

Injeksjonsarbeider ved Knappetunnelen

Lars Erik Nyhaug Jenssen
Torben Halland Wedervang

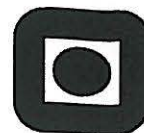
Tekniske geofag

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Bjørn Nilsen, IGB

Medveileder: Terje Kirkeby, Statens Vegvesen

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for geologi og bergteknikk



MASTEROPPGAVEN

Kandidatenes navn: Torben Wedervang
Lars Erik Nyhaug Jenssen

Oppgavens tittel: Injeksjonsarbeider ved Knappetunnelen

English title: Injection grouting at the Knappe road tunnel

Utfyllende tekst:

1. Som del av 2. byggetrinn av Ringvei Vest i Bergen pågår utsprenkning av den ca. 6,3 km lange Knappetunnelen. Ca. 0,6 km gjenstår per i dag å drive under Kanadaskogen mellom Sandeide og Liavatnet. I denne masteroppgaven, som gjennomføres i fellesskap av 2 studenter, skal det foretas en detaljert analyse av metodikk og resultater for injeksjonsarbeidene ved Knappetunnelen.

Masteroppgaven representerer en oppfølging av fordypningsprosjekt utført av Torben Wedervang høstsemesteret 2012, med hovedfokus på teoretisk grunnlag og erfaringer fra utvalgte sammenlignbare tunnelprosjekter. I denne oppgaven skal injeksjonsarbeidene ved Knappetunnelen analyseres i detalj, med spesiell fokus på gjennomgang og diskusjon av:

- Beskrivelsen av injeksjonsarbeider i kontrakten/prosessteksten.
- Tetthetskrav i relasjon til påtruffet geologi og oppnådde resultater.
- Seksjonsvis gjennomgang av utført injeksjon og analyse av mulige korrelasjoner mellom injeksjonsvolum og geologi.
- Observasjon/registrering på stuff for vurdering av eventuelle særtrekk i forbindelse med inntrengning av injeksjonsmasse i sprekker.
- Effekt av mikrosement i forhold til industrisement.
- Spesielle problemstillinger knyttet til partier med liten bergoverdekning, spesielt mht. gjenstående parti under Kanadaskogen.
- Vurdering og diskusjon av de benyttede stoppkriterier for injeksjon.
- Vurdering av benyttede prosedyrer for injeksjonsarbeidene, oppfølging og rapportering, inklusive praktiske konsekvenser og eventuelle forskjeller mellom ulike arbeidslag på stuff.
- Spesielle forhold knyttet til injeksjon i 2-løps tunnel.

2. Oppgaven gjennomføres i samarbeid med Statens vegvesen, Region vest med Geolog Terje Kirkeby som kontaktperson og ekstern veileder.

Studieretning: Ingeniør- og miljøgeologi

Hovedprofil: Ingeniørgeologi og bergmekanikk

Tidsrom: 14.01.-10.06.2013

Bjørn Nilsen, Professor/hovedveileder

Sammendrag

Knappetunnelen er en to-løps tunnel som går mellom Sandeide i sør og Liavatn i nord. Når tunnelen står ferdig, vil den være en del av Ringveg Vest. Dette er hovedvegen som forbinder bydelene i Bergensområdet. Knappetunnelen går i et område med sårbare naturtyper, samt områder med tett bebyggelse. Det er derfor svært strenge krav til innlekkasje i store deler av tunnelen. For å minimere innlekkasje har det blitt utført systematisk forinjeksjon etter prinsippet 'aktiv injeksjon'. Både mikrosement og industrisement har blitt benyttet. I denne oppgaven har injeksjonsarbeidene blitt analysert i detalj. Utførelse og prosedyrer, samt mengdeforbruk, utgjør brorparten av oppgavens innhold. Resultatene av injeksjonsarbeidene med hensyn på tette-effekt har blitt vurdert. Injeksjonsarbeidene per dags dato ser ut til å være vellykkede. Til dels svært store mengder injeksjonsmasser har gått med i tettingsarbeidet.

Det store sementforbruket var felles for både Liavatn-siden og Sandeide-siden. Mulige årsaker til dette er den oppsprukne bergmassen, men også injeksjonsprosedyrene. Raskere overgang til tjukkere masse og tilsats av akselerator og mauringsmasse på et tidligere tidspunkt kunne ha redusert inngangene, uten at resultatet hadde blitt dårligere. Økt fokus på samarbeid og færre endringer av injeksjonsprosedyrene ville gitt injeksjonsmannskapet bedre tid til å innarbeide nye rutiner. Slik ville injeksjonsarbeidet blitt optimalisert med de gjeldene prosedyrer.

På Liavatn-siden var innlekkasjen på stuff størst, opptil 2300 l/min på en skjerm, men mest tresifrede verdier. Det ble nok generelt benyttet for få og for lange hull, med for liten overlapp. Sprekker parallelt med tunnelaksen medførte også dårligere injiserbarhet. I Kanadaskogen, hvor overdekningen var liten, var det problemer med gjentatte utganger i terrenget.

Det er ikke registrert noen korrelasjon mellom injeksjonsvolum og geologi. Det er heller ikke påvist noen sammenheng mellom injeksjonsvolum knyttet opp mot vannlekkasjemålinger utført før injeksjon. Det har vist seg at det i all hovedsak er injeksjonsteknikk og prosedyrene som har vært avgjørende for hvor mye masse som har gått med. Det er en klar sammenheng mellom målte vannlekkasjer og medgåtte masser når en sammenligner de bakre og fremre løpene under driving på Liavatnet og Sandeide. Totalt sett ble det målt 47 % mindre vann i de bakre løpene i vannlekkasjemålinger utført i sonder- og skjermhull. Det gikk med 46 % mer injeksjonsmasse i de fremre løpene for tunnelen samlet, enn i de bakre løpene.

Abstract

The Knappe tunnel is a two-lane road tunnel connecting Sandeide (South) and Liavatn (North). When the tunnel work is completed, the tunnel will constitute a part of Ringveg Vest. Ringveg Vest is the main road that connects the different districts of the Bergen area. The Knappe tunnel is located in an area with sensitive natural amenities and close settlement. Harmful lowering of the groundwater level had to be prevented due to the environmental requirements. Therefore, the water tightness requirements were extremely strict. To minimize the leakage systematic pre-grouting has been performed according to the principle of 'aktiv injeksjon'. This means a slow pressure build up, to a predetermined stop criterion of maximum 80 bars. For the Knappe road tunnel both microcements and constructional cements were used, and the stop criteria were adapted with respect to the degree of rock overburden. In this thesis a detailed analysis of the grouting procedures and results is given.

The face leakage at Liavatn was greater than at Sandeide, where as much as 2300 l/min was measured at one of the fans. However, three digit values were most common. The rock mass was heavily jointed and infected with clay in the most challenging zones.

The results improved in the zones of highest water abundance, and were pretty much within the predetermined requirements. Joints aligned parallel to the tunnel axis gave difficult grouting conditions at Liavatn, as fewer joints were penetrated during the drilling of the fans. Limited overburden also causes problems such as grout leak to the surface. Perhaps too few and too long grouting holes were drilled. Also the overlapping of the fans could advantageously have been increased

For both Liavatn and Sandeide the consumption of cements was huge. This was probably due to the presence of open rock fractures, combined with the current grouting procedures and stop criteria. Quicker pressure build up could have been achieved through the addition of accelerator or 'mauring' at an earlier stage of the injection of each hole. Increased focus on cooperation between the two parties involved in the grouting of the tunnel, in addition to less frequent changes of the procedures, could have increased the level of understanding of the purpose of the grouting. Also the tunnel workers would have a better opportunity to adapt to new routines, and optimization of the grouting performances would have been achieved.

No correlation between the grout volume and geology has been registered. Also no correlation between grout volume and water abundance at the fan, could be found. It turns out that the grouting techniques and procedures have been the controlling factors for the grout consumption. Considering that the tunnel is a two-race tunnel with 50 meters separating the two faces, a difference between grout consumption and water abundance at the rear face and front face was expected. Such a correlation has been found. In total, a reduction of water leakage of 47 percent was measured at the rear faces, compared to the front faces. A 46 percent increase of grout consumption at the front faces compared to the rear faces, was also found.

Forord

Dette er en masteroppgave i TGB4930-Ingeniørgeologi og bergmekanikk utarbeidet ved institutt for geologi og bergteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) våren 2013. Oppgaven er en videreføring av Torben Halland Wedervang sin prosjektoppgave ‘Analyse av injeksjonsarbeider ved Knappetunnelen, byggetrinn 2’, utarbeidet høsten 2012. Masteroppgaven er et samarbeidsprosjekt skrevet av studentene Lars Erik Nyhaug Jenssen og Torben Halland Wedervang for studieretningen teknisk geologi, med fordypning i ingeniørgeologi og bergmekanikk.

Hovedveileder for oppgaven har vært Bjørn Nilsen, professor ved institutt for geologi og bergteknikk. Vi er takknemlige for de gode rådene og støtten Bjørn har gitt oss gjennom denne prosessen.

Medveileder for oppgaven har vært Terje Kirkeby, senioringeniør ved Statens Vegvesen Vegdirektoratet. Terje har gitt oss en utrolig god oppfølging og kommet med mange konstruktive innspill under hele prosessen. Vi har lært veldig mye nyttig kunnskap fra Terje og er takknemlige for all tid han har avsett til oss. En stor takk går også til alle kontrollingeniører ved prosjektkontoret som har vært behjelpelige og svart på spørsmål.

AF-gruppen er entreprenør ved Knappetunnelen, 2.byggetrinn. Vi er takknemlige for at vi ble tatt i mot med åpne armer og fikk følge arbeidene på stuff.

Til slutt vil vi takke familie og ikke minst medstudenter for fantastisk støtte alle de fem årene vi har tilbrakt på NTNU. Uten dere hadde nok ikke dette vært mulig. En spesiell takk går til Mats Wedervang som har tatt seg tid til å lese korrektur for oppgaven.

Innholdsfortegnelse

1.	Introduksjon	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Kort om Knappetunnelen.....	1
1.3	Mål og omfang.....	3
1.4	Grunnlagsmateriale og utførte undersøkelser	4
2.	Injeksjon i moderne norske tunneler	7
2.1	Introduksjon.....	7
2.2	Innlekkasjekrav.....	7
2.2.1	Miljøkrav	8
2.2.2	Arbeidsplasskrav	9
2.2.3	Oppfølging og kontroll av innlekkasjekrav	9
2.3	Injeksjonsriggen.....	10
2.4	Injeksjonsutstyr.....	13
2.4.1	Pakkere	13
2.4.2	Slanger, staver og koblinger	15
2.5	Injeksjonsmidler	16
2.5.1	Injeksjonsmassens reologi.....	16
2.5.2	Tilsetningsstoffer.....	18
2.5.3	Lagring av injeksjonsmasse	19
2.5.4	Testing av injeksjonsmiddel.....	20
2.6	Utførelse av injeksjon.....	20
2.6.1	Utforming av injeksjonsskjermen	21
2.6.2	Plassering av pakkere	24
2.6.3	Injeksjonstrykk	24
2.6.4	Akselerator/styrt herding.....	25
2.6.5	Ytre injeksjonsskjerm.....	26
2.6.6	Etterinjeksjon	27
2.7	Alternativer til injeksjon.....	28
2.8	Planlegging av injeksjon i Norge.....	29
2.8.1	Bergmassekategorier	30
2.8.2	Ingeniørgeologiske parametere som må undersøkes.....	31

2.8.3	Sonderboring og MWD	31
2.9	Krav til dokumentasjon/rapportering av utført injeksjon	33
2.10	Kontroll av resultatene av utført injeksjon.....	34
2.10.1	Kontrollhull og måleterskler	34
2.11	Injeksjon og HMS	35
2.11.1	Forsvarlig bruk av pakkere.....	36
3.	Ingeniørgeologiske forhold i Knappetunnelen	39
3.1	Regional- og lokal geologi	39
3.2	Topografi, overdekning og løsmasser	40
3.3	Forundersøkelser	41
3.4	Oppsprekking.....	42
3.5	Svakhetssoner	43
3.6	Vannforhold og innlekkasjekrav	47
4.	Kontraktens beskrivelse og krav til injeksjonsarbeidene	51
4.1	Oppgjør.....	51
4.2	Krav til innlekkasje.....	52
4.3	Prosedyrer for sonderboring og boring av kontrollhull	52
4.4	Injeksjonsprosedyrer.....	53
4.5	Krav til injeksjonsmidler	54
4.6	Krav til utstyr.....	54
4.7	Krav til rapportering og kontroll av innlekkasje	55
4.7.1	Krav til rapportering for bore- og injeksjonsrigger	55
4.7.2	Vannlekkasjemålinger	56
4.7.3	Vanntapsmålinger.....	57
4.7.4	Vannterskler	57
5.	Injeksjonsprosedyrer og skjermdesign	59
5.1	Generelle injeksjonsprosedyrer	59
5.1.1	Sonderboring og kontrollboring.....	60
5.1.2	Blandingsforhold for industrisement og tilsetningsstoffer	60
5.1.3	Prosedyrer for å oppnå mottrykk.....	61
5.1.4	Håndtering av utganger fra sprekker under injeksjon	62
5.1.5	Serieinjeksjon og utganger fra injeksjonshull	62
5.2	Design av injeksjonsskjermene	63

5.2.1	Standardskjermer.....	64
5.2.2	Skjermdesign.....	65
5.3	Injeksjonsprosedyrer og skjermdesign ved liten overdekning	68
5.4	Spesielle særtrekk i forbindelse med inntrengning av injeksjonsmasse.....	69
5.5	Oppfølging og kontroll av injeksjonsarbeidene.....	70
5.5.1	Samarbeidet mellom entreprenør og byggherre	70
5.5.2	Oppfølging av injeksjonsarbeidene	71
5.5.3	Dokumentasjon og rapportering	72
6.	Seksjonsvis gjennomgang og resultater	75
6.1	Innledning.....	75
6.1.1	Omfang.....	75
6.1.2	Grunnlagsdata.....	76
6.2	Driving sørover fra Liavatn	77
6.2.1	Seksjon ca. 8500 -8300 (Storamyra)	77
6.2.2	Seksjon ca. 8300-7900 (Storhovden Nord)	81
6.2.3	Seksjon ca. 7900-7750 (Dalsøkket med svakhetssone 10)	84
6.2.4	Seksjon ca. 7750 -7500 (Storhovden Sør).....	85
6.2.5	Seksjon ca. 7500-6950	86
6.3	Driving nordover fra Sandeide	88
6.3.1	Seksjon ca. 6100-6500 (Allestadveien med svakhetssone 3 og 4).....	88
6.3.2	Seksjon ca. profil 6500-6950 (Hesjaholtet).....	89
6.4	Driving sørover fra Sandeide.....	91
6.4.1	Seksjon ca. 5200-5100 (Kloakktunnelen)	91
6.5	Resultater	96
7.	Diskusjon.....	105
7.1	Innledning.....	105
7.2	Effekt av mikrosement i forhold til industrisement.....	105
7.3	To-løpsproblematikk	107
7.4	Usikkerheter ved vannlekkasjemålinger.....	108
7.4.1	Innlekkasjemålinger på stuff.....	108
7.4.2	Restlekkasjemålinger	109
7.5	Injeksjonsprosedyrer, skjermdesign og stoppkriterier.....	110
7.5.1	Liavatnet-siden	111

7.5.2	Sandeide-siden	112
7.5.3	Soner med lav overdekning og kloakktunnelen	113
7.6	Oppfølging og rapportering	114
7.6.1	Oppfølging	114
7.6.2	Rapportering	116
7.7	Tetthetskrav i relasjon til påtruffet geologi og oppnådde resultater	117
7.8	Seksjonsvis gjennomgang av utført injeksjon og analyse av mulige korrelasjoner mellom injeksjonsvolum og geologi	119
8.	Konklusjon og Anbefalinger	121
	Referanser	123

Figur 1: Oversikt over de ulike byggetrinnene (Kirkeby 2010).	2
Figur 2: Figuren viser en typisk injeksjonsrigg brukt i norske tunneler (Syrjänen and Tolppanen 2003).	10
Figur 3: Figuren viser hvordan pakkeren ligger i borehullet, og hindrer utstrømming av fluider (Syrjänen and Tolppanen 2003).	11
Figur 4: Figuren viser utstyret for datalogging på en moderne injeksjonsrigg (Fagermo, Frogner et al. 2008).	12
Figur 5: Pakkere med sete for mindre enn 60 bar (venstre), og mer enn 60 bar (høyre) (Kveen, Backer et al. 2010).	14
Figur 6: Figuren viser en såkalt 'standpipe'. Bildet er tatt fra Saunaprojektet (Fagermo, Frogner et al. 2008).	15
Figur 7: Injeksjonsskjerm med standard lengde 18 -24 meter (Kveen, Backer et al. 2010).	21
Figur 8: Injeksjonshull bores i en skjerm foran stuff (Kveen, Backer et al. 2010).	22
Figur 9: Salvelengde, skjerm lengde og overlapp sett i lengderetning (Kveen, Backer et al. 2010).	23
Figur 10: Figuren viser dobbel skjerm (til høyre) og enkel skjerm (til venstre) (Syrjänen and Tolppanen 2003).	23
Figur 11: Figuren viser stav med munnstykke for akseleratortilsats koblet til. Staven er kort fordi dette er en demoversjon (Holter 2011).	26
Figur 12: Prinsippskisse for etterinjeksjon (Syrjänen and Tolppanen 2003).	28
Figur 13: Tolking av hardhet basert på MWD-data (BeverTeam 2002). Merk: bildet på figuren er ikke produsert av BeverControl, men av det svenske selskapet Rockma.	32
Figur 14: Knappetunnelen 2. byggetrinn ligger i utkanten av øygardskomplekset. Tunneltraseen vises på kartet som en tykk svart kurve (NGU 2013).	39
Figur 15: Lengdeprofil av hovedløpene med utvalgte svakhetssoner markert. Målestokken vertikalt er 4 ganger den horisontale (Kirkeby 2010).	40
Figur 16: Oversikt grunnundersøkelser for 2. byggetrinn (Kirkeby 2010).	41
Figur 17: Figuren viser de to utleggene som representerer svakhetszone 2 (Kirkeby 2010).	44

Figur 18: Figuren viser lavhastighetssonene som sammenfaller med svakhetszone 4 (Kirkeby 2010).....	45
Figur 19: Figuren viser resultatene fra resistivitetsmålingene ved sone 4. Sonene markert med stiplet linje representerer de største anomaliene med signifikant lavere resistivitet.	45
Figur 20: Figuren viser dalsøkket som representerer svakhetszone 10 (Kirkeby 2010).	46
Figur 21: Figuren viser resultatene fra resistivitetsmålingene, inkludert sonene fra 8 til og med 13. Sonene markert med stiplet linje representerer de største anomaliene med signifikant lavere resistivitet enn snittet (Kirkeby 2010).	47
Figur 22: Krav til maks tillatte lekkasjer etter tunneldriving (Kirkeby 2010).	48
Figur 23: Figuren viser et eksempel på en skisse av en boreplan for en injeksjonsskjerm.....	66
Figur 24: Slik genereres en boreplan på riggen i praksis (byggeskolen, 2013).	67
Figur 25: Figuren viser seksjonen med minimal overdekning ved svakhetszone 3.	68
Figur 26: Figuren viser et oversiktsbilde over Sandeide-siden (Fra Sandeidekrysset til Varden stadion). Prosjektkontoret er merket med «P». Den røde linjen representerer kloakktunnelen (Kirkeby 2013).	76
Figur 27: Figuren viser medgåtte mengder med mikro- og industrisement, samt Q-verdi for hver skjerm i seksjonen for løp 11.	79
Figur 28: Figuren viser medgåtte mengder med mikro- og industrisement, samt innlekkasje på stoff for hver skjerm i seksjonen for løp 11.	80
Figur 29: Figuren viser medgåtte mengder med mikro- og industrisement, samt Q-verdi for hver skjerm i seksjonen for løp 12.	80
Figur 30: Figuren viser medgåtte mengder med mikro- og industrisement, samt innlekkasje på stoff for hver skjerm i seksjonen for løp 12.	81
Figur 31: Tverrprofil ved profil 8200 (Kirkeby 2010).	81
Figur 32: Tverrprofil over Storhovden (Kirkeby 2010).	86
Figur 33: Figuren viser et bilde av kloakktunnelen (Kirkeby 2013).	91
Figur 34: Oversiktsbilde over situasjonen for denne seksjonen. Kloakktunnelen krysser ca. ved pel 12- 5150 (Hentet fra kontrollørmelding).	92
Figur 35: Boreplan for profil 11-5177 (Hentet fra Prosjektplassen).	94
Figur 36: Boreplan for kryssing av kloakktunnel i løp 11. Tilsvarende boreplan ble brukt på løp 12 (Hentet fra Prosjektplassen).	95
Tabell 1: Oversikt over samlede injeksjonsmengder, vannlekkasjer og Q-verdier for Knappetunnelen.	96
Figur 37: Ingen lineær sammenheng mellom mengde medgått industrisement og Q-verdi. ...	98
Figur 38: Ingen sammenheng for mikrosement vs. Q-verdi.	98
Figur 39: Ingen lineær sammenheng mellom medgått mengde industrisement og Q-verdi. ...	99
Figur 40: Ingen sammenheng for mikrosement vs. Q-verdi.	99
Figur 41: Ingen lineær sammenheng mellom medgått masse av industrisement knyttet opp mot vannlekkasjemålinger.	100
Figur 42: Ingen lineær sammenheng for mikrosement vs. vannlekkasjer i løp 11.	101
Figur 43: Ingen lineær sammenheng mellom medgått masse av industrisement, knyttet opp mot vannlekkasjemålinger.	101

Figur 44: Lineær sammenheng mellom medgått mengde mikrosement og vannlekkasjemålinger. Korrelasjonsverdien, R, er rett i underkant av 0,7.	102
Figur 45: Restlekkasjene er målt ved pumping i grøft. Lekkasje er over kravet for hele Liavatn-strekket.....	103
Figur 46: Restlekkasjene er målt ved målesterskel på 11-6200. Lekkasje er under de forhåndssette kravene.	103
Figur 47: Restlekkasjene er målt ved målesterskel på 12-6200. Lekkasje er under de forhåndssette kravene.	104

1. Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Dette er en masteroppgave skrevet ved Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU. Oppgaven utgjør siste og avsluttende del av det femårige studieprogrammet Tekniske geofag, med fordypningsretningen Ingeniørgeologi og bergmekanikk. Masteroppgaven representerer en videreføring av prosjektoppgaven ‘Analyse av injeksjonsarbeider ved Knappetunnelen, byggetrinn 2’, skrevet av Torben Wedervang høsten 2012.

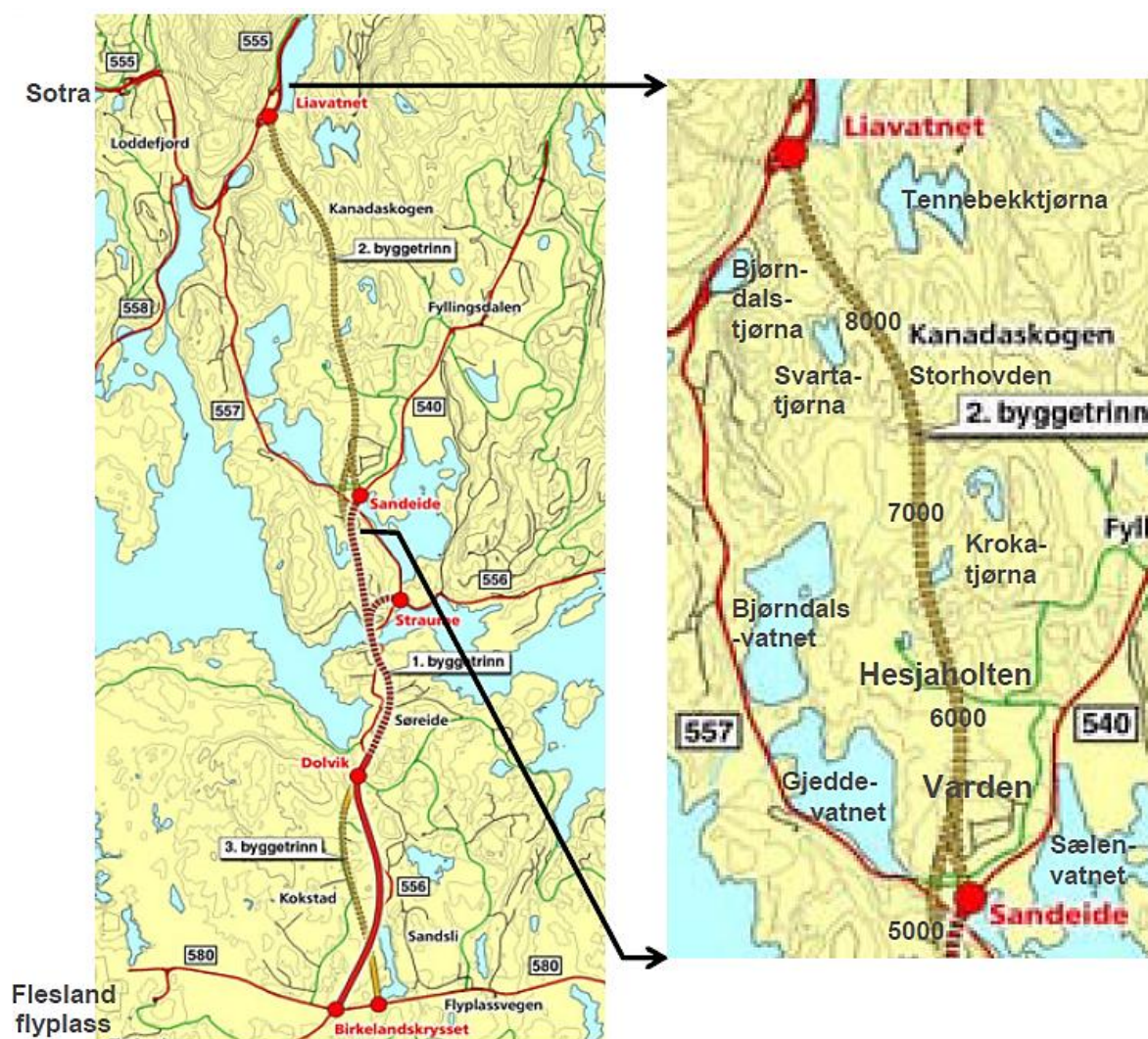
I takt med raskt voksende byer og økt trafikkmengde, har det i de siste årene vært fokusert på utbygging av infrastruktur. På lang sikt kan utbygging av nye tunneler i urbane områder være en riktig løsning for å løse problemer som plassmangel, trafikkstøy og forurensing. Ved utbygging av urbane tunneler er det ofte viktig med minimal vanninnlekkasje i tunnelen, slik at ikke blant annet grunnvannsforholdene endrer seg. Senkes grunnvannstanden kan både nærliggende miljø og bebyggelse ta skade. For å kunne kontrollere og minimere innlekkasjen i tunnelen, utføres det injeksjon i moderne tunnelbygging.

Injeksjonsarbeidene i bynære tunneler er ofte svært omfattende fordi det stilles så strenge krav til maksimal tillatt innlekkasje. I et moderne tunnelprosjekt er en stor del av kostnadene tilknyttet injeksjon. Det er derfor av stor betydning at injeksjonsprosessen utføres på en effektiv måte, med tanke på både mengde- og tidsforbruk.

1.2 Kort om Knappetunnelen

Ringveg Vest er en del av et nytt ringvegssystem i Bergensområdet som binder sammen bydelene Loddefjord, Ytrebygda, Fana, Åsane og Arna. Prosjektet inngår i Bergensprogrammet for transport, byutvikling og miljø. Det nye vegsystemet vil bestå av to tunneler, Knappetunnelen og Kokstad tunnelen, samt 5 kryss. Hele strekningen vil være 4-felts motorveg, noe som gir tilstrekkelig kapasitet og lite tidstap for trafikantene. Vegsystemet vil

redusere antall ulykker, og sikre god fremkommelighet for kollektivreisende. Reguleringsplanen til Ringveg Vest ble godkjent i bystyret i februar 2004 med følgende byggetrinn; 1. Dolvik - Sandeide, 2. Sandeide – Liavatn og 3. Flyplassvegen – Dolvik, se Figur 1 for beliggenhet.



Figur 1: Oversikt over de ulike byggetrinnene (Kirkeby 2010).

Knappetunnelen 1. byggetrinn, mellom Dolvik og Sandeide, ble påbegynt august 2006 og stod ferdig september 2010. I første kvartal av 2011 begynte arbeidene med forlengelsen av denne tunnelen. 2. Byggetrinn går mellom Sandeide (sør i Fyllingsdalen) og Liavatn (Laksevåg), og omfatter en to-løps fjell tunnel T9,5 med lengde 2 x 3,8 km lengde. I tillegg

kommer av- og påkjøringsramper ved Sandeide; $410 + 275 = 685$ meter. Tverrsnittet varierer fra T7,5 + 1 til T13, med ekstra bredde i kryssområdene (Kirkeby 2010).

To-løpstunnelen har blitt drevet fra både Liavtn- og Sandeide-siden. Søndre del av tunnellopene går under de tettbebygde områdene Varden og Hesjaholtet. Nordre del går under natur- og rekreasjonsområdet Kanadaskogen. Dette er et yndet turområde som benyttes mye av lokalbefolkningen. Landskapet er preget av skogkledde bergknauser omringet av myrer og små tjern. I disse områdene har kravet til innlekkasje vært strengest grunnet faren for å påføre det sårbare miljøet skader. Den geotekniske kategorien var vurdert til 3 grunnet hensynet til omgivelsene, samt stedvis minimal overdekning med lav bergmassekvalitet i områder med beboelse (Kirkeby 2010).

1.3 Mål og omfang

Målet med oppgaven er å presentere en analyse av utførelse og planlegging av injeksjonsarbeidet for en to-løpstunnel med strenge krav til innlekkasje. Hoveddelen av oppgaven vil bestå av en gjennomgang av utførte injeksjonsarbeider i forbindelse med byggingen av Knappetunnelen. Arbeidene utført for begge løp vil beskrives og vurderes. Sammenlikning av de utførte arbeidene med det som er beskrevet i kontrakten, vil bli tatt med der det er naturlig. Generelt vil hovedfokuset i oppgaven være på følgende punkter:

- Oppnådde resultater spesielt med hensyn på tetthet og mengdeforbruk tilknyttet de to injeksjonsmidlene industri- og mikrosement. Dette vil bli satt i et ingeniørgeologisk perspektiv, der særlig svakhetssonene vil være interessante.
- Tetthetskrav i relasjon til påtruffet geologi og oppnådde resultater.
- Problemstillinger i forhold til soner med liten overdekning.
- Stoppkriteriene, skjermdesignen og prosedyrene benyttet i injeksjonsarbeidet.
- Rapporteringssystemet og oppfølgingen av injeksjonsarbeidet.

- Eventuelle forskjeller mellom de ulike arbeidslagene, og særtrekk i forbindelse med inntrengning av injeksjonsmasse, vil også bli tatt med der det føles naturlig. Observasjoner på stuff over et lengre tidsrom, ville gitt et bedre grunnlag for å vurdere disse punktene.

Kun seksjoner der systematisk injeksjon har blitt utført i hovedløpet, vil bli analysert. Skjermer der sporadisk injeksjon har blitt utført, samt injeksjonen av påhuggene og av- og påkjøringsrampene, vil ikke bli inkludert i analysen. Analysen av injeksjonsarbeidene vil ikke bli satt i et anleggsteknisk perspektiv, der tidsforbruk og økonomi vil bli analysert. For eksempel vil ikke prisforskjell og forskjell i tidsforbruk bli vektlagt noe særlig i vurderingen av effekten av mikrosegment og industrisement. Detaljerte beskrivelser av utstyr og maskiner brukt i forbindelse med injeksjonen av Knappetunnelen, vil ikke bli gitt, fordi dette prinsipielt tilsvarer det som er beskrevet i teoridelen av oppgaven. Mengdeforbruk av tilsetningsstoffer blir ikke særskilt beskrevet og vurdert.

Selv om det ligger i injeksjonens natur at den er byggherrestyrt, har entreprenøren bidratt med mye materialet som er brukt i denne oppgaven. Men siden vi har hatt mer kontakt med byggherren gjennom veilederen vår, Terje Kirkeby, kan nok oppgaven bære preg av å ha blitt vinklet mer mot byggherrens rolle i injeksjonsarbeidet. Men gjennom samtaler med kilder hos entreprenør og egne observasjoner gjort på stuff har vi fått samlet informasjon som har bidratt til å balansere vurderingene av injeksjonsarbeidene.

1.4 Grunnlagsmateriale og utførte undersøkelser

Denne oppgaven er basert på en rekke grunnlagsmateriale fra først og fremst byggherre, men også entreprenør, samt egne observasjoner og undersøkelser i felt. De viktigste kildene kan oppsummeres som følger:

- Ingeniørgeologisk rapport til konkurransegrunnlaget.
- Samtaler og møter med personer i SVV og AF.
- Felles nettbasert Prosjektplass for AF og SVV (Projectplace).

- Egne registreringer og observasjoner på og bak stuff.
- Grunnlaget for anbudsbeskrivelsen (kontrakt).
- Mengdedata fra injeksjonsarbeidet.
- Møtereferater.
- Kontrollørmeldinger.
- Dagboken til kontrollingeniørene ved SVV.
- NGUs kartverk.
- NovaPoint Tunnel.
- SVV, NFF og BASF sine håndbøker.

2. Injeksjon i moderne norske tunneler

2.1 Introduksjon

Injeksjon av sementbaserte produkter i berg er den vanligste metoden for å forhindre innlekkasje av vann ved tunneldriving i Norge i moderne tid. I tillegg til tettingseffekten, vil injeksjon av berggrunnen ofte føre til at den blir mer stabil. I sjeldne tilfeller blir injeksjon benyttet i forbindelse med stabilitetssikring av knusingssoner (Nilsen and Broch 2010). Injeksjonsteknikken innenfor tunneldriving har eksistert i over 60 år, og har i de siste 20 årene utviklet seg mye (BASF 2011). Skandinavia har vært ledende innen å utvikle injeksjonsteknikken i retning av å bli mer effektiv og økonomisk. Injeksjon har blitt utført i en rekke bergarter og geologiske formasjoner med mer eller mindre suksess.

Berginjeksjon er et teknisk komplekst fag som krever inngående praktisk erfaring og bred geologisk bakgrunn av dem som er ansvarlige for planlegging og utførelse (Vegdirektoratet 2000). Det finnes to hovedtyper injeksjonsmidler; sementbaserte og kjemiske. Sementbaserte injeksjonsmidler er mest brukt (Nilsen and Broch 2010). Injeksjon i norske tunnelprosjekter er hovedsakelig erfaringsbasert, og det stilles krav om at entreprenøren har erfaring fra prosjekter med liknende tetthetskrav og fjellforhold. Dette gjelder særlig for tunnelanlegg der injeksjonen er forventet å være omfattende (Kveen, Backer et al. 2010). Detaljer om injeksjonsopplegget diskuteres gjerne underveis på stuff, og det er arbeidslederen eller eventuelt injeksjonsbasen og kontrollingeniøren som deltar i disse diskusjonene.

2.2 Innlekkasjekrav

Nødvendig omfang av tettingsinjeksjon avhenger først og fremst av de krav som stilles til tetthet og tillatt innlekkasje (Nilsen and Broch 2010). For undersjøiske tunneler og tunneler i bynære strøk, vil tetthetskravene være høyere enn i vanlige konvensjonelle tunneler. I planleggingsfasen av et tunnelprosjekt vurderes konsekvensene av innlekkasje til tunnelen. Det blir vurdert hvordan innlekkasjene vil påvirke omgivelsene rundt tunnelen (miljøkrav), hvordan det kan hemme driften av tunnelen (arbeidsplasskrav) og konsekvensene av innlekkasje for det permanente anlegget.

Når innlekkasjekravene til en tunnel skal fastsettes er det flere faktorer som må vurderes. Oppnådd tetthet ved injeksjon er avhengig av hvilke injeksjonsmasser som brukes i tillegg til selve injeksjonsteknikken (Erikstad, Karlsrud et al. 2003). En essensiell vurdering når maksimal innlekkasje fastsettes, er tunnelens plassering/beliggenhet. Går tunnelen i sensitive og setningsømfintlige bystrøk vil kravene være svært strenge. I forbindelse med tunnelbygging i Oslo, har det for eksempel blitt registrert flere tilfeller av setningsskader på bygninger som resultat av grunnvannsenkning (Nilsen and Broch 2010). Tetthetskravene var derfor ikke strenge nok for disse prosjektene. For en undersjøisk tunnel med et uendelig reservoar av vann over seg, er ikke kravene fullt så strenge. Dette er begrunnet med at lekkasjekonsekvensene i dette tilfellet vil være mye mindre med tanke på eventuelle setninger. Innlekkasje angis som liter per minutt per 100 meter tunnel (liter/minutt/100 meter). Innlekkasjekravene trenger ikke nødvendigvis å gjelde hele tunnelen. De kan være strenge i ømfintlige områder, og moderate i andre områder. Av og til bør ikke optimalt tetthetskrav settes på forhånd, men eventuelt justeres underveis i drivingen (Åndal, Andersson et al. 2001). Dette er forårsaket av forundersøkelsenes usikre natur, og den forventede geologien eller vannforholdene er ikke alltid de reelle.

2.2.1 Miljøkrav

Tunneler og andre anlegg i berg påvirker miljøet. Ved et tunnelprosjekt stilles det derfor miljøkrav for å begrense hvor mye skade miljøet skal kunne utsettes for. For undergrunnsanlegg er de største miljøfarene spredning av anleggskjemikalier samt effektene senkning av grunnvann medfører. Løsningen for å forhindre grunnvannsenkning er injeksjon. Ironisk nok bidrar samtidig injeksjon til ytterligere spredning av uønskede kjemikalier. I de senere år har kravene til injeksjonsmassene blitt strengere her i landet, noe som har ført til utslipp av mindre miljøskadelige stoffer. Det bør allikevel gjøres en vurdering mellom ønsket tetningsgrad og uønsket spredning av injeksjonsmasse (Stille and Eriksson 2005).

Senkning av grunnvann kan ha følgende negative effekter, som må tas med i betraktning:

- Reduksjon av poretrykket i løsmassene over tunnelen. Dette kan føre til setningsskader på bygninger og annen infrastruktur.

- Trefundamenter kan råtne på grunn av tilførsel av oksygen. Enkelte bergarter, som Alunskifer, kan swelle og påføre bygningsskader.
- Grunnvannsbrønner og andre vannkilder kan forringes, og i verste fall bli ødelagt. Jordbruksområder kan tørke ut.

2.2.2 *Arbeidsplasskrav*

For selve anleggsdriften stilles det også krav til innlekkasje. Kravene er tilknyttet arbeidsmiljø og fremdrift. Det er ikke ønskelig med store vanninnbrudd som kan føre til redusert fremdrift og økte kostnader. Innlekkasje kan også føre til problemer med lading av sprengstoff, samt redusert kvalitet på støpearbeidene. Grensen for maksimal innlekkasje under selve anleggsdriften er stort sett ikke dimensjonerende for injeksjonsprosessen. Dette er fordi innlekkasjekravene som settes med hensyn til omgivelsene som oftest er strengere (Kveen, Backer et al. 2010).

Også for det permanente anlegget er det en fordel at dette er tilstrekkelig tørt. Årsakene til at en ønsker et tørt miljø er mange, men viktigst er det å unngå skader på elektriske installasjoner og økte kostnader forbundet med pumping av vann. Med de kalde vintrene en opplever i Norge er ikke fuktighet gunstig med tanke på mulig isdannelse og de problemer som er forbundet med dette.

2.2.3 *Oppfølging og kontroll av innlekkasjekrav*

Funksjonskravene skal følges opp og kontrolleres underveis i drivingen av en tunnel. For oppfølging og kontroll benyttes i dag følgende metoder:

- Vanntapsmålinger i berget før og etter injeksjon.
- Innlekkasjemålinger i tunnelen.

- Poretrykk- og grunnvannstandsmålinger i berg og løsmasser rundt anlegget.
- Setningsmålinger på omkringliggende bebyggelse.

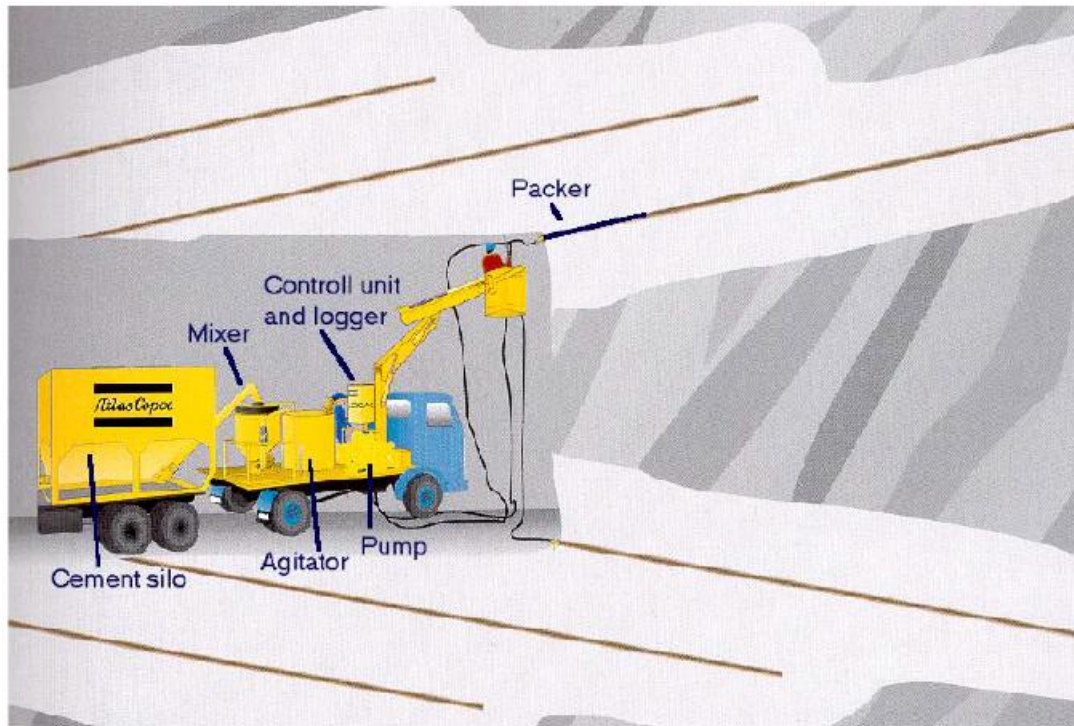
2.3 Injeksjonsriggen



Figur 2: Figuren viser en typisk injeksjonsrigg brukt i norske tunneler (Syrjänen and Tolppanen 2003).

I moderne injeksjon er det vanlig at alt utstyret blir installert permanent på kjøretøy som for eksempel trucker, der flere injeksjonslinjer kan bli brukt. Figur 2 viser en typisk injeksjonsrigg. For kontinuerlig forinjeksjon er tre linjer med tre pumper foretrukket (Syrjänen and Tolppanen 2003). Standardutstyr på en injeksjonsrigg er mikser, agitator, pumpe og datalogger. I tillegg kommer pakkere, staver, slanger og koblinger som brukes under injeksjonsarbeidet. En pakker er et forseglende instrument som brukes for å kontrollere inn- og utstrømning av fluider i injeksjonshullene. Et ferdigblandet injeksjonsmiddel pumpes med et overtrykk gjennom pakkene, inn i injeksjonshullet og videre ut i bergmassens sprekker eller kanaler. Injeksjonsmiddelet herder, ofte i løpet av en time, og tunnelen kan så

drives videre (Stille and Eriksson 2005). Figur 3 viser hvordan pakkeren ligger i borehullet, og hindrer utstrømming av fluider.



Figur 3: Figuren viser hvordan pakkeren ligger i borehullet, og hindrer utstrømming av fluider (Syrjänen and Tolppanen 2003).

Injeksjon utføres fra injeksjonsriggen. Som vist på Figur 3 er både siloer, blandere, kar for mellomlagring av ferdig blandet injeksjonsmasse og injeksjonspumpene installert på injeksjonsriggen. Injeksjonspumpene bør ha rikelig kapasitet for det maksimale trykk som skal benyttes. Injeksjonsriggen bør ha installert utstyr for automatisk logging av alle parameterne som inngår i injeksjonsrapporteringen. Dette bør omfatte (Kveen, Backer et al. 2010):

- Utført volum av ulike resepter i hvert hull.
- Trykk.
- Start- og stopptid for ulike blandinger.

Disse parameterne blir presentert i nåtid på skjermene som er installert på injeksjonsriggen, se Figur 4.



Figur 4: Figuren viser utstyret for datalogging på en moderne injeksjonsrigg (Fagermo, Frogner et al. 2008).

Dersom flere sementtyper skal brukes samtidig må flere av disse komponentene installeres. To siloer må være tilgjengelige dersom både industrisement og mikrosegment skal benyttes på det samme tunnelanlegget. Vekslingen mellom industrisement og mikrosegment kan da utføres uten langvarig stopp i injiseringen. Kar for mellomlagring av injeksjonsmiddel kalles agitatorer. For at injeksjonspumpingen skal kunne foretas kontinuerlig uten stopp i påvente av en ny blanding, er disse nødvendige på en injeksjonsrigg.

2.4 Injeksjonsutstyr

Utstyret som brukes under injeksjon, i tillegg til injeksjonsriggen og utstyret den er utrustet med, er pakkere, staver, slanger og koblinger. Det skal foreligge brukerveiledning for det utstyr som brukes. Det må påses at pumper og det utstyr som brukes i tilknytning til pumpene (pakkere, slanger, koblinger osv.) er dimensjonert for pumpenes designtrykk (Kveen, Backer et al. 2010).

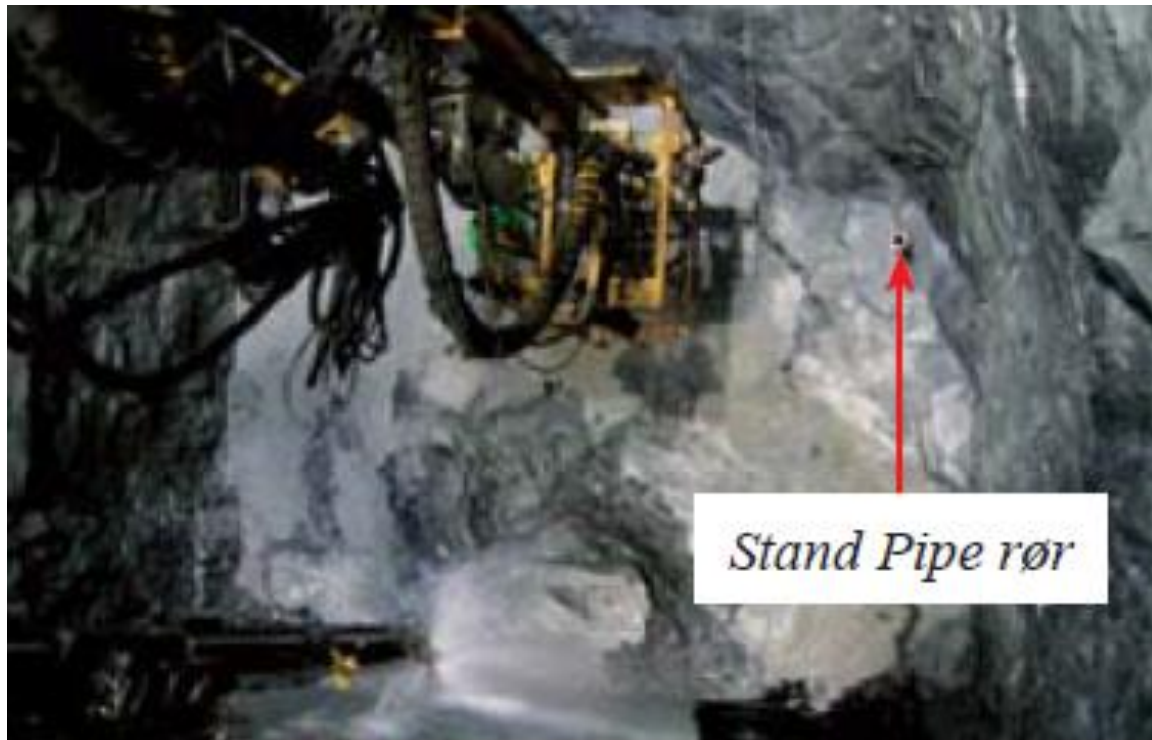
2.4.1 *Pakkere*

Når et hull blir stengt med en pakker, blir trykket sperret inne i borehullet og injeksjonsmassen blir dermed tvunget inn i sprekkene (Syrjänen and Tolppanen 2003). Pakkerne er normalt forankret i borehullet med en ekspandert forsegling. Injeksjonsmassen strømmer gjennom en ventil foran på pakkeren, som kan stenges. Spesielle pakkere med ekspansjonshylse er også tilgjengelige. Det finnes to ulike pakker-typer avhengig av hvilket trykk injeksjonsmassen skal pumpes med. For høye trykk, definert som over 60 bar, brukes en annen pakker-type enn for lave trykk (mindre enn 60 bar) (Kveen, Backer et al. 2010). På Figur 5 er det eksempler på begge typer: lavtrykkspakkere til venstre og høytrykkspakkere til høyre. Pakkerne er ulike i forhold til hva slags bruksområde de er egnet for. Pakkerne skal også være tilpasset hulldiameteren (Fagermo, Frogner et al. 2008). Engangspakkere blir ikke fjernet fra borehullene før salva sprenges, og dette er den mest brukte pakker-typen ved berginjeksjon (Kveen, Backer et al. 2010). Denne typen pakker har en ventil i fronten og spennes opp i borehullet med injeksjonsstaven. Ventilen blir skrudd av etter endt injeksjon, og da vil kun pakkeren sitte igjen i hullet. Staven kan rengjøres og brukes om igjen.



Figur 5: Pakkere med sete for mindre enn 60 bar (venstre), og mer enn 60 bar (høyre) (Kveen, Backer et al. 2010).

Flergangspakkere brukes til vanntapsmålinger og spesielle injeksjonsoppgaver, som for eksempel ekstremt dårlig berg. Da brukes såkalte hydrauliske pakkere som blir forankret ved hjelp av vanntrykk. Flergangspakkere kan avlastes etter bruk og fjernes fra hullet. Deretter kan de brukes om igjen. I dårlig bergmasse (for eksempel bergklasse E og F) er det ofte problemer med å få inn pakkerne i injeksjonshullene (Pedersen, Kompen et al. 2010). Under ekstreme forhold støpes et stålrør fast ca. 2 m inn i et hull i stoffen dersom pakkere ikke kan bli forsvarlig forankret. Dette er en såkalt 'standpipe' (Syrjänen and Tolppanen 2003). Hydrauliske pakkere eller såkalte hydrauliske pakkere bør da benyttes (Pedersen, Kompen et al. 2010). Fordelen med standpipen er at risikoen for utfall av pakkeren er svært liten, samt at vannet kan stenges av på stoff med de fordeler det innebærer (Fagermo, Frogner et al. 2008). Figur 6 viser en standpipe på stoff i Saudaprojektet.



Figur 6: Figuren viser en såkalt 'standpipe'. Bildet er tatt fra Saunaprojektet (Fagermo, Frogner et al. 2008).

2.4.2 Slangar, staver og koblinger

Ventilene på pakkerne, slangene og koblingene må tas i betraktning når utstyr og trykk for injeksjonsarbeidet skal velges (Syrjänen and Tolppanen 2003). Slangene bør være så korte som mulig. Injeksjonsstavene finnes i forskjellige lengder fra 1 m til 6 meter. Den vanligste stavlengden er 3 meter. Lengden på stavene er avhengig av hvor langt inne i bergmassen pakkerne skal plasseres, som igjen er avhengig av graden av oppsprekking av bergmassen. Trykktapet er større i lengre slanger, og faren for herding er større. Korte slanger er derfor generelt mer praktiske. Injeksjonsslangene må være av høy kvalitet for å kunne tåle injeksjonstrykk opp til 100 bar (Kveen, Backer et al. 2010). Slangar bør ha en innvendig diameter som gir minst mulig trykktap, og det er vanlig å benytte slanger med $\frac{3}{4}$ " innvendig diameter.

2.5 Injeksjonsmidler

Injeksjonsmassens evne til å trenge inn i sprekker er en viktig faktor for vellykket injeksjon. På grunn av at injeksjonsmassen er en suspensjon med korn, kan den ikke trenge inn i like små åpninger som vann. Utvikling av injeksjonsmasse har derfor i de senere år vært sterkt påvirket av å øke inntrengningsegenskapene. Den hovedsakelige utviklingen har vært å finmale sementen, slik at den maksimale kornstørrelsen blir mindre. Valg av injeksjonsmiddel skal gjøres på grunnlag av sprekkesystemet i tillegg til tekniske aspekter ved injeksjon, som hullavstand og injeksjonstrykk. De viktigste egenskapene til injeksjonsmiddelet oppsummeres følgende (Stille and Eriksson 2005):

- Inntrengningsegenskap – beskriver hvilke sprekkeåpninger injeksjonsmiddel kan ta seg gjennom uten at det filtreres eller blokkerer inntrengning.
- Reologi – beskriver flyteegenskapene til injeksjonsmiddelet når det utsettes for et gitt trykk.
- Trykkstabilitet – beskriver hvor mye vann som skilles ut av injeksjonsmiddelet når den utsettes for trykk. En god sement skiller ut lite.
- Herding – beskriver hvor fort injeksjonsmiddelet stivner, eller oppnår en viss bestandighet. Under normale omstendigheter har standard injeksjonssement en herdetid på 8 – 10 timer, mens en rask mikrosement under samme betingelser størkner på rundt 2 timer (Kveen, Backer et al. 2010). Lav temperatur på vann/sement før og under blanding sinker herdeprosessen. Med lav temperatur menes $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ned mot $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ vil herdeprosessen gå meget tregt (Vegdirektoratet 2000).

2.5.1 *Injeksjonsmassens reologi*

V/c-forholdet og den spesifikke overflaten påvirker i stor grad de reologiske egenskapene til injeksjonsmiddelet. Flytespenningen øker når v/c-forholdet minker og den spesifikke overflaten øker. For eksempel finmalt sement har større spesifikk overflate enn grovere malt

sement. Sementbaserte produkter er mest brukt for berginjeksjon (Syrjänen and Tolppanen 2003). De langvarige egenskapene og de miljømessige aspektene for sement er godt kjent, i tillegg er sement relativt billig. Blandingsprosedyren for injeksjonsmiddelet må være konsistent, og blandingsutstyret må være tilfredsstillende for at injeksjonen skal bli vellykket. I tillegg til v/c-forholdet og spesifikk overflate, påvirker følgende elementer injeksjonsmassens reologi (Stille and Eriksson 2005):

- Sementtype.
- Sementhydratisering (tidsavhengig).
- Blandingstid.
- Temperatur.

I prinsippet kan alle typer sement brukes til injeksjon, men de grovest malte vil ha begrenset inntrengningsevne i fine sprekker. Grovmalte sementer bør derfor kun brukes til å fylle store sprekker og hulrom (Kveen, Backer et al. 2010). Disse 'konvensjonelle' produktene kan ikke trenge inn i mindre sprekkeåpninger enn 0,1 – 0,2 mm (Nilsen and Broch 2010). Sementtypene som vanligvis benyttes til injeksjon i moderne tid kan deles inn i to kategorier, mikrosement og industrisement. Ikke-sementbaserte injeksjonsmidler brukes stort sett kun til etterinjeksjon eller andre spesialtilfeller (Kveen, Backer et al. 2010). Hovedforskjellen mellom mikro- og industrisement er kornstørrelsen. Mikrosementen har mye finere kornstørrelse, og har derfor bedre gjennomtrengningsegenskaper, samtidig som den binder mer vann. Blaine-verdien [m^2/kg] er et mål på hvor finmalt sementen er. Jo høyere spesifikk overflate, dess høyere Blaine-verdi oppnås under testing på et godkjent laboratorium (Syrjänen and Tolppanen 2003). Når det stilles strenge krav til tetthet for et anlegg benyttes ofte mikrosementer (Nilsen and Broch 2010).

Det er som regel ikke mulig å velge en løsning som oppfyller alle de ønskede egenskapene til den injiserte bergmassen. Generelt prioriteres lettflytende injeksjonsmidler med bra inntrengningsevne, for eksempel mikrosement, i bergarter med fine sprekker, mens det i

grove sprekker benyttes mer tyktflytende masser som industrisement. I situasjoner med både fine og grove sprekker injiseres først et injeksjonsmiddel med god inntrengingsevne, og senere et injeksjonsmiddel med lavere v/c-tall. V/c-tall er forholdet mellom sement og vann i injeksjonsmassen. Lavt v/c-forhold indikerer at det er lite vann i forhold til sement, høyt v/c-tall det motsatte (Stille and Eriksson 2005). I forhold til hvilke tetthetskrav som stilles for den ferdige tunnelen, vil bruken av industrisement og mikrosegment henholdsvis ofte være assosiert med lave til moderate krav og høye krav (Åndal, Andersson et al. 2001).

2.5.2 *Tilsetningsstoffer*

Strømningsegenskapene til injeksjonsmassen kan påvirkes av v/c-forholdet, og ved tilførsel av diverse tilsetningsstoffer (BASF 2011). Sement blandet med vann har en tendens til å separere over tid. Dette blir ofte kalt “bleeding”. For å motvirke dette må det tilsettes noe som motvirker sedimenteringen, og som gjør mørtelen mer stabil. Injeksjonsmassen er definert som stabil for “bleeding” < 2%, altså at mindre enn 2 % vann skiller seg fra suspensjonen. Labtesting av injeksjonsmiddelet kan bestemme hvor stabilt det er, men det kan miste sin stabilitet når det blir forstyrret, som for eksempel under injeksjonen (Syrjänen and Tolppanen 2003). Hvor ustabilt injeksjonsmiddelet blir, er avhengig sementens mineral- og kjemiske sammensetning. Tilførsel av bentonitt er en mulig løsning som blir brukt i utlandet (Kveen, Backer et al. 2010). Negative sider ved tilførsel av bentonitt er at den plastiske viskositeten og flytespenningen øker. Som et alternativ til bentonitt kan silikaslurry tilsettes injeksjonsmassen. Dette vil ha en tilsvarende effekt med tanke på å redusere separasjon, og brukes som regel i Norge i dag.

Tilsetning av superplastiserende stoffer er vanlig for å separere partikkelklynger i suspensjonen. Superplastiserende stoffer kalles også dispergerende midler (Kveen, Backer et al. 2010). Disse stoffene forårsaker en radikal økning av den spesifikke overflaten til partiklene i injeksjonsmiddelet, som igjen fører til økt aktivitet i hydratiseringsprosessen. Denne tilsetningen vil føre til en lavere plastisk viskositet og flytespenning. Ved å tilsette en kombinasjon av superplastiserende stoffer og bentonitt (silikaslurry i Norge) kan økte flyteegenskaper i injeksjonsmassen oppnås (Hässler, Håkansson et al. 1992). Samtidig øker

separasjonsstabiliteten ('bleeding'), og kombinasjonen av tilsetningsstoffene er at pumpekapasiteten øker, samt at problemer med tetting av slanger reduseres (Åndal, Andersson et al. 2001).

Felles for disse stabiliserende stoffene, superplastiserende/bentonitt og silikaslurry, er at de retarderer størkningsprosessen. Det er viktig at de har mindre partikler enn sementen, hvis ikke vil de oppføre seg som "overstørrelser" og hindre inntrengningen (Kveen, Backer et al. 2010). Tilsetningsstoffene påvirker generelt injeksjonsprosessen på en positiv måte, fordi injeksjonsmassen kan trenge lenger inn i bergmassen før herdingen starter (Syrjänen and Tolppanen 2003).

2.5.3 Lagring av injeksjonsmasse

Sementbasert injeksjonsmasse blir stort sett levert i sekker på 1000 kg. Disse må lagres forsvarlig. De viktigste punktene i forhold til lagring av sementbasert injeksjonsmasse, er oppsummert under (Kveen, Backer et al. 2010):

- Mikrosement er bedre egnet til lagring enn industrisement på grunn av ekstra beskyttelse fra emballasjen.
- All sement skal lagres tørt og luftig.
- Lagring, luftfuktighet osv. har stor innvirkning på kvaliteten til sementen. Å lagre sement i tunnelen over lengre tid, er ikke noen god løsning. Å rullere lageret er en bedre løsning, for da vil den eldste sementen kunne bli brukt først.

At sementen er fersk er viktig. Dersom den er for gammel, vil uvanlig mye 'bleeding' være resultatet, i tillegg til at herdetiden øker. Leverandøren av sementen må derfor kunne levere fersk sement når det er behov for det.

2.5.4 *Testing av injeksjonsmiddel*

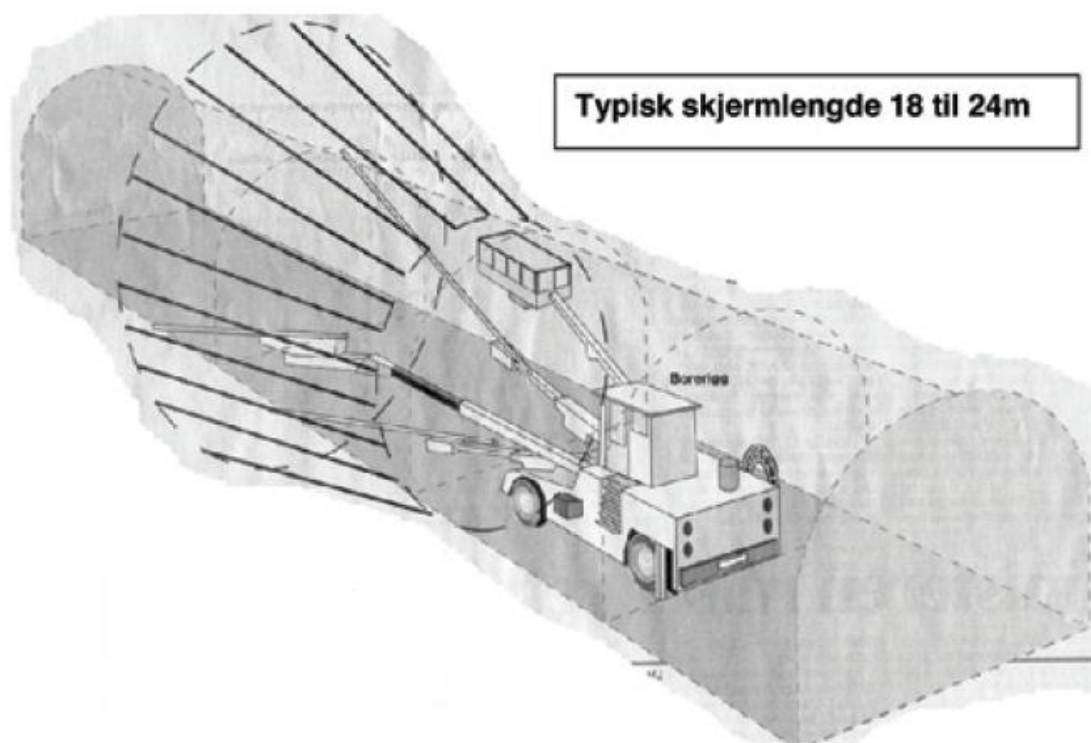
Alt injeksjonsmiddel skal være godkjent av byggherren. I Norge blir ingen tester av injeksjonsmiddelet utført under injeksjonsarbeidene, siden fabrikkens egne tester vanligvis er akseptert (Syrjänen and Tolppanen 2003). Slike tester utføres for å kontrollere viskositeten, graden av 'bleeding' og størkningen. Størkningen kan med fordel kontrolleres på stoff, fordi videre drift (boring) er avhengig av hvor raskt sementen størkner. Dette kan enkelt testes på stoff med en kopp. Når injeksjonsmassen er så stiv at man kan snu koppen på hodet uten at massen renner ut, har man nok størkning til videre drift av tunnelen (Kveen, Backer et al. 2010).

2.6 **Utførelse av injeksjon**

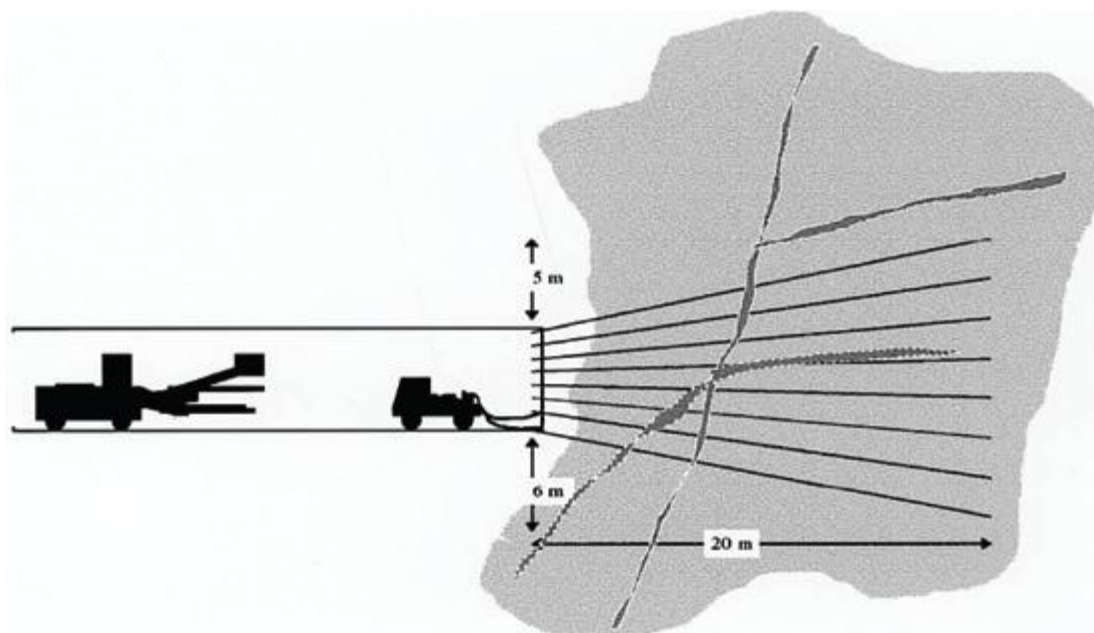
For at injeksjonsarbeidet skal være vellykket må det være et godt samspill mellom elementene som inngår. De tre hovedelementene er ifølge Kveen og Klüver geologien, utstyret og menneskene. Det er viktig med god kjennskap til de geologiske parameterne slik at en kan bestemme injeksjonsstrategi. Videre trenger en mennesker med erfaring og kompetanse slik at injeksjonsarbeidet utføres korrekt. Utstyr trengs for å utføre arbeidet effektivt, trygt og innenfor de gitte rammene. Design av injeksjonsskjermen må alltid bestemmes slik at de kravene til innlekkasje som er satt, blir overholdt. Berginjeksjon har ved siden av tetteeffekt også stabiliserende virkning på berget (Vegdirektoratet 2000). Den drivende kraft bak injeksjon er injeksjonstrykket. Det må benyttes så høyt trykk som forholdene tillater – dette kalles 'aktiv injeksjon'. Dvs. at injeksjon av hvert hull vanligvis avsluttes med trykk på 50-100 bar, etter gradvis trykkoppbygging ved hjelp av variasjon av v/c-forholdet (vann/ement-forhold). Det må nevnes at aktiv injeksjon er en særnorsk filosofi som ikke deles av de fleste tunnelingeniører på kontinentet, samt Sverige og Finland. Her opereres det med langt lavere injeksjonstrykk, med den begrunnelse at høye trykk og medfølgende hydraulisk splitting fører til nedsatt stabilitet av bergmassen (Vegdirektoratet 2000). I Norge er det vurdert at hydraulisk splitting kun har stabilitetsmessige konsekvenser i store fjellhaller.

2.6.1 *Utforming av injeksjonsskjermen*

Den vanligste formen for injeksjon, såkalt forinjeksjon, går ut på å bore et visst antall injeksjonshull i en skjerm foran tunnelstuppen, se Figur 7 og Figur 8. Også stuppen skal injiseres, ifølge Håndbok 021 (SVV 2010). Lengde, retning og diameter på hullene tilpasses bergets beskaffenhet og tetthetskravene som skal oppnås. Det har vist seg at man får en mer velsmurt drift dersom systematisk forinjeksjon utføres, og man unngår at lekkasjen flytter seg til ikke-injiserte områder (Åndal, Andersson et al. 2001).



Figur 7: Injeksjonsskjerm med standard lengde 18 -24 meter (Kveen, Backer et al. 2010).

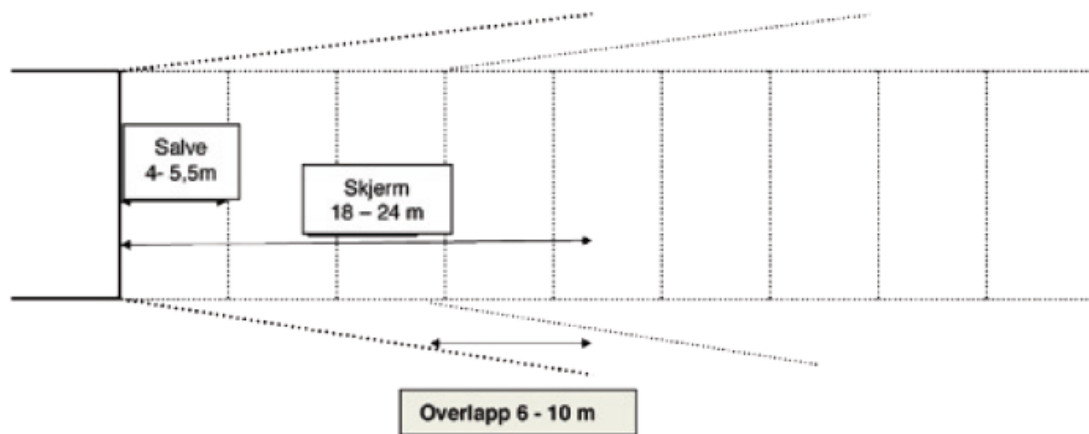


Figur 8: Injeksjonshull bores i en skjerm foran stoff (Kveen, Backer et al. 2010).

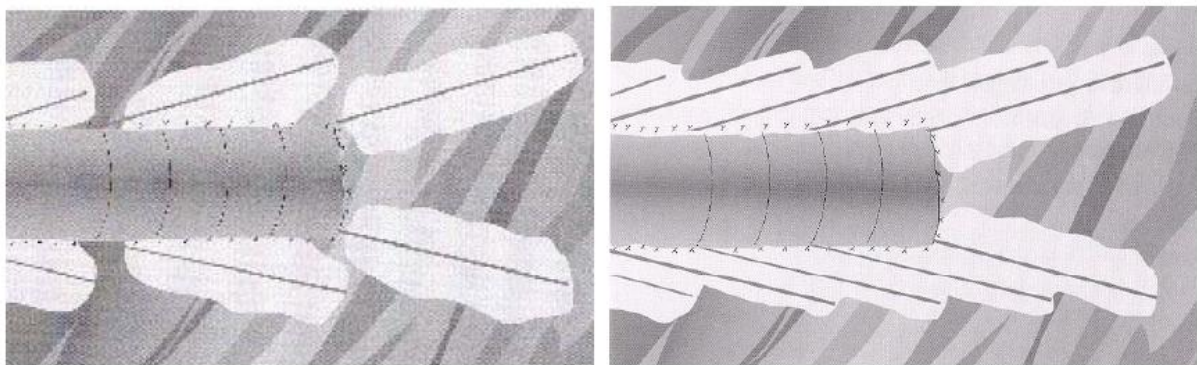
En forutsetning for vellykket injeksjon er riktig design av injeksjonsskjermen. Det er viktig at skjermen tilpasses de stedlige forhold (SVV 2010). Standard tykkelse på injeksjonshullene i skjermen er 51 eller 64 millimeter, mens skjerm lengden vanligvis ligger mellom 18 og 24 meter, se Figur 9. Ved syklisk injeksjon er det vanlig med en overlapp mellom hver skjerm. I Figur 9 foreslås det at denne avstanden er i størrelsesorden 6 – 10 meter. Hvor stor overlapp som benyttes varierer naturligvis fra prosjekt til prosjekt, og er blant annet avhengig av tetthetskravene. Mengden overlapp kan også variere fra seksjon til seksjon for et bestemt tunnelanlegg, avhengig av innlekkasjeforholdene og bergforholdene. Ved strenge krav til innlekkasje benyttes dobbel skjerm over hele tunnelen. Det vil si at for disse prosjektene, er avstanden mellom skjermene halvparten av skjerm lengden. På Figur 10 er skjerm med dobbel overlapping og enkel overlapping vist. Ved enkel overlapping er faren for lekkasje i grensen mellom to etterfølgende skjerm store. I tillegg til å sørge for at overlappingen mellom skjermene er tilstrekkelig stor nok, samt lengde og avstand mellom injeksjonshullene, er det viktig at sprengningen utføres på en slik måte at injeksjonsskjermen ikke skades (SVV 2010).

Hullavstanden ved ansett varierer ut fra hvor strenge tetthetskravene er (Kveen, Backer et al. 2010). På prosjekter der fjellet har vært forholdsvis tett, er det erfart at man må ha forholdsvis høy oppbøringsgrad for å treffe de vannførende kanalene (Åndal, Andersson et al. 2001).

Dersom bergmassen er oppsprukket eller har høy permeabilitet, bør hullengden reduseres. Ved god kommunikasjon mellom hullene, kan hullantall reduseres.



Figur 9: Salvelengde, skjerm lengde og overlapp sett i lengderetning (Kveen, Backer et al. 2010).



Figur 10: Figuren viser dobbel skjerm (til høyre) og enkel skjerm (til venstre) (Syrjänen and Tolppanen 2003).

Grunnen til at injeksjonsskjermene bør overlappe hverandre, er for å unngå masseutgang bak stuff ved injeksjon. En ønsker at mørtelen skal trenge inn i, og tette sprekke foran stuff. Injeksjonspakkerne plasseres derfor 1.5 – 2.5 meter inn i injeksjonshullene, innenfor injisert område fra forrige skjerm. Når den aller første injeksjonsskjermen klargjøres, plasseres naturligvis pakkerne i områder som ikke har vært injisert tidligere. Pakkerne i første skjerm plasseres derfor med fordel dypere inn i injeksjonshullene, for å unngå unødvendig stor masseutgang bak stuff.

2.6.2 *Plassering av pakkere*

I utkanten av hullene plasseres injeksjonspakkere. Pakkere settes normalt 1,5 til 2,5 meter inn i borhullet, men denne avstanden skal tilpasses bergmassekvaliteten på stuff. I spesielle tilfeller kan det være aktuelt å plassere pakkere 10-15 meter inn i borehullet. Hvis man borer på vann med høyt trykk, kan det være svært vanskelig å få montert en pakker. For å få det til kan det hjelpe å skjære av tuppen på pakkeren, slik at noe av vannet får renne gjennom staven og ut av bergmassen. Da vil vanntrykket bli mindre bak pakkeren, men det kan i tillegg være nødvendig å bore flere avlastingshull dersom trykket er veldig høyt i utgangspunktet. Alle pakkere som settes i disse hullene må ha avskåret tupp, slik at vannet har fri passasje ut gjennom staven.

2.6.3 *Injeksjonstrykk*

Valg av riktig injeksjonstrykk er en vanskelig, men viktig, vurdering som må gjøres. Injeksjonstrykket driver injeksjonsmiddelet inn i sprekke, og er svært avgjørende for hvor tett sonen rundt tunnelen blir. Den norske filosofien går ut på å benytte så høyt trykk som forholdene tillater, med en øvre skranke på 100 bar. Denne filosofien deles derimot ikke av så mange andre land, blant annet fordi det antas at faren for ulykker er større dersom høye trykk benyttes som stoppkriterium. Ved høye injeksjonstrykk kan en oppleve at berget deformeres og at nye sprekker åpnes, såkalt hydraulisk splitting. Effekten av dette er ikke fullstendig dokumentert. I et sikkerhetsperspektiv er bruk av høye trykk ved injeksjon betenkelig (Fagermo, Frogner et al. 2008). Likevel er holdningen til Statens vegvesen og Vegdirektoratet at hydraulisk splitting er en forutsetning for å tilfredsstille de strenge tetthetskravene. Likevel kan jekking av berget, slik at nye kanaler åpnes, for eksempel føre til uønsket stor inngang av masse. Riktig injeksjonstrykk må derfor vurderes på plassen ut fra de erfaringene som gjøres underveis i injeksjonsarbeidet (Kveen, Backer et al. 2010).

Prinsippet 'Aktiv injeksjon', som benyttes på norske tunnelanlegg der injeksjon utføres, går ut på at en prøver å oppnå en kontinuerlig trykkoppbygging i hvert injeksjonshull til et endelig forhåndsbestemt sluttrykk, eller et såkalt stoppkriterium er nådd. Trykkoppbyggingen styres

med å variere v/c-forholdet i injeksjonsmiddelet. Det injiseres først med tynne masser med god inntrengningsevne, og videre med tykkere masser. Det tilstrebes så lavt v/c-forhold som mulig for å oppnå tilsiktet masseinngang (Kveen and Klüver 2004). Dette fører til at herdetiden og injeksjonstiden går ned, samtidig som at kvaliteten på herdet masse er god. Dersom man har for mye vann, vil man få mye separasjon og i verste fall en ødelagt sementmasse. Ulemper med tørr sementmasse er at sementmassen kan bli så tyktflytende at man ikke får særlig penetrasjon i sprekkene i berget. Altså, det gjelder å finne det mest optimale v/c-forholdet i injeksjonsmassen, avhengig av sprekkenes karakter og hvor rask trykkoppbygningen i hullet er. Hvilken masseresept som gir best resultat er avhengig av stedlige forhold og bergkvalitet (Vegdirektoratet 2000).

Dersom ikke riktig trykkoppbygning oppnås i enkelte hull, kan man bytte over til en masse som gir økt injeksjonsmotstand. Eventuelt kan man la hullet 'hvile', slik at injeksjonsmassen får begynt å herde. Dermed øker friksjonen, og dette tiltaket er aktuelt dersom masseinngangen er stor. Eventuell tilsats av mauringsmasse kan være et alternativ, særlig i forbindelse med store lekkasjer og åpne sprekker. Mauringsmasse pumpes gjennom borehull i berget og strømmer mot lekkasjested der massen avsettes, og består av partikler som blandes med vann eller injeksjonsmasse (Kveen and Klüver 2004). Et vanlig tiltak for å avslutte hull der trykkoppbygning ikke oppnås ved å pumpe inn de angitte mengdene ved de ulike v/c-forholdene, er å tilsette akselerator. Dette er først og fremst et tiltak som er nyttig dersom mikrosemeter benyttes som injeksjonsmiddel.

2.6.4 Akselerator/styrt herding

Tilsats av akselerator i injeksjonsmassen kan være nyttig for å oppnå riktig sluttrykk. Dette kalles styrt herding, og er en metode som brukes for å 'plugge' hullet dersom ikke riktig mottrykk oppnås etter at angitt mengde injeksjonsmiddel har blitt pumpet inn (Kveen, Backer et al. 2010). I Norge brukes normalt alkaliefrie akseleratorer, ikke kalsiumklorid som er en vanlig akselerator i andre land. Akselerator er et nyttig hjelpemiddel ved utganger i og bak stuff, og ved store innganger av injeksjonsmaterialer.

Under injeksjonen blir akseleratoren mikset med injeksjonsmassen helt framme på staven, som vist på Figur 11. Akseleratoren blir pumpet til staven via en egen linje som er koblet til staven via et eget munnstykke. Ved å bruke en egen linje for akseleratortilsatsen unngås herding av injeksjonsmassen i slanger og koblinger. Det er viktig at riktig mengde akselerator blir tilsatt i forhold til strømningshastigheten til injeksjonspumpa. Dette gjøres for å oppfylle reseptens krav til prosentandel akselerator i injeksjonsmassen. Riggen må derfor være tilstrekkelig avansert til at dette blir utført med tilfredsstillende. Akseleratortilsats fungerer ikke like bra for alle sementtyper. For industrisement er ikke effekten like stor som for enkelte mikrosegmenttyper (Kveen, Backer et al. 2010).



Figur 11: Figuren viser stav med munnstykke for akseleratortilsats koblet til. Staven er kort fordi dette er en demoversjon (Holter 2011).

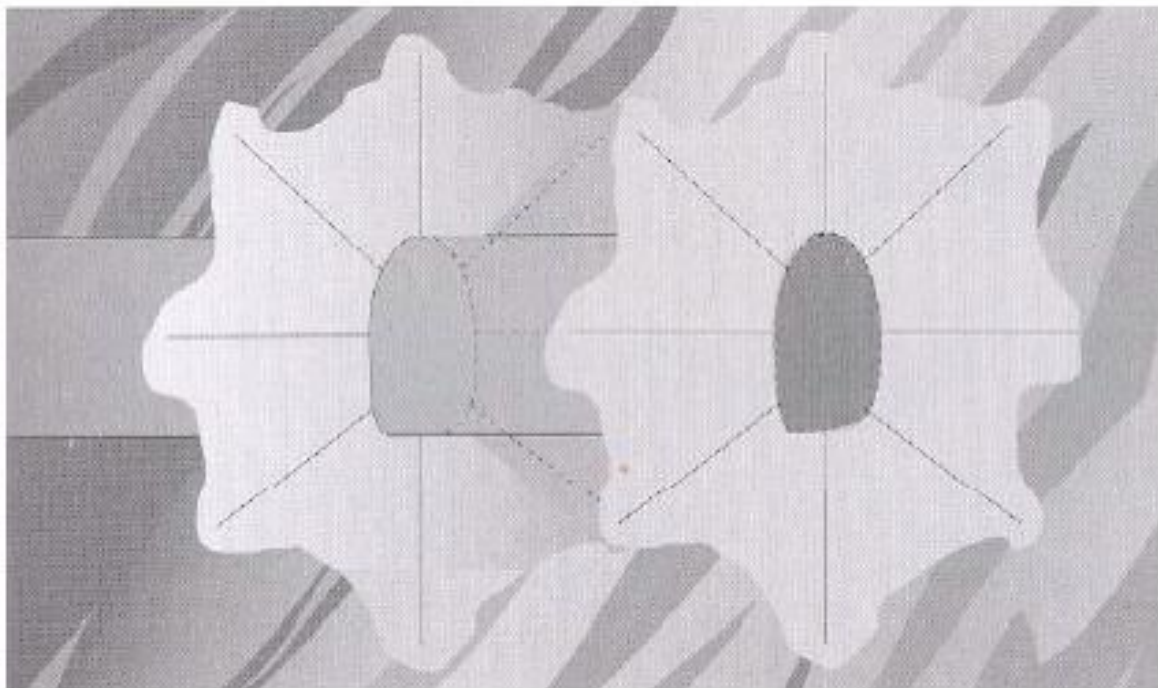
2.6.5 Ytre injeksjonsskjerm

Dersom hverken skifte over til masse som gir økt injeksjons-motstand, pauser under injeksjon av hvert hull med stor masseinnngang, tilsats av akselerator eller mauringsmasse gir riktig trykkoppbygging, kan man injisere en ytre skjerm. Denne 'sperreskjermen' må etableres før normal injeksjon utføres, og berget nær tunnelen injiseres. Denne ytre skjermen vil føre til at konduktiviteten i mer perifere deler av bergmassen reduseres. Slik kan det dannes en barriere som gjør det mulig å benytte nødvendig høyt injeksjonstrykk i bergmassen nærmere tunnelen.

Det har vist seg fordelaktig å starte en injeksjonsrunde med å injisere sålehullene først. Deretter injiseres vegghullene, og til slutt hullene i hengen. I tilfeller der det bores en ytre sperreskjerm mot dagen, bør det vurderes spesielt om denne skjermen skal injiseres før både hull i hengen og hull lenger nede i profilet (Vegdirektoratet 2000). Injeksjonsmetoden med styrt herding ved tilsats av akselerator gjør at det er mulig til å utføre slik 'barriereinjeksjon' (Holter 2011).

2.6.6 *Etterinjeksjon*

Seksjoner som fortsatt drypper, og som er identifisert etter videre drift, blir reparert med etterinjeksjon (Syrjänen and Tolppanen 2003). Det finnes mange typer etterinjeksjon. Prinsippet for denne metoden er vist i Figur 12. Det kan være alt fra injeksjon av boltehull som lekker (Thor bolt), mer eller mindre konsentrerte punktlekkasjer ut av berget, til lange strekninger hvor det siver inn mer vann enn akseptabelt (Kveen, Backer et al. 2010). Etterinjeksjon bak stuff er et tiltak som kan bidra noe til å redusere lekkasjer, gitt at den er omfattende og riktig utført (Erikstad, Karlsrud et al. 2003). Det er imidlertid svært dyrt å utføre, og bør betraktes som en nødløsning når andre tiltak ikke er gjennomførbare.



Figur 12: Prinsippskisse for etterinjeksjon (Syrjänen and Tolppanen 2003).

2.7 Alternativer til injeksjon

Sementbasert injeksjonsmasse, eventuelt tilsatt tilsetningsstoffer, har vist seg å virke tilfredsstillende under de fleste bergforhold. Selv under meget vanskelige forhold har det vist seg at det har vært mulig å oppnå så tett berg ved forinjeksjon at alle aktuelle krav til tetthet har latt seg oppfylle. Riktig utført injeksjon kan redusere eller eliminere behovet for vann-/frostsikring, men der det er tvil om berginjeksjon alene kan innfri gitte tetthetskriterier, må det opprettes et system for vanninfiltrasjon og/eller overrisling (Vegdirektoratet 2000). Et slikt system kan også være aktuelt der tunnelen skal drives i nærheten av setningsømfintlige byggverk eller andre installasjoner som er lett påvirkelig av grunnvannsdrenering. Dette systemet kan stenges av dersom det viser seg at tettingen i tunnelen over tid er tilstrekkelig til å opprettholde grunnvannsnivå og poretrykk innen tillatte kriterier.

Anvendelse av membranisolert utstøpning e.l. er også et alternativ til injeksjon, og kan være aktuelt der lekkasjeproblerne opptrer i fjell med så lav stabilitet at injeksjon ikke har tilstrekkelig stabiliserende virkning. Da tetting med membranisolert utstøpning i

setningsømfintlige områder også nødvendigvis innebærer injeksjon som foreløpig tetting, er det lite trolig at dette kan konkurrere på tid og kostnader med injeksjon. Dette forutsetter at injeksjonen utføres så omfattende at metoden oppfyller tetthetskravene alene. Ved bruk av membran som vanntetting, utføres først en avretningsstøp før membranen monteres. Deretter støpes selve betongutforingen (Erikstad, Karlsrud et al. 2003).

Vanntett betongutforing uten membran er også et alternativ, men omfattende kontakthinjeksjon mellom berg og betong er da ofte nødvendig.

2.8 Planlegging av injeksjon i Norge

Forundersøkelser på området hvor tunnelen skal ligge er nødvendig for å kunne planlegge injeksjon, og jo mer detaljerte disse er, dess bedre og mer forutsigbare resultater vil bli oppnådd (Syrjänen and Tolppanen 2003). Disse undersøkelsene kan være dyre, men vil være nødvendige for å få en tettest mulig tunnel.

Prosjekteringsarbeider skal på bakgrunn av hydrologiske og hydrogeologiske utredninger konkludere med bl.a. kriterier for tillatt drenering av grunnvannsmagasinet i berg og løsmasser ved tunnelen, og kriterier for nødvendige tettetiltak i tunnelen. I hydrogeologisk sensitive områder skal det opprettes system for overvåking av grunnvannsforholdene i god tid før tunneldriving starter.

Planlegging og utarbeidelse av prosedyrer for injeksjonsarbeidene som er basert på resultatene fra forundersøkelser, er avhengig av at forundersøkelsene er detaljerte. Prosjekteringsarbeidet, som utføres før tunnelen bygges, skal angi metoder for injeksjonsarbeider og forventet tilpasning til varierende bergforhold (Vegdirektoratet 2000).

2.8.1 *Bergmassekategorier*

Publikasjon104, Berginjeksjon i praksis, utgitt av Statens Vegvesen, opererer med ulike kategorier eller typer bergmasser som har vist seg å ha hatt mest betydning i injeksjonssammenheng i Norge (Kveen and Klüver 2004). Det har blitt antatt at en firedeling av bergmasseeegenskapene er mest relevant for norske bergmasseforhold, selv om ikke absolutt alle forhold da blir inkludert. Basert på hvilken kategori bergmassen for en gitt seksjon av tunneltraseen befinner seg i, kan den overordnede injeksjonsstrategien velges. Også relativt masseforbruk er angitt for hver kategori. Naturligvis kan ikke alle tunnelprosjekter plasseres i en av disse kategoriene. Detaljene rundt injeksjonsprosedyrene diskuteres på stuff i tillegg, men bergartstypene som Statens vegvesen opererer med kan gi en pekepinn på hvor lange hull som bør bores, v/c-forhold, trykk, type injeksjonsmiddel osv. Dette er parametere som også må vurderes fortløpende på stuff for hver skjerm.

Som grunnlag for utarbeidelse av anbudsbeskrivelsene er det viktig at forventet prosedyre for injeksjon angis (Kveen and Klüver 2004). Skjermdesign og overlapp, samt forventet forbruk av tid og masser, skal angis. Konsekvenser for injeksjonsopplegget, avhengig av ingeniørgeologiske og hydrogeologiske forhold langs hele tunneltraseen, skal også vurderes, særlig i forbindelse med svakhetssoner. Når best mulig injeksjonsopplegg skal etableres for en tunnel, er det vanligvis riktig å ta utgangspunkt i et opplegg som innebærer tiltak som er i overkant av det som oppfyller gitte tetthetskrav for aktuell bergmasse. All injeksjon bør utføres på basis av prøve-og-feile-prinsippet for å optimalisere injeksjonen underveis iht. vekslende bergforhold. Det er spesielt viktig å observere hva som skjer i en startfase av injeksjonsarbeidet, slik at utførelse av injeksjonen og stoppkriteriene kan tilpasses forholdene (Kveen, Backer et al. 2010). I forbindelse med drivingen av Bragernestunnelen i Drammen var mottoet å begynne strengt og eventuelt slakke av på opplegget etter hvert (Åndal, Andersson et al. 2001)

2.8.2 *Ingeniørgeologiske parametere som må undersøkes*

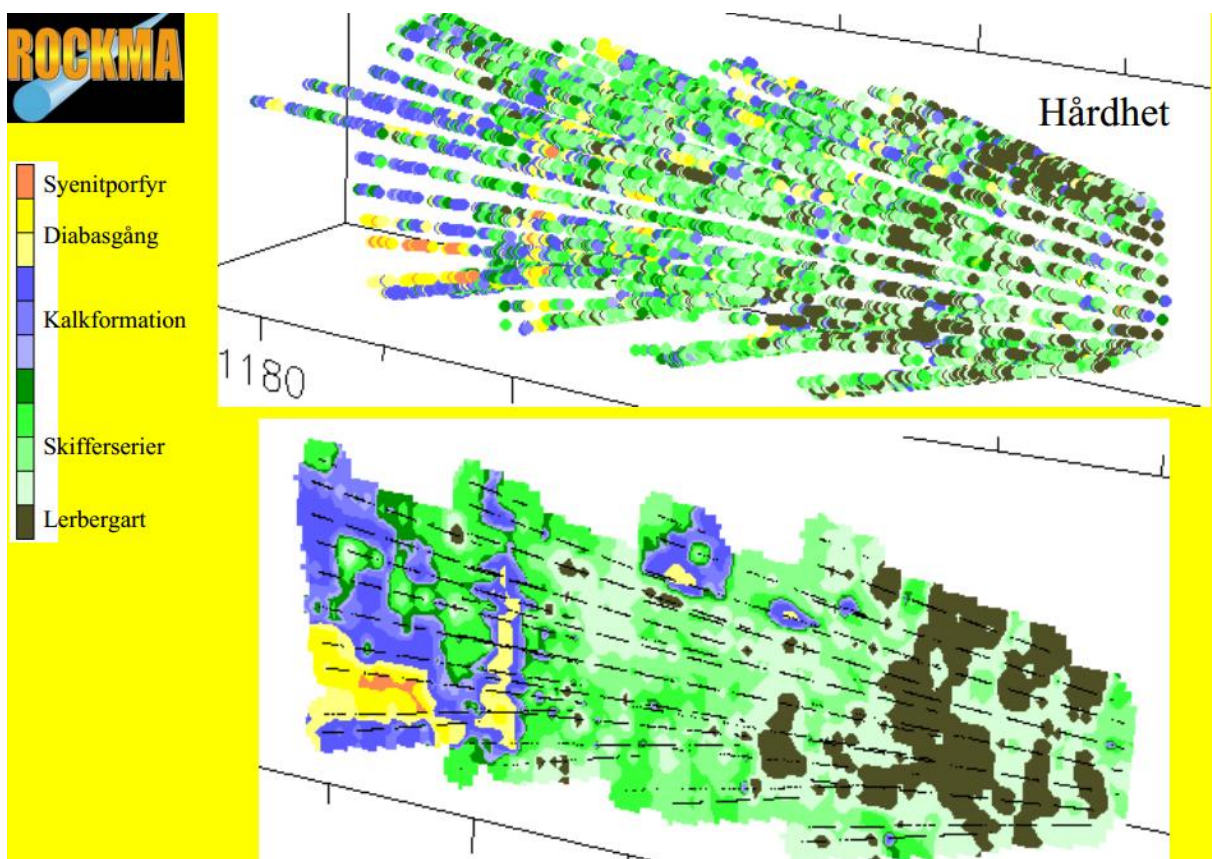
De bergforhold som er viktigst for injeksjonsstrategien er bergartstype, tektonisk påvirkning, sprekkekarakter og -orientering, sprekkefylling og spenningstilstand (Vegdirektoratet 2000). Egenskapene til sprekken, både for enkeltsprekker og sprekkenettverk, må derfor analyseres. I tillegg må omfanget av sprekker i området der tunnelen skal bygges kartlegges. Også de hydrogeologiske forholdene i området der tunneltraseen skal legges bør undersøkes, da med spesielt fokus på konduktiviteten og transmissiviteten til bergmassen. Sprekkeegenskapene kontrollerer hvor lett injeksjonsmiddelet trenger inn i sprekken. I tillegg vil også retningsavviket for borehullene være kontrollert av geologien, og borplanen må justeres dersom retningsavviket er for stort, særlig dersom tetthetskravene er strenge (Kveen, Backer et al. 2010). I bergrom med kort avstand til andre bergrom, rørledninger, konstruksjoner eller til terrengoverflaten, må det etableres rutiner for inspeksjoner for å oppdage eventuelle utganger av injeksjonsmasse. Kartlegging av slike områder bør utføres før injiseringen starter. I tillegg bør det utføres inspeksjoner underveis i injeksjonen, slik at utganger av injeksjonsmasse i dagen eller bak stuff blir oppdaget før injeksjonsmassen størkner.

2.8.3 *Sonderboring og MWD*

Da det er vanskelig å planlegge detaljene i injeksjonsarbeidet på grunn av usikkerheten og variasjonen i bergmasseforhold, blir det i Norge utført systematisk sonderboring for å skaffe opplysninger om bergkvalitet og vannlekkasjer foran stuff. Dette er særlig viktig i en startfase når lekkasjeforholdene er minst kjent (SVV 2010). Når lekkasjevann forekommer i sonderhull eller andre hull, er dette beskjed om at berget fører vannmengder som er like store eller større enn registrert lekkasje (Vegdirektoratet 2000). Prosedyrene for injeksjonsarbeidene blir blant annet ofte basert på resultatene fra sonderboringene. For Bragernestunnelen i Drammen ble injeksjonen generelt planlagt ut ifra vannlekkasjemålinger gjort fra sonderhull (Åndal, Andersson et al. 2001). Vanligvis bores 2-4 sonderhull med en viss stikning og lengde foran stuff. Det må påpekes at for anlegg der det stilles moderate krav til innlekkasje, kan ikke injeksjonen baseres på lekkasjemålingene fra et begrenset antall sonderhull.

Ved boring av sonderhull og injeksjonshull er det utslagsgivende for resultatet at hullene skjærer de sprekker som er vannførende. Sprekker som er parallellorientert i forhold til tunnelen gir ofte meget vanskelige forhold for tetting.

Sonderboring utføres ofte i forbindelse med boreparametertolkning (MWD). Dette er et tolkningsprogram som bruker boreloggen fra riggen til å dokumentere og tolke graden av oppsprekking, hardhet og vannlekkasje foran stoff. Figur 13 viser hvordan tolkingen av MWD-data gjøres i praksis. Her har hardhet blitt tolket basert på boreparameteren borsynk. Det foretas en hydrogeologisk vurdering av berget foran stoff på grunnlag av sonderboringer, vanntapsmålinger og de geologiske forundersøkelsene. På bakgrunn av dette kan det utarbeides en plan for forinjeksjon (SVV 2010). Ved hjelp av informasjonen som kan hentes ut fra boreloggen kan både skjermgeometri, stavlengder, grenser for injeksjonstrykk og egnet injeksjonsmiddel vurderes og justeres fortløpende (Kveen, Backer et al. 2010).



Figur 13: Tolkning av hardhet basert på MWD-data (BeverTeam 2002). Merk: bildet på figuren er ikke produsert av BeverControl, men av det svenske selskapet Rockma.

2.9 Krav til dokumentasjon/rapportering av utført injeksjon

De fleste kontrakter stiller krav om at det skal føres injeksjonsrapport. Det må føres egen protokoll eller injeksjonsrapport for hver injeksjonsomgang (Kveen, Backer et al. 2010). Utskrift fra loggen på injeksjonsriggen skal være en del av injeksjonsrapporten. Denne inneholder detaljerte opplysninger om gjennomføringen av injeksjonsomgangen. Logg fra boringen (borparametertolkningen) skal også være en 'del av injeksjonsrapporten. I tillegg bør det registreres informasjon om variasjoner i borsynk, farge på borvann og angivelse av borproblemer, leire osv. (Kveen, Backer et al. 2010). Injeksjonstrykk mot tid i hvert enkelt hull, med angivelse av sluttrykk og om mottrykk (ståtid) er oppnådd, skal blant annet være inkludert i injeksjonsrapporten. Derfor er det viktig at hullene på stuff spraymerkes med samme nummer som på borplanen.

En komplett oversikt over opplysningene som injeksjonsrapporten bør inneholde, er gitt i NFFs håndbok 06 (Kveen, Backer et al. 2010). De viktigste punktene er:

- Målte innlekkasjer, gjerne på figuren som viser skjerm og hullnummer.
- Anvendt injeksjonsmørtel (type sement, v/c-forhold og tilsetninger).
- Noter der det er registrert utganger av injeksjonsmasse på og bak stuffen.
- Medgått injeksjonsmengde (volum og/eller kg) for hver injeksjonsmørteltype i hvert enkelt hull.
- Injeksjonstrykk mot tid i hvert enkelt hull, med angivelse av sluttrykk og om mottrykk (ståtid) er oppnådd.
- Injeksjonstid (start/slutt injeksjon og eventuelt start/slutt boring).

Før injeksjonsarbeidene starter bør trykktapet i systemet som utgjøres av pumpe, slanger og koblinger dokumenteres ved gjennomkjøring av mørtel.

2.10 Kontroll av resultatene av utført injeksjon

Selv om avgjørelser rundt injeksjonsarbeidet ofte tas på stuff, er gode rutiner og god kommunikasjon viktig for å få gode resultater. Det er derfor en fordel at arbeidslaget er godt innarbeidet, men da må de ha klare prosedyrer for arbeidet (Kveen, Backer et al. 2010). Forutsigbarhet i prosedyrene er jo en nøkkelfaktor for at gode rutiner skal kunne bli innarbeidet i laget. En vellykket injeksjonsomgang avhenger av at operatøren kan styre og holde oversikt over hvor mye av hver injeksjonsmørtel som til enhver tid går med i hvert hull. Dette avhenger til dels av hvor oversiktlig injeksjonsriggen er. Et hensiktsmessig skjema for notater er også avgjørende for å holde oversikten og videreformidle status ved skiftbytte. Hvor suksessfull injeksjonen er, er avhengig av hvor tett tunnelen har blitt i forhold til de gitte innlekkasjekrav. Poretrykksmålinger og setningsmålinger er viktige hjelpemidler for å vurdere graden av suksess mhp tetting (Åndal, Andersson et al. 2001). Man må også ha i bakhodet at injeksjonsegenskaper kan variere over tid (Syrjänen and Tolppanen 2003).

Et eksempel på en situasjon som kan føre til at injeksjonen blir mislykket, er at de installerte boltene penetrerer den injiserte sonen, og dermed ødelegger skjermen. Dersom dette er tilfelle må boreplanen justeres slik at punktering av injeksjonsskjermer unngås. Utganger av injeksjonsmasse bak stuff eller i dagen må også unngås.

2.10.1 Kontrollhull og måleterskler

Den injiserte sonen bør bli testet under konstruksjonsfasen ved å bore noen kontrollhull, og deretter måle innlekkasjen eller vanntapet. Disse kontrollhullene må ikke være lengre enn den injiserte sonen. Dersom de målte verdiene er høyere enn den planlagte maksimale innlekkasjen, bør injeksjon gjentas delvis eller fullstendig (Syrjänen and Tolppanen 2003). Dette er viktig dersom det er innlekkasje i et punkt på konturen, enten det er en liten og stor innlekkasje det dreier seg om, kan denne føre til at sprekkefyllingen over tid vaskes ut og etter hvert føre til stabilitetsproblemer.

En måte for å kontrollere innlekkasjen, i tillegg til kontrollhull, er ved å installere måleterskler i alle eller enkelte deler av tunnelen, eksempelvis hver 100 – 200 m. På den måten kan den totale innlekkasjen måles. Man må særlig være oppmerksom på soner der innlekkasjen er stor.

Målingene må gjøres i perioder uten driving, helst i forbindelse flere dagers driftsstans for å få målt reell innlekkasje uten tilførsel av driftsvann. Det anbefales å måle flere ganger over en tidsperiode for å sikre at innlekkasjen er stabil. Dette er spesielt viktig i anlegg med de strengeste innlekkasjekravene. I bergrom eller ved driving av tunneler på synk kan utpumping av vann som samles ved stuff også brukes til å måle innlekkasje. Her lar en vannet renne inn over en gitt tid, deretter måles mengden som må pumpes ut for å nå tilsvarende nivå som før pumpingen startet (Kveen, Backer et al. 2010).

Felles for alle metoder for å måle innlekkasje er at forbedringspotensialet er stort (Åndal, Andersson et al. 2001).

Når det gjelder vanntapsmålinger kan det være nødvendig å benytte trykk som det kan bli aktuelt å benytte under injeksjon, for å åpne kommunikasjon mellom hull og kanaler. Vanntapsmålinger utføres ofte med 10 bars overtrykk, dvs. 10 bar høyere enn poretrykket på plassen der målingene utføres.

2.11 Injeksjon og HMS

Generelt bør det utarbeides egen HMS-prosedyre for injeksjonsarbeider på grunn av arbeidenes spesielle karakter (Vegdirektoratet 2000). På anlegg der injeksjon skal utføres i større eller mindre omfang, er det visse standardkrav til HMS som skal følges. Blant annet skal løft av personell utføres med sertifisert og godkjent personløfter. Øvrige delkomponenter/koblinger etc. bør også ha krav om sertifisering/godkjenning (Kveen, Backer et al. 2010). Injeksjonsmiddelet må være godkjent av byggherren før det tas i bruk. I tillegg kreves det at eget HMS datablad er tilgjengelig på anlegget for alle injeksjonsmidler, og det må spesielt påses at disse også er kjent for de som utfører arbeidene.

Moderne injeksjonsrigger er utformet for å være en sikker og god arbeidsplass med avskjerming mot sjenerende vanddrypp, støy og støv. Riggene bør være utstyrt med godt lys,

både i retning mot stuff og ved blanderne. Personlig verneutstyr skal tas i bruk i henhold til instruks (Vegdirektoratet 2000).

2.11.1 Forsvarlig bruk av pakkere

De vanligste ulykkene i forbindelse med injeksjonsarbeider er sprut av injeksjonsmiddel og utpressing av pakkere. I forhold til installasjon av pakkere, bør en forsøke å minimere faren for utpressing av disse under injeksjonsarbeidene. Inspeksjon av pakkerne under injeksjon bør foretas for å sjekke at ingen av disse ikke beveger seg utover i hullet. Viktige punkter som en bør ha i bakhodet ved installasjon av pakkere er (Kveen, Backer et al. 2010):

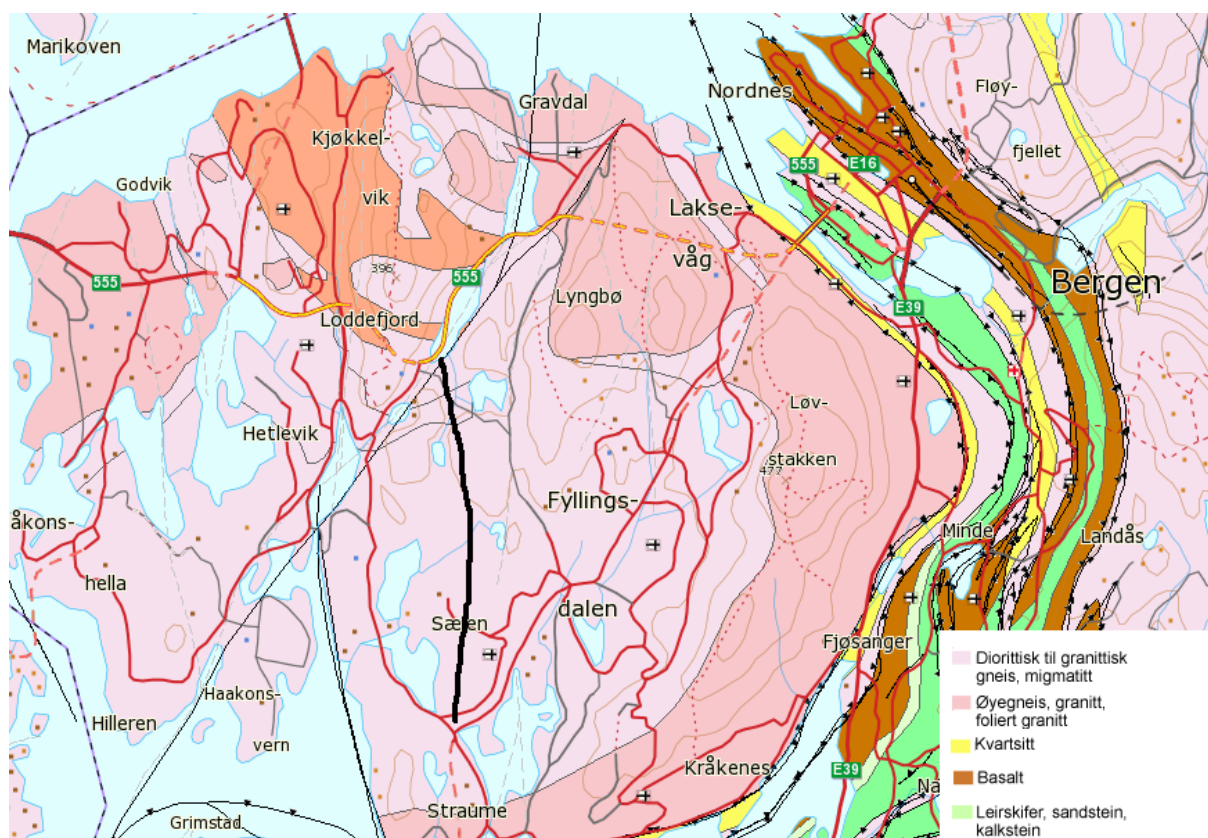
- Faren for utpressing av pakkeren øker med økende borhulldiameter. Dette er de viktig å vurdere ved valg av borhulldimensjon.
- Pakkere bør settes i hullet før injeksjonen starter, for å unngå ‘smøring’ av hullet av injeksjonsmiddelet.
- Pakkere bør settes lenger inn i hullet enn 2 m dersom bergmassen er veldig oppsprukket. Lange nok staver, opptil 6 m, må da være tilgjengelige på anlegget. Dersom bergmassen er ekstremt dårlig kan det være nødvendig å montere pakkerne i innstøpt rør. Utskifting av pakkere eller installasjon av dobbeltpakkere kan også være en løsning.
- En av grunnene til at utpressing av pakkere skjer, er at de er for dårlig oppspent, og derfor er det viktig at pakkerne strammes ordentlig til før injeksjon.
- Oppstramming av pakkere utføres med stavene, derfor er gode vedlikeholdsrutiner for disse viktig.
- Man må sørge for å feste staven i stuffen med kjetting. Da vil man unngå at pakkerne ‘fyker’ avgårde som prosjektiler.

I tillegg til disse punktene må det nevnes at pakkerne helst bør være åpne under injeksjons, så en kan følge med på hvor massen går og om noen hull fylles tidlig opp.

3. Ingeniørgeologiske forhold i Knappetunnelen

3.1 Regional- og lokal geologi

Det meste av Ringveg Vest går gjennom dekkebergarter som ble skjøvet på sin nåværende plass under den kaledonske fjellkjedefoldningen for ca. 400 millioner år siden. Disse bergartene opptrer i en bueformet struktur kjent som Bergensbuene. Innerst har buene en kjerne av grunnfjell kalt Øygardskomplekset (Kirkeby 2010).



Figur 14: Knappetunnelen 2. byggetrinn ligger i utkanten av øygardskomplekset. Tunneltraseen vises på kartet som en tykk svart kurve (NGU 2013).

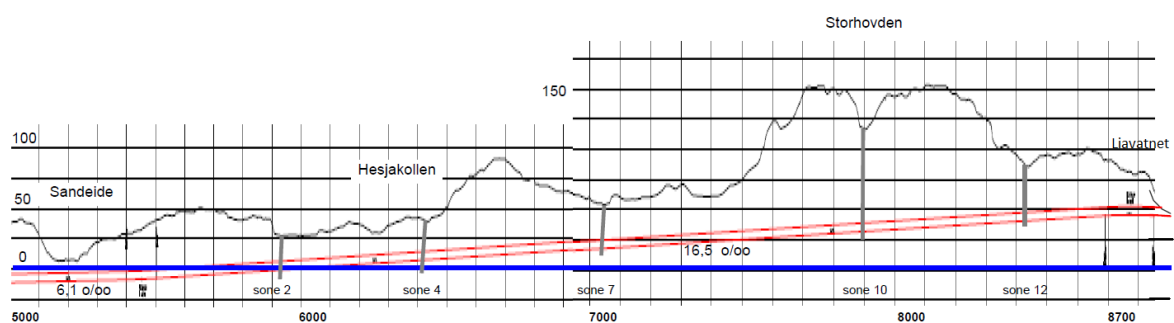
Tunnelene på Byggetrinn 2 går i utkanten av Øygardskomplekset, i grunnfjell, se Figur 14. Bergartene langs tunneltraséen i den sørlige del er i all hovedsak homogene granittiske

gneiser. Den nordlige delen befinner seg i rødlig omdannet granitt, gneisgranitt og båndete/migmatittiske gneiser. Hvite kvartsårer og lyse granittiske bånd opptrer langs hele tunnelstrekningen. Gneisene viser foliasjon og lineasjon. Foliasjonen opptrer enkelte steder som sprekkesett, mens lineasjonen har liten betydning for stabilitetsforholdene (Kirkeby 2010).

3.2 Topografi, overdekning og løsmasser

Terrenget i Kanadaskogen og den nordre del består for det meste av skogkledte bergknauser med mellomliggende vann og myrflater. I den sørlige delen er relieffet lavere og landskapet til dels tettbebygget med hus og leilighetskomplekser, samt et stort idrettsanlegg.

Terrenget varierer fra 7 m. o. h. ved påhugget på Sandeide, til ca. 155 meter ved Storhovden. Overdekningen varierer, men størsteparten (75 %), av tunnelen har mellom 20-50 meter overdekning. Resterende del har høyere overdekning med unntak av påhuggsområdene hvor overdekningen er mindre enn 10 meter, se Figur 15. Også under Bjørgeveien/prosjektkontoret på Sandeide vil det være mindre enn 10 meter bergoverdekning.



Figur 15: Lengdeprofil av hovedløpene med utvalgte svakhetssoner markert. Målestokken vertikalt er 4 ganger den horisontale (Kirkeby 2010).

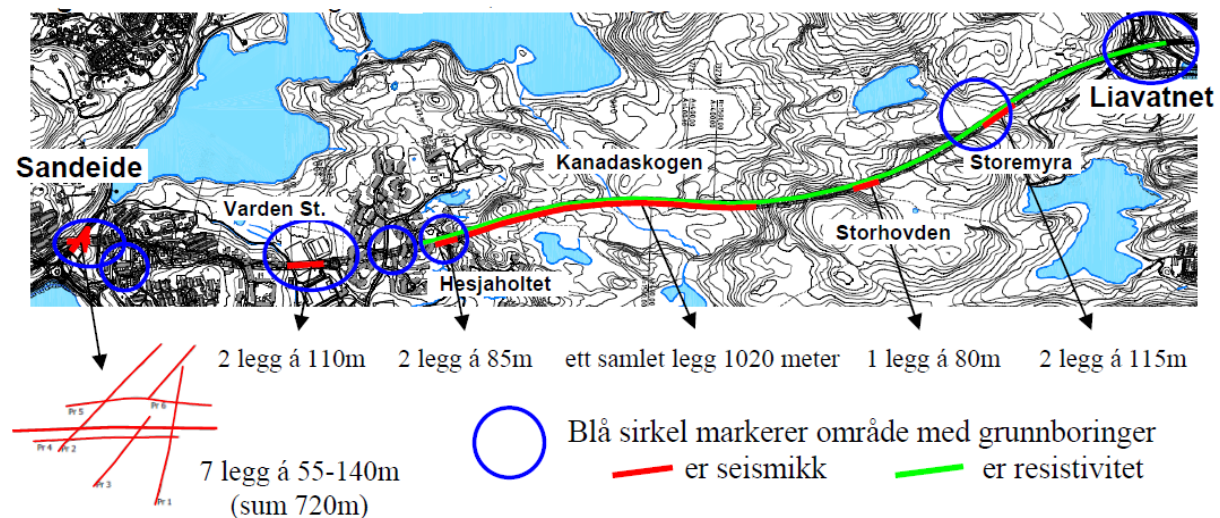
Løsmassene i området er dannet under og etter siste istid, om lag 12000 år siden. Marin

grense i Bergensområdet ligger ca. ved kote +50. Langs tunnelen finnes det marine avsetninger i hele det bebyggede området fra Sandeide til Allestadhaugen, samt ved forskjæringen ved Liavatnet. Disse løsmassene varierer i mektighet over hele området. Enkelte hus er fundamentert helt eller delvis på urørte masser, med fare for skader som følge av tunnelsprengning.

Over marin grense er det mellom bergblotningene et tynt lag av morene, ras- og forvittringsmateriale og torv. I myrsøkkene er mektigheten noe tykkere. Sonderinger og refraksjonsseismikk indikerer en mektighet på inntil 10 meter (Kirkeby 2010).

3.3 Forundersøkelser

I forundersøkelsene ble det funnet en rekke svakhetssoner i området. Grunnundersøkelsene omfattet refraksjonsseismikk, boringer, resisivitetsmålinger og feltbefaringer. Oversikt over boringer, seismikk (rødt) og resistivitet (grønt) vises i Figur 3.



Figur 16: Oversikt grunnundersøkelser for 2. byggetrinn (Kirkeby 2010).

Grunnboringene har stort sett blitt utført i perioden 1998 – 2002 ved prosjektering av tunnelene på de to første byggetrinnene. Noen ekstra grunnboringer ble i tillegg utført 2009.

Refraksjonsseismikk er utført av GeoPhysix AS og GeoTeam AS. Lavhastighetssoner er definert som ganghastigheter under 4000 m/s, og representerer soner med svekket bergmassekvalitet. Resultatet fra målingene antyder at 75.5 % av traséen har god bergmassekvalitet (>5000 m/s), 12 % har middels kvalitet (4000 – 4999 m/s) og 12.5 % har lav hastighet (<4000 m/s) (Kirkeby 2010).

Resistivitetsmåling er en relativt ny metode med hensyn til tunnelprosjektering. Her måles motstanden mot strømgjennomgang gjennom berggrunnen. Svakhetssoner med oppsprekking/leire/vann vil være mer ledende enn massivt berg. Massivt berg vil fremstå som anomalier langs et måleprofil der elektroder er satt ut. Dette forutsetter at bergmassen har relativt høy resistivitet i utgangspunktet, slik at det blir en målbar kontrast mellom det som er massivt, oppsprukket og ledende. Fra disse målingene viser spesielt sone 4 ved Hesjakollen (profil 6400) og sone 12 under Storemyra (profil 8400) veldig lav resistivitet (Kirkeby 2010).

Over de strekkene hvor resistivitetsmålinger og refraksjonsseismikk kan sammenlignes, er det veldig god overenstemmelse enkelte steder, mens andre steder overhodet ikke.

3.4 Oppsprekking

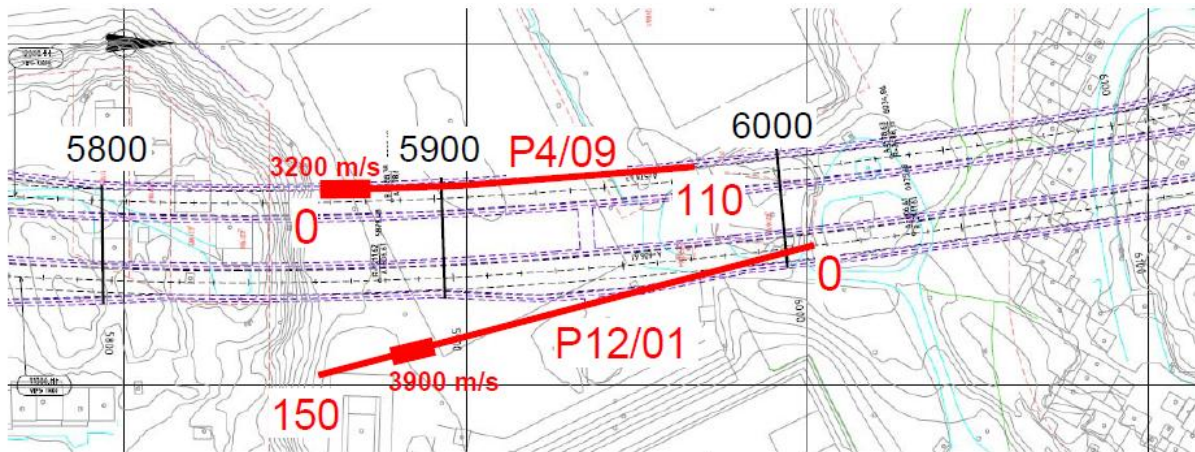
Et N-S stående sprekkesett er veldig markert og opptrer i hele tunnelområdet. Sprekkene er gjennomsettende og utholdende med et steilt fall på 70-90° østlig. Nabosprekker kan være parallelle, men er ikke nødvendigvis alltid det. Sprekkeavstanden mellom enkeltsprekker varierer fra 0,5-1,5 meter i massiv gneis, mens i enkelte oppknuste soner er sprekkavstanden i desimeter avstand, gjerne med innspill av leire. Sprekker på tvers av de markerte N-S sprekkene opptrer i varierende grad, ikke like hyppige og gjennomgående.

3.5 Svakhetssoner

Svakhetssonene i berggrunnen fremstår som lineamenter og langstrakte søkk i terrenget. De synes lett på topografiske kart og ved stereografisk betraktning av flyfoto. Svakhetssonene kan være forkastninger eller bruddsoner med ingen eller bare liten bevegelse. Vedlegg A viser oversiktsbilder med innlagte svakhetssoner. Vedlegg F er en tabell som viser mektighet, strøk, vinkel til trasé, profilnummer, sonenummer og bergoverdekning ved svakhetssonene. To sterke trender ble funnet med hensyn til lineamenter/soner; den ene med retning NNV-SSØ og vinkelforskjell på 0-15° til hovedtunnelen, og den andre med retning NNØ-SSV og vinkelforskjell på 35-50° til hovedtunnelen. Beliggenheten til de antatt mest markante svakhetssonene er markert på vertikalprofilet på Figur 3. Resultatene fra forundersøkelsene for alle sonene, til sammen 13, er kort oppsummert under (Kirkeby 2010).

Sone 1: Denne sonen er mellom profil 5100 og 5200, altså dalsøkket der prosjektkontoret og Bjørgeveien lå. Mektigheten var antatt å ligge på rundt 75 meter, og sonen var antatt å stå vinkelrett på traseen. Sonen var dominert av meget variabel og ofte dårlig bergmasse over hele strekningen. Over en strekning på 60-80 meter var bergoverdekningen meget liten, helt ned mot 5 meter.

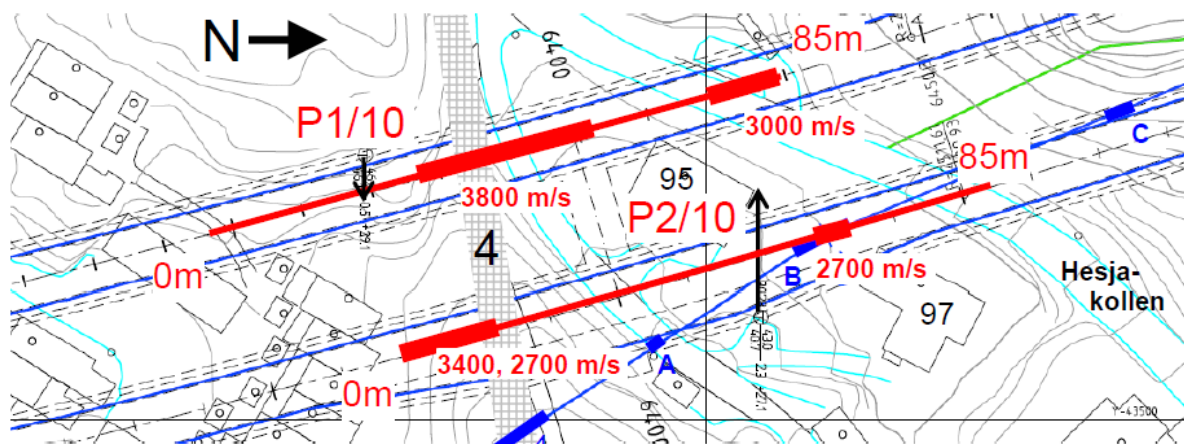
Sone 2: Denne sonen var omtrent 10 meter bred, og ble registrert i to utlegg på sørsiden av dalstrøket, ca. ved profil 11-5880 og 12-8575. Disse dekket passeringen under idrettsplassen ved Varden Stadion, og framkom som to lavhastighetssoner langs traseen. På Figur 17 er utleggene markert som P12/01 og P4/09. Ellers var det høye hastigheter i området. Sone 2 hadde 65 graders vinkel til tunneltraseen.



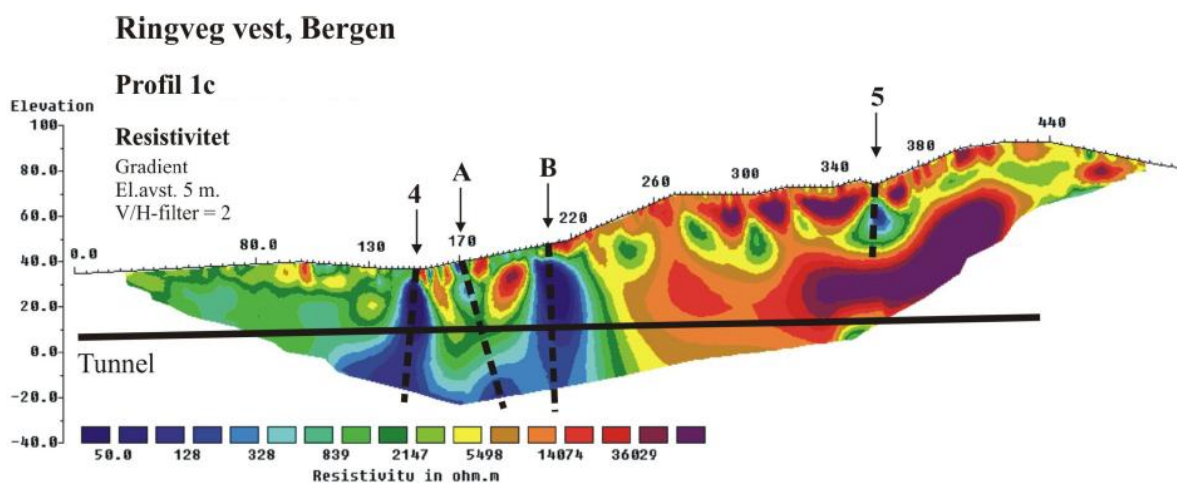
Figur 17: Figuren viser de to utleggene som representerer svakhetszone 2 (Kirkeby 2010).

Sone 3: Denne sonen er ikke tatt med på lengdeprofilet på Figur 15, men ansees som viktig på grunn av den lave fjelloverdekningen over sonen. Sonen var antatt å krysse på tvers av tunnelen, men viste seg etter driving å ikke ha noen betydning.

Sone 4: Svakhetszone 4 var kjent før geofysiske undersøkelser ble utført, og fremkommer som et tydelig lineament i terrenget på topografiske kart. Sonen er markant, og krysser tunnelen vinkelrett på akse (profil ca. 6385). Figur 18 viser to lavhastighetssoner som sammenfaller med lineamentet som utgjør utgående av svakhetszone 4. I tillegg er det også flere andre lavhastighetssoner ved Hesjakollen, som indikerer mindre markante svakhetssoner. Fra seismikk og resistivitet (se Figur 19) over tunnelen synes sone 4 relativt mektig, antakelig med leire og tett oppsprekking. Resistiviteten var målt til under $10 \Omega\text{m}$. Etter driving viste det seg at det var soner hele veien som vist på Figur 18.



Figur 18: Figuren viser lavhastighetssonene som sammenfaller med svakhetszone 4 (Kirkeby 2010).



Figur 19: Figuren viser resultatene fra resistivitetsmålingene ved sone 4. Sonene markert med stiplet linje representerer de største anomaliene med signifikant lavere resistivitet.

Sone 5 og 6: Generelt er hele området fra Hesjakollen (ca.profil 6450) til sone 7 (ca.profil 7000) dominert av SSV-NNØ strykende lineamenter og dalsøkk, som var antatt å representere svakhetssoner, svakhetssonene 5 og 6. Svakhetszone 6 ble forsøksvis inndelt i 4 soner med ulik karakter (ulike fall- og fallretninger samt vinkel til traseen). Svakhetssonene var antatt å bestå av dårlig berg, med moderat til spiss vinkel til tunneltraseen. Mellom sonene var berget av god kvalitet.

Sone 7 og 8: Sone 7 ble antatt å ha et meget steilt sørlig fall og skjære tunnelene omtrent ved 11-7000 og 12-6990. Disse antagelsene var basert på resistivitetsmålinger og observasjoner i terrenget. Svakhetszone 8 var antatt å krysse ved 11-7495 og 12-7485 i terreng, basert på resultater fra seismikk og resistivitet samt terrengformen. Både sone 7 og 8 var antatt å rekke ned i tunnelnivå, uten at de nødvendigvis måtte være brede. Sone 7 var antatt å være relativt smal.

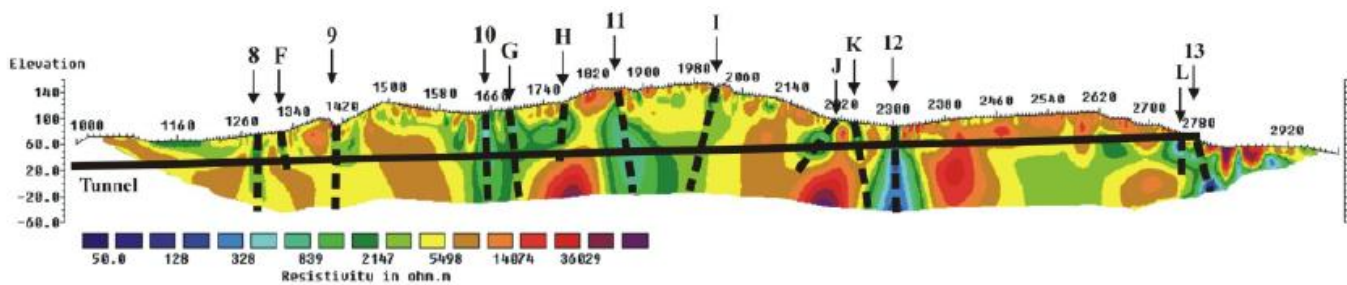
Sone 9: Denne sonen var ikke antatt å være problematisk.

Sone 10: Tennebekkmyra fra profil 7900-7800 i Kanadaskogen, ligger i et søkk som utgjør utgående av svakhetszone 10. Her var lavhastighetszone forventet, i likhet med Bjørgeveien og Hesjakollen. Resistivitetsmålingene gav her lave verdier, som vist på **Feil! Fant ikke referansebildet..** Registrert hastighet var på 2500 m/s, over en 30 meter lang strekning. Dette er den laveste målte hastigheten på prosjektet. Det var forventet lave bergklasser over en 50 meters strekning innenfor 7830-7880 i nordgående løp 11, og 7800-7850 i sørgående løp 12.



Figur 20: Figuren viser dalsøkket som representerer svakhetszone 10 (Kirkeby 2010).

Sone 11: Sone 11 kommer tydelig fram på resistivitsprofilen på Figur 21, og har lavere resistivitet enn sone 10.



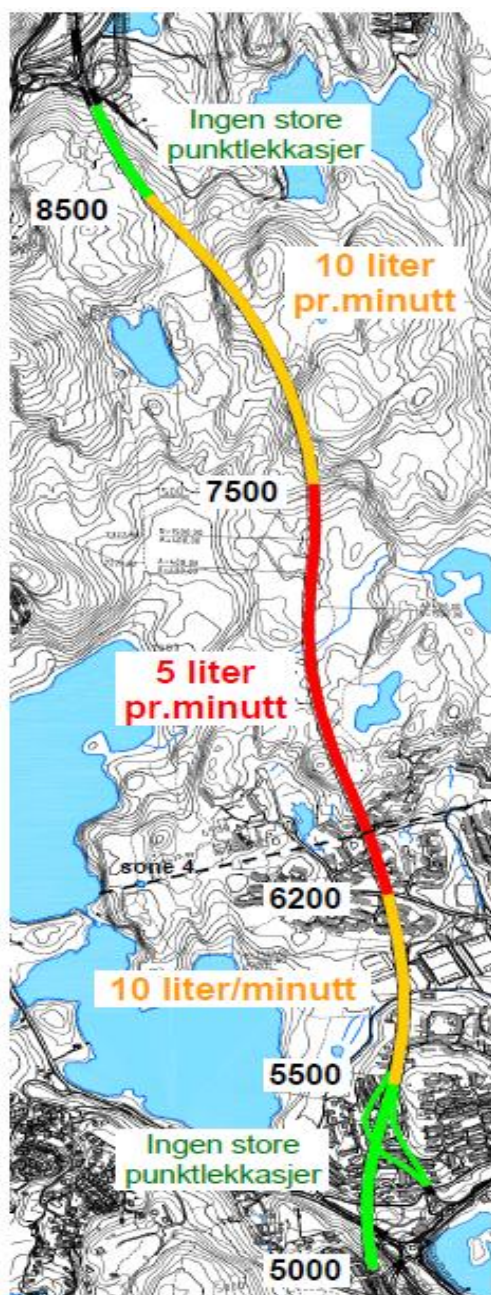
Figur 21: Figuren viser resultatene fra resistivitetsmålingene, inkludert sonene fra 8 til og med 13. Sonene markert med stiplet linje representerer de største anomaliene med signifikant lavere resistivitet enn snittet (Kirkeby 2010).

Sone 12: Sammen med sone 4 ved Hesjakollen utmerker sone 12 under Storemyra seg med særlig lav resistivitet.

Sone 13: Denne sonen befinner seg ved påhugget på Liavatn-siden (profil 8820).

3.6 Vannforhold og innlekkasjekrav

I følge NGU sin nasjonale grunnvannsdatabase GRANADA er det ikke registrert brønner for vannforsyning i nærheten av tunnelen. Tunnelen ligger i sin helhet, utenom ved påhugg, under grunnvannsmettet sone. Store topografiske forskjeller i Kanadaskogen gir varierte grunnvannsforhold. Grunnvannsstrømmen følger i all hovedsak samme retning som overflatevannet, det vil si vestover og vekk fra tunnelen.



Figur 22: Krav til maks tillatte lekkasjer etter tunneldriving (Kirkeby 2010).

Tunnelen krysser under et naturområde med mange myrer og små tjern. Det er spesielt de tjernene og myrene som ligger over marin grense hvor faren for drenering er størst. Over marin grense er det ikke et tettende leirlag i bunn, slik som det er under den marine grensen. Litla Krokåtjørna, som ligger 50 - 100 meter øst for profil 6700 – 6900, ligger over marin grense og kan stå i fare for å bli drenert. I tillegg til Litla Krokåtjørna er myrgruppen Mm1 – Mm5 utsatt. Denne ligger på begge sider av tunnelen mellom profilnummer 6850 og 7400. Disse blir i dag overvåket ved hjelp av oppsatte løsmassebrønner (Kirkeby 2010).

Innlekkasjekravene i Knappetunnelen varierer over hele strekningen, se Figur 22. Innlekkasjekravene er satt på bakgrunn av en hydrogeologisk vurderingsrapport fra Jordforsk, nå Asplan Viak (Snilsberg, Borch et al. 2003)

Grunnvannet langs tunnelen på 2. byggetrinn er i sin helhet matet fra den delen av nedbøren som infiltrerer grunnen. Uten mottiltak vil tunnelene drenere omkringliggende bergarter og løsmasser. Konsekvenser av dette kan være uttørkning av myrer, bekker og vann, samt setninger i utsatte løsmasser (Snilsberg, Borch et al. 2003).

På bakgrunn av dette har jordforsk gjort en samlet vurdering, og satt meget strenge krav til maksimalt tillatte innlekkasjer etter sprengning.

I rød sone betyr dette 2,5 liter/min/100m per løp. For oransje sone er kravet 5,0 liter/min/100m per løp. Dette medfører systematisk forinjeksjon med sementer i rød sone, og store deler av den oransje sone.

I forbindelse med kloakktunnelen, som ligger i den grønne sonen helt sør, er det ingen krav til innlekkasje. I dette området er det allikevel injisert for å forhindre uønsket inntrengning av avløpsvann.

De strenge kravene i rød sone kommer av at det er et populært natur- og rekreasjonsområde med mange myrer og små tjern. Disse områdene har blitt omtalt som de mest sårbare på grunn av tynne og utette masser over fjell samt åpne sprekkesystemer. Områdene mates av nedbør og selv om det normalt regner mye i Bergen (2250 mm/år), forekommer langvarige tørkeperioder (Kirkeby 2010).

På bakgrunn av den hydrogeologiske rapporten ble det anbefalt å sette opp 4 overvåkningsbrønner i de mest sårbare områdene. Plassering av tre ekstra brønner er også foreslått, men ikke anbefalt (COWI 2009). Plassering av disse brønnene kan sees i Vedlegg D.

4. Kontraktens beskrivelse og krav til injeksjonsarbeidene

Beskrivelse av de ulike arbeidene og mengder er angitt i kontrakten for Fv. 557 Ringveg vest byggetrinn 2, K20 Sandeide – Liavatnet. Også beskrivelse av injeksjonsarbeidene og mengder av de ulike komponentene i injeksjonsmidlene er angitt. Beskrivelsen består av en standard del og en spesiell del. Standarddelen består av Statens vegvesens håndbøker nr. 025 'Prosesskode-1 Standard beskrivelsestekster for vegkontrakter' og 026 'Prosesskode-2 Standard beskrivelsestekster for bruer og kaier'. Den spesielle delen kan gjelde i tillegg til standarddelen eller erstatte den helt. Dersom det ikke er noen endringer i arbeidets omfang i 'standard beskrivelse', vil det ikke være noen 'spesiell beskrivelse'. I dette kapittelet vil det ikke bli skilt spesifikt mellom standard og spesiell beskrivelse.

4.1 Oppgjør

Beskrivelse av injeksjonsarbeidene i kontrakten, blir gjort i en egen prosess som omhandler sonderboring, kjerneboring og injeksjon. Denne prosessen omfatter 'alle arbeider foran og nær stuff som har til formål å undersøke hvilke bergforhold tunnelen kan ventes å komme inn, i eller som har til formål å tette, stabilisere eller drenere berget.' Det er benyttet egne enhetspriser for injeksjonstid og masser. Dersom injeksjonen utføres med redusert kapasitet, skal mengden reduseres tilsvarende.

Selve injeksjonsarbeidet er timebetalt, men unødige avbrudd som skyldes reparasjoner, venting på sement e. l. skal i følge kontrakten trekkes ut av regnskapet. Opp- og nedrigging av injeksjon blir betalt per stykk, til sammen 250. Injeksjonsmiddel, tilsetningsstoffer og spesialsement blir betalt per kg. Ulike typer pakkere blir betalt per stykk.

Et tak på 100 timer pålagt utvidet herdetid er fastsatt. 60 minutters herdetid etter avsluttet pumping er beregnet slik at disse ikke blir betalt for.

I forhold til bruk av styrt herding, er det i kontrakten bestemt at prosessen som omhandler dette kun skal benyttes etter 'avtale med byggherren'. Mengden måles som medgåtte mengder ren akselerator i kg. Ytelsesparametere for viskositet, tid og herding er ikke nevnt, som anbefalt i det svenske Trafikverkets anbefalinger om bruk av styrt herding (Holter 2011).

4.2 Krav til innlekkasje

Innlekkasjekravene er svært strenge, derfor vil systematisk injeksjon være nødvendig over større deler av tunnelen. Kravene er oppsummert i tabellen:

Strekning	Total innlekkasje (sum begge løp)
Profil 5 000 - 5 500	større punktlekkasjer unngås
Profil 5 500 - 6 200	10 l/min/100 m
Profil 6 200 - 7 500	5 l/min/100 m
Profil 7 500 - 8 500	10 l/min/100 m
Profil 8 500 - 8 800	større punktlekkasjer unngås

Disse innlekkasjekravene gjelder restlekkasjene, altså de endelige innlekkasjene.

4.3 Prosedyrer for sonderboring og boring av kontrollhull

Ved hjelp av sonderboring med slaghammer blir vannlekkasjeforholdene avdekket, og eventuelle lekkasjemålinger kan utføres. Omfanget av sonderboringer angis av byggherren, og det skal normalt sonderbores i seksjoner der systematisk injeksjon ikke blir utført. I prosessen er det også beskrevet antall borehull (2 – 6 hull), stikning (inntil 15 utenfor teoretisk profil ved lav overdekning) og overlapp mellom sonderhullene (minimum 8 m ved systematisk sonderboring). Beskrivelser av prosedyrene for sonderboring i form av kjerneboring vil ikke bli gitt her, fordi det kun ble benyttet en gang i løpet av drivingen av tunnelen.

Injeksjonshull skal bores og spyles for klargjøring av injeksjon. I kontrakten er det spesifisert hvordan dette skal utføres. Plassering, antall og lengde til injeksjonshullene er ikke spesifisert i kontrakten, men dersom entreprenøren mener det blir sløst med hull, kan de fremme krav om erstatning for forlatt fortjeneste. Eventuelle kontrollhull bores mellom og med samme retning som injeksjonshullene. Antall vil bli vurdert i hvert enkelt tilfelle.

4.4 Injeksjonsprosedyrer

Det er byggherren som bestemmer om det skal utføres systematisk injeksjon, og injeksjon kan utføres for å forbedre stabilitetsforholdene i svakhetssonene eller ved lav bergoverdekning. Skjermene skal tilpasses forholdene eller 'etter oppnådde resultater', som det står i kontrakten. Byggherren bestemmer start, stopp, type og omfang av injeksjon. Generelt gjelder følgende prosedyrer for injeksjon av bergmassen, ifølge kontrakten:

- Injeksjonsvariablene bestemmes på grunnlag av geologisk kartlegging, sonderboring og vanntapsmålinger.
- Stoppkriterier vurderes og bestemmes på stedet, og oppgis av byggherren som overtrykk ved avslutning av injeksjon, eller som innpumpet mengde injeksjonsmiddel.
- Hullet anses som ferdig injisert når sluttrykket er oppnådd, og masseinngangen er neglisjerbar.
- Herdetid etter avsluttet injisering er normalt innenfor 60 min., derfor kan ikke ny boring starte opp tidligst før 60 min. etter avsluttet pumping.

Spesifisering av ulike v/c-forhold for ulike injeksjonsmengder er ikke angitt i kontrakten, bare at v/c-forholdet skal 'gradvis reduseres fra 1.0-1.2 ned mot 0,4 for trykkoppbygning'. Dersom ikke mottrykk er oppnådd eller angitt maksimalmengde overskredet, er det i kontrakten instruert at byggherre skal tilkalles og pumpingen stoppes. Ved utganger i flere hull, skal serieinjeksjon initieres, ellers skal injeksjonen utføres fra sålen og oppover. Pakkerne skal plasseres 1,5 m inn i borehullet.

Ellers skal prosedyrer utarbeides av byggherren, og tilpasses underveis. Det er antydning i kontrakten at prosedyrene skal være basert på Håndbok 021, kap. 7.2.2 *Forinjeksjon* og Publikasjon 104 *Berginjeksjon i praksis*. Det er klart at unødige vanskelige forhold vil oppstå dersom krav til utførelse og spesifikasjoner fra byggherre blir for omfattende. Som alternativ til svært høye trykk kan det være mulig å oppnå høyere inntrengningsevne ved å justere injeksjonsopplegget (Fagermo, Frogner et al. 2008).

4.5 Krav til injeksjonsmidler

I standardbeskrivelsen i prosessen som omfatter injeksjonsprosedyrene, er det gitt generelle føringer for når ulike injeksjonsmidler og tilsetningsstoffer skal benyttes, hvordan de skal behandles, lagres osv.

4.6 Krav til utstyr

Når det gjelder utstyret som benyttes til injeksjonen stilles det krav til dette i kontrakten. De viktigste kravene er:

- Det skal injiseres på minimum 3 linjer, og tilsats av akselerator skal være mulig.
- Hver av linjene skal kunne tåle et injeksjonstrykk på 100 bar.
- Slangor, rør, koblinger og pakkere skal ha stor nok diameter til å takle dette trykket (100 bar), samtidig som unødig separasjon ("bleeding") unngås.
- Injeksjonsutstyret skal minimum takle v/c-forhold i området 0,4-2,0.

Det at det stilles krav til riktig dimensjonering er meget viktig, med tanke på de høye trykkene som det opereres med. At det er krav om minimum 3 linjer kan føre til at oversikten blir dårlig ved problemer (Fagermo, Frogner et al. 2008). Dersom utstyr går i stykker, noe som sannsynligvis vil skje før eller siden, vil det ikke være mulig å injisere på alle linjer. Vasking av linjer for å forhindre gjengroing av pumper og rør, vil også måtte utføres med jevne

mellomrom. Forståelse fra SVVs side om at reparasjoner og vasking må utføres er nødvendig for å sikre et godt samarbeidsklima.

4.7 Krav til rapportering og kontroll av innlekkasje

I kontrakten er det spesifisert hvilke krav til rapportering og protokollføring som skal være oppfylt. Disse rapportene danner grunnlaget for videre injeksjonsarbeid og sluttokumentasjon. Entreprenøren skal levere dagraporter for hver stuff. Både bestillingsskjema for injeksjonsmidler, pakksedler og injeksjonsrapporter er inkludert i disse dagraportene. Dagraportene leveres neste dag kl. 11. Ukerapporter er et sammendrag av dagraportene og leveres påfølgende mandag innen kl.11. I injeksjonsrapportene skal tidspunkt for start og stopp av pumper, samt tidspunkt for start av ny boring, fremgå.

Kontroll av innlekkasje skal også utføres, og vannlekkasjemålinger, vanntapsmålinger og vannterskler er aktuelle metoder for å få en oversikt over innlekkasjen.

4.7.1 Krav til rapportering for bore- og injeksjonsrigger

For å bedre kunne vurdere injeksjonsopplegget, er det i kontrakten bestemt at alle rigger i tunnelen skal ha komplett utstyr for automatisk logging av all boring (Measure While Drilling). Derfor blir all boring logget, og alle hull blir rapportert umiddelbart etter endt boring over nett. Slik logging av borehull har blitt gjort på tidligere prosjekter, for eksempel Lørentunnelen (Neby 2011). Her ble data fra langhull og bolter samlet inn, og overført fra riggen ved hjelp av minnepinne. Byggeherren kunne så laste opp dataene, og tolke blant annet innlekkasjeforhold og behovet for injeksjon. I kontrakten for K20 Sandeide – Liavatnet, er det bestemt at data fra hver stuff skal leveres digitalt på et tabellformat, som kan leses av Excel. Programmet som er brukt heter Bever Control, og leverandøren kalibrerer programmet i forhold til rigger og fjellforhold. Entreprenøren må derfor gi tilgang på utstyr og data til leverandøren.

For selve injeksjonsriggen er det i likhet med boreriggene krav om full datalogging. Registrering av masseinn ganger og trykk samt start og stopptidspunkt for hvert hull skal gjøres. Dokumentasjon i form av datautskrift skal inneholde:

- Mengder for hvert enkelt hull ved ulike v/c-forhold og trykk.
- Start- og stopptidspunkt for injeksjonen.

Denne datautskriften leveres byggherren etter endt injeksjonsomgang. Under injeksjonen skal disse parameterne også kunne vises på en skjerm i sanntid, og variasjonen i tid skal plottes grafisk. Injeksjonsriggene manglet slikt utstyr, men det ble godtatt av byggherren likevel.

En protokoll over forhold som har betydning for bergkvaliteten fra sonderboringene, blir overlevert byggherren umiddelbart etter avsluttet sonderboring. Vanninnbrudd og innlekkasje under sonderboringen og injeksjonsboringen, blir registrert og protokollført, injeksjonsopplegget kan blant annet vurderes ved hjelp av disse dataene. Protokollen skal også inneholde alle nødvendige opplysninger om boringen. Vannlekkasjemålinger og vanntapsmålinger skal også protokollføres.

4.7.2 Vannlekkasjemålinger

I prosessen er det spesifisert hvordan og når vannlekkasjemålinger skal utføres. Vannlekkasje skal bli målt ved oppsamling av utstrømmende vann gjennom kort stav og åpen pakke fra borhullet i bømte. Dette skal gjøres minst 5 minutter etter endt boring, og i hull med lekkasje. Her skal det settes en åpen pakke med kort injeksjonsstav. Lekkasje fra hvert hull og samlet lekkasje skal registreres som liter/min, og inngå i protokollen over forhold som har betydning for bergkvaliteten.

4.7.3 *Vanntapsmålinger*

Vanntapsmålinger som supplement til lekkasjemålinger bestilles av byggherren, og disse utføres i så fall normalt under innboring. Byggherren bestemmer hvor vanntapsmålingene skal utføres, seksjonslengder og trykk. I prosessen er det detaljert beskrevet hvordan disse målingene skal utføres. Vanntapet skal angis i Lugeon (L), der 1 L tilsvarer 1 liter per minutt per meter borhull ved 1 MPa overtrykk. Målingene utføres fra bunnen av hullet og utover i nærmere angitte seksjoner, og både store og små vannmengder skal kunne måles med tilfredsstillende nøyaktighet med måleutstyret. I kontrakten er det spesifisert at alt grunnlag for beregning av Lugeon-verdiene og hulldata skal protokollføres.

4.7.4 *Vannterskler*

Vannmålinger ved hjelp av måleerskler er også beskrevet i kontrakten. Måleerskler etableres etter bestilling fra byggherren og skal kunne settes opp hvor som helst, uansett tunneltverrsnitt. Akkumulerte mengder vann forårsaket av måleerskler skal avleses daglig. Disse er målt av ultrasoniske mengdemålere som monteres utenpå vannledning og pumpeledning ved Sandeide og Liavatnet. Netto innlekkasje i l/s oppdateres daglig på www.prosjektplassen.no, webhotellet som byggherre benytter for lagring av data tilknyttet byggetrinnene.

5. Injeksjonsprosedyrer og skjermdesign

Injeksjonsprosedyrene, som har blitt fulgt ved injeksjon av aktuelle seksjoner i Knappetunnelen, er basert på de føringer som er gitt i kontrakten. I kontrakten er det bestemt at byggherren skal bestemme injeksjonsprosedyrene kontinuerlig fra skjerm til skjerm. Gjennom kontrollørmeldinger utarbeidet av Byggherren ble injeksjonsprosedyrene oppdatert kontinuerlig. Hvor ofte disse ble oppdatert var avhengig av hvor ofte forholdene på stuff varierer. Injeksjonen i Knappetunnelen ble utført etter prinsippet aktiv injeksjon, altså med høye trykk (minst 80 bar). Unntak fra denne filosofien var i forbindelse med injeksjon av påhuggene, der kun 10-15 bar benyttes som stoppkriterium. Her var innspenningen svært liten, særlig på Liavatn-siden. Også i forbindelse med soner der overdekningen er liten ville injeksjonsprosedyrene bli endret, og trykket redusert for å kompensere for økt hullantall. Trykket ble da redusert oppover mot hengen, slik at injeksjonsmassen ble pumpet inn med lavest i trykk i hullene som var nærmest terrengoverflaten. Da ble faren for utganger i dagen redusert.

5.1 Generelle injeksjonsprosedyrer

I kontrollørmeldingene skrevet av byggherren, SVV, var injeksjonsprosedyrene beskrevet. Disse ble lagt ut på prosjektplassen, slik at entreprenøren kontinuerlig ble oppdatert på eventuelle endringer fra forrige skjerm. Injeksjonstrykk, tilsetningsstoffer, v/c-forhold, skjermdesign, stoppkriterier osv. ble angitt i disse meldingene. Kontrollørmeldingene ble lagt ut på webhotellet Prosjektplassen, tilgjengelig for de ansatte i AF slik at de ble informert om de nye prosedyrene. Etter hvert som mer og mer erfaring ble opparbeidet gjennom injeksjonsarbeidet, ble injeksjonsprosedyrene optimalisert. Det var en kontinuerlig dialog mellom kontrollingeniørene og injeksjonsbas/formann, der ulike innspill angående injeksjonsprosedyrene ble diskutert. Den endelige avgjørelsen om eventuelt å endre prosedyrene var det opp til byggherren å ta.

5.1.1 Sonderboring og kontrollboring

Injeksjonsprosedyrene var hovedsakelig basert på lekkasjemålinger fra sonderhull. I tilfeller der det var observert mye vann, har det blitt utført lekkasjemålinger i alle hull før stavene ble satt inn i hullene. I seksjoner der fjellet var tørt ble ikke sonderboringer utført for hver salve, men kanskje for hver 3. salve. Dette var ved systematisk injeksjon. Ved sporadisk injeksjon kunne pause i sonderboringen etter 8 m og 17 m, for å se om lekkasjen kunne spores til deler av hullet, åpne for enda flere salver enn 4.

Dersom det lakk fra kontrollhull, ville ny skjerm og injeksjon bli bestilt av byggherren.

5.1.2 Blandingsforhold for industrisement og tilsetningsstoffer

Mengder for de ulike reseptene eller blandingsforholdene ble angitt i kontrollørmeldingene. I utgangspunktet var det besluttet å bruke mest mulig industrisement, men mikrosegment ble også benyttet. Injeksjonsskjermene ble vanligvis injisert fra sålen (i midten og ut til siden) og oppover, med langsom trykkoppbygging med gradvis tykkere masse i hvert hull. Enkelte lag pumpet i starten av prosjektet sementen for raskt inn i hullene, slik at en gradvis oppbygging av trykket ikke ble oppnådd. SVV fryktet at sluttrykket ikke holdt seg stabilt, men kunne falle etter at injeksjonen var utført, før sementen hadde herdet tilstrekkelig. SVV delte sin bekymring om dette til AF på et injeksjonsmøte, slik at lagene fikk beskjed om å pumpe injeksjonsmassen saktere inn i hullene, eller aktivt variere v/c-forholdet opp eller ned etter behov. Se vedlegg G for de ulike reseptene som har blitt brukt i injeksjonsarbeidene.

Ofte er et v/c-forhold på 0,9 det innledende blandingsforhold for en standard injeksjonsskjerm med industrisement, selv om det i kontrakten var det angitt at dette burde være i størrelsesorden 1,0-1,2. Dersom ikke trykkoppbygging ble oppnådd etter 500 liter, ble blandingsforholdet endret til 0,8. Deretter ble det justert ned til v/c=0,7 dersom det fortsatt ikke ble bygd opp trykk etter nye 500 liter. Det var også vanlig at det ble blandet gradvis helt ned til v/c=0,5, avhengig av injeksjonsforløpet. Jo lavere v/c-forhold, desto raskere trykkoppbygning og mulighet for å avslutte hullet ved oppgitt stoppkriterium. Ofte ble det satt

en maksgrense for hvor mye injeksjonsmasse som kunne pumpes inn før sluttrykk burde vært oppnådd, for eksempel 1500 l.

Når det gjelder tilsetningsstoffer, ble omtrent 2 % SP-stoff tilsatt både mikrosegment og industrisement. Silika ble aldri tilsatt mikrosegment. Silika ble i starten tilsatt bare ved $v/c = 0,8$ og høyere, og ikke mer enn 8-10% silika ble tilsatt. Etter hvert ble det bestemt at silika kun skulle tilsettes på $v/c = 0,9$ -blandinger, og blandingsresepten ble tilpasset slik at silikaslurrien ble mer konsentrert.

5.1.3 *Prosedyrer for å oppnå mottrykk*

SVV ønsket ikke å bruke mikrosegment på Liavatnet-siden, men heller å tilpasse hullmønster og prosedyrer for å lykkes jevnt over med industrisement. Likevel ble mikrosegment benyttet i relativt stor grad, særlig i soner der bergmassen var dårlig og innlekkasjene store. Også i forbindelse med etablering av en ytre skjerm mot kloakktunnelen ble ca. 1/3 av skjermen fylt med mikrosegment. Mikrosegment ble også brukt på Sandeide-siden i flere skjerner.

Dersom ikke mottrykk var oppnådd før maksgrensen var nådd, ville tiltak bli iverksatt for å få avsluttet hullet. Avhengig av om det var mikrosegment eller industrisement som ble benyttet som injeksjonsmiddel, ville valg av slike tiltak være forskjellig. Ved bruk av mikrosegment var styrt herding i form av akseleratorstilsetning foretrukket metode for å avslutte hull. Dette var ikke nødvendig dersom tilstrekkelig mottrykk ble oppnådd ved maksimalt innpumpet injeksjonsmengde. Likevel formanet byggherren i starten injeksjonsarbeiderne om at styrt herding burde bli brukt i minst mulig grad. I stedet for styrt herding ble det anbefalt en gradvis reduksjon av v/c -forholdet, til for eksempel 0,5. Dette er tilsvarende prosedyre som for industrisement, altså gradvis fortykning av injeksjonsmassen for å oppnå mottrykk. Etter hvert ble styrt herding som metode for å avslutte hull standard prosedyre, da det viste seg å fungere godt. Tilsats av akselerator for å oppnå mottrykk ble vurdert som et alternativ også for industrisement, selv om metoden ikke er like effektiv og kontant som for mikrosegment. Akseleratorstilsats i industrisement vil føre til at den blir noe mer seigtflytende.

5.1.4 *Håndtering av utganger fra sprekker under injeksjon*

En prioritert rekkefølge med tiltak for å stanse utganger på stuff ble etter hvert utarbeidet av SVV. Kun tilsats av Zugol og hvile hadde vært benyttet i starten. Listen er som følger for industrisement:

- 1) La hullet hvile.
- 2) Mauring.
- 3) Zugol.
- 4) Stry/pussegarn og trekiler.
- 5) Akselerator.

Mauringsmasse kan leveres på kort varsel, så derfor var det vurdert som et godt alternativ. I forbindelse med mauring av stuff monteres en ny pakke bak den gamle, og kranen på staven blir stengt av for å forhindre injeksjonsmasse å trenge ut. For mikrosement har styrt herding med akselerator blitt ofte benyttet for å oppnå mottrykk ved store innganger og for å stoppe utganger.

5.1.5 *Serieinjeksjon og utganger fra injeksjonshull*

Generelt var kravet i prosedyrene at kraner måtte skrus til på stavene dersom det kom injeksjonsmasse ut av disse, altså ved kommunikasjon mellom nabohull. I utgangspunktet skulle pakkerne være åpne ved hjelp av småplugger i spissene til pakkerne. Når pakkerne var åpne fikk injeksjonsmasse og vann fikk slippe ut gjennom pakkeren og videre gjennom staven. Serieinjeksjon av de hullene som mottok masse skulle da igangsettes. Dette var spesielt viktig dersom det ble injisert med mikrosement.

Det var alltid et mål for AF at alle lagene fulgte de samme prosedyrer for injeksjonsarbeidene. Injeksjonsarbeider er komplekse av karakter, og det er mange faktorer som må koordineres for å oppnå tilfredsstillende resultater. SVVs kontrollingeniører på stuff har registrert enkelte forskjeller mellom lagene, og opplyste AF om dette. Dermed fikk lagene samkjørt prosedyrene for injeksjon. Det vil ofte være enkelte mindre forskjeller mellom lagene, særlig i startfasen av injeksjonsarbeidene.

Et eksempel som kan nevnes er at SVVs kontrollingeniører blant annet registrerte at enkelte lag skrudde til kranene i alle hull før injeksjon ble igangsatt. For å kunne avsløre kommunikasjon mellom ulike hull via sprekker i bergmassen, var det viktig at kranene ikke ble skrudd til før injeksjon ble satt i gang. Gråvannet får da renne fritt ut av stavene. Anleggsledelsen i AF ga beskjed til lagene om dette, slik at prosedyrene kunne endres.

I tilfeller der hull mottar injeksjonsmasse fra nabohull eller via sprekker, er det viktig at disse ikke står 'ubrukt' for lenge slik at massen stivner i hullene. Da vil hullene ikke lenger være i stand til å motta mer injeksjonsmasse. Når kommunikasjon mellom nabohull oppdages tidlig, kan serieinjeksjon igangsettes før injeksjonsmassen stivner. SVVs kontrollingeniører har hjulpet til med å registrere eventuelle gjennomganger til nabohull. Dette er særlig viktig for mikrosement på grunn av den korte herdetiden. Under egne observasjoner gjort på stuff, har det bare blitt registrert at serieinjeksjon ikke har blitt utført i forbindelse med injisering av industrisement. Dette er forståelig på grunn av den lange herdetiden dette injeksjonsmiddelet har sammenliknet med mikrosement. Dette var heller ikke et krav fra SVVs side.

5.2 Design av injeksjonsskjermene

Skjermenes utforming ble bestemt av byggherren. Stikning, hullengde og avstand mellom hull er avhengig av stedlige forhold som overdekning og sprekkeretninger. Ved injeksjon av nisjer, vil nødvendigvis stikningen måtte være tilpasset nisjens geometri. Hvis en skjerm var en del av et område hvor det ble utført systematisk injeksjon, ble design og erfaringer fra tidligere skjermene brukt som et utgangspunkt for utførelsen av denne skjermen. Hvis tidligere skjermene har vært vellykket er det ingen grunn til å endre designet, med mindre de geologiske og hydrogeologiske forholdene har blitt endret. Dette kan forekomme i forbindelse med

svakhetssoner, lav overdekning eller andre faktorer som for eksempel en kloakktunnel som ligger like over hengen. Påhugget på Sandeide-siden er et spesielt interessant eksempel på hvordan de stedlige forholdene kontrollerte hvordan injeksjonen skulle utføres. Her var det observert lekkasje i sprekke, slik at injeksjon ble ansett som nødvendig. I stedet for en enkelt lang skjerm, ble det boret dobbel skjerm. Denne løsningen ble valgt fordi risikoen for at boreavvik kunne føre til skade på en vannledning i nærheten, var vurdert som signifikant.

5.2.1 *Standardskjermer*

I kontrakten var det spesifisert at en standardskjerm på 30 hull og 24 meter lange hull skulle tas utgangspunkt i, men at denne kunne modifiseres avhengig av de stedlige forholdene. I praksis ble flere standardskjermer utarbeidet og byttet på, eller brukt som utgangspunkt for skjermdesign i de ulike seksjonene. Utgangspunktet for planleggingen av neste skjerm var sonderboringene der hvor det ikke var systematisk injeksjon. Erfaringer fra tidligere skjermer var også avgjørende for planleggingen.

I kontrollørmeldingene ble skjermdesignet spesifisert. Eventuelt ble det oppgitt hvilken standardskjerm som skulle bli benyttet. Ofte ble det vurdert at injeksjonsskjermen som ble bestilt ikke kunne ha nøyaktig lik utforming som en av standardskjermene, for eksempel på grunn av forholdene på stoff. Da ville det i så fall i kontrollmeldingen være oppgitt hvilken standardskjerm som skulle være utgangspunktet for skjermdesignet, og de modifikasjoner som er gjort på boreplanen for standardskjermen ble oppgitt. Det kan blant annet være spesifisert at det skal være flere eller færre hull i for eksempel hengen, eller at skal være forskjellig stikning på ulike hull i den nye skjermen i forhold til standardskjermen. I tillegg kan lengden eller avstanden på enkelte hull være endret. Fortetting, kortere skjermavstand og forkorting av hull var vanlig prosedyre dersom forholdene på stoff ble forverret eller overdekningen redusert. En generell filosofi som byggherren levde etter var at det var bedre å bore flere hull enn å korte ned på skjermelengder og antall salver i syklusen.

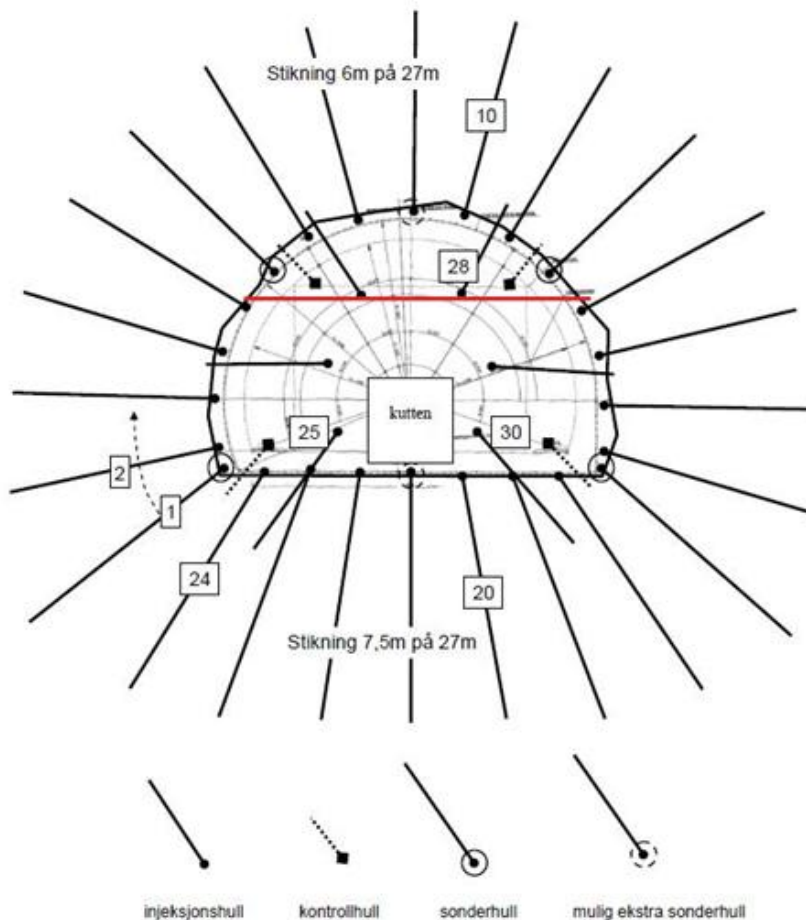
Det skal nevnes at i seksjoner der det var hyppige variasjoner i forholdene på stoff, slik at skjermene måtte endres ofte, var det ikke alltid slik at en endring i skjermdesignen ble kommunisert til AF via en kontrollørmelding. I stedet kunne spesifikasjonene bli

kommunisert muntlig til bas på stuff. Dette var for å slippe å måtte forholde seg til stadig nye kontrollørmeldinger, som kunne være frustrerende for entreprenøren.

5.2.2 *Skjermdesign*

Ved systematisk injeksjon ble ny skjerm boret for hver 3. eller 4. salve. En forutsetning for at det skulle kunne injiseres for hver 4. salve, med for eksempel hull på 24 eller 27 m, var at det var lite eller ikke noe vann i hullene etter skjermboring. Dersom vann av betydning ble påtruffet, ble hullelengden kortet ned til for eksempel 24 m, og kun 3 salver per skjermboring. Dette måtte selvfølgelig vurderes basert på overdekningen, fjellkvaliteten osv. Det var viktig at skjermene ikke ble for lange, fordi for lange skjermene gir dårligere injeksjon av det innerste berget på grunn av trykktap, hullspredning og økende boreavvik.

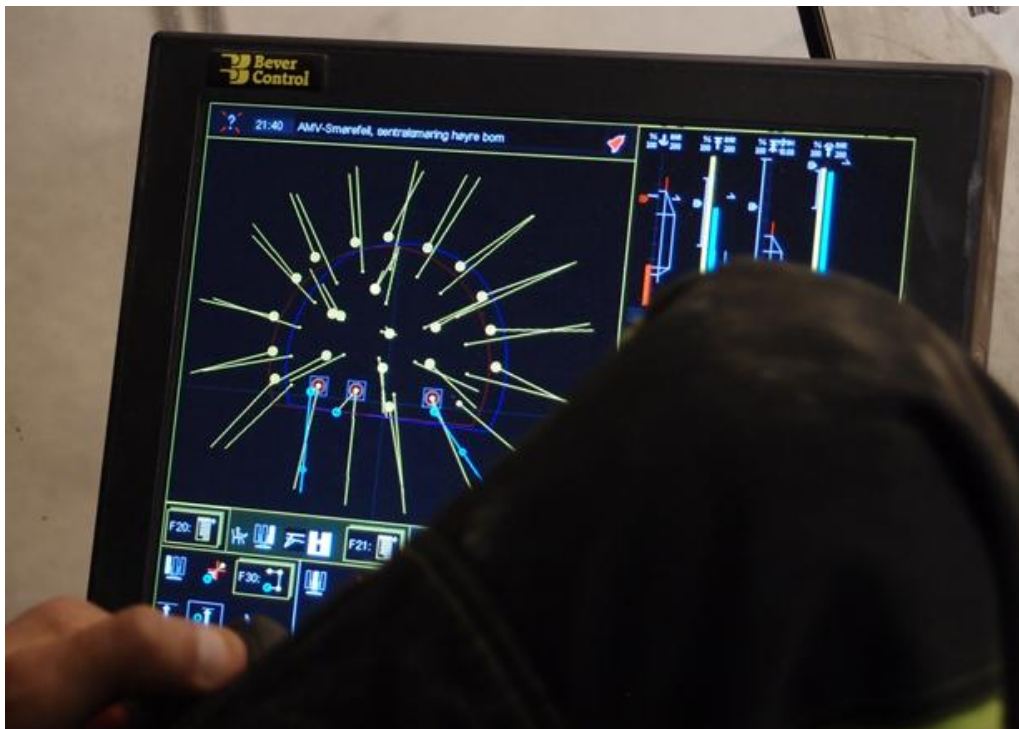
Som oftest ble kontrollhullene plassert nærmere sentrum av profilet enn injeksjonshullene, som er plassert i kransen rundt profilet. En tegning over et tunnelprofil er vist på Figur 23 (S11S-5147). Dette er et eksempel på en modifisert 'standardskjerm med 30 hull', der stikning og hullantall er endret. Skjermen ble benyttet på Sandeide-siden under kloakktunnelen, der mikrosement ble injeisert i den øverste 1/3 av skjermen, og industrisement i resten. Denne løsningen ble valgt for å danne en barriere mot kloakktunnelen.



Figur 23: Figuren viser et eksempel på en skisse av en boreplan for en injeksjonsskjerm.

Størrelsen på stikningen til hullene i en injeksjonsskjerm, var avhengig av vurderinger gjort av byggherren, som igjen var avhengig av hvor god plass det var rundt tunnelprofilet. Under sålen ble hullene gitt størst stikning, for eksempel 6 meter. Dette ble gjort på grunn av at hardere ladning påfører skader på fjellet. Ved liten overdekning ble hullene gitt mindre stikning enn ved moderat eller stor overdekning. I forbindelse med nisjer, ville hullene være vinklet mer ut enn vanlig. Detaljer rundt stikningen til injeksjonshullene ble gitt i kontrollørmeldingene. I tilfeller der slepperetningene var markante, ble det tidvis forsøkt å tilpasse boremønsteret etter dette i stedet for å bore en 'tradisjonell' skjerm. I nisjer/havarilommer ble boremønsteret tilpasset 'manuelt' etter stedlig profil. Både vinklingen på hullene og antall hull ble endret i slike områder.

Før en skjerm ble boret ble det gitt en tegning over tunnelprofilet til bas med angivelse av hullplassering samt andre spesifikasjoner, før boringen av skjermen ble igangsatt. I praksis tegnet byggherren et utkast til boreplan, eventuelt ble spesifikasjonene kommunisert muntlig til AF. Men utkastet som SVV skisserte kunne ikke ha spesifikasjoner som trosset riggens begrensninger, fordi den endelige boreplanen ble generert på riggen. Hvordan den endelige boreplanen så ut på skjermen de hadde på riggen, er vist i Figur 24. For eksempel hadde SVV, i tillegg til at ytterhullene har nok stikning til at både boltedybde og skjermkjøter dekkes opp, ønsket at ytterhullene ble ansatt så langt ut som mulig. Men riggen hadde ikke mulighet til å ansette ytterhullene helt ytterst fordi det var fysisk umulig for riggens bommer å bore hull helt ut til kanten.



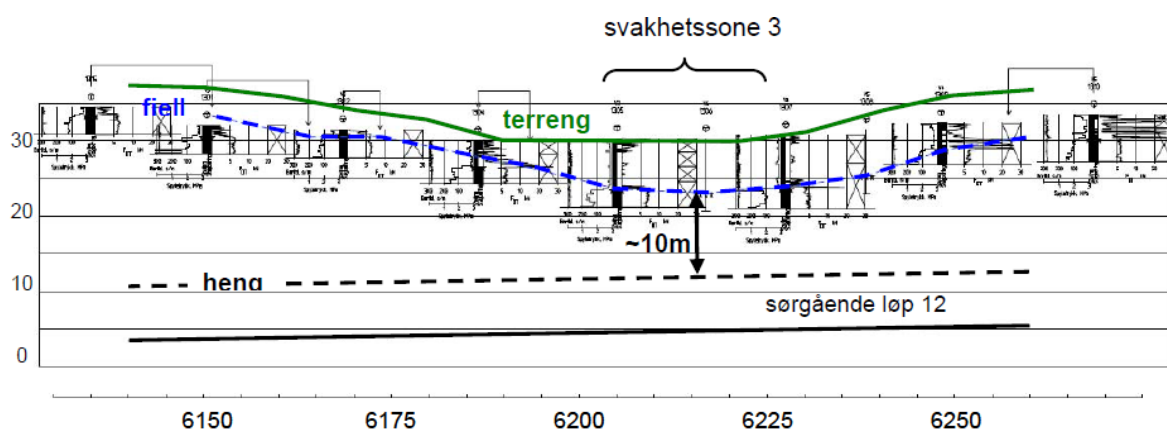
Figur 24: Slik genereres en boreplan på riggen i praksis (byggeskolen, 2013).

Da forslag til boreplan hadde blitt generert på riggen, ble boreplanen sendt til SVV som kommenterte denne med eventuelle rettelser. Dersom standardskjermer ble benyttet uten modifikasjoner, var det ikke nødvendig å generere boreplanene på riggen, dette fordi de allerede naturligvis lå lagret i datasystemet der.

5.3 Injeksjonsprosedyrer og skjermdesign ved liten overdekning

Det var flere soner med liten overdekning langs tunneltraséen. Sonen med til dels meget dårlig berg under Bjørgeveien på Sandeide, der tunnelene også måtte like innunder en uføret kloakktunnel, var den mest utfordrende delen av tunnelen. Her var det en strekning med over 60-70 meter minimal overdekning, ofte bare 5 meter. Innlekkasjene her var ikke særlig store, så injeksjonens hensikt her var å stabilisere bergmassen. Bergmassen her var av svært dårlig karakter, og det ble injisert en sperreskjerm med mikrosement og sluttrykk på 40 bar. For mer detaljert beskrivelse av denne seksjonen se kapittel 6.3.1.

Ved liten overdekning er faren for utganger i terrengoverflaten større enn ved stor overdekning. I Kanadaskogen ble det registrert flere tilfeller av utganger i dagen etter injeksjonsrundene. Den første utgangen nordfra kom ved profilnummer 11-7500. Overdekningen hadde da blitt redusert til 30 meter fra 100-150 meter tidligere. Kontrollingeniørene overvåket kontinuerlig terrenget under injeksjonen for å sjekke om eventuelle utganger i dagen hadde skjedd. Dersom utganger hadde skjedd, ble tiltak satt i gang for å fjerne betong-kakene som har lagt seg i hager og på turveger, for eksempel på Hesjakollen. Som vist på Figur 25 var fjelloverdekningen ved svakhetszone 3, før boligområdet på Hesjakollen, på kun 10 meter.



Figur 25: Figuren viser seksjonen med minimal overdekning ved svakhetszone 3.

I soner der overdekningen var liten ble både prosedyrene for injeksjonen og boremønsteret endret for å unngå unødvendige utganger. Endringer i injeksjonsprosedyrene og boreplan ble implementert dersom utganger i dagen ble registrert, eller dersom totaloverdekningen ble antatt å minke betydelig. Høye trykk og tynn masse ble generelt unngått i soner med lav overdekning, og stikningen på injeksjonshullene i hengen ble endret slik at disse ikke stod for steilt. For steile injeksjonshull kunne føre til at injeksjonsmassen fortere nådde terrengoverflaten før trykkoppbygging var oppnådd. Stikning på 2,5 meter ble gjerne brukt der overdekningen var minimal, for eksempel ved svakhetssone 3. Et sluttrykk på kun 20 bar fra vederlaget og opp, med henholdsvis 50 bar i sålen og 40 bar midt i stuff ble benyttet her. 20 bar er det laveste sluttrykket som er benyttet under injeksjonsarbeidene på Knappetunnelen.

I Kanadaskogen på Liavatnet-siden ble prosedyrene endret slik at flere hull ble boret i periferien (T9,5). Grunnen til at flere hull ble boret her, var for å kompensere for lavere sluttrykk. I stedet for 80 bars sluttrykk ved stor overdekning, ble dette redusert til 60 bar. Antall injeksjonshull ble økt til 40 hull, derav 34 i periferien (krans, såle og heng). Til sammenlikning var standard injeksjonsskjerm ved stor overdekning på 30-35 hull på Liavatnet-siden. For både stor og liten overdekning ble 6 hull i stuff boret. Det ble spekulert i om et trykk på 60 bar var for lavt for pumping med industrisement, men det ble vurdert at inntrengingen var god nok. Mengdebegrensning på liter masse (industrisement) pr. hull ble introdusert som et annet tiltak for å unngå utganger i dagen (slik at det ikke skulle bli pumpet for lenge på tynn masse). Der overdekningen var på et minimum, ved for eksempel profil 7170 i løp 12 og 7150 i løp 11, ble det injisert med mikrosement.

5.4 Spesielle særtrekk i forbindelse med inntrengning av injeksjonsmasse

Et problem hele veien har vært hovedsprekker med liten eller ingen vinkel til tunnelretningen, som betyr at hvert injeksjonshull krysser relativt få sprekker. Injeksjonsmassen vil da ikke bre seg utover i bergmassen på tvers av tunnelaksen like effektivt som den ville ha gjort, dersom hovedsprekkene var mer gunstig orientert. Det ble forsøkt noen skjermmer med kryssende hull for å nå flere sprekkesett (inj. møte 6). Resultatene var ikke særlig gode, noe som viser at slike sprekker er vanskelig å injisere.

Generelt gjaldt det at jo flere stikk og sprekker det var i fjellet, desto flere utganger ville komme på stuff under injiseringen. Der hvor det stod igjen oppsprukket fjell fra forrige salve var det flere utganger, og også ut fra injeksjonshull fra den forrige skjermen i stuffen. I enkelte tilfeller har det blitt observert at det har kommet vann ut av hull så langt som 30 meter bak stuff under injeksjonsarbeidet (L12, 7945). Dette tyder på at vannet har blitt presset bakover når injeksjonsmassen brer seg innover og bakover i bergmassen. Det vertikale sprekkesettet kan ha bidratt til bevegelsen av injeksjonsmassen bakover i bergmassen. Derfor var det viktig for SVV at boltene ble gyst før injeksjonen startet, basert på erfaringene med injeksjonsmasse som kom ut via boltehullene.

Enkelte særtrekk i forbindelse med inntrengning av injeksjonsmasse er registrert under observasjoner gjort under injeksjonsarbeidet på Liavatnet-siden av undertegnede. Ved profil 7112 ble det for eksempel registrert utganger fra stuff under injeksjonen, både fra horisontale og vertikale sprekker. Bergmassen her bestod hovedsakelig av båndet gneis, og foliasjonen var orientert horisontalt med et vertikalt sprekkesett. Oppe til venstre side var bergmassen oppsprukket slik at de fleste av utgangene skjedde her enn ellers i stuffen. Inngangen av injeksjonsmasse, her mikrosement, var her så stor at akselerator ble tilsatt før mengdebegrensningene i kontrollørmeldingene var oppnådd. Slike instruksjoner ble gitt muntlig av kontrollingeniøren på stuff, basert på erfaringene fra de forrige skjermene hvor inngangene hadde vært store. Utganger fra injeksjonshull fra den forrige skjermen ble observert nederst ved sålen (over hull 27).

5.5 Oppfølging og kontroll av injeksjonsarbeidene

5.5.1 Samarbeidet mellom entreprenør og byggherre

Injeksjonsarbeidene på Ringveg Vest ble styrt av byggherren SVV, med innspill fra entreprenøren AF. AF stod for utførelsen av injeksjonsarbeidene. Det ble arrangert byggemøter mellom partene ca. hver andre uke, og dette ble som oftest holdt på SVV sitt anleggskontor på Sandeide. På disse møtene ble det diskutert alle de teknisk-økonomiske

aspektene ved driften, både utførte arbeider og fremtidige arbeidsoppgaver. Ved behov ble det også arrangert møter som kun omhandlet injeksjon. Disse ble kalt injeksjonsmøter. Deltakerne som stilte på injeksjonsmøtene fra SVV-leiren var som oftest teknisk byggeleder, anleggsgeologen og kontrollingeniører. Fra AF-leiren stilte prosjektleder, anleggsleder og prosjektingeniører. På injeksjonsmøtene ble det diskutert aktuelle problemstillinger tilknyttet injeksjonsarbeidene. Eksempelvis ble HMS diskutert, i tillegg valg av injeksjonsmiddel, rutiner for kontroll, kontraktsoppfølging, injeksjonsstrategi og utførelse. På disse møtene hadde AF mulighet til å konfrontere SVV om eventuelle uenigheter i injeksjonsstrategien, og derfor være med å påvirke det fremtidige injeksjonsopplegget. Møtereferater ble lagt ut på et felles nettbasert arbeidsområde eller webhotell kalt Prosjektplassen. Prosjektplassen var en plattform hvor det ble kommunisert skriftlig mellom SVV og AF. Da det var beregnet omfattende injeksjon for store deler av tunneltraseen, var det naturlig å ha som felles mål at injeksjonsarbeidene skulle være effektive og vellykkede på første forsøk. Via såkalte SVUer (Spørsmål Vedrørende Utførelse) ble AF konfrontert med eventuelle innvendinger SVV hadde i forbindelse med utføringen av injeksjonsarbeidene.

5.5.2 Oppfølging av injeksjonsarbeidene

Oppfølging av injeksjonsarbeidene ble gjort kontinuerlig av kontrollingeniørene og anleggsgeologen. Endringer i injeksjonsopplegget ble kommunisert via kontrollmeldinger fra SVV. AF innrettet seg etter endringene og forandret injeksjonsopplegget, som kontrollingeniørene fulgte opp. I den daglige driften var verbal kommunikasjon mellom kontrollingeniører og injeksjonsmannskap en viktig del av samarbeidet. Her ble det diskutert nødvendig injeksjonsopplegg for de gitte forholdene. Kontrollingeniørene og injeksjonsmannskapet kunne bli enige om å fravike instruksene gitt i kontrollmeldingene hvis dette var vurdert til å kunne gi et bedre resultat. Injeksjonsarbeidet som ble utført av AFs injeksjonslag ble også kontrollert av SVVs kontrollingeniører, som en del av oppfølgingen. Det betydde ikke nødvendigvis at kontrollingeniørene kontrollerte injeksjonsarbeidene på stuff kontinuerlig mens injeksjon ble utført. For det meste av tiden var det kun injeksjonsmannskapet som var på stuff. Det var med andre ord et tillitsbasert forhold mellom byggherre og entreprenør. I seksjoner der overdekningen var liten ble utganger i terrenget

registrert av kontrollingeniørene, slik at sementen kunne fjernes. Når kontrollingeniørene var på stuff for å følge opp injeksjonsarbeidene noterte de blant annet mengdene med injeksjonsmasse som hadde blitt injisert. Eventuelle problemer ble også notert i 'Dagboken', som var en logg vakthavende kontrollingeniør oppdaterte etter hvert skift. Denne ble lagt ut på Prosjektplassen. Byggherren tok likevel stikkprøver fra tid til annen for å bekrefte at injeksjonsarbeidene ble utført i henhold til beskrivelsene. Konkrete eksempler på slik kontroll var boreavviksmåliger og testing av injeksjonsmiddel med hensyn på herdetid, v/c-forhold og tilsetningsstoffer. Borehullsavvik ble i første omgang målt ved at en lommelykt ble ført inn i hullene, festet på for eksempel en lekte, stakefjær osv. Deretter ble det notert hvor langt inn i hullet, og i hvilken retning lyset forsvant. Borehullsavviket ble deretter estimert ved å bruke en empirisk formel. For at oppgjøret skulle bli rettferdig og sluttdokumentasjonen mest mulig presis, måtte vekta på injeksjonsriggen stemme slik at riktige mengder sement ble injisert. Nøyaktigheten til vekta på injeksjonsriggen har blitt kontrollert ved at kontrollingeniører fra SVV har veid bøtter med injeksjonsmasse med forskjellig v/c-forhold, og sammenlignet med teoretisk vekt. I tillegg til vekter på riggene, ble også resepter og reelt forbruk sjekket tidlig og kontinuerlig i injeksjonsarbeidet av kontrollingeniørene.

Kontrollhull ble normalt boret etter første salva i en skjerm for å sjekke om resultatene fra injeksjonsrunden var tilfredsstillende. Hullengden ble bestemt slik at kontrollhullene skulle ligge innenfor skjermen, og stikningen skulle være mindre enn for injeksjonshullene. Optimalt skulle kontrollhullene ha en slik retning og lengde slik det var spor etter de i fjellet bak den siste salva i skjermen. Dersom det ble påtruffet vann i enden av skjermen, var det en indikasjon på at antall salver per skjerm kanskje burde reduseres.

5.5.3 Dokumentasjon og rapportering

All dokumentasjon fra tunneldrivingen skulle komme tidsnok og fortløpende, enten det gjaldt salveplaner/rapporter, all sprøytebetong, injeksjon, rådata MWD, bolting mm. SVV ville deretter signere/godkjenne uke/skiftrapporter kontinuerlig, senest i begynnelsen av hver uke, eller evt. daglig. Injeksjonsrapportene var den viktigste delen av rapporteringen fra injeksjonen. En injeksjonsrapport skulle inneholde de punktene som er gitt i kapittel 2.5. I tillegg til injeksjonsrapporten ble det levert en bore-rapport. Det var fokus fra SVVs side på at

injeksjonsrapporten var oversiktlig og levert innen rimelig tid etter avsluttet injeksjon. 3-5 dager var greit, men 7 dager var for lang tid ifølge SVV.

Injeksjonshullene skulle nummereres etter fast mønster, og SVV ønsket et bilde med hullnummerering av boret skjerm eller i det minste den gjeldende boreplanen. Denne skulle vises i injeksjonsrapporten. Alle typer langhullsboringer ble rapportert i en egen bore-rapport. Alt av mengder som ble forbrukt i injeksjonsrundene, ble registrert i en datalogg på injeksjonsriggen, slik som beskrevet i kontrakten. Operatøren på riggen hadde til enhver tid oversikt hvor mye som var blitt pumpet inn (liter) totalt i hullet, hvor mye som ble pumpet inn per tid eller såkalt fløde (liter/min), og med hvilket trykk det ble pumpet inn injeksjonsmiddel i hvert injeksjonshull. I tillegg til datautskriften ble sluttrykk og injeksjonsmengder for de ulike reseptene registrert på et eget skjema for hånd. Hvis det ble tilsatt Zugol eller mauringsmidler, ble antall sekker registrert på samme skjemaet av operatøren. Kontrollingeniøren hadde mulighet til å gjøre et overslag av mengdeforbruket ved å telle antallet tomme sement- og Zugol-sekker som var blitt benyttet. Etter hver injeksjonsskjerm gikk entreprenøren gjennom skjemaet med registrert mengdeforbruk. På denne måten dokumenterte altså entreprenøren medgåtte mengder og tid som hadde blitt brukt. Skjemaet ble digitalisert og sendt til byggherren for signering. Vedlagt skjemaet var utskrift av dataloggen på injeksjonsriggen. Dataloggen skulle kunne overføres til Excel for enklere oppsummering.

Når det gjelder vannlekkasjemålinger, ble disse utført der synlig vann ble observert i injeksjonshullene. Lekkasjeforholdene skulle komme fram på rapportskjemaene. Bøtte og stoppeklokke skulle ifølge kontrakten bli benyttet for å anslå innlekkasjen i l/min ved hvert enkelt hull. SVV forlangte ikke målestav og bøtte i alle hull, men ville ha et omtrentlig anslag for egen sluttrapportering, både fra enkelthull og samlet. Dette gjaldt både sonder- og injeksjonshull. Vannlekkasje fra sonder- og kontrollhull skulle måles som beskrevet i prosessen, men det ble spesifisert av SVV at måling av vannlekkasje fra hull på synk bare hadde hensikt dersom de var helt fylt av vann. Dette var aktuelt særlig for sålehull.

6. Seksjonsvis gjennomgang og resultater

6.1 Innledning

6.1.1 Omfang

Dette kapittelet vil ta for seg injeksjonsarbeidene som har vært utført i de ulike seksjonene av hovedløpene. Tunnelen er delt opp i 9 ulike seksjoner, der hver seksjon inkluderer beskrivelser for begge løpene, se Vedlegg H for vertikalprofil med de ulike seksjoner angitt. Seksjonene er avgrenset slik som i den geologiske rapporten (Kirkeby 2010), med den forskjellen at områder hvor det ikke har vært utført injeksjon, ikke er tatt med. Hovedfokuset i denne gjennomgangen vil være på svakhetssoner og områder med mye vannlekkasje. Svakhetssoner og vannførende sprekker er avgjørende for hvordan skjermene skal tilpasses, og er mer interessante å studere enn de standardskjermene som brukes i de områdene der de ingeniørgeologiske forholdene var tilnærmet konstante. Som beskrevet i kapittel 3 var oppsprekkingen tilnærmet konstant gjennom hele tunneltraseen, selv om berget til dels var meget oppsprukket på Sandeide-siden. Her var det til gjengjeld lite vann, men på grunn av det åpne fjellet var masseforbruket stort.

Det er naturlig å gjennomgå injeksjonsarbeidene med driveretningen, som betyr synkende profilnumre fra Liavatn. Fra Sandeide-siden er bildet noe mer komplisert, her drives hovedløpet både nordover og sørover på grunn av av- og påkjøringsrampene (61 og 62). Figur 26 viser situasjonen. Den røde linjen representerer en kryssende kloakktunnel ved profil 5150. Grensen mellom nordlig og sørlig driveretning på Sandeide-siden er definert som profilnummeret der av- og påkjøringsrampene krysser hovedløpet. Grensen mellom Sandeide-siden og Liavatn-siden er definert som profilnummeret til gjennomslaget, altså der siste salve ble sprengt. Denne salva ble sprengt 15. april 2013, ca. ved profilnummer 6950.



Figur 26: Figuren viser et oversiktsbilde over Sandeide-siden (Fra Sandeidekrysset til Varden stadion). Prosjektkontoret er merket med «P». Den røde linjen representerer kloakktunnelen (Kirkeby 2013).

I beskrivelsen av seksjonene vil først geologien og utførte injeksjonsarbeider bli gjennomgått. Videre vil andre forhold som har hatt betydning for utformingen av skjermene og injeksjonsprosedyrene, bli nevnt. Av praktiske årsaker vil mengden medgått injeksjonsmasse, knyttet opp mot Q-verdier og vannforhold bli presentert i diagrammer i Vedlegg C. Resultater basert på disse diagrammene vil presenteres i kapittel 6.4.

6.1.2 Grunnlagsdata

Når seksjonene blir gjennomgått må data hentes fra forskjellige kilder som komplimenterer hverandre. Injiserte mengder, antall utførte skjermene og innlekkasjemålinger på stuff med tilhørende profilnummer er oppsummert på et excel-ark som viser totaloversikten med hensyn på utført injeksjon. Disse tallene er samlet inn fra injeksjonsrapporter og borelogger, samt datautskriften fra boreriggen.

Injeksjonsprosedyrene som blir beskrevet er basert på kontrollørmeldinger, møtereferater, samtaler med kilder i SVV og AF, samt egne observasjoner på stoff. Geologiske beskrivelser er naturlig nok hentet fra geologisk rapport (Kirkeby 2010). Q-verdier er hentet fra NovaPoint tunnel.

Der det har vært huller eller uklarheter/feilføringer i rapporter, har disse blitt oppklart i samtale med ansatte ved Ringveg Vest-prosjektet eller ved å lete i SVV sin dagbok.

6.2 Driving sørover fra Liavatn

Injeksjonsmiddelet som skulle brukes på Liavatn-siden var opprinnelig bestemt til å være industrisement, men mikrosegment ble også benyttet i enkelte skjermene. I starten ble det injisert sporadisk basert på sonderboringer (fra profil ca. 8450 til 8500), derfra systematisk til ca. 8300, forbi sone 12 som det på forhånd var planlagt å injisere. Fra profil 8200 til 8250 ble det injisert sporadisk, før det ble bestemt at det skulle injiseres systematisk. Dette var fordi det over flere skjermene hadde vært signifikante mengder innlekkasje, og det var et felles ønske om faste rutiner. Ved svakhetssone 10 (profil ca. 7800) ble fjellet mer oppsprukket og leireinfisert, og her ble det injisert med mikrosegment. Etter profil ca. 7775 ble berget litt bedre, og det ble derfor injisert med industrisement igjen. Overdekningen har til nå vært på 100-150 meter, men ved profil 11- 7500 ble det registrert en utgang i Kanadaskogen. Overdekningen hadde nå blitt redusert til 30 meter, og prosedyrene ble endret (lavere trykk og flere injeksjonshull). Fortsatt ble det injisert med industrisement. De siste 49 skjermene på Liavatn-siden ble injisert med mikrosegment.

6.2.1 Seksjon ca. 8500 -8300 (Storamyra)

Fra profil 8500 startet det strenge kravet om 10 liter/minutt/100m samlet for begge løp, og det var her injeksjonsarbeidet startet. Første injeksjonsskjem ble bestilt for løp 11, profilnummer

8466 (11-8466). Dette løpet var det fremste av de to som ble drevet fra Liavatn. Totalt i seksjonen har det vært utført 18 skjerner.

Geologien i denne seksjonen består av granittisk gneis og båndgneis. Q-verdier kartlagt på stoff varierte mellom 5 og 25 for hele seksjonen, med unntak av 11-8350-8335 og 12-8325-8300. Her varierte Q-verdiene mellom 0,13 og 1,3.

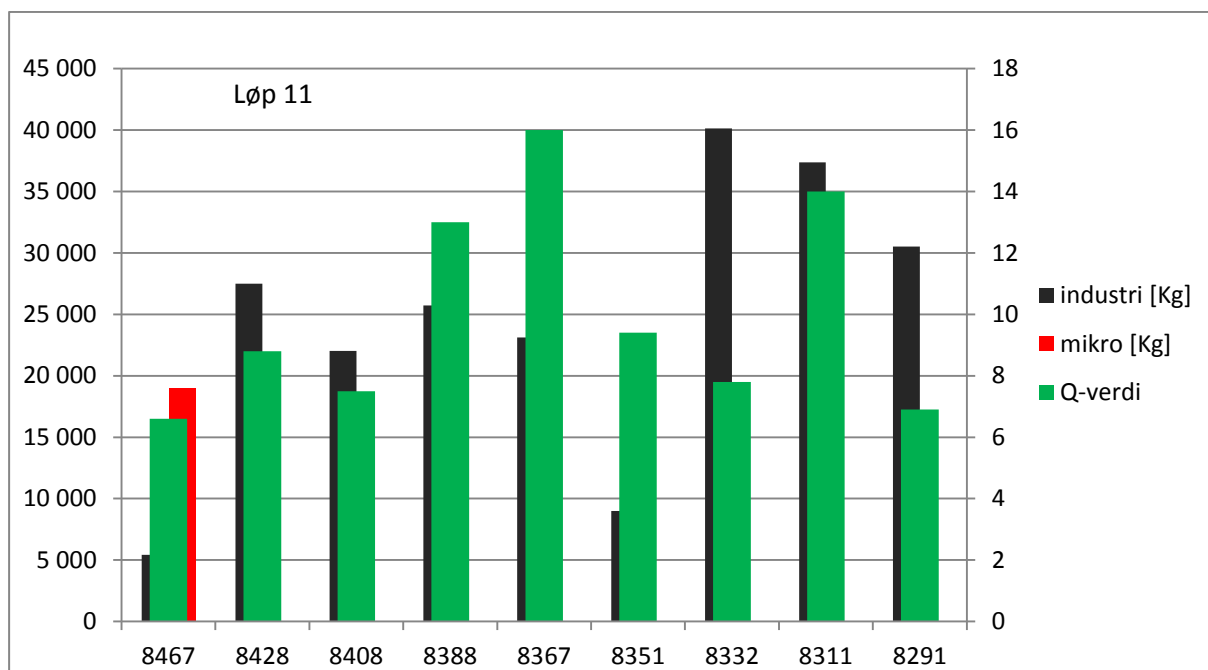
Mellom profilnummer 8400 og 8300 ligger området som heter Storamyra. Fra forundersøkelsene var det kartlagt 3 svakhetssoner her, svakhetszone 12 (profil 8370) samt de mindre svakhetssonene K (profil 8320) og J (profil 8300). Overdekningen i denne seksjonen var aldri lavere enn 30 meter. Det ble bestilt systematisk injeksjon gjennom hele dette strekket. Valget om å benytte systematisk injeksjon ble basert på resultatene fra forundersøkelsene og sonderboringer. Vannlekkasjemålinger utført etter endt skjerm boring tydet på at det var vannførende sprekker i deler av seksjonen. Resultatene av målingene varierte mellom 5 og 70 liter/minutt/skjem. Gjennomsnittet lå på ca. 10 liter/minutt/skjem.

Skjermene i denne seksjonen bestod i all hovedsak av 24 injeksjonshull á 27 meter, med noen unntak. I løp 11 ble det brukt industrisement på alle skjerner utenom én, mens det på tre av skjermene i løp 12 ble brukt mikrosegment. Stikningen som ble benyttet var 5 meter i ytterhullene, 6 meter i sålen og 2-3 meter i indre krans. Injeksjonshullene ble ansatt så langt ut mot såle, vegg og heng som praktisk mulig. Superplastiserende stoff ble tilsatt alle blandinger. Silika ble tilsatt industrisement ved v/c-forhold 0,8 og høyere.

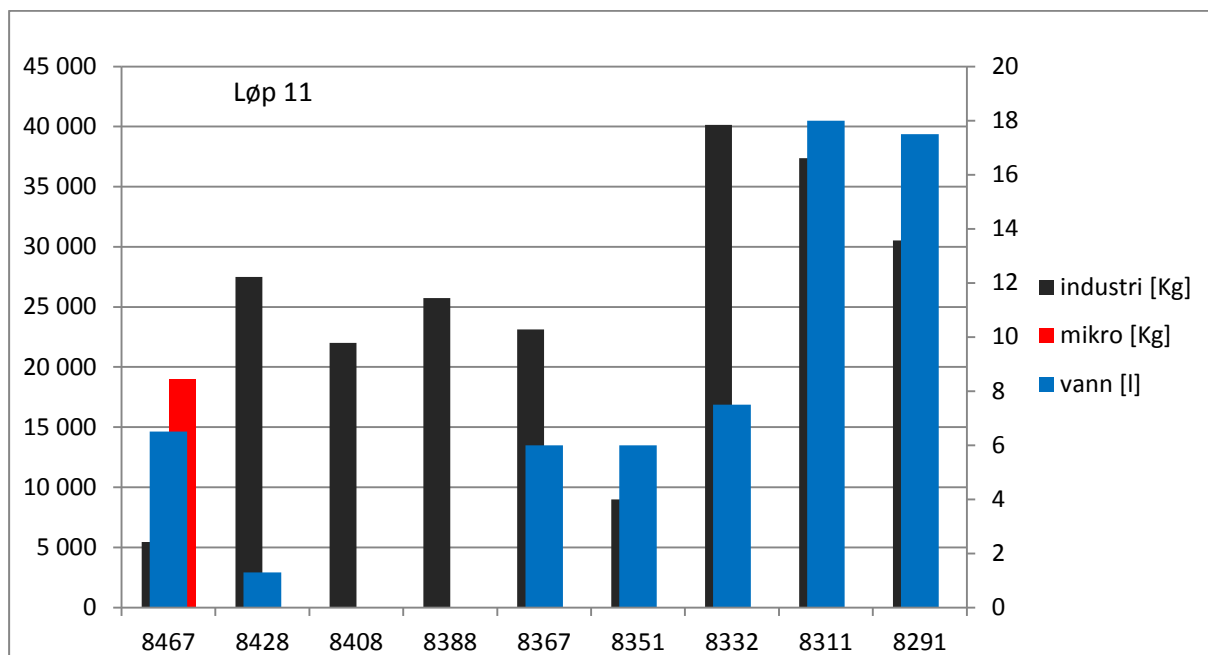
Injeksjonsprosedyrene for denne seksjonen var følgende:

- Injeksjon i alle skjermene startet med v/c-forhold 0,9, deretter over til 0,7 etter 500 liter, og videre til tykkeste blanding 0,5 hvis det ikke var tilstrekkelig trykkoppbygging.
- Rundt 1500 liter/hull totalt var satt som maksgrense. Det ble allikevel pumpet inn mer i og nær sålen (mindre ved hengen), avhengig av injeksjonsforløpet.
- Oppnådd sluttrykk på 80 bar ble benyttet framfor maksgrensen på 1500 liter.
- Ved utganger på stoff ble mauring eller akselerator benyttet.

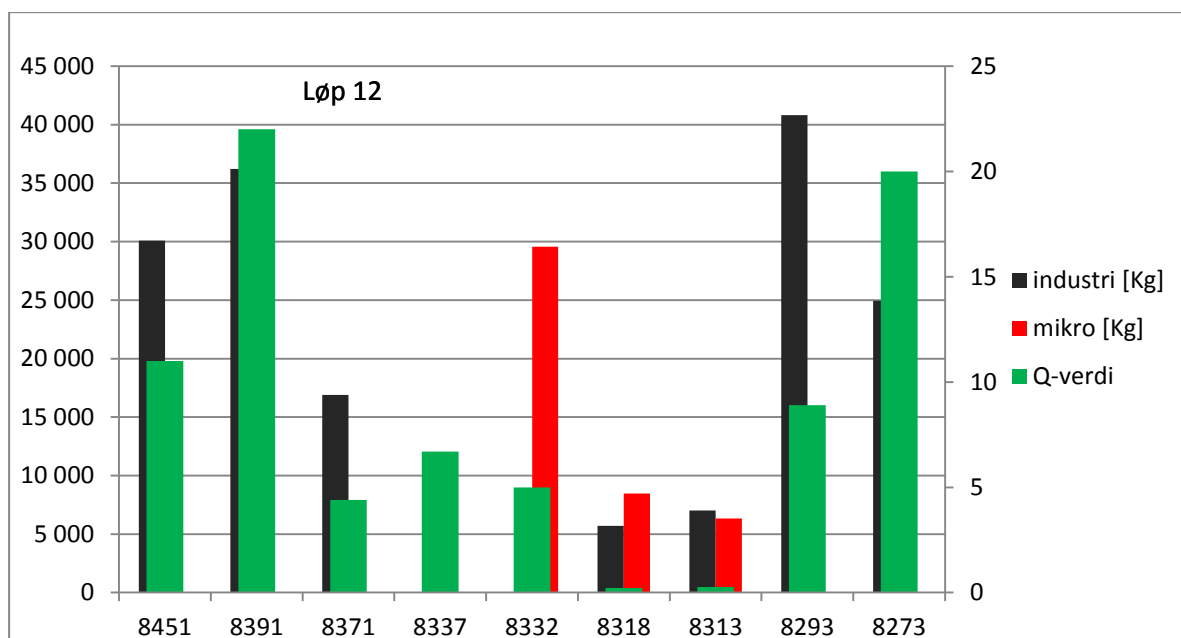
I stolpediagrammene i figurene under vises mengder og type med inngått injeksjonsmasse, målt opp mot Q-verdi og vannlekkasje, for alle injeksjonsskjermene i seksjonen. For de videre seksjonene vil disse diagrammene presenteres i Vedlegg C.



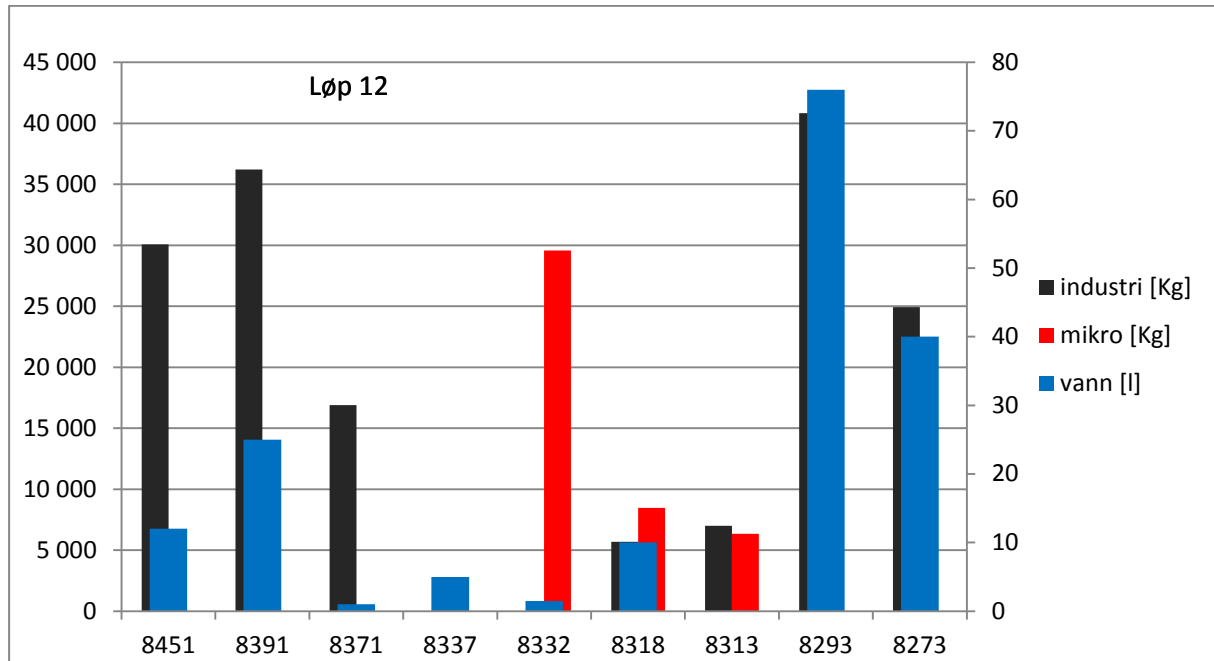
Figur 27: Figuren viser medgåtte mengder med mikro- og industrisement, samt Q-verdi for hver skjerm i seksjonen for løp 11.



Figur 28: Figuren viser medgåtte mengder med mikro- og industrisement, samt innlekkasje på stuff for hver skjerm i seksjonen for løp 11.



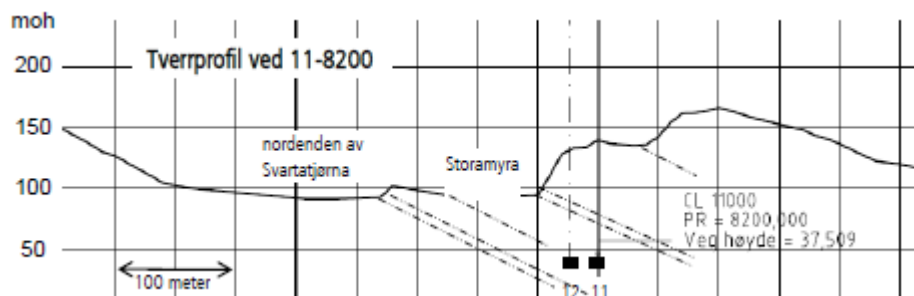
Figur 29: Figuren viser medgåtte mengder med mikro- og industrisement, samt Q-verdi for hver skjerm i seksjonen for løp 12.



Figur 30: Figuren viser medgåtte mengder med mikro- og industrisement, samt innlekkasje på stuff for hver skjerm i seksjonen for løp 12.

6.2.2 Seksjon ca. 8300-7900 (Storhovden Nord)

Krav til innlekkasje i denne seksjonen var som i den forrige, det vil si 10 liter/minutt/100 meter samlet for begge løp. Geologien i seksjonen er stort sett båndete gneiser med tydelige gneisfoliasjoner. Overdekningen økte etter at Stormyra var passert, og endte opp på ca. 100 meter ved profil 8200, se Figur 31.



Figur 31: Tverrprofil ved profil 8200 (Kirkeby 2010).

Fra forundersøkelsene var det kartlagt 3 mindre svakhetssoner, I, 11 og H ved profilnummer 8200-8000, 7960 og 7900. Q-verdier kartlagt på stuff varierte mellom 4 og 25, med et gjennomsnitt på cirka 10 for hele seksjonen. Dårligste Q-verdier ble tatt mellom 8200 og 8000. Den systematiske injeksjonen fra forrige seksjon stoppet opp ved 11-8291 og 12-8273, og ble gjenopptatt i denne seksjonen etter at det ble målt innlekkasje i skjermhullene som oversteg kravene. Det ble injisert systematisk 11-8251 og 12-8176. Vannlekkasjemålinger varierte mellom 3 og 1400 liter/minutt/skjem, med et gjennomsnitt på 190 liter/minutt/skjem. Mest vann ble målt mellom profil 8150-7930, i begge løp

AF og SVV hadde et injeksjonsmøte i startfasen av denne seksjonen. Her ble det diskutert rammebetingelser, prinsipper og arbeidsprosedyrer. Felles mål for begge parter var effektiv, vellykket injeksjon på første forsøket.

For denne seksjonen ble det utført 37 skjermene. Skjermene bestod i første omgang av standard skjermene med 24 hull à 27 meter for T9,5, og 29 hull à 27 meter for nisjeområder med T12,5 profil. Etter 4 skjermene ble standard skjermene modifisert. Hullantallet ble endret til 30 og 34 for henholdsvis T9,5 og T12,5. Dette ble gjort for å sikre seg mot gjentatte injeksjoner samme sted, men også fordi det var så høye vannlekkasjemålinger i både sonder- og skjermhull.

Spesielt for denne seksjonen var de til tider store vannmengdene. Dette førte til at injeksjonsopplegget måtte endres i to omganger. Først ble hullantallet endret som beskrevet over, senere ble det i tillegg innført 5 ekstra injeksjonshull per skjerm. De ekstra hullene ble innført på grunn av mye smådrypp bak stuff, spesielt fra enkelte av boltene. Hullene, med lengde på 13 meter, hadde større stikning og ble plassert fra vederlag til vederlag. Hullantallet ble økt i et forsøk på å fange opp partiet i skjermkjøten der injeksjonen var antatt til å være noe dårligere, grunnet økt hullavstand og trykktap innover i de lengre hullene. De store vannmengdene førte også til at avstanden mellom skjermene ble kortet ned. Lekkasjemålinger gjort i forbindelse med kontrollboringer var ved enkelte skjermene så våte at skjermene ble kortet ned til 10 meters sykluser, til forandring fra standardavstanden på 20 meter.

Injeksjonsopplegget for skjermene med ekstra hull var følgende:

- ‘Aktiv injeksjon’ med v/c <1 og jevn, langsom trykkoppbygging mot minst 80 bar ved bruk av gradvis tykkere masse.
- Industrisement med 2 % SP, og silika på tynne blandinger (maks 10 %).
- Pakkere med små plugger inn i pakkerspissen, slik at kontakten mellom hullene ble oppdaget.
- 800 liter i sålehull før v/c-bytte, 300 liter i topphullene.
- Pålagt herdetid på stoffene som ikke allerede var injisert.
- 17 meter lange kontrollhull etter hver injeksjonsskjem.
- 5 ekstra injeksjonshull med lengde på 13 meter, per skjem.
- Borplan med instruks at annenhver injeksjonsskjem ble vridd med $\frac{1}{2}$ hullavstand. Økte antall hull i konturen med to på bekostning av hull i stoff. Det vil si at antall hull i stoff ble redusert fra 8 til 6.
- Økte stikningen til 6 meter i buen, og også økt stikning i sålen (før 6-7 meter).
- Tiltak for å stanse utganger på stoff, bak stoff, til andre løpet var; 1. La hullet hvile, 2. Muring, 3. Andre stoffer, som Zugol, 4. Stry/pussegarn og trekiler og 5. Akselerator.

Se Vedlegg C for oversikt over medgatte mengder, lekkasjemålinger og Q-verdier for hele seksjonen.

6.2.3 Seksjon ca. 7900-7750 (Dalsøkket med svakhetssone 10)

Også for denne seksjonen var kravet til innlekkasje på 10 liter/minutt/100 meter samlet for begge løp. Seksjonen inneholdt en meget markert svakhetssone samt vannførende sprekker parallelt med tunnelretningen, svakhetssone 10. Seismikken utført under forundersøkelsene ga en hastighet på 2500 m/s, noe som tydet på dårlig bergmassekvalitet. Mektigheten viste seg å være over 70 meter under drivingen. Det var anslått lave bergklasser over en strekning på 50 meter i begge løp, 11- 7880-7830 og 12- 7850-7800.

Geologien i området var uforandret i forhold til tidligere seksjoner, og består av gneisbergarter. Ved svakhetssone 10 var berget leirinfisert. Q-verdiene for hele seksjonen varierte mellom 1,5 og 24, snittet for sonen var på 8. Det var stort sett godt berg, foruten i svakhetssonen. I svakhetssonen var Q-verdiene stort sett under 4. Vannlekkasjer målt etter endt skjerm boring var i snitt 300 liter/minutt/skjerm.

Det ble utført 25 skjerm totalt. Opplegget fra forrige seksjon med 5 ekstra hull á 13 meter ble avsluttet ved 11- 7886 og 11-7895. I første del av denne seksjonen, frem mot svakhetssone 10, og delvis gjennom, ble det benyttet standard industriskjerm. Etter hvert som tunnelene støtte på store vannførende sprekker, cirka ved 11/12-7815, ble det enighet om å prøve med mikrosement. I området med de vannførende sprekke ble det tatt i bruk en ny borplan med 34 hull á 24 meter. Dette ga tettere hull rundt profilet og en c/c på cirka 1,2. Ny borplan, gjeldende for både mikro- og industrisement, ble innført ved 11-7784 og 12-7814. Totalt var det 8 skjerm med mikrosement i denne seksjonen, resten var med industrisement

Injeksjonsprosedyrene for industrisement var uendret fra forrige seksjon. For mikrosement gjaldt følgende prosedyre:

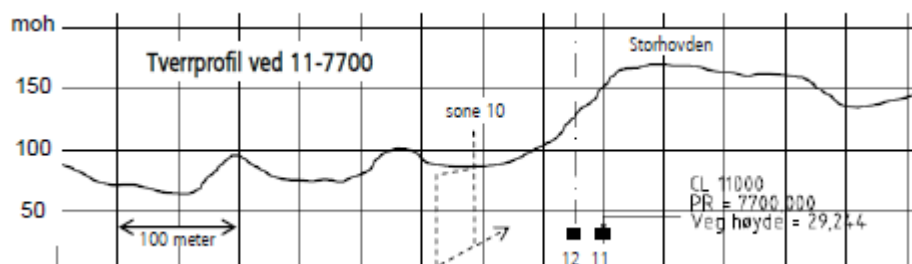
- Kun v/c lik 0,8 med bruk av akselerator for styrt herding. Gradvis fortykning av injeksjonsmassen slik som for industrisement, ble ansett som uaktuelt.
- Hvis trykket bygget seg jevnt og merkbart opp, ble ikke akselerator tilsatt.

- Gikk det mer enn 1500 liter i sålehull uten trykkoppbygging, ble det startet opp forsiktig med akseleratorstilsetning (Grense for midt i stoffen var 1000 kg, 750 i topphullene).
- Det ble i første omgang tilsatt 2% akselerator av sementvekten. Fordi sementen normalt reagerte etter 20 minutter ved denne konsentrasjonen, ble det sørget for at det ikke ble pumpet for raskt.
- Dersom det ikke bygget seg opp trykk etter inntil 300 liter, skulle mengden med akselerator økes til 4%, til makstrykket på 60 bar ble oppnådd
- Dersom det fortsatt ikke var trykkoppbygging, ble ytterligere 300 liter pumpet inn. Nå med 6% akselerator.
- Ved utganger til andre hull skulle serieinjeksjon utføres.
- Hullene skulle bli avsluttet uten akseleratorstilsetning, minst 5 pumpeslag med akseleratorfri sement.

Spesielt for denne seksjonen var at injeksjonsopplegget ble endret på grunn av dårligere injeksjonsresultater enn forventet. Skjermavstanden var på de våteste strekkene nede i 5 meter, det vil si bare én salve per injeksjon. Se Vedlegg C for fullstendig oversikt over mengdeforbruk knyttet opp mot vannlekkasjer og Q-verdier.

6.2.4 Seksjon ca. 7750 -7500 (Storhovden Sør)

Kravet til innlekkasje var i denne seksjonen 10 liter/min/100 meter samlet for begge løp. Det var ikke forventet store problemer med tanke på dårlig bergmasse i denne seksjonen. Kun én svakhetssone var registrert i forundersøkelsene. Svakhetssone 9 krysser ved 11-7585 og 12-7570 i terrenget. Det var registrert resistivitet mellom 1000 og 2000 Ω m, noe som tydet på at det var vannførende sprekker i området. Overdekning i denne seksjonen var på over 50 meter. Figur 32 viser et tverrprofil over Storhovden.



Figur 32: Tverrprofil over Storhovden (Kirkeby 2010).

Geologien i seksjonen består av gneisbergarter. Q-verdiene i seksjonen varierte mellom 4 og 33. Snittet lå på i overkant av 10. Berget i denne seksjonen var noe bedre enn i den forrige seksjonen, men fortsatt var det en del sprekker og leire. Et problem for alle seksjonene hittil har vært hovedsprekker med liten eller ingen vinkel til tunnelretningen. Dette har betydd at hvert injeksjonshull har krysset relativt få sprekker.

Det har vært utført 34 skjermmer totalt i denne seksjonen. Fortsatt har det vært utført systematisk injeksjon, med industrisement som injeksjonsmiddel. I seksjonen har det vært mye vann, opptil 2300 liter/min, men mest tresifrede verdier. Gjennomsnittet var 350 liter/min/skjem. Forbruk av sement og tid var meget høyt. I snitt har det gått det med 70 tonn på fremre stoff (11) og 50 tonn på bakre (12), for hver femtende meter som var injeksjonslengden. Tidsforbruket var høyt, 15-30 injeksjonstimer per skjerm. Injeksjonsskjermene var standard 34 hull á 24 meter, derav 28 hull i krans/såle og 6 hull i stoff for T9,5. Det ble forsøkt noen skjermmer med kryssende hull (24 meter) for å oppnå kommunikasjon med flere av de langsgående sprekke, se Vedlegg E for borplan. Det ble ingen store endringer i prosedyrene, foruten at det ble forsøkt å plugge hullene med akselerator. Dette har tidligere kun vært benyttet på mikroskjemmer.

6.2.5 Seksjon ca. 7500-6950

Fra 7500 begynte det strengeste kravet til innlekkasje, 5 liter/minutt/100 meter. Ved så strenge krav har det vært nødvendig med systematisk injeksjon. I denne seksjonen var det på forhånd registrert to svakhetssoner. Svakhetsone 8 ved 7490, og svakhetssone 7 ved 7400.

Geologien i området var fortsatt dominert av gneis. Q-verdiene varierte mellom 0,52 og 23, med et gjennomsnitt på 6,8. Overdekningen i seksjonen gikk gradvis ned fra 50 meter ved pel 7500, til 30 meter ca. 100 meter lenger framover. Det ble for første gang observert utganger i terrenget i Kanadaskogen. Derfor ble det bestemt å prøve ut nye prosedyrer. Vannlekkasjemålinger utført etter endt skjerm boring viste et gjennomsnitt på 10 liter/minutt/skjem.

Totalt for seksjonen var det utført 66 skjerner, hvorav 49 var mikroskjermer. Seksjonen startet med industriskjermer før mikrosegment ble benyttet. På grunn av den lave overdekningen ble boreplan for hele seksjonen endret. Den lave overdekningen, og faren for utganger i dagen, førte til at det ble bestemt av byggherren at trykket skulle reduseres fra 80 til 60 bar. For å kompensere for dette ble hullantallet økt til 40 for profil T9,5, og 50 for T12,5. Boreplan og injeksjonsprosedyre for industrisement så ellers slik ut for profil T9,5:

- 34 hull á 24 meter i kransen og sålen. 4 hull ekstra i vegger og heng, og 2 hull til i sålen sammenlignet med forrige seksjon.
- Fortsatt 6 hull i stuff.
- v/c 0,9 over til 0,7 dersom ikke rask trykkoppbygging. Samme blanding videre til 60 bar dersom det var fornuftig trykkoppbygging (maks 2500 liter).
- v/c 0,5 ved maks volum til hullet var avsluttet, altså ved sluttrykk 60 bar over noen minutter.
- Dersom inngangen ble oversteget med 1500 liter, ble akselerator, mauring eller lignende benyttet.

Mesteparten av injeksjonen ble utført med mikrosegment. Prosedyrene for injeksjon med mikrosegment var tilsvarende som for seksjon 7900-7750.

Injeksjonen ble avsluttet fra Liavatn ved 11-6947 og 12-6995. Herfra frem til gjennomslag viste sonderboringene at det var tilstrekkelig tørt, og det ble bestemt at injeksjon ikke var nødvendig selv om det var strenge krav.

6.3 Driving nordover fra Sandeide

Det har generelt vært svært lite vann på Sandeide Nord, og til tross for strenge lekkasjekrav har det stort sett bare vært sonderboring. Injeksjon har imidlertid vært igangsatt flekkvis grunnet stabilitet, liten overdekning og mulig fare for setninger om det skulle være vann. Det ble startet opp systematisk injeksjon fra 6350 begge løp på grunn av sone 4, liten overdekning og hus på løsmasser. Berget var «sultent», og derfor gikk det med store mengder injeksjonsmasser (industrisement). Selv om det var lite vann på strekningen, var det antatt at injeksjonen hadde god effekt på stabiliteten.

6.3.1 Seksjon ca. 6100-6500 (*Allestadveien med svakhetsone 3 og 4*)

Tetthetskravet i seksjonen endret seg fra 10 til 5 liter/minutt/100 meter for begge løp samlet, ved pel 6200. Ved pel 6200 ble det etablert en målesterskel. Seksjonen inkluderer svakhetssonene 3 og 4, samt de mindre sonene A, B og C. Svakhetsone 3 krysser løpene vinkelrett ved pel ca. 6210. Svakhetsone 4 ved pel 6340 krysser også vinkelrett, og er den mest markerte sonen med mektighet på 15 meter i følge forundersøkelsene. Seksjonen inneholder også et sårbart myrområde som starter ved pel 6340 og strekker seg til 7250.

Q-verdier i seksjonen varierte mellom 0,67 og 12, med et snitt på ca. 4. Det var hovedsakelig gneis av middels kvalitet. Enkelte områder var leirinfisert. Ved svakhetsone 3 og 4 var Q-verdiene stort sett lavere enn 1. Seksjonen var stort sett lekkasjefri, og det ble ikke målt verdier på over 5 liter/minutt. Gjennomsnittsmålingene gjort etter endt skjermboring for alle skjermene lå i underkant av 1 liter/minutt/skjem.

Totalt for seksjonen ble det utført 23 skjermene. De første injeksjonsskjermene ble utført i begge løp ved svakhetsone 3, mellom pel 6191 og 6219 for løp 11, og mellom pel 6204 og 6220 for løp 12. Ved svakhetsone 3 var fjelloverdekningen bare 10 meter (se figur kap. 5.4). På disse skjermene ble det brukt industrisement med standard skjermene på 34/24 hull á 24 meter. Standard prosedyre, men sluttkriteriene varierte:

- Pumping med $v/c = 0,7$ maks 500 liter, så over på $v/c = 0,5$ maks 1000 liter.
- Trykkoppbygging med 80 bar i sålen, 60 bar midt i stuff og 40 bar i øvre del av stuff. Dette gjaldt for 11-6191, 11-6206, 12-6204 og 12-6220.
- For 11-6220 ble det benyttet 50 bar i sålen, 40 bar i stuff og 20 bar i øvre del av stuff.

Etter svakhetssone 3 ble det ikke injisert, dette til tross for at en var innenfor området med de strengeste kravene. Fravær av vann gjorde at injeksjonsarbeidene ikke startet opp før en nærmet seg svakhetssone 4. Fra 11-6365 og 12-6354 begynte systematisk injeksjon hver tredje salve, det vil si hver 15 meter. Skjermene var injisert med industrisement, med en overlapp på 9 meter mellom skjermene. Prosedyrene for injeksjonen er tilsvarende som for før svakhetssone 3. Standard skjermes på 34 hull á 24 meter ble benyttet, samt 50 bars sluttrykk på grunn av den lave overdekningen.

6.3.2 Seksjon ca. profil 6500-6950 (Hesjaholtet)

Tetthetskravet for denne seksjonen er 5 liter/minutt/100 meter for begge løp samlet. Generelt er hele området fra Hesjakollen (ca.profil 6450) til sone 7 (ca.profil 7000) dominert av SSV-NNØ strykende lineamenter og dalsøkk som antas å representere svakhetssoner. Det er stort sett myr og vegetasjon på overflaten, noe som gjorde det vanskelig å kartlegge svakhetssonene. Overdekningen for området ligger mellom 50 og 35 meter, minkende overdekning med driveretningen.

Q-verdiene for seksjonen varierte mellom 0,62 og 20, med et gjennomsnitt på 5,9. Det var stort sett gneis av god bergkvalitet mellom svakhetssonene. I svakhetssonene var det ofte leire i sprekkene.

Injeksjonsarbeidene fortsatte videre inn i denne seksjonen, som ikke var like tørr som den forrige seksjonen (fortsatt lite vann). Det var i gjennomsnitt målt 4 liter/minutt/skjem. 34-hullsplanen for T9,5 ble videreført fra forrige seksjon. Det ble også skjermavstanden på 15

meter og overlappen på 9 meter. Prosedyrene for begge løp, fra og med 11- 6484 og 12- 6572, var følgende:

- 300 liter med $v/c = 0,9$.
- $v/c = 0,7$ inntil 1000 liter hvis ikke mottrykk oppnås.
- $v/c = 0,5$ inntil 1500 liter dersom det ikke ble oppnådd sluttrykk på 80 bar
- Videre tiltak, i prioritert rekkefølge, var; akselerator, tykkere blanding (lavere v/c), mauringsmasse og hullhvile.

Fra 11- 6575 og 12- 6732 ble hullengden endret til 27 meter. Dette ble bestemt da vannforholdene og fjellforholdene viste seg og være gode.

Injeksjonsarbeidet ble avsluttet med siste skjerm ved 11- 6859 og 12-6907. På de siste 100 meterne i begge løp gav sonderboringene så lite vann at det ble besluttet ikke å injisere, til tross for de strenge kravene.

6.4 Driving sørover fra Sandeide

På denne strekningen var overdekningen liten, og problemer med utganger til både terrengoverflaten og Kloakktunnelen var en utfordring. Både industri- og mikrosement ble benyttet i samme skjerm, der mikrosementen ble injisert i øverst i skjermen for å danne en barriere mot kloakktunnelen.

6.4.1 Seksjon ca. 5200-5100 (Kloakktunnelen)



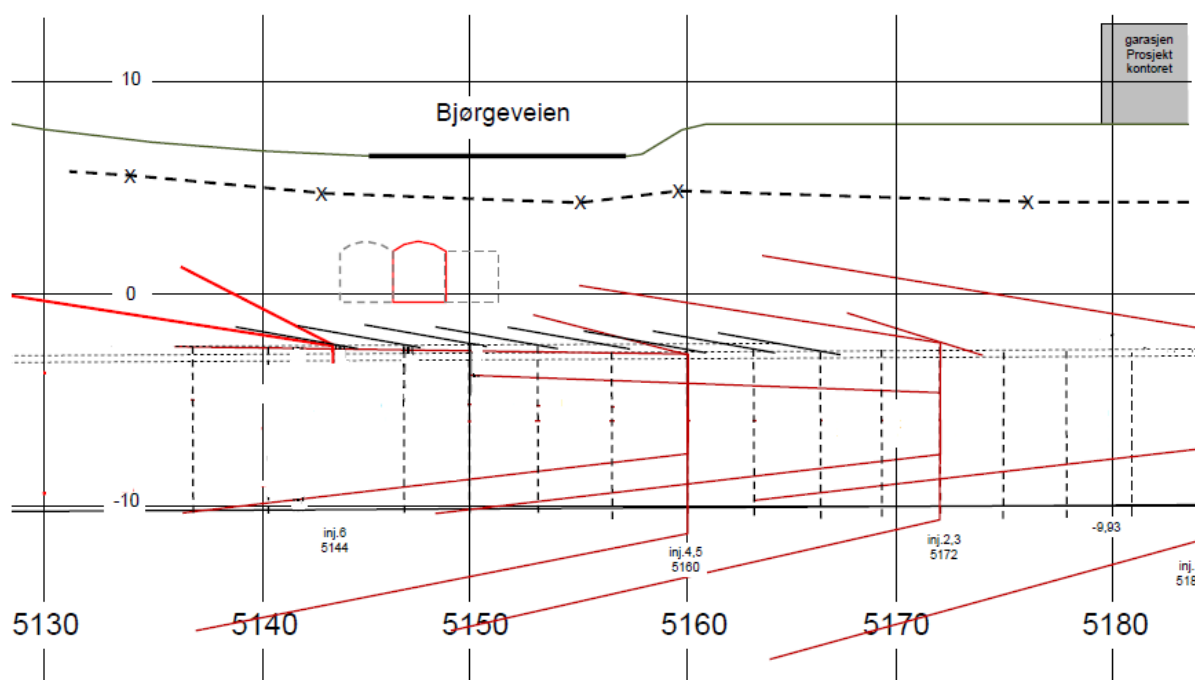
Figur 33: Figuren viser et bilde av kloakktunnelen (Kirkeby 2013).

Det er ingen krav til innlekkasje i denne seksjonen, foruten kravet om å unngå større punktlekkasjer. Det ble allikevel besluttet å injisere dette strekket på grunn av lav overdekning, samt ønsket om å unngå avløpsvann fra kloakktunnelen. Figur 34 viser et

vertikalprofil av mesteparten av seksjonen, der kloakktunnelen er inkludert. Figur 33 viser et bilde tatt av kloakktunnelen under en befarings i 2010.

I denne seksjonen var det lav overdekning med et gjennomsnitt på ca. 5 meter. Bergmassen var stort sett svært oppsprukket og kunne karakteriseres som dagfjell. Q-verdiene for seksjonen varierte, for begge løp, mellom 0,13 og 7,5. Gjennomsnittlig Q-verdi lå på 0,9.

Det ble gjennomført totalt 13 skjerming for begge løp, 7 i løp 11 og 6 i løp 12. Som oftest ble det først injisert en sperreskjerm med mikrosegment i øvre del av stuff. Her var sluttrykket lavere enn for industriskjermen i nedre del av stuff. Videre følger en detaljert beskrivelse av injeksjonsarbeidet for denne seksjonen:



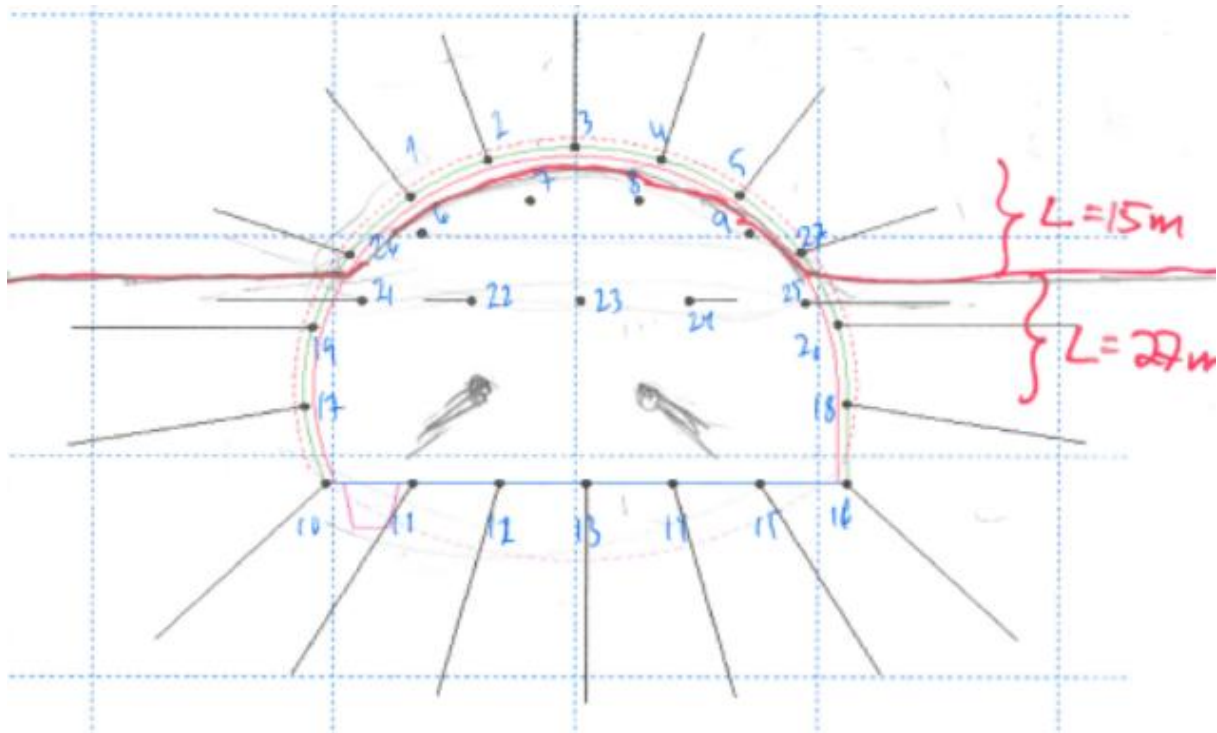
Figur 34: Oversiktsbilde over situasjonen for denne seksjonen. Kloakktunnelen krysser ca. ved pel 12- 5150 (Hentet fra kontrollørmelding).

Injeksjonsarbeidet med industrisement startet ved pel 11- 5196 og 12- 5187 på grunn av svært dårlig fjell og innlekkasje. Det ble målt 25 liter/minutt fra sonderhull i løp 11 og 8 liter/minutt i løp 12. På dette stadiet var det ikke langt til hverken kloakktunnelen eller terrengoverflaten, se Figur 34. Derfor ble det under injeksjonsarbeidet fokusert på å unngå utganger her ved å

unngå å pumpe langvarig på tynn masse med høye trykk. Det ble også forsøkt å ha ulike stopptrykk avhengig av hvor langt unna hengen det ble injisert, slik at det ble lavest trykk i topphull (40-50). Standard prosedyre for industrisement ble brukt, det vil si gradvis tykkere blanding ($v/c = 0.9, 0.7, 0.5$), silika kun på tynneste blanding. Standard skjerm med 24 hull ble benyttet, boreplanen er vist i Figur 35.

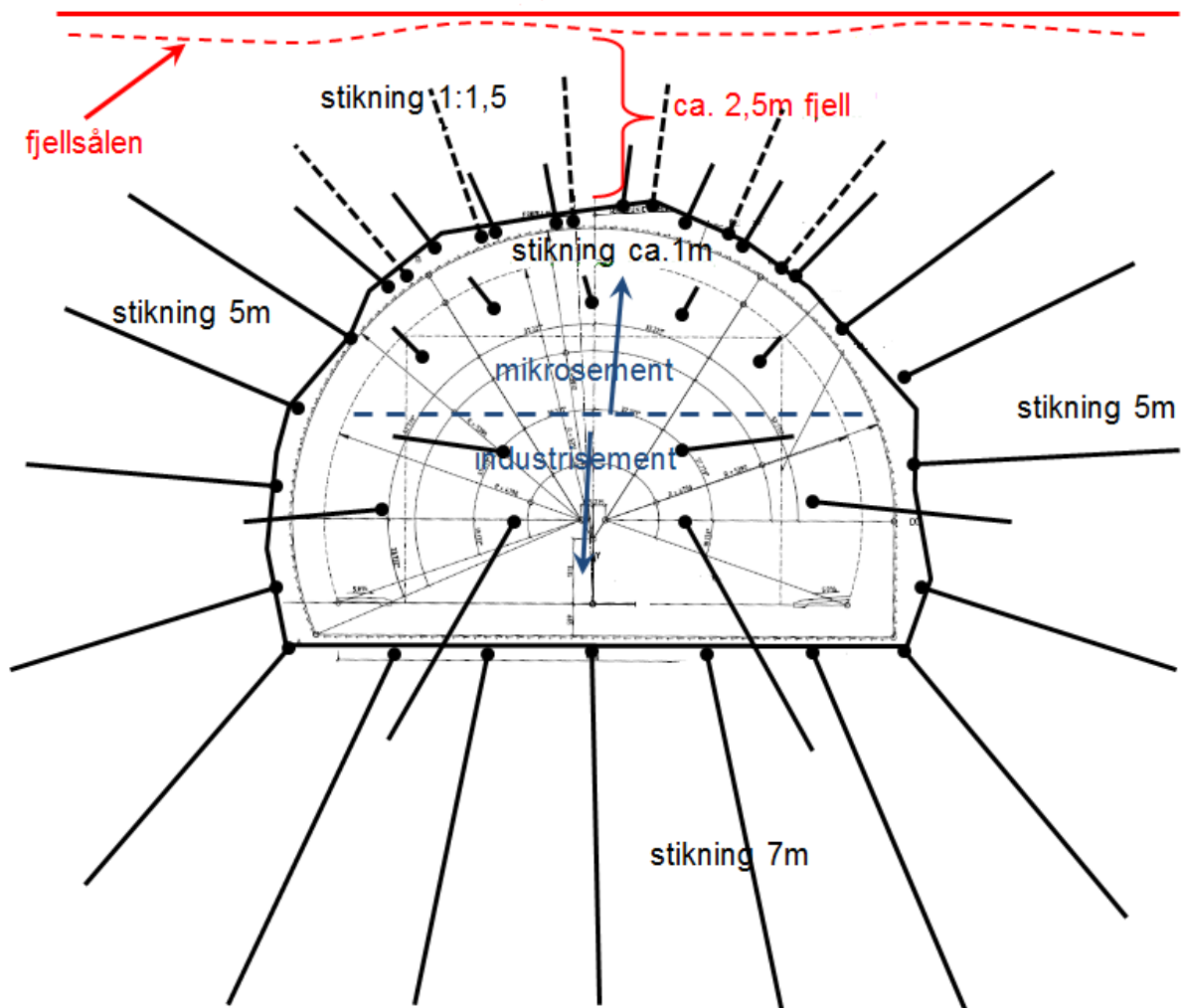
Allerede på neste skjerm i begge løp (11- 5177 og 12- 5172) ble injeksjonsopplegget endret. Dette ble gjort etter diskusjon mellom representanter fra både AF og SVV. Injeksjonsprosedyrene for disse skjermene var så godt som identiske, og kan oppsummeres slik:

- Først ble det injisert en sperreskjerm med mikrosegment i hullene 21-25, deretter 24 meters hullene rett fram, til slutt korthullene øverst på 15 meter.
- Startet med $v/c = 0.7$, gikk over til $v/c=0.5$ for trykkoppbygging. Sluttrykket var i størrelsesorden 30-40 bar i øverste hull, 50-60 bar midt i stuff.
- Akselerator ble brukt dersom trykk ikke ble oppnådd innen rimelig tid. I løp 11 ble det brukt 435 kg med akseleratortilsetning.
- Industrisement i nedre halvdel, startet pumping i bunn som vanlig med $v/c=0.9$, og gikk relativt raskt over på tykkere masse.
- Sluttrykk 70-80 bar.



Figur 35: Boreplan for profil 11-5177 (Hentet fra Prosjektplassen).

De neste skjermene i begge løp, 11- 5164 og 12- 5160, var de mest kritiske. Disse skjermene gikk rett under kloakktunnelen, og det var viktig å ta hensyn til stikningen i topphullene. Overdekningen var bare på 2,5 meter ved kryssing av kloakktunnelen. Kjerneboring ble utført på 11- 5168. Boreplanen for skjermen injisert under kloakktunnelen er vist i Figur 36. Stikningen til de enkelte hullene er inkludert på figuren.



Figur 36: Boreplan for kryssing av kloakktunnel i løp 11. Tilsvarende boreplan ble brukt på løp 12 (Hentet fra Prosjektplassen).

Injeksjonsopplegget for disse skjermene var omtrent identisk som for de to foregående skjermene, med noen forskjeller:

- For mikrosement ble det bare brukt $v/c = 0,7$ og tykkere masser for å unngå utganger på grunn av dagfjellsone og åpne sprekker.
- Forsiktig bruk av akselerator.

- Kjerneborhullet ble også injisert. Dette var plassert rett under sålen i kloakktunnelen, og det var derfor viktig å fylle hele hullet opp med injeksjonsmasse. Det ble benyttet tykk masse og lavt sluttrykk.

De siste skjermene som ble injisert i forbindelse med kryssingen av kloakktunnelen, 11-5147 og 12-5143, ble bare injisert i øvre del av stuff med mikrosement/akselerator. Det ble besluttet ikke å injisere den nedre del av stuff på grunn av lite vann og 4 tørre sonderhull i skjermen.

Se Vedlegg C for fullstendig oversikt over injeksjonsmengder knyttet opp mot Q-verdier og vannforhold.

6.5 Resultater

I Tabell 1 presenteres en rekke nøkkeldata som skal refereres til i den videre diskusjonen av injeksjonsarbeidet utført i Knappetunnelen. Tabellen viser gjennomsnittlige Q-verdier for ulike seksjoner av tunnellopene, den samlede innlekkasjen fra samtlige skjerner i alle løp og den totale medgåtte mengden industrisement og mikrosement. Tabellen viser også hvilket løp som representerte det fremre og bakre da injeksjonsarbeidet ble utført.

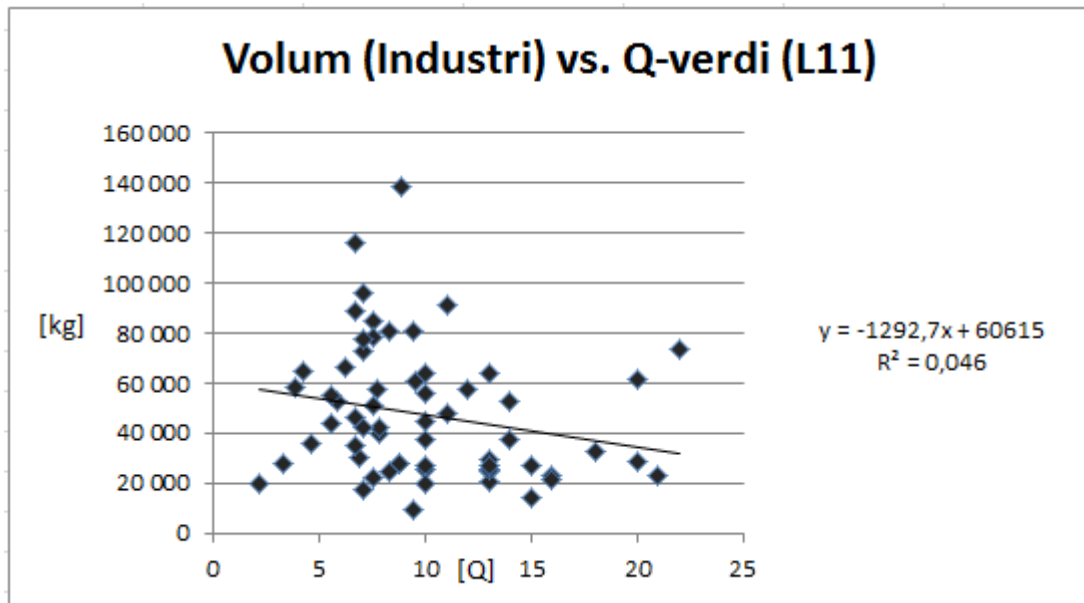
Løp	Profilnummer	Stuff	Q-verdi (Gj.snitt)	Vann (Samlet) [l]	Industri [Tonn]	Mikro [Tonn]
L-11	8467-6947	Fremre	8,9	19600	3000	830
L-12	8451-6995	Bakre	8,0	10300	2000	710
S-11-N	6191-6878	Bakre	5,3	67	900	0
S-12-N	6204-6907	Fremre	4,7	132	1400	0
S-11-S	5196-5126	Fremre	1,7	27	190	56
S-12-S	5187 -5143	Bakre	0,8	62	100	28
Samlet	4624 meter		7,2	30188	7590	1624

Tabell 1: Oversikt over samlede injeksjonsmengder, vannlekkasjer og Q-verdier for Knappetunnelen.

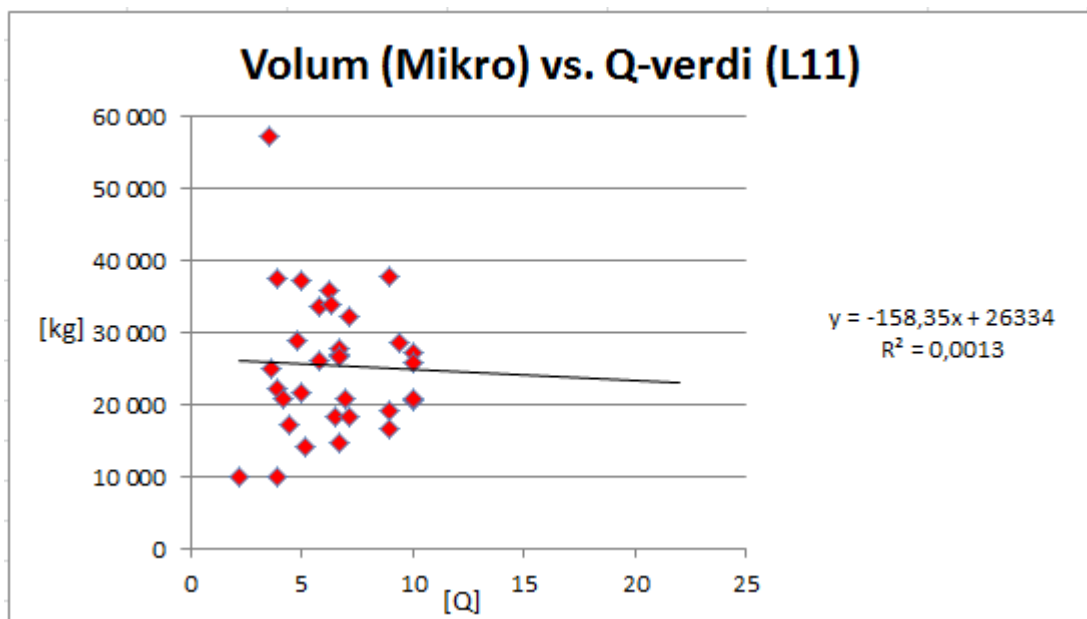
Fra de samlede verdiene ser en at 4624 meter totalt er injisert i hovedløpene. Det er forbrukt 9214 tonn med injeksjonsmasse i tettingsarbeidet. Dette tilsvarer et forbruk av injeksjonsmasse på 2000 kg/meter injisert tunnel. Gjennomsnittlig Q-verdi for de injiserte seksjonene er på 7,2. Den totale innlekkasjen målt i sonder- og skjermhull utgjør 30188 liter, der hoveddelen er vann fra Liavatn-siden. Det kommer også tydelig frem fra tabellen at det både har gått med mer masser og lekket inn mer vann etter boring i de fremre løpene under driving.

Eventuelle korrelasjoner mellom Q-verdi og medgått injeksjonsvolum blir også vurdert i denne oppgaven. Q-verdiene er beregnet av kontrolleringeniører i SVV, mens injeksjonsmengdene kan leses av fra dataloggen til injeksjonsriggen. Medgåtte volumer av mikro- og industrisement knyttet opp mot samsvarende Q-verdier vises i de påfølgende 4 plottene (Figur 39-41). Det er kun resultater fra de utførte injeksjonsarbeidene på Liavatn som presenteres i disse plottet.

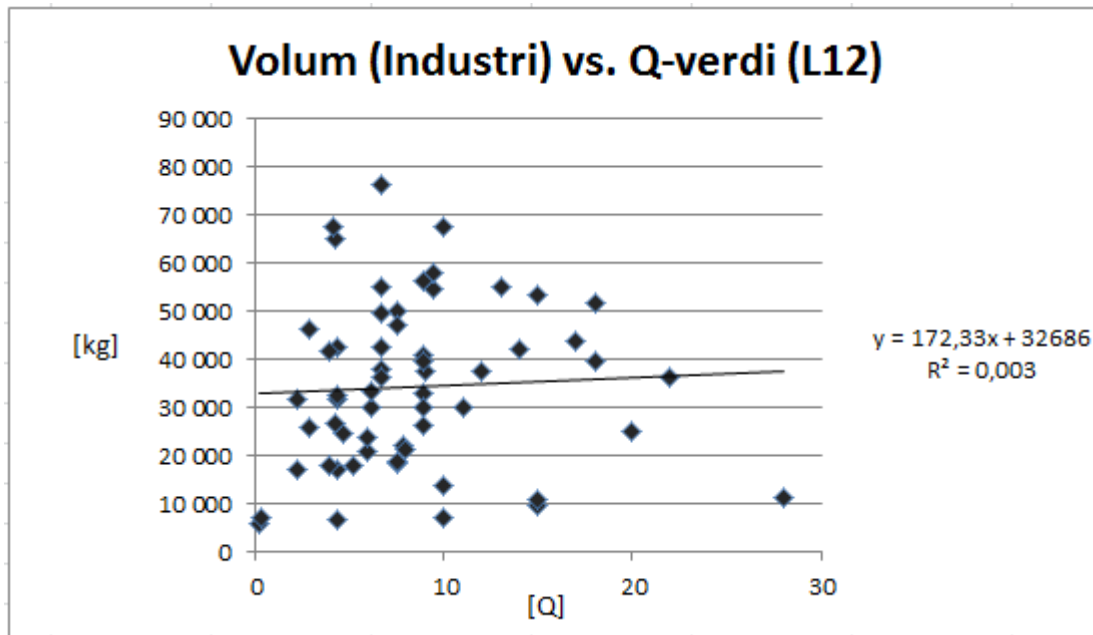
For å avgjøre i hvilken grad det finnes en målbar sammenheng mellom medgått injeksjonsvolum og Q-verdi, er det i plottet tilpasset en lineær trendlinje med tilsvarende formel, samt en determinanskoeffisient R^2 . Determinanskoeffisienten sier noe om hvor nær punktene er trendlinjen. R^2 verdier opp mot 1 indikerer at punktene ligger nær kurven. Kvadratroten av determinanskoeffisienten, R, utgjør korrelasjonsverdien. Hvis R-verdien er nær 0, vil plottet utgjøre en sky av spredte punkter. Det vil da ikke være noen lineær sammenheng mellom punktene.



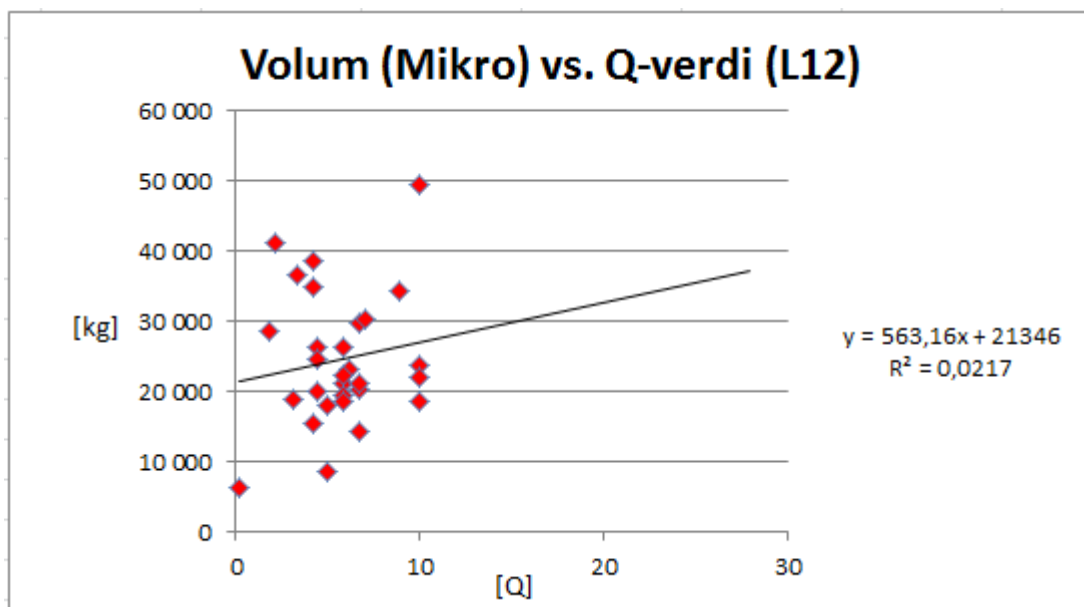
Figur 37: Ingen lineær sammenheng mellom mengde medgått industrisement og Q-verdi.



Figur 38: Ingen sammenheng for mikrosement vs. Q-verdi.



Figur 39: Ingen lineær sammenheng mellom medgått mengde industrisement og Q-verdi.

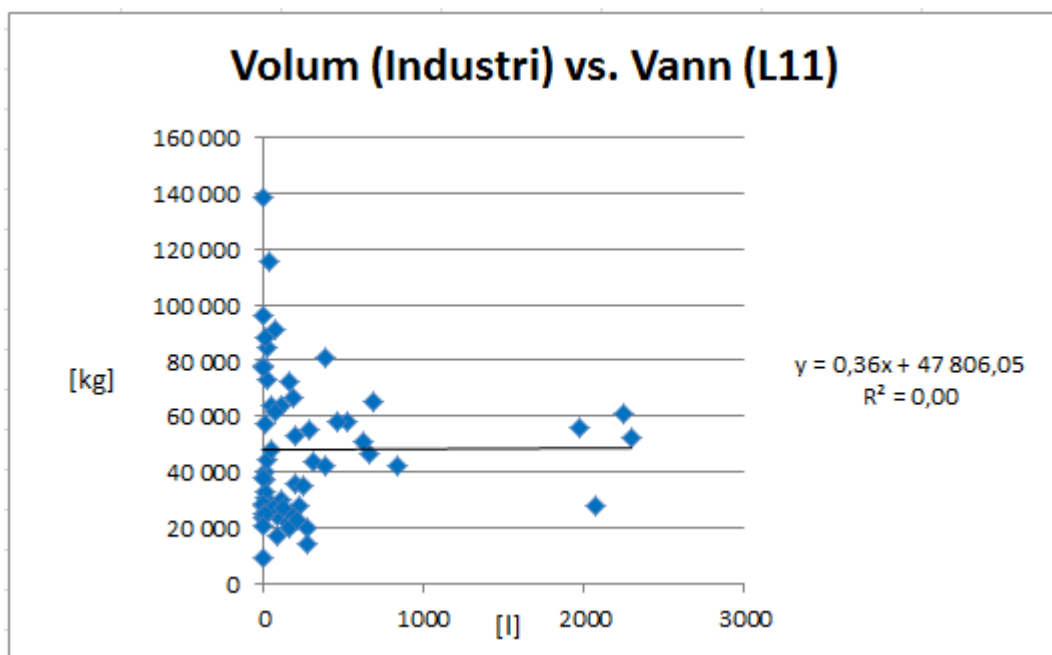


Figur 40: Ingen sammenheng for mikrosegment vs. Q-verdi.

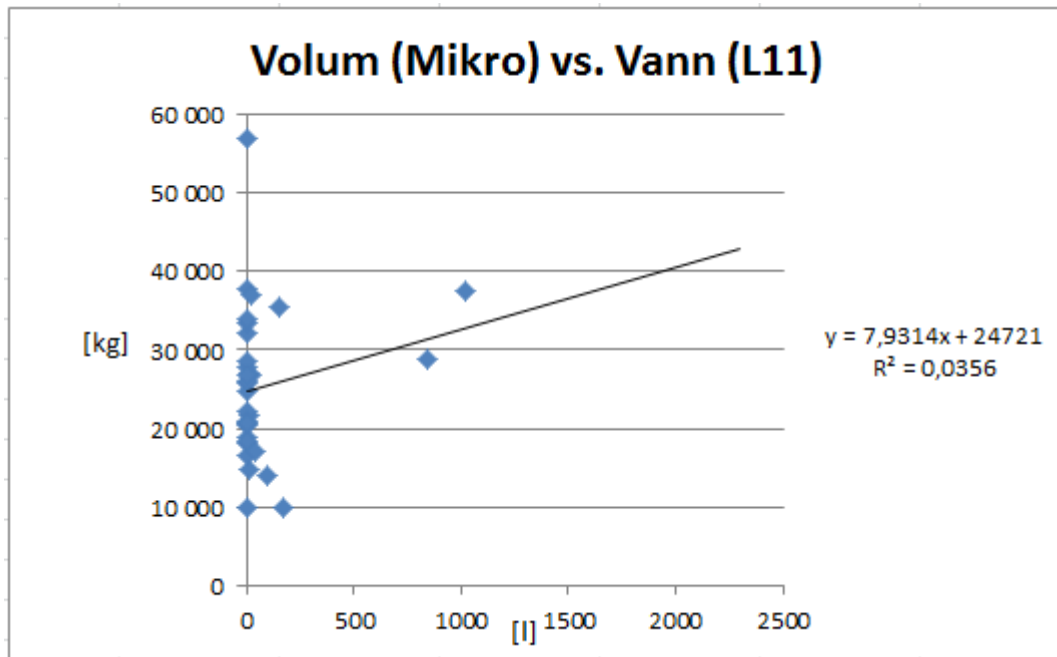
Plottene over viser at det ikke er noen lineær sammenheng mellom medgåtte masser mikro/industrisement og Q-verdi. Det betyr ikke nødvendigvis at det ikke er en sammenheng,

kun at det ikke er en lineær sammenheng. Ut ifra at punktene er så spredt i samtlige plott, virker det imidlertid som at det ikke er noen klar sammenheng.

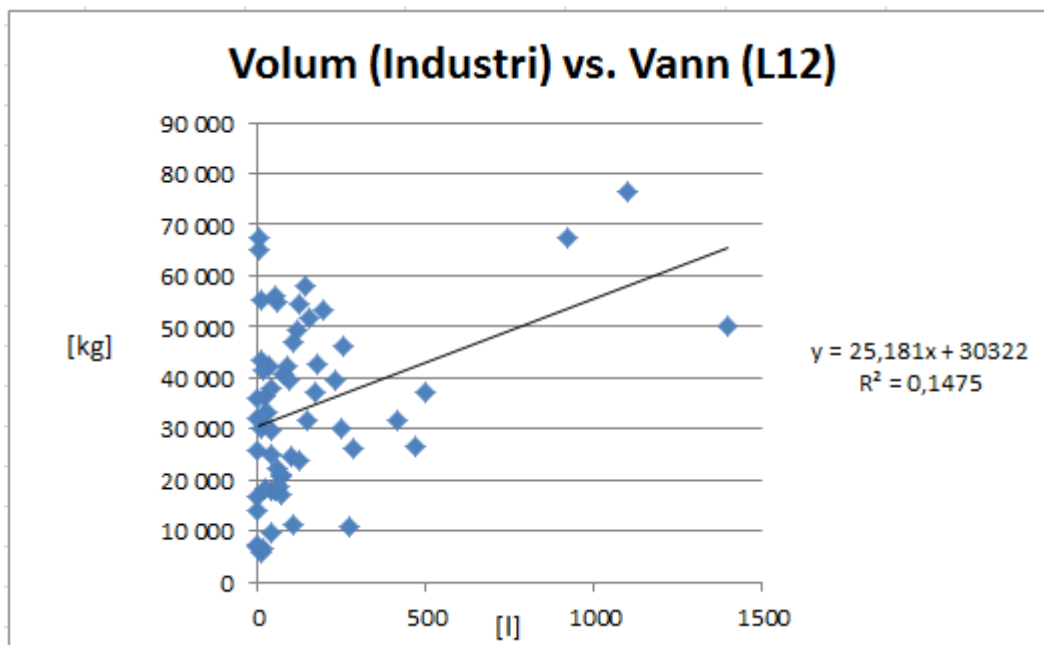
Plott for å avgjøre om det har vært en sammenheng mellom vannlekkasjer, målt i sonder- og skjermhull, og medgått injeksjonsmasse for mikro- og industrisement, har også blitt satt opp. Kun resultater fra Liavtn-siden vil bli presentert fordi vannlekkasjene på Sandeide-siden var betydelig mindre.



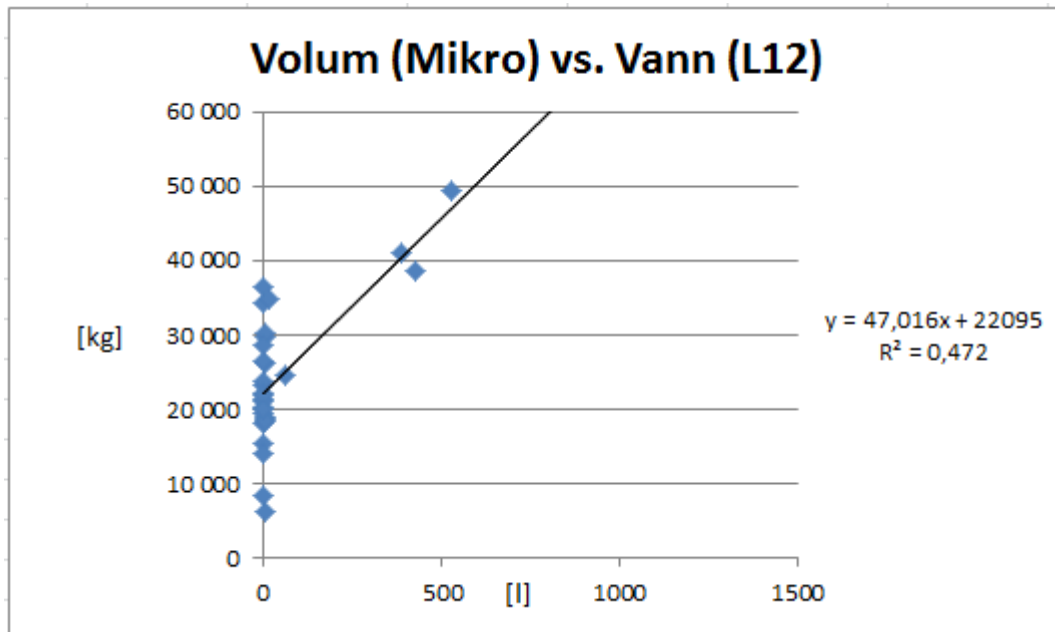
Figur 41: Ingen lineær sammenheng mellom medgått masse av industrisement knyttet opp mot vannlekkasjemålinger.



Figur 42: Ingen lineær sammenheng for mikrosegment vs. vannlekkasjer i løp 11.



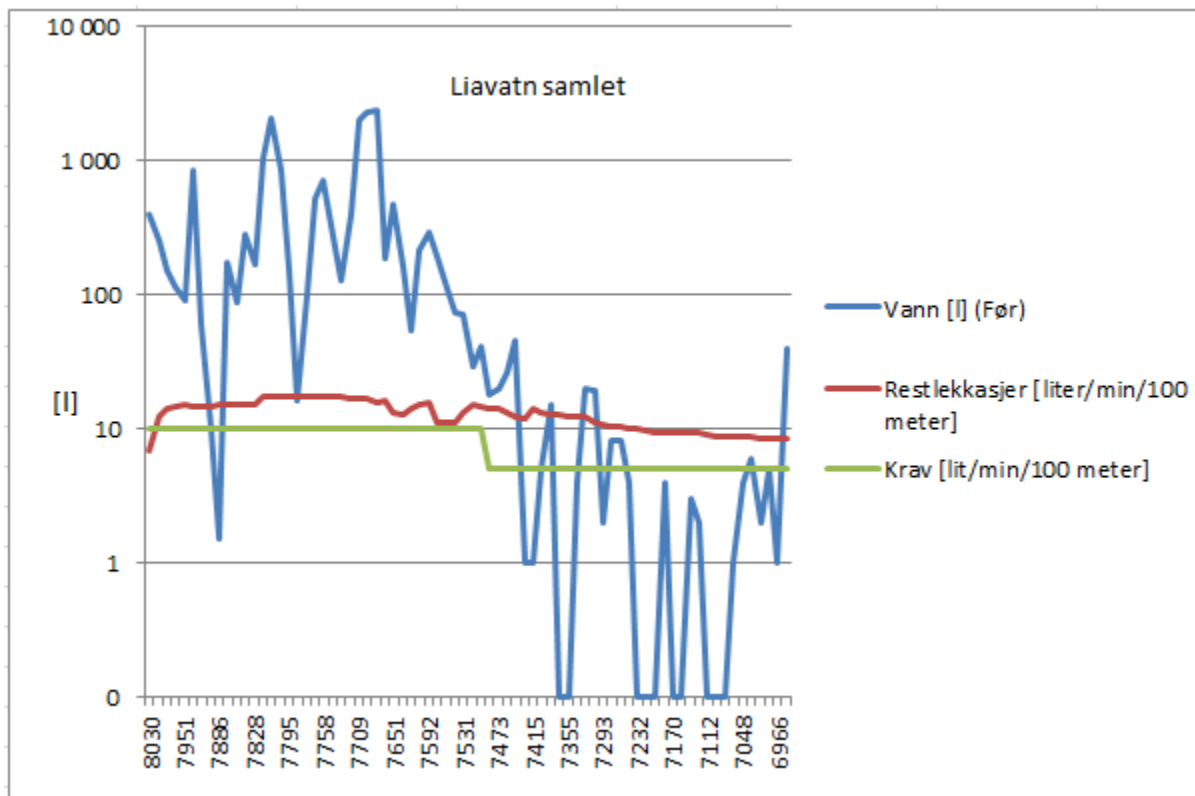
Figur 43: Ingen lineær sammenheng mellom medgått masse av industrisement, knyttet opp mot vannlekkasjemålinger.



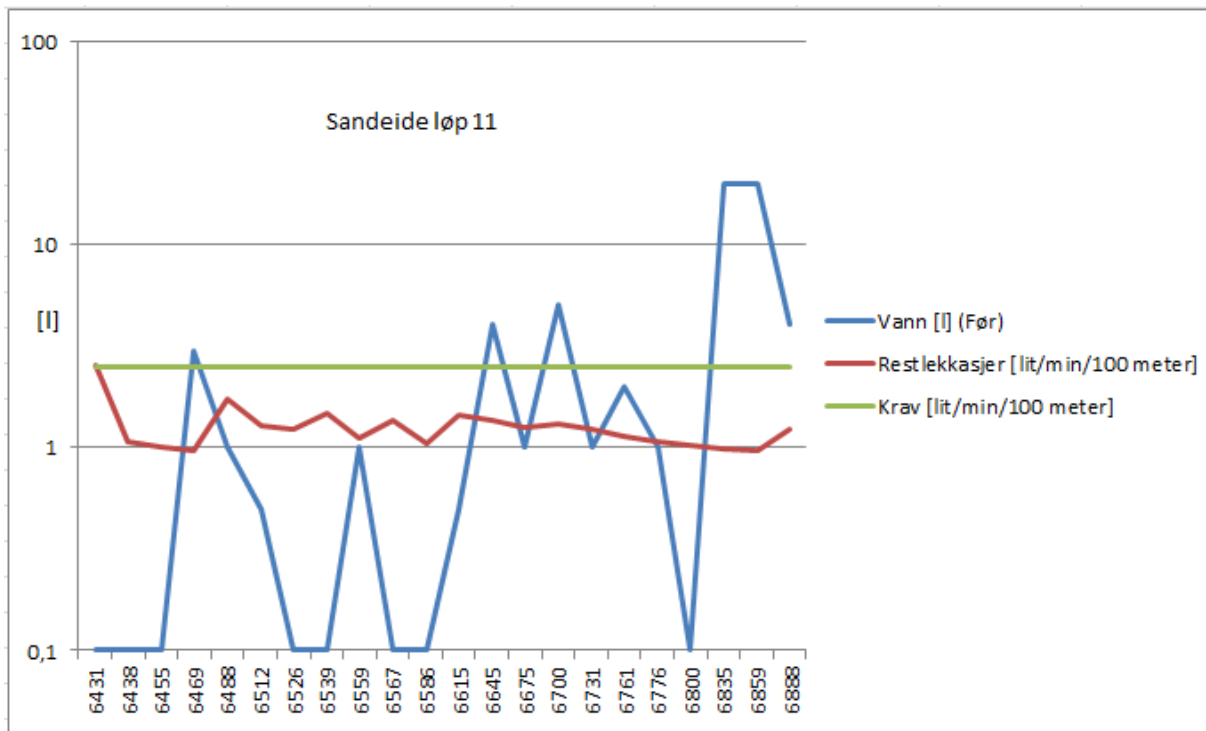
Figur 44: Lineær sammenheng mellom medgått mengde mikroement og vannlekkasjemålinger. Korrelasjonsverdien, R, er rett i underkant av 0,7.

Plottene over viser at det i liten grad er noen sammenheng mellom medgåtte mengder injeksjonsmasse og vanninnlekkasje. Unntaket synes å være Figur 44, hvor linjens R-verdi er på 0,7.

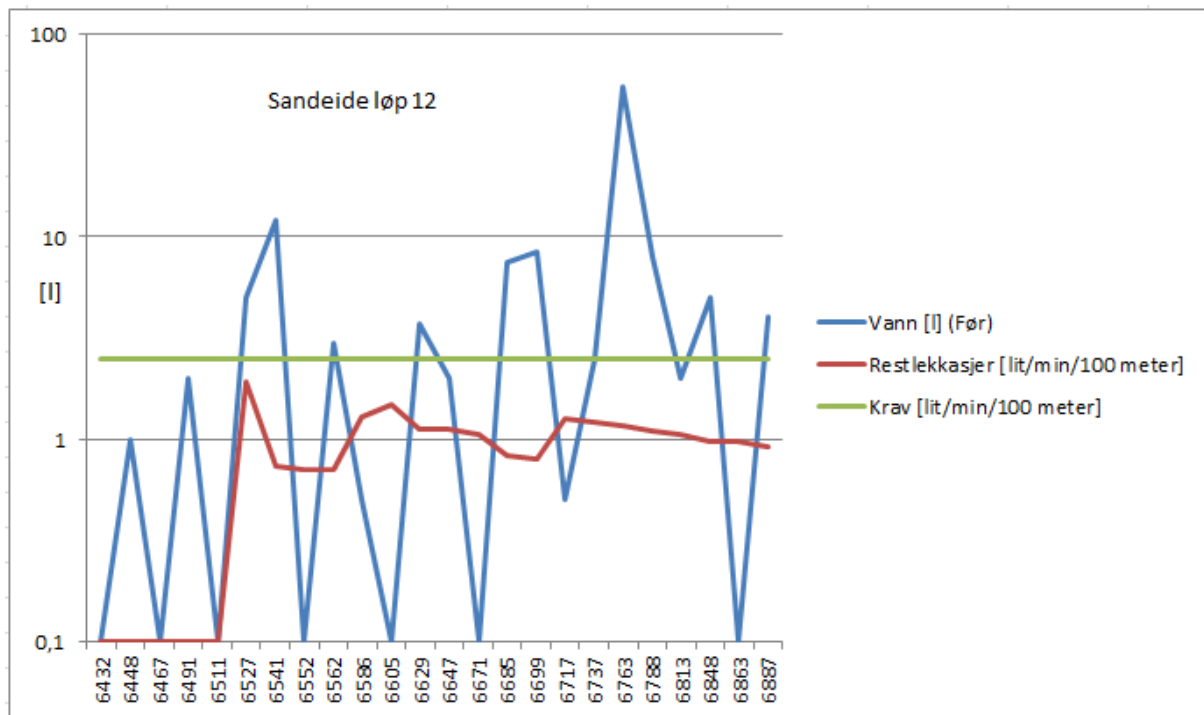
For å bestemme i hvilken grad injeksjonsarbeidet i Knappetunnelen har vært vellykket, må det blant annet sees nærmere på de reelle restlekkasjene sammenliknet med kravene til innlekkasjene. I de tre påfølgende figurene vises verdiene til restlekkasjene som er målt underveis i tunneldrivingen. Den blå linjen viser hvor mye vann [l] som har vært målt i sonder- og skjermhull før injeksjon. Den røde linjen viser hvor antall liter/minutt/100 meter restlekkasje. Restlekkasjene på Liavatn måles ved hjelp av pumper i grøfter. Vannet som er fordelt mellom høybrekket ved profilnummer 8750 og frem til der det pumpes i grøft, blir målt. Vannmålingen fra pumpen representerer et estimat på restlekkasjene. Hvis pumpen er plassert ved for eksempel profil 7592, vil alt vannet som er fordelt mellom profilene 8750-7592 bli målt [l/minutt]. Restlekkasjene på Sandeide tilsvarer vannet fordelt mellom stuff og ned til målestersklene ved profil 6200, altså her ble ikke pumper i grøft benyttet. Til slutt i figurene er også kravene til restlekkasje lagt inn slik at restlekkasjemålingene blir satt i perspektiv.



Figur 45: Restlekkasjene er målt ved pumping i grøft. Lekkasjeene er over kravet for hele Liavtn-strekket.



Figur 46: Restlekkasjene er målt ved målesterskel på 11-6200. Lekkasjeene er under de forhåndssatte kravene.



Figur 47: Restlekkasjene er målt ved målelerskel på 12-6200. Lekkasjeene er under de forhåndsatte kravene.

På figurene kan en se at kravene er overholdt på Sandeide-siden, mens de på Liavatn-siden er overgått. Det har blitt gjennomført en måling for hele løp 11 profil 8750-6200, 14. mai 2013, altså etter gjennomslag. Denne målingen viste en samlet restlekkasje på ca. 2 liter/minutt/100 meter, og dette er innenfor kravet hvis en lar denne målingen representere hele løpet under ett. Usikkerhet ved utførelse vannmålingene og tolkning av restlekkasjemålingene vil diskuteres nærmere i diskusjonsdelen.

7. Diskusjon

7.1 Innledning

Den følgende diskusjonsdelen har blitt delt inn i ulike delkapitler for å få en mer oversiktlig struktur. På grunn av injeksjonens komplekse natur må nødvendigvis diskusjonsdelen bli omfattende. Det er derfor nødvendig å dele inn i flere underkapitler. Likevel vil temaene være beslektet fordi injeksjonsprosessene er sammensatte. Flere av de samme faktorene blir omtalt i ulike delkapitler. Dette gjøres fordi de henger sammen, og er derfor vanskelig å diskutere isolert sett.

7.2 Effekt av mikrosement i forhold til industrisement

Når effekten av mikrosement og industrisement skal diskuteres og sammenlignes, vil tettingsresultatet være den faktoren som er mest interessant å se på. Andre forhold som tidsforbruk, kostnader, praktiske utfordringer etc. vil ikke diskuteres. Å sammenligne effekten av mikrosement og industrisement er en vanskelig oppgave. Ulike forutsetninger med tanke på geologi og vannforhold gir ofte dårlig sammenligningsgrunnlag. En vil heller aldri få vite sikkert hvor tett det hadde blitt om en hadde valgt det ene injeksjonsmiddelet fremfor det andre. Drømmescenariet hadde vært å sammenligne tettingseffekten av de to injeksjonsmidlene over et lengre strekk med tilsvarende forhold. Dette er derimot sjeldent tilfelle. At industrisement har blitt brukt i mye større grad enn mikrosement bidrar til at sammenligningsgrunnlaget blir enda tynnere. På Sandeide-siden er det kun brukt industrisement, med unntak av ved kryssingen av kloakktunnelen, hvor det ble satt opp en sperreskjerm med mikrosement. På Liavatn er det derimot brukt både mikrosement og industrisement, og det er mulig å sammenligne tettingsresultatet til en viss grad.

Fra pel 11-7355 og 12-7412 og frem til gjennomslag på ca. 6900 ble det stort sett kun brukt mikrosement. I dette området var det praktisk talt helt tørt etter injeksjon med mikrosement, og godt innenfor kravet om 5 liter/minutt/100 meter for begge løp samlet. Vannlekkasjemålinger utført i sonder- og skjermhull viste på forhånd at området hadde veldig

lite vann, se Vedlegg C. Det er derfor vanskelig å anta noe om hvilken rolle injeksjon med mikrosement har hatt for tettingsarbeidet. Ved tilsvarende tørre forhold har jo injeksjon med industrisement også gitt gode sluttresultater. Muligens kunne resultatet vært tilfredsstillende selv uten noen injeksjon i det hele tatt ved slike forhold.

I det våte området i og etter svakhetssone 10, 7860-7630 begge løp, er det brukt industrisement og mikrosement om hverandre. Dette området representerer det beste grunnlaget for å sammenligne tettingseffekten av de to. Vannlekkasjemålinger utført i dette området før injeksjon tydet på at det var vannførende sprekker parallelt med løpene, og det ble i starten benyttet industrisement i tettingsarbeidet. Da dette ikke ga tilfredsstillende resultater, i tillegg til at det var forventet enda våtere forhold fremover, ble det besluttet å tette med mikrosement i håp om å oppnå bedre resultater. Kartlegging og måling av innlekkasje og drypp utført juli 2012, se vedlegg B, viser at området, til tross for omfattende injeksjon med både mikro- og industrisement, ikke er tilstrekkelig tørt. Det skal allikevel nevnes at innlekkasjene i dette området har avtatt siden denne kartleggingen, og at innlekkasjeverdier i vedlegg B per dags dato er noe mindre.

Et interessant resultat er at områdene i den våte sonen som er injisert med mikrosement, ikke har blitt tørrere enn områdene som er injisert med industrisement innenfor samme seksjon. Snarere tvert i mot. Årsakene til dette kan være mange, men hovedforklaringen kan være at området hvor det ble brukt mikrosement var det våteste. Det er derfor naturlig at det også er her det er størst restlekkasje etter injeksjon. Effekten av injiseringen i forhold til industrisement kan ikke vurderes rettfærdig basert på tetteresultatet, fordi ingen andre soner med slike vannforhold har blitt injisert med industrisement. Trolig ville det ikke blitt noe tørrere med industrisement, basert på generell erfaringer med injeksjon. En annen faktor som må tas med i denne diskusjonen er injeksjonslagenes erfaring med bruk av mikrosement på dette stadiet. Kanskje hadde det vært lurt å injisere med mikrosement noen skjærmer før de våteste områdene ble påtruffet. Da ville erfaringen med bruk av mikrosement med tanke på utførelse, prosedyrer, reaksjonstid, herdetid og de ulike reseptene vært bedre. Men det er jo selvfølgelig enkelt å være etterpåklok, og det er ikke alltid lett å forutsi om vannmengdene vil være store lenger enn en skjerm i forveien.

Et viktig moment i diskusjonen om hvorvidt mengdene kunne vært begrenset, er det faktumet at det ble injisert store volum i seksjoner med lite eller intet vann, særlig på Sandeide-siden.

Kanskje burde innsatsen i større grad blitt konsentrert mot seksjoner der vanninnlekkasjene var betydelige?

7.3 To-løpsproblematikk

Det var både fordeler og ulemper ved å utføre injeksjon i en to-løps tunnel. En klar fordel var at erfaringer fra injeksjonsopplegget i det fremre løp kunne overføres til det bakre. Med minstekrav om 50 meters avstand mellom stuffene var tiden også tilstrekkelig slik at injeksjonsforløpet i det bakre løpet kunne tilpasses basert på erfaringene fra det fremre løpet. Med teoretisk 12 meter fjell mellom hvert løp måtte borplaner for fremre og bakre stuff tilpasses hverandre for å oppnå mest mulig effektiv boring. SVV var opptatt av at mesteparten av injeksjonsmassen skulle injiseres på den fremre stuffen, særlig når det gjaldt midtstabben. Dette kommer tydelig frem når en ser på mengdene som har blitt injisert i de to løpene. Det gikk med 46 % mer injeksjonsmasse i de fremre løpene for tunnelen samlet enn for de bakre løpene. Det er naturlig at det går med mer injeksjonsmasse da det ble injisert i fullstendig uninjisert berg. En annen sammenheng som er observert var at det var mindre vannfylte sprekker i de bakre løpene, og derfor mindre lekkasje, både før og etter injeksjon. Totalt sett var det 47 % mindre vann før injeksjon i det bakre løpet sammenlignet med det fremre.

Et problem i forhold til at det gikk med mindre mengder i bakre løp var at det da var en viss fare for at fremdriften i det bakre løpet kunne bli for stor i forhold til fremdriften i det fremre. Dette førte til noen praktiske utfordringer for entreprenøren da det kom til å fordele personell og ressurser mest mulig effektivt. Et annet moment som måtte tas hensyn til var faren for utganger i det fremre løpet under injeksjon av det bakre. I praksis viste det seg at dette ikke utgjorde noe vesentlig problem, og det vanligste var litt drypp fra enkelte bolter i det fremre løpet under injeksjon av det bakre.

7.4 Usikkerheter ved vannlekkasjemålinger

Å ha en viss formening om hvor mye vann som er i berget er viktig når injeksjonsarbeidet skal dimensjoneres. Dette er også viktig kunnskap når injeksjonsarbeidet skal evalueres. Nøyaktige målinger av vannlekkasje blir ikke ansett som en nødvendighet fordi det som oftest holder med omtrentlige målinger. Allikevel bør en viss nøyaktighet tilstrebes fordi mange vurderinger blir gjort på bakgrunn av vannlekkasjemålingene. Spesielt valg av injeksjonsmiddel, prosedyrer og skjermdesign blir gjort på bakgrunn av disse målingene. Vannlekkasjemålingene gjort ved Knappetunnelen bærer preg av unøyaktighet på enkelte områder. Det samme kan også sies om restlekkasjemålingene som ble gjort etter utført injeksjon.

7.4.1 *Innlekkasjemålinger på stuff*

Usikkerhetsmomentene i vannlekkasjemålingene utgjøres i hovedsak av forhold som har med utførelsen av disse å gjøre. Målinger gjort i sonderhull var de mest nøyaktige, selv om vannlekkasjemålingene ble basert på øyemål. I tvilstilfeller ble det satt inn en åpen pakke og målt nøyaktig med bøtte og stoppeklokke. Ved store vannmengder ble botten fylt såpass fort opp at det ble vanskelig å vurdere vannmengden. En viktig usikkerhetsfaktor ved måling av innlekkasje hullvis er at det samme vannførende sprekkesystemet kan bidra til vannlekkasje i flere hull. Dette vil gi en kunstig høy måleverdi i disse hullene.

Da vannmengdene skulle bestemmes i skjermhullene ble tilsvarende metode som for sonderhullene benyttet. Usikkerheten i disse målingene skriver seg fra tidspunktet de blir gjort på. Da det er vanskelig å få gjort nøyaktige vannmålinger, vil naturligvis den totale vannmengden per skjerm være unøyaktig. Generelt ble målingene utført da hele skjermen var ferdigboret, men ofte var målingene basert på øyemål og gjort underveis i boringen. Vannet 'flytter seg' etter hvert som det bores, og hull som står oppført med store lekkasjer kan være tørre når skjermen er ferdigboret. Dette fører også til at inntrykket av mengden vann i berget er større enn det i realiteten er. Vannanslaget blir dermed konservativt. Et annet usikkerhetsmoment ved vannmålinger i sonder- og skjermhull er at det brukes vann i

boringsprosessen. Vannet brukes for å skylle ut bergfragmenter. Dette vil kunne spille inn på målingene og i teorien gi noe høyere verdier.

En faktor som kompliserte vannlekkasjemålingene i Knappetunnelen er sprekkeretningen til hovedsprekkene. De vannførende sprekkene gikk også ofte parallelt. Dette førte til at det ble vanskelig å treffe på sprekkesystemene, med mindre stikningen ble tilpasset i sonder- og skjermhull. Da kunne flest mulig vannførende sprekker bli krysset under målingene.

7.4.2 Restlekkasjemålinger

Det ble utført kontinuerlige restlekkasjemålinger i grøfter og på terskler. Disse målingene er viktige fordi de forteller noe om hvor vellykket injeksjonsarbeidene over lengre strekk har vært. Resultatene fra disse målingene gir en indikasjon på om restlekkasjene er under de forhåndssatte kravene. NFF anbefaler at det bør være terskler hver 100-200 meter i tunnelen, og at det gjøres daglige målinger.

I Knappetunnelen var det etablert langt færre måleterskler enn det som var anbefalt av NFF. Det var etablert bare én måleterskel i hvert løp, på 11/12-6200. Dette har ført til at det var vanskelig å lokalisere lekkasjepunktene i tunnelene, og vurdere om kravene ble oversteget lokalt. I tillegg til målinger i terskler ble det utført målinger fra pumper i grøfter. Dette gir også et inntrykk av hvor mye som lekker inn til tunnelen, men målingene vil ikke være like nøyaktige som målingene utført på tersklene. Fra resultatene fra målingene tatt ukentlig, kan en se at kravene ikke ble holdt under drivingen på Liavatn-siden. Målingene, som har blitt tatt ukentlig, viser at restlekkasjene har vært 3-5 liter/minutt/100 meter over kravene. På Sandeide, hvor målingene har blitt gjort på måleterskelen ved pel 6200, viser resultatene at restlekkasjene er under kravet. Etter gjennomslag har ble det utført en måling ved pel 6200 i løp 11 for området mellom høybrekket på 8750 og 6200. Denne siste målingen viste bare 50 liter/minutt restlekkasje for strekket 8750-6200. Dette gir 2 liter/minutt/100 meter, noe som altså er godt innenfor kravene. Dette tallet virker veldig lavt sammenlignet med målinger utført under driving av tunnelen. Uansett har det vært en klar trend at restlekkasjene har avtatt over tid og at tunnelen har blitt tørrere.

I kontrakten var det bestemt at det skulle utføres restlekkasjemålinger på terskler hver dag. I stedet for å gjøre målinger hver dag, ble Byggherre og AF enige om å gjøre målinger hver mandag. Da ville ikke målingene bli påvirket i så stor grad av vann brukt i forbindelse med tunnelarbeidene. Vannforbrukende operasjoner fører til at estimatet blir konservativt.

7.5 Injeksjonsprosedyrer, skjermdesign og stoppkriterier

Det er naturlig å diskutere injeksjonsprosedyrer, skjermdesign og stoppkriterier sammen, fordi disse temaene henger sammen. En diskusjon rundt stoppkriterier uten å ta hensyn til injeksjonsprosedyrene eller skjermdesign er vurdert til å bli lite fornuftig. I seksjoner med liten overdekning er for eksempel sluttrykket redusert fra over 80 bar til 40-50 bar, men samtidig er hullantallet økt for å kompensere for dette trykkfallet. Mengden injeksjonsmasse som blir injisert er dermed ikke bare avhengig av stoppkriteriene, men også blant annet av skjermdesign. Samtidig vil særlig mengden med injeksjonsmiddel være avhengig av hva slags stoppkriterium som er brukt, og med de store mengdene som har blitt injisert både på Liavatnet-siden og Sandeide-siden, vil det være naturlig å vurdere stoppkriteriene i den sammenheng.

Både på Liavatnet-siden og Sandeide-siden var mengdene for store etter SVVs mening, og det kan stilles spørsmål ved om ikke blant annet stoppkriteriene burde ha vært strengere, i tillegg til endring av skjermdesign. Det betyr ikke nødvendigvis at sluttrykket bør reduseres. For eksempel ville innføring av strengere mengdebegrensninger kunne ha redusert mengden injisert masse. For å oppnå mottrykk ved et lavere maksvolum, må det nødvendigvis pumpes med tykkere masse tidligere når hullet injiseres, eventuelt kan det tilsettes mauringsmasse på et tidligere tidspunkt. Både tilsats av mauringsmiddel og akselerator burde kanskje ha blitt benyttet på et tidligere stadium i injeksjonen, ved bruk av henholdsvis industri- og mikrosement. Også mer tid satt av til hvile av hullet kunne vært et alternativ. Da ville man oppnådd mottrykk med mindre masse. Dette ville nok, på den andre siden, ha forsinket den allerede trege fremdriften ytterligere. Større overlapp og fortetting av hullene vil øke mengdene injisert injeksjonsmasse per løpemeter tunnel. Det virker likevel ikke som om det ble 'sløst' med skjerm og hull i Knappetunnelen i soner med påvist innlekkasje. Kanskje kunne injeksjonen i soner med lite eller intet vann ha vært mindre omfattende, med like gode resultater.

Hovedsprekker på langs av tunnelaksen, som dominerte store deler av tunneltraseen, ga også dårlig injiserbarhet. Forsøk med kryssende injeksjonshull ble utført for noen skjermene på Liavatnet-siden, uten at resultatene ble signifikant bedre. Kanskje burde det blitt forsøkt med slike spesialtilpassede skjermene over en lengre strekning? Når arbeidslagene må innarbeide seg nye rutiner, vil det naturligvis være en viss treghet forbundet med dette. De nye prosedyrene vil nødvendigvis ikke fungere optimalt de første skjermene. Dette er også et viktig moment som en må ha bakhodet i diskusjonen rundt prosedyrer og skjermdesign.

I det følgende blir injeksjonsprosedyrene, skjermdesignen og stoppkriteriene for de viktigste seksjonene i Knappetunnelen vurdert og diskutert.

7.5.1 Liavatnet-siden

Fra den første seksjonen (8500-8300) av var det satt mengdebegrensninger for hvert hull, men det ble prioritert å oppnå sluttrykket på 80 bar fremfor å avslutte hullene ved oppnådd maksimum (1500 liter totalt ved $v/c = 0,5$). Å prioritere å oppnå makstrykket er også poengtert i kontrakten. Dette var det som skjedde i praksis, og hullene ble avsluttet ved et makstrykk på 80-90 bar, uten mengdebegrensninger. Dette forårsaket nok de store masseinngangene på Liavatnet-siden, der så mye som 115 tonn industrisement kunne bli injisert i en enkelt skjerm. Masseinngangen i hele seksjonen fra høybrekket til ca. profil 7500 var stor (70 tonn på fremre og 50 tonn på bakre løp). Strengere mengdebegrensninger ville nok ha redusert masseinngangene, men det hadde nok ikke blitt tett nok med det skjermdesignet som ble benyttet. Det ble nok benyttet for lange og for få hull med for liten overlapp mellom skjermene. Tilsats av mauringsmiddel på et tidligere tidspunkt i injeksjonen av hvert hull for å oppnå mottrykk kunne vært en mulighet – og ikke bare kun ved utganger på stuff. Et alternativ til mengdebegrensninger kunne vært midlertidig å stanse pumpingen på et hull med stor inngang, og heller fokusere pumpingen på nabohull. For industrisement bør pumpingen i så fall starte igjen innen 1 time.

Innlekkasjemengdene var store i de første seksjonene på Liavatnet-siden, og selv med de store mengdene med industrisement som ble injisert ble ikke lekkasjekravene oppnådd umiddelbart etter avsluttet injeksjon. Selv da det ble forsøkt med mikroskjemmer og 5 meters avstand

mellom skjermene ved sone 10 (profil 7800-7775), var ikke restlekkasjene innenfor kravet etter avsluttet injeksjon. Antall hull her var normalt 34 hull á 24m pr. skjerm, derav 6 hull i stuff. Men gitt at vannlekkasjene var store og bergmassen oppsprukket og infisert av leire, var det å forvente at denne seksjonen ville bli utfordrende. Økende leirinnhold gir nedsatt konduktivitet og injiserbarhet (Kveen and Klüver 2004), og det var nok klokest å benytte mikrosegment. Økt hullantall kunne kanskje gitt bedre resultater, men da ville mengdene også ha økt dersom ikke akselerator hadde blitt tilsatt tidligere.

Fokuset på mengdebegrensninger ble økt etter hvert som overdekningen ble redusert til 30 meter, og sluttrykket endret til 60 bar (7500-6950). Her ble det stort sett benyttet mikroskjermer, med gradvis økning av mengden akselerator tilsatt, avhengig av mengden injisert. Mengdene med mikro- og industrisement var store også her. Det spørs om ikke det hadde vært fordelaktig å innføre strengere mengdebegrensninger for industrisement ved å gå over til tykkere masse tidligere i injiseringen for å oppnå mottrykk. Når det gjelder skjermdesignen, synes et hullantall på 40 hull for en skjerm for T9,5 profil rimelig med den benyttede overlappingen (boring av ny skjerm hver tredje salve), tatt overdekningen i betraktning. Når det gjelder mikrosegment, kunne kanskje akseleratormengdene tilsatt blitt økt tidligere i injeksjonen av hvert hull for at herdingen skulle gå raskere og mottrykk oppnådd tidligere. Kanskje burde blandingen vært tykkere i utgangspunktet. Da kunne nok kanskje noen av utgangene i Kanadaskogen også vært unngått.

7.5.2 *Sandeide-siden*

På Sandeide-siden var fjellet stort sett tørt, men injeksjonen ble antatt å virke positivt inn på stabiliteten på grunn av den tidvis lave overdekningen, særlig under kloakktunnelen. Samtidig ble det også her brukt store mengder injeksjonsmasse på grunn av de åpne sprekkene, særlig på Sandeide Nord. Her ble akseleratortilsatt benyttet for å forsøke å avslutte hullene dersom mengdebegrensningene ble overgått for industrisement, altså i stedet for mauringsmiddel. Da mengdene var store, virket det ikke som om dette var et avgjørende tiltak for å begrense masseinnngangene. Å oppnå mottrykk på maksimalt 80 bar der overdekningen var stor, og 40 bar der overdekningen var liten, ble prioritert fremfor å begrense masseinngangen.

I soner hvor bergmassen var svært oppsprukket ble det injisert med høyt trykk ved stor overdekning. Hadde det kjappere blitt gått over på tjukkere masse og eventuelt

mauringsmiddel, ville masseinngangen muligens blitt begrenset. Samtidig ville en oppnå at den nærmeste sonen rundt tunnelprofilen ville bli tett nok. Særlig i tilfeller med plutselig trykkfall og økt 'flow' under injiseringen, kunne det med fordel ha blitt tilsatt mauringsmiddel for å oppnå mottrykk. En slik reaksjon kan være et symptom på at massen farer langt avgårde. Da det var lite vann i størsteparten av Sandeide-delen av tunnelen, hadde det kanskje ikke vært nødvendig å injisere bergmassen med så høyt trykk som ble brukt. Med lavere trykk ville ikke nye sprekkesystemer blitt nådd. Den allerede oppsprukne bergmassen ville muligens ha blitt tett og stabilisert nærmest tunnelprofilen.

7.5.3 *Soner med lav overdekning og kloakktunnelen*

I områdene der det var lav overdekning under Kanadaskogen kan det diskuteres om sluttrykket var for høyt på grunn av gjentatte utganger i terrenget. På Sandeide-siden var ikke innlekkasjene særlig store heller, men bergmassen var oppsprukket. Hydraulisk jekking av berget var dermed ikke så viktig, fordi injeksjonsmassen kunne strøkke i allerede eksisterende kanalsystemer. Høyt trykk burde dermed ikke være nødvendig. Når det gjelder industrisement måtte trykket uansett være høyere enn for mikrosement, fordi friksjonen er større for denne typen injeksjonsmiddel.

At det ble startet opp systematisk injeksjon fra profil 6350 i begge løp på Sandeid-siden var nok klokt, både på grunn av sone 4, men også på grunn av minkende overdekning (35 meter på det laveste). Hus på løsmasser ved Hesjaholtet er også ekstra sensitive i forhold til en eventuell grunnvannssenkning. Kloakktunnelen og sone 3 representerte seksjoner der overdekningen var meget lav, bare 5 meter, med fare for setninger. Samtidig var berggrunnen svak. Et sluttrykk på 20 bar i øvre del av skjermen under sone 3 i løp 11 er det laveste sluttrykket i hele tunnelen. Et så lavt sluttrykk kan rettferdiggjøres når oppsprekningen er stor, men kan være for lavt når det blir injisert med industrisement i standardskjerner på 34 hull. Så lavt sluttrykk ble benyttet bare for én skjerm, og for de etterfølgende skjermene ble et sluttrykk på 40 bar benyttet før den systematiske injeksjonen ble avsluttet etter sone 3. Dersom mikrosement hadde blitt benyttet her, hadde faren for utganger i terrenget vært større på grunn av inntrengingsegenskapene. Terrengoverflaten var bare 20 meter over tunnelhengen.

I forbindelse med passeringen av kloakktunnelen var det viktig å tette tunnelen mot kloakklekkasje. Skjermene ble da delt i to, med mikrosegment i øvre halvdel og industrisement i nedre. At det ble valgt mikrosegment i øvre halvdel var nok klokt for å unngå farlig hydraulisk jekking, samt for å injisere de fineste sprekkene. Også bruk av litt tjukkere sement ($v/c = 0,7$) i sperreskjermen enn vanlig og forsiktig bruk av akselerator for å unngå utganger i terreng og kloakktunnel, var nok en klok prosedyre. Oppe i den oppsprukne dagsonen er det fort gjort at tynn injeksjonsmasse når opp til terrengoverflaten, og det kunne nok ha blitt pumpet med enda lavere trykk enn 40 bar. Å injisere nedre halvdel med industrisement på de skjermene der det var vannlekkasje var nok kostnadmessig gunstigere for byggherren. Selv om skjermene blir mer kompliserte ved å injisere med både mikro- og industrisement, virket det som en mer gunstig løsning enn bare å injisere med mikrosegment.

7.6 Oppfølging og rapportering

7.6.1 Oppfølging

I tillegg til injeksjonsmøtene og byggemøtene, der statusen på injeksjonen ble diskutert mellom SVV og AF, utgjorde Dagboken en viktig del av oppfølgingen av injeksjonsarbeidene. Via SVUer fikk AF mulighet til å forberede svar dersom SVV hadde noen innvendinger vedrørende utførelsen av injeksjonsarbeidet. Representantene for AF slapp da å være uforberedt på spørsmål angående detaljer vedrørende utførelse på byggemøter og injeksjonsmøter.

Kontrollingeniørene oppdaterte alltid Dagboken før skiftet var over. Dagboken var den viktigste kilden til dokumentasjonen av den daglige oppfølgingen av injeksjonsarbeidene. Eventuelle avvik fra kontrollørmeldingene, utarbeidet av anleggsgeologen, som ble kommunisert muntlig til injeksjonsbasen, ble blant annet notert her. Erfaringer og prosedyrer fra forrige skjerm ble videreført til den neste via Dagboken.

Når kontrollingeniøren startet skiftet sitt, kunne han eller hun via Dagboken få oppdatert seg på informasjon om hva som hadde blitt utført av betydning tidligere. Det er klart at for å få

fullt utbytte av en slik ordning, må alle kontrollingeniørene være flinke til å notere ned hendelser eller informasjon av betydning. Injiserte mengder og tidspunkt for når injeksjonen ble startet og avsluttet, var alltid med. Det betyr at de også må kommunisere med AFs mannskaper for å få informasjon om hva som eventuelt har skjedd av betydning, tidligere under injeksjonsrunden. Eksempler på hendelser eller informasjon som burde noteres, og som har med injeksjon å gjøre, kan for eksempel være:

- Om det er utganger på stuff eller i dagen.
- Tiltak som blir gjort ved utganger, for eksempel ekstra pakker i hullet.
- Kommunikasjon mellom hull, og om serieinjeksjon blir utført.
- Om mottrykk blir oppnådd eller eventuelt hva som blir gjort for å oppnå mottrykk (mauring, Zugol, akselerator).
- Temperaturen på injeksjonsvannet, særlig når det er kaldt.
- Antall linjer som blir benyttet under injeksjonen.
- Avvik fra prosedyrer gitt i kontrollørmelding som blir besluttet på stuff og kommunisert til injeksjonsbas.

Kontrollørmeldingene er ment som veiledende prosedyrer for hvordan injeksjonen skal utføres, men det er viktig at de beslutninger som blir tatt på stuff som fraviker den gjeldene kontrollørmeldingen, blir notert og videreformidlet til både byggherren og neste AF-skift. Endringer av prosedyrer som kommuniseres muntlig, fører lett til misforståelser eller at ikke alle får det med seg, dermed er det viktig å notere dette ned skriftlig. Viktige erfaringer må videreformidles og noteres i Dagboken, slik at disse når anleggsgeologen som utarbeider kontrollørmeldingene.

Det er en fordel at formen på hvordan Dagboken føres er noenlunde lik, uavhengig av hvem som er på skift. Hvor mye informasjon som ble notert i Dagboken varierte litt fra skift til skift. Enkelte kontrollingeniører noterte mer detaljert enn andre. At det brukes et kortfattet 'telegrafspråk' med forkortelser er ikke nødvendigvis negativt, men det må ikke bli så kortfattet at det blir vanskelig for utenforstående å tolke hva kontrollingeniøren egentlig har skrevet. Oppsummert var dagboken et nyttig verktøy for å notere hendelser (med klokkeslett)

som er av betydning for injeksjonsarbeidet. Andre nyttige erfaringer gjort i løpet av skiftet ble også notert. Dagboken var altså nyttig både i forbindelse med oppfølgingen av injeksjonsarbeidet, men den utgjorde også en del av grunnlaget for sluttdokumentasjonen.

7.6.2 *Rapportering*

Når det gjelder rapporteringen, leverte AF injeksjonsrapportene med den informasjonen som var krevd i kontrakten. Den endelige formen på injeksjonsrapportene ble ikke avgjort før etter en del 'prøving og feiling'. Men til slutt var SVV fornøyd med formen på rapporteringen. Både SVV og AF var enige i at datautskriften fra riggen var vanskelig å lese. Derfor ble de samme dataene overført til Excel-format og lagt ut på Prosjektplassen. AF la ut alle data fra vannmålingene på Prosjektplassen i Excel-format som ble oppdatert hver uke. SVV mente en stund at injeksjonsrapportene og borerapportene ble levert for sent, og det ble avtalt at injeksjonsrapportene i Excel-format skulle bli levert hver mandag og torsdag etter avtale med SVV. SVV pirket også på ukesrapportene, og mente at det ofte var feilføringer og uklarheter i forbindelse med rapporteringen av injeksjonen. For sen levering av injeksjonsrapportene og uklarheter i forbindelse med injeksjon i ukesrapportene var noe som ble tatt opp av SVV på møter mellom SVV og AF, for eksempel på byggemøter og injeksjonsmøter. Det er vanskelig for noen utenforstående og vurdere hvilke endringer som eventuelt kunne ha blitt gjort for at SVV skulle bli mer fornøyd med injeksjonsrapportene og ukesrapportene, men bedre kommunikasjon mellom AF og SVV på dette området kunne kanskje ha bedret situasjonen. Kanskje burde et standardformat på injeksjonsrapporten vært avklart mellom AF og SVV før injeksjonsarbeidet ble påbegynt. Likevel virket det som om SVV stort sett var fornøyd med hvordan AF rapporterte injeksjonsarbeidene sine.

Trykkutvikling og masseinnngang over tid skulle, ifølge kontrakten, kunne følges med på under injeksjonen på grafer på dataskjermene på injeksjonsriggen. Slike grafer ble ikke produsert før rimelig sent i injeksjonsarbeidene. Grunnen til at akkurat dette kan være interessant å se på er på grunn av muligheten for såkalte åpningstrykk, der flowen går opp og trykket ned. Dette kan være et tegn på at massen flyter veldig langt av gårde. Det kan også være et tegn på at adgang til nye sprekkesystemer nær tunnelen har blitt oppnådd, noe som er positivt. Hvilket av disse to alternativene som var aktuelt, må i så fall vurderes i hvert enkelt

tilfelle. Hvor nyttig dette systemet er, kan nok diskuteres, og det har nok ikke vært avgjørende for injeksjonsresultatene at disse grafene har manglet.

Når det gjelder MWD-data virker det som om det ikke har vært noen store problemer i forbindelse med levering av disse. Innleveringen av borehullsdata for injeksjonshullene ble utført 3 timer etter boringen. Eventuelle problemer som oppstod i forbindelse med innlevering og avlesing av MWD-dataene ble løst av AFs stikningsleder i samarbeid med en av kontrollingeniørene. Injeksjonen ble ikke i særlig grad basert på MWD-data, noe som er forståelig på grunn av tregheten i forbindelse med tolkingen av MWD-dataene. Men som en del av grunnlaget for sluttdokumentasjonen kan metoden likevel være nyttig.

Rapporteringen og bruken av tilsetningsstoffene var et tema som ble diskutert mellom AF og SVV. SVV mente spesielt at det var uklart hvordan silika ble avregnet. Også forbruket av akselerator var høyt, ifølge SVV. Det er klart at i forhold til oppgjør, må det være enighet om hvordan tilsetningsstoffene skal bli avregnet. Det så ut som om SVV og AF ble enige om en løsning på dette problemet etter hvert. I forhold til sillikaen hadde AF satt en strek med tusj på sillika-dunken for avlesning før og etter injeksjonen, slik at den totale mengden sillika benyttet kunne avleses.

7.7 Tetthetskrav i relasjon til påtruffet geologi og oppnådde resultater

På Liavatnet-siden begynte de strenge kravene på 10 liter/minutt/100 meter ved 8500. Før 8500 var det bare krav om at større punktlekkasjer skulle unngås. Etter 7500 var kravet 5 liter/minutt/100 meter for begge løp samlet. Betydelige vannlekkasjer ble ikke påtruffet før 8150 og avtok etter 7450. Dette var det eneste strekket med betydelig vannlekkasjer på stoff. På Sandeide-siden var Litla Kroatjørna, samt myrgruppen Mm1 –Mm5 på forhånd pekt ut som mulige sårbare områder i forhold til fare for drenasje. Her ble det derimot ikke påvist vann under driving av tunnelen.

Gjennom strekket 8150-7450 var overdekningen større enn gjennomsnittet, og topografien økte raskt over marin grense (kote 50 meter) (Kirkeby 2010). Grunnvannsspeilet følger ofte topografien slik at trykkehøyden øker med økende overdekning over tunnelen (Nilsen 2013). I tillegg til at trykkehøyden på grunn av overdekningen vil være stor, vil også fravær av marin leire øke infiltrasjon av overflatevann. Dette vil medføre en naturlig strømming av vann mot lavere trykkgradienter, som betyr at vannet vil strømme mot tunnelen. Dette kan være med å forklare hvorfor sonene med stor overdekning på Liavatn-siden var så våte.

Det er ikke funnet noen åpenbar sammenheng mellom graden av innlekkasje og avstanden i forhold til svakhetssonene. Sonen med stor oppsprekking og høyt leirinnhold etter svakhetszone 10, representerte sonen med størst vanninnlekkasje. Hvorfor de største lekkasjene kom etter sonen er det vanskelig å gi noen fornuftig forklaring på. Generelt er det jo erfart at forkastningssoner ofte er vannbærende på den ene siden (Kovri and Anagnostou 1995).

På forhånd var det både vanskelig å forutsi nøyaktig hvor mye vann det var i bergmassen, og hvor de største lekkasjene ville oppstå. Det var derfor ikke mulig å gi noen indikasjon på hvor den største injeksjonsinnsatsen burde legges ned basert på kunnskap om vannforholdene alene. På Sandeide-siden, der det gikk det med mye injeksjonsmasse i tørt berg på grunn av 'sultent' fjell, er det naturlig å stille spørsmål ved injeksjonsinnsatsen. Men det må understekes at injeksjonen bidro til å stabilisere bergmassen. Basert på resultatene fra de siste 100 uinjiserte meterne før gjennomslag, kan en la seg friste til å konkludere med at injeksjonsarbeidet før denne seksjonen var meningsløst med hensyn på tette-formålet. I denne seksjonen var sonderhullene tørre, og det ble derfor vurdert som unødvendig med injeksjon. Likevel ble det i etterkant observert at i dette området var sprøytbetongen fuktigere, og det smådryppet enkelte steder. Det kan tyde på at vannet har forflyttet seg over tid, og inn mot denne seksjonen. Oppsummert er injeksjonen på Sandeide-siden vellykket, men som tidligere nevnt var mengdene med injeksjonsmasse for store.

Injeksjonsresultatene på Liavatn-siden er det vanskeligere å bedømme på nåværende tidspunkt. På Figur 45 kan det tydelig sees at det var mye vannlekkasjer over store deler av seksjonen. Restlekkasjemålingene som ble gjort underveis viser at det var gjennomgående for mye innlekkasje. Målinger gjort etter gjennomslag på løp 11, viser imidlertid at lekkasjene har avtatt ganske mye i etterkant. De ferskeste målingene viste 2 liter/minutt/100 meter for strekket 6200-8750, noe som er godt innenfor kravet. Usikkerhetene ved

vannlekkasjemålingene er diskutert tidligere, og det virker som om estimatene av restlekkasjene er konservative. Likevel har det blitt utført for få restlekkasjemålinger, og arbeider som pågår i tunnelen nå hindrer etablering av flere målepunkter. Men det er nærliggende å anta at injeksjonsarbeidene er vellykkede på Liavatnet-siden, blant annet fordi det ikke er blitt bestemt å etterinjisere.

7.8 Seksjonsvis gjennomgang av utført injeksjon og analyse av mulige korrelasjoner mellom injeksjonsvolum og geologi

Som figurene 38-41 i resultatdelen viser, er det ingen målbar sammenheng mellom medgåtte injeksjonsmasser og geologi.

Som et mål på bergmassens oppsprekking og kvalitet, har Q-verdiene blitt brukt. Disse var det mest praktisk å bruke som sammenligningsgrunnlag. Det kan diskuteres om Q-verdier representerer bergmassens oppsprekkingskarakter tilfredsstillende nok. Stort sett hele den injiserte delen av tunnelen har hatt Q-verdier i bergklassen C/B, og til dels klasse D. Med andre ord har bergmassens kvalitet har vært ganske jevn, noe som har medført at det ikke kan identifiseres noen sammenheng mellom medgåtte masser og geologi. Bergmassen i området består av gneis i mer eller mindre ulike varianter. Hadde det vært større variasjoner med tanke på hovedsprekkeretning, sprekkevidde osv. i de injiserte områdene, kunne det kanskje vært en tydeligere trend i figur 38-41.

Det er heller ikke funnet noen korrelasjon mellom injeksjonsvolum og vannlekkasjemålinger. Det vil si at selv om det har vært vannførende sprekker og våte forhold, har det ikke gått med mer injeksjonsmasse i disse skjermene enn i skjerner som er injiserte i tørre forhold. Dette er kanskje litt merkelig, men underbygger bare det at det er oppsprekkningen og gneisens natur som har bestemt hvor mye injeksjonsmasse som har gått med, i tillegg til selvfølgelig stoppkriteriene og prosedyrene som har blitt benyttet.

8. Konklusjon og Anbefalinger

- Det er ikke godt nok grunnlag for å argumentere for at mikrosement har hatt bedre tettingseffekt enn industrisement ved dette prosjektet. Det måtte ha vært injisert i større grad med mikrosement i vannførende berg for at en konklusjon skal kunne trekkes. Mikrosement burde kanskje sånn sett vært brukt i større grad.
- Det går med mindre mengder injeksjonsmasse i de bakre løpene, selv med like skjermdesign og prosedyrer. Det er også betydelig mindre vann i de bakre løpene.
- Det burde vært klarere og fastere rutiner ved vannlekkasjemålinger i sonder- og skjermhull. Klare grenser for når ny skjermboring skulle utføres, basert på kontrollboringer og sonderboringer, kunne med fordel ha blitt definert.
- Flere måleterskler burde vært støpt, slik at lekkasjeområder i tunnelen kunne blitt bestemt mer nøyaktig.
- Tilsats av mauringsmasse og akselerator på et tidligere tidspunkt i injiseringen av hvert injeksjonshull, samt raskere overgang til tykkere masse, kunne ha redusert masseinngangen.
- Innsatsen burde vært fokusert på soner der vannlekkasjene var størst. Her burde de største inngangene ha blitt injisert. I tørre soner burde stoppkriteriene vært tilpasset slik at mindre masse ble injisert.
- Dagboken er et nyttig verktøy for å følge opp injeksjonsarbeidet. Erfaringer og endringer i prosedyrene gitt i kontrollørmeldingene må noteres slik at informasjonen videreføres til neste kontrollingeniør-skift og entreprenør-skift.
- Rapporteringssystemet for injeksjonsarbeidet fungerte tilfredsstillende, selv om formen på injeksjonsrapporten ikke var avklart før injeksjonsarbeidet ble påbegynt. Formen ble optimalisert etter hvert, og eventuelle uklarheter eller feilføringer ble tatt opp på for eksempel byggemøter.

- Dersom nye prosedyrer skal testes ut må arbeidslagene få tid på seg til å innarbeide nye rutiner. Eksempler på dette er boring og injisering av kryssende skjermer, men også ved endring av injeksjonsmiddel.
- Tatt i betraktning de i utgangspunktet store vannmengdene og den betydelige reduksjonen av vannlekkasjene gjennom injeksjonsarbeidet, kan det konkluderes med at injeksjonsarbeidet har vært vellykket.

Referanser

BASF (2011). Pre-Excavtion Grouting in Rock Tunneling.

BeverTeam (2002). "Planning and reporting software to support drilling jumbos." Efficient drill and blast management.

COWI (2009). Overvåkingsprogram for grunnvann i løsmasser, Ringvei vest: 59.

Erikstad, K., et al. (2003). "Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø." Statens Vegvesen.

Fagermo, J., et al. (2008). "Sikkerhet ved berginjeksjon." Teknisk Rapport 08.

Holter, K. G. (2011). "Forinjeksjon med styrt aksellerert herding av mikrosegmenter." Trafikverket (Sverige).

Hässler, L., et al. (1992). "Rheological properties of microfine cements." Tunnelling and Underground Space Technology 7(4): 311-492.

Kirkeby, T. (2010). Geologi

Ringveg Vest Bergen, 2.byggetrinn

Ingeniørgeologisk rapport til konkurransegrunnlaget, Statens Vegvesen Vegdirektoratet: 132.

Kirkeby, T. (2013). "Byggherreskolen på besøk." Statens Vegvesen.

Kovri, K. and G. Anagnostou (1995). "The ground response curve in tunneling through short fault zones." International Society for Rock Mechanics (Zürich).

Kveen, A., et al. (2010). Praktisk Berginjeksjon for Underjordsanlegg, NFF.

Kveen, A. and B. H. Klüver (2004). Berginjeksjon i Praxis. Miljø- og samfunnstjenelige tunneler: 68.

Neby, A. (2011). "Vårsleppet NBG 2011 - Injeksjon Lørentunnelen." Statens Vegvesen.

NGU (2013). Bergrunnskart over Bergensområdet.

Nilsen, B. (2013). "Samtale med Bjørn Nilsen (17/4 - 2013)."

Nilsen, B. and E. Broch (2010). "Ingeniørgeologi Berg GK-kompendium."

Pedersen, K., et al. (2010). Arbeider foran stoff og stabilitetssikring i vegtunneler.

Snilsberg, P., et al. (2003). Vurdering av vannbalanse ved tunneldriving Ringveg Vest, Bergen: 34.

Stille, H. and M. Eriksson (2005). Cementinjektering i hårt berg.

SVV (2010). Håndbok 021, Statens Vegvesen Vegdirektoratet.

Syrjänen, P. and P. Tolppanen (2003). "Hard rock tunnel grouting practice in Finland, Sweden and Norway - Literature study." Finnish tunneling association (FTA).

Vegdirektoratet, S. V. (2000). Internrapport 2151. Miljø- og Samfunnstjenlige Tunneler. B. H. Klüver. **Delprosjekt C: Tetteteknikk**: 23.

Åndal, T., et al. (2001). "Injeksjon - Erfaringer fra utførte tunnelprosjekter." Internrapport 2233 Statens Vegvesen.

Vedlegg

Vedlegg A

Kart med svakhetssoner avmerket.

Vedlegg B

NovaPoint inklusiv drypplekkasjer.

Vedlegg C

C1: Q-verdi løp 11

C2: Q-verdi løp 12

C3: Mengde vs. Q-verdi løp 11

C4: Mengde vs. Q-verdi løp 12

C5: Mengde vs. Vann (før) løp 11

C6: Mengde vs. Vann (før) løp 12

Vedlegg D

Oversikt over brønner (kart).

Vedlegg E

Boreplan krysskjern.

Vedlegg F

Tabell over svakhetssoner.

Vedlegg G

Injeksjonsresepter (tabell).

Vedlegg H

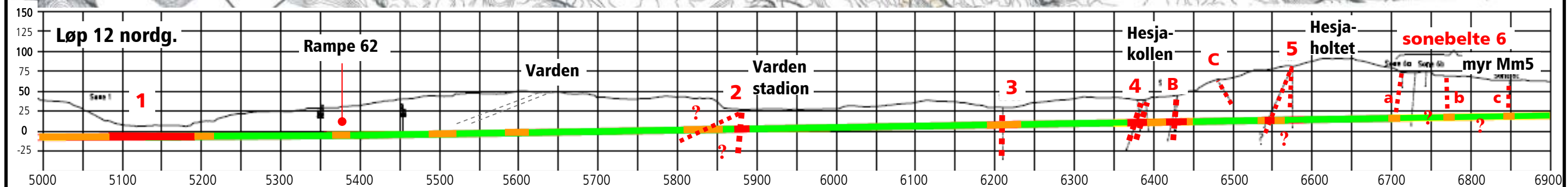
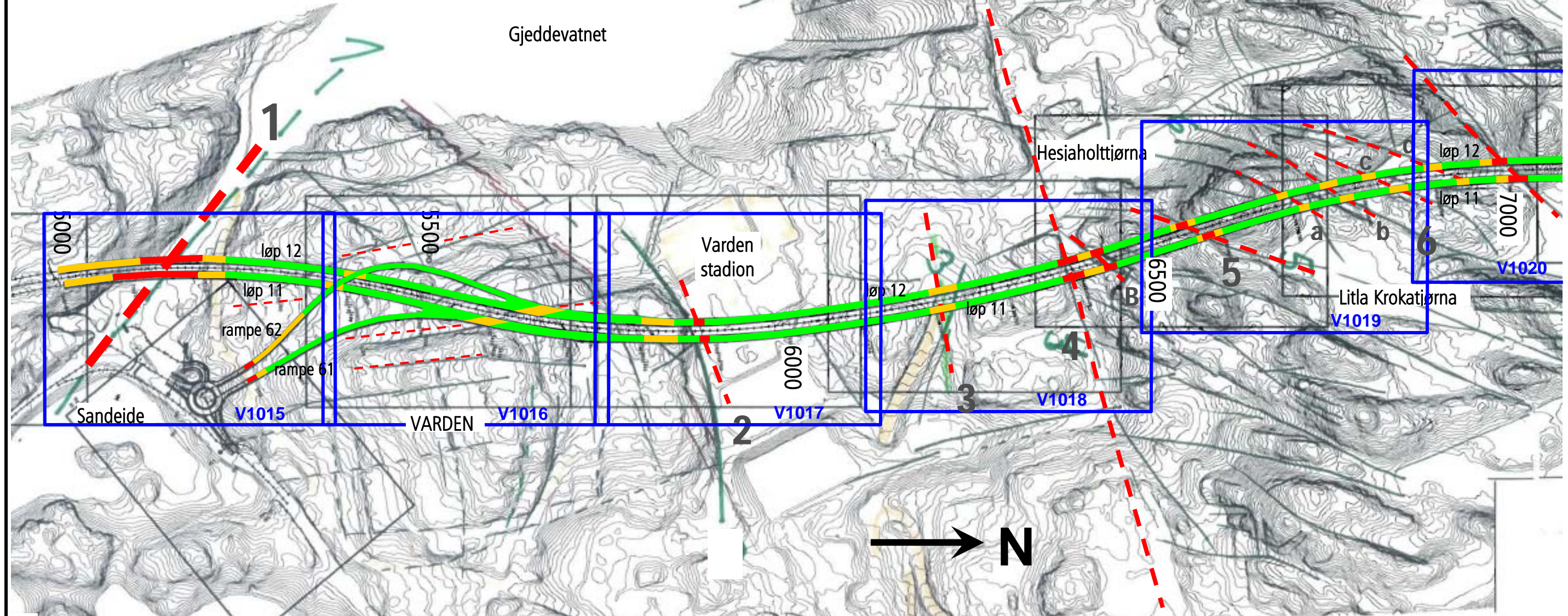
Oversikt seksjoner (vertikalprofil).

De antatt mest markerte svakhetssonene er merket med røde, stiplete linjer og tilhørende nummer.

Verken krysningssted i tunnelnivå eller bergklasse (og start/slutt bergklasse) må forstås som nøyaktig stedsangivelse (men mer som en en tolkning), begge deler vil være beheftet med en viss grad av usikkerhet.


Se ellers rapportteksten, avsnitt 7 (Tolkningsdelen).

Gjeddevatnet



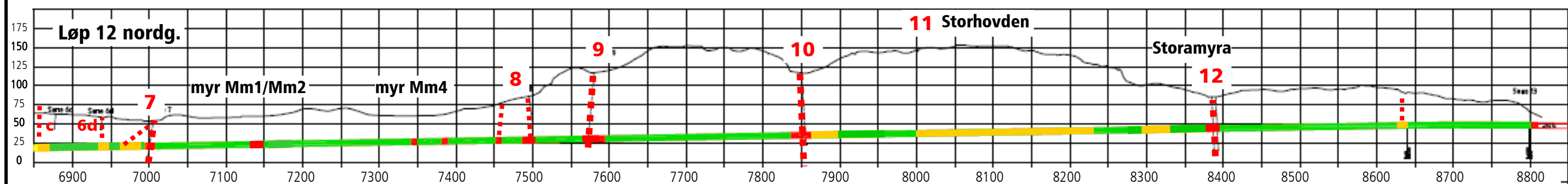
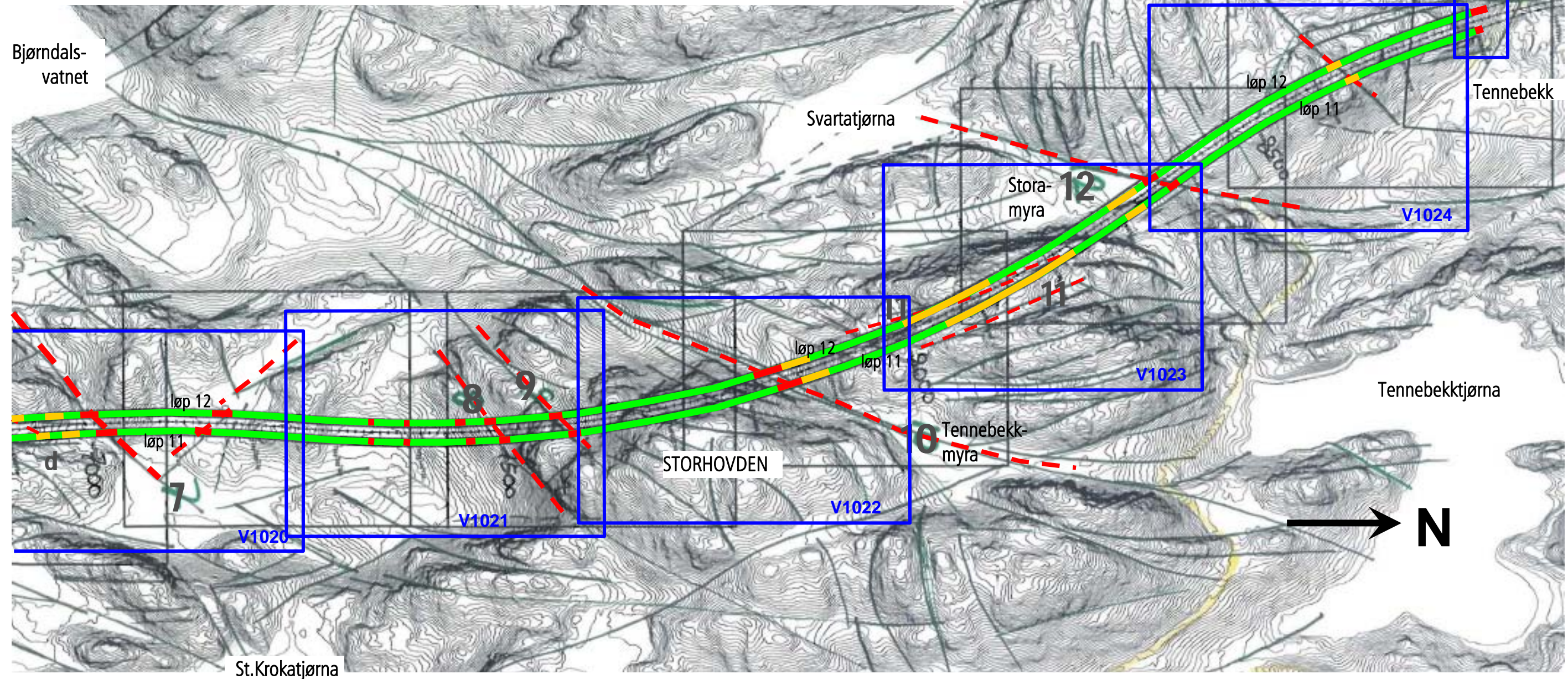
- Bergmasseklasse E/F (svært dårlig til ekstremt dårlig, Q -verdi < 1)
- Bergmasseklasse D (dårlig bergmasse, tett oppsprukket, $1 < Q < 4$)
- Bergmasseklasse B/C (god til middels bergmasse, lite til moderat oppsprukket, $Q > 4$)

Ved vurdering av bergklasse er det også tatt hensyn til overdekningen; overdekning mindre enn tunnelvernsnittet setter bergklassen lavere.

 Statens vegvesen Fv.557 Ringveg Vest Bergen, 2.byggetrinn Geologi og grunnundersøkelser Kart og lengdeprofil sørlige del, profil 5000-7000	Tegn. av: terjki	Dato: juli 2010
	Kontr:	
	Godkj./sign:	
	Saksb: Terje Kirkeby	
	Bru nr:	
Produisert av: Statens vegvesen Region vest og Vegdirektoratet	PROFnr:	
	Arkiv ref: 2010127742-001-15	
	Målestokk: 1:5500 ved A3	
	Tegn. nr.	15

Vedlegg A

De antatt mest markerte svakhetssonene er merket med røde, stiplede linjer og tilhørende nummer. Verken krysningssted i tunnelnivå eller bergklasse (og start/slutt bergklasse) må forstås som nøyaktig stedsangivelse (men mer som en tolkning), begge deler vil være beheftet med en viss grad av usikkerhet. Se ellers rapportteksten, avsnitt 7 (Tolkningsdelen).



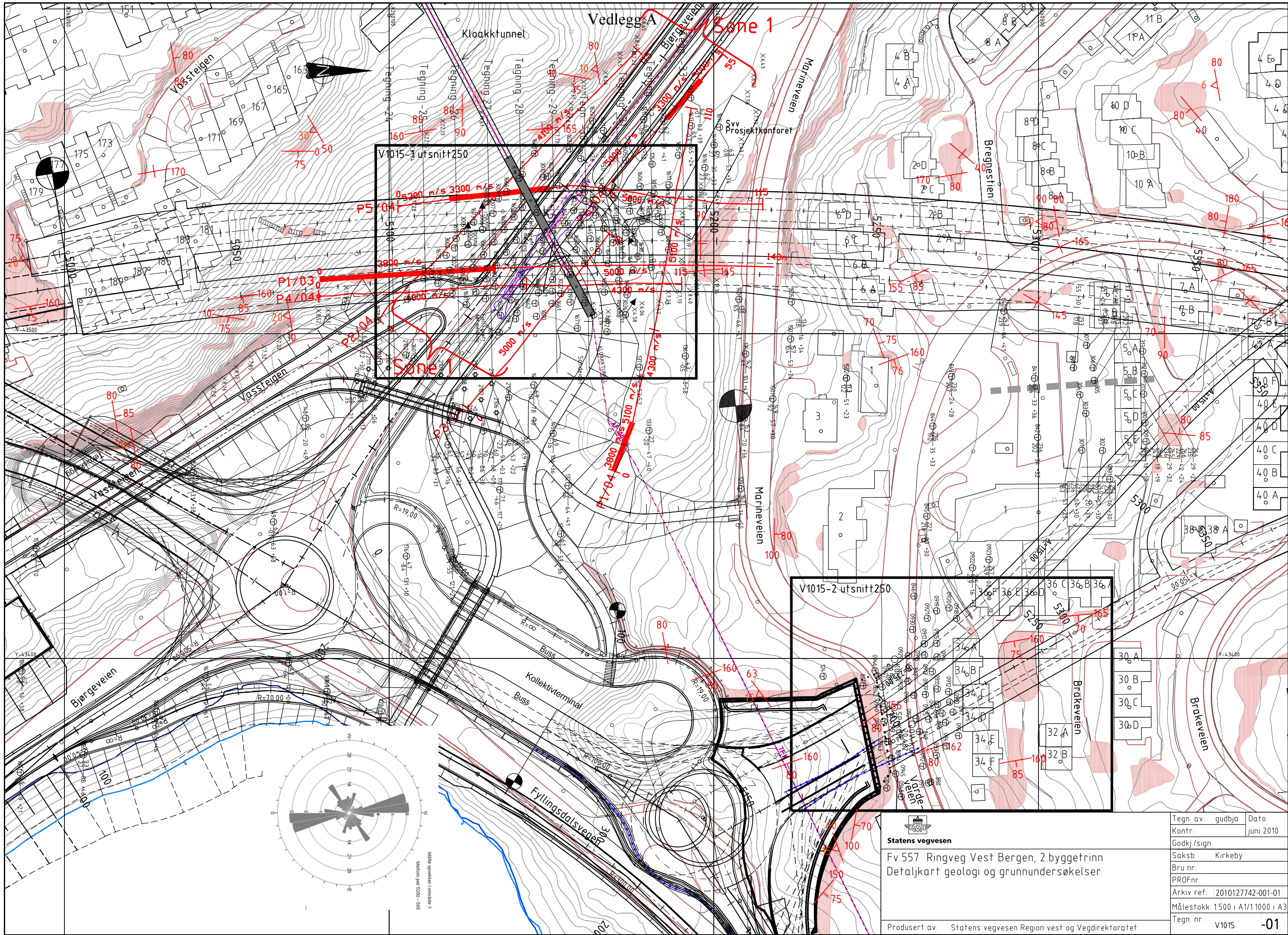
- Bergmasseklasse E/F (svært dårlig til ekstremt dårlig, Q -verdi < 1)
- Bergmasseklasse D (dårlig bergmasse, tett oppsprukket, $1 < Q < 4$)
- Bergmasseklasse B/C (god til middels bergmasse, lite til moderat oppsprukket, $Q > 4$)


Ved vurdering av bergklasse er det også tatt hensyn til overdekningen; overdekning mindre enn tunnelvernsnittet setter bergklassen lavere.

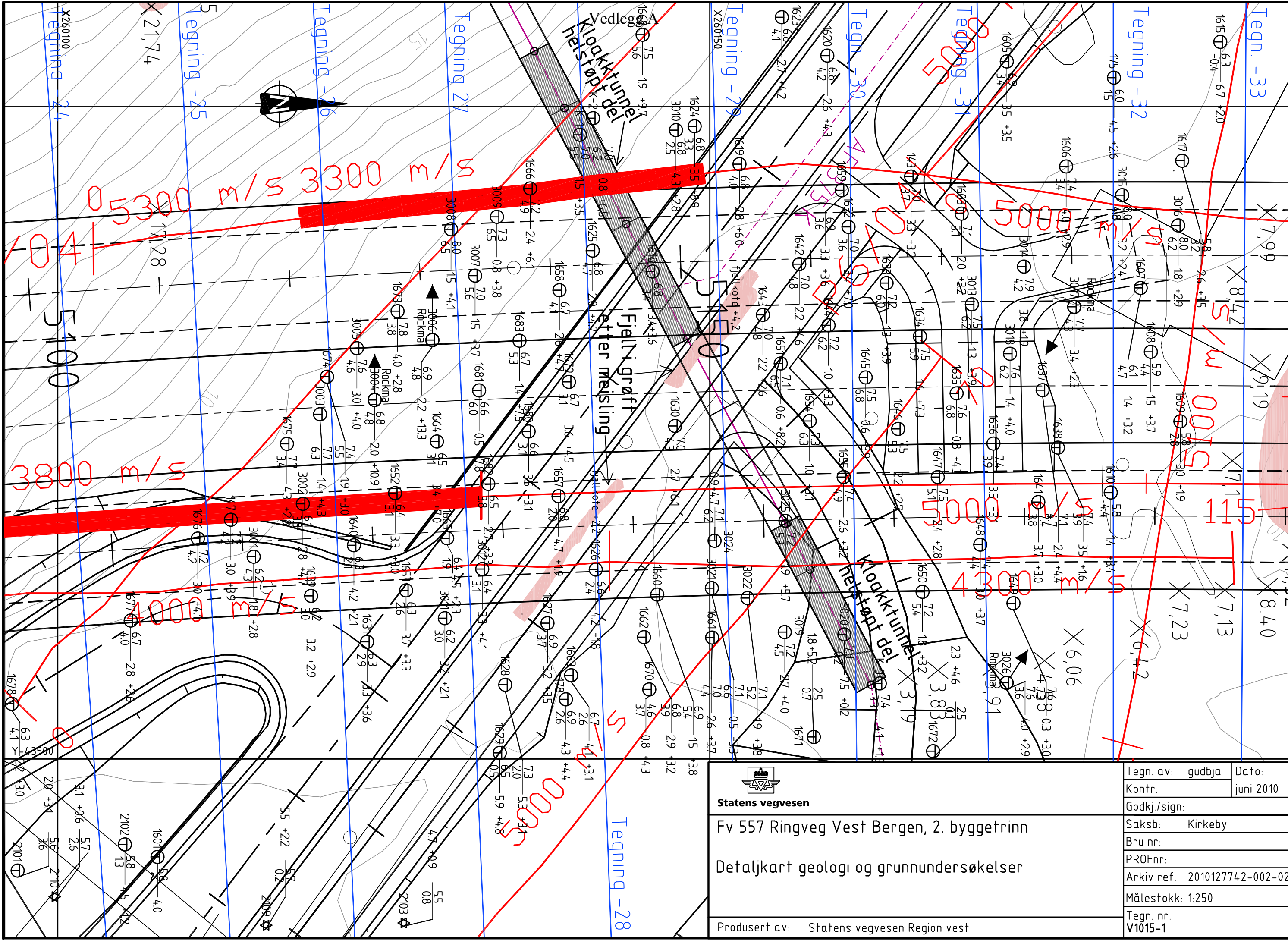
Fv.557 Ringveg Vest Bergen, 2.byggetrinn
Geologi og grunnundersøkelser
Kart og lengdeprofil nordlige del, profil 7000-8800


Produsert av: Statens vegvesen Region vest og Vegdirektoratet

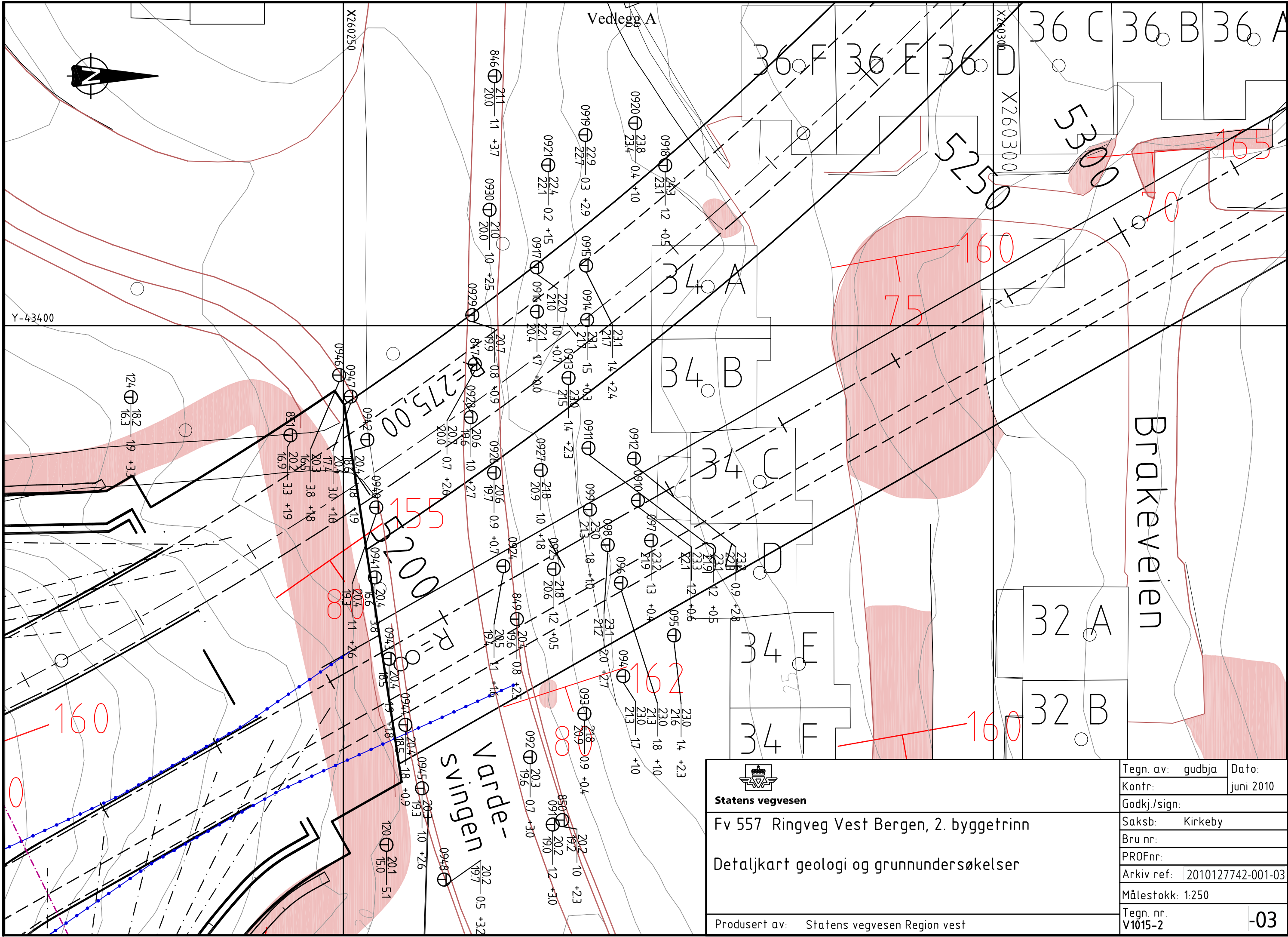
Tegn. av: terjki	Dato: juli 2010
Kontr:	
Godkj./sign:	
Saksb: Kirkeby	
Bru nr:	
PROFnr:	
Arkiv ref: 2010127742-001-16	
Målestokk: 1:5000 ved A3	
Tegn. nr. 16	




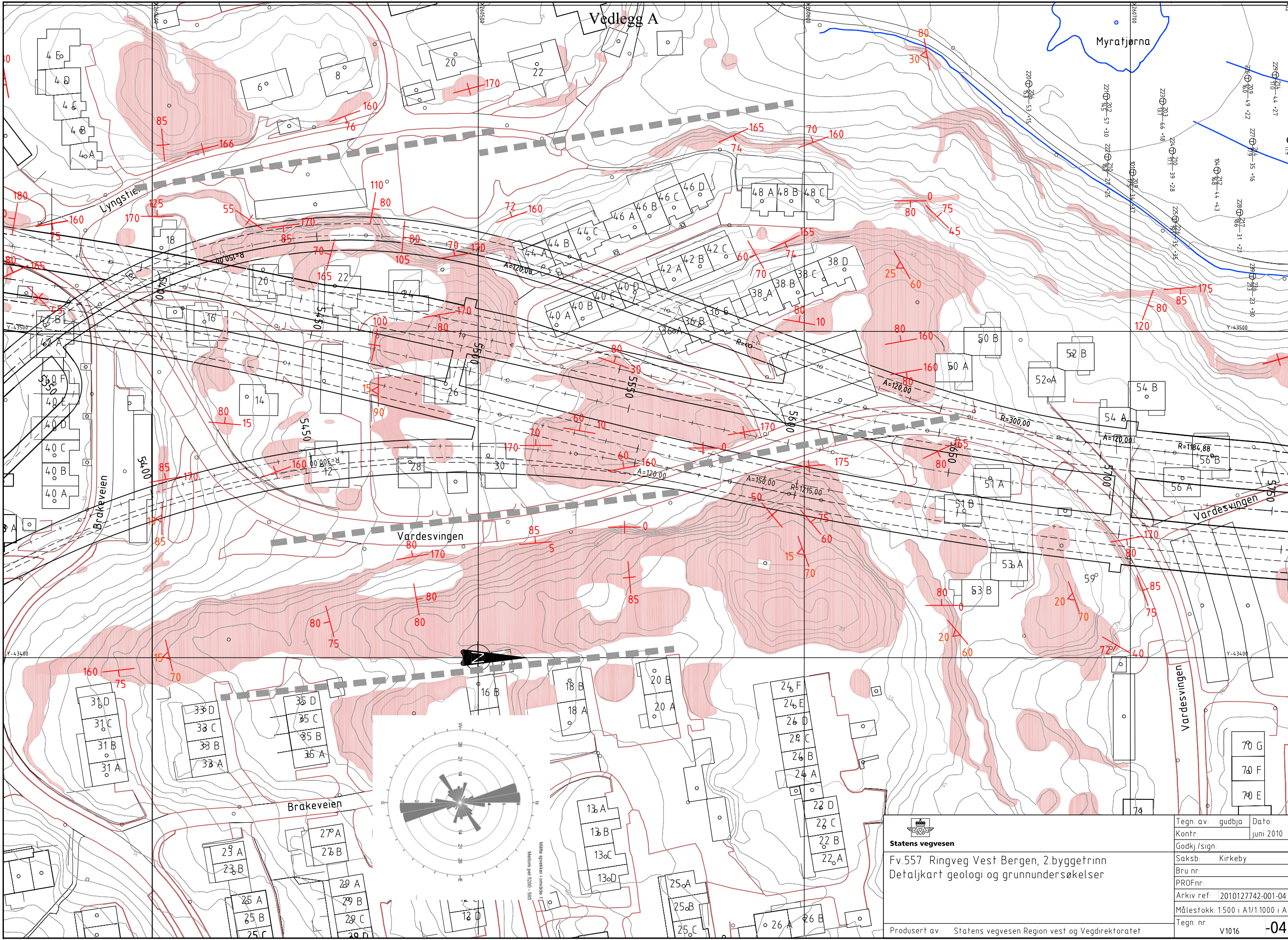
 Statens vegvesen Fv.557 Ringveg Vest Bergen, 2.bygge­trinn Detalj­kart geologi og grunnundersøkelser	Tegn. av:	gudbja	Dato:	juni 2010		
	Kontr:					
	Godkj./sign:					
	Saksb:	Kirkeby				
	Bru nr:					
	PROFnr:					
	Arkiv ref:	2010127742-001-01				
	Målestokk:	1:500 i A1/1:1000 i A3				
Produsert av:	Statens vegvesen Region vest og Vegdirektoratet			Tegn. nr.	V1015	-01



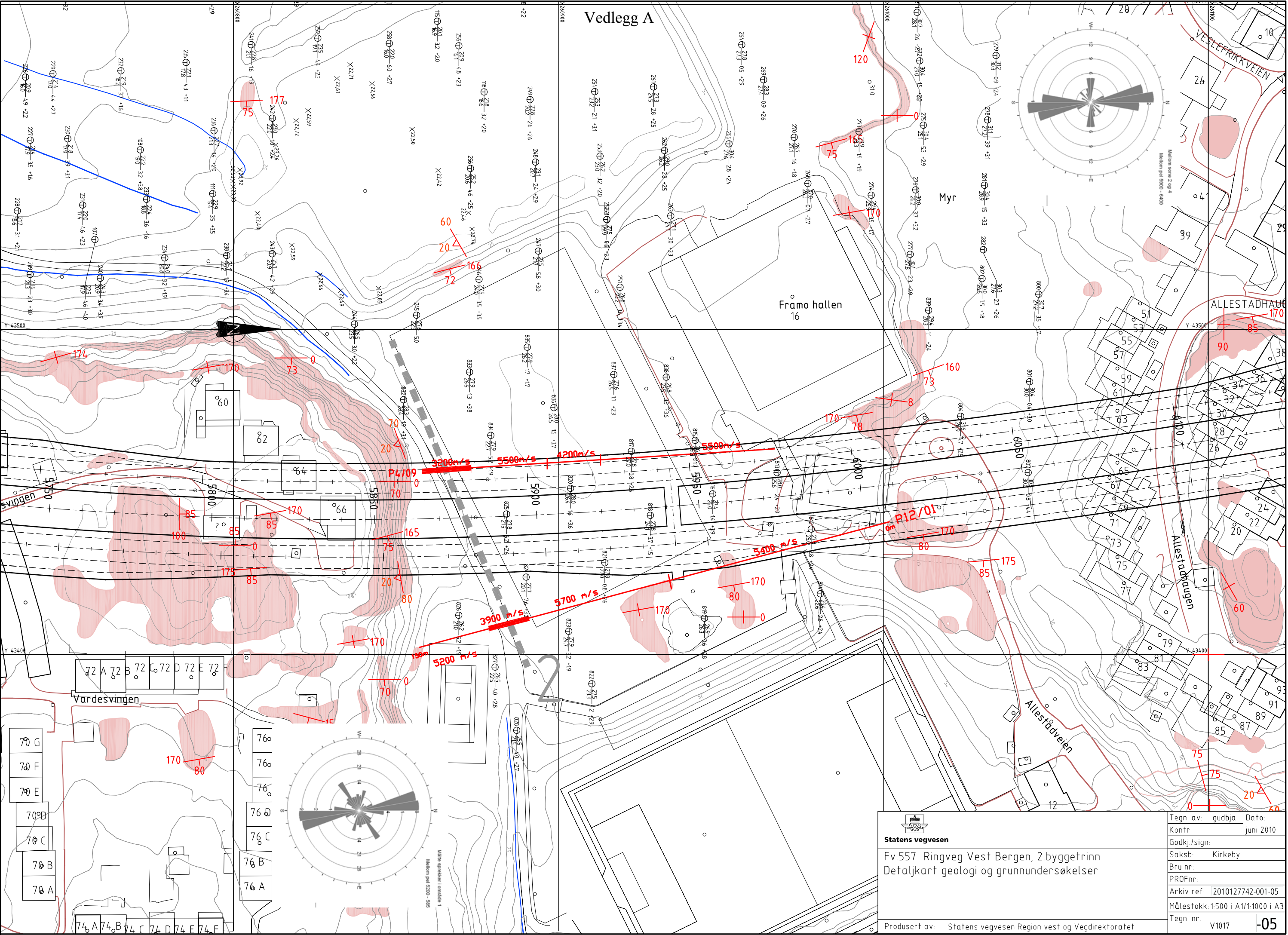
 Statens vegvesen	Tegn. av: gudbja		Dato:
	Kontr:		juni 2010
	Godkj./sign:		
Fv 557 Ringveg Vest Bergen, 2. byggetrinn Detaljkart geologi og grunnundersøkelser	Saksb: Kirkeby		
	Bru nr:		
	PROFnr:		
	Arkiv ref: 2010127742-002-02		
	Målestokk: 1:250		
Produsert av: Statens vegvesen Region vest	Tegn. nr. V1015-1		




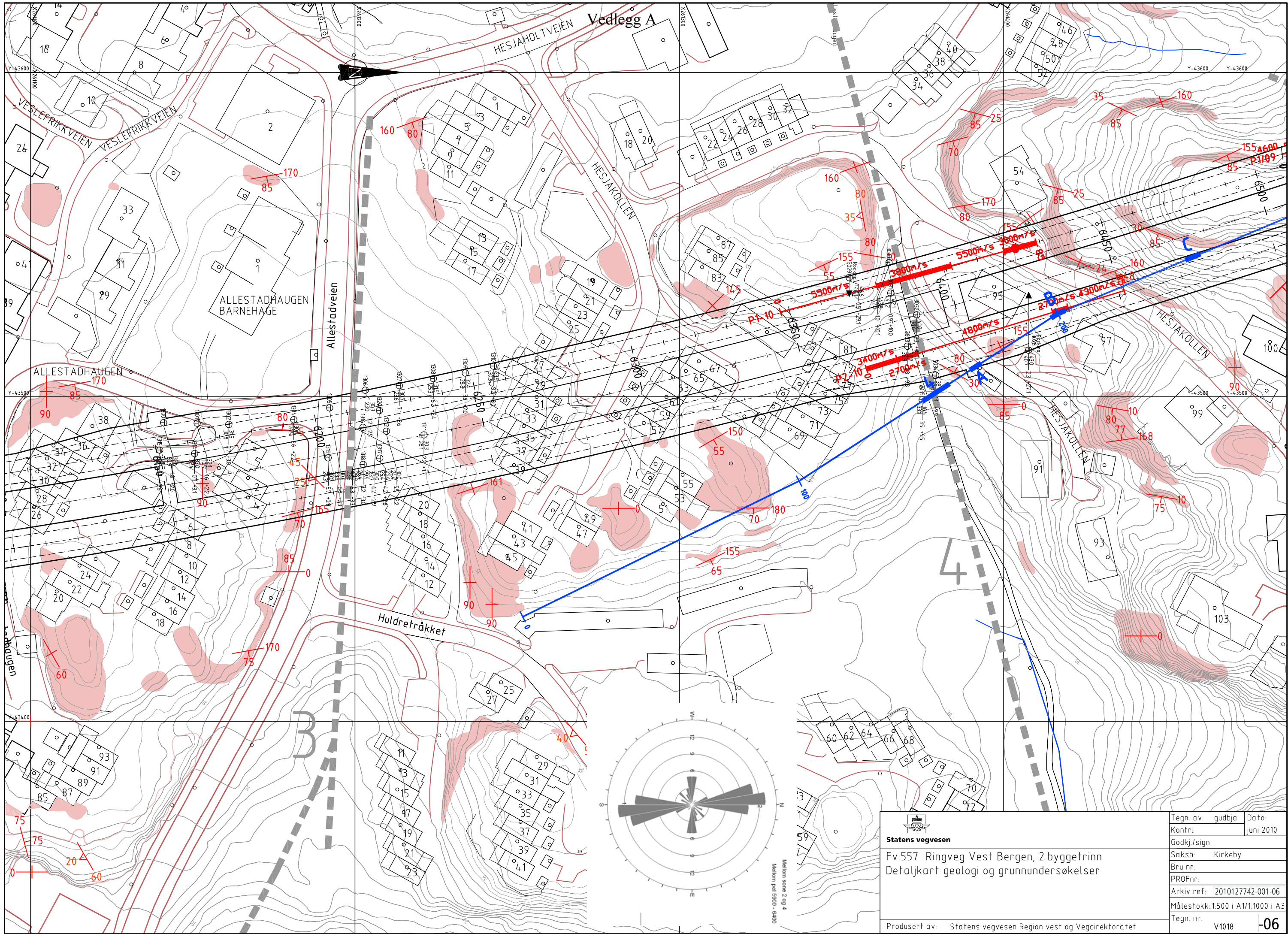
 Statens vegvesen Fv 557 Ringveg Vest Bergen, 2. byggetrinn Detaljkart geologi og grunnundersøkelser Produsert av: Statens vegvesen Region vest	Tegn. av: gudbja	Dato: juni 2010
	Kontr:	
	Godkj./sign:	
	Saksb: Kirkeby	
	Bru nr:	
	PROFnr:	
	Arkiv ref: 2010127742-001-03	
	Målestokk: 1:250	
	Tegn. nr. V1015-2	-03



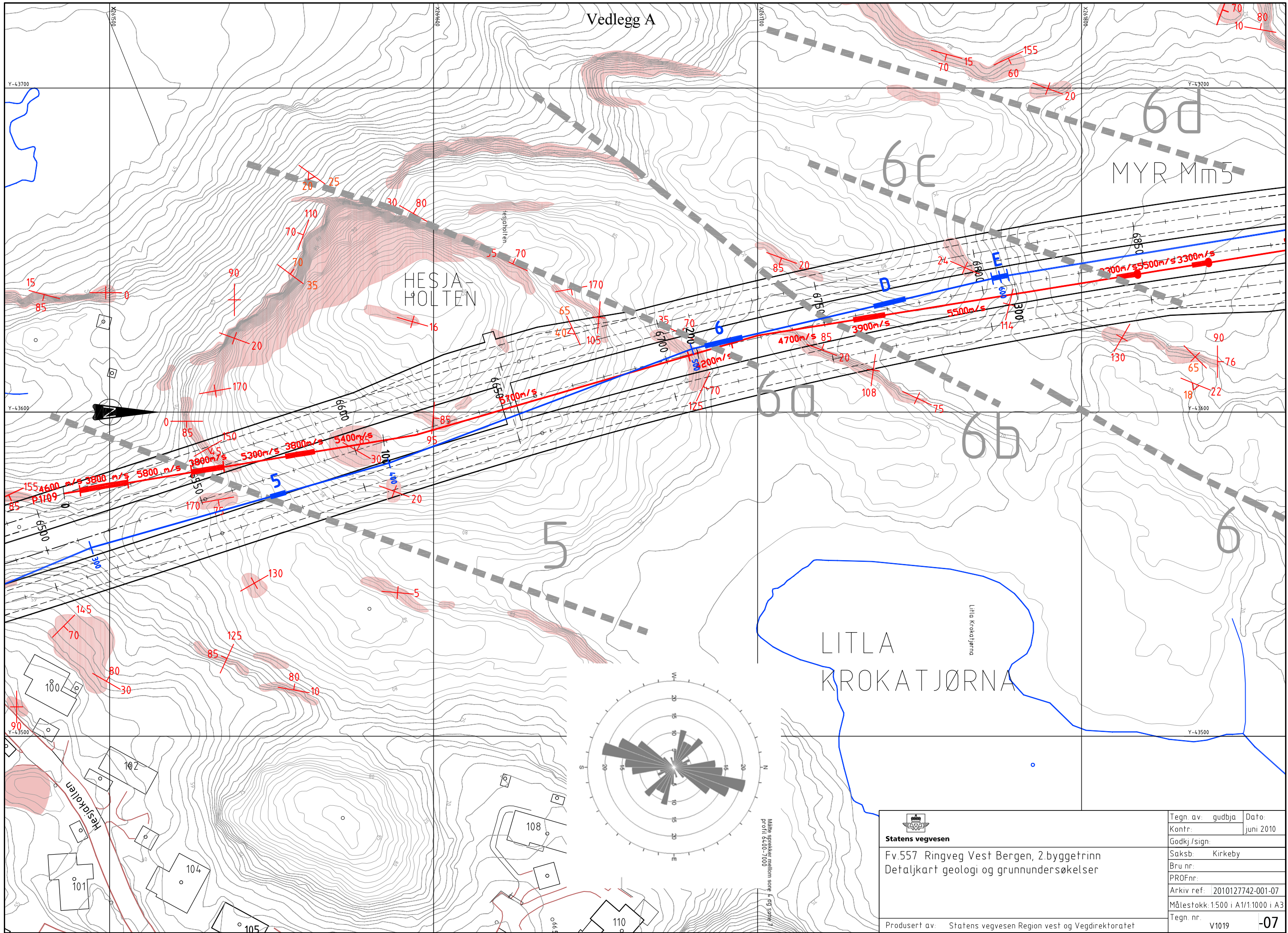
Statens vegvesen		Tegn. av: gudbja	Dato: juni 2010
Kontr:		Godkj./sign:	
Fv.557 Ringveg Vest Bergen, 2. byggetrinn		Saksb: Kirkeby	
Detaljkart geologi og grunnundersøkelser		Bru nr:	
Produisert av: Statens vegvesen Region vest og Vegdirektoratet		PROFnr:	
		Arkiv ref: 2010127742-001-04	
		Målestokk: 1:500 i A1/1:1000 i A3	
		Tegn. nr. V1016	

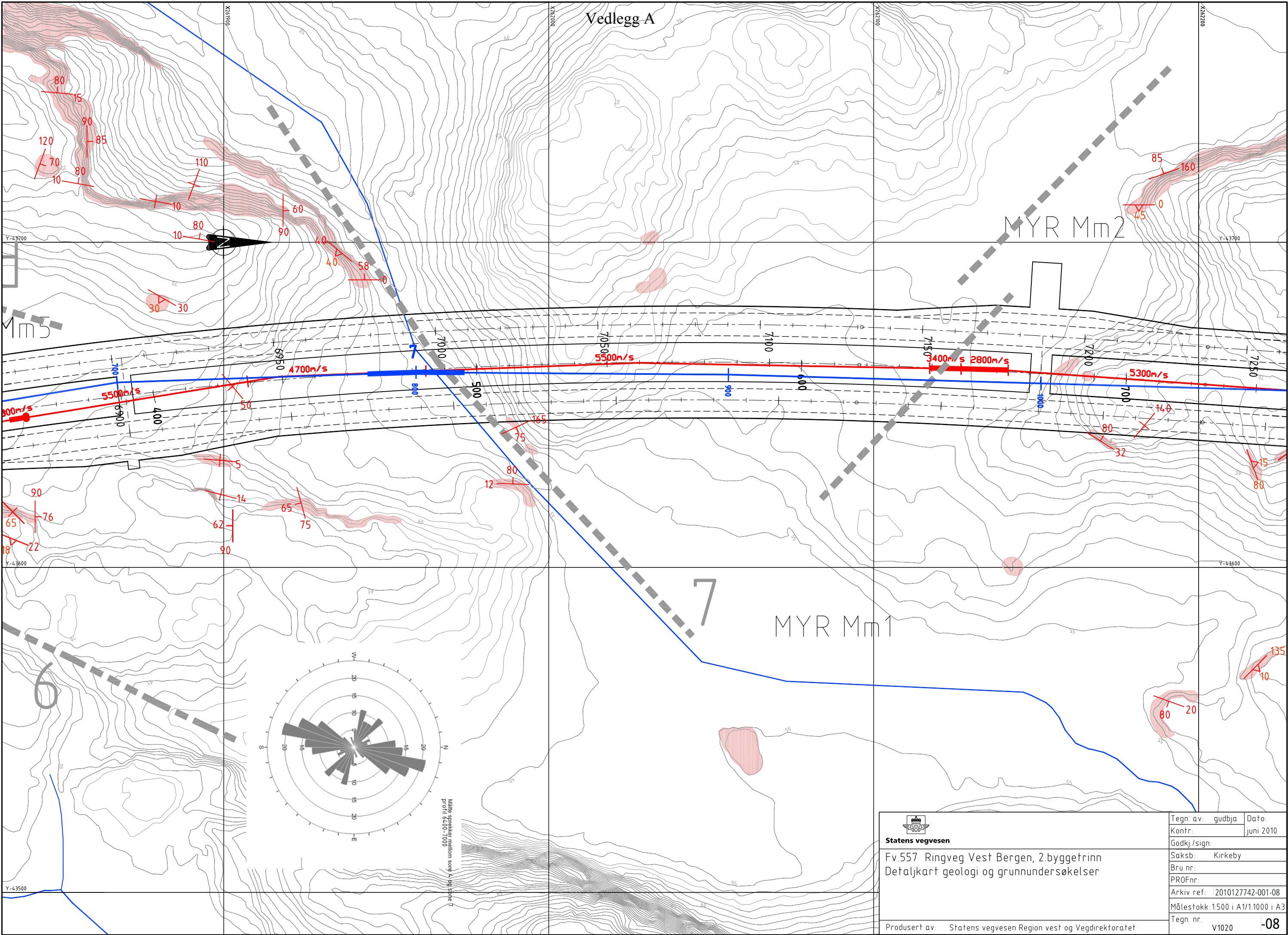


 Statens vegvesen Fv.557 Ringveg Vest Bergen, 2. byggetrinn Detaljkart geologi og grunnundersøkelser	Tegn. av: gudbja	Dato: juni 2010
	Kontr:	
	Godkj./sign:	
	Saksb: Kirkeby	
	Bru nr:	
	PROFnr:	
	Arkiv ref:	2010127742-001-05
Produsert av: Statens vegvesen Region vest og Vegdirektoratet	Målestokk: 1:500 i A1/1:1000 i A3	
	Tegn. nr. V1017	-05



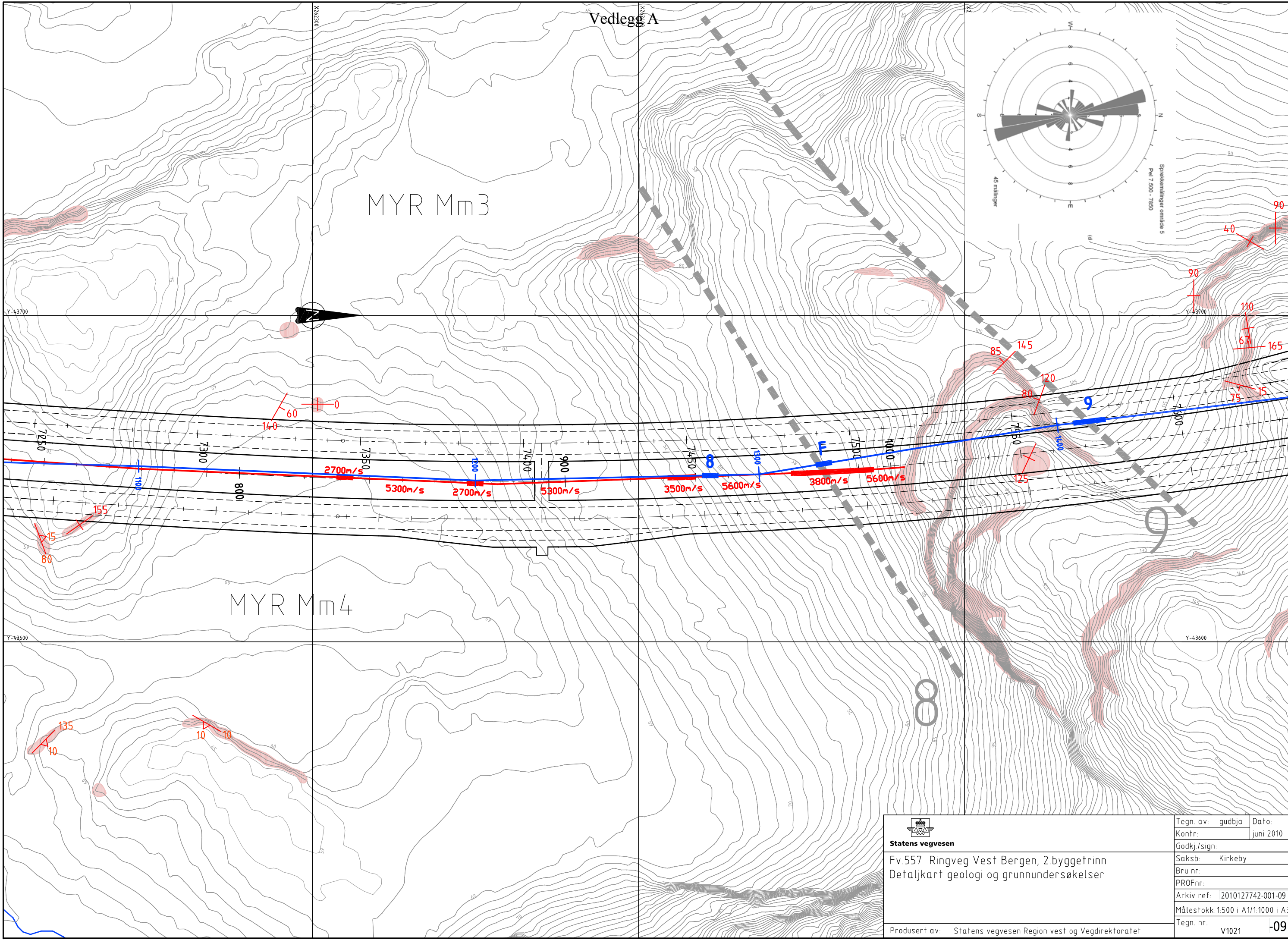
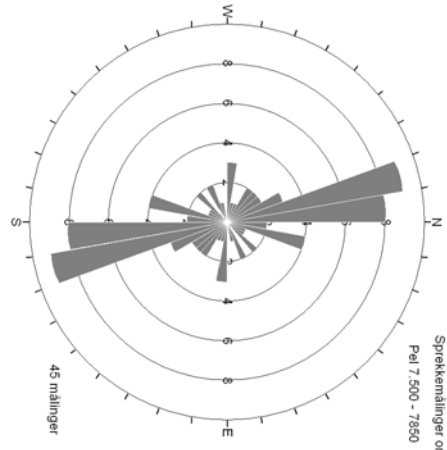
Vedlegg A





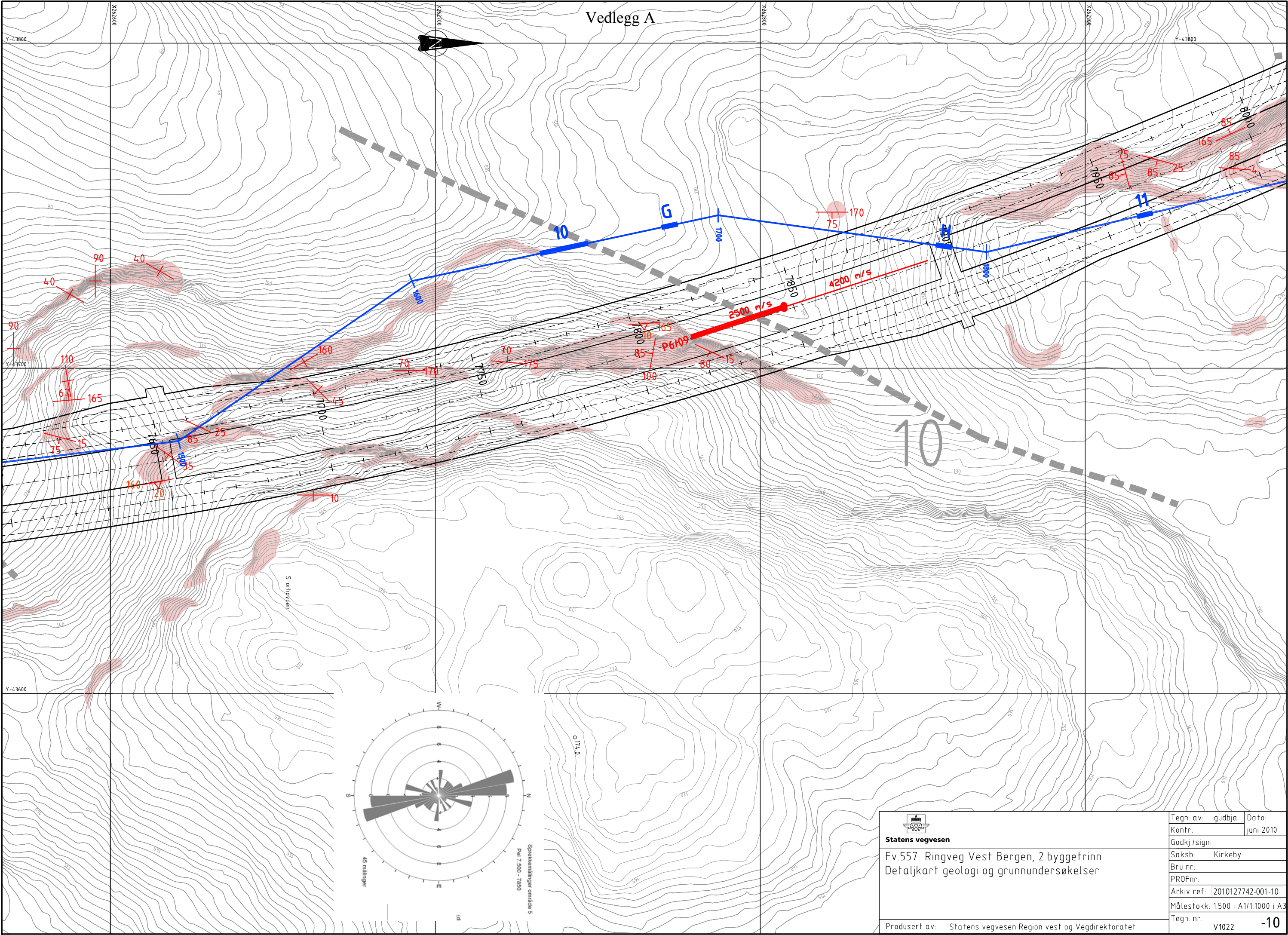
MYR Mm3

MYR Mm4



 Statens vegvesen Fv.557 Ringveg Vest Bergen, 2.byggetrinn Detaljkart geologi og grunnundersøkelser	Tegn. av: gudbja	Dato: juni 2010
	Kontr:	
	Godkj./sign:	
	Saksb: Kirkeby	
	Bru nr:	
	PROFnr:	
	Arkiv ref: 2010127742-001-09	
Produsert av: Statens vegvesen Region vest og Vegdirektoratet	Målestokk: 1:500 i A1/1:1000 i A3	
	Tegn. nr. V1021	-09

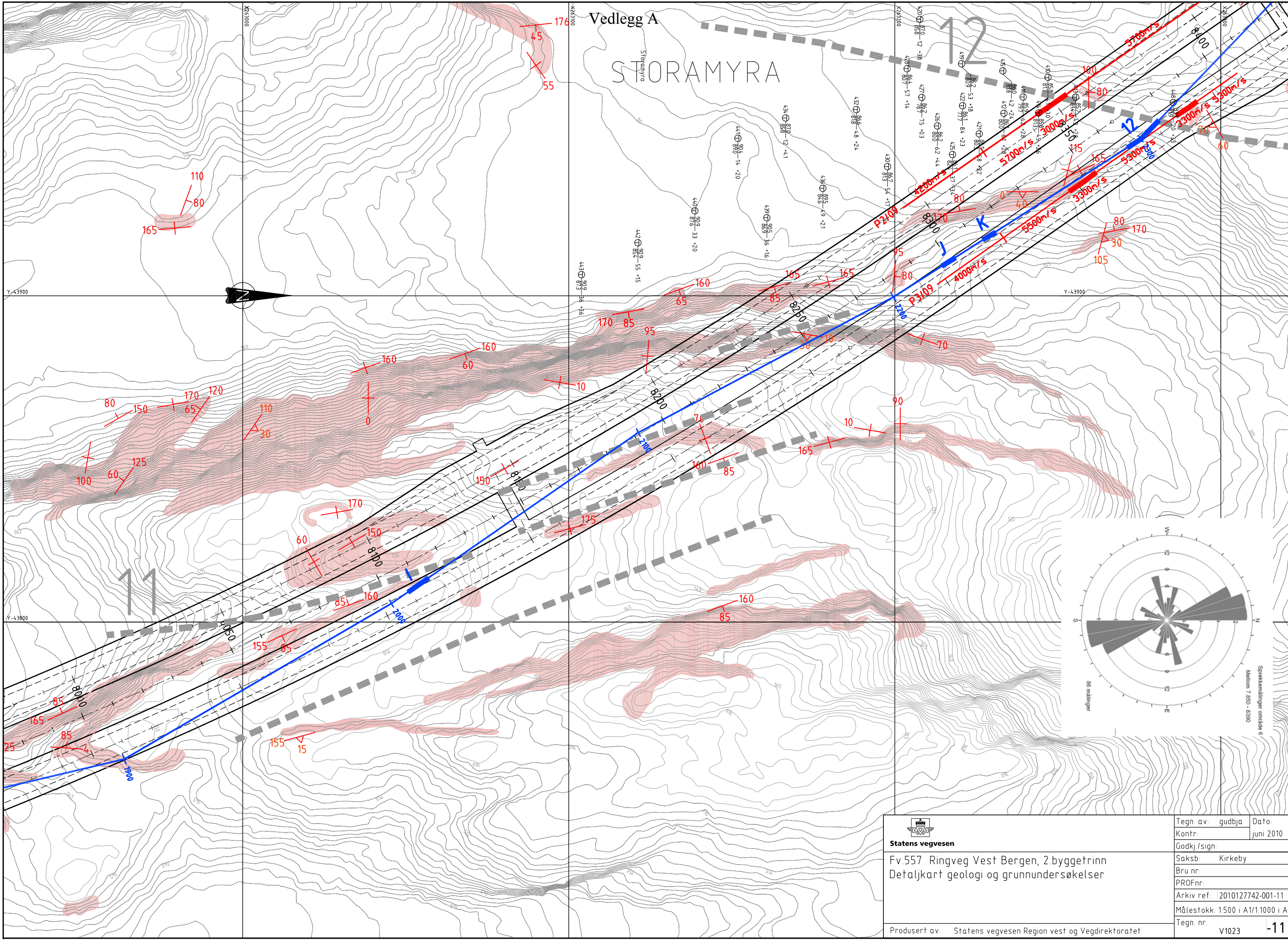
Vedlegg A




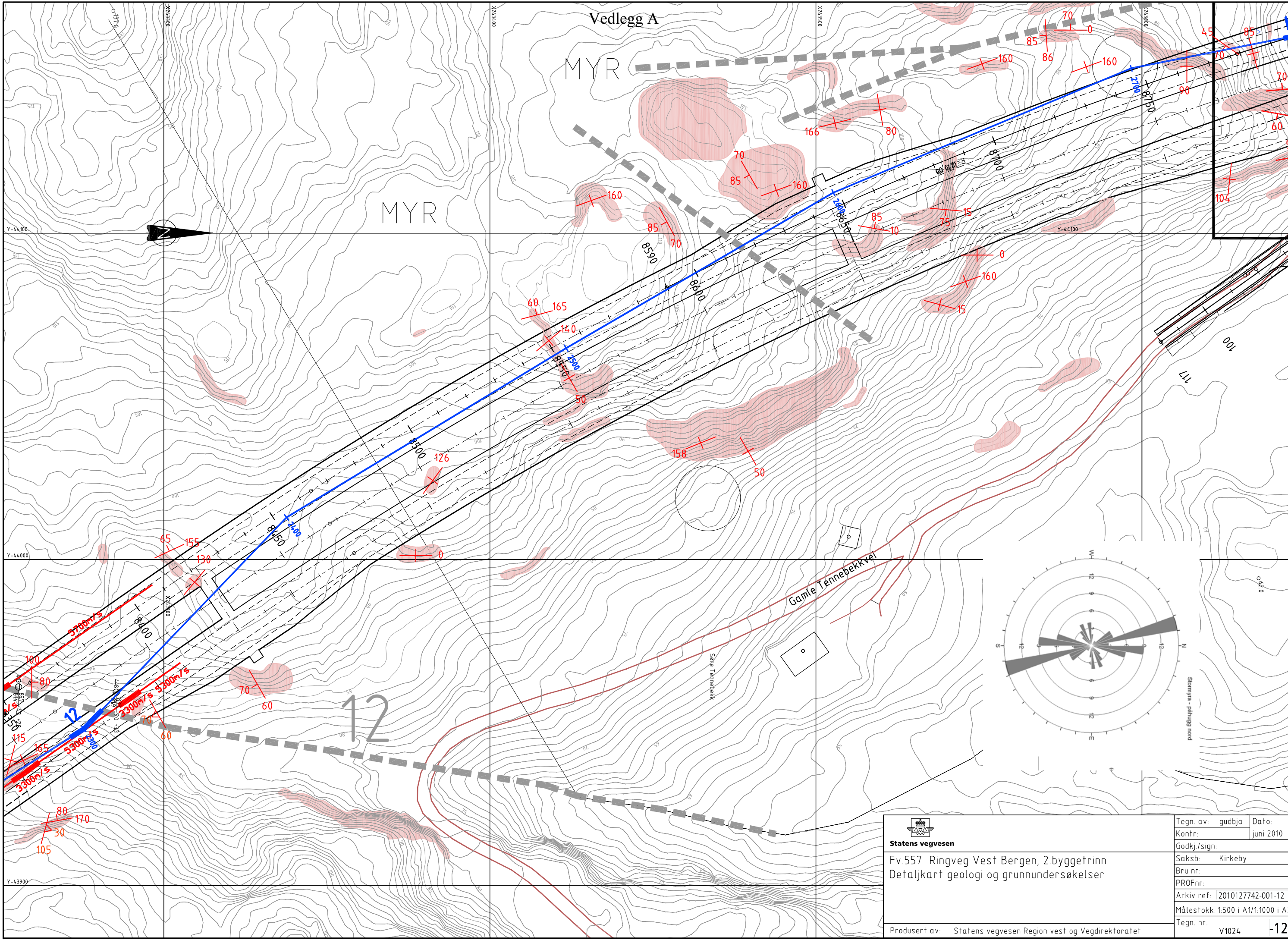
Fv.557 Ringveg Vest Bergen, 2.byggetrinn
Detaljkart geologi og grunnundersøkelser


Produsert av: Statens vegvesen Region vest og Vegdirektoratet

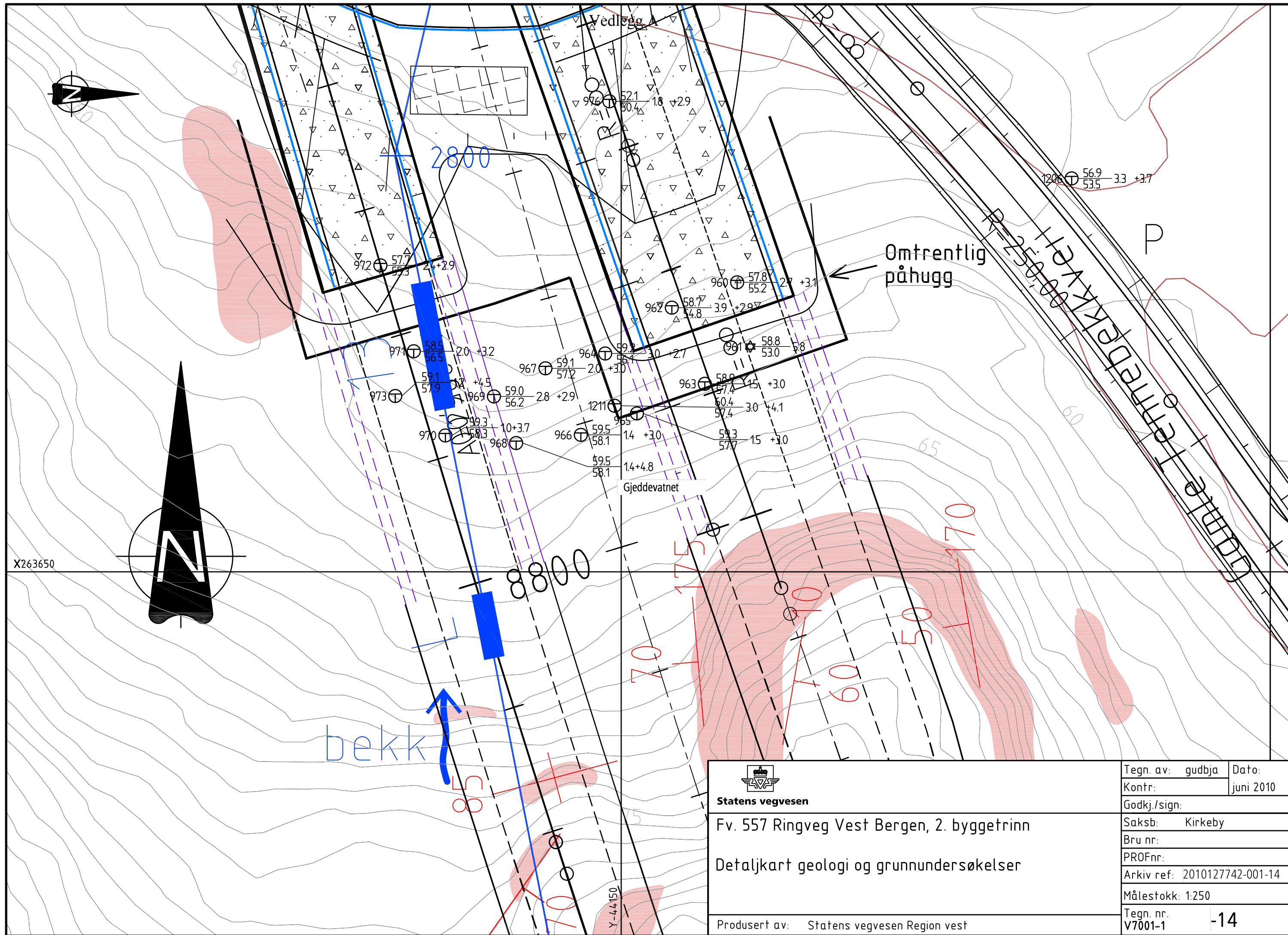
Tegn. av:	gudbja	Dato:	juni 2010
Kontr:			
Godkj./sign:			
Saksb:	Kirkeby		
Bru nr:			
PROFnr:			
Arkiv ref:	2010127742-001-10		
Målestokk:	1:500 i A1/1:1000 i A3		
Tegn. nr.	V1022		-10



 Statens vegvesen Fv.557 Ringveg Vest Bergen, 2.byggetrinn Detaljkart geologi og grunnundersøkelser	Tegn. av: gudbja	Dato: juni 2010
	Kontr:	
	Godkj./sign:	
	Saksb: Kirkeby	
	Bru nr:	
	PROFnr:	
	Arkiv ref: 2010127742-001-11	
Produsert av: Statens vegvesen Region vest og Vegdirektoratet	Målestokk: 1:500 i A1/1:1000 i A3	
	Tegn. nr. V1023	-11



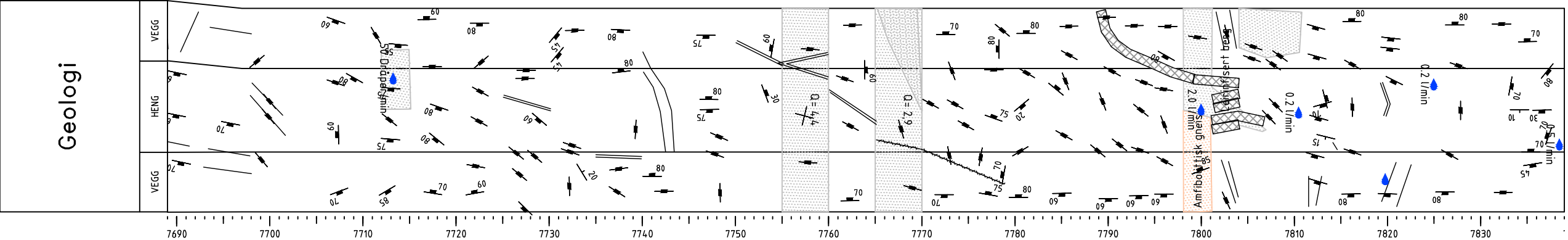
 Statens vegvesen Fv.557 Ringveg Vest Bergen, 2.byggetrinn Detaljkart geologi og grunnundersøkelser	Tegn. av: gudbjø	Dato: juni 2010
	Kontr:	
	Godkj./sign:	
	Saksb: Kirkeby	
	Bru nr:	
	PROFnr:	
Produsert av: Statens vegvesen Region vest og Vegdirektoratet	Arkiv ref: 2010127742-001-12	
	Målestokk: 1:500 i A1/1:1000 i A3	
	Tegn. nr. V1024	-12



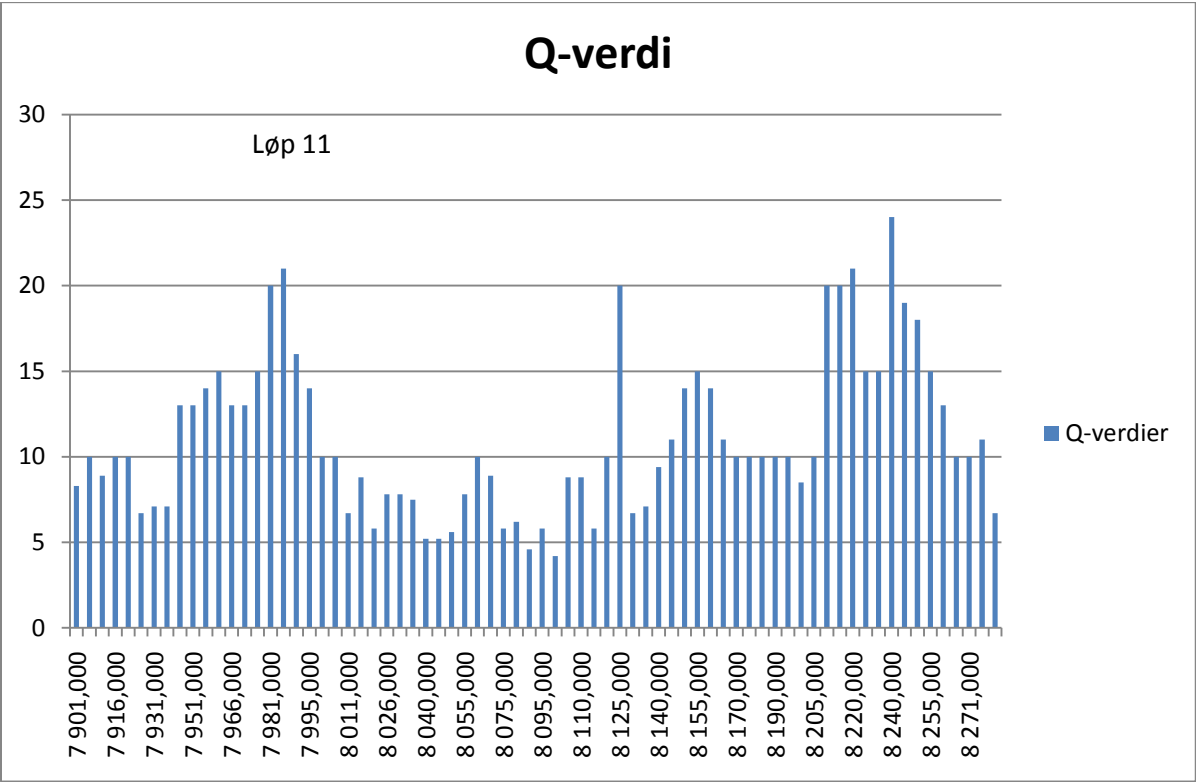
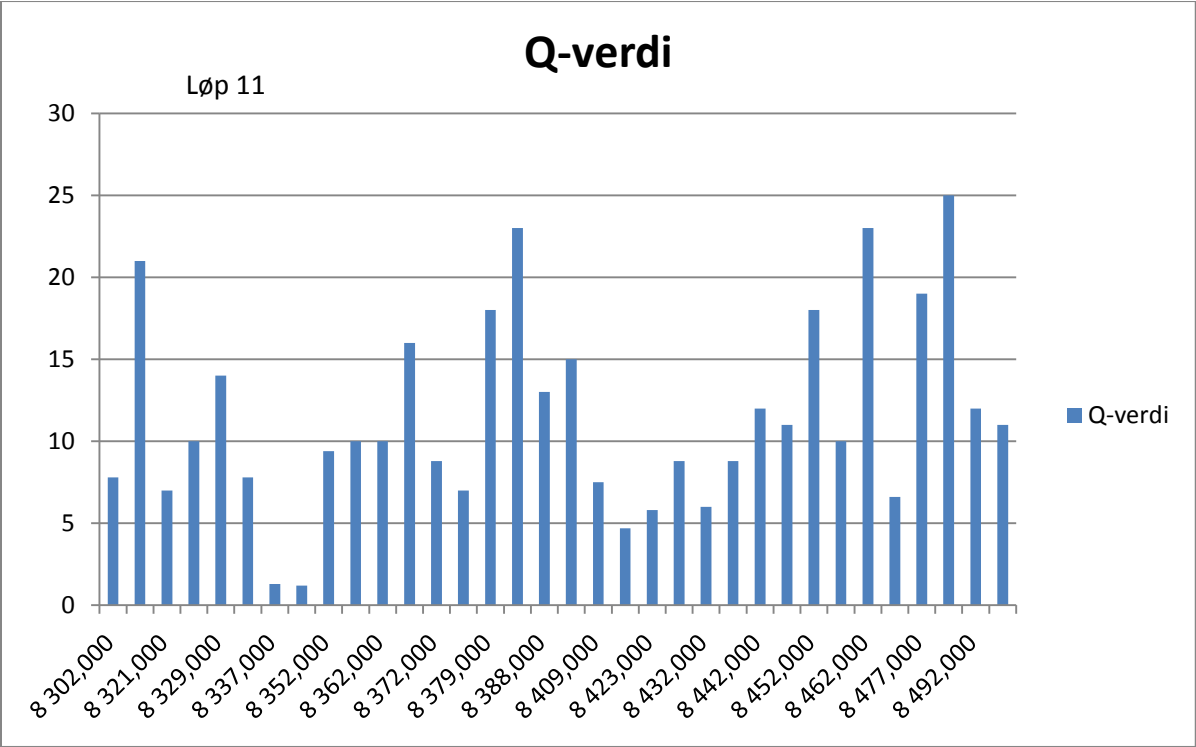
RQD/Jn	80/6,0	85/6,0	95/6,0		75/9,0	85/9,0	85/6,0	80/6,0	85/6,0	85/6,0	90/9,0	85/6,0	80/6,0	80/6,0		63/7,5	80/9,0		70/9,0	70/9,0	70/9,0	70/9,0	70/9,0	60/9,0	70/9,0	75/6,0	60/15	75/9,0	70/9,0	70/6,0	80/6,0	80/6,0	80/6,0	90/6,0	70/3,0
Jr/Ja	1,5/3,0	1,5/3,0	4,0/2,0		1,5/3,0	1,5/2,0	2,0/3,0	2,0/3,0	2,0/3,0	2,0/3,0	1,5/2,5	2,0/3,0	2,0/3,0	2,0/3,0		2,0/3,0	1,5/3,0		1,5/4,0	1,5/3,5	1,5/3,0	1,5/4,0	1,5/4,0	1,5/4,0	1,5/4,0	2,0/8,0	1,5/4,0	2,0/4,0	1,5/3,0	1,5/3,0	1,5/2,0	1,5/2,0	2,0/2,0	2,0/2,0	3,0/2,5
Jw/SRF	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0		1,0/1,0	0,66/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0		1,0/1,0	1,0/1,0		1,0/1,0	0,66/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	0,66/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0
Q-Verdi	6,7	7,1	32		4,2	4,7	9,4	8,9	9,4	9,4	6,0	9,4	8,9	8,9		5,6	4,4		2,9	2,2	3,9	2,9	2,9	2,5	2,9	2,1	15	4,2	3,9	5,8	10	10	13	15	28
Bergklasse																																			
Injeksjon	<div><div><div>51591 Kg</div><div>57857 Kg</div><div>54588 Kg</div><div>26174 Kg</div><div>32228 Kg</div><div>17187 Kg</div><div>46194 Kg</div><div>41016 Kg</div><div>38457 Kg</div><div>55045 Kg</div><div>11297 Kg</div></div></div>																																		

Løp 12

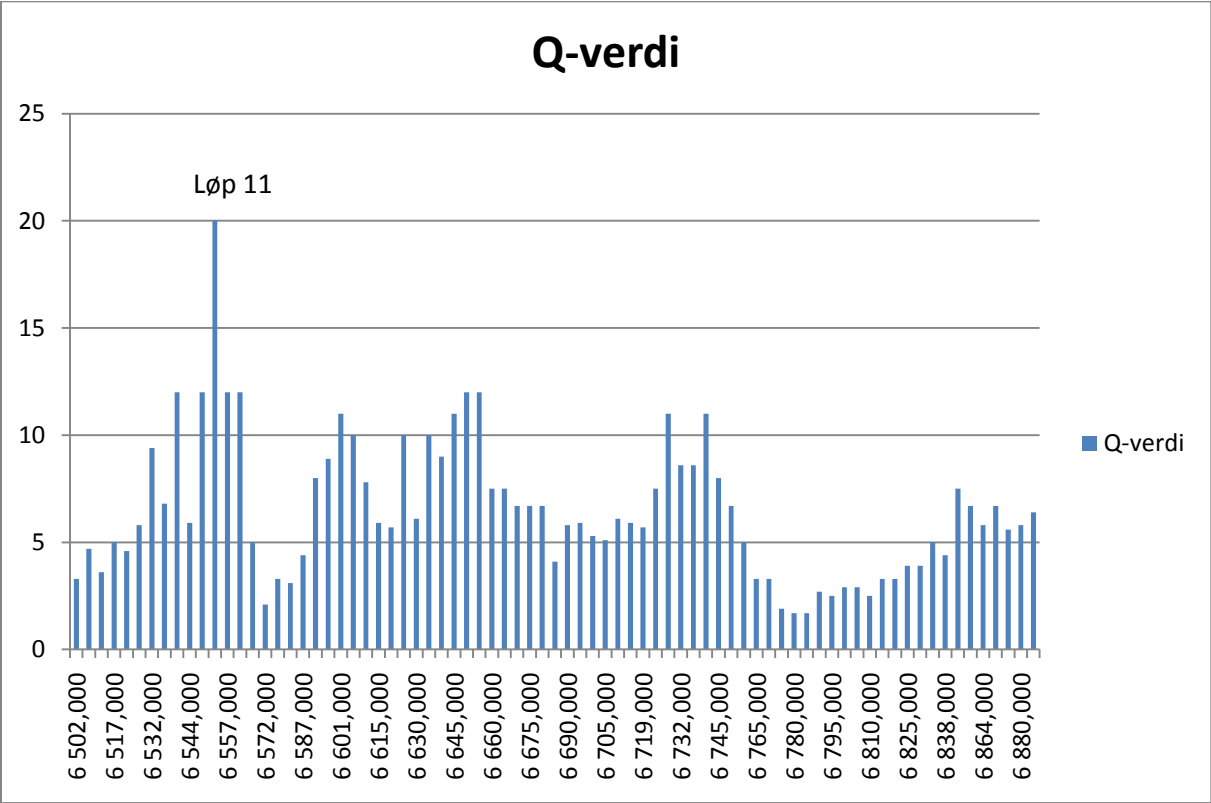
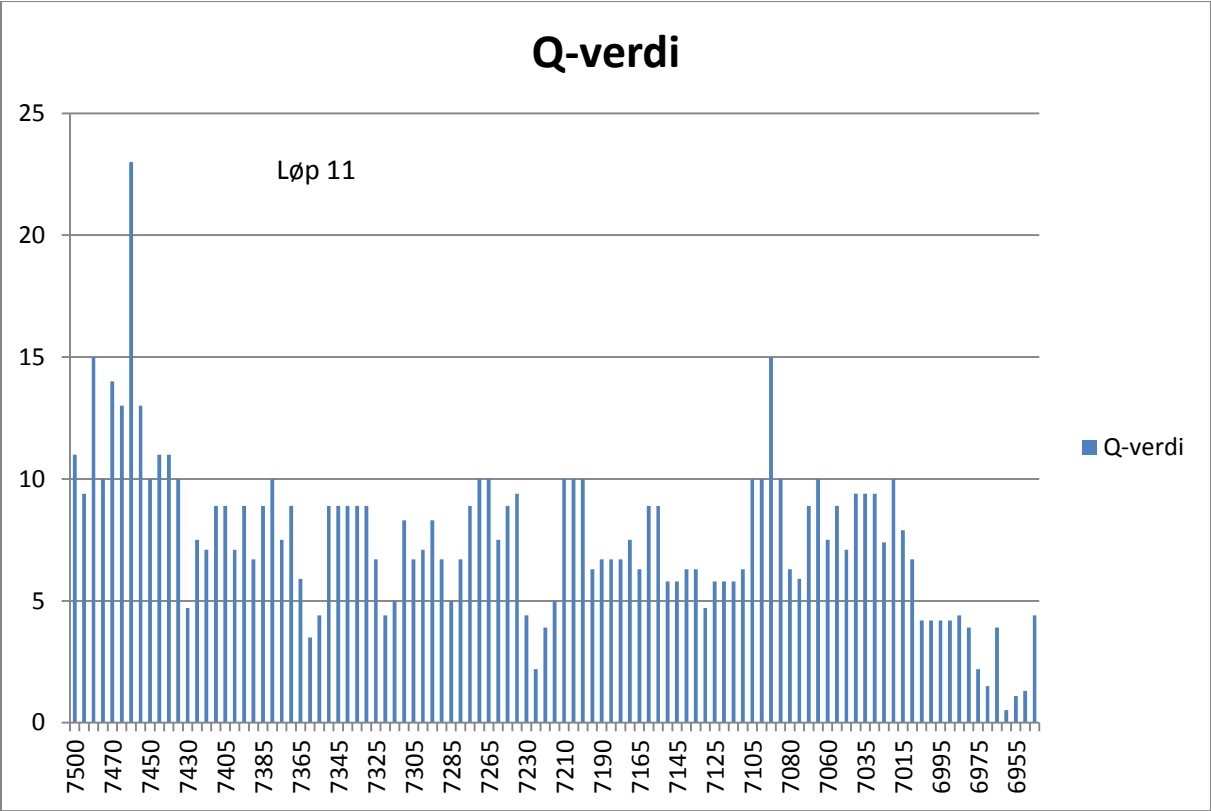
Vedlegg B



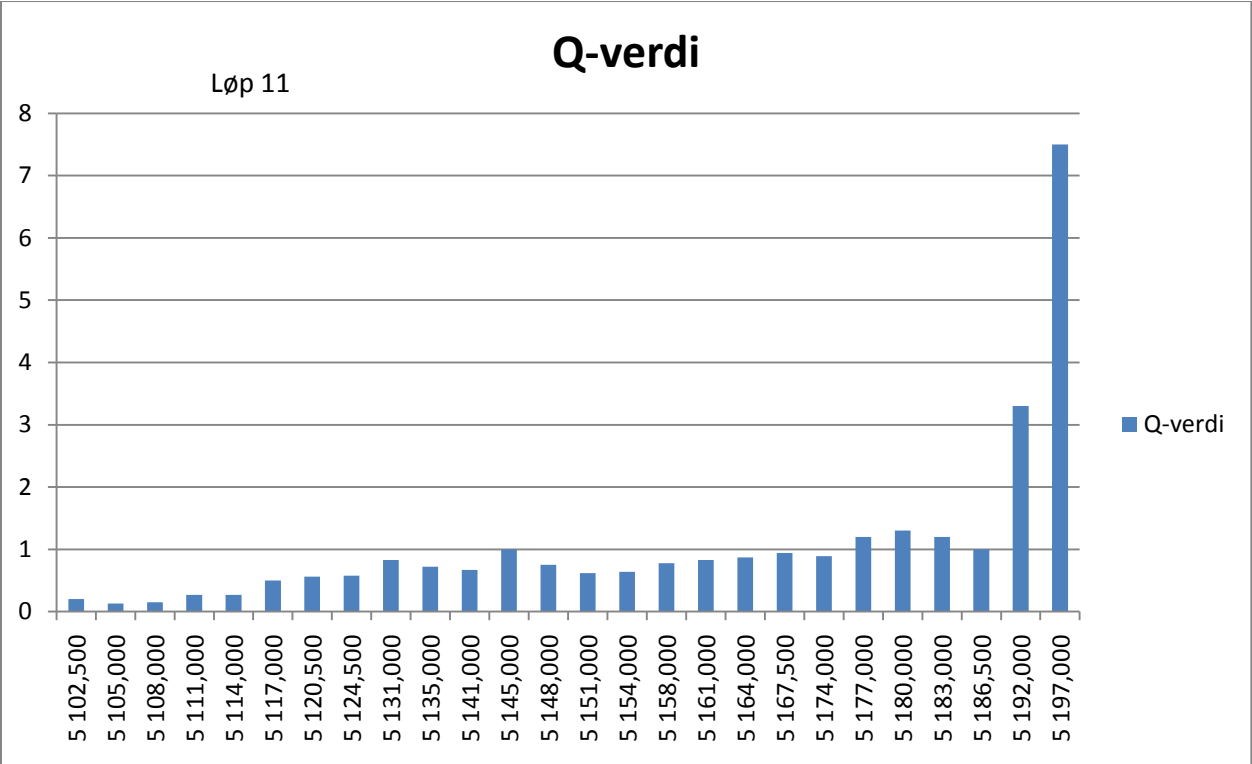
Vedlegg C1



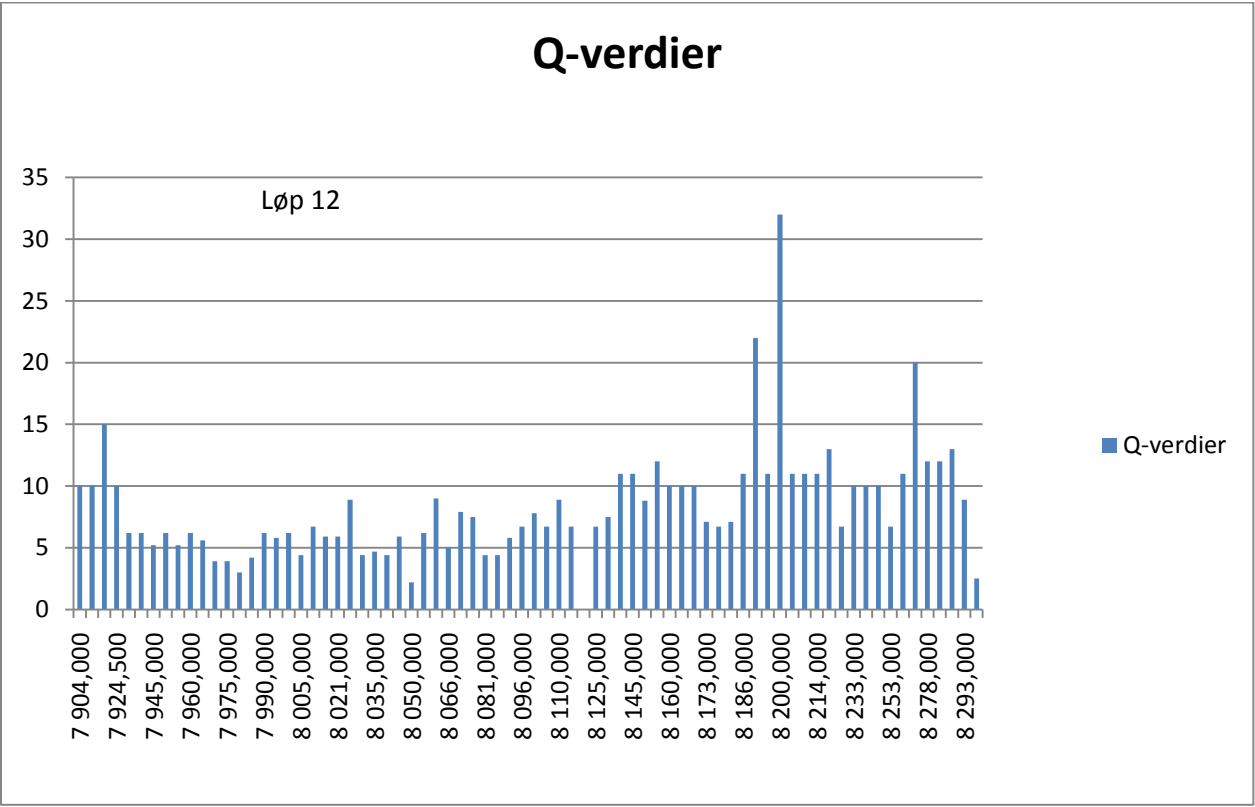
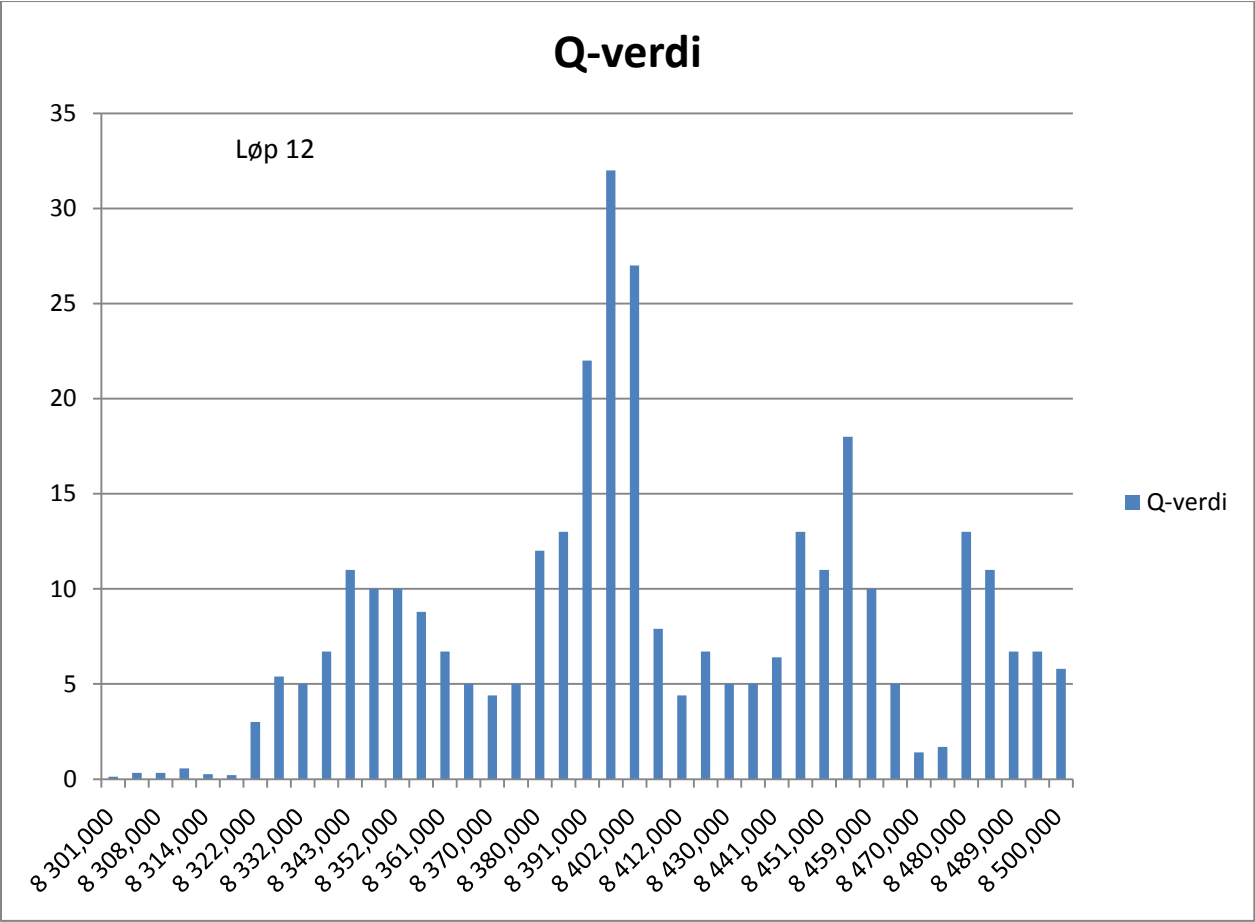
Vedlegg C1



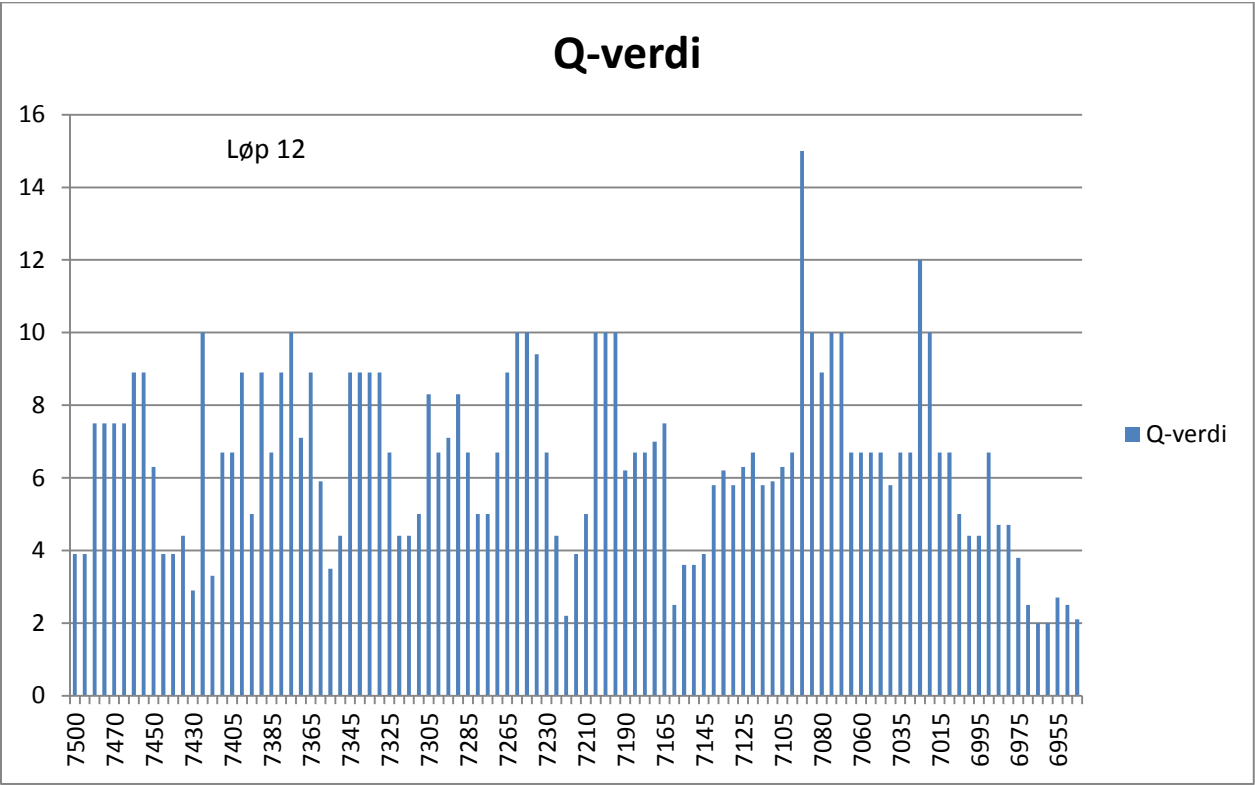
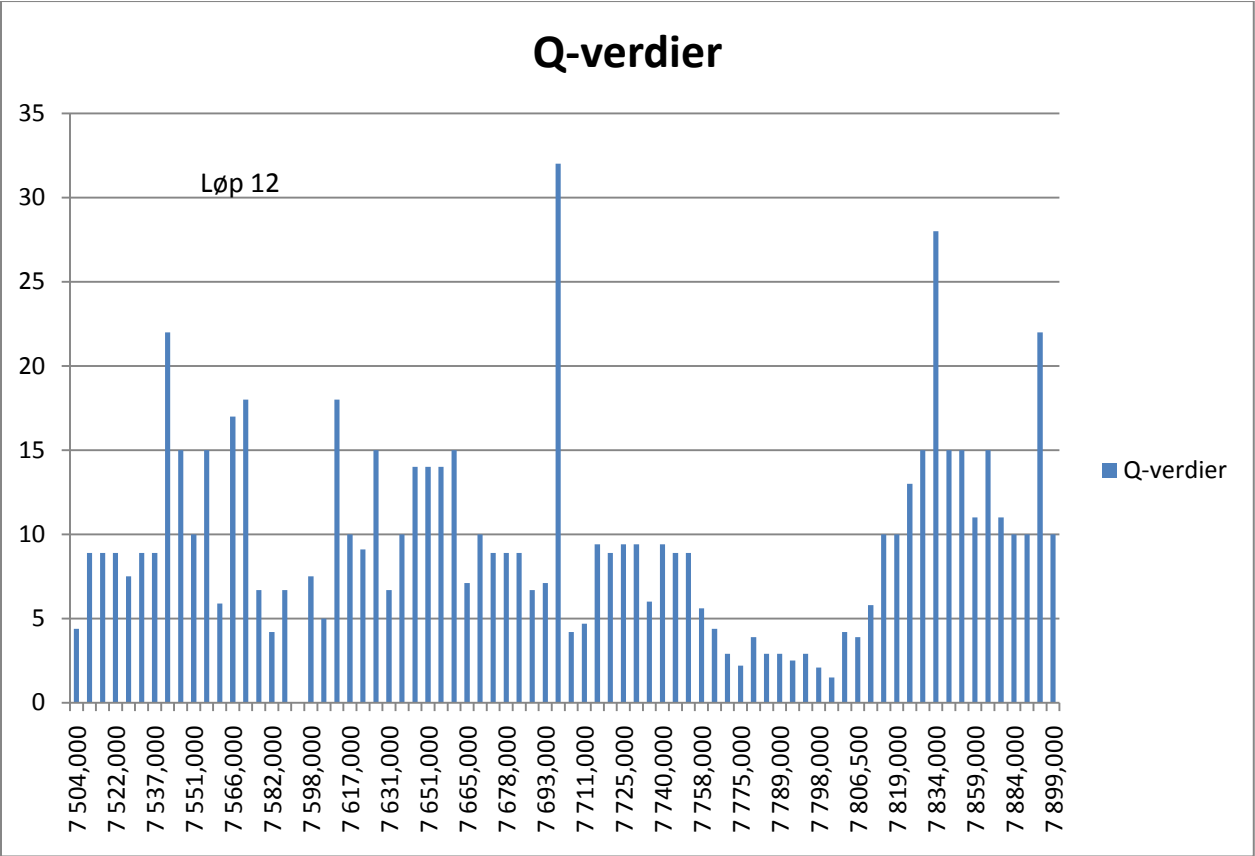
Vedlegg C1



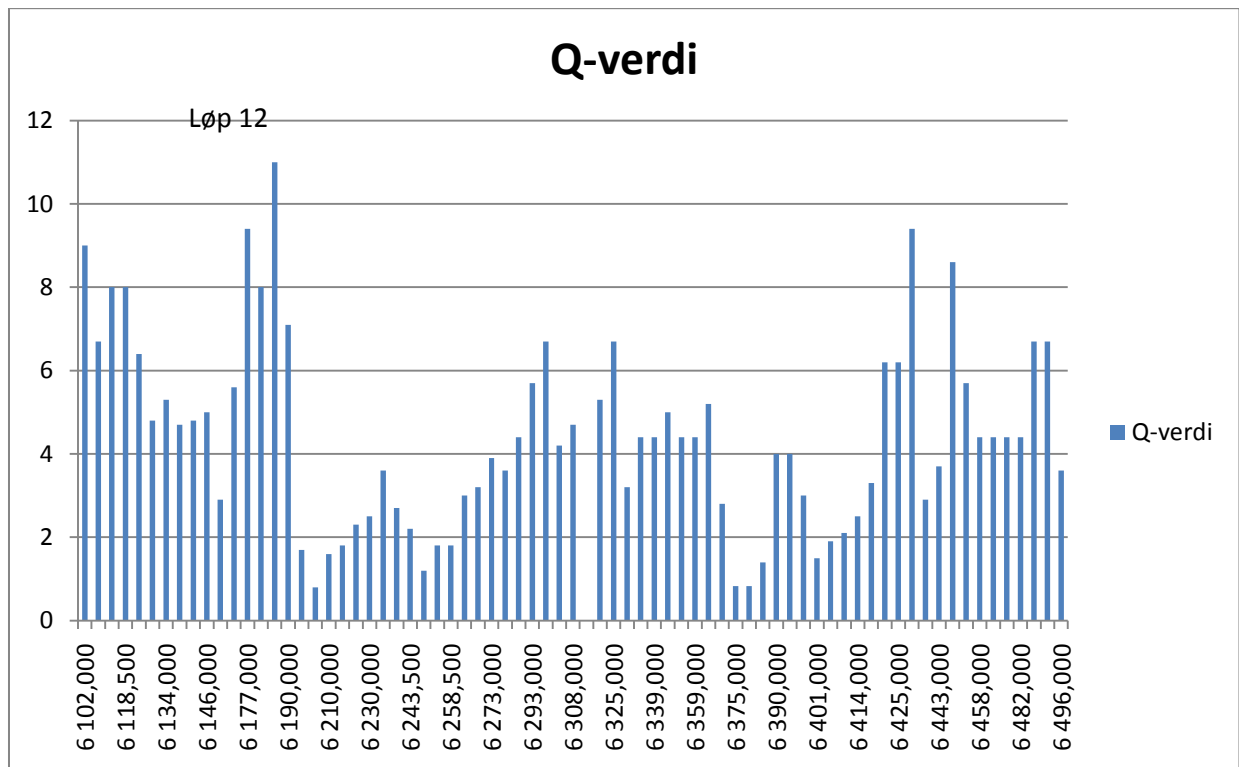
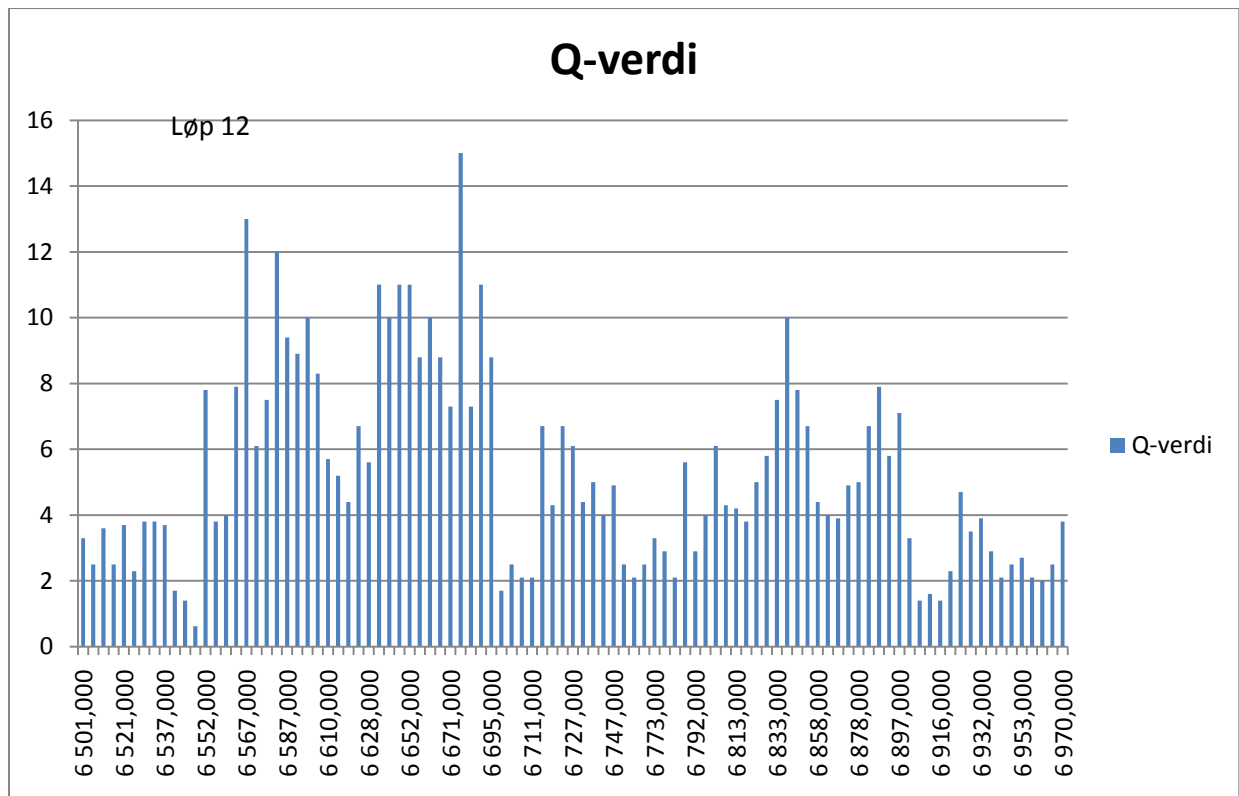
Vedlegg C2



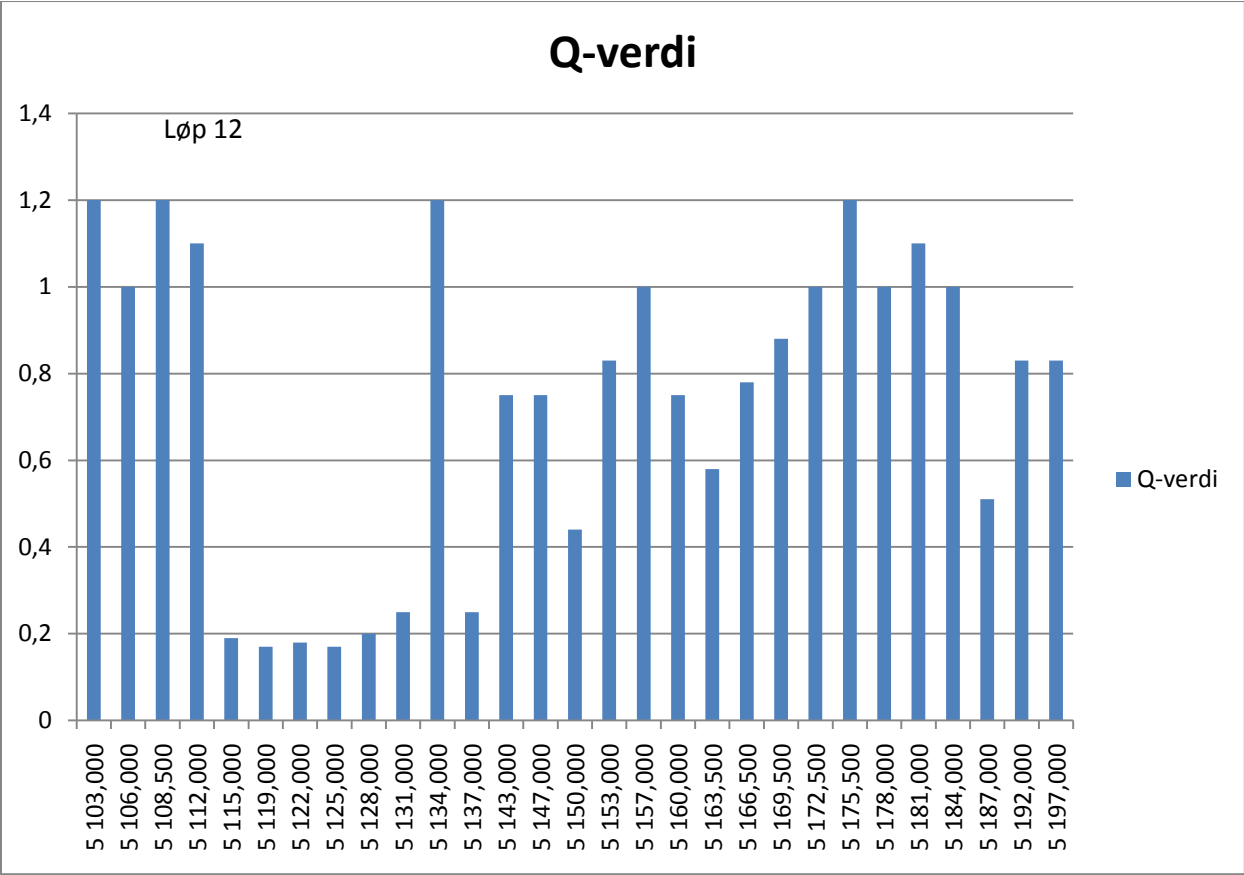
Vedlegg C2



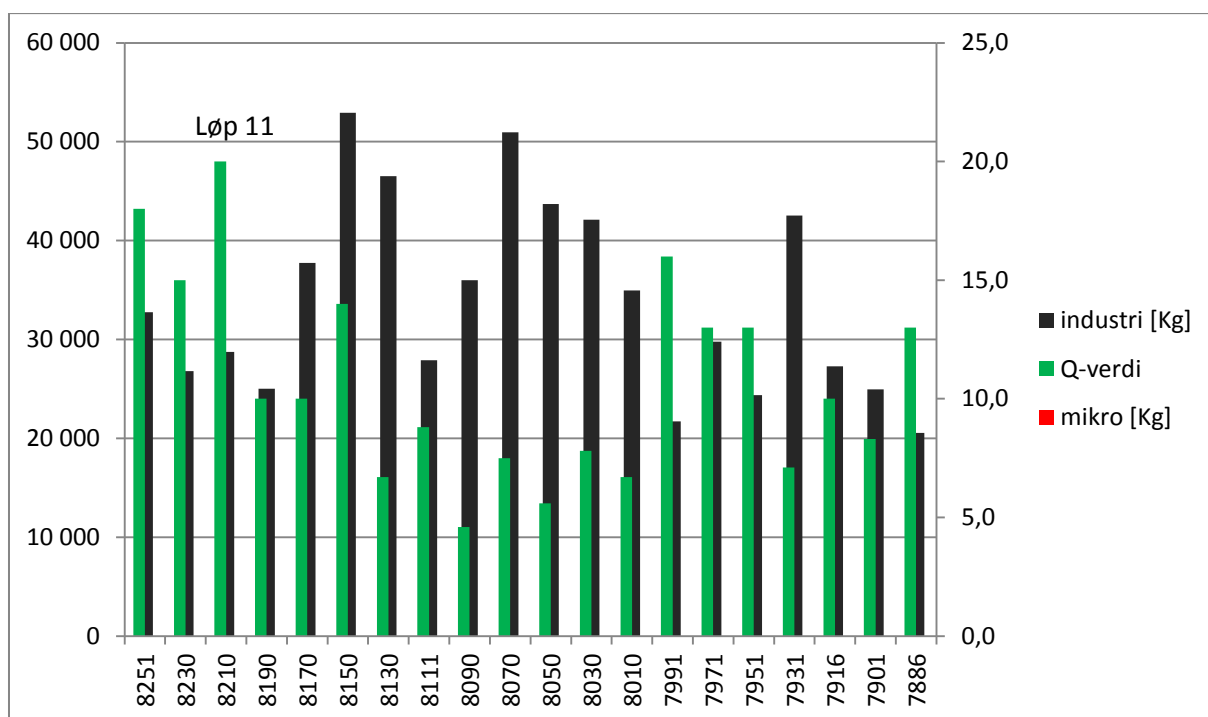
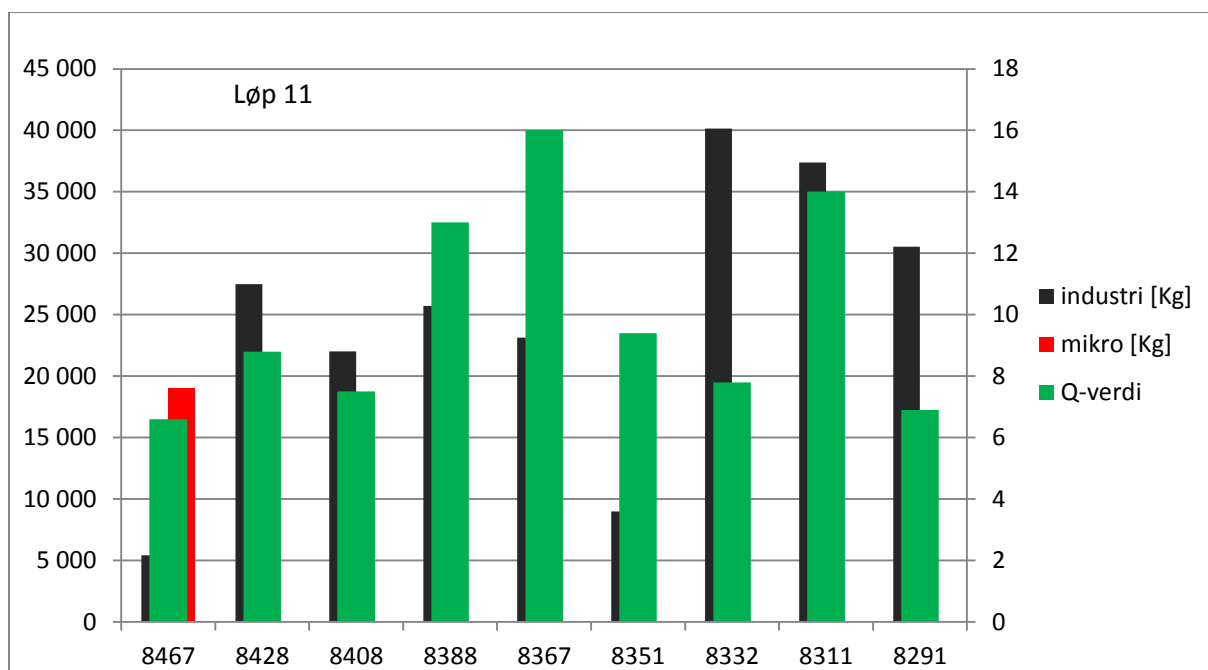
Vedlegg C2



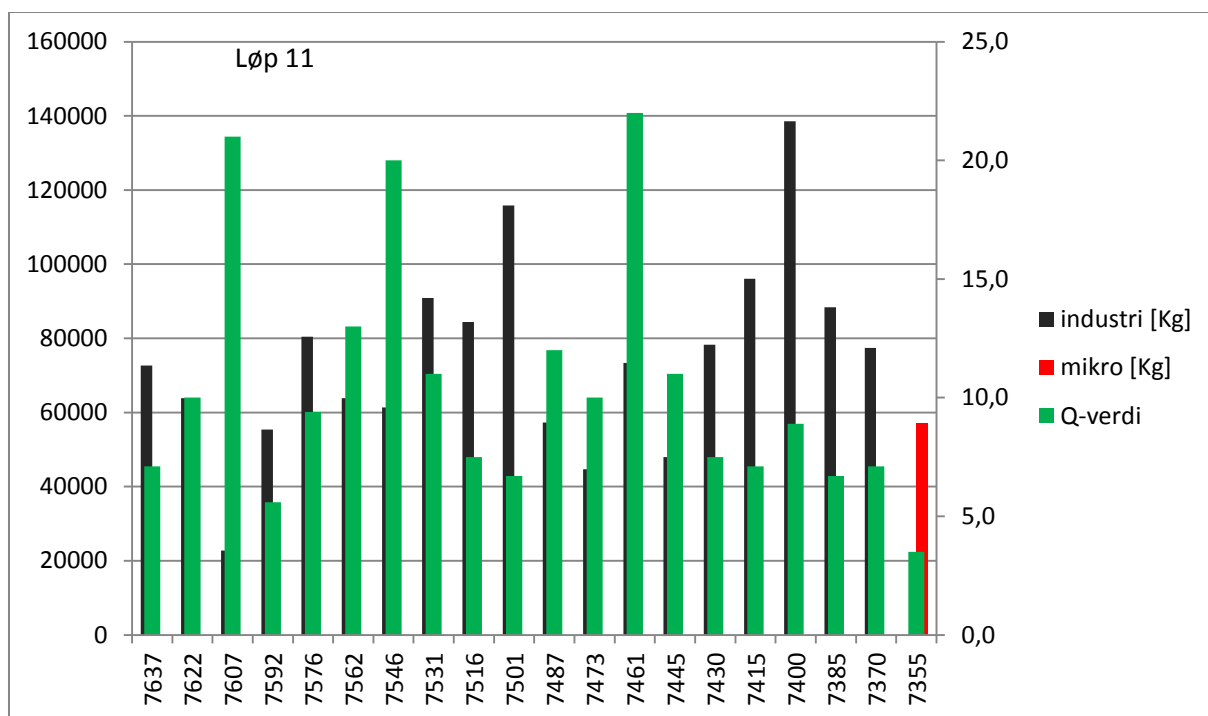
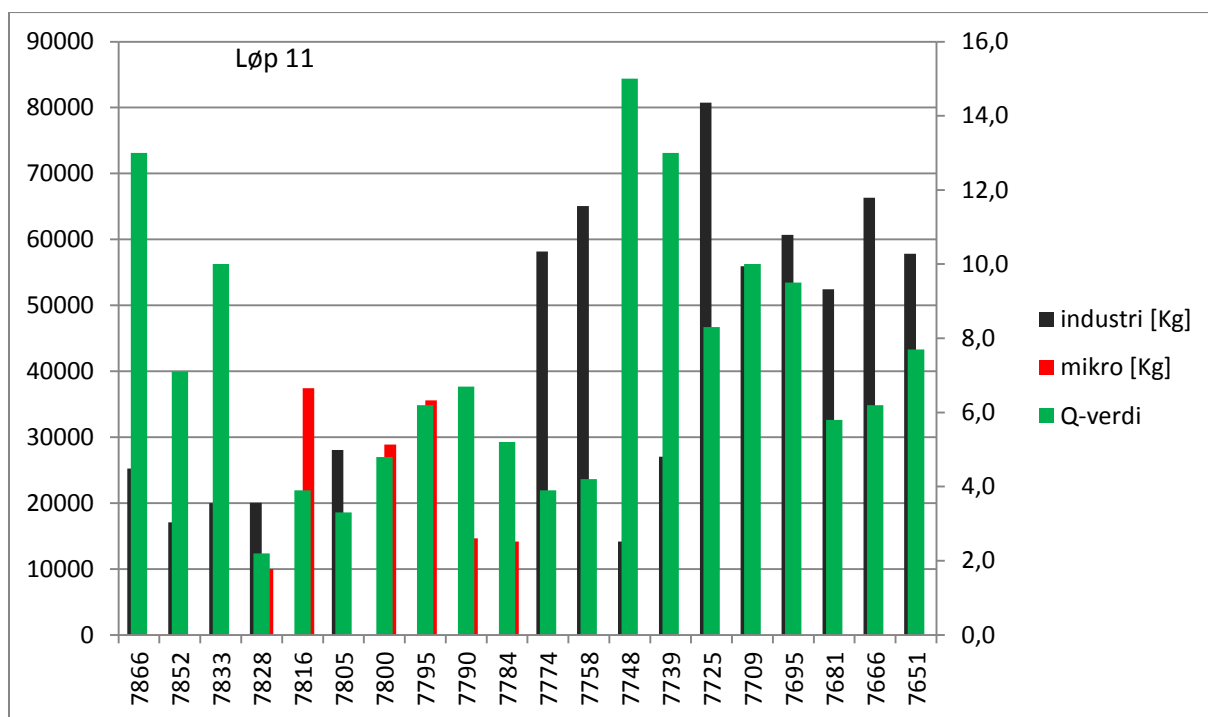
Vedlegg C2



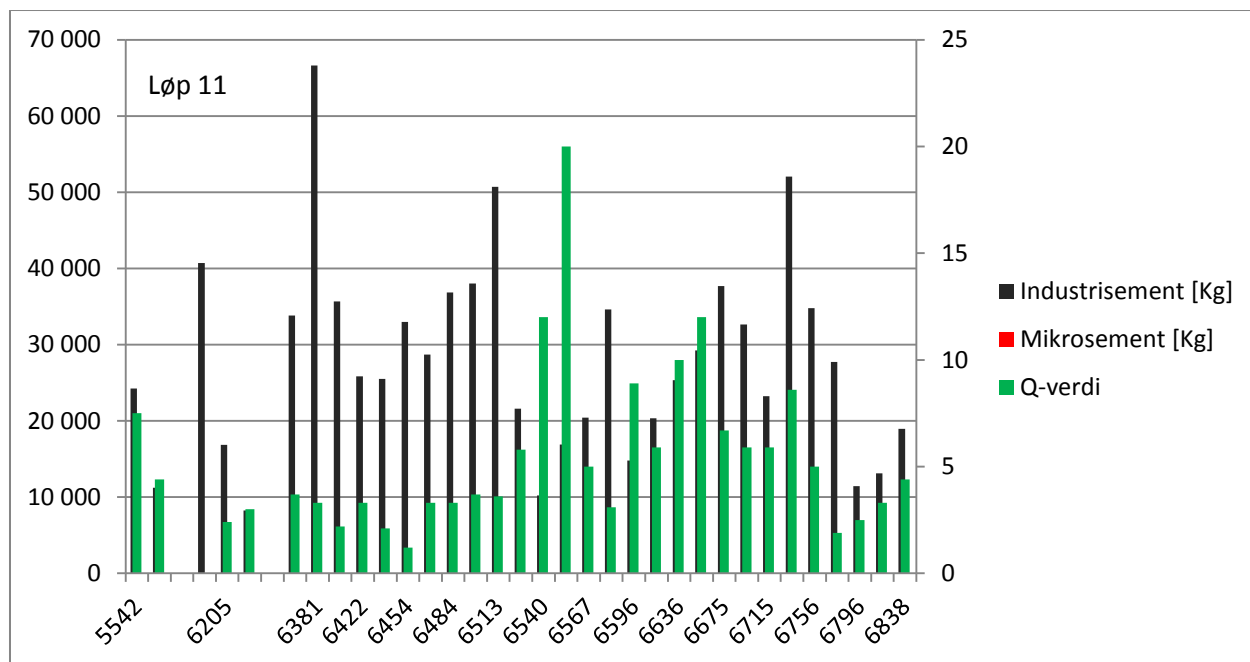
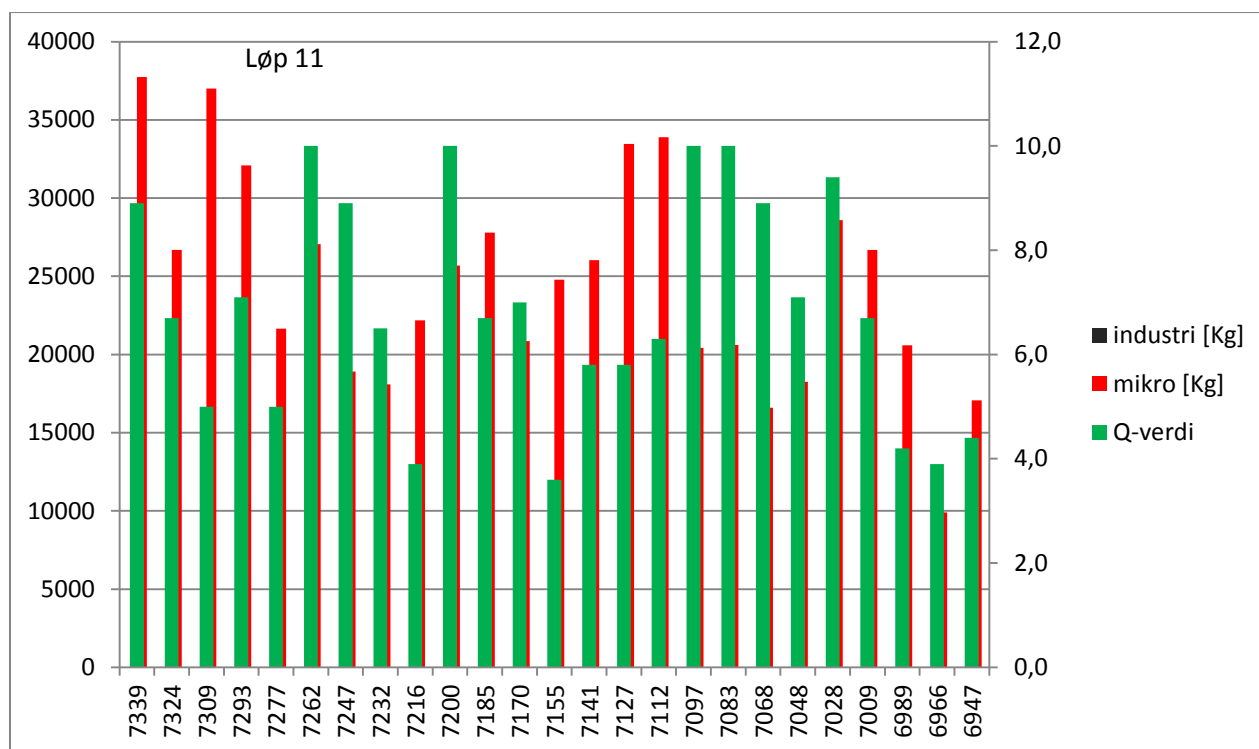
Vedlegg C3



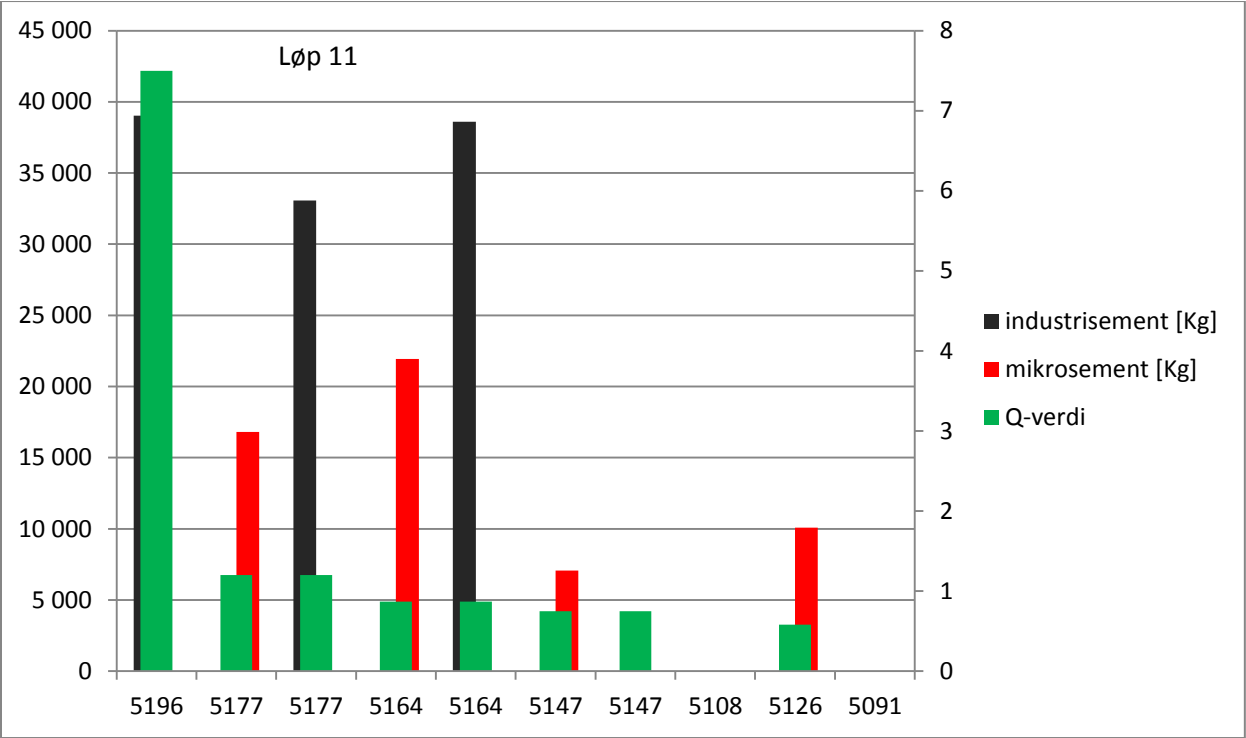
Vedlegg C3



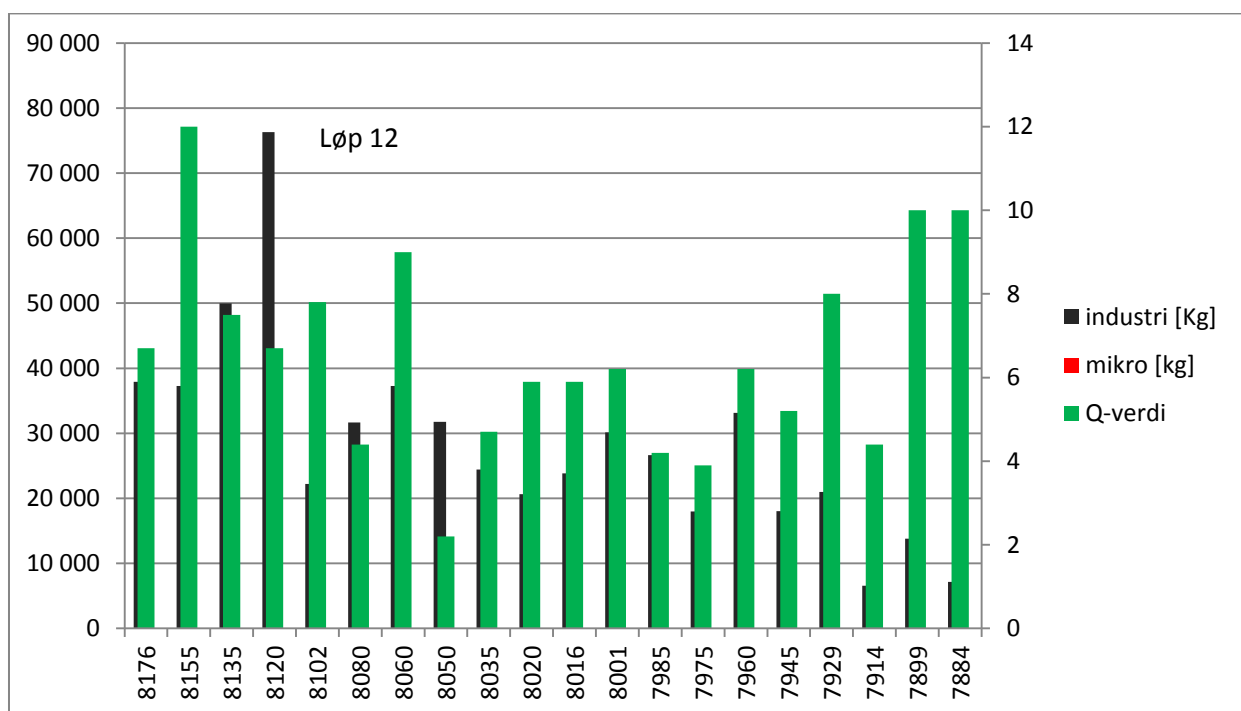
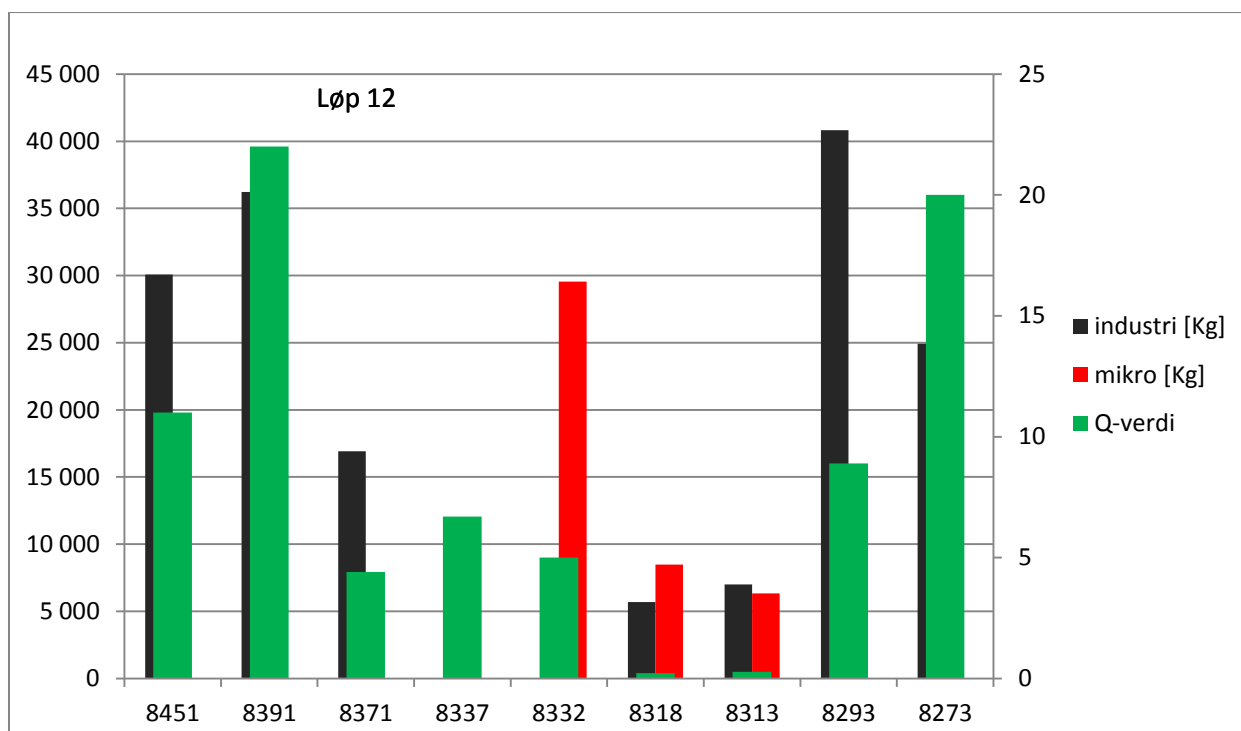
Vedlegg C3



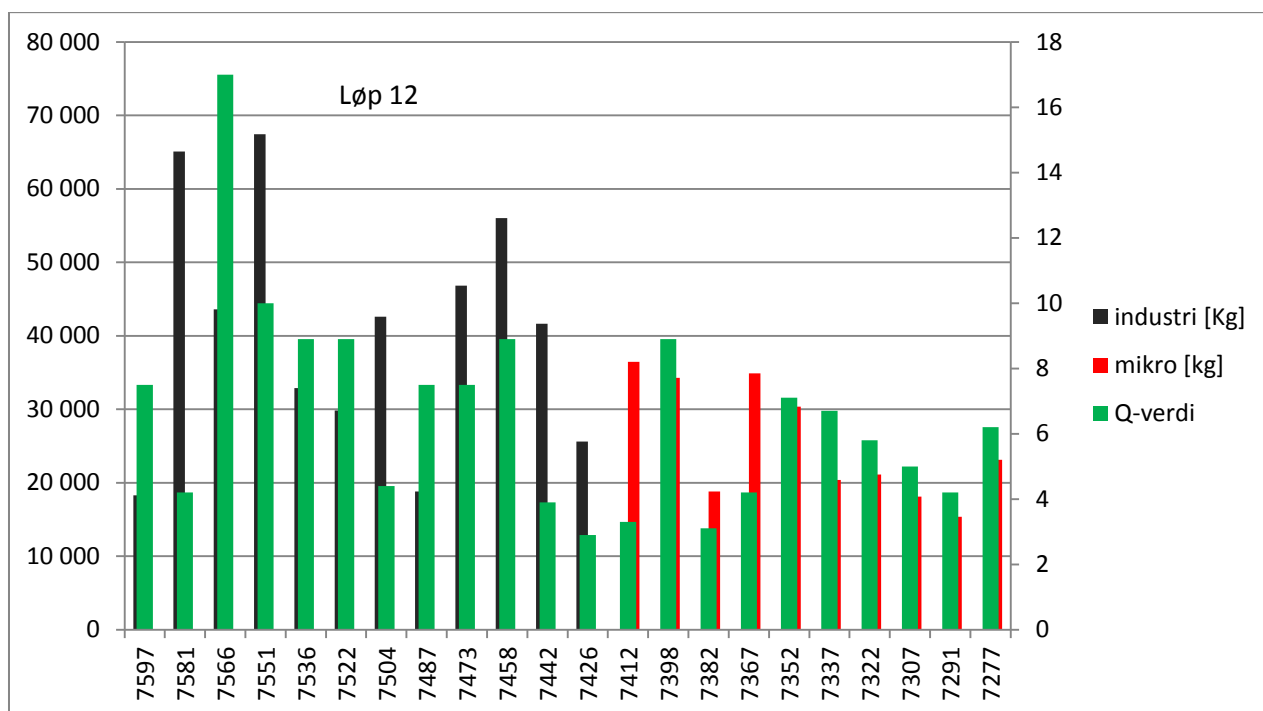
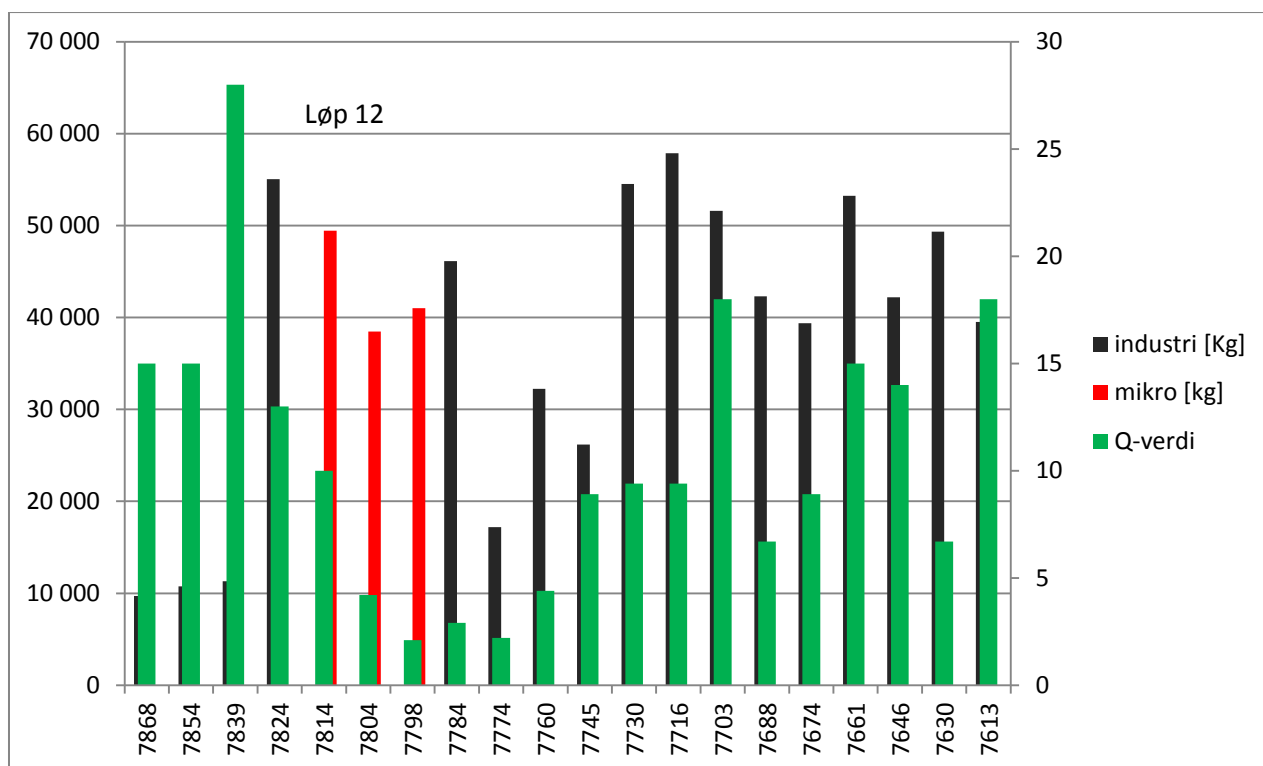
Vedlegg C3



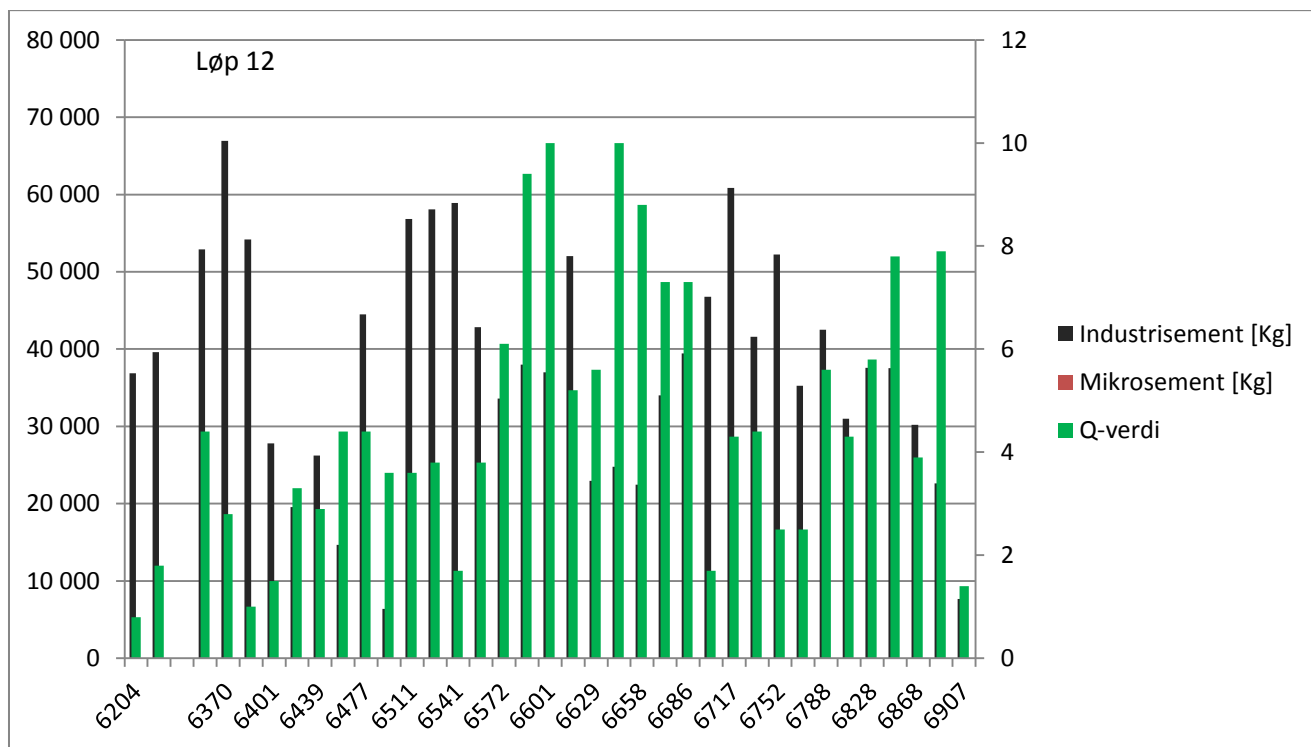
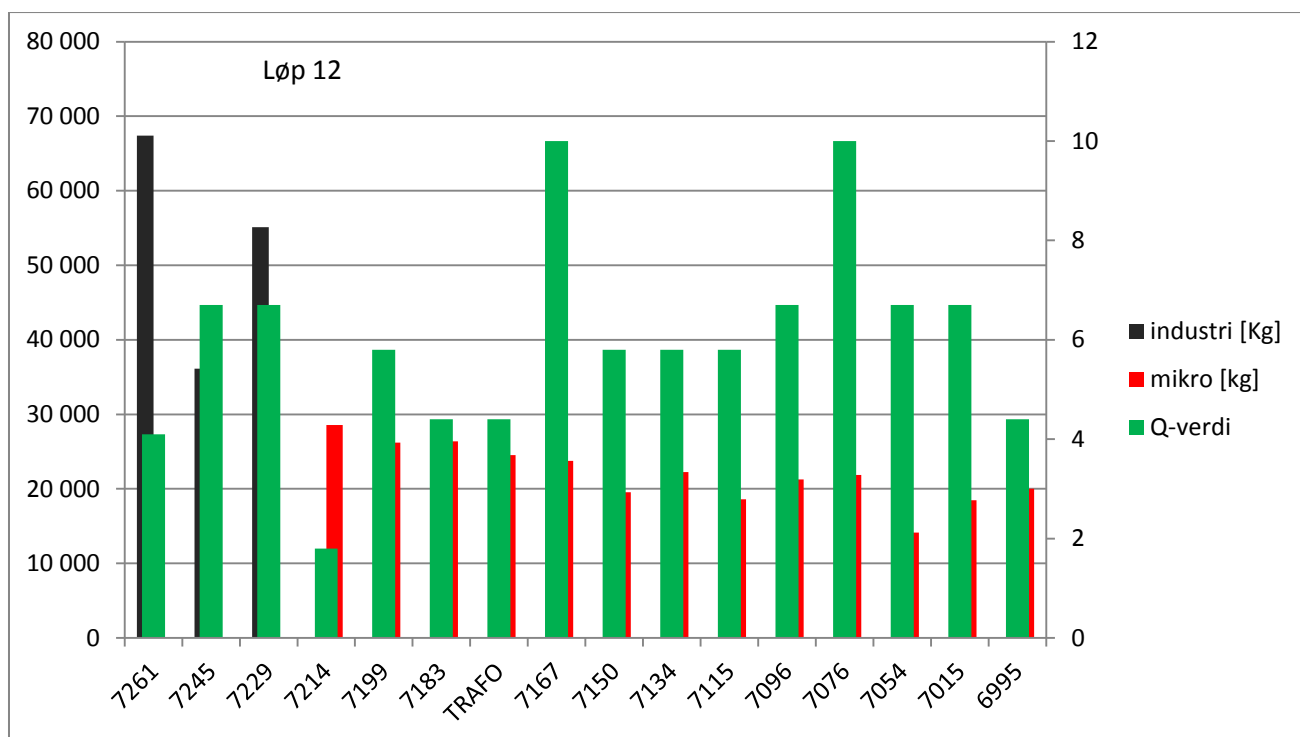
Vedlegg C4



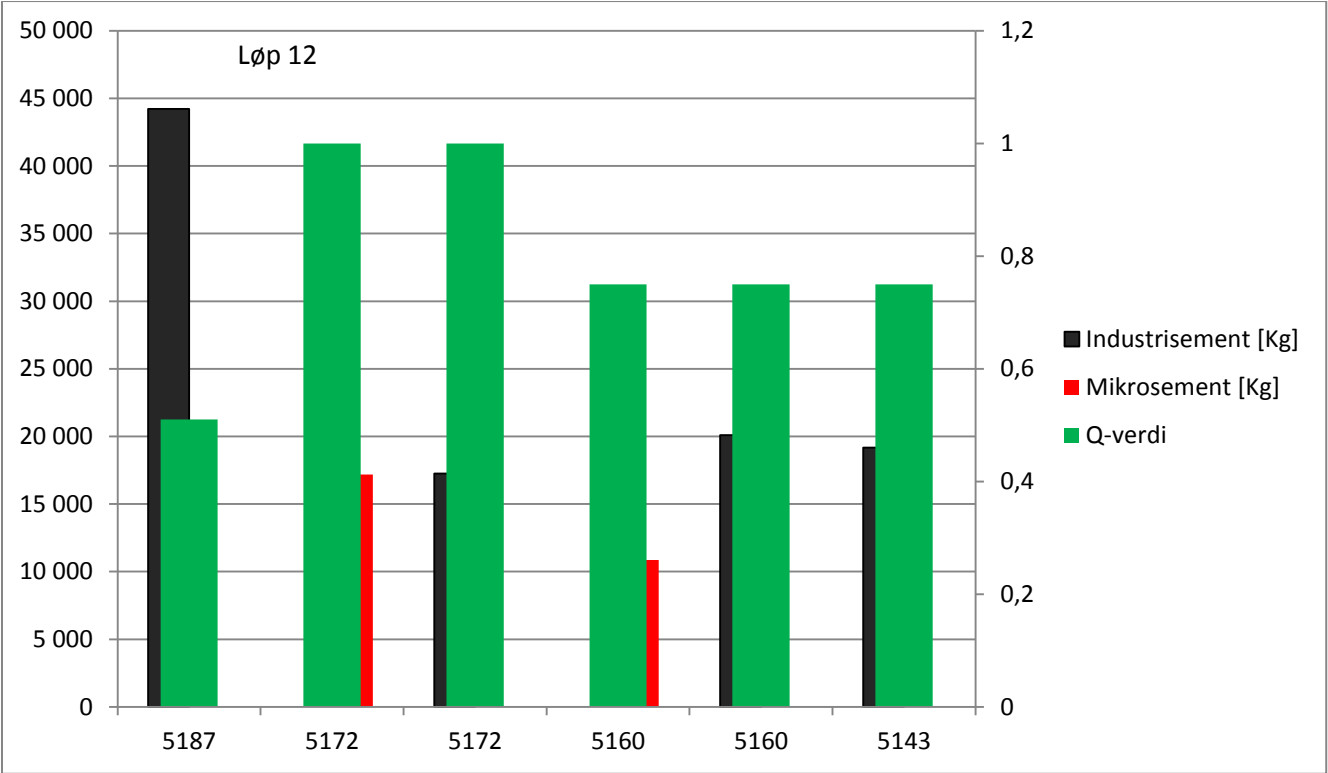
Vedlegg C4



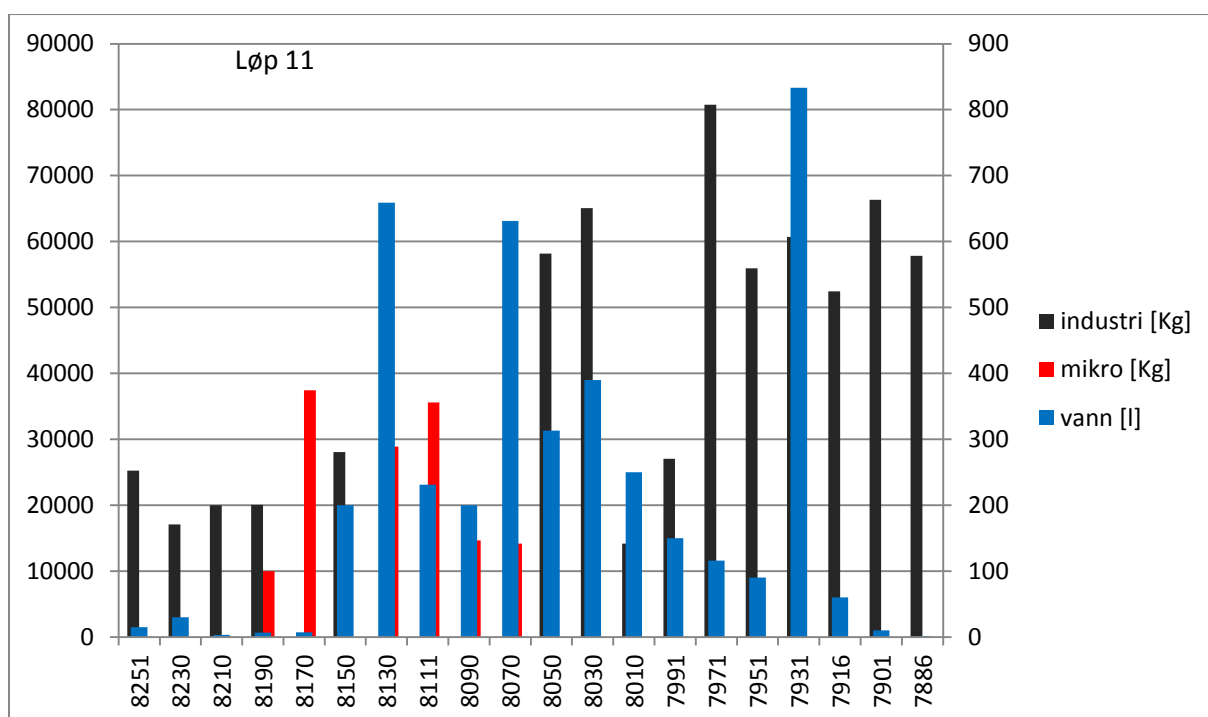
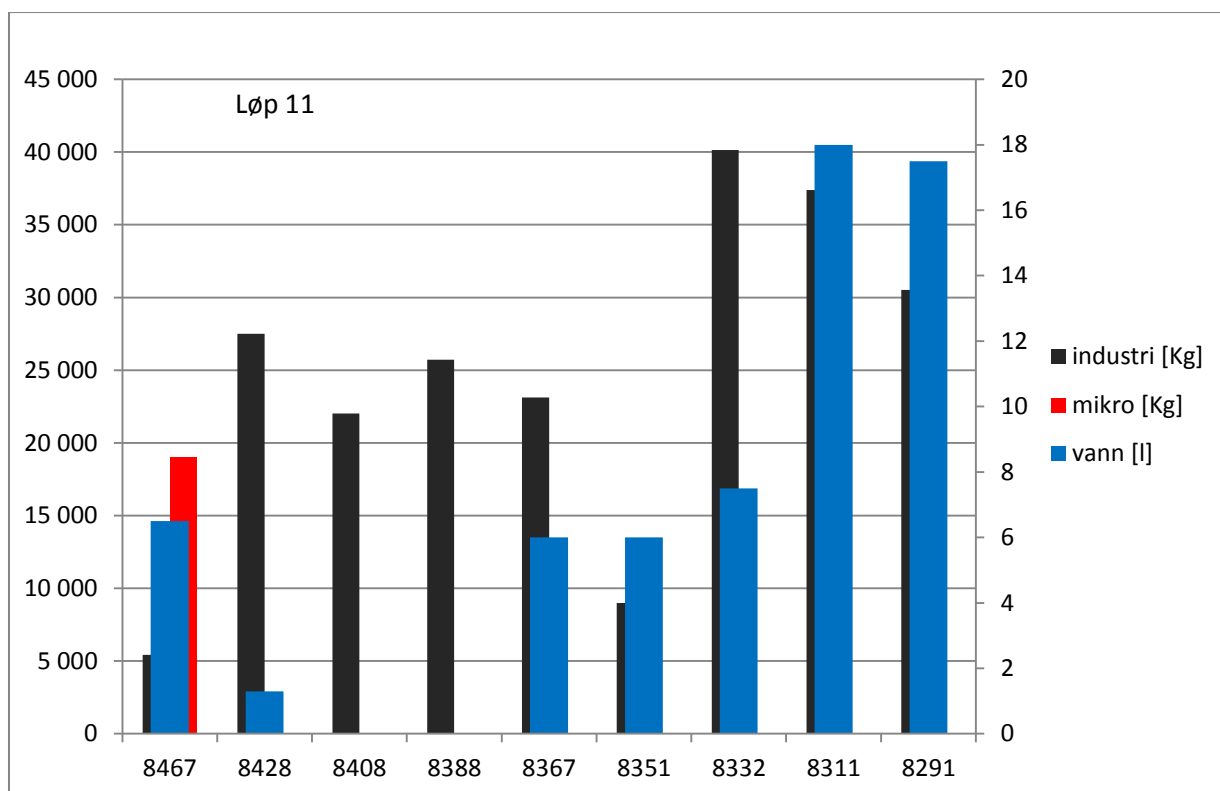
Vedlegg C4



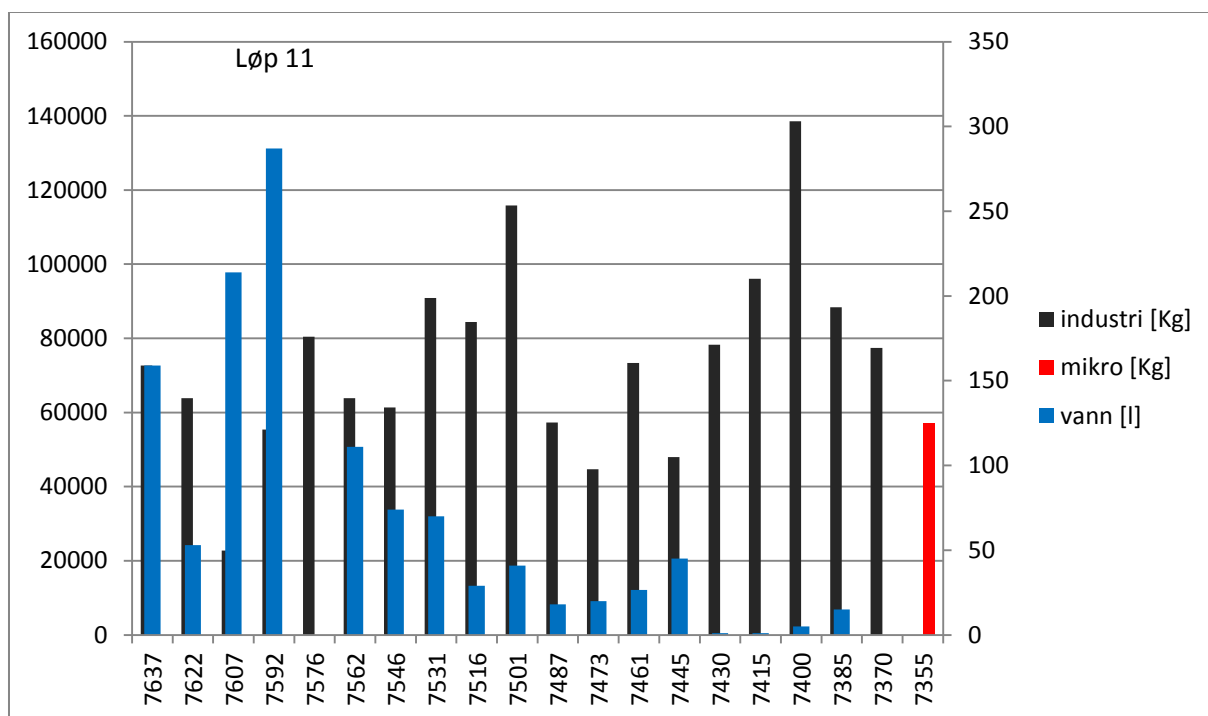
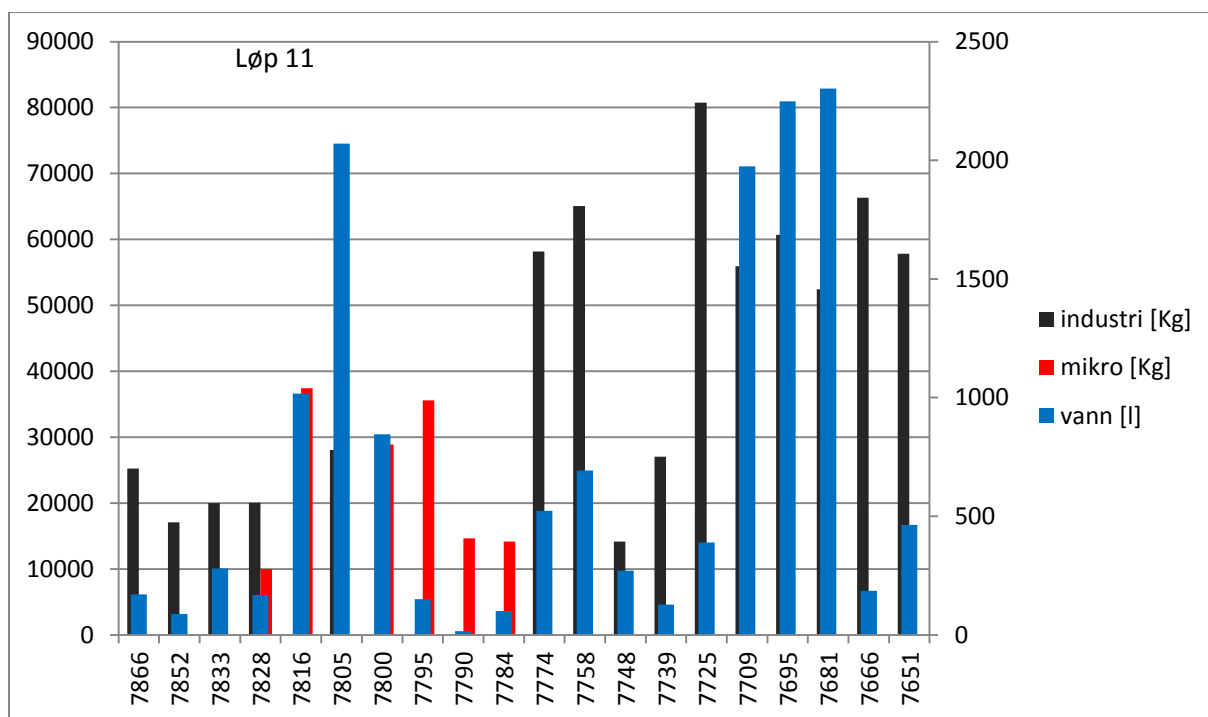
Vedlegg C4



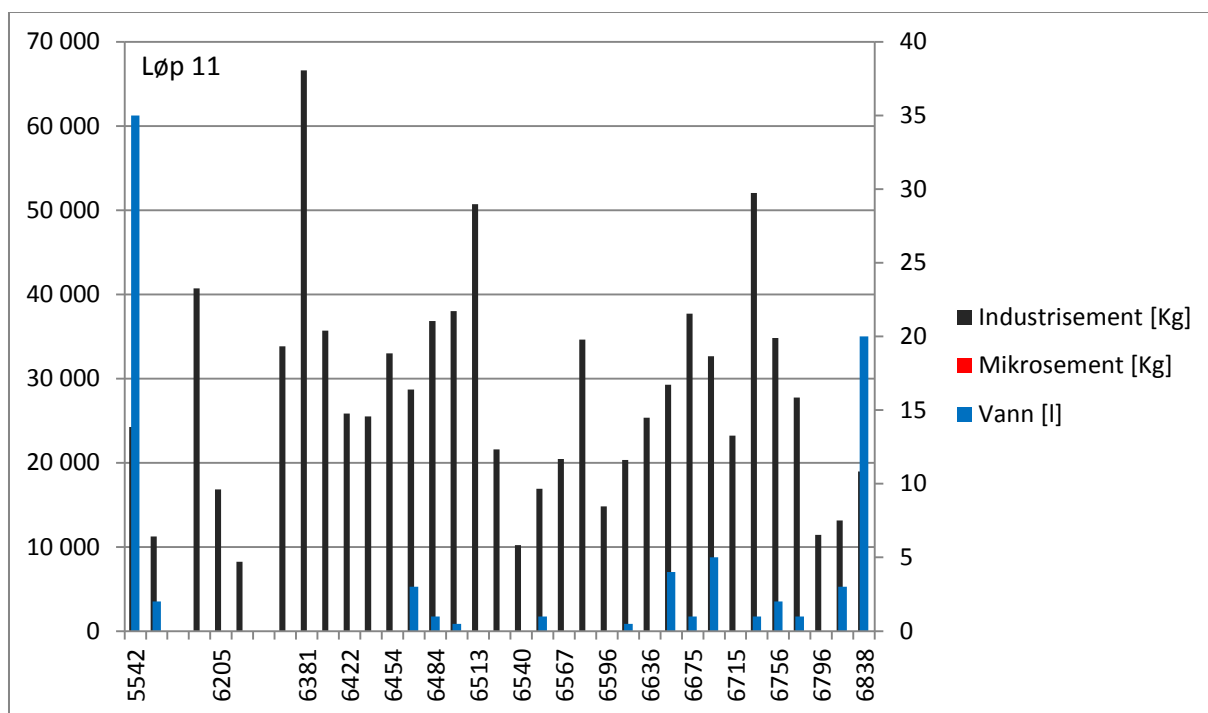
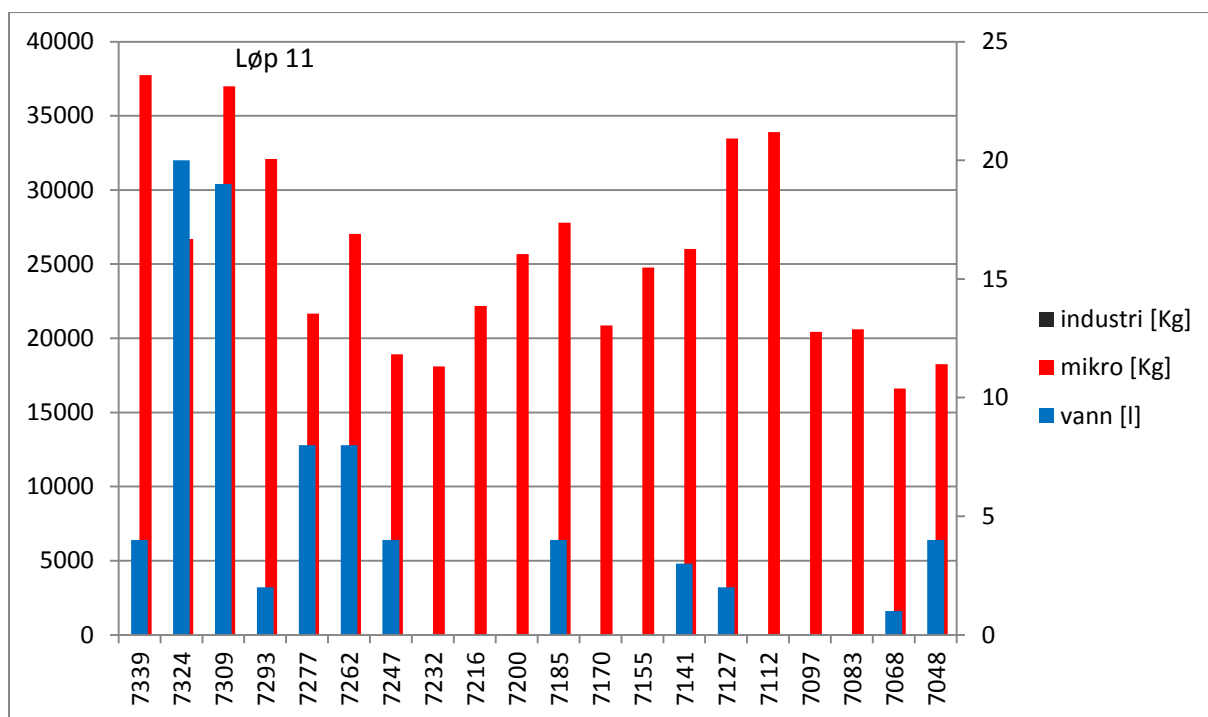
Vedlegg C5



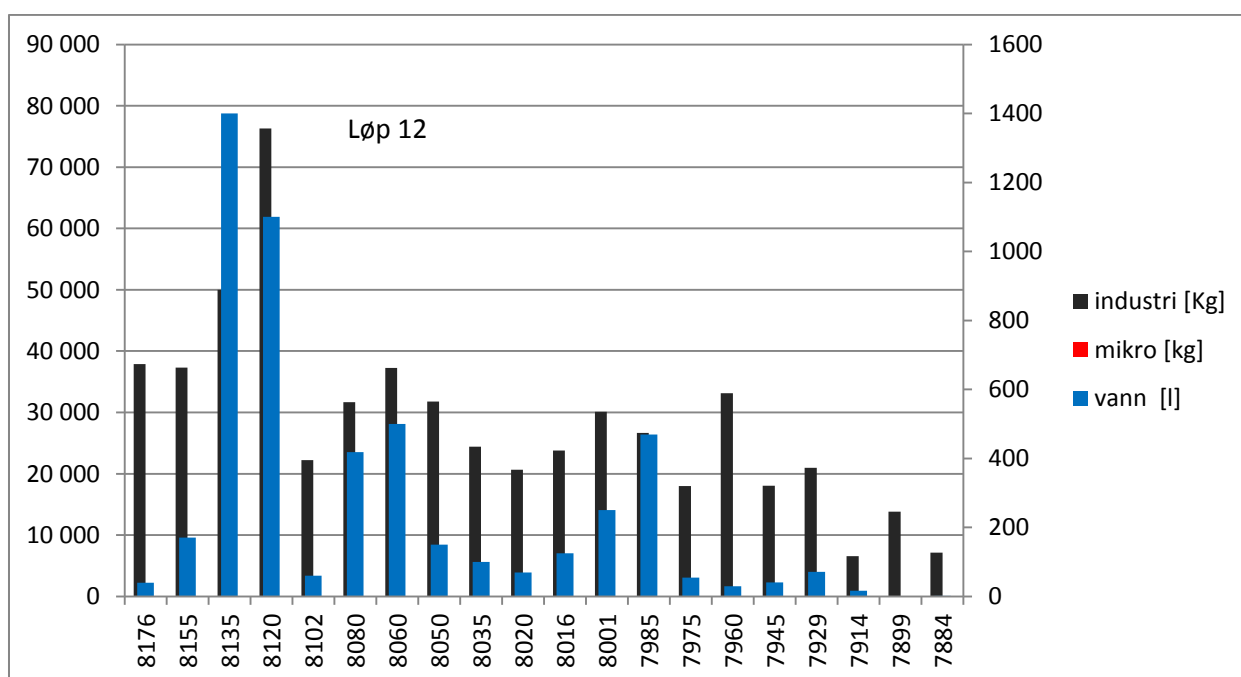
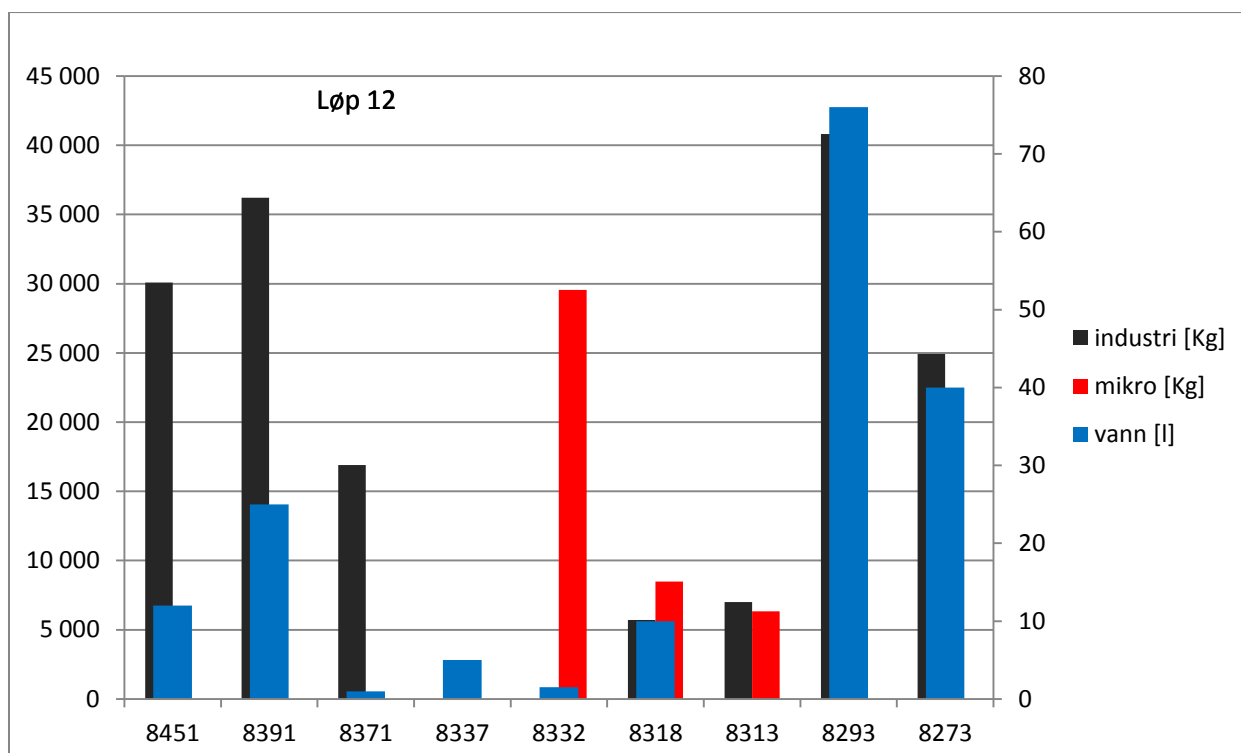
Vedlegg C5



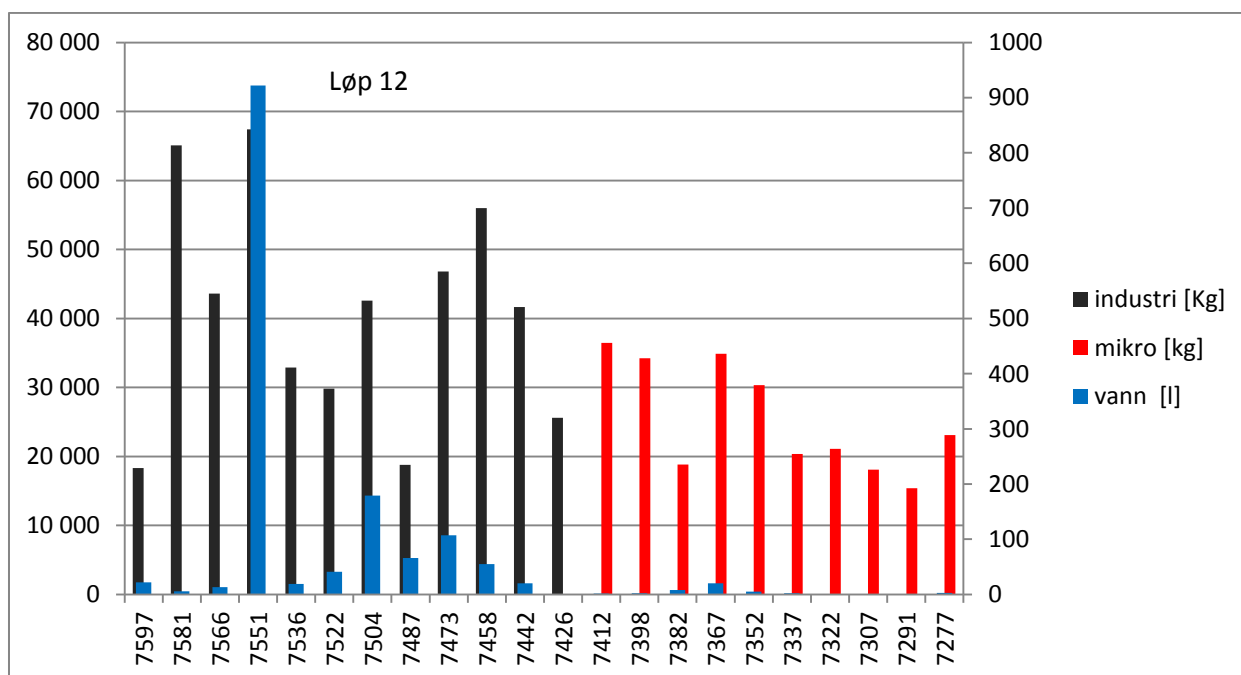
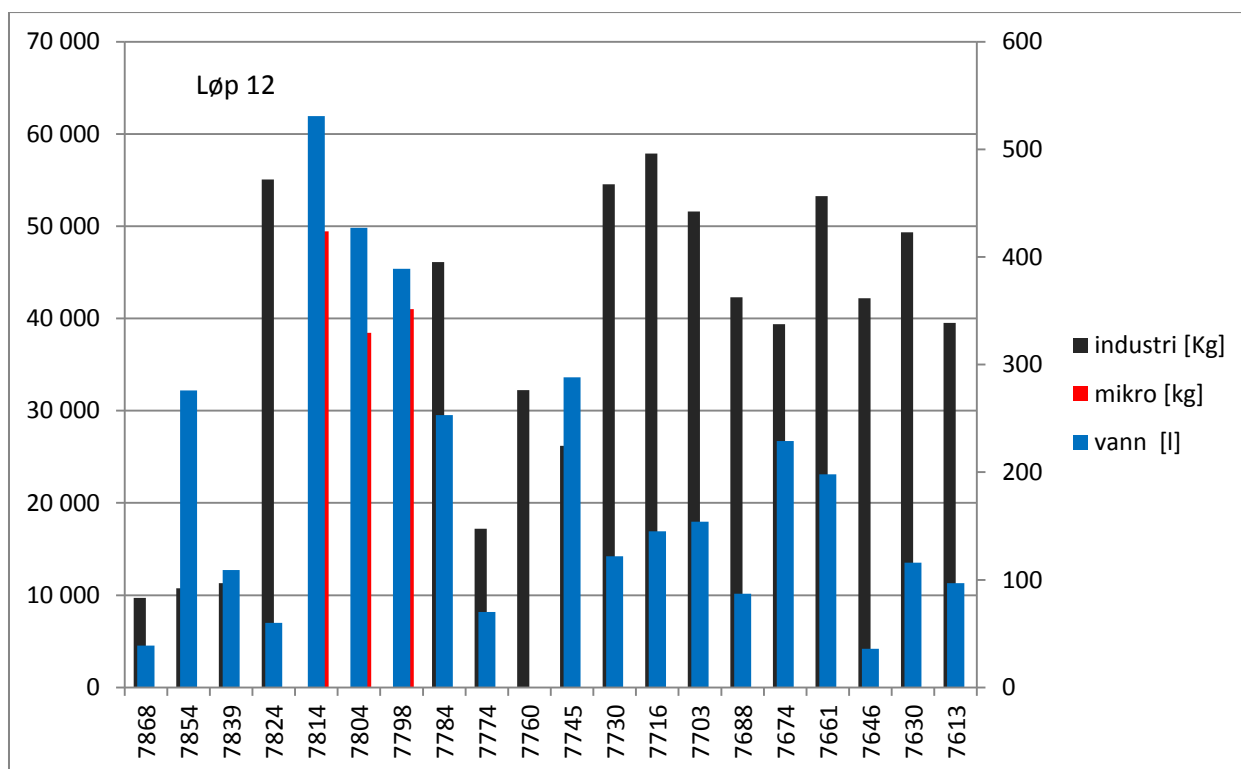
Vedlegg C5



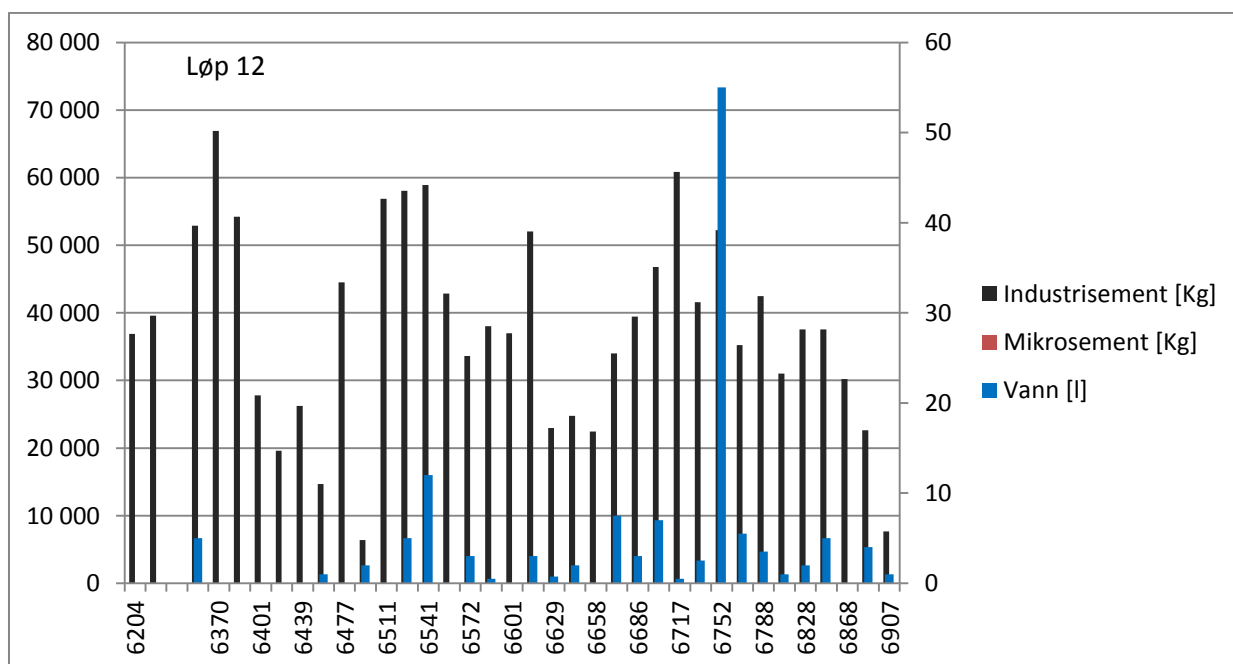
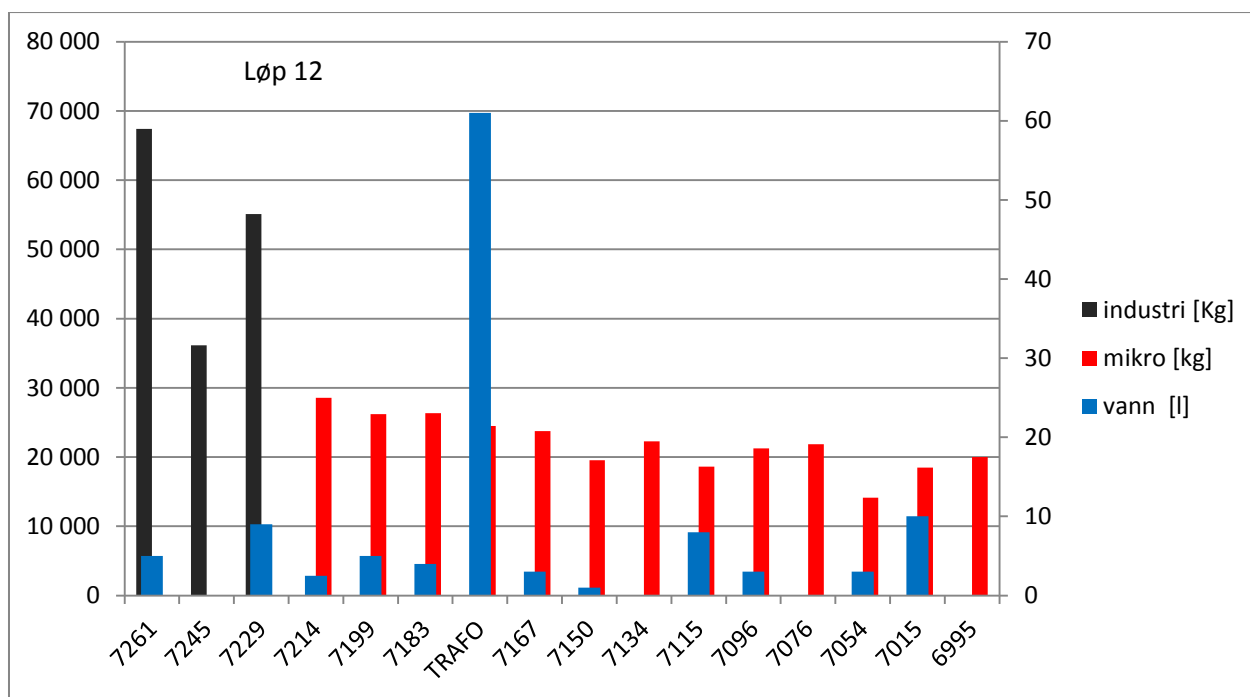
Vedlegg C6



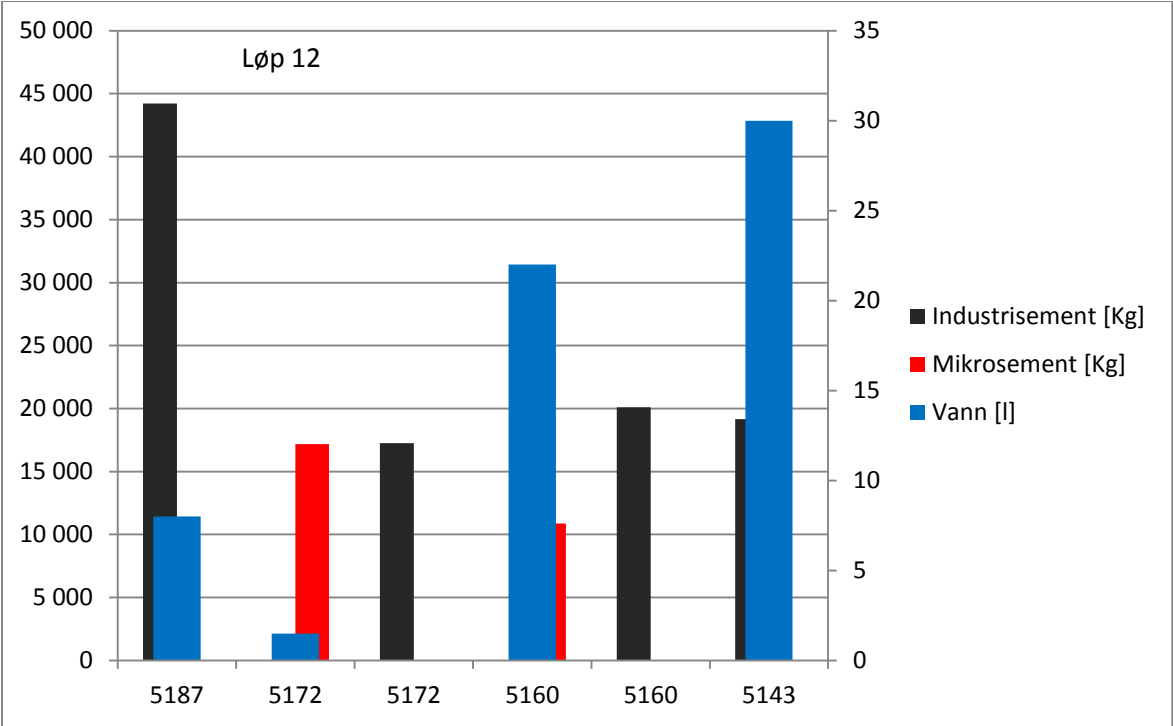
Vedlegg C6

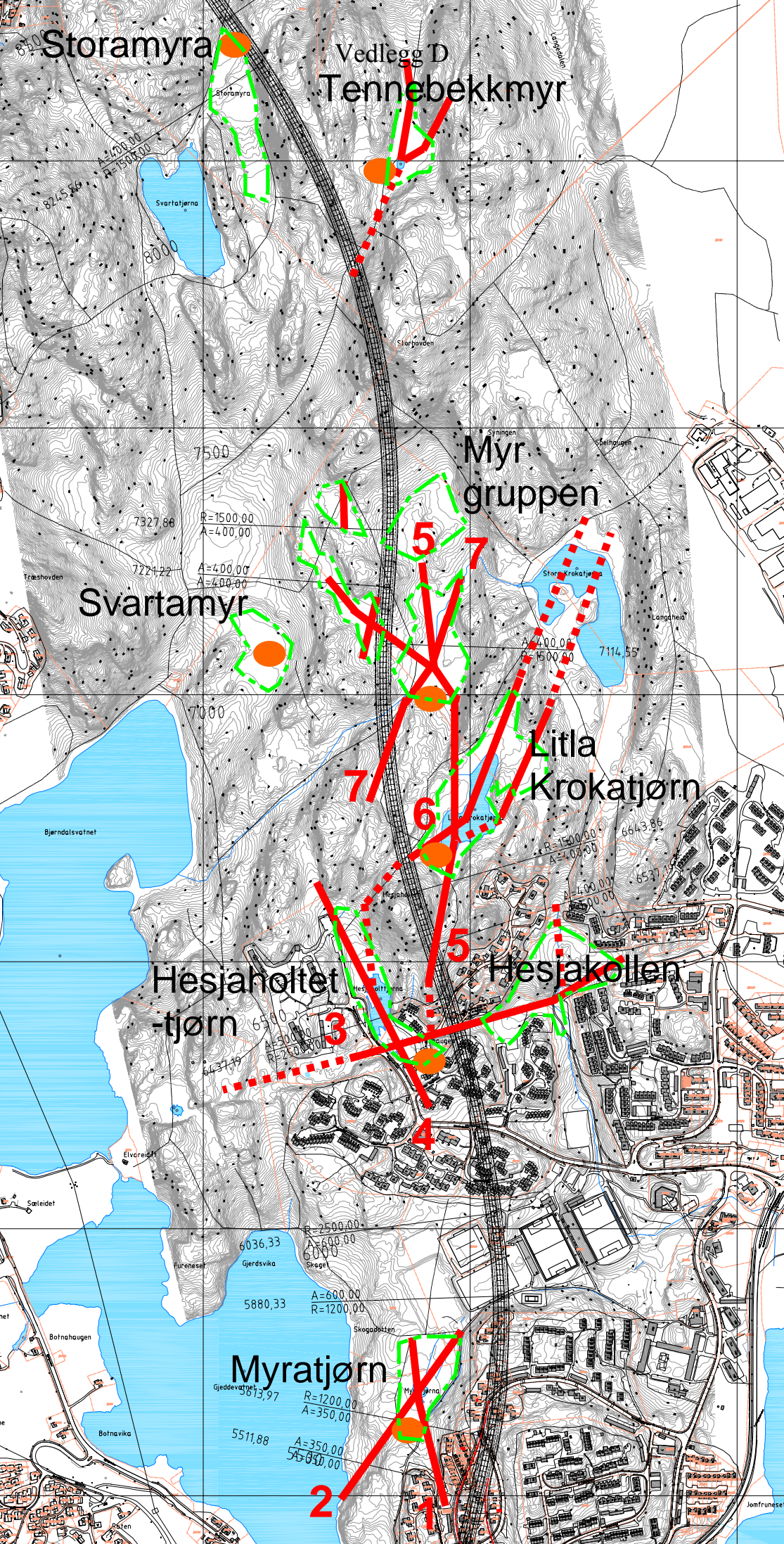


Vedlegg C6



Vedlegg C6





Storamyra

Vedlegg D
Tennebekkmyr

Myr
gruppen

Svartamyra

Litla
Krokatjørn

Hesjahollet-
tjørn

Hesjakollen

Myratjørn

$R=1500,00$
 $A=400,00$
 $A=400,00$
 $A=400,00$

$A=400,00$
 $R=1500,00$

$A=300,00$
 $R=2500,00$

$A=600,00$
 $R=1200,00$
 $A=350,00$

$A=350,00$
 $R=1200,00$
 $A=350,00$

Vedlegg E

Borrplan

Standard salverapport

Prosjekt

Firma	AF Gruppen Norge A/S
Anlegg	2279 Ringveg Vest -Byggetrinn 2
Tunnel	11000
Stuff	11L
Merknad	11_sonder_36_kryss

Savledata

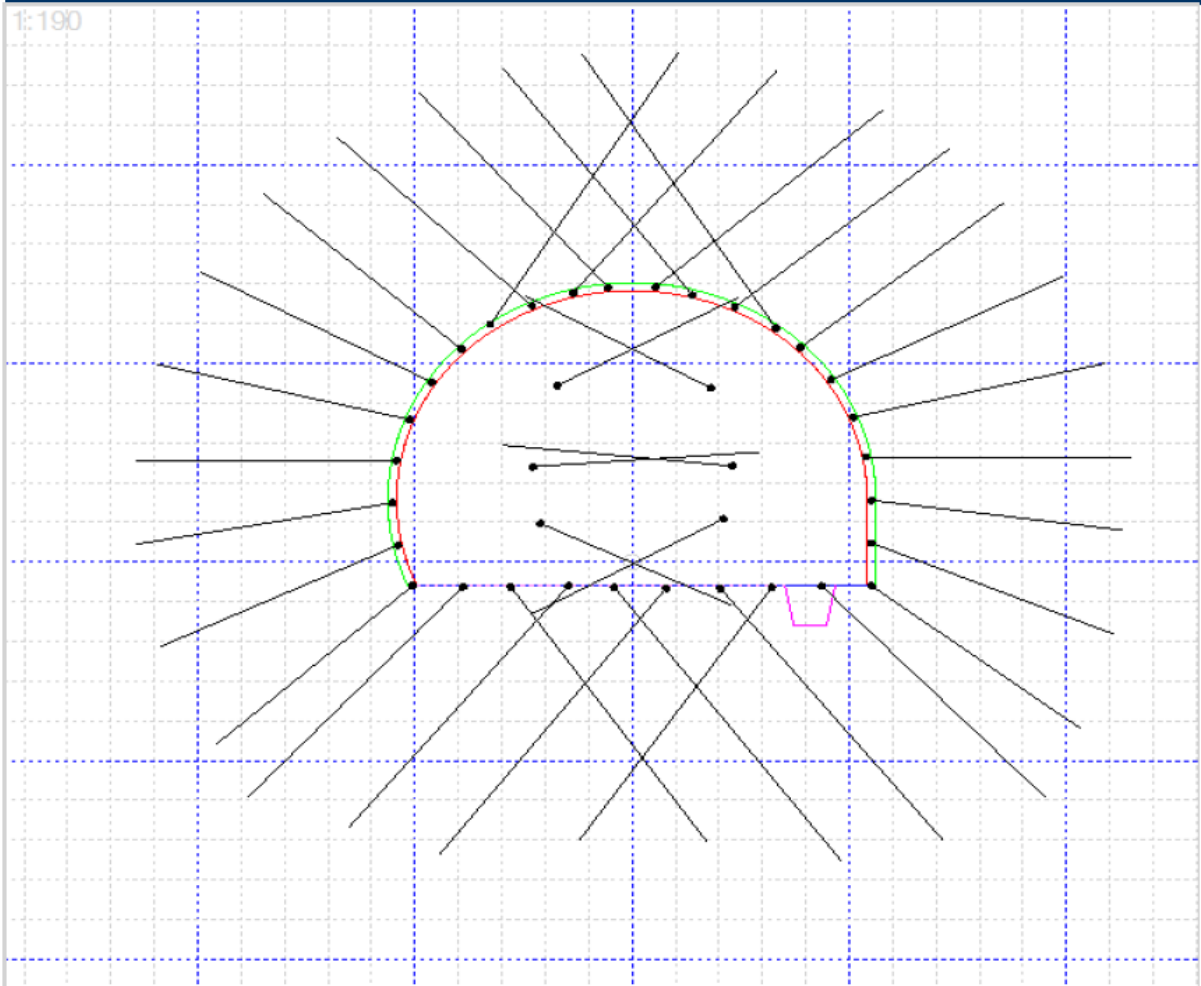
Borrmeter (m)	612
Areal kontur ansett (m ²)	68
Areal kontur bunn (m ²)	68
Areal borrhull ansett (m ²)	70
Areal borrhull bunn (m ²)	383

Antall hull

Sonder	36
=Totalt	36

Grafisk

1:190



Vedlegg F

Sone nr.	Profil-nummer ¹⁾		tolk fra ²⁾			mektighet (ca m) ³⁾	strøk, ° fra N	vinkel til traséen	berg-overd.
			T	S	R				
1	5100-5200	Bjorgeveien/Sandeide	j	j	–	75	N100Ø	90°	~5m
2	5880	Varden stadion	n	j	–	10	N65Ø	65°	~17m
3	6210	Allestaveien	j	–	–	10	N90Ø	85°	~10m
4	6385	Hesjakollen	j	j	j	15	N85Ø	90°	~21m
A	11-6400	—”—	n	n	j	5	?	?	~26m
B	6425	—”—	n	j	j	5	N60Ø?	85°?	~28m
6370-6440 som et soneområde									
C	6475	Hesjaholtet S	n	–	j	<5		90°	~48m
5	6560	Hesjaholtet, flere soner?	j	j	j	10	N25Ø	40°	~50m
6a	6715	Hesjaholtet N	j	j	j	<5	N25Ø	30°	~50m
6b	6760	Hesjaholtet N (sone D)	j	j	j	10	N35Ø	45°	~48m
6c	6850	Hesjaholtet N (sone E)	j	j	j	5	N15Ø	25°	~35m
6d	6940	Myr	j	n	n	5	N15Ø	25°	~32m
benevnes som soneområde 6									
7	7000	bekkedal fra myr	j	n	j	15	N40Ø	90°	~26m
	7160	Myr	n	j	n	15	N135?	45°?	~21m
	7340	utkant myr	n	j	–	<5	?	?	~26m
	7380	utkant myr	n	j	–	<5	?	?	~28m
5)	7450	slak skråning	n	j	j	5	?	?	~38m
8	7490	Storhovden N (sone F)	j	j	j	10	N35Ø	60°	~45m
9	7575	Storhovden	j	–	j	10	N45Ø	60°	~65m
10	7835	Tennebekkmyrdalen	j	j	j	20	N25Ø	45°	~70m
G		del av 10, 20mV s.løp?	n	–	j	<5	?	?	~
H	7900		n	–	j	<5	?	?	~90m
11	7960		n	–	j	<5	?	?	~100m
I	8000-8200	små, lange søkk ⁴⁾	j	–	j	<5 ?	N15V	10°	~90m
J	8300	Fjellkant	n	n	j	<5	?	?	~50m
K	8320	Fjellkant	n	n	j	<5	?	?	~50m
	8350	Fjellkant	n	j	n	<5	–	–	~50m
12	8370	Storamyra	j	j	j	10	N15Ø	50°	~32m
L	8795		n	–	j	5	–	–	<10m
13	8820	Påhugg	n	–	j	10	–	–	~5m

Skjematisk oversikt registrerte svakhetssoner. Tallene er sonens ”navn” fra de første geologiske detaljundersøkelsene (ref.20), bokstavene er ekstra soner indikert fra resistivitetsmålinger (ref.26), i tillegg kommer noen flere uten navn/ betegnelse. Se fotnoter 1,2,3,4,5) nedenfor.

1) mellom løpene i terreng, dvs middelverdiene av deres resp. profilnr. Bare ett løp er f.eks 11-6400.

2) T: topografi/feltarbeide, S: refraksjonssismikk, R: resistivitetsmålinger (j: ja, n: nei, –: ikke målt)

3) meget omtrentlig, stor usikkerhet i tunnelretningen, særlig ved liten krysningsvinkel.

4) disse er kalt sone 11 i denne rapporten.

5) denne er kalt 8 kun i resistivitetsrapporten. Sone 8 kalles sone F i resistivitetsrapporten.

Injeksjonsresepter

Rigg: "Jesus"

		Type Resept	Type sement	kg						
				Sement	Akselrator	Vann	Sillica slurry	Rheobuild	Glenium	Sum i kg
Resept nr	1	0,9	Industrisement	181,0		160	18,1kg (13L)		2,50	343,50
Resept nr	2	Halv 0,9	Industrisement	90,5		80,0	9kg (6L)		1,25	171,75
Resept nr	3	0,7	Industrisement	250,0		173			3,40	426,40
Resept nr	4	0,5	Industrisement	270,0		133			3,70	406,70
Resept nr	5	Halv 0,8	Microsement	100,0		80,0		1,4		181,35
Resept nr	6	Halv 0,7	Microsement	114,0		80,0		1,6		195,55
Resept nr	7	Halv 0,5	Microsement	136,5		68,3		1,9		206,60
Resept nr	8	0,8	Microsement	200,0		160		2,7		362,70
Resept nr	9	0,7	Microsement	228,0		160		3,1		391,10
Resept nr	10	0,5	Microsement	273,0		136,5		3,7		413,20
Resept nr	11	Vask				370				370,00
Resept nr	12	0,45	Industrisement	190,6		85,78			3,81	280,22

Ved styrt herding og industrisement, kall den for resept 20.

Ved styrt herding og mikrosement kall den for resept 25.

Storhovden

