISK GNEIS (GRANITE GNEISS)
 - GRANITISK - KVARTSDIORITISK (GRANITIC - QUARTZDIORITIC)
 - METAGABBRO OG METADOLERITT (METAGABBRO AND METADOLERITE)
 - AMFIBOLITT (AMFIBOLITE)
- JORDSMONN (SOILS)
- LØSMASSER (LOOSE MASSES)
 - SAND, GRUS OG STEIN/BLOKK (SAND, GRAVEL AND STONE / BLOCKS)
 - LEIRE OG MORENE (CLAY AND MORENE)

- SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) 0-5 m
 - SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) 5-10 m
 - SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) >10 m
 - SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) UKJENT BREDD (UNKNOWN WIDTH)
- BERGLOTNING (ROCK EXPOSURE)
- STRØK / FALL AV SPREKKER (STRYKE/FALL OF CRACKS)

- EKSISTERENDE (EXISTING)**
- TOTALSONDERING EKSISTERENDE (EXISTING TOTAL SOUNDING)
 - KJERNEBORHULL (CORE DRILLING)
 - PRØVERISER (SOIL SAMPLINGS)
 - REFRAKSJONSEISMIKK PROFIL - SONER MED HASTIGHET > 4000 M/S ER UTHEVET (REFRACTION SEISMIC PROFILE. ZONES WITH SPEED >4000 M / S ARE HIGHLIGHTED)
- 3000 m/s

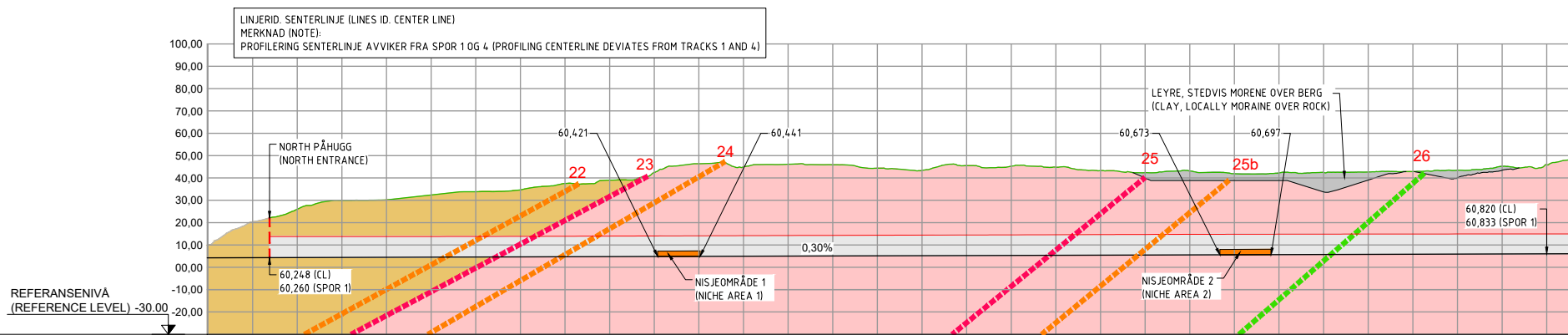
HENVISNING (REFERENCES):



DEFINERT MÅLESTOKK GJELDER FOR A1 FORMAT				
03C	Klar for bygging	26.05.2021	JHP	ASH GDM
02C	Klar for bygging	25.03.2021	JHP	ASH GDM
01C	Klar for bygging	09.10.2020	JHP	ASH GDM
00C	Klar for bygging	26.08.2020	JHP	ASH GDM
Rev.	Revisjonen gjelder			

Bstfaldbanen VL, (Moss) - Sarpsborg Carlbergtunnelen		Revisjon	
Driving, bergsikring og utgraving		Revisjon	
Geoteknisk plan		Revisjon	
PROSJEKT: 960168 (SMS)		Revisjon	
PARSELL: 30		Revisjon	
SMS-30-V-55000		Revisjon	
FDV aksept/tegningssaker		Revisjon	
FDV rev.		Revisjon	

Vedlegg E: Profil av Carlbergtunnelen



Geometri (Geometry)		Profilnummer (Profil number)											
Tunnelnivå (Tunnel level) [m.o.h.]		00-02											
Terrengnivå (Ground level) [m.o.h.]		60+300, 60+400, 60+500, 60+600, 60+700, 60+800											
Fjelloverdekning (Rock cover) [m]		60,248 (CL), 60,260 (SPOR 1), 60,421, 22, 23, 60,441, 24, 60,673, 25, 25b, 60,697, 26, 60,820 (CL), 60,833 (SPOR 1)											
Geologisk formasjon (Geological formation)		SBM6*, SBM3, SS1, SBM1, SS1, SBM1, SS1, SBM2, SS1, SBM1											
Geologisk område (Geological area)		SBM6*, SBM3, SS1, SBM1, SS1, SBM1, SS1, SBM2, SS1, SBM1											
Lengde (Length) [m]		20, 90.36, 70, 190, 30, 20, 10, 65, 20, 145											
Foliasjon (Foliation) [fall / fallretning] (dip/dip direction)		55 / 280											
Bergmassegenskaper (Rock mass properties)		Gneiss 26.7 / Amphibolite - Metagabbro: 31.1											
		Inntak berg (Intact rock)		U.C.S. σ_{cd} [MPa], Young modulus E_r [GPa], Poisson forhold (Ratio) ν									
Bergmasse (Rock mass)		Sprekkesett (Crack set)											
		RQD/Un		Orientation (fall / fallretning) (Orientation (dip/dip direction))									
Hydrogeologi (Hydrogeology)		Innlekkasje/krav (Leakage requirement)											
		Hydraulisk ledningsevne (Hydraulic Conductivity) [m/s]		10^{-5} - 10^{-6} , 10^{-9} - 10^{-6} , 10^{-5} - 10^{-6} , 10^{-9} - 10^{-6} , 10^{-5} - 10^{-6} , 10^{-9} - 10^{-6} , 10^{-5} - 10^{-6} , 10^{-9} - 10^{-6}									
Q Bergmassekvalitet og berøstøtte (%) (Rock mass quality and rock support class (%))		J1=55/280; J2=50/110; J3=85/185; Tilfeldig sprekke J4=30/115; J5=65/060											
		A/B Q>10		30									
Q Bergmassekvalitet og berøstøtte (%) (Rock mass quality and rock support class (%))		C 10>Q>4		55									
		D 4>Q>1		15									
Q Bergmassekvalitet og berøstøtte (%) (Rock mass quality and rock support class (%))		E 1>Q>0.1		85									
		F 0.1>Q>0.01		-									
Q Bergmassekvalitet og berøstøtte (%) (Rock mass quality and rock support class (%))		G 0.01>Q		-									
		-		-									

*SBM1 = 2/20/10.6/10.2
 *SBM2 = 2.7/5/4.2/4
 *SBM3 = 0.4/2.5/1.1/1.2
 *SBM6 = 0.35/1/1.3/1.15
 SBM6 = 0.5/1.5/0.75/0.85
 *SS1 = 0.04/2.15/0.33/0.5

CARLBERGTUNNELN (P.N. 60,248 TIL P.N. 60,820 I HENHOLD CL // P.N. 60,260 TIL P.N. 60,833 I HENHOLD SPOR 1)
 GEOTEKNISK PROFIL (GEOTECHNICAL PROFILE)
 MÅLESTOKK (SCALE) 1:1000 / 1:1000

Geodetisk referansesystem
 Horisontfält datum: EUREF89
 Prosjeksjon: NTM Sone 10
 Vertikalt datum: NN2000

MERKNADER (NOTES):
 • INTERVALLER OG PROSENTANDEL SOM BLE VIST FOR Q-VERDIEN ER VEILEDENDE OG KAN VÆRE FORSKJELLIG FRA DE SOM BLE OPPNÅDD UNDER UTGRAVNING.
 (INTERVALS AND PERCENTAGE SHOWN FOR THE Q + VALUE ARE INDICATIVE AND MAY DIFFER FROM THOSE OBTAINED DURING EXCAVATION).
 • TERRENG OG BERGOVERFLATEN ER REPRESENTERT I PROFILEN SOM FØLGER DEN SENTRALE AKSEN AV TUNNELN. FJELLOVERDEKKNING I TVERRRETNINGEN KAN VÆRE MINDRE ENN ANGIT I PROFILEN. DENNE FAKTAEN GJENSPEILES I 3D-MODELLEN OG ER ANALYSERT I DETALJ I DESIGNDOKUMENTENE.
 (THE GROUND AND ROCK SURFACE ARE REPRESENTED IN THE PROFILE FOLLOWING THE CENTRAL AXIS OF THE TUNNEL. ROCK COVERAGE IN THE CROSS DIRECTION MAY BE LESS THAN INDICATED IN THE PROFILE. THIS FACT IS REFLECTED IN THE 3D MODEL AND IS ANALYZED IN DETAIL IN THE DESIGN DOCUMENTS).

LEGENDE (LEGEND):
 BERGARTER (FRA ROSA BERGRUNNSKART, HORTEN 1813I)
 ■ GRANITISK GNEISS (GRANITE GNEISS)
 ■ GRANITISK - KVARTSDIORITISK (GRANITE - QUARTZDIORITIC)
 ■ METAGABBRO OG METADOLERITT (METAGABBRO AND METADOLERITE)
 ■ AMFIBOLITT (AMFIBOLITE)

JORDSMONN (SOILS)
 ■ LØSMASSER (LOOSE MASSES)
 ■ SAND, GRUS OG STEIN/BLOKK (SAND, GRAVEL AND STONE / BLOCKS)
 ■ LEIRE OG MORENE (CLAY AND MORENE)
 INNLEKKASJEKRAV (LEAKAGE REQUIREMENTS)
 ■ 5 l/min x 100 m TUNNEL
 ■ 10 l/min x 100 m TUNNEL
 SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) 0-5 m
 ■ SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) 5-10 m
 ■ SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) >10 m
 ■ SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) UKJENT BREDD (UNKNOWN WIDTH)

HENVISNING (REFERENCES):
 ■ mossiAANS
 ■ BANE NOR

DEFINERT MÅLESTOKK GJELDER FOR A1 FORMAT

00C	Klar for bygging	26.05.2021	JHP	ASH	GDM
Rev	Revisjonens gjelder	Date	Utør av	Rev. av	Godt av

Østfoldbanen VL (Moss) - Sarpsborg Carlberg tunnelen Driving, bergsikring og utgraving Geoteknisk profil km 60,260 - 60,833

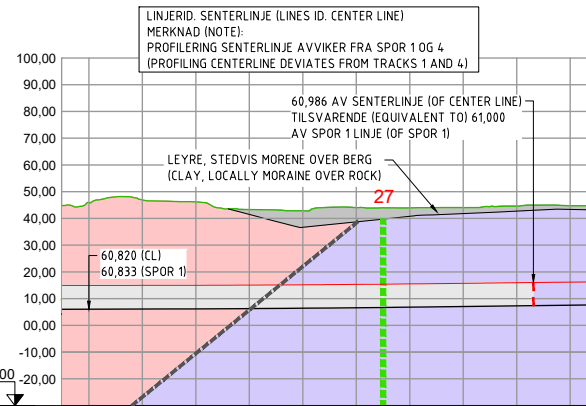
PROSJEKT: 960168 (SMS) PARSELL: 30

SMS-30-V-55300 00C

FDV aksept/Prosjektleder: FDV rev:

Gjennomgått
 Gjennomgått m/kommentar
 Kommentert
 Revider og send inn ny revisjon
 For informasjon (ikke gjennomgått)

Sign:



Geometri (Geometry)	Profilnummer (Profil number)	60+900				61+000	
	Tunnelnivå (Tunnel level) [m.o.h.]	6.04					
	Terrengnivå (Ground level) [m.o.h.]	30.96	45.91	6.10			
	Fjelloverdekning (Rock cover) [m]		31.59	46.09	6.16		
Geologisk formasjon (Geological formation)		SBM1					
Geologisk område (Geological area)		SBM1		SBM2		SS1	
Lengde (Length) [m]		145		40		20	
Foliasjon (Foliation) [fall / fallretning] (dip/dip direction)		55 / 280					
Bergmassegenskaper (Rock mass properties)	Inntak berg (Intact rock)	γ [kN/m ³]	Gneiss 26.7 / Amphibolite - Metagabbro: 31.1				
		U.C.S. σ _c [MPa]	145	145	45	145	
		Young modulus E _t [GPa]	50	50	25	50	
		Poisson forhold (Ratio) ν	0.18	0.18	0.20	0.18	
	Sprekkefall (Crack set)	Orientering (fall / fallretning) (Orientation (dip/dip direction))					
		J1=55/280; J2=50/110; J3=85/185; Tilfeldig sprekk J4=30/115; J5=65/060					
	Bergmasse (Rock mass)	RQD/Jn	90/12	90/12	30/12	90/12	
		Jr/Ja	1.5/1.0	1.5/1.5	3.0/3.0	1.5/1.0	
		Jw/SRF	1.0/1.0	1.0/2.5	0.66/5.0	1.0/1.0	
		Q (min / maks / hyppigst / mener) (min/max/frequent/medium)	*SBM1	2.7/5/4.2/4	*SS1	*SBM1	
Young modulus E _m [GPa]		40	40	4.0	40		
Friksjonsvinkel (Friction angle) φ _i [°]		45	45	25	45		
Samhold C _m [MPa]	2	2	0.3	2			
Hydrogeologi (Hydrogeology)		Innlekkasjekrav (Leakage requirement)					
		Hydraulisk ledningsevne (Hydraulic Conductivity) [m/s]					
Q Bergmassekvalitet og berørlighet (%) (Rock mass quality and rock support class (%))	A/B Q>10	30	-	-	30		
	C 10>Q>4	55	60	-	55		
	D 4>Q>1	15	40	15	15		
	E 1>Q>0.1	-	-	85	-		
	F 0.1>Q>0.01	-	-	-	-		
	G 0.01>Q	-	-	-	-		
			60,880	60,920	60,940	60,986	

*SBM1 = 2/20/10.6/10.2
 *SBM2 = 2.7/5/4.2/4
 *SBM3 = 0.4/2.5/1.1/1.2
 *SBM6 = 0.35/1.1/3/1.15
 SBM6 = 0.5/1.5/0.75/0.85
 *SS1 = 0.04/2.15/0.33/0.5

CARLBERGTUNNELEN (P.N. 60,820 TIL P.N. 60,986 I HENHOLD CL // P.N. 60,833 TIL P.N. 61,000 I HENHOLD SPOR 1)
 GEOTEKNISK PROFIL (GEOTECHNICAL PROFILE)
 MALESTOKK (SCALE) 1:1000 / 1:1000

Geoteknisk referansesystem
 Horisontalt datum: EUREF89
 Prosjektsjon: NTM Sone 10
 Vertikalt datum: NN2000

MERKNADER (NOTES):
 •INTERVALLER OG PROSENTANDEL SOM BLE VIST FOR Q-VERDIEN ER VEILEDENDE OG KAN VÆRE FORSKJELLIG FRA DE SOM BLE OPPNÅDD UNDER UTGRAVINGEN. (INTERVALS AND PERCENTAGE SHOWN FOR THE Q + VALUE ARE INDICATIVE AND MAY DIFFER FROM THOSE OBTAINED DURING EXCAVATION).
 •TERRENG OG BERGOVERFLATEN ER REPRESENTERT I PROFILEN SOM FØLGER DEN SENTRALE AKSEN AV TUNNELN. FJELLOVERDEKKNING I TVERRRETNINGEN KAN VÆRE MINDRE ENN ANGIT I PROFILEN. DENNE FAKTAEN GJENSPEILES I 3D-MODELLEN OG ER ANALYSERT I DETALJ I DESIGNDOKUMENTENE. (THE GROUND AND ROCK SURFACE ARE REPRESENTED IN THE PROFILE FOLLOWING THE CENTRAL AXIS OF THE TUNNEL. ROCK COVERAGE IN THE CROSS DIRECTION MAY BE LESS THAN INDICATED IN THE PROFILE. THIS FACT IS REFLECTED IN THE 3D MODEL AND IS ANALYZED IN DETAIL IN THE DESIGN DOCUMENTS).

LEGENDE (LEGEND):
 BERGARTER (FRA NGUS BERGRUNNSKART, HORTEN 1813I)
 GRANITISK GNEISS (GRANITE GNEISS)
 GRANITISK - KVARTERDIORITISK (GRANITIC - QUARTERDIORITIC)
 METAGABBRO OG METADOLERITT (METAGABRO AND METADOLERITE)
 AMFIBOLITT (AMFIBOLITE)

JORDSMONN (SOILS)
 LØSMASSER (LOOSE MASSES)
 SAND, GRUS OG STEIN/BLOKK (SAND, GRAVEL AND STONE / BLOCKS)
 LEIRE OG MORENE (CLAY AND MORENE)
 INNLEKKASJEKRAV (LEAKAGE REQUIREMENTS)
 5 l/min x 100 m TUNNEL
 10 l/min x 100 m TUNNEL
 SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) 0-5 m
 SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) 5-10 m
 SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) >10 m
 SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) UKJENT BREDD (UNKNOWN WIDTH)

HENVISNING (REFERENCES):

DEFINERT MÅLESTOKK GJELDER FOR A1 FORMAT

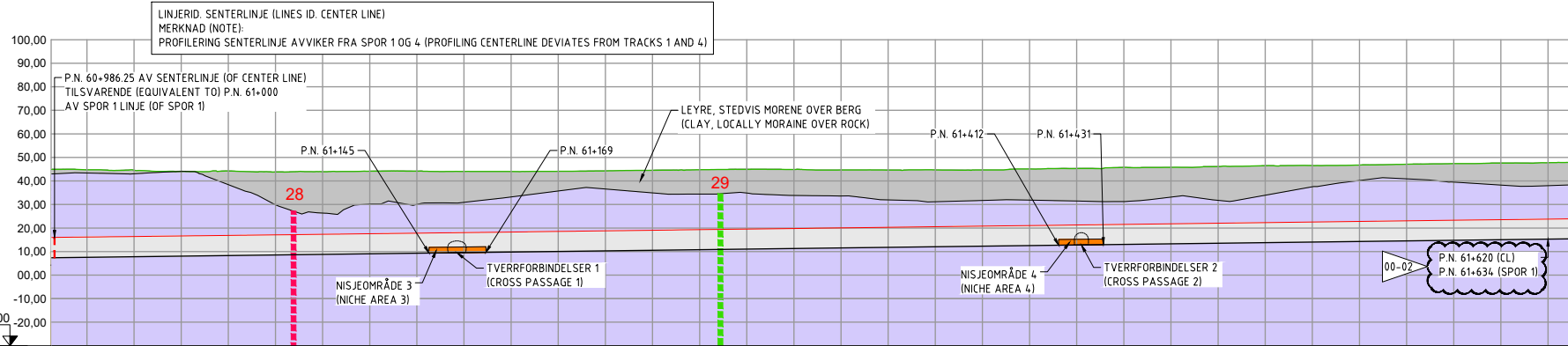
00C	Klar for bygging	25.03.2021	JMP	ASH	GDM
Rev	Revisjonen gjelder	Dato	Utørk av	Utørk av	Utørk av

Østfoldbanen VL, (Moss) - Sarpsborg Carlbergtunnelen Driving, bergsikring og utgraving Geoteknisk profil km 60,833 - 61,000

PROSJEKT: 960168 (SMS) PARSELL: 30

00C-01-02_Dato_25.03.2021

Gjennomgått
 Gjennomgått med kommentar
 Kommentert
 Revurdert og sendt inn ny revisjon
 For informasjon (ikke gjennomgått)
 Sign: _____



Geometri (Geometry)	Profilnummer (Profil number)	61+000					61+100					61+200					61+300					61+400					61+500					61+600																													
	Tunnelnivå (Tunnel level) [m.o.h.]	27.56					27.56					27.56					27.56					27.56					27.56					27.56																													
Geologisk formasjon (Geological formation)	Terrenghvå (Ground level) [m.o.h.]	28.02					28.02					28.02					28.02					28.02					28.02					28.02																													
	Fjelloverdekning (Rock cover) [m]	27.19					27.19					27.19					27.19					27.19					27.19					27.19																													
Geologisk område (Geological area)	Lengde (Length) [m]	65.42					20					30					30					45					90					10					120					50					75					150									
	Foliasjon (Foliation) [fall / fallretning] (dip/dip direction)	55 / 280																														50 / 305																													
Bergmassegenskaper (Rock mass properties)	Inntatt berg (Inact rock)	U.C.S. σ_{cl} [MPa]	145					145					45					145					145					145					45					145					145																		
		Young modulus E_c [GPa]	50					50					25					50					50					50					25					50					50																		
		Poisson forhold (Ratio) ν	0.18					0.18					0.20					0.18					0.18					0.18					0.20					0.18					0.18																		
	Sprekkefall (Crack fall)	Orientering (fall / fallretning) (Orientation (dip/dip direction))	J1=55/280; J2=50/110; J3=85/185; Tilfeldig sprekk J4=30/115; J5=65/060																																																										
		Orientation (dip/dip direction)	Gneiss 26.7 / Amphibolite - Metagabbro: 31.1																																																										
	Bergmasse (Rock mass)	RQD/Jn	90/12					90/12					30/12					90/12					90/36					90/12					90/36					90/12					90/12																		
		Jn/Ja	1.5/1.0					1.5/1.5					3.0/3.0					1.5/2.0					1.5/2.0					1.5/1.5					3.0/3.0					1.5/2.0					1.5/2.0					1.5/1.5													
		Jw/SRF	1.0/1.0					1.0/2.5					0.66/5.0					1.0/5.0					1.0/5.0					1.0/2.5					0.66/5.0					1.0/5.0					1.0/5.0					1.0/2.5													
		Q (min / maks / hyppigst / mener) (min/max/frequent/medium)	2/20/10.6/10.2					2.7/5/4.2/4					*SS1					0.4/2.5/1.1/1.2					0.1/1.0/0.35/0.45					2.7/5/4.2/4					*SS1					0.4/2.5/1.1/1.2					0.1/1.0/0.35/0.45					0.4/2.5/1.1/1.2					2.7/5/4.2/4								
		Young modulus E_r [GPa]	40					40					4.0					40					40					40					4.0					40					40					40													
Friksjonsvinkel (Friction angle) ϕ_r [°]		45					45					25					45					45					45					25					45					45					45														
Samhold C_r [MPa]		2					2					0.3					2					2					0.3					2					2					2					2														
Hydrogeologi (Hydrogeology)	Innlekkasjekrav (Leakage requirement)																																																												
	Hydraulisk ledningsevne (Hydraulic Conductivity) [m/s]	10^{-9} - 10^{-6}					10^{-9} - 10^{-6}					10^{-5} - 10^{-6}					10^{-9} - 10^{-6}					10^{-9} - 10^{-6}					10^{-9} - 10^{-6}					10^{-9} - 10^{-6}					10^{-9} - 10^{-6}					10^{-9} - 10^{-6}																			
Q Bergmassekvalitet og bergstøtte (%) (Rock mass quality and rock support class (%))	A/B Q>10	30					-					-					-					-					-					-					-					-					-														
	C 10>Q>4	55					60					-					-					60					-					-					-					-					60														
	D 4>Q>1	15					40					15					65					-					40					-					-					-					65					40									
	E 1>Q>0.1	-					-					85					35					100					-					85					-					-					100					35									
	F 0.1>Q>0.01	-					-					-					-					-					-					-					-					-					-					-					-				
	G 0.01>Q	-					-					-					-					-					-					-					-					-					-					-					-				
		P.N. 60+986.25					P.N. 61+051.67					P.N. 61+071.67					P.N. 61+101.67					P.N. 61+131.67					P.N. 61+176.67					P.N. 61+286.67					P.N. 61+276.67					P.N. 61+386.67					P.N. 61+466.67					P.N. 61+521.67									

*SBM1 = 2/20/10.6/10.2
 *SBM2 = 2.7/5/4.2/4
 *SBM3 = 0.4/2.5/1.1/1.2
 *SBM6 = 0.35/1.1/3/1.15
 *SS1 = 0.04/2.15/0.33/0.5

CARLBERGTUNNELEN (P.N. 60+986.25 TIL P.N. 61+620 I HENHOLD CL // P.N. 61+000 TIL P.N. 61+634 I HENHOLD SPOR 1)
 GEOTEKNISK PROFIL (GEOTECHNICAL PROFILE)
 MÅLESTOKK (SCALE) 1:1000 / 1:1000

Geodetisk referansesystem
 Horisontalt datum: EUREF89
 Prosjeksjon: NTM Sone 10
 Vertikalt datum: NN2000

MERKNADER (NOTES):
 •INTERVALLER OG PROSENTANDEL SOM BLE VIST FOR Q-VERDIEN ER VEILEDENDE OG KAN VÆRE FORSKJELLIG FRA DE SOM BLE OPPNÅDD UNDER UTGRAVING.
 (INTERVALS AND PERCENTAGE SHOWN FOR THE Q + VALUE ARE INDICATIVE AND MAY DIFFER FROM THOSE OBTAINED DURING EXCAVATION.)
 •TERRENG OG BERGOVERFLATEN ER REPRESENTERT I PROFILEN SOM FØLGER DEN SENTRALE AKSEN AV TUNNELEN. FJELLOVERDEKNING I TVERRRETNINGEN KAN VÆRE MINDRE ENN ANGIT I PROFILEN. DENNE FAKTAEN GJENSPEILES I 3D-MODELLEN OG ER ANALYSERT I DETALJ I DESIGNDOKUMENTENE.
 (THE GROUND AND ROCK SURFACE ARE REPRESENTED IN THE PROFILE FOLLOWING THE CENTRAL AXIS OF THE TUNNEL. ROCK COVERAGE IN THE CROSS DIRECTION MAY BE LESS THAN INDICATED IN THE PROFILE. THIS FACT IS REFLECTED IN THE 3D MODEL AND IS ANALYZED IN DETAIL IN THE DESIGN DOCUMENTS.)

LEGENDE (LEGEND):
 BERGARTER
 (FRA NGUS BERGRUNNSKART, HORTEN 1813)
 ■ GRANITISK GNEISS (GRANITE GNEISS)
 ■ GRANITISK - KVARTERDIORITISK (GRANITIC - QUARTERDIORITIC)
 ■ METAGABBRO OG METADOLERITT (METAGABBRO AND METADOLERITE)
 ■ AMFIBOLITT (AMPHIBOLITE)

JORDSMONN (SOILS)
 ■ LØSMASSER (LOOSE MASSES)
 ■ SAND, GRUS OG STEIN/BLOKK (SAND, GRAVEL AND STONE / BLOCKS)
 ■ LEIRE OG MORENE (CLAY AND MORENE)
 INNLEKKSJEKRAV (LEAKAGE REQUIREMENTS)
 ■ 5 l/min x 100 m TUNNELL
 ■ 10 l/min x 100 m TUNNELL
 SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) 0-5 m
 ■ SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) 5-10 m
 ■ SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) >10 m
 ■ SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) UKJENT BREDD (UNKNOWN WIDTH)

HENVISNING (REFERENCES):
 ■ 00-02

DEFINERT MÅLESTOKK GJELDER FOR A1 FORMAT

00C	Klar for bygging	26.02.2021	JMP	ASH	GDM
Rev.	Revisjonen gjelder				

Østfoldbanen VL, (Moss) - Sarpsborg
 Carlsberg-tunnelen
 Driving, bergsikring og utgraving
 Geoteknisk profil
 Km 61.000 - 61.634

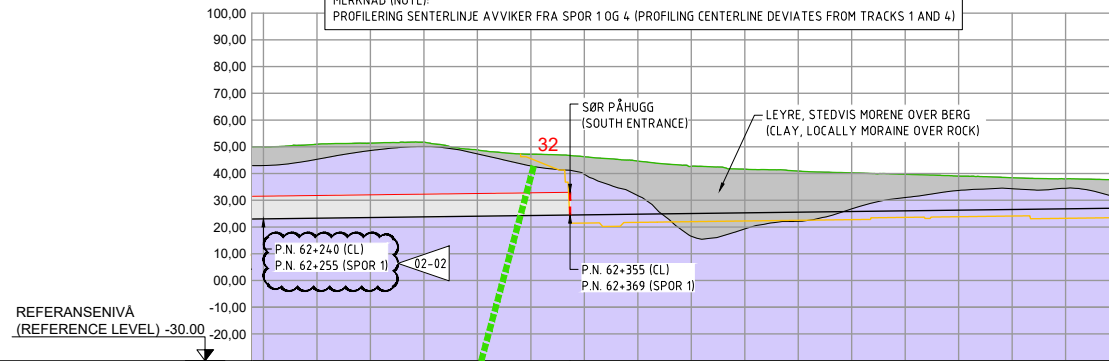
PROSJEKT: 960168 (SMS)
 PARSELL: 30

Rev. 00C

Sign: _____

Gjennomgått
 Gjennomgått med kommentar
 Kommentert
 Rev. og send inn ny revisjon
 For informasjon (ikke gjennomgått)

LINJERID. SENTERLINJE (LINES ID. CENTER LINE)
 MERKNAD (NOTE):
 PROFILERING SENTERLINJE AVVIKER FRA SPOR 1 OG 4 (PROFILING CENTERLINE DEVIATES FROM TRACKS 1 AND 4)



Geometri (Geometry)		Profilnummer (Profil number)	62+300				62+400	62+500	62+556.82
		Tunnelnivå (Tunnel level) [m.o.h.]	23.04	23.29	23.04	24.04	24.29		
		Terrengnivå (Ground level) [m.o.h.]	49.96	50.00	51.33	51.71	51.71	47.20	
		Fjelloverdekning (Rock cover) [m]	11.46	10.52	16.59	17.84	14.81	10.04	
Geologisk formasjon (Geological formation)		SBM2 SBM3 SBM6							
Geologisk område (Geological area)		SBM2 SBM3 SBM6							
Lengde (Length) [m]		50 13 20							
Foliasjon (Foliation) [fall / fallretning] (dip/dip direction)		50 / 305							
Bergmassegenskaper (Rock mass properties)		Gneiss 26.7 / Amphibolite - Metagabbro: 31.1							
Inntakt berg (Intact rock)	U.C.S. σ_{ci} [MPa]	145 145 145							
	Young modulus E _i [GPa]	50 50 50							
Sprekkefjell (Crack seil)	Poisson forhold (Ratio) ν	0.18 0.18 0.18							
	Orientering (fall / fallretning) (Orientation (dip/dip direction))	J1=50/305; J2=60/120; J3=85/185; Tilfeldig sprekk J4=30/115; J5=65/060							
Bergmasse (Rock mass)	RQD/Jn	90/12 90/12 70/24							
	Jn/Je	1.5/1.5 1.5/2.0 1.5/2.0							
Bergmasse (Rock mass)	Jw/SRF	1.0/2.5 1.0/5.0 1.0/5.0							
	Q (min / maks / hyppigst / mener) (min/max/frequent/medium)	2.7/5/4.2/4 *SBM3 *SBM6							
Bergmasse (Rock mass)	Young modulus E _m [GPa]	40 40 40							
	Friksjonsvinkel (Friction angle) ϕ_i (°)	45 45 45							
Bergmasse (Rock mass)	Samhold C _n [MPa]	2 2 2							
	Innekkasjekrav (Leakage requirement)	-							
Hydrogeologi (Hydrogeology)	Hydraulisk ledningsevne (Hydraulic Conductivity) [m/s]	10 ⁻⁹ -10 ⁻⁶ 10 ⁻⁹ -10 ⁻⁶ 10 ⁻⁵ -10 ⁻⁶							
	Q Bergmassekvalitet og bergsløstet (%) (Q Rockmass quality and rock support class (%))	A/B Q>10	-						
Q Bergmassekvalitet og bergsløstet (%) (Q Rockmass quality and rock support class (%))	C 10>Q=4	60							
	D 4>Q=1	40							
	E 1>Q=0.1	-							
	F 0.1>Q=0.01	-							
	G 0.01>Q	-							
			P.N. 62+271.67	P.N. 62+321.67	P.N. 62+334.67	P.N. 62+354.67			

*SBM1 = 2/20/10.6/10.2
 *SBM2 = 2.7/5/4.2/4
 *SBM3 = 0.4/2.5/1.1/1.2
 *SBM6 = 0.35/1/1.3/1.15
 *SS1 = 0.04/2.15/0.33/0.5

02-02 CARLBERGTUNNELEN (P.N. 62+240 TIL P.N. 62+355 I HENHOLD CL // P.N. 62+255 TIL P.N. 62+369 I HENHOLD SPOR 1)
 GEOTEKNISK PROFIL (GEOTECHNICAL PROFILE)
 MÅLESTOKK (SCALE) 1:1000 / 1:1000

Geoteknisk referansesystem
 Horisontalt datum: EUREF89
 Prosjeksjon: NTM Sone 10
 Vertikalt datum: NN2000

MERKNADER (NOTES):
 • INTERVALLER OG PROSENTANDEL SOM BLE VIST FOR Q-VERDIEN ER VEILEDENDE OG KAN VÆRE FORSKJELLIG FRA DE SOM BLE OPPNÅDD UNDER UTGRAVNING. (INTERVALS AND PERCENTAGE SHOWN FOR THE Q + VALUE ARE INDICATIVE AND MAY DIFFER FROM THOSE OBTAINED DURING EXCAVATION).
 • TERRENG OG BERGOVERFLATEN ER REPRESENTERT I PROFILEN SOM FØLGER DEN SENTRALE AKSEN AV TUNNELN. FJELLOVERDEKKNING I TVERRRETNINGEN KAN VÆRE MINNEN ENNGANG I PROFILEN. DENNE FAKTA ER GJENSPEILET I 3D-MODELLEN OG ER ANALYSERT I DETALJ I DESIGNDOKUMENTENE. (THE GROUND AND ROCK SURFACE ARE REPRESENTED IN THE PROFILE FOLLOWING THE CENTRAL AXIS OF THE TUNNEL. ROCK COVERAGE IN THE CROSS DIRECTION MAY BE LESS THAN INDICATED IN THE PROFILE. THIS FACT IS REFLECTED IN THE 3D MODEL AND IS ANALYZED IN DETAIL IN THE DESIGN DOCUMENTS).

LEGENDE (LEGEND):
 BERGARTER (FRA NGUS BERGRUNNSKART, HORTEN 1813)
 GRANITISK GNEISS (GRANITE GNEISS)
 GRANITISK - KVARTSDIORITISK (GRANITIC - QUARTZDIORITIC)
 METAGABBRO OG METADOLERITT (METAGABBRO AND METADOLERITE)
 AMFIBOLITT (AMPHIBOLITE)

JORDSMONN (SOILS)
 LØSMASSER (LOOSE MASSES)
 SAND, GRUS OG STEIN/BLOKK (SAND, GRAVEL AND STONE / BLOCKS)
 LEIRE OG MORENE (CLAY AND MORENE)
 INNEKKSJEKRAV (LEAKAGE REQUIREMENTS)
 5 l/min x 100 m TUNNEL
 10 l/min x 100 m TUNNEL
 SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) 0-5 m
 SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) 5-10 m
 SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) ANTATT BREDD (ASSUMED WIDTH) >10 m
 SVAKHETSSONE (WEAKNESS ZONE) UKJENT BREDD (UNKNOWN WIDTH)

HENVISNING (REFERENCES):
 02-02

DEFINERT MÅLESTOKK GJELDER FOR A1 FORMAT

02C	Klar for bygging	26.02.2021	JMP	ASH	GDM
02C	Klar for bygging	09.02.2020	JMP	ASH	GDM
02C	Klar for bygging	26.08.2020	JMP	ASH	GDM
Rev.	Revisjonen gjelder	Date	Utørk av	Sesj av	

Østfoldbanen VL, (Moss) - Sarpsborg
 Carlsberg-tunnelen
 Driving, bergsikring og utgraving
 Geoteknisk profil
 km 62.255 - 62.369

PROSJEKT: 960168 (SMS)
 PARSELL: 30

SMS-30-V-55003
 02C

02C-02-01_Dato_26.02.2021

