

Analyse av pumpedata som verktøy for oppfølging av injeksjonsarbeider

Eivind Sundset Moe

Geologi

Innlevert: mai 2018

Hovedveileder: Eivind Grøv, IGP

Medveileder: Helen Andersson, Huth & Wien Engineering AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for geovitenskap og petroleum



Ingeniørgeologi Masteroppgave 60p

Studentens navn: Eivind Sundset Moe

Studieretning: Miljø- og geoteknologi, ingeniørgeologi

Tittel: Analyse av pumpedata som verktøy for oppfølging av injeksjonsarbeider

Faglærer: Eivind Grøv

Samarbeidspartner, bedrift el.l: SINTEF

Utfyllende tekst for oppgaven:

Hovedmålet med injeksjon er å hindre eller begrense innlekkasje. Samtidig ønsker naturlig nok alle parter at dette skal gjøres så billig som mulig. Derfor burde optimalisering av injeksjonsprosedyren være av stor interesse.

En utfordring ved injeksjon er at det er vanskelig å forutse forholdene i berget og man må derfor gjøre en rekke antagelser som man legger til grunn når man lager en prosedyre for injeksjon. Før et prosjekt starter opp er det gjennomført en rekke undersøkelser som skal hjelpe til å utarbeide denne prosedyren. I noen tilfeller går prosedyren for injeksjon gjennom en revidering etter at man har gjennomført noen omganger med injeksjonsarbeider. Disse er stort sett basert på erfaringer fra stuff.

Målet med denne oppgaven er å belyse hvordan analyse av pumpedata kan brukes som et verktøy til å følge opp injeksjonsarbeider, samt oppdatere injeksjonsprosedyren fortløpende. Et viktig punkt er at det arbeidet som skal gjennomføres må være forutsigbart. Derfor er målet også å utarbeide en oppskrift på hvordan endringer gjøres slik at entreprenør og byggherre kan forutse hva oppdatering av injeksjonsprosedyren vil innebære.

Ansvarlig faglærer og hovedveileder for oppgaven er prof. II Eivind Grøv, Institutt for geovitenskap og petroleum. Oppgaven utføres som en del av bransjeprojektet TIGHT.

Ekstern veileder er Helen Andersson fra Huth & Wien Engineering.

Innleveringsfrist: 15. mai 2018

Eivind Gjør

Faglærer

FORORD

Denne oppgaven er skrevet ved Institutt for geovitenskap og petroleum ved NTNU, og er avslutningen av det toårige masterprogrammet i geologi. Arbeidet med oppgaven har til tider vært vanskelig, med en del opp- og nedturer. Det har imidlertid vært utrolig lærerikt.

Jeg vil takke Leiv Livik fra Veidekke for at han ordnet slik at jeg kunne komme ned og være med på praktisk injeksjon ved Lyshorntunnelen. I tillegg vil jeg takke Ingvild Lausund fra Veidekke for hjelp med å anskaffe injeksjonsdata.

Videre vil jeg takke doktorgradsstudent Helene Strømsvik for mange gode diskusjoner og innspill i løpet av sommeren og høsten 2017. Samtidig vil jeg takke medveileder Helen Andersson for mange interessante diskusjoner angående kombinasjonsinjeksjon og utrolig engasjement.

Jeg skylder og min søster Astrid, og min kjæreste Mona en stor takk for korrekturlesing.

Til slutt vil jeg rette en stor takk til veileder Eivind Grøv for deling av nettverk, samt gode diskusjoner og tips når jeg sto fast.

SAMMENDRAG

I forbindelse med driving av tunneler og bergrom i Norge er håndtering av vannlekkasje inn til anlegget i mange tilfeller en utfordring. Det er ofte vanskelig å forutse omfanget av innlekkasjene da den avhenger av en del parametere det er vanskelig å ha fullstendig kontroll på, som for eksempel spenningsforhold, sprekketetthet, sprekkekarakter og lokalisering av svakhetssoner for å nevne noen. Avhengig av anleggets bruk og det omkringliggende områdets sensitivitet bestemmes det tetthetskrav for anlegget før driving. I Norge er forinjeksjon med sement og høyt trykk den vanligste metoden for å oppnå tilstrekkelig tetthet.

Sementbasert forinjeksjon i Norge er utviklet gjennom mange år med erfaringer. Men det er fortsatt vanskelig å forutse tids- og masseforbruket til injeksjonsarbeidene ved en tunnel. Denne uforutsigbarheten gjør planlegging av videre driving vanskelig, i tillegg til at det er utfordrende å forutse kostnadene til injeksjon. Målet med denne oppgaven er å vise hvordan pumpedata kan benyttes som verktøy til å følge opp injeksjonsarbeider.

I denne oppgaven er pumpedata fra Eysturøyartunnelen på Færøyene brukt til å analysere tids- og masseforbruket av de utførte injeksjonsarbeidene. Det er i tillegg fremstilt grafer som viser trykkutviklingen og sementstrømningen for injeksjonsforløp. Ved å benytte tids- og masseanalysen sammen med grafene av injeksjonsforløp er «problemhull» med stort forbruk og lang injeksjonstid uten tilfredsstillende utvikling filtrert ut. Som et grep for å kutte ned på tids- og masseforbruket for disse hullene er det utført beregninger for bruk av kombinasjonsinjeksjon. Beregningene viser at det er store potensielle innsparinger å oppnå i tids- og masseforbruket.

Arbeidet med injeksjonsforløpene førte til fremstillingen av en ny prosedyre som kan benyttes mens injeksjonen foregår, og som kan brukes sammen med kombinasjonsinjeksjon til å kutte tids- og masseforbruket. Den nye prosedyren ble benyttet på data fra både Eysturøyartunnelen på Færøyene, og Lyshorntunnelen like sør for Bergen. Dette er to prosjekter drevet i helt ulik geologi. Bruken av den nye prosedyren og beregninger for bruk av kombinasjonsinjeksjon viser at man potensielt kunne spar omtrent 80 tonn sement og nesten 70 timer injeksjonstid ved å følge prosedyren.

ABSTRACT

In relation with the excavation of underground structures in Norway, handling of water leakage into the structures is often a challenge. It is often difficult to predict the extent leakage as it depends on several parameters it is difficult to have complete knowledge of. Such as stress conditions, fracture density, fracture characteristic and the location of weakness zones, just to mention a few. Depending on the usage of the underground structure, and the sensitivity of the surrounding area, a leakage requirement is determined before excavation. In Norway, pre-excavation grouting with cement and high injection pressures is most common method of achieving the desired leakage requirement.

Cementbased pre-excavation grouting in Norway is developed through many years of experience. But it is still difficult to predict the time and amount of cement the grouting works will need. This uncertainty makes the planning of further excavation difficult, in addition to making it challenging to predict the cost of the grouting. The aim of this study is to show how data from grouting works can be utilized as a tool to follow up the grouting works.

In this thesis pump data from the Eysturøyartunnelen at the Faroe Islands has been used to analyze the time and cement masses of the executed grouting works. Additionally, graphs showing the pressure development and cementflow has been produced. By utilizing the time- and mass analysis together with the graphs, “problemholes” with great cement consumption and long pump time without satisfactory development has been localized. As a measure to reduce the time- and mass consumption for these holes calculations for the use of combination grout has been performed. These calculations show that it is possible to achieve savings of both time and masses.

The work on these data lead to the creation of a new procedure that can be utilized in real time during grouting works and can be used together with combination grouting to reduce time- and mass consumption. The new procedure was used on data from both the Eysturøyartunnelen at the Faroe Islands and on the Lyshorntunnelen just south of Bergen. These two projects are excavated in completely different geology. The use of the new procedure together with calculations for the use of combination grouting showed that there are potential savings of 80 tons of cement and almost 70 hours of work.

Innhold

FORORD.....	III
SAMMENDRAG.....	V
ABSTRACT.....	VII
FIGURLISTE.....	XI
TABELLISTE.....	XIII
1 INNLEDNING.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Formål med oppgaven.....	1
2 INJEKSJON.....	3
2.1 Tetthetskrav og kostnader.....	4
2.2 Bergmassens egenskaper.....	5
2.3 Forinjeksjon.....	7
2.4 Etterinjeksjon.....	10
2.5 Injeksjonsprosedyre.....	10
2.6 Sementbaserte injeksjonsmasser.....	12
2.7 Injeksjonstrykk.....	16
2.8 Stoppkriterie.....	17
2.9 Kjemisk injeksjon.....	19
2.10 Kombinasjonsinjeksjon.....	22
2.11 Kontrakter.....	23
3 DATAINNSAMLING OG ANALYSEMETODE.....	25
3.1 Studieområde.....	25
3.2 Bever Team.....	27
3.3 Tid og masseforbruk.....	28
3.4 QP-indeks.....	30
3.5 Fremstilling av grafer.....	30

3.6	Visuell vurdering av injeksjonsforløp	32
3.7	Kombinasjonsinjeksjon	36
4	RESULTATER	45
4.1	Eysturøyartunnelen	45
4.2	Funn – Ny prosedyre for vurdering av injeksjonsforløp	66
5	DISKUSJON	77
5.1	Tids- og masseforbruk	77
5.2	Prosedyre vurdering av injeksjonsforløp	79
5.3	Visuell vurdering av injeksjonsforløp	80
5.4	Ny prosedyre for vurdering av injeksjonsforløp.....	81
5.5	Kombinasjonsinjeksjon	82
5.6	Feilkilder.....	84
6	KONKLUSJON	87
7	FORSLAG TIL VIDERE ARBEID	89
	REFERANSER	91
	VEDLEGG	93

FIGURLISTE

Figur 2.1: Viser kostnaden (i euro) som skal til for å oppnå en gitt tetthetsgrad/innlekkasje (Grøv og Woldmo, 2012).....	4
Figur 2.2: Boring av skjerm til forinjeksjon. Legg merke til tidligere hull og fylte sprekker (gult fyll) (Statens Vegvesen, 2011).....	7
Figur 2.3: Ønsket omfang av injisert område (etter Aarset et. al., 2010).	7
Figur 2.4: Pakker (til venstre) festet til injeksjonsstav. Munnstykke for akseleratorbruk på toppen (Hognestad et al., 2010).	8
Figur 2.5: Pågående injeksjon ved Lyshorntunnelen.....	9
Figur 2.6: Eksempel på injeksjonsprosedyre (Hognestad et al., 2010).....	11
Figur 2.7: Viser sammenhengen mellom tidlig fasthet og sementens kornstørrelse (Pantazopoulos et al., 2012).....	14
Figur 2.8: Filterkake. Alternativ 1 viser hvordan sprekkeåpningen kan blokkeres. Alternativ 2 er blokkering ved en innsnevring av sprekken (Hansson, 1994).	15
Figur 2.9: Normal trykkbruk i forskjellige land. (A) er for godt fjell i Sverige. (B) er tommelfingerregel for Europa – 1 bar/m dybde. (C) er vanlig fjell i Sverige. (D) er dårlig fjell i Sverige. (E) er amerikansk praksis 1 psi/fot dybde. Norsk praksis ligger til venstre for (A) (Warner, 2004).....	17
Figur 2.10: Viser GIN-kurver. Det plottes volum injisert mot injeksjonstrykk (Lombardi og Deere, 1993).....	19
Figur 2.11: Reaksjonsforløpet for polyuretan (Bogdanoff, 1990).	22
Figur 3.1: Tunnelløpet for Eysturøyartunnelen. Hentet fra P/F Eystur- og Sandoyartunlar (2018).....	26
Figur 3.2: Lokalisering av Lyshorntunnelen (Statens Vegvesen, 2014).	27
Figur 3.3: Viser hvordan flytrapporten eksportert fra Bever Team ser ut.	28
Figur 3.4: Figur fremstilt av kandidaten. Øverst er en graf som viser strømning og trykk mot tid. Nederst er QP-indeks mot tid	31
Figur 3.5: Viser et injeksjonsforløp med en pause i pumpingen.....	31
Figur 3.6: Eksempel på injeksjonsforløp som viser tilfredsstillende trykkoppbygging etter 90 minutter, dermed kan videre pumping forsvares. Havner i kategori 1.	33
Figur 3.7: Eksempel på injeksjonsforløp som ikke viser tilfredsstillende trykkoppbygging etter 90 minutter. Havner i kategori 2.	33
Figur 3.8: Prosedyre for vurdering av injeksjonsforløpene ved Eysturøyartunnelen.....	35
Figur 4.1: Fordeling av antall hull per skjerm ved Hvitanesstuppen.	46
Figur 4.2: Masseforbruk per skjerm ved Hvitanesstuppen.	47
Figur 4.3: Viser fordelingen av tidsbruk per skjerm, samt akkumulert tidsbruk ved Hvitanesstuppen.	48
Figur 4.4: Fordeling av antall hull per skjerm ved Strendurstuppen.	51
Figur 4.5: Masseforbruk per skjerm ved Strendurstuppen.....	52
Figur 4.6: Viser fordelingen av tidsbruk per skjerm, samt akkumulert tidsbruk ved Strendurstuppen.	54
Figur 4.7: Sammenheng mellom masseforbruk og tidsbruk ved Eysturøyartunnelen.	57

Figur 4.8: Viser sementforbruket for opprinnelig injeksjonsopplegg og for kombinasjonsinjeksjon ved Eysturøyartunnelen.	62
Figur 4.9: Viser tidsbruken for opprinnelig injeksjonsopplegg og for kombinasjonsinjeksjon ved Eysturøyartunnelen.	63
Figur 4.10: Viser potensielle besparelser for hullene i kategori 2 ved Eysturøyartunnelen om det hadde blitt utført kombinasjonsinjeksjon på dem. I dette tilfellet vil materialkostnadene for kombinasjonsinjeksjon øke i forhold til det opprinnelige injeksjonsopplegget. Sementkostnad er 1 kr/kg. Polyuretankostnad er 100 kr/kg. Timekostnad er 3 000 kr/time.	64
Figur 4.11: Viser potensielle besparelser for hullene i kategori 2 ved Eysturøyartunnelen om det hadde blitt utført kombinasjonsinjeksjon på dem. I dette tilfellet vil det oppnås besparelser både for materialer og tidsbruk. Sementkostnad er 3 kr/kg. Polyuretankostnad er 150 kr/kg. Timekostnad er 7 000 kr/time..	65
Figur 4.12: Flytskjema som viser ny prosedyre for vurdering av injeksjonsforløp.	67
Figur 4.13: Viser sementforbruket for opprinnelig injeksjonsopplegg og for kombinasjonsinjeksjon ved Eysturøyartunnelen.	71
Figur 4.14: Viser tidsbruken for opprinnelig injeksjonsopplegg og for kombinasjonsinjeksjon ved Eysturøyartunnelen.	72
Figur 4.15: Viser potensielle besparelser for hullene i kategori 2 ved Eysturøyartunnelen om det hadde blitt utført kombinasjonsinjeksjon på dem. I dette tilfellet vil materialkostnadene øke i forhold til det opprinnelige injeksjonsopplegget. Sementkostnad er 1 kr/kg. Polyuretankostnad er 100 kr/kg. Timekostnad er 3 000 kr/time.	73
Figur 4.16: Viser potensielle besparelser for hullene i kategori 2 ved Eysturøyartunnelen om det hadde blitt utført kombinasjonsinjeksjon på dem. I dette tilfellet vil materialkostnadene øke i forhold til det opprinnelige injeksjonsopplegget. Sementkostnad er 3 kr/kg. Polyuretankostnad er 150 kr/kg. Timekostnad er 7 000 kr/time.	74

TABELLISTE

Tabell 2-1: Stegene i Lugeon-test (Geotechdata, 2015)	6
Tabell 2-2: Sementtyper delt inn etter kornstørrelse (Statens Vegvesen, 2015).	12
Tabell 2-3: Effekten tilsetningsstoffer har på flyteegenskapene til en injeksjonsmasse. Rød farge betyr sterkere effekt (Stille, 2015).	15
Tabell 3-1: Anbefalte mengder materialer til kombinasjonsinjeksjon etter vannforhold i borhull. Tabellen er utarbeidet av Huth & Wien Engineering (2012b).	37
Tabell 3-2: Mengde sement og tidsbruk brukt i det opprinnelige injeksjonsopplegget.	39
Tabell 3-3: Beregning av mengder til en runde kombinasjonsinjeksjon. Eksempelparametere.	40
Tabell 3-4: Mengde sement og polyuretan brukt i fase 2 av kombinasjonsinjeksjonen, samt tidsbruken.	41
Tabell 3-5: Mengde sement og tidsbruk for eksempelhullet i fase 1 av kombinasjonsinjeksjonen.	41
Tabell 3-6: Samlet tids- og masseforbruk av kombinasjonsinjeksjon for fase 1 og 2.	41
Tabell 3-7: Oppsummering av tids- og masseforbruket for begge injeksjonsoppleggene, samt forskjellene i forbruket mellom oppleggene.	42
Tabell 3-8: Sammenligning av kostnader for injeksjonsoppleggene og besparelser dersom kombinasjonsinjeksjon benyttes.	43
Tabell 4-1: Mengdeanalyse for skjermene ved Hvitanes.	47
Tabell 4-2: Tidsanalyse for skjermene ved Hvitanes.	48
Tabell 4-3: Mengdeanalyse for hull ved Hvitanes	48
Tabell 4-4: Tidsanalyse for hullene ved Hvitanes.	49
Tabell 4-5: Mengdeanalyse for skjermene ved Strendurstuffen.	53
Tabell 4-6: Tidsanalyse for skjermene ved Strendurstuffen.	53
Tabell 4-7: Mengdeanalyse for hullene ved Strendurstuffen.	55
Tabell 4-8: Tidsanalyse for hull ved Strendurstuffen.	55
Tabell 4-9: Mengde- og tidsanalyse fra samtlige hull ved Eysturøyartunnelen.	56
Tabell 4-10: Injeksjonsforløpene som havnet i kategori 2, samt medgått mengde injeksjonsmasse for de respektive skjermene.	58
Tabell 4-11: Viser tid- og masseforbruket til hullene i kategori 2. Både for opprinnelig injeksjonsopplegg og for kombinasjonsinjeksjon.	59
Tabell 4-12: Kostnadsberegning for injeksjon av hull i kategori 2.	60
Tabell 4-13: Eksempel som viser når i injeksjonsforløpet den visuelle vurderingen finner sted.	68
Tabell 4-14: Antall visuelt vurderte hull fra Eysturøyartunnelen.	68
Tabell 4-15: Opprinnelig forbruk, forbruk ved alternativt opplegg samt potensielle besparelser ved å benytte kombinasjonsinjeksjon ved Eysturøyartunnelen.	69
Tabell 4-16: Antall visuelt vurderte hull fra Lyshorntunnelen.	75
Tabell 4-17: Opprinnelig forbruk, forbruk ved alternativt opplegg samt potensielle besparelser ved å benytte kombinasjonsinjeksjon ved Lyshorntunnelen.	76

1 INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

Norges beliggenhet og topografi gjør at driving av underjordsanlegg er svært aktuelt, og tunnelbransjen i Norge har lang erfaring med driving av slike anlegg. I mange tilfeller er det en utfordring å håndtere vanninntrenging fra den omkringliggende bergmassen, til tross for tunnelbransjens erfaring. Det drives tunneler over hele landet og stort sett ligger disse under grunnvannsspeilet. Faren for senkning av grunnvannstanden er en høyst reell problemstilling og konsekvensene av en slik senkning kan bli store.

Helt siden driving av Romeriksporten hvor Puttjern og Lutvann forsvant grunnet senkning av grunnvannstanden har lekkasjeutfordringer i tunnel og bergrom virkelig kommet på banen. Å kontrollere innlekkasjene til underjordsanlegg står høyt på prioriteringslisten. Den mest utbredte måten å kontrollere innlekkasje til et underjordsanlegg er å benytte en injeksjonsmasse som fyller vannførende sprekker slik at lekkasjen når et akseptabelt nivå. I Norge er forinjeksjon med sementbasert masse og høyt trykk den etablerte løsningen. Denne løsningen er basert på empiri fra tidligere injeksjonsarbeider.

I 2014 startet forskningsprosjektet TIGHT (True Improvement in Grouting High pressure Technology for tunnelling) opp som et KPN-prosjekt (Kompetanseprosjekt for Næringslivet). Formålet med prosjektet er å optimalisere injeksjonsprosessen og gi svar på hva som fysisk skjer i bergmassen under injeksjon. TIGHT er finansiert gjennom Norges Forskningsråd og det er SINTEF som er prosjekteier. Denne oppgaven er skrevet i samarbeid med TIGHT.

1.2 Formål med oppgaven

Formålet med oppgaven er å vise hvordan pumpedata kan benyttes til å forbedre injeksjonsprosedyren ved fortløpende oppfølging, og dermed spare tid og kostnader. Dette skal utføres ved å samle inn data fra ulike prosjekter og analysere disse. Det som skal gjennomføres er:

- Analysere trykk og medgåtte mengder.
- Belyse hvordan analyse av pumpedata kan brukes som et verktøy til å følge opp injeksjonsarbeider.
- Utarbeide et forslag til hvordan endringer gjøres slik at entreprenør og byggherre bedre kan forutse hva en oppdatering av injeksjonsprosedyren vil inneholde.

2 INJEKSJON

Når en tunnel eller en annen type underjordsanlegg skal drives vil det i forkant settes innlekkasjekrav. Dette kravet setter grensen for hvor mye vann man kan tillate inn i anlegget. I tunneldriving er dette kravet vanligvis oppgitt som liter per minutt per 100m (l/min/100m).

Faktorer som påvirker innlekkasjekravet er ifølge Hognestad *et al.* (2010):

- Anleggets formål
- Anleggets plassering
- Anleggets overdekning og størrelse
- Lekkasjekonsekvenser – økonomiske og miljømessige
- Sikkerhetsmessige forhold
- Permanent og midlertidig funksjonskrav
- Økonomi

En metode for å begrense innlekkasjen er å gjøre selve periferien av underjordsanlegget tettere. Dette kan blant annet gjøres ved hjelp av membran og betongutstøpning. Det er en metode som i hovedsak benyttes for å beskytte tekniske installasjoner.

En annen måte å redusere innlekkasjen til underjordsanlegget er å redusere bergmassens permeabilitet i området rundt anlegget. Dette gjøres ved å injisere bergmassen med et tetningsmiddel (injeksjonsmasse), som trenger inn i, og forsegler vannførende sprekker. Injeksjon er fokuset for denne oppgaven og vil bli nærmere presentert i dette kapitlet.

Injeksjon av bergmassen kan utføres på flere måter. Felles for alle er at målet er å redusere bergmassens konduktivitet ved å fylle sprekker og hulrom med en injeksjonsmasse.

Faktorer som påvirker om injeksjonen blir vellykket er etter Davik *et al.* (2002):

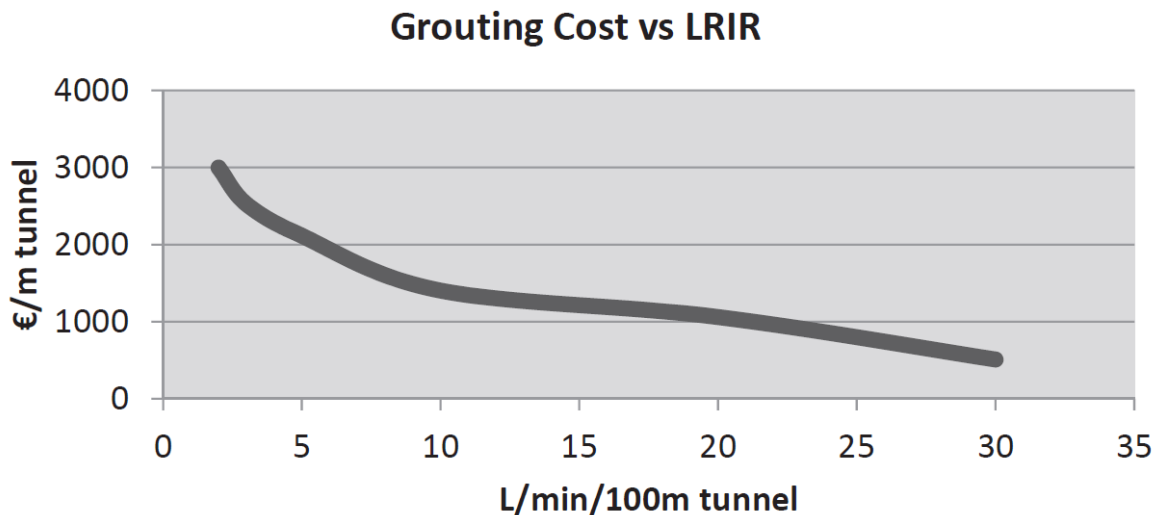
- Bergmasseforhold
- Injeksjonsmassens materialegenskaper
- Injeksjonsmetode

I det følgende vil forskjellige tilnærminger, typer injeksjonsmasser og injeksjonsmassenes egenskaper presenteres. Men først litt om faktorer som bestemmer graden av behovet for injeksjon.

2.1 Tetthetskrav og kostnader

Kravene til tetthet avhenger som tidligere nevnt av flere faktorer. Eksempelvis vil en jernbanetunnel under tettbebygde strøk ha veldig strenge krav til innlekkasje, ettersom en senkning av grunnvannsstanden blant annet kan føre til store skader på miljø og medføre setningsskader. I tillegg vil slitasje på installasjoner øke ved høyere vanninntrenging, noe som igjen vil føre til høyere vedlikeholdskostnader. Derimot vil en veitunnel i rurale strøk ha mye mildere krav. Generelt sett kan vi dele inn tunneler i tre klasser etter tetthetskrav (Grøv og Woldmo, 2012):

- 2 – 10 l/min/100m tunnel for urbane tunneler i sensitive områder
- 10 – 30 l/min/100m tunnel for undersjøiske- og rurale tunneler
- >30 l/min/100m tunnel for tunneler uten spesifikke krav.



Figur 2.1: Viser kostnaden (i euro) som skal til for å oppnå en gitt tetthetsgrad/innlekkasje (Grøv og Woldmo, 2012).

Injeksjonskostnader øker naturlig nok med strengere innlekkasjekrav, men dette er ikke et lineært forhold. Figur 2.1 viser at det er mye dyrere å redusere innlekkasjen fra 10 til 5 L/min/100m enn fra 30 til 25 L/min/100m (Grøv og Woldmo, 2012). For prosjekter med strenge innlekkasjekrav og krevende geologi vil injeksjonskostnadene være betydelige. Holmøy, Strømsvik og Rise (2015) skriver at kostnader til injeksjon typisk kan ligge mellom 20-30% av de totale drivekostnadene ved tunneldriving.

En del av kostnadene Holmøy, Strømsvik og Rise (2015) nevner går til sement og andre materialer som trengs for injeksjonsprosessen, men det som virkelig driver injeksjonskostnadene opp er tidsbruken. I 1998 var ressurskostnaden på stuff (tunnelfronten)

typisk 5000-8000 kr/time (Beitnes, 1998), dette tilsvarer 7 375-11 800 kr/time etter dagens verdi. Forinjeksjon (se kap. 2.3) er tidkrevende og ettersom det foregår på stoff kan det ikke utføres andre arbeider der mens injeksjon foregår. Til tross for dette foretrekkes forinjeksjon over etterinjeksjon (se kap. 2.4).

2.2 Bergmassens egenskaper

Bergmassen er byggematerialet tunneler og underjordsanlegg bygges i, og er en faktor som påvirker forutsetningene for injeksjonen. Geologiske forhold som bergartstype, spenningsforhold, oppsprekkingsgrad, sprekkeorientering, sprekkeåpning, sprekkeruhet, sprekkeinnfyllinger og kommunikasjonen mellom vannførende sprekker er parametere som er avgjørende for vanskelighetsgraden av injeksjonen (Davik *et al.*, 2002). Spesielt parametere som omhandler sprekkeforhold kan variere veldig, og kan dermed være vanskelig å forutse (Warner, 2004).

I tillegg er det viktig å ha en forståelse for de hydrogeologiske forholdene på stedet. Høyde på grunnvannspeil, vannstrømningen i berget og den kjemiske karakteren av vannet er parametere som påvirker injeksjonen, og bør dermed vurderes når det utarbeides en injeksjonsprosedyre (Hognestad *et al.*, 2010).

2.2.1 Vanntapsmålinger

For å stå best mulig rustet til å takle potensielle vannproblemer er det nyttig og nødvendig å vite hvor stor lekkasje det er inn i tunnelen eller bergrommet (Hognestad *et al.*, 2010). Dette gjelder både før og etter injeksjonen. I forkant er det av interesse å vite hvor store lekkasjer det er som må tettes, mens det i etterkant er viktig å vite hva restlekkasjen er og om ønskelig resultat er oppnådd. I tillegg er det i noen tilfeller lekkasjen i forkant som avgjør om det skal injiseres eller ikke.

For å kartlegge vannforholdene i forkant av injeksjon, er Lugeon-testen utviklet. Den måler vanntapet fra en seksjon av et borhull ved et gitt overtrykk. Testen utføres ved å avgrense et område i borhullet med en eller to pakkere (se kap. 2.3). Avstanden som avgrenses kan varieres. Deretter pumpes det vann inn mellom pakkene. Målingen gjennomføres ved et forhåndsbestemt maksimum testtrykk (P_{max}), som bestemmes ut fra stedlige forhold. For å unngå hydraulisk splitting er det ikke ønskelig å overgå minste hovedspenning.

Vanntapet (Q) per minutt i borhullet per løpemeter med et overtrykk på 10 bar definerer Lugeon-verdien (Hognestad *et al.*, 2010). Man må ha kjennskap til det stedlige vanntrykket for å kunne vite når man har 10 bars overtrykk. Hvis det forutsettes homogene forhold kan en Lugeon-test avsløre gjennomsnitts-permeabiliteten til bergmassen.

Testen utføres i 5 steg hvor trykket holdes konstant i 10 minutter for hvert steg. Tabell 2-1 viser de vanlige stegene i en lugeon-test (Geotechdata, 2015).

Tabell 2-1: Stegene i Lugeon-test (Geotechdata, 2015)

Steg	Trykk
1	$0,5 \times P_{max}$
2	$0,75 \times P_{max}$
3	P_{max}
4	$0,75 \times P_{max}$
5	$0,5 \times P_{max}$

Å måle innlekkasjen fra et sonderhull er et kjapt enkelt alternativ til Lugeon-testen. Lugeon-verdier kan være nyttige i bestemmelser av injeksjonsparametere, men det er ikke alltid det gjennomføres slike tester. En sonderhullsmåling gjennomføres ved å måle tiden det tar å fylle en bøtte med vann som kommer ut fra et sonderhull (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015). Det er ikke en test som avdekker permeabiliteten til bergmassen, men den gir en pekepinn på hvordan vannforholdene ser ut foran stoffen og kan være nyttig i planleggingen av for eksempel injeksjonsarbeider. Sonderboring foretas med jevne mellomrom foran stoff for å avdekke hvilke bergforhold som møter tunnelen. Det er 20-30 meter lange hull som bores slik at det er overlapp fra forrige sonderhull. Det bores ofte mer enn et sonderhull slik at man har undersøkt et større område av bergmassen foran stoff.

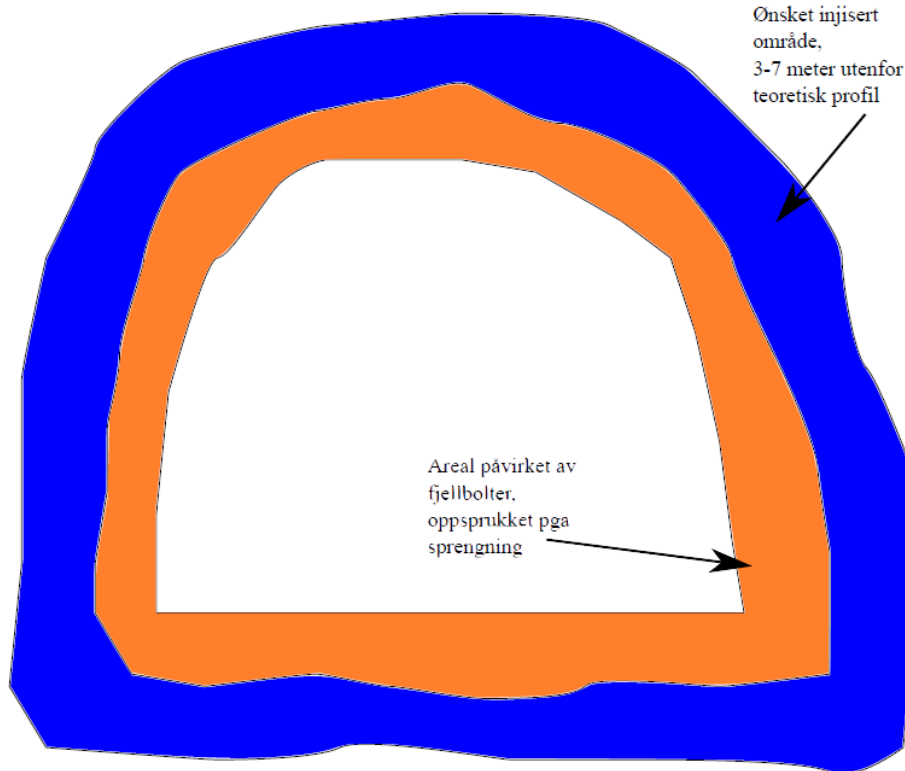
For å verifisere om tetthetskravet er oppnådd lages det terskler i tunnelen eller bergrommet. Tersklene måler hvor mye vann som renner ut av en gitt seksjon av tunnelen. Vannet føres ut av terskelen gjennom et målerør, hvor målinger kan utføres når vannivået er stabilt. Det vil si at målingene må utføres når det ikke drives eller holdes på med aktiviteter som tilfører vann. Det anbefales å utføre testene jevnlig slik at eventuelle endringer i innlekkasjen oppdages (Hognestad *et al.*, 2010).

2.3 Forinjeksjon

Forinjeksjon er å presse injeksjonsmasse inn i bergmassen foran stoff og er den vanligste formen for injeksjon her til lands. Forinjeksjon utføres ved å bore hull fra stoff i driveretningen. Hullene er normalt 18-24m lange med en stikning på 5-10° (Figur 2.2). Disse hullene bores og injiseres rundt hele tunnelperiferien slik at man får en fullstendig skjerm eller paraply foran tunnelen. Et viktig poeng er at injeksjonsskjermen er tilstrekkelig tykk slik at den ikke blir punktert ved bolting, som illustrert i Figur 2.3 (Hognestad *et al.*, 2010).



Figur 2.2: Boring av skjerm til forinjeksjon. Legg merke til tidligere hull og fylte sprekker (gult fyll) (Statens Vegvesen, 2011).



Figur 2.3: Ønsket omfang av injisert område (etter Aarset *et al.*, 2010).

Fordelen med å injisere foran stoff er at permeabiliteten i bergmassen er senket før tunnelen avanserer inn i området. Dermed er potensielle innlekkasje problemer taklet før tunnelen når de.

Injeksjonsomgangen begynner ved at en borerigg borer samtlige injeksjonshull som inngår i skjermen. Etter at boringen av injeksjonsskjermen er gjennomført skylles hullene og det plasseres pakkere og injeksjonsstaver i hullene. Pakkerne gjør at injeksjonsmasse kan strømme inn i hullet, men ikke tilbake. Injeksjonsmassen pumpes inn i bergmassen via injeksjonsslanger som går fra injeksjonspumpen(e) til injeksjonsstavene, som igjen er koblet til pakkene i hullene. Figur 2.4 viser en pakker på en forkortet stav til demonstrasjonsbruk, i tillegg vises munnstykket som benyttes i de tilfellene akselerator skal benyttes.



Figur 2.4: Pakker (til venstre) festet til injeksjonsstav. Munnstykke for akseleratorbruk på toppen (Hognestad et al., 2010).

Det benyttes trykk opp mot 100 bar under forinjeksjon, derfor sikres alle injeksjonstavene med kjetting før selve injiseringen starter. Dette er for å hindre skade på mennesker og maskiner i tilfelle en stav skal bli presset ut av hullet. Figur 2.5 viser en stoff hvor injeksjon pågår. Hele stoffen er sikret med kjetting og slangene fra injeksjonspumpene er koblet til de nederste hullene i midten. Det er vanlig å begynne injeksjonen med de nederste hullene og deretter jobbe seg opp i profilet.



Figur 2.5: Pågående injeksjon ved Lyshorntunnelen.

Injeksjonsriggen blander og pumper injeksjonsmasse inn i hullene gjennom pakkerne. En injeksjonsrigg har vanligvis flere blandere og pumper slik at det kan injiseres på flere linjer, det vil si at det kan pumpes på flere hull samtidig (Klüver og Kveen, 2004). Hvilke krav som stilles til injeksjonsriggen avhenger av hvilke krav som stilles til den injeksjonen som skal gjennomføres. Men kapasiteten bør være såpass at injeksjonen kan foregå fortløpende uten at det må tas pause for å få blandet nok injeksjonsmasse.

Etter gjennomført injeksjon og en avtalt setningstid for injeksjonsmassen utføres sonderboring for å kontrollere om restlekkasjen er på et akseptabelt nivå. Om restlekkasjen er på et akseptabelt nivå kan tunnelen avansere.

2.3.1 Behovsprøvd eller systematisk forinjeksjon

Det finnes to tilnærminger til hvordan forinjeksjon skal praktiseres, systematisk injeksjon og behovsprøvd injeksjon. Systematisk injeksjon foregår ved at det injiseres ved faste intervaller over et lengre strekk som er forhåndsbestemt. Systematisk injisering praktiseres hvor det fra

forundersøkelsene forventes store vannlekkasjer, eller at det er tegn til at vanninntrengingen i tunnelen kan overstige tetthetskravene.

Ved tradisjonell tunneldriving betyr det imidlertid ikke at det injiseres etter hver salve, normalt injiseres det etter hver 3. eller 4. salve slik at det blir en overlapp av skjermene. En injeksjonsskjem er normalt mellom 18 og 24 meter lang (Klüver og Kveen, 2004). Mens en salve normalt fører til en inndrift på ca. 5 meter.

Ved å benytte seg av behovsprøvd injeksjon settes ikke injeksjon i gang før det blir vurdert som nødvendig. Metodene for å bestemme om injeksjon skal iverksettes er innlekkasjemålinger fra sonderhull eller andre vurderinger av vannforholdene på stoff (kap.2.2.1). Hvor store innlekkasjeverdier som utløser injeksjon er stort sett bestemt på forhånd.

2.4 Etterinjeksjon

Etterinjeksjon er injeksjon som foregår i tunnelen etter at tunnelstuffen har beveget seg fremover. Denne type injeksjonsarbeider er ofte resultat av at forinjeksjonen ikke oppnådde tilfredsstillende resultat. Det er vanligvis punktlekkasjer som tettes under etterinjeksjon, men faren for at lekkasjen bare flytter til et annet sted i tunnelen er erfaringsmessig stor (Garshol, 2007).

Etterinjeksjon er noe man prøver å unngå fordi det er vanskelig og dyrt, det blir ofte brukt kjemiske injeksjonsmasser (se kap. 2.9) for å oppnå tilfredsstillende resultat. Erfaringer fra flere norske tunnelprosjekt viser at kostnaden for etterinjeksjon kan være 30-60 ganger større enn kostnaden til forinjeksjon (Stenstad, 1998).

2.5 Injeksjonsprosedyre

Før et prosjekt starter opp fremstilles det en injeksjonsprosedyre, dette dokumentet legger rammene for injeksjonsmetoden som skal benyttes. Detaljnivået i en injeksjonsprosedyre kan variere mye fra en prosedyre til den neste. Noen inneholder kun krav til tetthet og overlater til entreprenør å bestemme hvilken metode, materiale og utstyr som skal benyttes (Davik *et al.*, 2002).

I andre injeksjonsprosedyrer er det lagt flere føringer for hva slags materialer, utstyr, metode og stoppkriterie som skal benyttes. Prosedyrene må alltid tilpasses tetthetskrav og geologien på stedet. Injeksjonsprosedyren blir utarbeidet med grunnlag i forundersøkelser og erfaringer fra andre prosjekter. Det betyr at en rekke kvalifiserte antagelser angående vannforhold og geologi må gjøres når injeksjonsprosedyren utarbeides. En revidering av injeksjonsprosedyren kan forekomme underveis i prosjektet, ofte basert på erfaringer fra stuff. Figur 2.6 viser hvordan en injeksjonsprosedyre kan se ut.

Injeksjonsprosedyre



Jernbaneverket

Injeksjonen utføres etter følgende opplegg:

1. Resept 1 v/c = 0,8	Industrisement	Mengde:	ca 300 liter
2. Resept 2 v/c = 0,6	Industrisement	Mengde:	ca 600 liter
3. Resept 3 v/c = 0,5	Industrisement	Mengde:	ca 600 liter

Med resept 4 v/c = 0,8 under pkt 1 skal det blandes i ca 7 % microsilika.

Dersom foreskrevet trykk ikke er oppnådd etter pkt 1, pumpes det etter pkt 2.

Dersom foreskrevet trykk ikke er oppnådd etter pkt 2 kan hullet med fordel "hvile" ca 1 til 2 timer. Det skal deretter pumpes etter pkt 3.

Dersom foreskrevet trykk ikke oppnås skal innpumping i dette hullet avsluttes med en blanding med industrisement og akselerator.

I øvre halvdel av skjermen kan det være en fordel å forsøke å avslutte alle hull med innblanding av akselerator.

Innpumpingshastigheten bør begrenses til 40 liter/min.

Ved utganger i stuff skal det brukes sement med blanding med akselerator eller mauring.

Følgende trykk skal brukes:

Bergoverdekning	Borhull i heng og vegg	Borhull i såle og i stuff
0-5 meter	20 bar	30 bar
5-15 meter	40 bar	60 bar
> 15 meter	80 bar	80 bar

Figur 2.6: Eksempel på injeksjonsprosedyre (Hognestad et al., 2010).

For å avslutte injeksjonen på et hull må stoppkriteriet normalt oppfylles (kap. 2.8).

2.6 Sementbaserte injeksjonsmasser

Det skilles mellom sementbaserte og ikke-sementbaserte (kjemiske) injeksjonsmasser. I Norge er det forinjeksjon med sementbaserte injeksjonsmasser som er den vanligste formen for injeksjon. I denne delen vil sementens egenskaper, reologi og tilsetningsstoffer presenteres.

Følgende funksjonskrav er satt opp for injeksjonsmasser (Aarstad, Skjølvold og Justnes, 2015):

- Massen skal være stabil
- Massen skal være lettflytende
- Massen skal størkne raskt etter plassering i bergmassen

2.6.1 Injeksjonsmassens kornstørrelse og inntrengningsevne

Sementbaserte injeksjonsmasser deles inn i kategorier basert på sementens kornstørrelse, disse er: standard injeksjonssement, mikrofin sement og ultrafin sement. For å oppfylle kravet til å være innenfor en gitt kategori må d_{95} være innenfor en viss kornstørrelse, det vil si at 95% sementmassens totale vekt har kornstørrelse under en viss verdi (Brattli, 2015). Tabell 2-2 viser sementinndeling etter kornstørrelse (Statens Vegvesen, 2015).

Tabell 2-2: Sementtyper delt inn etter kornstørrelse (Statens Vegvesen, 2015).

Kategori	Kornstørrelse
Standard injeksjonssement	$d_{95} > 20\mu\text{m}$
Mikrofin sement	$d_{95} < 20\mu\text{m}$
Ultrafin sement	$d_{95} < 10\mu\text{m}$

Det antas at sementen kan trenge inn i sprekkeåpninger som er ca. 3 ganger større enn sementens kornstørrelse (Hognestad og Holter, 2012; Tolppanen og Syrjänen, 2003). For mikrofin sement og ultrafin sement er dette forholdet litt mer komplisert. Disse sementene er mer kjemisk aktive og har en større tendens til å flokkulere. Derfor er den minste sprekken disse kan trenge inn i 10 ganger større enn sementens kornstørrelse (Stille, Gustafson og Hassler, 2012). Sementens evne til å trenge inn i sprekker er sementens inntrengningsevne.

Henn og Davenport (2005) viser til at kostnaden for ultrafin sement er 5-15 ganger dyrere enn for standard injeksjonssement. Likevel kan bruk av ultrafin sement føre til besparelser fordi denne sementen tåler et høyere V/C-forhold og har en mye raskere herdeprosess enn standard injeksjonssement. Dette fører til mindre forbruk av masser og tid.

2.6.2 Vann-sementforhold (V/C-forhold)

Forholdet mellom vann og sement i injeksjonsmassen er avgjørende for massens strømmingsevne og inntrengningsevne. Et høyt V/C-forhold gir bedre strømming og inntrenging, men medfører noen negative effekter. Klüver og Kveen (2004) har listet opp de negative effektene:

- Nedsatt kvalitet på herdet masse
- Lengre tid til herdeprosessen starter og lengre herdetid
- Lav trykkoppbygging i nærliggende bergmasse på grunn av tendens til fjernttransport, det betyr redusert tetteffekt nær tunnel
- Unødvendig høyt masseforbruk
- Fare for hydraulisk splitting/jekking

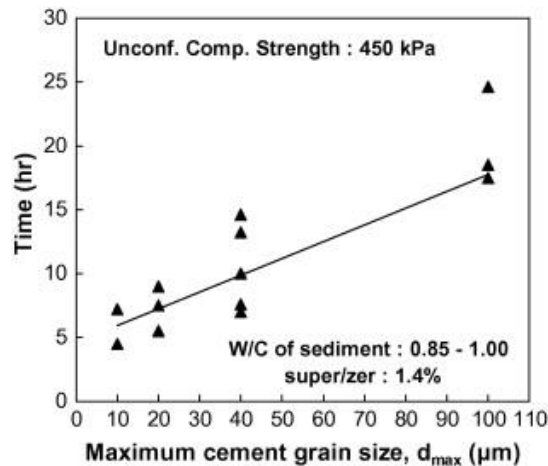
Ved valg av V/C-forhold må alle effektene, positive og negative, tas med i vurderingen.

God stabilitet på sementmassen er viktig for et godt injeksjonsresultat. En ustabil masse vil oppleve separasjon («bleeding»), som betyr at sementen synker til bunns mens vannet blir liggende igjen på toppen (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015). I bergmassen kan dette føre til at kun bunnen av en sprekk fylles med sement, mens det ikke blir tett i toppen. Disse situasjonene kan være veldig vanskelig å få tettet senere ettersom det allerede er noe masse inne i berget. For å løse dette problemet tilsettes stabiliserende stoffer i injeksjonsmassen, som i Norge vanligvis er silikaslurry.

Ved å tilsette stabiliserende stoffer vil sementen være stabil ved et høyere V/C-forhold. Det er viktig å nevne at stabiliserende stoffer øker setningstiden på injeksjonsmassen (Hognestad *et al.*, 2010). NS-EN 12715 definerer en masse som stabil om det er mindre enn 5 % vannutskillelse etter 2 timer (Standard Norge, 2000).

2.6.3 Bindetid og tidligfasthet

For at tunneldrivingen skal kunne fortsette så kjapt som mulig etter endt injeksjon, er det av stor interesse at sementen herder eller binder seg så kjapt som mulig. Pantazopoulos *et al.* (2012) fant at herdeprosessen skjer raskere ved avtagende kornstørrelse. Figur 2.7 viser sammenhengen mellom kornstørrelse og tidligfasthet. Bruk av mikrofin sement i stedet for standard injeksjonssement kan dermed sørge for mindre ventetid før tunneldrivingen kan fortsette.

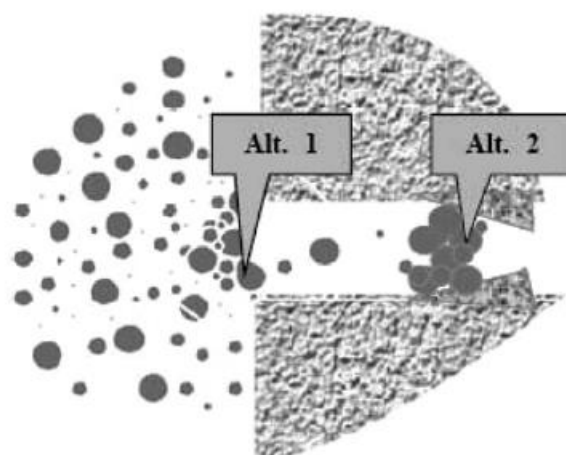


Figur 2.7: Viser sammenhengen mellom tidlig fasthet og sementens kornstørrelse (Pantazopoulos *et al.*, 2012).

2.6.4 Filterkakedannelse

Sementkorn kan separeres fra injeksjonsmassen og danne en filterkake som blokkerer sprekkeåpningen. Denne separasjonen avhenger av sementens kornstørrelse og kornfordelingskurven, som viser kumulativ vekt mot kornstørrelse. Om denne kurven er bratt og innenfor et lite spekter av kornstørrelse er massen ensgradert, mens en slakere kurve er innom flere kornstørrelser og kalles velgradert (Brattli, 2015).

Eklund og Stille (2008) har vist at det er gunstig med en ensgradert injeksjonsmasse, og at det er viktig å unngå overkorn som er større enn resten av kornene og dermed kan blokkere sprekkeåpninger. Figur 2.8 viser hvordan kornstørrelsen kan føre til blokkering av en sprekke enten ved sprekkeåpningen eller ved en innsnevring lenger inn i sprekken.



Figur 2.8: Filterkake. Alternativ 1 viser hvordan sprekkeåpningen kan blokkeres. Alternativ 2 er blokkering ved en innsnevring av sprekken (Hansson, 1994).

2.6.5 Reologi

Reologiske egenskaper beskriver en væskes flyteegenskaper. Spredningen av en injeksjonsmasse avhenger av massens viskositet og flytskjærspenning. Stille (2015) påpeker at det er flere faktorer som påvirker sementmassens flyteegenskaper. V/C-forhold, sementmassens kornstørrelse og bruk av tilsetningsstoffer er avgjørende for flyteegenskapene. Stille anbefaler å teste egenskapene til den injeksjonsmassen som skal benyttes i injeksjonsarbeidet for hvert prosjekt. Tabell 2-3 viser effekten tilsetningsstoffer, V/C-forhold og sementtype har på injeksjonsmassens flyteegenskaper. Kritisk sprekkeåpning er den sprekkeåpningen sementmassen kan trenge inn i.

Tabell 2-3: Effekten tilsetningsstoffer har på flyteegenskapene til en injeksjonsmasse. Rød farge betyr sterkere effekt (Stille, 2015).

	Operasjon	Flytskjærspenning	Viskositet	Kritisk sprekkeåpning
V/C-forhold	Økning	↓	↓	↓
Finhetsgrad	Økning	↑	↑	↑
Plastiserer	Tilføre	↓	↓	↓
Akseleratorer	Tilføre	↑	→	→

Samtidig som en økende finhetsgrad reduserer bindetiden fører det også til at viskositeten og flytskjærspenningen av massen går opp. Dette kan motvirkes ved å tilsette superplastiserende (plastiserer) stoffer i injeksjonsmassen.

2.6.6 Superplastiserende stoffer

Superplastiserende tilsetningsstoffer dispergerer sementkornene i massen slik at de ikke fnokker, dette er gunstig da det ikke er ønskelig at massen skal klumpe seg. Massen får bedre flyteegenskaper av å tilsette superplastiserende stoffer (Tabell 2-3). Tilsetningsstoffene fungerer ved å oppheve de elektriske bindingene slik at klumper løses opp (Håkansson, 1993). En effekt av dette er at det tar lenger tid før sementen stivner (Hognestad *et al.*, 2010).

Bruk av superplastiserende stoffer gjør at det kan benyttes sementmasse med lavt V/C-forhold som likevel har god penetrasjonsevne (Stille, 2015).

2.6.7 Akselerator og retarder

Hvis det er problemer med å oppnå mottrykk i en injeksjonsprosess kan det være aktuelt å benytte styrt herding, dette utføres ved å tilsette en akselerator til injeksjonsmassen. En akselerator gjør at massen flokkulerer kjappere og minsker setningstiden til sementen (Garshol, 2007). Dette gjør at man kan få «plugget» sprekkene og oppnå ønsket mottrykk. Akselerator er vanligvis alkalifri og tilsettes gjennom en ventil på injeksjonsstaven (Hognestad *et al.*, 2010). Ved å tilsette akseleratoren på denne måten unngår man at akseleratoren kan føre til skade på resten av utstyret ved at sementen herder før den har blitt pumpet inn i berget. For å tilsette akselerator benyttes en egen akseleratorpumpe.

Ved injeksjon i områder med høy temperatur kan herdeprosessen skje for fort. I slike tilfeller vil det være aktuelt å tilsette en retarder, som utsetter den kjemiske reaksjonen i sementen (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015).

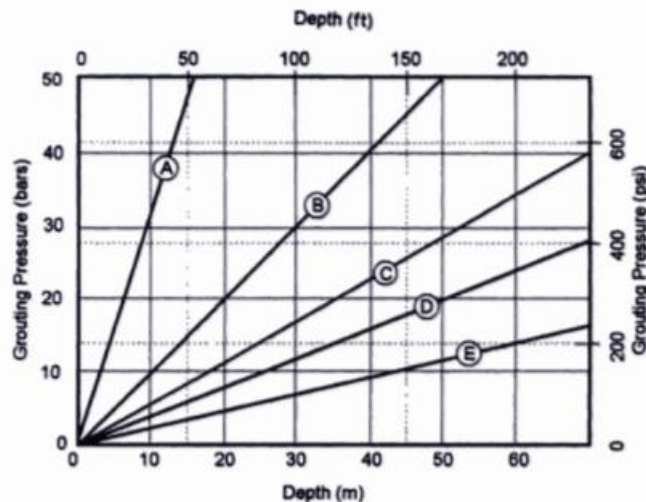
2.7 Injeksjonstrykk

For at injeksjonsmassen i det hele tatt skal trenge inn i sprekker må injeksjonstrykket være større enn det stedlige vanntrykket som står i sprekkene. I tillegg må injeksjonstrykket overkomme motstanden i bergmassen som følge av spenningstilstand i bergmassen, sprekkåpning, ruhet på sprekkflater og sprekkinnfyllinger (Klüver og Kveen, 2004).

Injeksjonsresultatet avhenger i stor grad av hvilket injeksjonstrykk som blir benyttet. Et høyt injeksjonstrykk vil øke penetrasjonseffekten og distansen injeksjonsmassen når. Om det blir benyttet en ustabil sementblanding vil et høyt trykk føre til utpressing av løst vann, som vil føre til at den gjenværende mørtelen har høyere fasthet og lavere permeabilitet (Davik *et al.*, 2002).

Stille, Gustafson og Hassler (2012) viser til at et høyt injeksjonstrykk kan erodere vekk plugger dannet i sementmassen (se kap. 2.6.4).

Figur 2.9 viser forskjell i normalt trykk mellom forskjellige nasjoner. Hvilket trykk som blir sett på som normalt varierer mellom land og verdensdeler. Norsk injeksjonspraksis er kjent for å benytte seg av trykk opp mot 100 bar om forholdene tillater det (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015).



Figur 2.9: Normal trykkbruk i forskjellige land. (A) er for godt fjell i Sverige. (B) er tommelfingerregel for Europa – 1 bar/m dybde. (C) er vanlig fjell i Sverige. (D) er dårlig fjell i Sverige. (E) er amerikansk praksis 1 psi/foot dybde. Norsk praksis ligger til venstre for (A) (Warner, 2004).

For å oppnå et tilfredsstillende resultat må injeksjonspumpen(e) kunne levere høy strømningsgrad under høyt trykk, og ha et høyt potensielt trykk totalt sett. Hognestad *et al.* (2010) skriver at ønskelig kapasitet er på 100 liter pr. minutt ved ca. 80% av maksimalt tillatt trykk.

Høyt injeksjonstrykk kan i midlertidig også føre til deformasjon av bergmassen ved at sprekker åpnes, også kalt jekking. Jekking fører til økt massekonsum og ukontrollert spredning av injeksjonsmassen. Rafi og Stille (2015) mener at det eneste positive med åpning av sprekker på denne måten er at spredningen av injeksjonsmassen øker. Det er stor uenighet rundt om man skal godta jekking eller prøve å unngå det (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015).

2.8 Stoppkriterie

Ved forinjeksjon er det umulig å vite helt sikkert om injeksjonsomgangen er tilfredsstillende før etter stoffen har beveget seg videre. En vellykket injeksjon avhenger av flere faktorer og noen av de er umulig å fastslå med sikkerhet. Dette gjelder blant annet injeksjonsmassens

inntrenging i bergmassen og tettingsgraden av sprekkene (Holmøy, Strømsvik og Rise, 2015). Det er derfor ikke mulig å bestemme det beste tidspunktet for å gi seg med injeksjonen. Et stoppkriterie må tilpasses hvert enkelt prosjekt og oppdateres basert på erfaringer under drivingen.

Holmøy, Strømsvik og Rise (2015) har listet noen eksempler på vanlige stoppkriterier:

- Minste injeksjonsstrøm, det betyr at injeksjonen avbrytes når injeksjonsstrømmen er mindre enn en forutbestemt hastighet, ved et forutbestemt maksimalt injeksjonstrykk.
- Maksimum volum, det betyr at injeksjonen avsluttes når et forutbestemt volum er injisert. Dette er ofte en løsning om injeksjonsstrømmen ikke avtar.

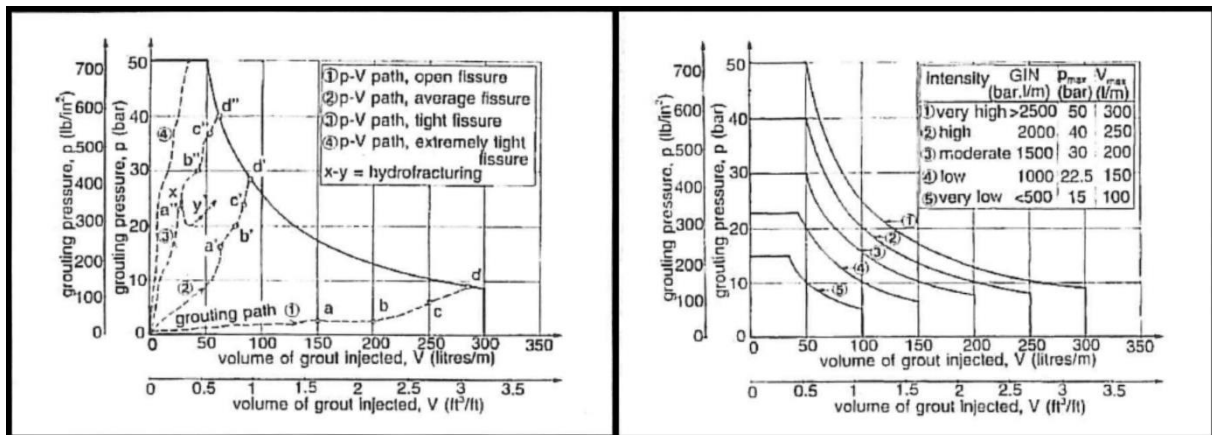
Det er også mulig å styre avslutningen på injeksjonen ved å benytte akselerator eller en tykkere injeksjonsmasse og dermed begrense masseforbruket.

I Norge er stoppkriteriet vanligvis at det oppnås et visst mottrykk og/eller at det har medgått en viss mengde injeksjonsmasse. Hognestad *et al.* (2010) sier at det bør tilstrebes å oppnå stoppkriteriet i alle hull, samtidig er det lurt å se på hele skjermen under ett. Om det går inn mer masse i et hull enn stoppkriteriet tilsier kan dette aksepteres om det ikke går inn noe særlig masse i resten av hullene.

Det finnes også aktive stoppkriterier som er utviklet i andre land og to av disse vil nå bli kort presentert.

GIN-metoden (Grouting Intensity Number) er et aktivt stoppkriterie. Det vil si at injeksjonen avbrytes når grafen for trykk og injisert volum når en forhåndsbestemt GIN-kurve. GIN-metoden er utviklet med bakgrunn i erfaringer fra laboratoriestudier, teoretiske studier av injeksjonsstrømning og penetrasjon, samt feltobservasjoner av injeksjonstrykk og medgåtte mengder i forbindelse med vannkraftprosjekter (Lombardi og Deere, 1993).

Figur 2.10 viser GIN-kurver for forskjellige scenarioer (til høyre i figuren). Hvilken GIN-kurve som settes som stoppkriterie avhenger av tetthetskrav og geologiske forhold. Til venstre i figuren vises hvordan GIN-kurven nås under forskjellige geologiske forhold. Forholdet mellom trykk og injisert volum utvikler seg ulikt ettersom hvilke typer sprekker eller hulrom det injiseres i. Dersom injeksjonen foregår i en åpen sprekk eller kanal vil injeksjonsgrafene følge rute 1 i figuren. Rute 2 tilsvarer en normal sprekk, rute 3 en trang sprekk og rute 4 en ekstremt trang sprekk.



Figur 2.10: Viser GIN-kurver. Det plottes volum injisert mot injeksjonstrykk (Lombardi og Deere, 1993).

Basert på forskning i Sverige er det blitt utviklet en injeksjonsmetode som heter Real Time Grouting Control (RTGC). Denne metoden går ut på å følge opp injeksjonsarbeidene i sanntid ved å benytte seg av en rekke teorier rundt injeksjonsmassens spredning. Stoppkriteriet er relatert til spredning av injeksjonsmassen. Injeksjonen vil avsluttes når en forhåndsbestemt minste sprekkeåpning er fylt, eller når spredningen i den største sprekken når en maks distanse (Stille *et al.*, 2009).

2.9 Kjemisk injeksjon

En kjemisk injeksjonsmasse er en ren løsning som ikke inneholder partikler, dette er i motsetning til en sementbasert injeksjonsmasse som er en masse med partikler i suspensjon (Bruce, 2005). Inntrengningsevnen til en kjemisk injeksjonsmasse avhenger i all hovedsak av massens viskositet og injeksjonstrykk (Karol, 2003). Dette gir den en fordel over sementbaserte injeksjonsmasser, hvor inntrengningsevnen er begrenset av sementkornenes størrelse. De viktigste bruksområdene til kjemisk injeksjon er ifølge Davik *et al.* (2002):

- I anlegg med svært strenge krav til tetthet
- Ved større lekkasjer hvor en momentan tetting er nødvendig
- I anlegg hvor en begrensning av spredning på injeksjonsmaterialet er ønskelig/nødvendig ut ifra økonomiske eller miljømessige årsaker
- I anlegg hvor tidsaspektet ved injeksjon er kritisk
- I anlegg der det i tillegg til vanntetting er ønskelig med forsterkning av bergmassen

Kostnadene for kjemiske injeksjonsmidler er to til ti ganger større per volumenhet enn for sementbaserte injeksjonsmidler. Men ved riktig bruk vil forbruket av kjemiske injeksjonsmidler være såpass mye lavere sammenlignet med sementbasert injeksjon at det likevel vil kunne være lønnsomt å benytte seg av kjemisk injeksjon (Davik *et al.*, 2002).

Karol (2003) lister en mengde punkter for hvilke egenskaper det ideelle kjemiske injeksjonsmiddelet burde ha, men nevner samtidig at et middel som tilfredsstiller samtlige punkter ikke finnes. Valg av injeksjonsmiddel må derfor bestemmes spesifikt til hvert enkelt prosjekt for å imøtekomme de kravene som stilles til det enkelte prosjekt. Egenskaper som bør vurderes ved valg av kjemisk injeksjonsmiddel er etter Karol (2003):

- Bestandighet
- Inntrengningsevne
- Styrke
- Sikkerhet
- Enkel håndtering
- Tilgjengelighet
- Kostnad

I praksis deles kjemiske injeksjonsmidler i to hovedgrupper (Davik *et al.*, 2002):

- Geler
- Herdeplaster

Geler er stoffer som er løst i vann i relativt lav konsentrasjon. Herdingen skjer ved at vannet bindes til en gel gjennom at polare krefter holder vannet på plass (Davik *et al.*, 2002). Fordelen med denne type injeksjonsmasse er at den har veldig lav viskositet og dermed meget bra inntrengningsevne. Ulempen er at styrken er relativt lav og det kan være vanskelig å kontrollere brukstiden (Karol, 2003). I tillegg er slike geler utsatt for synerese, det vil si at massen blir mindre over tid fordi noe av væsken presses ut (Andersson, 1998).

Herdeplastene er lettflytende materialer som stort sett består av to komponenter som blandes på stoff og deretter pumpes inn i bergmassen (Davik *et al.*, 2002). Herdeplastene er monomerer eller polymerer. Sluttproduktets kvalitet avhenger av en god reaksjon, som igjen avhenger av korrekt mengde komponenter (Garshol, 2007).

Det finnes flere typer herdeplaster, alle med forskjellige styrker og svakheter. Polyuretan er en type herdeplaster som på grunn av sine egenskaper er høyst aktuell for bruk i forbindelse med injeksjon.

2.9.1 Polyuretan

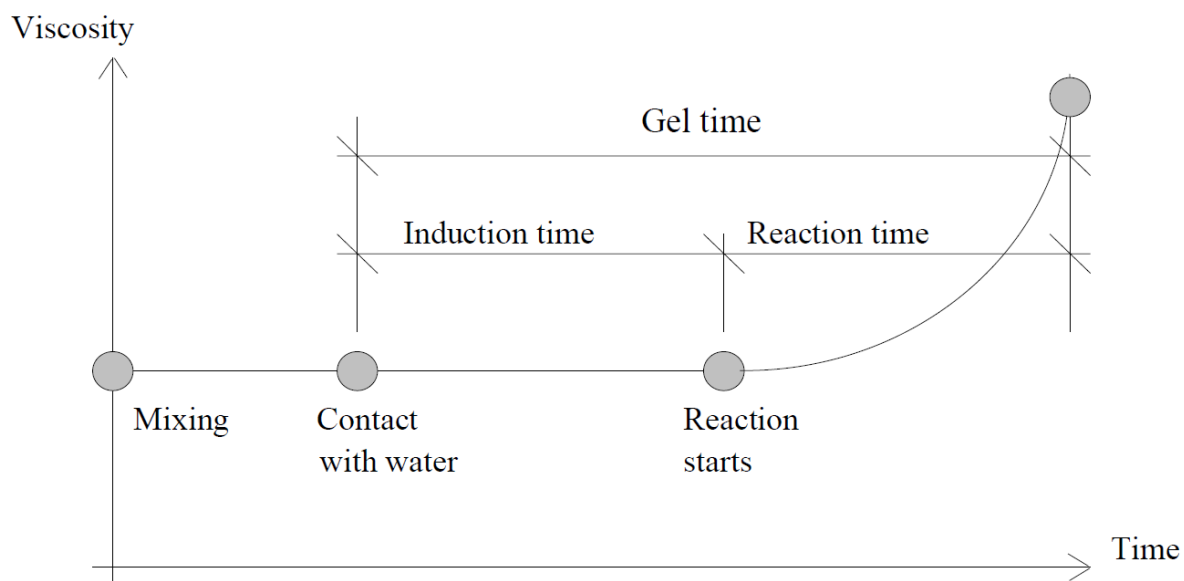
Polyuretan dannes ved en reaksjon mellom isocyanater og hydroksylgrupper til et høymolekulært materiale, i tillegg kan isocyanatene reagere med hydroksylgruppene i vann (Davik *et al.*, 2002). Polyuretan ekspanderer på grunn av CO₂-produksjon. Bruken av polyuretan kan blant annet være gunstig i møte med større åpninger eller hulrom da volumøkningen kan komme opp mot 25 ganger det opprinnelige volumet (Davik *et al.*, 2002).

Polyuretaner kan enten være en-komponent eller to-komponents, hovedforskjellen mellom disse er at en-komponent polyuretan er prepolymerisert. Det vil si at polymeriseringsprosessen er satt i gang på fabrikken hvor massen blir produsert, men prosessen er stoppet før den er fullbyrdet. Denne typen polyuretan reagerer og skummer i kontakt med vann. Karol (2003) skriver at bruken av en-komponent polyuretan kan være fordelaktig sammenlignet med to-komponent polyuretan fordi sistnevnte stiller høye krav til kontrollerte omgivelser ved blanding. Andersson (1998) skriver at den største ulempen med en-komponents polyuretan er at prepolymeriseringen medfører høyere viskositet.

To-komponents polyuretan består av like mengder polyisocyanater og polyhydroksyler som blandes på anlegget (Andersson, 1998). Reaksjonen danner et fast stoff hvis blandingen ikke kommer i kontakt med vann, og danner et skum om blandingen kommer i kontakt med vann.

Mange av polyuretanene reagerer i kontakt med vann, dette betyr at i møte med rennende vann hvor sementmassen i stor grad vil kunne bli vasket vekk vil polyuretanen skumme og bevege seg mot strømmen (Andersson, 1998).

Viskositeten til polyuretan er relativt høy. Inntregningsevnen er i all hovedsak bestemt av polyuretanets viskositet og geltid, i tillegg til injeksjonstrykket (Andersson, 1998; Karol, 2003). Viskositeten øker ettersom reaksjonen forløper (Figur 2.11).



Figur 2.11: Reaksjonsforløpet for polyuretan (Bogdanoff, 1990).

Figur 2.11 viser hvordan reaksjonsforløpet til et enkomponents polyuretan er. Induksjonstiden (Induction time) er tiden fra polyuretaket kommer i kontakt med vann til reaksjonen starter. Denne tiden avhenger i størst grad av mengde tilsatt katalysator, men også av temperaturen (Andersson, 1998). Induksjonstiden blir mindre ved mer tilsatt katalysator. Reaksjonstiden (Reaction time) er tiden fra reaksjonen starter til reaksjonen er fullbyrdet og polyuretaket har nådd fast fase. Geltid (Gel time) er den samlede tiden fra kontakt med vann til fullbyrdet reaksjon.

2.10 Kombinasjonsinjeksjon

Kombinasjonsinjeksjon benytter seg av både polyuretan og sementbasert injeksjonsmasse. Ved å tilsette en viss mengde polyuretan i sementmassen kan masseforbruket begrenses. Dette er en metode som er spesielt egnet når (Hognestad *et al.*, 2010):

- Sementen pumpes inn i fjellet uten at mottrykk oppnås og sementforbruket blir unormalt stort
- Sementen ikke rekker å herde før den renner ut på stoffen (stoppemiddel)

Polyuretaket transporteres med sementstrømmen og reagerer etter en forhåndsbestemt periode. Denne perioden bestemmes ved hjelp av mengde tilsatt katalysator. Reaksjonen gjør at det dannes en propp som sementen kan pumpes mot og dermed kan trykkoppbygging oppnås. Fordelen med bruk av kombinasjonsinjeksjonen over akselerator i injeksjonsmassen er at

polyuretanet ikke fremskynder herdingen av sementmassen, og dermed ikke blokkerer injeksjonshullet og nabohull ved gjennomgang (Huth & Wien Engineering, 2012a).

Kombinasjonsinjeksjon ble benyttet med stor suksess til etterinjeksjonsarbeidet ved Romeriksporten. Ved dette prosjektet ble det i utgangspunktet benyttet mikrofin sement til etterinjeksjonen. Men i noen tilfeller ble denne sementen skylt ut av bergmassen, og da ble det med suksess benyttet kombinasjonsinjeksjon til å oppnå tilfredsstillende resultat (Borchardt og Andersson, 2000).

2.11 Kontrakter

I en kontrakt mellom byggherre og entreprenør er alt arbeid som skal utføres beskrevet og prislagt. Det finnes forskjellige løsninger til hvordan injeksjonsarbeidene prises. Den utfordrende delen av å prislegge injeksjon er at det er umulig på forhånd å vite nøyaktig hvor lang tid injeksjonsarbeidene vil ta, eller hvor mye masse som kommer til å gå med. I tillegg kan forholdene endre seg underveis i prosjektet, slik at injeksjonsopplegget må justeres. Davik *et al.* (2002) presenterer noen viktige punkter med tanke på kontrakten:

- Klargjør ansvarsforholdet mellom byggherre og entreprenør
- Sett krav til injeksjonsutstyr: kvalitet, trykk, kapasitet, antall linjer, V/C-forhold som kan håndteres
- Benytt egne enhetspriser for injeksjon og pumpetid
- Ved injeksjonsstopp for entreprenør, hvem betaler tapt tid og tetteproblemer?
- Opp- og nedrigg må inkluderes i injeksjonstid, eventuelt regnes en time for opprigg og en time for nedrigg.
- Påbegynt injeksjonstid skal avsluttes, selv inn i fritid
- Klargjør hvilke masser og mengder som skal være på lager
- Klargjør oppgjørsform for ikke-benyttede masser
- Klargjør bolteproblematikk. Lengde og gysing med hensyn på fare for punktering av skjerm
- Det må være lett for byggherre å variere injeksjonsopplegget med skjermgeometri inkl. antall/lengde borhull
- Det må utarbeides en prosedyre for samspill mellom byggherre og entreprenør

Warner (2004) presenterer og diskuterer forskjellige former for betalingsløsninger som kan benyttes i injeksjonsarbeider. Davik *et al.* (2002) og Warner (2004) anbefaler begge å benytte seg av en todelt løsning hvor det betales for medgått masse og medgått pumpetid hver for seg.

Sementprisen det betales for i kontrakten er vanligvis den reelle sementprisen pluss 10-15% for håndtering av sementen (Warner, 2004). Det er stor forskjell i pris mellom standard injeksjonssement og mikro- eller ultrafin sement (Henn og Davenport, 2005).

Når gjelder pris for tidsbruk fant Andersson (2005) at timeprisen for injeksjonsarbeider var ca. 2 000 kr/time for et prosjekt og opp til 4 200 kr/time for et annet prosjekt. Disse prisene er den prisen byggherren betaler entreprenør per time for injeksjonsarbeidene.

Når pris eller kostnader for injeksjon omtales i denne oppgaven er det den kontraktsfestede prisen det siktes til. Det vil si den prisen byggherren betaler entreprenøren for massen og/eller tidsbruken.

3 DATAINNSAMLING OG ANALYSEMETODE

I dette kapittelet vil innsamling av data og analysemetode presenteres. Masseforbruk, tidsbruk og injeksjonsforløp for Eysturøyartunnelen ble analysert etter en forhåndsbestemt metode (kap. 3.3 og 3.6). Grunnen til at disse analysene kun ble utført på et av prosjektene er at datagrunnlaget fra Lyshorntunnelen er begrenset, og ikke sett på som tilstrekkelig for disse analysene. Data fra begge prosjektene ble benyttet til å fremstille grafer av injeksjonsforløpene (kap. 3.5).

Dataene som er samlet inn er injeksjonsdata logget med programvare fra Bever Control, det er to hovedgrunner til dette. For det første er Bever Control tilknyttet TIGHT og dermed en samarbeidspartner. For det andre har jeg skrevet et Pythonscript (Python Software Foundation) som benytter seg av excelfiler produsert av Bever Control sin programvare (kap. 3.5).

Analysen som ble utført på dataene fra Eysturøyartunnelen ble gjennomført for å avdekke om det er behov for en oppfølgingsplan av injeksjonsarbeidene og om det er potensielle besparelser å oppnå i tid og kostnader. Til slutt ble det gjennomført utregninger på hva de potensielle besparelsene kunne være ved bruk av kombinasjonsinjeksjon på Eysturøyartunnelen (kap. 3.7).

3.1 Studieområde

Dataene til denne oppgaven er hentet fra veiprojektene Lyshorntunnelen og Eysturøyartunnelen. Disse prosjektene er valgt på grunn av tilgjengelighet gjennom TIGHT. Begge prosjektene benytter seg av typisk norsk praksis i tunneldrivingen og er sånn sett sammenlignbare.

Eysturøyartunnelen er en undersjøisk tunnel på Færøyene som vil kutte reiseveien mellom Torshavn og Runavik/Strendur fra 55 til 17 kilometer (P/F Eystur- og Sandoyartunlar, 2018). Tunnelen blir 11,2 km totalt og knytter Hvitanes på Streymøy sammen med Strendur og Runavik på Eysturøy. Tunnelen består av et hovedløp fra Hvitanes som deler seg ved en rundkjøring og har grener opp til Strendur og Runavik. Tunnelverrsnittet er 81 m^2 , mens bergoverdekningen varierer fra 30 til 110m.

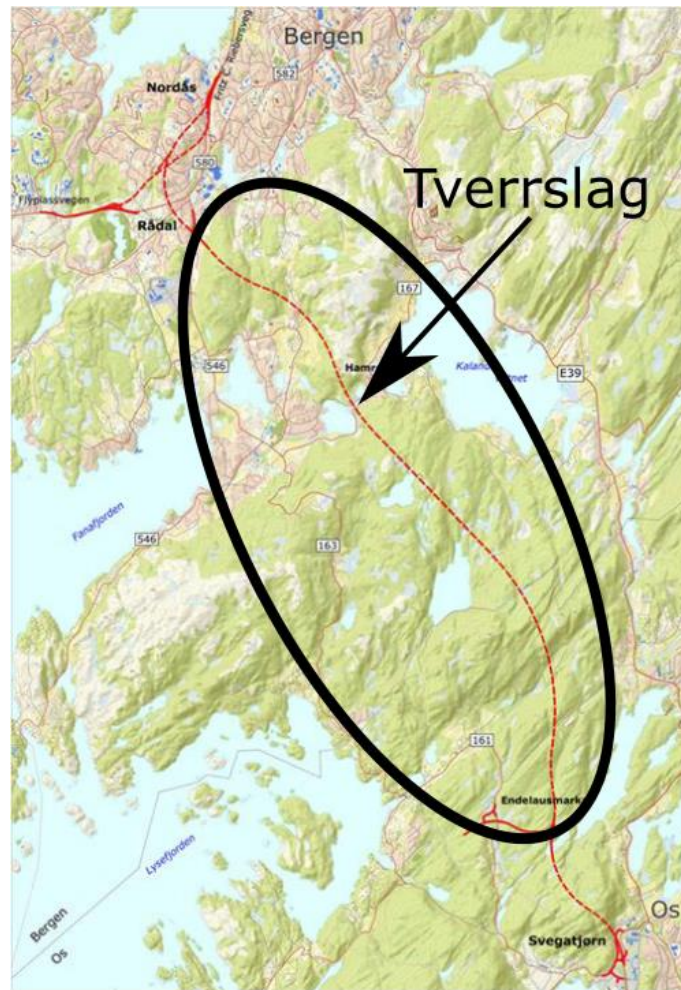


Figur 3.1: Tunnelløpet for Eysturøyartunnelen. Hentet fra P/F Eystur- og Sandoyartunlar (2018).

Færøyene er bygd opp av basaltserier som stammer fra lavastrømmer. Basaltseriene er skilt av diverse pyroklastiske og sedimentære lag med 1 til 30 meter tykkelse (Passey, 2006). Tunnelen drives i hovedsak i en basaltserie det allerede er drevet flere tunneler i på Færøyene, dermed er kunnskapen om potensielle utfordringer kjente (Grøv, 2016). Figur 3.1 viser lokaliseringen av tunnellopet for Eysurøyartunnelen. Det drives fra både Hvitanes og Strendur.

Lyshorntunnelen er en del av utbyggingen av E39 mellom Svegatjørn og Rådal, som vil bli ny hovedvei mellom Os og Bergen når den står ferdig. Lyshorntunnelen er en 9,2 km lang toløpstunnel i klassen T9,5, som tilsvarer et tunnelverrsnitt på $66,6\text{m}^2$ (Statens Vegvesen, 2016). Tunnelen drives hovedsakelig i gneis, gabbro og amfibolitt. Bergoverdekningen varierer fra 10 til 250m. (Statens Vegvesen, 2014)

Figur 3.2 viser lokaliseringen av Lyshorntunnelen samt tverrslaget hvor det drives i begge retninger fra. I tillegg drives det fra Endelausmarka i sør.



Figur 3.2: Lokalisering av Lyshorntunnelen (Statens Vegvesen, 2014).

3.2 Bever Team

Bever Control er et firma som leverer datastyrte styrings- og overvåkningssystemer for borerigger i tunnel- og gruvevirksomhet (Bever Control AS, 2018). Dataene som hentes ut fra injeksjonsriggen kan kun åpnes i Bever Team, som er et program fra Bever Control. Rådataene fra injeksjonsriggene finnes i Vedlegg B. I Bever Team kan den loggede dataen analyseres i programmet, eller så kan det eksporteres excelfiler som inneholder data fra injeksjonen. Excelfilene som ble eksportert og benyttet i denne oppgaven var:

- Flytrapport – Rapport som består av en Excel arbeidsbok. Hvert ark i arbeidsboken inneholder detaljerte data fra et hull.
- Sammendrag – Rapport som viser nøkkeltall for både enkelthull og hele skjermen.

Hole No.	1								
LogTime	Run	Pump No.	Pressure [bar]	Flow cement [l]	Flow Acl. [l]	Amount Cement [kg]	Amount Acl. [kg]	Recipe name	
14.06.2017 21:30:46	16	2	7,00	5,50	0,00	2,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:31:02	16	2	11,30	13,50	0,00	8,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:31:19	16	2	7,30	21,50	0,00	15,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:31:38	16	2	13,20	26,00	0,00	22,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:31:55	16	2	7,60	22,50	0,00	29,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:32:11	16	2	14,40	28,00	0,00	34,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:32:27	16	2	10,40	25,00	0,00	40,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:32:42	16	2	12,90	24,00	0,00	46,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:32:58	16	2	14,40	23,00	0,00	53,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:33:15	16	2	11,90	26,00	0,00	58,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:33:31	16	2	16,90	27,00	0,00	64,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:33:46	16	2	10,10	22,50	0,00	71,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:34:02	16	2	18,90	25,00	0,00	77,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:34:23	16	2	17,30	23,00	0,00	85,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:34:39	16	2	19,30	26,00	0,00	90,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:34:54	16	2	20,50	27,00	0,00	96,00	0,00	Industri 0,8	
14.06.2017 21:35:10	16	2	19,20	22,50	0,00	101,00	0,00	Industri 0,8	

Figur 3.3: Viser hvordan flytrappporten eksportert fra Bever Team ser ut.

Figur 3.3 viser hvordan flytrappporten fra Bever Team ser ut. Hver linje i excelarket tilsvarer et loggetidspunkt, og ved hvert loggetidspunkt er det registrert:

- Loggetidspunkt
- Run
- Pumpe
- Trykk
- Sementstrømning
- Akseleratorstrømning
- Total mengde sement
- Total mengde akselerator
- Oppskriftsnavn

Av disse er loggetidspunkt, trykk, sementstrømning, total mengde sement og oppskriftsnavn de viktigste parameterne.

3.3 Tid og masseforbruk

Som tidligere forklart var en analyse av tids- og masseforbruket nødvendig for å avdekke behovet for en oppfølgingsplan av injeksjonsarbeidene. I tillegg legger det grunnlaget for sammenligning mellom de to stoffene det drives på ved Eysturøyartunnelen og vurderingen presentert i kapittel 3.6.

Analysen av tid og masseforbruk ble først gjennomført for hver enkelt stoff. Det vil si at det ble dannet et datasett for Hvitanesstufen, og et datasett for Strendurstufen. Det ble hentet data fra

både sammendragene av injeksjonsomgangene og flytrapportene. Dataene fra alle skjermene ved en stoff ble satt sammen til et enkelt datasett og følgende parametere ble funnet ved hjelp:

- Antall skjermer
- Antall hull
- Totalt masseforbruk
- Gjennomsnittlig masseforbruk
- Enkelthulls masseforbruk
- Total tidsbruk
- Gjennomsnittlig tidsbruk
- Enkelthulls tidsbruk

Ved hjelp av de ovenstående parameterne kunne det bestemmes hvilke skjermer og hull som sto for høyt masseforbruk og/eller lang tidsbruk. Etersom skjermer og hull med høyt forbruk også står for høye kostnader og lang tidsbruk var det naturlig å se nærmere på disse. Det ble bestemt at hull med forbruk på over 4 000 liter injeksjonsmasse skulle grupperes sammen.

Det ble valgt å se på samtlige skjermer fra prosjektstart til 01.01.18. Normalt ville det vært naturlig å filtrere skjermene blant annet basert på skjermstørrelse, antall hull og lignende. Det er ikke valgt å gjøre i denne oppgaven ettersom fokuset er å vise hvordan analyse av pumpedata kan benyttes til å forbedre injeksjonen helt ned på enkelthulls nivå. Å se på samtlige hull er i dette tilfellet hensiktsmessig.

For å finne medgått mengde sement per hull fantes det to muligheter. Den første var å bruke strømmingen for hvert loggetidspunkt som grunnlag for utregning av totalen. Den andre muligheten var å hente den totale mengden fra flytrapportene fremstilt i Bever Team. Det sistnevnte alternativet ble valgt ettersom strømmingen ved loggetidspunktet kun er momentan strømming, dermed er det ingen kontroll på hvordan strømmingen er mellom loggetidspunktene. Informasjonen fra sammendragene ga medgåtte mengder av hver resept for hvert enkelt hull.

Tidsbruken som ble vurdert var pumpe tiden fra første måling til siste måling. Dette gjaldt både for enkelthull og for hele skjermer. Opprigging og nedrigging av utstyr ble ikke tatt med i analysen, med unntak av når det er snakk om kombinasjonsinjeksjon (se kap. 3.7).

3.4 QP-indeks

QP-indeks er et visuelt verktøy som gjør det enklere å se hvordan forholdet mellom strømning og trykk endrer seg (Strømsvik og Grøv, 2017). Indeksen er fremstilt av PhD kandidat Helene Strømsvik ved NTNU og benytter strømning, Q (l/min), og trykk, P (bar). Se ligning 3.1.

$$QP - indeks = (Q - P + 90) \times 0,9 \quad (3.1)$$

Etter QP-indeksen er beregnet gattes kurven ut ved å bruke et glidende gjennomsnitt med spenn på 5, filteret legges to ganger over hverandre. Det gjøres for at tolkning av grafen skal bli enklere.

Ved et tilfredsstillende injeksjonsforløp vil QP-indeksen falle, dette er et resultat av at trykket øker mens strømningen avtar. Figur 3.4 viser hvordan QP-indeksen faller utover i injeksjonsforløpet som et resultat av at trykket øker og strømningen minker. Om QP-indeksen får et oppsving kan dette tyde på en uønsket hendelse, for eksempel jekking. Det å benytte seg av QP-indeksen kan derfor gi en god indikasjon på injeksjonsforløpet.

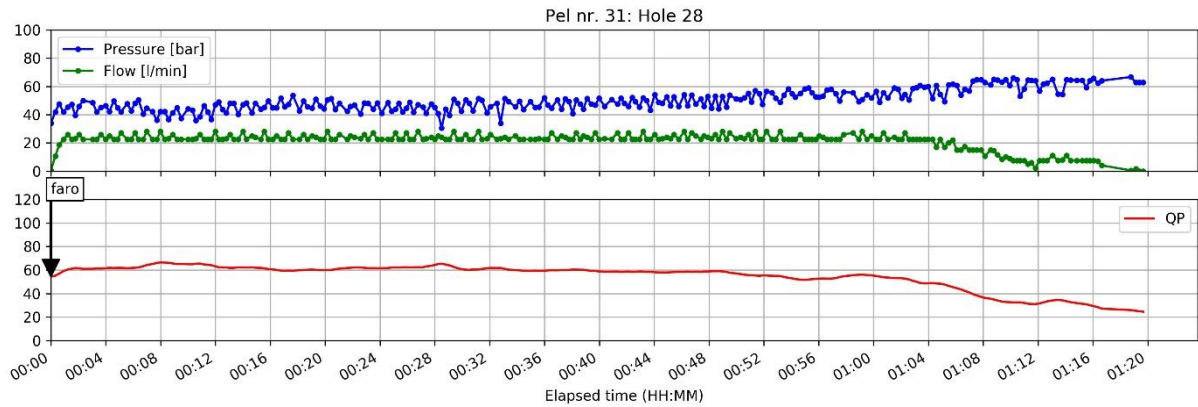
QP-indeksen ble brukt aktivt i den visuelle vurderingen av injeksjonsforløpene (se kap 3.6).

3.5 Fremstilling av grafer

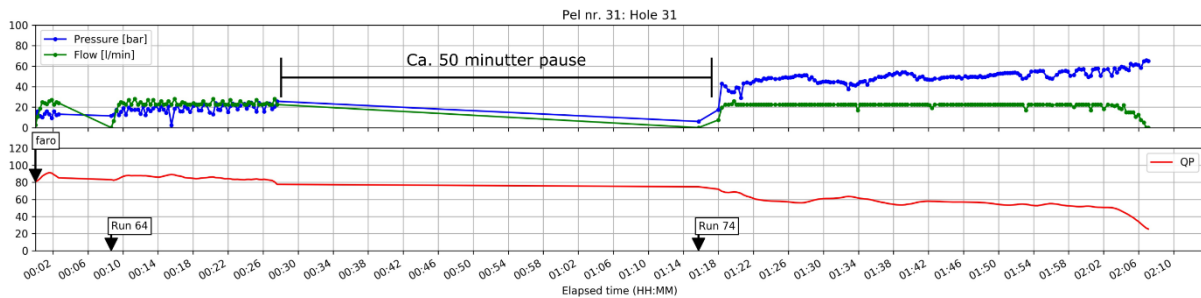
Kandidaten har skrevet et pythonscript (se vedlegg A) som raskt og enkelt fremstiller figurer av injeksjonsforløpene. Pythonscriptet bruker flytrappertene, som illustrert i Figur 3.3, til å lage en figur per injeksjonshull uavhengig av hvor mange hull det er i skjermen. Figurene er todelt for å gjøre det lettere å tolke grafene. Den øverste delen viser trykk og strømning mot tid, mens den nederste delen viser QP-indeks mot tid.

Figurene lagres automatisk som .jpeg-filer i en bestemt mappe og får filnavn etter pelnummer og hullnummer. Figur 3.4 viser hvordan figurene ser ut. Alle grafene har lik målestokk på x- og y-aksen. Samme hvilken figur man ser på vil det alltid være 4 minutter mellom hver vertikale støttelinje og alltid 20 (l/min eller bar) mellom hver horisontale støttelinje. Dette er for å gjøre det lettere å sammenligne grafer med forskjellig varighet. Konsekvensen av å fremstille grafer på denne måten er at bredden av hver enkelt graf avhenger av tidsbruken for hvert hull. Bredden på figurene vil derfor nesten alltid variere.

Vurderingen av injeksjonsforløpene (se kap. 3.6) ble gjennomført på datamaskin. Fordelen med å vurdere på datamaskin er at det kan zoomes inn på grafene og dermed analysere grafene på likt grunnlag hver gang.



Figur 3.4: Figur fremstilt av kandidaten. Øverst er en graf som viser strømning og trykk mot tid. Nederst er QP-indeks mot tid



Figur 3.5: Viser et injeksjonsforløp med en pause i pumpingen.

Figur 3.5 viser et injeksjonsforløp hvor det er tatt en pause etter ca. 27 minutter som varer i ca. 50 minutter. For å gjøre det tydeligere når det pumpes og når det ikke pumpes er det lagt inn en prikk på trykk- og flytgrafen for hvert eneste loggepunkt. I figurene er det og lagt inn noen piler som viser når et nytt «run» starter, et nytt «run» forekommer vanligvis etter en pause. Det markeres også når oppskriften endres, i Figur 3.5 brukes oppskrift «faro» fra start til slutt. Dette er navnet på den oppskriften som er lagt inn av operatøren på injeksjonsriggen, og det er den oppskriften det pumpes med. Oppskriften sier noe om V/C-forholdet. Å vite når oppskriften endres er nyttig i en vurdering av injeksjonsforløpet fordi effekten av endringen kan observeres i grafen. Alt det ovennevnte gjøres automatisk av pythonscriptet.

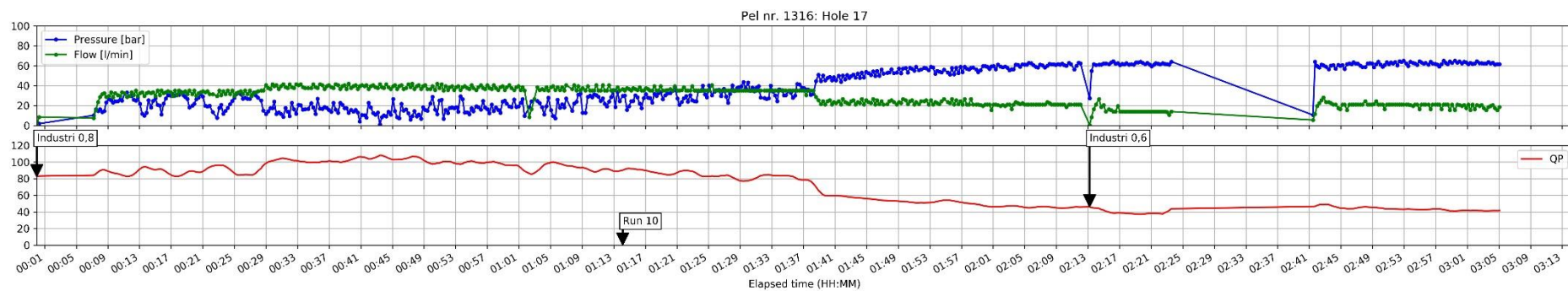
3.6 Visuell vurdering av injeksjonsforløp

Injeksjonsforløpene hullene ved Eysturøyartunnelen med forbruk over 4 000 liter ble vurdert visuelt av meg. Fokuset var å se hvordan injeksjonsforløpene utviklet seg. Det ble lagt vekt på trykkoppbygging, volumstrøm og QP-indeksen.

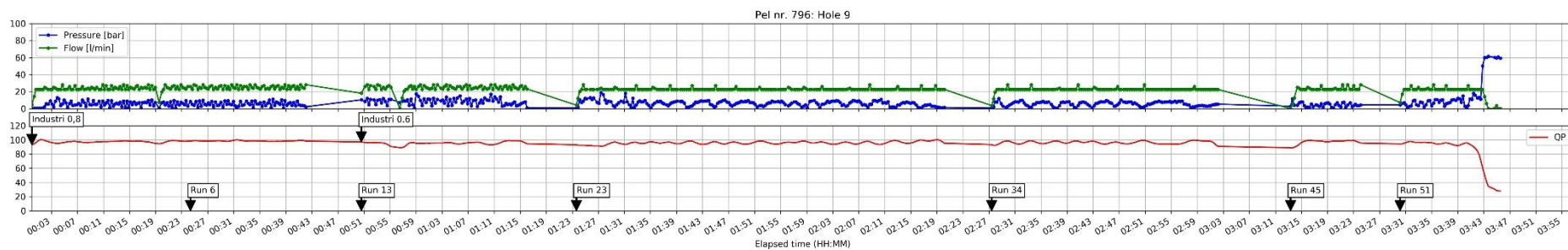
Etter 90 minutter pumping ble den visuelle vurderingen av injeksjonsforløpene gjennomført, og de ble plassert i en av to kategorier:

1. Tilfredsstillende forløp – Injeksjonsforløpet viser positiv trend, som betyr at det kan antas at stoppkriteriet vil nås innen kort tid ved videre pumping
2. Ikke-tilfredsstillende forløp – Injeksjonsforløpet viser liten eller ingen positiv trend, som betyr at det ikke kan antas at stoppkriteriet vil nås innen kort ved videre pumping.

Figur 3.6 viser et forløp i kategori 1. Det er en jevn trykkoppbygging samtidig som QP-grafen faller før 90 minutters pumping, derfor kan det antas at denne utviklingen fortsetter og at stoppkriteriet kan nås innen rimelig tid. Figur 3.7 viser et forløp i kategori 2. Det er ingen tegn til trykkoppbygging før 90 minutter, derfor kan det heller ikke antas at trykkoppbygging vil forekomme innen rimelig tid.



Figur 3.6: Eksempel på injeksjonsforløp som viser tilfredsstillende trykkoppbygging etter 90 minutter, dermed kan videre pumping forsvares. Havner i kategori 1.



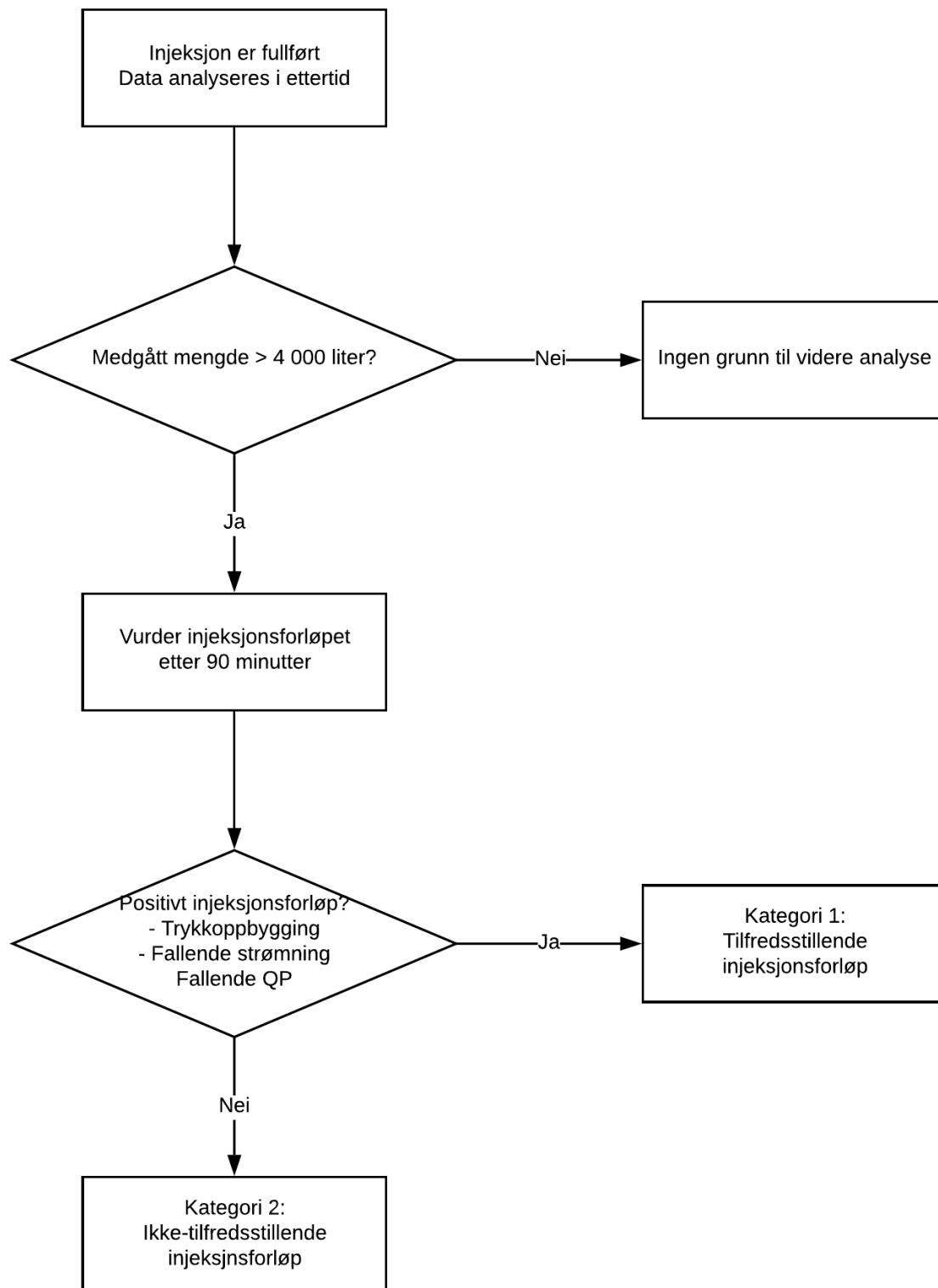
Figur 3.7: Eksempel på injeksjonsforløp som ikke viser tilfredsstillende trykkoppbygging etter 90 minutter. Havner i kategori 2.

En av grunnene til at vurderingen av forløpene ble gjort etter 90 minutters pumping er at det på dette tidspunktet har blitt pumpet såpass mye injeksjonsmasse at det bør være gode tegn til trykkoppbygging og/eller at strømmingen faller. En annen grunn er at massekonsumet etter 90 minutter begynner å bli signifikant. Med jevn pumping på 20l/min vil det etter 90 minutter ha medgått 1 800 liter injeksjonsmasse.

Vurderingen av injeksjonsforløpene ble gjennomført slik at det ikke ble lagt vekt på det som skjedde etter 90 minutters pumping. Det ble gjort slik på grunn av at denne metoden er ment å brukes underveis i injeksjonsomgangen, personen som skal gjøre vurderingen har derfor ingen informasjon om hvordan forløpet vil se ut videre.

For hullene som havnet i kategori 2 (ikke-tilfredsstillende forløp) er anbefalingen å endre oppskrift eller injeksjonsopplegg. Det finnes flere oppskrifter/metoder det kan endres til, og en av disse er å benytte seg av kombinasjonsinjeksjon i et forsøk på å oppnå tilfredsstillende resultat samtidig som massekonsumet begrenses. I denne oppgaven vil det bli anbefalt at hull som havner i kategori 2 benytter kombinasjonsinjeksjon til å fullføre injeksjonen.

Figur 3.8 viser hele prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp, fra analyseprosessen av tid- og masseanalysen i Excel til visuell vurdering av injeksjonsforløpene. Ved å bruke skjermene hvor den totale tidsbruken og massekonsumet allerede var kjent fikk man tak i de hullene hvor de potensielle besparelsene er størst. For disse hullene var det av interesse å utføre beregninger for hva bruk av kombinasjonsinjeksjon ville ha å si for tids- og masseforbruket.



Figur 3.8: Prosedyre for vurdering av injeksjonsforløpene ved Eysturøyartunnelen.

3.7 Kombinasjonsinjeksjon

Å benytte seg av kombinasjonsinjeksjon vil kunne bety kutt i tids- og masseforbruk (se kap. 2.10). For de hullene som havnet i kategori 2 etter prosedyren illustrert i Figur 3.8, ble det gjennomført utregninger på hva en endring til kombinasjonsinjeksjon vil medføre av tid- og kostnadsbesparelser.

I dette kapittelet vil metoden for beregning av tid, masseforbruk og kostnader presenteres. Det gjelder beregninger for både ren sementbasert injeksjon og for kombinasjonsinjeksjon. I tillegg vil metoden for den praktiske gjennomføringen av kombinasjonsinjeksjonen presenteres.

Første steg var å beregne tids- og masseforbruk for opprinnelig injeksjonsopplegg. Deretter ble tid- og masseforbruk for en runde med kombinasjonsinjeksjon beregnet. Til slutt ble det beregnet hvor mye tid og masse det potensielt kunne spares eller ikke spares ved å benytte kombinasjonsinjeksjon.

Det er valgt å dele kombinasjonsinjeksjonen inn i to faser. Dette er gjort for å gjøre utregningene lettere å følge.

- Fase 1 er den delen av injeksjonen som foregår med ren sementbasert injeksjonsmasse, altså det opprinnelige injeksjonsopplegget.
- Fase 2 er selve kombinasjonsinjeksjonen, det vil si at injeksjonsmassen er en blanding av sement og polyuretan.

Etter at utregningene for tid og masseforbruk var utført, ble neste steg å finne ut hva endringene av injeksjonsopplegg hadde å si for kostnadene av injeksjonsomgangen. For å gjøre dette måtte det settes en pris for sement, polyuretan og ikke minst hva en time med injeksjonsarbeid kostet. Når dette var gjort kunne kostnadene sammenlignes. For at beregningene av eventuelle innsparinger skulle være sammenlignbare, ble det forutsatt at kombinasjonsinjeksjonen oppnådde tilfredsstillende resultat etter en omgang.

Masseforbruket til en omgang med kombinasjonsinjeksjon ble beregnet med utgangspunkt i Tabell 3-1 som gir veiledende verdier for massebruk basert på vannforholdene. Jo større vannlekkasjer det er inn i tunnelen/borhullet, desto mer sement og polyuretan blir anbefalt.

Tabell 3-1: Anbefalte mengder materialer til kombinasjonsinjeksjon etter vannforhold i borhull. Tabellen er utarbeidet av Huth & Wien Engineering (2012b).

Vanntilrenning i borhullet	Vanntap i «Lugeon» (l/min,m,MPA)	Volum sement pr. m borhull (liter/m)	Volum «TACSS» pr. m borhull (liter/m)	Mengde katalysator pr. kg «TACSS» (%)
A. Litt (drypp)	0 – 5	10 – 15	1.0 – 1.5	2 – 4
B. Middels	5 – 10	15 – 20	1.5 – 2.0	3 – 6
C. Stor	10 – 20	20 – 30	2.0 – 3.0	5 – 8
D. Meget stor (sprutende vann)	Over 20	>30	>3.0 Beregnet mht. sementvolum	9 – 10

For å beregne masseforbruket med størst mulig sikkerhet, er det viktig å ha kunnskap om følgende parametere:

- Vanntilrenning i borhull eller på stoff
- Hullengde
- Pakkerplassering

Vanntilrenningen i borhullet bestemmer hvor mye sement, TACSS og katalysator som skal benyttes i injeksjonsomgangen. Best mulig kunnskap om vannforholdene gjør at sjansen for feilvurderinger og unødvendig stort massekonsum minimeres.

TACSS er samlingsnavnet på et ikke vannløselig injeksjonspolyuretan, som har høy prepolymeriseringsgrad (Huth & Wien Engineering, 2012b). Det er i denne oppgaven tatt utgangspunkt i et polyuretan med navn HA Cut CFL AF (Huth & Wien Engineering, 2014), som er en enkomponents polyuretan og vil bli benyttet der hvor TACSS nevnes.

En av grunnene til at hullengde og pakkerplassering er viktige parametere å ha kunnskap om, er at beregningene er basert på mengder per meter hull som skal injiseres. En annen grunn er at det er av stor interesse å beregne volumet av injeksjonshullet som skal injiseres. Volumet som skal til for å fylle borhullet kommer i tillegg til de anbefalte mengdene per meter hull som skal injiseres. Hullengde og pakkerplassering er parametere det med liten innsats kan holdes kontroll på, spesielt om man oppholder seg på stoff.

3.7.1 Eksempelhull

For å vise hvordan utregning av mengder til kombinasjonsinjeksjon, og hvordan tids- og kostnadsberegninger ble gjennomført, presenteres det her et fiktivt eksempl hull med høyt tids- og masseforbruk. Først vil noen forutsetninger for utregningen presenteres, deretter vil masseforbruket for hullet uten noen endringer beregnes, så vil tidsbruken og masseforbruket for kombinasjonsinjeksjon beregnes. Deretter vil det utføres en sammenligning av tids- og masseforbruket av tilnærmingen uten noen endringer og tilnærmingen ved bruk av kombinasjonsinjeksjon. Til slutt vil en kort innføring i den praktiske gjennomføringen av kombinasjonsinjeksjon presenteres.

Det antas at et hull har blitt injisert i 5 timer med konstant volumstrøm på 25 l/min, dette tilsvarer 7 500 liter injeksjonsmasse. Gjennom forløpet har det ikke vært noen tegn til trykkoppbygging eller avtagende strømning av injeksjonsmassen, og QP-grafen er derfor helt flat. V/C – forholdet er 0,8.

For å finne antall kg sement i sementblandingen må først injeksjonsmassens densitet finnes. Standard injeksjonssement har en tetthet (ρ) på 3,13 kg/dm³ (Norcem AS, 2018), som vil si 3,13 kg/liter.

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3.2)$$

1,8 kg injeksjonsmasse (m_i) vil bestå av 0,8 kg vann, som tilsvarer 0,8 liter vann, og 1 kg sement. For å finne hvor stort volum dette opptar brukes formel 3.2. Volum av 1kg sement, V_s :

$$V_s = \frac{m_{s0}}{\rho_s} = \frac{1kg}{3,13 \text{ kg/dm}^3} = 0,3195l$$

Volum av 1,8 kg injeksjonsmasse, V_i :

$$V_i = 0,8l + 0,3195l = 1,1195l$$

Densitet av injeksjonsmassen, ρ_i :

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i} = \frac{1,8kg}{1,1195l} = 1,609 \text{ kg/l} \rightarrow 1,609 \text{ kg/dm}^3$$

Vekt av 7 500 liter injeksjonsmasse, m_{tot} :

$$m_{tot} = V_{tot} \times \rho_i = 7\,500l \times 1,609 \text{ kg/dm}^3 = 12\,067,5kg$$

Vekt av sement i blandingen, m_s :

$$\frac{12\,067,7\text{kg}}{1,8} = 6\,704,3\text{kg sement}$$

Antall liter vann i blandingen:

$$12\,067,7\text{kg} - 6\,704,3\text{kg} = 5\,363,4\text{kg} \rightarrow 5\,363,4\text{ liter}$$

Oppsummert betyr dette at det etter 5 timers pumping er brukt 6 704,3 kg sement uten å oppnå tilfredsstillende resultat.

Tabell 3-2: Mengde sement og tidsbruk brukt i det opprinnelige injeksjonsopplegget.

Mengde injeksjonsmasse	Mengde sement	Mengde vann	Tidsbruk
7 500 liter	6 704,3 kg	5 363,4 liter	5:00:00

For å beregne mengdene som trengs for en runde kombinasjonsinjeksjon må det bestemmes noen parametere. Bestemte parametere og beregning av masser vises i Tabell 3-3.

Tabell 3-3: Beregning av mengder til en runde kombinasjonsinjeksjon. Eksempelparametere.

	Mengder	Merknad
Lugeon	10	Bestemt for dette eksempelet
Vanntilrenningskategori	Middels (B)	Se Tabell 3-1
Hullengde (m)	24	Bestemt for dette eksempelet
Hulldiameter, d (m)	0,058	Bestemt for dette eksempelet
Pakkerplassering	2m inn i borhullet	Bestemt for dette eksempelet
Lengde som injiseres, l (m)	22	$24m - 2m = 22m$
Volum av hullet som skal injiseres (liter)	58,1	$V = \pi \times r^2 \times l$ $\pi \times \left(\frac{0,058m}{2}\right)^2 \times 22m = 0,0581m^3$
Volum sement pr. m borhull (liter/m)	20	Se Tabell 3-1
Volum TACSS pr. m borhull (liter/m)	2,0	Se Tabell 3-1
Mengde katalysator pr. kg TACSS (%)	6	Se Tabell 3-1
Volum sement (liter)	498,1	$(22m \times 20 \text{ l/m}) + (58,1l) = 498,1l$
Volum TACSS (liter)	44	$22m \times 2,0 \text{ l/m} = 44l$
Mengde katalysator (kg)	2,84	$(44l \times 1,075 \text{ kg/dm}^3) \times 0,06 = 2,84kg$

I eksempelet antas det at polyuretanen har en tetthet på $1,075\text{kg/dm}^3$, tilsvarende produktet HA Cut CFL AF (Huth & Wien Engineering, 2014). For å gjennomføre denne injeksjonsomgangen skal det injiseres nesten 550 liter masse, med en strømningshastighet på 25 l/min vil dette ta ca. 22 minutter. Membranpumpen som brukes til å injisere polyuretanet har en kapasitet på 4-5 l/min. I tillegg vil det være lurt å beregne 30 minutter til plunder med injeksjonsutstyret ettersom det krever litt opprigging for å gjennomføre injeksjonen. Totalt antas det at en omgang med kombinasjonsinjeksjon vil ta en time. Om resultatet ikke er tilfredsstillende vil en ny runde kunne ta mindre tid ettersom utstyret er på plass og rigget opp.

For å beregne antall kilo sement brukt i kombinasjonsinjeksjonen benyttes samme metode som presentert tidligere i dette kapittelet. Tabell 3-4 viser mengdene brukt i en runde kombinasjonsinjeksjon.

Tabell 3-4: Mengde sement og polyuretan brukt i fase 2 av kombinasjonsinjeksjonen, samt tidsbruken.

Mengde injeksjonsmasse (sementblanding)	Mengde sement	Mengde vann	Mengde polyuretan	Tidsbruk
498,1 liter	445,2 kg	356,2 liter	47,3 kg	1:00:00

Ved å følge metoden for vurdering av injeksjonsforløp (se kap. 3.6) vil det ha blitt injisert i 90 minutter (fase 1) før kombinasjonsinjeksjonen starter opp (fase 2). Masseforbruket og tidsbruken for denne delen av injeksjonen må tas med i beregningen for kostnadene i eksempelet.

Det vil si at medgått mengde etter 90 minutters pumping må finnes:

$$25 \frac{l}{min} \times 90min = 2\ 250l$$

Tabell 3-5: Mengde sement og tidsbruk for eksempelhullet i fase 1 av kombinasjonsinjeksjonen..

Mengde injeksjonsmasse	Mengde sement	Mengde vann	Tidsbruk
2 250 liter	2 011,3 kg	1 609,0 liter	1:30:00

Tabell 3-5 viser masseforbruket etter 90 minutters pumping. Hvis den visuelle vurderingen av injeksjonsforløpet havner i kategori 2 (kap.3.6), vil kombinasjonsinjeksjon gjennomføres. For å si noe om den totale tidsbruken og det totale masseforbruket til kombinasjonsinjeksjon, må verdiene fra Tabell 3-4 og Tabell 3-5 slås sammen.

Tabell 3-6: Samlet tids- og masseforbruk av kombinasjonsinjeksjon for fase 1 og 2.

Mengde sement	Mengde polyuretan	Tidsbruk
2 456,5kg	47,3kg	2:30:00

Tabell 3-7: Oppsummering av tids- og masseforbruket for begge injeksjonsoppleggene, samt forskjellene i forbruket mellom oppleggene.

	Mengde sement	Mengde polyuretan	Tidsbruk
Opprinnelig injeksjonsopplegg			
7 500 liter injeksjonsmasse	6 704,3kg	0kg	5:00:00
Kombinasjonsinjeksjon			
Fase 1: 2250 liter injeksjonsmasse	2 011,3kg		1:30:00
Fase 2: 542,1 liter injeksjonsmasse	445,2kg	47,3kg	1:00:00
Kombinasjonsinjeksjon totalt:	2 456,5kg	47,3kg	2:30:00
Differanse			
Opprinnelig opplegg - Kombinasjonsinjeksjon	4 247,8kg	-47,3kg	2:30:00

Tabell 3-7 viser forskjellene mellom de to injeksjonsoppleggene. Det som gjenstår er å sette en pris for massene og tidsbruken. Prisene kan variere en del, derfor velges det å bruke et spenn av verdier:

- Sementpris: 1 – 3 kr/kg
- Polyuretanpris: 100 – 150 kr/kg
- Timespris injeksjonsarbeid: 3 000 – 7 000 kr/time

Basert på disse prisene beregnes kostnadene.

Tabell 3-8: Sammenligning av kostnader for injeksjonsoppleggene og besparelser dersom kombinasjonsinjeksjon benyttes.

	Pris sement (NOK)		Pris polyuretan (NOK)		Pris tidsbruk (NOK)	
	Min	Maks	Min	Maks	Min	Maks
Opprinnelig injeksjonsopplegg						
7 500 liter injeksjonsmasse	6 704	20 113	0	0	15 000	35 000
Kombinasjonsinjeksjon						
Fase 1: 2250 liter injeksjonsmasse	2 011	6 034	0	0	4 500	10 500
Fase 2: 542,1 liter injeksjonsmasse	445	1 336	4 730	7 095	3 000	7 000
Kombinasjonsinjeksjon totalt:	2 457	7 370	4 730	7 095	7 500	17 500
Differanse						
Opprinnelig opplegg - Kombinasjonsinjeksjon	4 248	12 743	-4 730	-7 095	7 500	17 500
Totalt (NOK):	4 653 – 25 513					

Differansen i Tabell 3-8 tilsvarer potensielle innsparinger ved å benytte kombinasjonsinjeksjon i eksempelhullet. Det er et stort spenn i potensielle innsparinger, på grunn av usikkerhet i pris av masser og pris av arbeidstid. I tillegg til de økonomiske innsparingene vil tidsbruken være halvert ved bruk av kombinasjonsinjeksjon.

Den praktiske gjennomføringen av kombinasjonsinjeksjon innebærer å benytte en membranpumpe som kobles til ventilen for akselerator på injeksjonsstaven (se Figur 2.4). Membranpumpen pumper polyuretan inn i injeksjonshullet, men denne pumpen har begrenset pumpekapasitet og derfor benyttes sementpumpen til å presse polyuretanet videre ut i bergmassen. Etter en ventetid på noen minutter injiseres det som normalt med sementbasert masse. Ventetiden vil ha gitt polyuretanet tid til å reagere. Om det ikke oppnås tilfredsstillende trykkoppbygging kan det gjennomføres ny omgang hvor det injiseres polyuretan og sement. (Huth & Wien Engineering, 2012b).

4 RESULTATER

Målet med oppgaven har vært å belyse hvordan pumpedata kan brukes som verktøy til å følge opp injeksjonsarbeider. Dette er gjort ved å analysere tids- og masseforbruk, samt benytte trykk og sementstrømning til å vurdere injeksjonsforløp. Resultatene fra studien vil bli presentert i dette kapitlet.

Begge prosjektene, som blir omtalt i denne oppgaven, har brukt standard injeksjonssement. V/C-forholdet har variert, men stort sett er det benyttet 0,8 eller 0,6 ved Eysturøyartunnelen og 0,9 eller 0,7 ved Lyshorntunnelen. De strekningene av tunnelene det er samlet data fra har bedrevet behovsprøvd injeksjon.

Ved Lyshorntunnelen er stoppkriteriet satt til 80 bar eller ved veldig høyt massekonsum (over 2 000 liter). Eysutøyartunnelen har et stoppkriterie på 60 bar i mesteparten av tunnelen, med unntak i områder med lav overdekning hvor stoppkriteriet er betydelig lavere.

Det er analysert 1 160 injeksjonshull fordelt på 50 skjermmer fra Eysturøyartunnelen. Funnene fra dette har resultert i en ny prosedyre for vurdering av injeksjonsforløp, som blir gjort greie for i andre del av dette kapitlet. Den nye prosedyren er blitt benyttet til å analysere 82 injeksjonshull fordelt på 3 skjermmer ved Lyshorntunnelen, samt de 1 160 injeksjonshullene ved Eysturøyartunnelen.

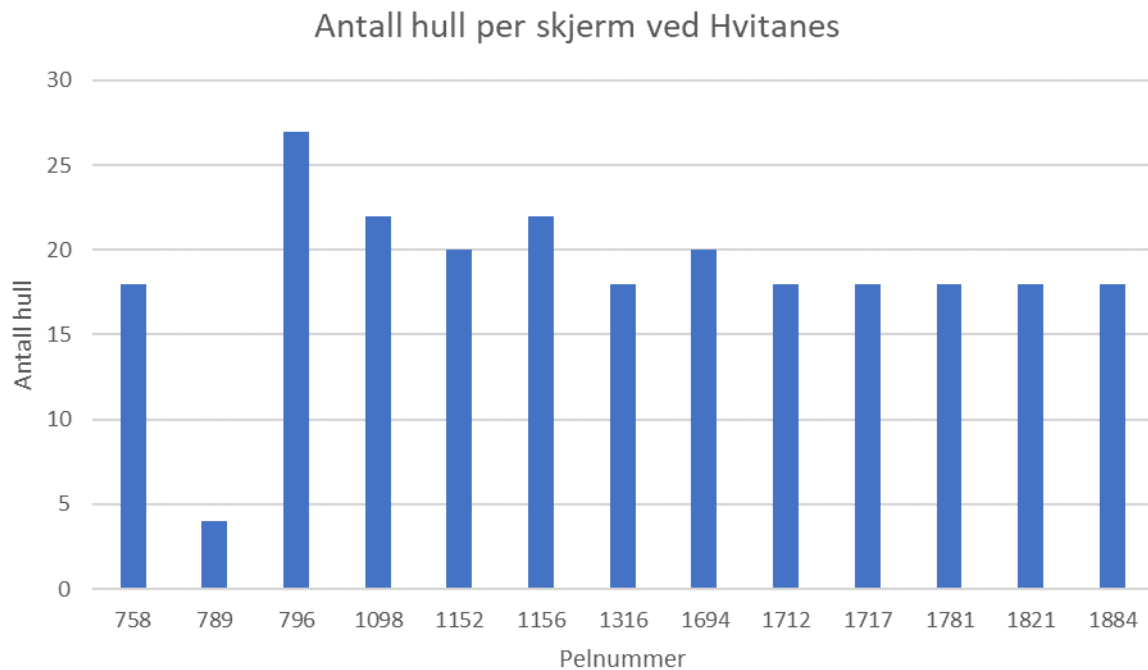
4.1 Eysturøyartunnelen

Resultatene som legges fram i denne delen er produktet av analysene utført på dataene fra Eysturøyartunnelen. Analysen av masseforbruket legger grunnlaget for hvilke hull som blir vurdert visuelt. Det vil si hull med forbruk på over 4 000 liter injeksjonsmasse. Utfallet av den visuelle vurderingen avgjør hvilke hull det utføres beregninger for kombinasjonsinjeksjon på.

Dataene som blir presentert her stammer fra logger registrert av Bever Control på injeksjonsriggen. Databehandlingen ble presentert i kapittel 3.3. Resultatene for hver stuff vil bli presentert hver for seg, deretter vil det samlede resultatet presenteres. Masse til fylling av hull er ikke trukket fra i disse resultatene.

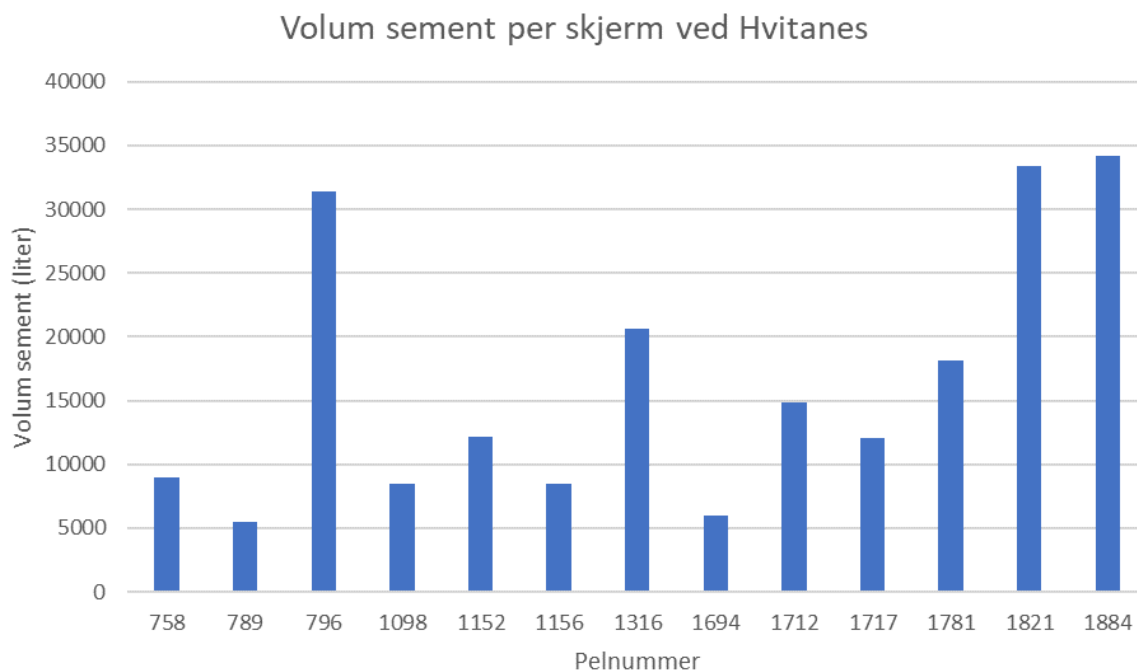
4.1.1 Tids- og masseforbruk

Fra stoffen som drives fra Hvitanes er det analysert 13 injeksjonsskjermer med totalt 241 injeksjonshull. Det er skjermene fra pel 758 til og med 1884 som er analysert. Tids- og masseforbruk fra skjermene vil først legges fram, deretter vil data fra hull presenteres. Stoffen fra Hvitanes er drevet med pelnumrene fra lavest til høyest, det vil si at første skjerm analysert er ved pel 758 og siste er ved 1884. Strekningen som er analysert er 1 126 meter.



Figur 4.1: Fordeling av antall hull per skjerm ved Hvitanesstøffen.

Figur 4.1 viser fordelingen av antall hull per skjerm. Normalen for dette prosjektet er at det er 18 hull per skjerm, byggherren kan imidlertid anwise plassering av flere hull om dette skulle være ønskelig. 5 skjermene har 20 eller flere hull, mens en skjerm har kun 4 hull.



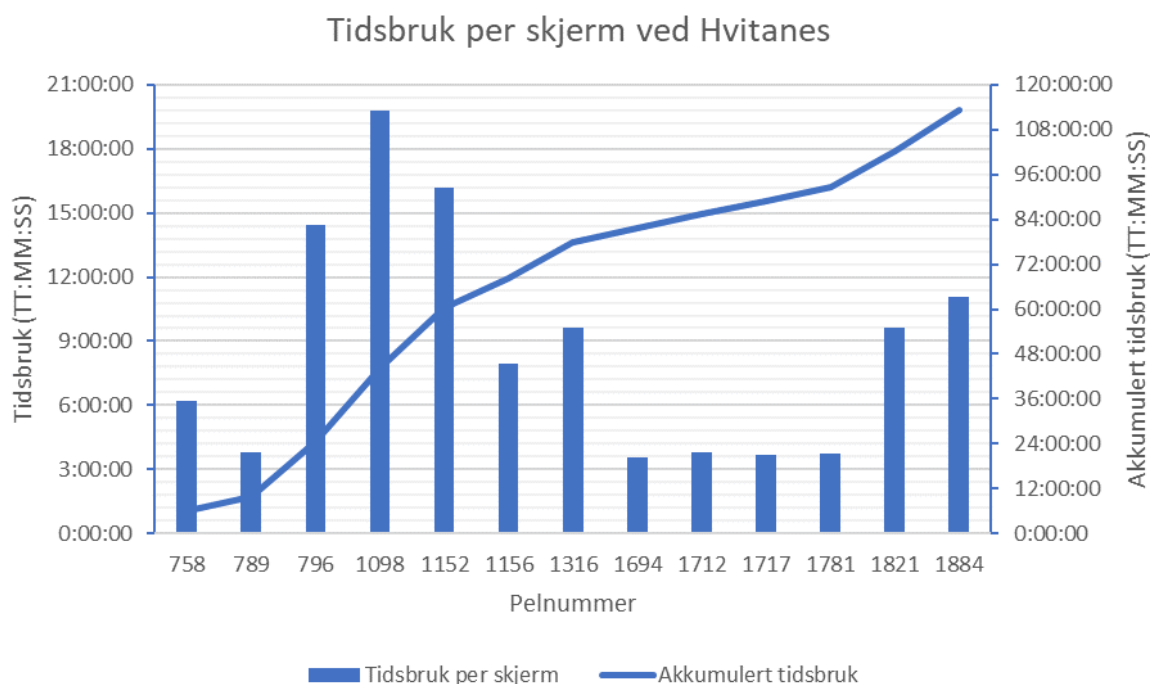
Figur 4.2: Masseforbruk per skjerm ved Hvitanesstuffen.

Figur 4.2 viser masseforbruket for hver enkelt skjerm ved Hvitanesstuffen. Skjermene ved pel 796, 1821 og 1884 skiller seg ut ved at forbruket er over 30 000 liter sementmasse. Tabell 4-1 viser masseforbruk fra de 13 skjermene ved Hvitanesstuffen. Forskjellen mellom maksimum og minimum medgåtte mengder er 28 795 liter. På strekningen fra pel 758 til pel 1884 er det medgått 190 liter sementmasse per løpemeter.

Tabell 4-1: Mengdeanalyse for skjermene ved Hvitanes.

Resultater fra skjermene mellom pel 758 og 1884

Min. medgått masse (liter)	5 447
Maks medgått masse (liter)	34 242
Gjennomsnittlig medgått masse (liter)	16 479
Totalt medgått masse (liter)	214 229
Medgått masse per meter tunnel (liter/m)	190



Figur 4.3: Viser fordelingen av tidsbruk per skjerm, samt akkumulert tidsbruk ved Hvitanesstufen.

Tabell 4-2 viser tidsbruken for de 13 skjermene ved Hvitanesstufen. Figur 4.3 viser fordeling av skjermene etter tidsbruk, samt akkumulert tidsbruk. Flere skjermer har injeksjonstid på drøyt 3 timer, mens 3 skjermer har injeksjonstid på over 12 timer. Det er stor variasjon i injeksjonstiden og det er over 16 timer mellom minimum og maksimum.

Tabell 4-2: Tidsanalyse for skjermene ved Hvitanes.

Resultater fra skjermene mellom pel 758 og 1884

Min. tidsbruk (TT:MM:SS)	3:32:13
Maks tidsbruk (TT:MM:SS)	19:46:48
Gjennomsnittlig tidsbruk (TT:MM:SS)	8:43:16
Total tidsbruk (TT:MM:SS)	113:22:26

Tabell 4-3 viser noen nøkkeltall for masseforbruket per hull for Hvitanesstufen. 0 liter medgått masse betyr at man ikke har fått inn noe masse i hullet, som betyr at hullet allerede er fylt opp av injeksjonsmasse fra et annet hull i skjermen.

Tabell 4-3: Mengdeanalyse for hull ved Hvitanes

Resultater fra hullene mellom pel 758 og 1884

Totalt antall hull	241
Gjennomsnittlig antall hull per skjerm	18,5
Min. medgått masse (liter)	0
Maks medgått masse (liter)	12 961
Gjennomsnittlig medgått masse (liter)	889
Totalt medgått masse (liter)	214 229
Hull med forbruk over 4000 liter	14
% av hull med forbruk over 4000 liter	5,8 %
Samlet forbruk av hullene med forbruk over 4000 liter (liter)	82 746
% av totalt masseforbruk	38,6 %

Tabell 4-4 viser noen nøkkeltall for tidsbruken på enkelthull for Hvitanesstuppen. Total tidsbruk for hull er større enn total tidsbruk for skjermene, dette er fordi man kan injisere på flere hull samtidig. Minimum tidsbruk er 0:00:00, noe som mest sannsynlig betyr at hullet er lagt inn i datasytemet, men ikke injisert på.

Tabell 4-4: Tidsanalyse for hullene ved Hvitanes.

Resultater fra skjermene mellom pel 758 og 1884

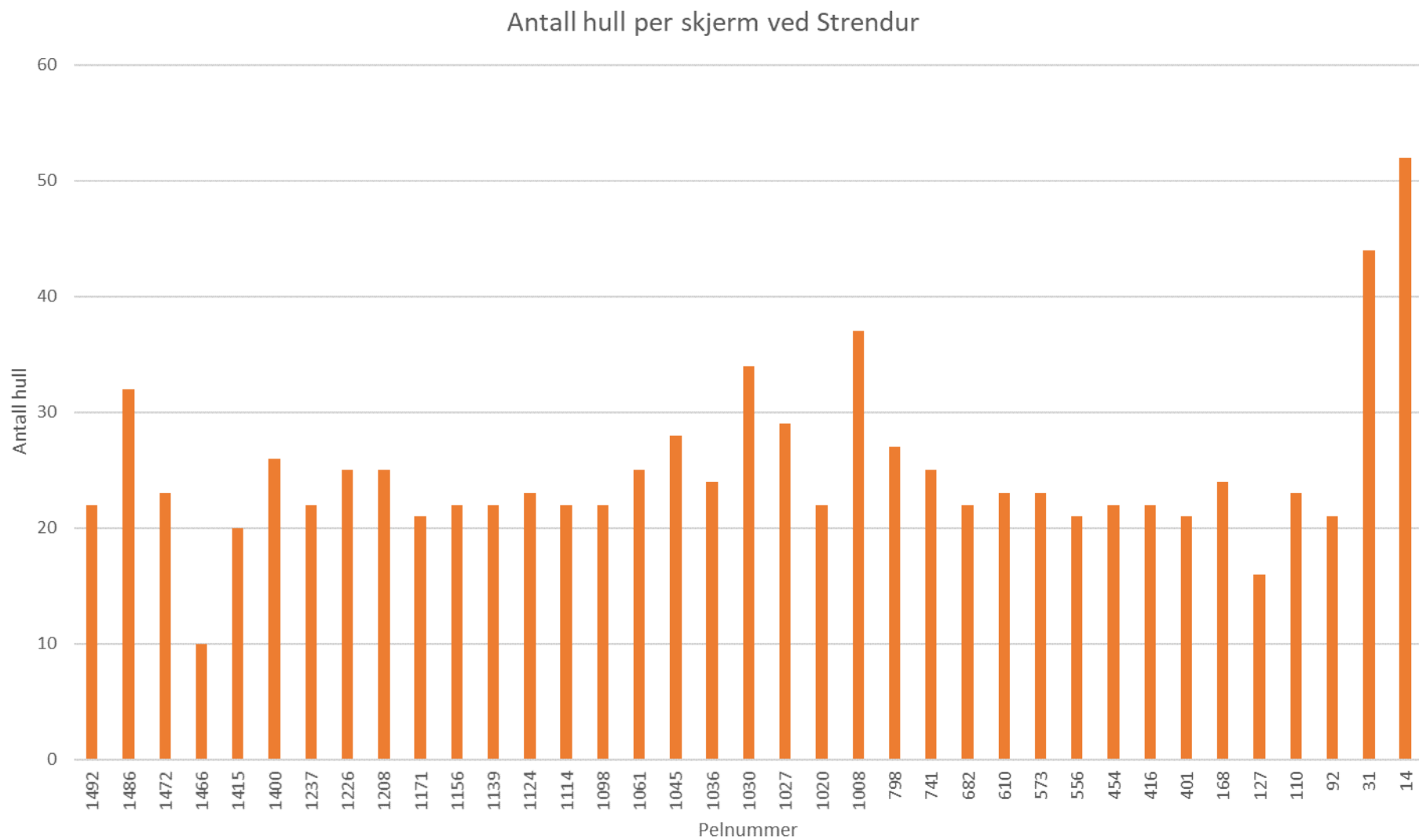
Min. tidsbruk (TT:MM:SS)	0:00:00
Maks tidsbruk (TT:MM:SS)	11:07:30
Gjennomsnittlig tidsbruk (TT:MM:SS)	0:57:13
Total tidsbruk (TT:MM:SS)	225:01:56
Tid brukt på hull med forbruk over 4000 liter (TT:MM:SS)	76:34:21
% av total tid brukt på hull med forbruk over 4000 liter	34,0 %

Resultatene som er presentert i Tabell 4-3 og Tabell 4-4 viser at 5,8% (14 hull) av hullene står for 38,6% av det totale massforbruket og 34% av den totale tidsbruken ved Hvitanesstuppen.

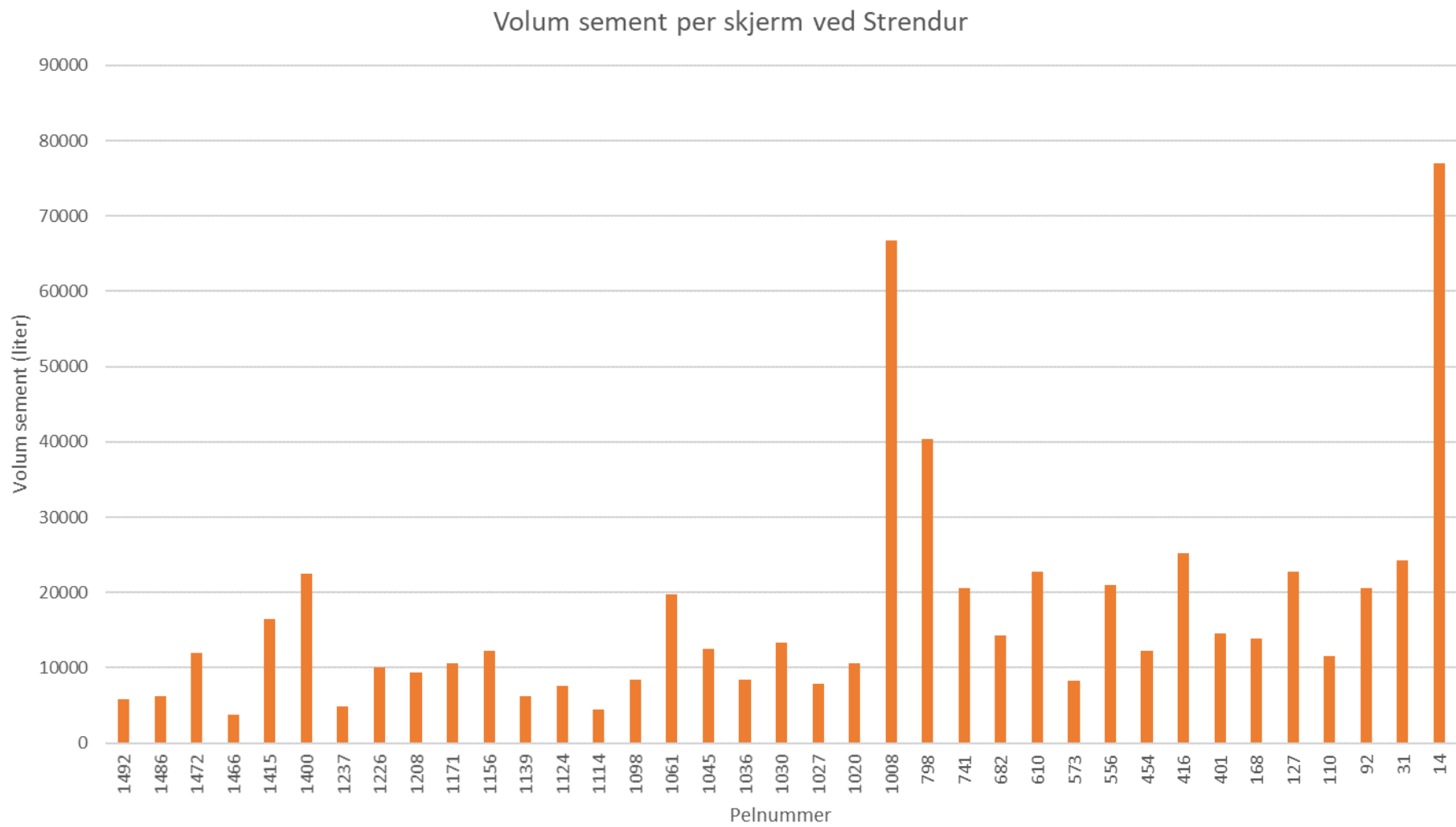
Fra stoffen som drives fra Strendur er det analysert 919 injeksjonshull fordelt på 37 skjermer. Skjermene fra pel 1492 til og med pel 14 er analysert. Ved Strendurstuffen er første skjerm 1492 og det har blitt drevet i synkende rekkefølge til pel 14. Den studerte strekningen er 1 478 meter lang.

Figur 4.4 viser fordelingen av antall hull per skjerm. Som tidligere nevnt er normalen for dette prosjektet 18 hull per skjerm, men byggherren kan imidlertid anwise plassering av flere hull om dette skulle være ønskelig. Ved Strendurstuffen er det stort sett mellom 21 og 23 hull per skjerm. 2 skjermer har over 40 hull, mens 3 skjermer har under 20 hull.

Figur 4.5 viser masseforbruket for hver enkelt skjerm ved Strendurstuffen. Skjermene ved pel 1008, 798 og 14 skiller seg ut ved at forbruket er over 40 000 liter sementmasse. Tabell 4-5 viser masseforbruket fra de 37 skjermene ved Strendurstuffen. Forskjellen mellom maksimum og minimum medgått mengde er 73 220 liter. På strekningen fra pel 1492 til pel 14 er det medgått 412 liter sementmasse per løpemeter.



Figur 4.4: Fordeling av antall hull per skjerm ved Strendurstuffen.



Figur 4.5: Masseforbruk per skjerm ved Strendursstufan.

Tabell 4-5: Mengdeanalyse for skjermene ved Strendurstuffen.

Resultater fra skjermene mellom pel 1492 og 14

Min. medgått masse (liter)	3 806
Maks medgått masse (liter)	77 026
Gjennomsnittlig medgått masse (liter)	16 466
Totalt medgått masse (liter)	609 228
Medgått masse per meter tunnel (liter/m)	412

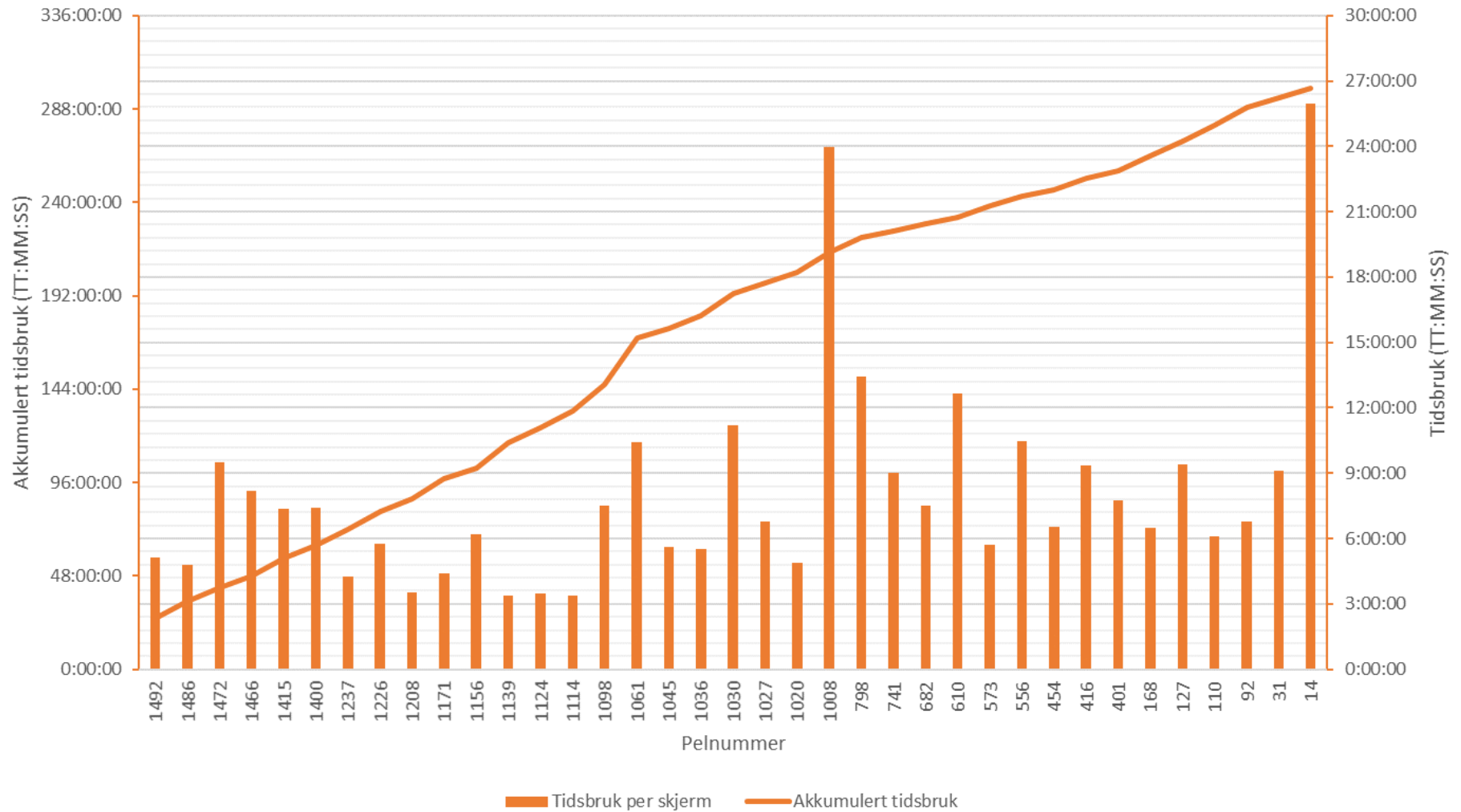
Tabell 4-6 viser nøkkeltall for tidsanalysen av skjermene ved Strendurstuffen. Det er over 22 timer mellom minimum og maks tidsbruk.

Tabell 4-6: Tidsanalyse for skjermene ved Strendurstuffen.

Resultater fra skjermene mellom pel 1492 og 14

Min. tidsbruk (TT:MM:SS)	3:21:49
Maks tidsbruk (TT:MM:SS)	25:57:46
Gjennomsnittlig tidsbruk (TT:MM:SS)	8:04:39
Total tidsbruk (TT:MM:SS)	298:52:19

Tidsbruk per skjerm ved Strendur



Figur 4.6: Viser fordelingen av tidsbruk per skjerm, samt akkumulert tidsbruk ved Strendurstuffen.

Tabell 4-7 viser nøkkeltall fra mengdeanalysen av hull ved Strendurstuffen. Minimum 1 liter medgått masse betyr at hullet har vært fullt fra før og at det ikke har vært mulig å få inn noe masse. 23 hull har forbruk over 4000 liter.

Tabell 4-7: Mengdeanalyse for hullene ved Strendurstuffen.

Resultater fra hullene mellom pel 1492 og 14

Totalt antall hull	919
Gjennomsnittlig antall hull per skjerm	24,8
Min. medgått masse (liter)	1
Maks medgått masse (liter)	11 988
Gjennomsnittlig medgått masse (liter)	663
Totalt medgått masse (liter)	609 228
Hull med forbruk over 4000 liter	23
% av hull med forbruk over 4000 liter	2,5 %
Samlet forbruk av hullene med forbruk over 4000 liter (liter)	139 728
% av totalt masseforbruk	22,9 %

Tabell 4-8 viser nøkkeltall fra tidsanalysen av hull ved Strendurstuffen. Totalt tidsbruk for hull er større enn totalt tidsbruk for skjermene, dette er fordi det kan injiseres på flere hull samtidig. Total tidsbruk er medregnet eventuelle pauser i pumpingen.

Tabell 4-8: Tidsanalyse for hull ved Strendurstuffen.

Resultater fra skjermene mellom pel 1492 og 14

Min. tidsbruk (TT:MM:SS)	0:00:00
Maks tidsbruk (TT:MM:SS)	11:07:16
Gjennomsnittlig tidsbruk (TT:MM:SS)	0:50:18
Total tidsbruk (TT:MM:SS)	770:24:17
Tid brukt på hull med forbruk over 4000 liter (TT:MM:SS)	136:31:32
% av total tid brukt på hull med forbruk over 4000 liter	17,7%

Resultatene som er presentert i Tabell 4-7 og Tabell 4-8 viser at 2,5% (23 hull) av hullene står for 22,9% av det totale masseforbruket og 17,7% av den totale tidsbruken ved Strendurstuffen.

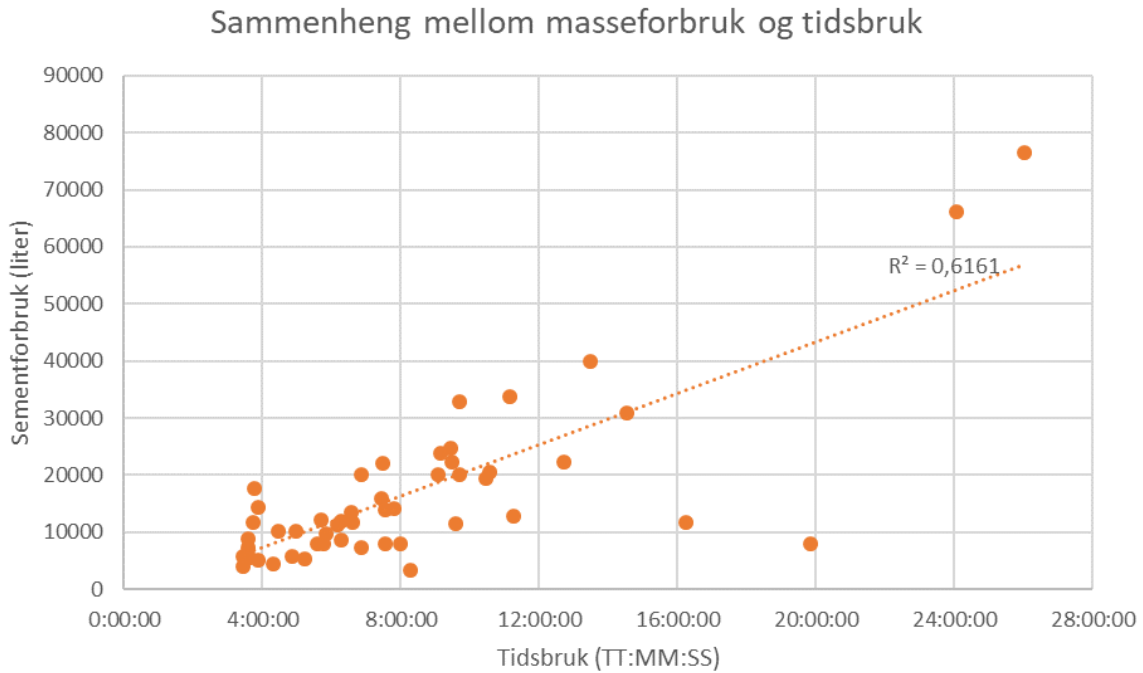
Tabell 4-9 viser de samlede resultatene av masseanalysen fra Eysturøyartunnelen. Av 1 160 hull hadde 37 hull (3,2%) forbruk over 4000 liter. Disse hullene sto for 27,0% av det totale masseforbruket og 21,4% av den totale tidsbruken ved Eysturøyartunnelen. Grunnen til at den totale tidsbruken for hull er større enn den er for skjermer, er at det kan injiseres flere hull på en gang, dermed kan det logges medgått tid på flere hull samtidig. I snitt injiseres det på litt over to linjer (hull) samtidig.

Tabell 4-9: Mengde- og tidsanalyse fra samtlige hull ved Eysturøyartunnelen.

Samlede resultater fra Eysturøyartunnelen

Strekning analysert (m)	2 604
Totalt antall skjermer	50
Totalt antall hull	1 160
Totalt medgått masse (liter)	823 457
Gjennomsnittlig medgått masse (liter per hull)	710
Medgått masse per meter tunnel (liter/m)	316
Hull med forbruk over 4000 liter	37
% av hull med forbruk over 4000 liter	3,2%
Samlet forbruk av hullene med forbruk over 4000 liter (liter)	222 474
% av totalt masseforbruk	27,0%
Total tidsbruk alle skjermer (TT:MM:SS)	412:14:45
Gjennomsnittlig tidsbruk for skjermer (TT:MM:SS)	8:14:42
Total tidsbruk hull (TT:MM:SS)	995:26:13
Tidsbruk på hull med forbruk over 4000 liter (TT:MM:SS)	213:05:53
% av tid brukt på hull med forbruk over 4000 liter	21,4%

Figur 4.7 viser at det er en viss sammenheng mellom masseforbruket og tidsbruken ved Eysturøyartunnelen. Tidsbruken er fra pumpestart ved første hull til avslutning av siste hull.



Figur 4.7: Sammenheng mellom masseforbruk og tidsbruk ved Eysturøyartunnelen.

4.1.2 Visuell vurdering av injeksjonsforløp

Injeksjonsforløpene til de 37 hullene som hadde over 4000 liter forbruk er analysert i detalj etter metoden presentert i kapittel 3.6. Tabell 4-10 viser en oversikt over hullene som havnet i kategori 2 sammen med masseforbruket for de aktuelle skjermene. Skjermene 796, 1821 og 1884 ved Hvitanesstuppen skiller seg ut sammen med skjermene 1008, 798 og 14 ved Strendurstuppen. Disse 6 skjermene har alle 3 eller flere hull i kategori 2. Samtidig er det disse skjermene som har det høyeste masseforbruket av alle skjermene ved Eysturøyartunnelen.

Tabell 4-10: Injeksjonsforløpene som havnet i kategori 2, samt medgått mengde injeksjonsmasse for de respektive skjermene.

Stuff - Skjerm	Antall hull med forbruk > 4 000 liter	Antall hull i kategori 2	Medgått mengde for skjermen (liter)
Hvitanes – Pel 796	3	3	31 371
Hvitanes – Pel 1152	1	1	12 172
Hvitanes – Pel 1316	1	0	20 590
Hvitanes – Pel 1712	1	1	14 822
Hvitanes – Pel 1781	1	1	18 185
Hvitanes – Pel 1821	4	4	33 379
Hvitanes – Pel 1884	3	3	34 242
Strendur – Pel 1400	1	1	22 509
Strendur – Pel 1008	5	4	66 691
Strendur – Pel 798	5	5	40 328
Strendur – Pel 610	2	1	22 697
Strendur – Pel 416	2	2	25 209
Strendur – Pel 401	1	1	14 509
Strendur – Pel 14	7	6	77 026
Totalt:	37	33	

4.1.3 Kombinasjonsinjeksjon

Det er utført beregninger av hvordan tidsbruken, masseforbruket og kostnadene for injeksjonshullene i kategori 2 (Tabell 4-10) ville vært dersom det etter 90 minutters pumping ble bestemt at kombinasjonsinjeksjon skulle gjennomføres. Detaljerte utregninger finnes i vedlegg F.

Parameterne som benyttes for utregningen er forklart i kapittel 3.7. Opprinnelig injeksjon foregikk uten at kandidaten var tilstede på stuff. Informasjon om lugeonverdier og pakkerplasseringer var begrenset. Dermed ble det gjort noen sannsynlige antagelser ved utregningene.

Det ble antatt at:

- Pakkerne er plassert 2 meter inn i hvert hull
- Hulldiameter er 58mm
- Vannforholdene tilsvarer kategori B: Middels (Tabell 3-1)
- Prisene for masser:
 - Sement: 1 – 3 kr/kg
 - Polyuretan 100 – 150 kr/kg
- Pris for en time med injeksjon:
 - 3000 – 7000 kr/time

Grunnen til at det er lagt inn et spenn i prisene for masser og tidsbruk er at det er utfordrende å si nøyaktig hva disse vil være. Derfor vil det for kostnadsberegningene presenteres en minimums- og en maksimumspris. Som nevnt i kapittel 2.11 kan timeprisen for injeksjon variere en del, Andersson (2005) fant at prisene for ulike prosjekter varierte mellom 2 000 kr/time og 4 200 kr/time. Det er sannsynlig at prisen har gått opp i siden 2005 og dermed er 3 000-7 000 kr/time sett på som et sannsynlig spenn.

Basert på beskrivelser av vannforholdene på stuff ble det bestemt at kategori B, middels vanntilrenning skulle brukes for alle hull. Pakkerplassering ble satt til 2 m inn i hullet. Plasseringen varierer nok noe, men 2 m inn er en naturlig plassering. Hullengde var kjent for alle hull. For skjermen ved pel 14 i Strendurstuffen var denne 30 m. For de resterende skjermene i tunnelen var hullengden 24 m.

Med en hulldiameter på 58mm betyr det at volumet av hullene som skal fylles med injeksjonsmasse er 74 liter for skjermen ved pel 14 og 58,1 liter for resten av skjermene.

Tabell 4-11: Viser tid- og masseforbruket til hullene i kategori 2. Både for opprinnelig injeksjonsopplegg og for kombinasjonsinjeksjon.

	Opprinnelig opplegg	Kombinasjonsinjeksjon	Differanse
Sementforbruk (kg)	168 615	64 540	104 075
Polyuretanforbruk (kg)	0	1 638	-1 638
Tidsbruk (TT:MM:SS)	194:05:53	83:00:00	111:05:53

Tabell 4-11 viser nøkkeltallene fra utregningen av massekonsumet og tidsbruken ved opprinnelig injeksjonsopplegg og for kombinasjonsinjeksjon. Kombinasjonsinjeksjon ville

benyttet kun 38,3% av de opprinnelige brukte sementmassene og 42,8% av den opprinnelige injeksjonstiden.

For opprinnelig injeksjonsopplegg er prisen for det totale sementforbruket og den totale injeksjonstiden beregnet. For kombinasjonsinjeksjonen er tid og masseforbruket for både fase 1 og fase 2 medregnet. Det vil si forbruket av opprinnelig injeksjonsopplegg opptil 90 minutter, samt forbruket av selve kombinasjonsinjeksjonen. Det er antatt at en runde med kombinasjonsinjeksjon vil ta 1 time, medregnet plunder med utstyr.

Tabell 4-12: Kostnadsberegning for injeksjon av hull i kategori 2.

		Opprinnelig opplegg	Kombinasjonsinjeksjon	Differanse
Massepris (NOK)	Min	168 615	228 370	-59 755
	Maks	505 845	439 363	66 482
Kostnad for tidsbruk (NOK)	Min	582 294	249 000	333 294
	Maks	1 358 686	581 000	777 686
Total kostnad (NOK)	Min	750 909	477 370	273 539
	Maks	1 864 531	1 020 363	844 168

Tabell 4-12 viser nøkkeltallene fra utregningen av kostnadene forbundet med å injisere hullene i kategori 2. Ettersom det er utfordrende å estimere prisene korrekt er det som tidligere nevnt benyttet minimum og maksimum priser. Minimumspris tilsvare sementpris på 1 kr/kg, polyuretanpris på 100 kr/kg og pris for injeksjon på 3 000 kr/time. Maksimumspris tilsvare sementpris på 3 kr/kg, polyuretanpris på 150 kr/kg og pris for injeksjon på 7 000 kr/time.

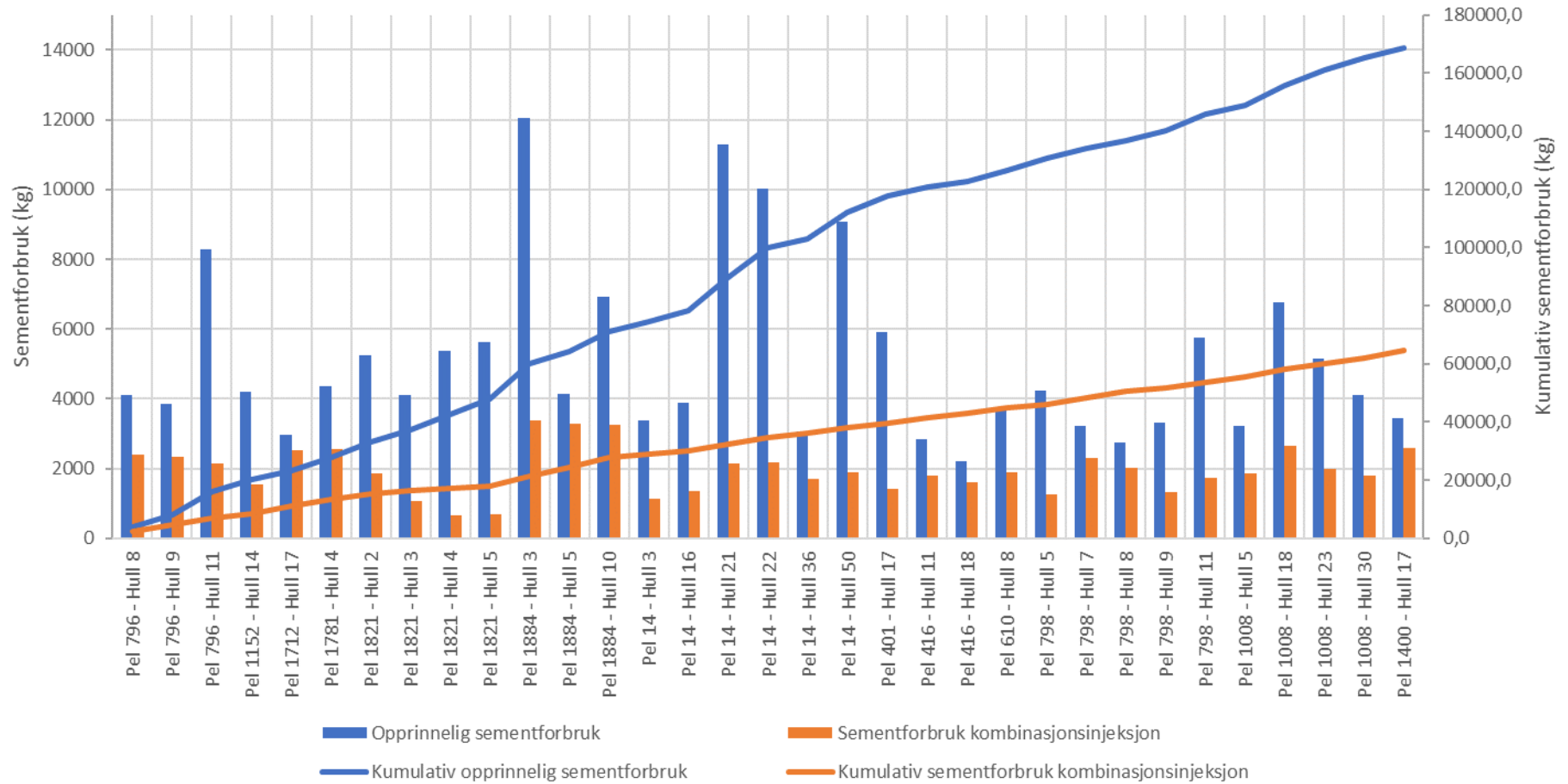
Totalt er det store muligheter for innsparinger ved å benytte seg av kombinasjonsinjeksjon, men det er først og fremst tidsbruken som medfører den store innsparingen. I tilfellet med minimumspriser (sement og polyuretan) vil man gå i minus på utgifter til massene. Avhengig av prisene benyttet vil kombinasjonsinjeksjonens totale kostnader tilsvare mellom 54,7% og 63,6% av de opprinnelige kostnadene.

Figur 4.8 viser sementforbruket for det opprinnelige injeksjonsopplegget og for kombinasjonsinjeksjon. Ved å benytte kombinasjonsinjeksjon vil sementforbruket minke i samtlige injeksjonshull.

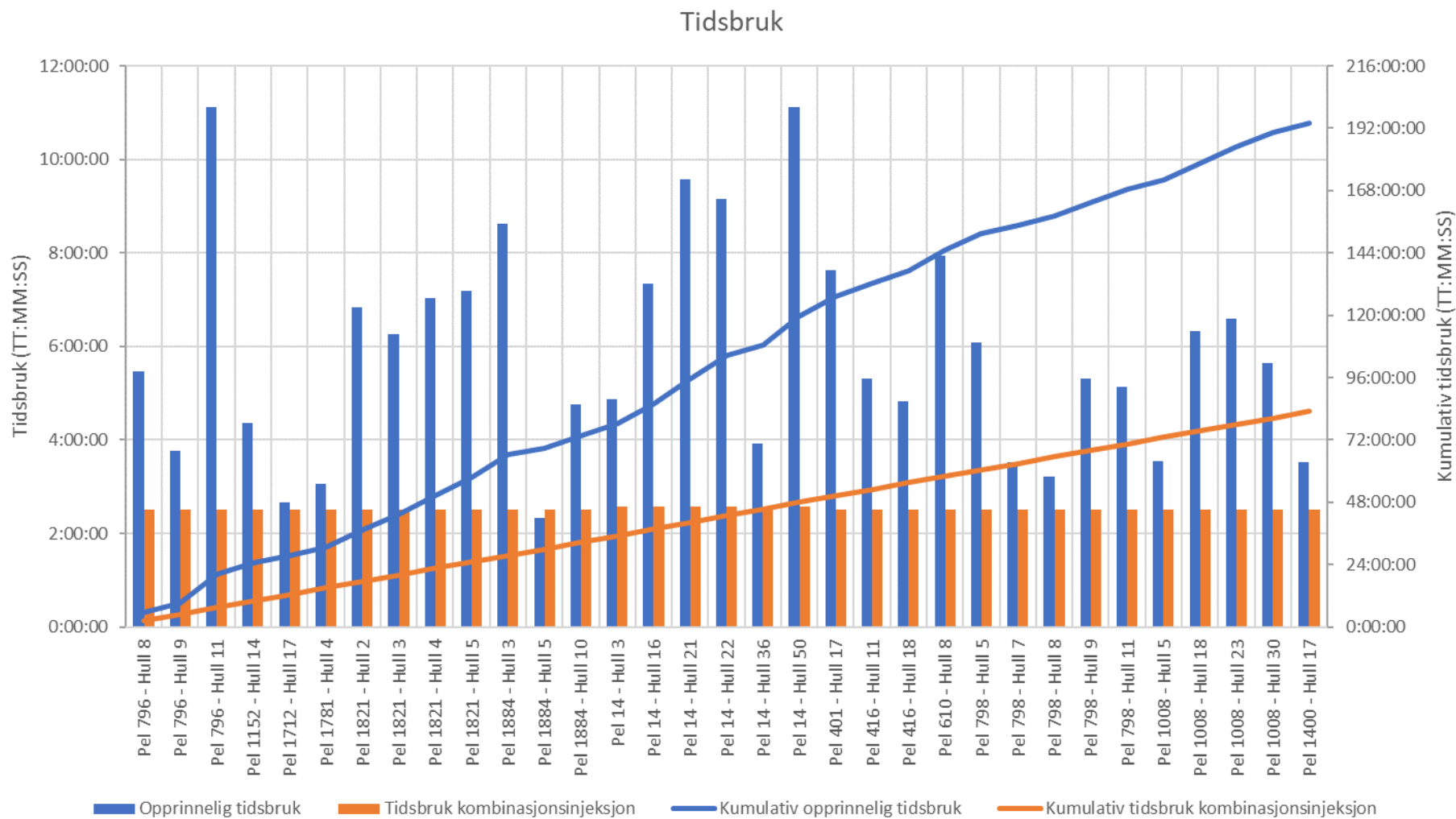
Figur 4.9 viser tidsbruken for det opprinnelige injeksjonsopplegget og for kombinasjonsinjeksjon. Det er kun hull 5 i skjermen ved pel 1884 på Hvitanesstuppen det ikke spares tid på ved å benytte kombinasjonsinjeksjon. For de fleste hullene er kuttene i tidsbruk på minst to timer.

Figur 4.10 og Figur 4.11 viser de mulige besparelsene som kan oppnås om kombinasjonsinjeksjon blir benyttet. Figurene representerer henholdsvis besparelsene for minimum og maksimum prisnivå, som forklart lenger opp. Ved minimumspriser vil materialkostnadene (sement og polyuretan) bli høyere ved kombinasjonsinjeksjon enn ved å følge opprinnelig injeksjonsopplegg, men det vil likevel oppnås total besparelse ettersom kuttene i tidsbruk er store. Ved maksimumspriser er det besparelser både innenfor materialer og tidsbruk.

Sementforbruk

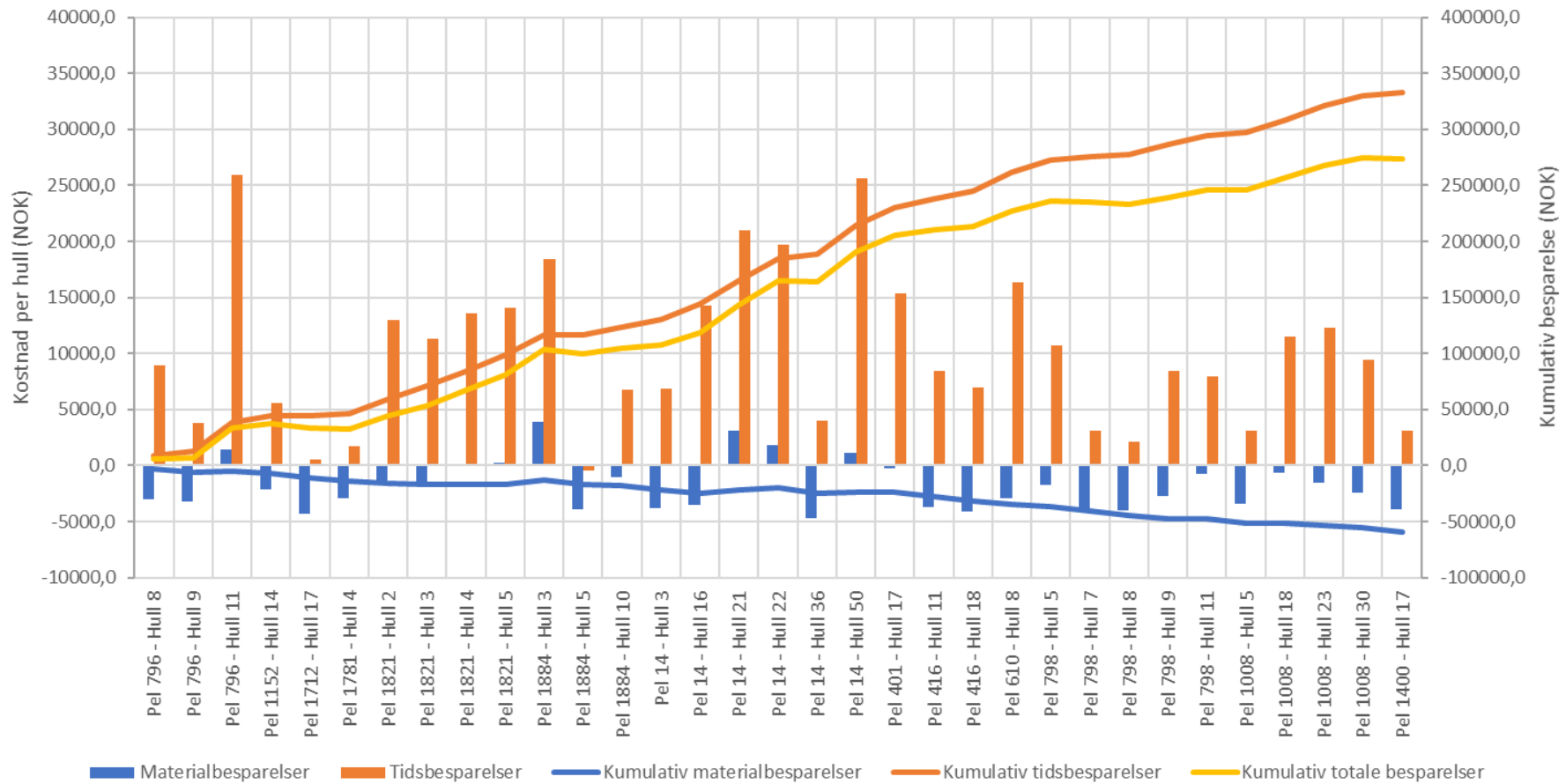


Figur 4.8: Viser sementforbruket for opprinnelig injeksjonsopplegg og for kombinasjonsinjeksjon ved Eysturøyartunnelen.



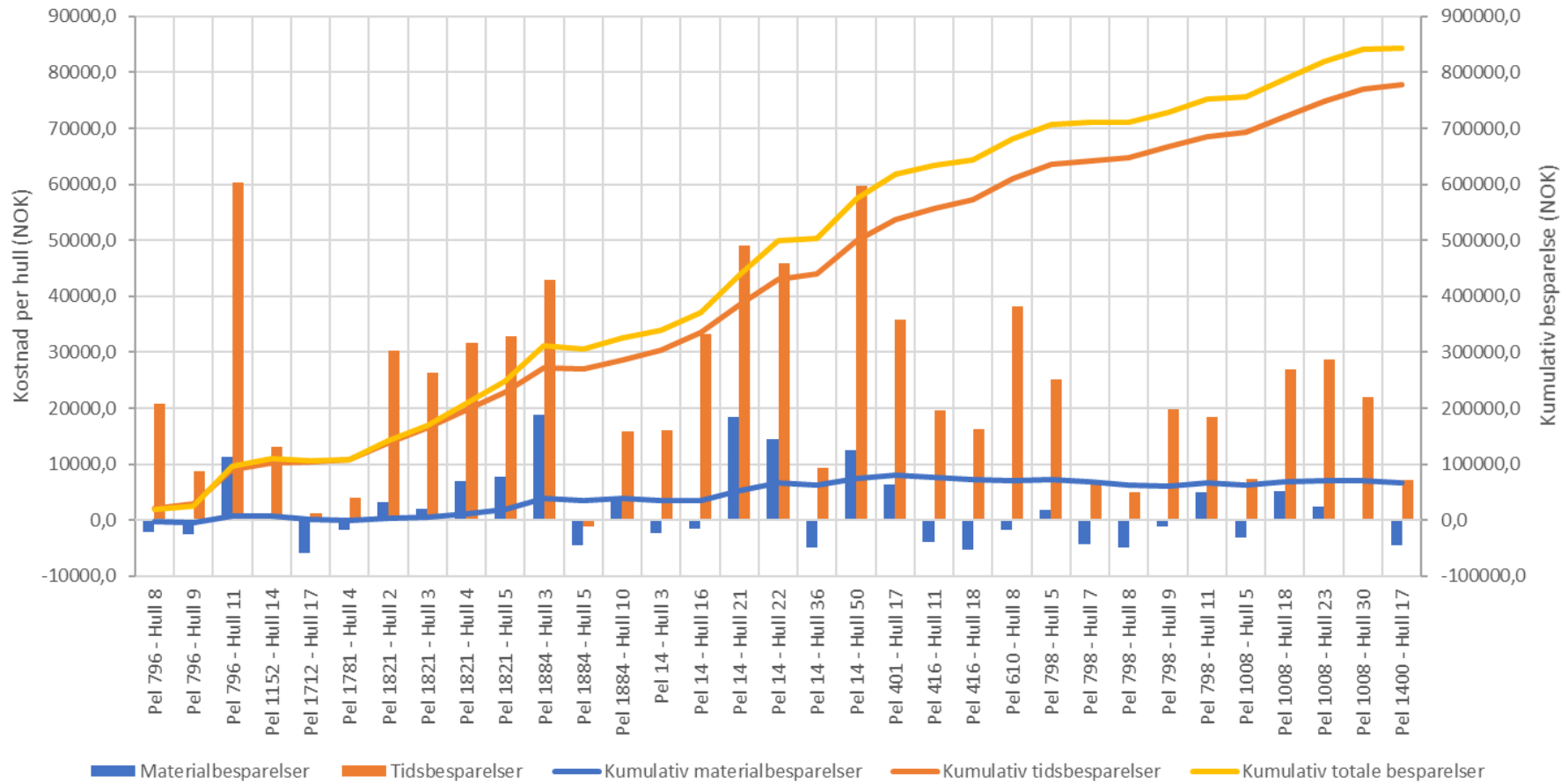
Figur 4.9: Viser tidsbruken for opprinnelig injeksjonsopplegg og for kombinasjonsinjeksjon ved Eysturøyartunnelen.

Besparelser ved å benytte kombinasjoninjeksjon - Minimum pris



Figur 4.10: Viser potensielle besparelser for hullene i kategori 2 ved Eysturøyartunnelen om det hadde blitt utført kombinasjonsinjeksjon på dem. I dette tilfellet vil materialkostnadene for kombinasjonsinjeksjon øke i forhold til det opprinnelige injeksjonsopplegget. Sementkostnad er 1 kr/kg. Polyuretankostnad er 100 kr/kg. Timekostnad er 3 000 kr/time.

Besparelser ved å benytte kombinasjoninjeksjon - Maksimum pris



Figur 4.11: Viser potensielle besparelser for hullene i kategori 2 ved Eysturøyartunnelen om det hadde blitt utført kombinasjoninjeksjon på dem. I dette tilfellet vil det oppnås besparelser både for materialer og tidsbruk. Sementkostnad er 3 kr/kg. Polyuretankostnad er 150 kr/kg. Timekostnad er 7 000 kr/time.

4.2 Funn – Ny prosedyre for vurdering av injeksjonsforløp

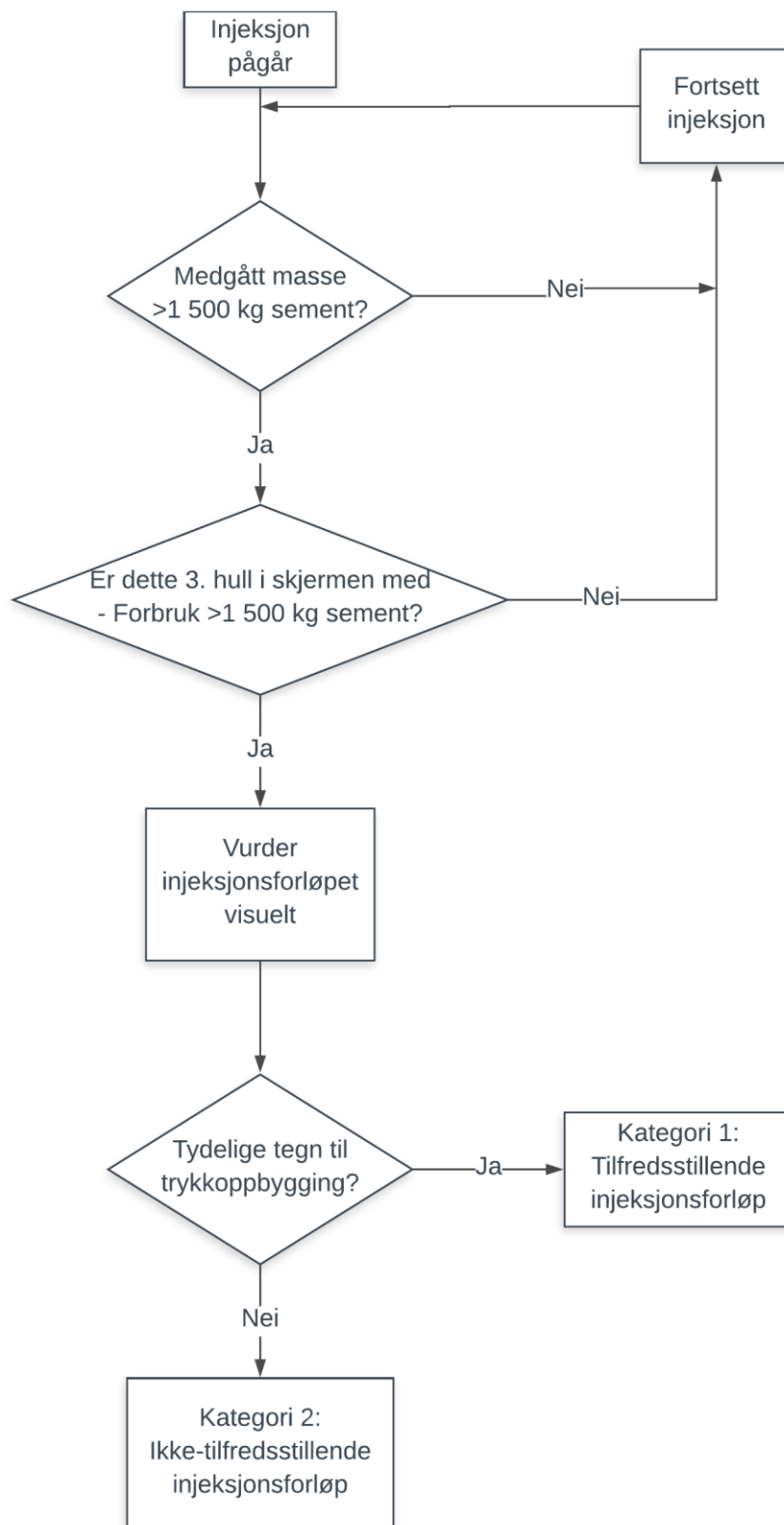
I dette kapitlet vil det presenteres en ny prosedyre for vurdering av injeksjonsforløp. Metoden benyttet i kapittel 4.1 viser at det kan oppnås potensielt store innsparinger ved å identifisere og endre injeksjonsopplegget for hull med stort masseforbruk og lang pumpetid. Metoden baserte seg på å analysere dataene etter at injeksjonen er fullført (Figur 3.8) og utfordringen ved å anvende denne metoden er at den krever «fasiten» for å kunne benyttes.

Resultatene fra kapittel 4.1 viser at det er 6 skjermene som har tre eller flere hull med stort masseforbruk og ikke-tilfredsstillende injeksjonsforløp. I tillegg er det disse 6 skjermene som har det største masseforbruket langs hele Eysturøyartunnelen, som betyr at den største potensielle innsparingen ligger hos disse. Derfor er den nye prosedyren utarbeidet slik at disse «problemskjermene» kan bli oppdaget mens injeksjonen pågår.

Figur 4.12 viser flytskjemaet til den nye prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp. Den forutsetter at det har gått med over 1 500 kg sement i minst 3 hull før en vurdering gjøres. Med en gang det tredje hullet når 1 500 kg medgått sement skal injeksjonsforløpet vurderes visuelt. På dette tidspunktet skal injeksjonsforløpet for det første og det andre hullet som nådde 1 500 kg medgått sement også vurderes, forutsatt at det fortsatt injiseres på dem. Deretter skal ethvert hull hvor det går 1 500 kg sement i, vurderes så snart det når denne grensen. Grunnen til at det må være minst 3 hull med dette forbruket er at et eller to enkelthull med høyt forbruk kan tolereres (se kap. 2.8).

Den største forskjellen mellom den gamle og den nye prosedyren er at den nye ikke har noen tidsbegrensning. Eksempelvis vil et hull vurderes visuelt om det oppnår kravene til masseforbruk uavhengig av når i injeksjonsforløpet det skjer.

Den visuelle vurderingen er lik den som er beskrevet i kapittel 3.6. Injeksjonsforløpene vil enten puttes i kategori 1 (tilfredsstillende forløp) eller i kategori 2 (ikke-tilfredsstillende forløp). For de hullene som havner i kategori 2 anbefales det å utføre kombinasjonsinjeksjon.



Figur 4.12: Flytskjema som viser ny prosedyre for vurdering av injeksjonsforløp.

Den nye prosedyren er benyttet på dataene fra både Eysturøyartunnelen og Lyshorntunnelen. Deretter er det gjort beregninger for bruk av kombinasjonsinjeksjon på hullene som havnet i kategori 2.

Ettersom denne prosedyren baserer seg på at et tredje hull når 1 500 kg sementforbruk, er det først gjort en gjennomgang av alle injeksjonshullene for å finne ut om og når hvert enkelt hull overstiger 1 500 kg forbruk.

Tabell 4-13 viser et eksempel på hvordan prosedyren fungerer. En tenkt pumping starter ved midnatt (00:00:00). Hull 1 når 1 500 kg medgått sement på 50 minutter, men ettersom dette er det første hullet med denne mengden foretas det ingen vurdering av forløpet. Hull 2 når også 1 500 kg medgått sement etter 50 minutter, men pumpingen startet 30 minutter etter hull 1 så klokka er nå 01:20:00. Hull 3 når 1 500 kg medgått sement klokka 01:30:00 og på dette tidspunktet vurderes hull 1, 2 og 3. Hull 4 når 1 500 kg medgått sement klokka 01:50:00 og vurderes da, selv om det kun er injisert i 50 minutter på dette hullet.

Tabell 4-13: Eksempel som viser når i injeksjonsforløpet den visuelle vurderingen finner sted.

	Pumpestart	Når er det medgått 1 500 kg sement?	Når vurderes forløpet visuelt?
Hull 1	00:00:00	00:50:00	01:30:00
Hull 2	00:30:00	01:20:00	01:30:00
Hull 3	00:40:00	01:30:00	01:30:00
Hull 4	01:00:00	01:50:00	01:50:00

4.2.1 Eysturøyartunnelen

Ved å benytte den nye prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp på dataene fra Eysturøyartunnelen er det langt flere hull som vurderes visuelt for injeksjon. 18 skjermene har tre eller flere hull som oppfyller kriteriene til å vurdere injeksjonsforløpet visuelt.

Tabell 4-14: Antall visuelt vurderte hull fra Eysturøyartunnelen.

Antall vurderte hull	89
Kategori 1 – Tilfredsstillende injeksjonsforløp	44
Kategori 2 – Ikke-tilfredsstillende injeksjonsforløp	45

Tabell 4-14 viser antall hull som har blitt vurdert visuelt etter den nye prosedyren. Halvparten av de vurderte hullene havnet i kategori 2. For disse hullene ble det gjort utregninger for å avdekke hva et skifte til kombinasjonsinjeksjon ville medført av endring i masseforbruk, tidsbruk og kostnader. Metoden for utregning er lik den som er presentert i kapittel 3.7, med unntak av at den nye prosedyren tar utgangspunkt i medgått mengde kilo og ikke liter. Det betyr at omregningen fra liter til kilo ikke er nødvendig.

Parameterne som omhandler vannforhold, hullengde og pakkerplassering er lik som for resultatene presentert i kapittel 4.1.3.

Tabell 4-15 viser innsparingene som kan oppnås om kombinasjonsinjeksjon benyttes på de hullene som havnet i kategori 2. Ved å benytte kombinasjonsinjeksjon vil sementforbruket bli 56,9% av det opprinnelige sementforbruket. I tillegg vil tidsbruken være 68,0% av den opprinnelige tidsbruken.

Tabell 4-15: Opprinnelig forbruk, forbruk ved alternativt opplegg samt potensielle besparelser ved å benytte kombinasjonsinjeksjon ved Eysturøyartunnelen.

		Opprinnelig opplegg	Kombinasjonsinjeksjon	Differanse
Sementforbruk (kg)		173 840	98 834	75 006
Polyuretanforbruk (kg)		0	2 180	-2 180
Tidsbruk (TT:MM:SS)		190:03:45	129:11:02	60:52:43
Kostnad (NOK)	Min	744 028	704 396	39 632
	Maks	1 851 958	1 527 804	324 154

Figur 4.13 viser sementforbruket for samtlige hull i kategori 2. Det er noen hull hvor forbruket av sement er lavere ved å følge det opprinnelige injeksjonsopplegget enn ved å benytte kombinasjonsinjeksjon. Men ved de aller fleste hullene blir forbruket mindre ved å benytte kombinasjonsinjeksjon. Det er noen hull som skiller seg ut ved at kuttet i sementforbruket er betydelig.

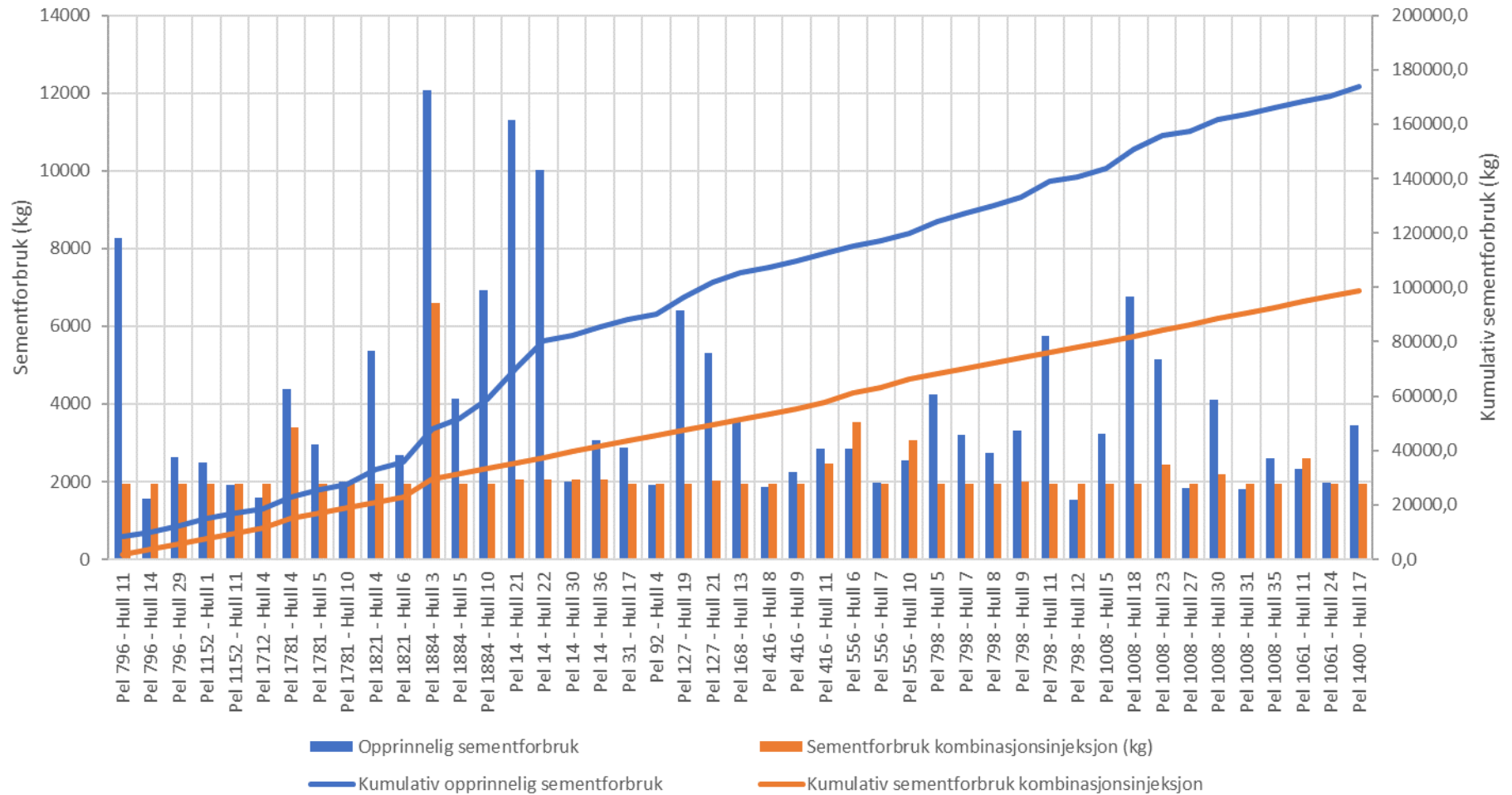
Figur 4.14 viser tidsbruken for samtlige hull i kategori 2. En del hull viser liten forskjell mellom tidsbruk for opprinnelig injeksjonsopplegg og ved å benytte kombinasjonsinjeksjon. Men det er noen hull som skiller seg ut med kutt i tidsbruk på over 4 timer.

Figur 4.15 og Figur 4.16 viser de potensielle besparelsene som kunne oppnås om det ble benyttet kombinasjonsinjeksjon på hullene i kategori 2 (Tabell 4-14). Merk at y-aksene har

ulike skalaer. Redusert timebruk fører til de største besparelsene, mens materialutgiftene øker ved bruk av kombinasjonsinjeksjon.

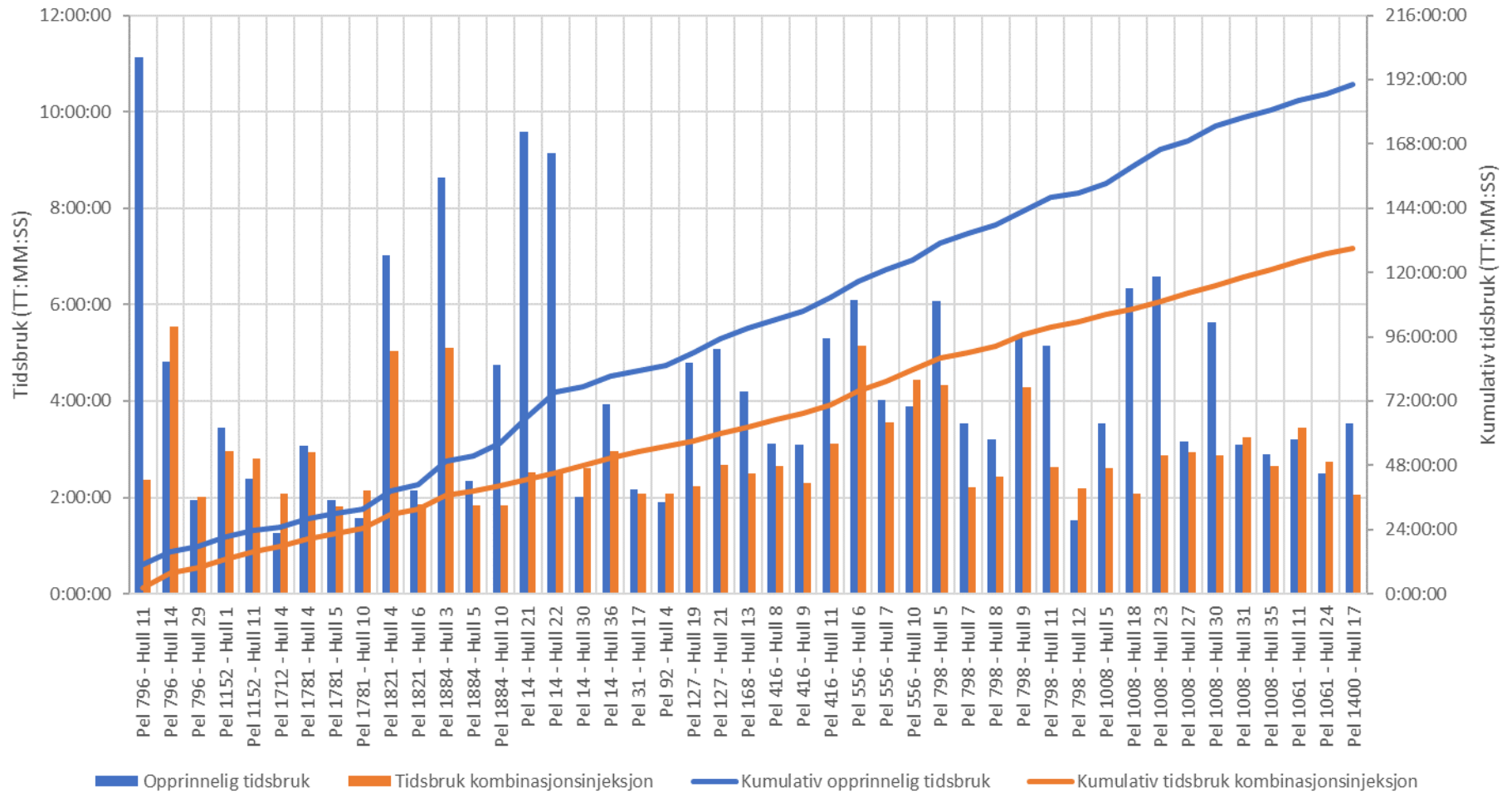
Størrelsen av besparelsene avhenger av prisene for materialer og tidsbruk. Med like minimums- og maksimumspriser som benyttet tidligere, vil kostnadene for kombinasjonsinjeksjon ligge mellom 82,5 og 94,7% av kostnadene for det opprinnelige injeksjonsopplegget.

Sementforbruk



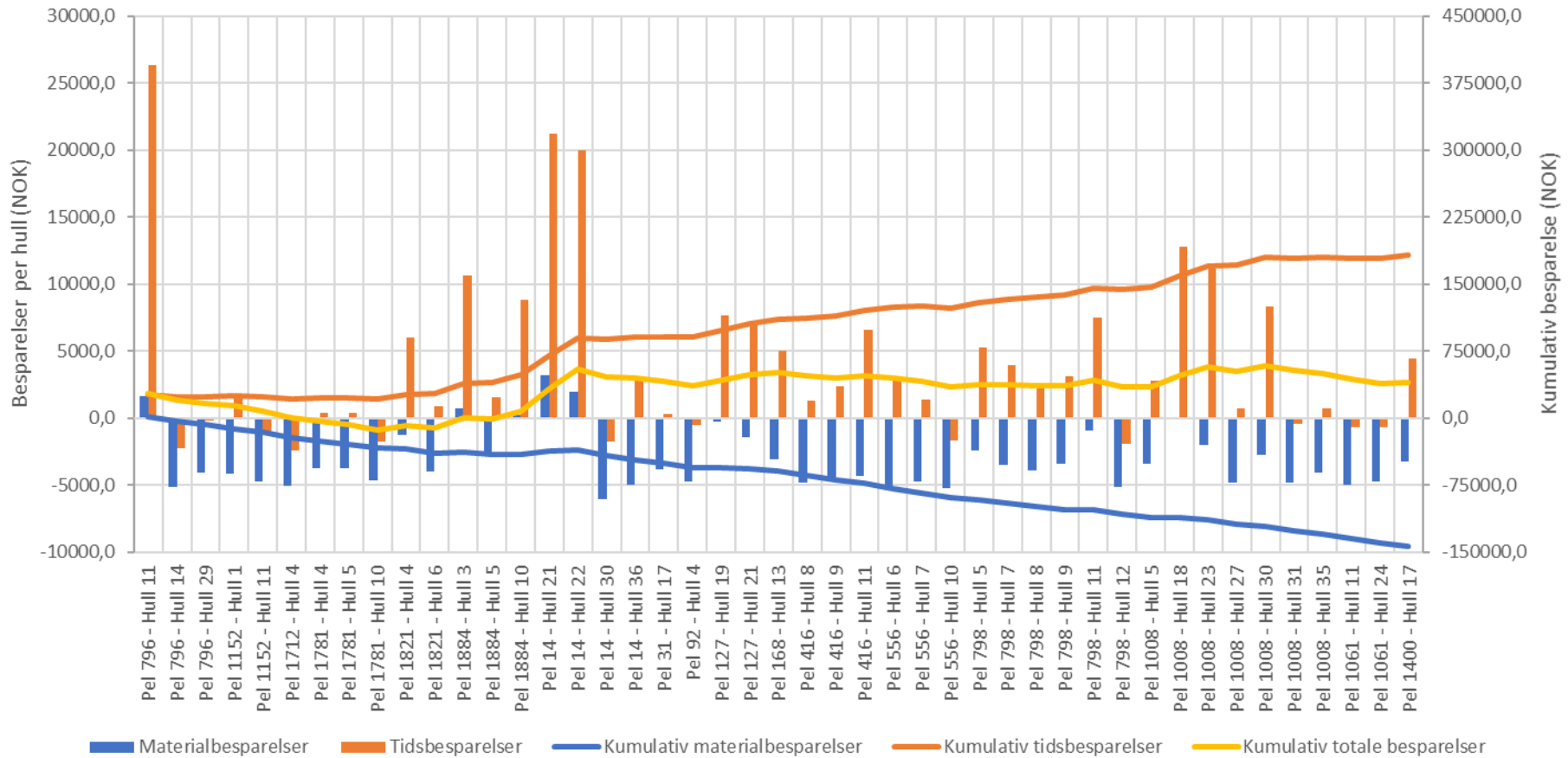
Figur 4.13: Viser sementforbruket for opprinnelig injeksjonsopplegg og for kombinasjonsinjeksjon ved Eysturøyartunnelen.

Tidsbruk



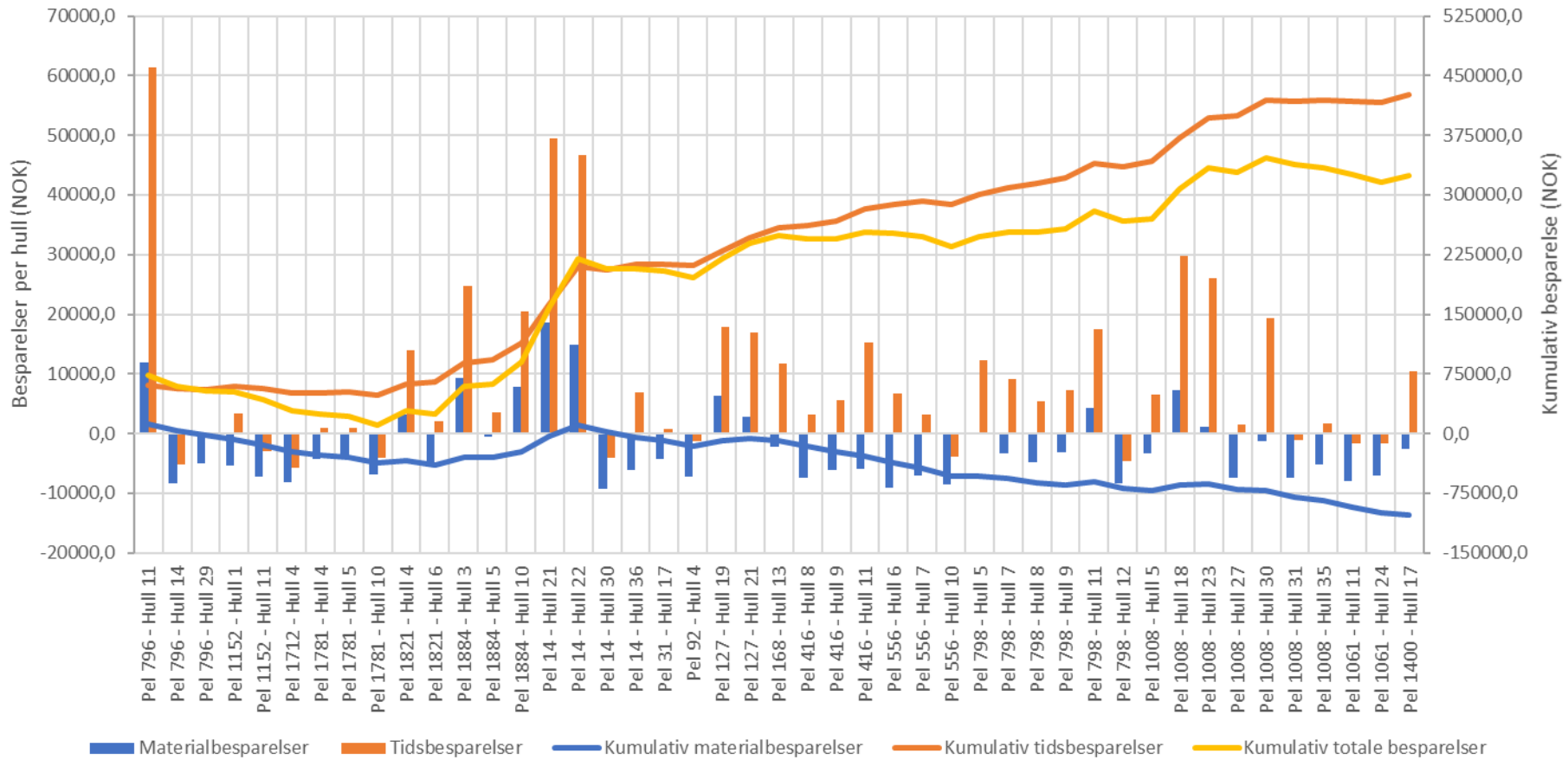
Figur 4.14: Viser tidsbruken for opprinnelig injeksjonsopplegg og for kombinasjonsinjeksjon ved Eysturøyartunnelen.

Besparelser ved å benytte kombinasjoninjeksjon - Minimum pris



Figur 4.15: Viser potensielle besparelser for hullene i kategori 2 ved Eysturøyartunnelen om det hadde blitt utført kombinasjoninjeksjon på dem. I dette tilfellet vil materialkostnadene øke i forhold til det opprinnelige injeksjonsopplegget. Sementkostnad er 1 kr/kg. Polyuretankostnad er 100 kr/kg. Timekostnad er 3 000 kr/time.

Besparelser ved å benytte kombinasjoninjeksjon - Maksimum pris



Figur 4.16: Viser potensielle besparelser for hullene i kategori 2 ved Eysturøyartunnelen om det hadde blitt utført kombinasjoninjeksjon på dem. I dette tilfellet vil materialkostnadene øke i forhold til det opprinnelige injeksjonsopplegget. Sementkostnad er 3 kr/kg. Polyuretankostnad er 150 kr/kg. Timekostnad er 7 000 kr/time.

4.2.2 Lyshorntunnelen

Ved Lyshorntunnelen er det samlet inn data fra injeksjonsskjermene ved pel 10 949, 10 994 og 11009, som alle ligger i samme tunnellop. Den nye prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp (Figur 4.12) er benyttet på dataene fra de 82 hullene som disse 3 skjermene består av. Av disse er det seks hull fra en skjerm som oppfyller kravene til visuell vurdering. Tabell 4-16 viser antall hull som er vurdert visuelt, samt inndelingen i kategorier. For de hullene som havnet i kategori 2 er det gjort utregninger for kombinasjonsinjeksjon etter metoden presentert i kapittel 3.7.

Tabell 4-16: Antall visuelt vurderte hull fra Lyshorntunnelen.

Antall vurderte hull	6
Kategori 1 – Tilfredsstillende injeksjonsforløp	3
Kategori 2 – Ikke-tilfredsstillende injeksjonsforløp	3

Parametere som hullengde, pakkerplassering og innlekkasje er hentet fra injeksjonsrapport fra Veidekke (Vedlegg G).

Hullengden er 27 m og pakkerplasseringen er 2,5 m inn i hullet, som betyr at den injiserte lengden blir 24,5 m. Det er antatt en hulldiameter på 58 mm, som betyr at volumet av hullet er 64,7 liter.

Innlekkasjen før injeksjon var 350 l/min. Derfor ble det bestemt at hullet havnet i kategori D (se Tabell 3-1). Dette betyr at det blir anbefalt 30 liter sement per meter borhull og 3 liter TACSS per meter borhull. I tillegg anbefales det 10% katalysator tilsatt polyuretanen (10% av polyuretanens vekt).

Som for utregningene ved Eysturøyartunnelen opereres det med et spenn av priser. Minimumspris tilsvare sementpris på 1 kr/kg, polyuretanpris på 100 kr/kg og pris for injeksjon på 3 000 kr/time. Maksimumspris tilsvare sementpris på 3 kr/kg, polyuretanpris på 150 kr/kg og pris for injeksjon på 7 000 kr/time.

Tabell 4-17: Opprinnelig forbruk, forbruk ved alternativt opplegg samt potensielle besparelser ved å benytte kombinasjonsinjeksjon ved Lyshorntunnelen.

		Opprinnelig opplegg	Kombinasjonsinjeksjon	Differanse
Sementforbruk (kg)		11 676	6 853	4 823
Polyuretanforbruk (kg)		0	237	-237
Tidsbruk (TT:MM:SS)		26:56:06	17:09:33	09:46:33
Kostnad (NOK)	Min	92 481	79 784	12 697
	Maks	223 573	170 980	52 593

Tabell 4-17 viser masseforbruket, tidsbruken og kostnadene ved både å benytte seg av det opprinnelige injeksjonsopplegget og ved å benytte seg av kombinasjonsinjeksjon. Ved å skifte til kombinasjonsinjeksjon ville det totale sementforbruket vært 58,7% av det opprinnelige. Tidsbruken ville vært 63,7% av den opprinnelige tidsbruken. Totalt ville kostnaden av kombinasjonsinjeksjon vært mellom 76,5% og 88,3% av kostnaden for det opprinnelige injeksjonsopplegget.

5 DISKUSJON

I innledningen til oppgaven ble formålet med oppgaven presentert. Den besto i å vise hvordan pumpedata kan benyttes til å forbedre injeksjonsprosedyren ved fortløpende oppfølging. I oppgaven har pumpedata blitt analysert for å avdekke tids- og masseforbruk. Arbeidet med pumpedataene har resultert i en ny prosedyre for oppfølging og oppdatering av injeksjonsarbeidene. Denne benytter seg av medgått masseforbruk, og visuell vurdering av injeksjonsforløpene ved å vurdere grafer av trykk og sementstrømning. Prosedyrene for vurdering av injeksjonsforløp er benyttet til å lokalisere «problemhull», og for disse er det gjort beregninger på hva tids- og masseforbruket ville blitt dersom kombinasjonsinjeksjon hadde blitt benyttet.

I dette kapittelet vil resultatene fra analysen, vurderingene av injeksjonsforløpene og effekten av kombinasjonsinjeksjon diskuteres.

5.1 Tids- og masseforbruk

Analysen av tids- og masseforbruket la grunnlaget for hvilke hull som skulle vurderes nærmere ved å filtrere ut hull med forbruk over 4 000 liter injeksjonsmasse. Analysen ga også innsikt i det totale forbruket og om variasjoner fra skjerm til skjerm.

De to stoffene det drives på ved Eysturøyartunnelen viser visse likhetstrekk når det kommer til masseforbruk og tidsbruk. Tabell 4-1 viser at det i snitt går med 16 479 liter injeksjonsmasse for en skjerm på Hvitanesstuppen. Til sammenligning går det i snitt med 16 466 liter ved Strendurstuppen (Tabell 4-5). Dette kan begrunnes i at tunnelen drives i den samme geologien hele veien, og dermed at den gjennomsnittlige injeksjonsmassen som trengs for å tette lekkasjen er lik. Likevel er det stor variasjon i massekonsumet mellom enkeltskjermer. Figur 4.2 og Figur 4.5 viser at masseforbruket til injeksjonsskjemene ved Eysturøyartunnelen stort sett er mellom ca. 5 000 til 20 000 liter masse. Det er imidlertid seks skjermer som skiller seg ut ved å ha forbruk over 30 000 liter. Disse skjermene ligger ikke i umiddelbar nærhet til hverandre og det store forbruket linker dermed ikke skjermene sammen. På samme måte som gjennomsnittsforkbruket av injeksjonsmasse kan forklares med de geologiske forholdene, kan de store variasjonene i forbruk forklares med at geologien kan endre seg mye på kort tid. Det vil si at svakhetssoner og konsentrasjon av sprekker kan stå for høyt forbruk lokalt, mens den gjennomsnittlige permeabiliteten i bergmassen er ganske lik over et lengre strekk. Den store variasjonen tyder på at det er vanskelig å forutse total masse- og tidsbruk.

Ved Strendurstuffen er det medgått 412 liter per meter tunnel, mens det ved Hvitanesstuffen ikke er gått mer enn 190 liter per meter (Tabell 4-1 Tabell 4-5). En årsak til denne forskjellen kan være at utregningen er basert på avstanden fra første skjerm til siste skjerm ved hver stuff. Likevel må det bemerkes at det er en betydelig forskjell.

For enkelthull er forbruket ved Strendurstuffen 663 liter per hull, mens det ved Hvitanesstuffen er 889 liter per hull (Tabell 4-3 og Tabell 4-5). Dette kan forklares med at det er under 19 hull i snitt for hver skjerm på Hvitanesstuffen, mot nesten 25 hull i snitt på Strendurstuffen. Som tidligere nevnt går det likevel med omtrent like mye injeksjonsmasse i snitt på begge stuffene. Dette kan tyde på at antall hull i skjermen ikke avgjør hvor mye masse som går med. Det er også mulig at man ville fått inn tilstrekkelig injeksjonsmasse uten å bore ekstra hull ved Strendurstuffen. Forskjellen i antall hull er ganske markant, og kan muligens forklares ved at kontrollingeniøren på Strendurstuffen anviser flere ekstrahull enn kontrollingeniøren ved Hvitanesstuffen.

For hele Eysturøyartunnelen er det samlede forbruket 823 457 liter sementmasse fordelt på 50 skjermer og 1 160 hull. 37 hull (3,2%) står for 222 474 (27,0%) liter forbruk. Som forklart i kapittel 2.8 kan stort forbruk i enkelthull forsvares om det går inn lite injeksjonsmasse i resten av skjermen. Men forbruk opp mot 13 000 liter (Tabell 4-3) for enkelte hull er såpass ekstremt at det ikke kan tilskrives denne grunnen alene. Det er vanskelig å vite hvorfor det ikke er gjort grep tidligere for de hullene med det største forbruket.

I snitt brukes det i underkant av 8 timer og 15 minutter på en injeksjonsskjerm i Eysturøyartunnelen (Tabell 4-9). For Strendurstuffen er gjennomsnittlig tidsbruk rett i overkant av 8 timer, mens det for Hvitanesstuffen i snitt tar 40 minutter lenger tid. Dette til tross for at det i snitt er 6 hull færre i en skjerm ved Hvitanes. Dette tyder på at det ikke nødvendigvis tar lenger tid å injisere en skjerm, selv om det er flere hull i den. Det er imidlertid sannsynlig at tiden for boring klargjøring av flere hull er lengre når antall hull øker. Det er mulig at det ved Hvitanesstuffen legges inn flere pauser, noe som ikke er uvanlig når masseforbruket når et visst punkt uten at ønsket mottrykk oppnås. Ettersom det går inn mer masse per hull på denne stuffen kan dette være en forklaring.

Tabell 4-4 og Tabell 4-8 viser at gjennomsnittstiden brukt på et injeksjonshull er like over 50 minutter ved Strendurstuffen, mens på Hvitanesstuffen er denne snitt-tiden like under en time. Det er ikke veldig stor forskjell, men det er naturlig med litt høyere injeksjonstid per hull ved Hvitanesstuffen fordi det som tidligere nevnt gjennomsnittlig går mer masse i hvert hull. Dette

samsvarer bra med gjennomsnittstiden det tar å injisere en skjerm, ettersom det på Hvitanesstuppen i snitt tar 40 minutter lenger tid å injisere en skjerm enn ved Strendurstuppen. Også disse resultatene viser at det ikke nødvendigvis tar kortere tid å injisere om man har færre hull.

Noe det er verdt å merke seg i Figur 4.3 og Figur 4.6 er at tidsbruken per skjerm varierer veldig. Helt fra rett over 3 timer til over 24 timer. Dette er en utfordring for drivingen av tunnelen da det er vanskelig å planlegge når neste salve kan skytes, som igjen er ekstra utfordrende i områder hvor det ikke er lov å skyte salve døgnet rundt. Om injeksjonen er ferdig på et ugunstig tidspunkt vil tiden til neste salve kunne bli unødvendig lang. Likevel er dette neppe et problem ved Eysturøyartunnelen da den er undersjøisk og ikke i nærheten av bebyggelse, sett bort fra den første delen ved Strendur.

Oppsummert viser tids- og masseanalysen at det er relativt få hull som står for høyt masseforbruk og lang tidsbruk. Analysen viser også at det er vanskelig å forutse hvor mye masse som vil gå med og hvor lang tid det vil ta. Om parameterne masseforbruk og tidsbruk var mer forutsigbare ville dette gjort det lettere å anta en fremdriftsplan, samt at det ville vært lettere å forutse hvor mye masse som trengs på anlegget. Dette vil igjen gjøre utarbeidelsen av en kontrakt mer forutsigbart med tanke på totalt forbruk og totale kostnader. Samlet sett understreker dermed tids- og masseanalysen for Eysturøyartunnelen nytten av å bruke pumpedata i oppfølgingen av injeksjonsarbeidene. Om grep hadde blitt gjort på noen av hullene med stort forbruk kunne mye sementmasse og tidsbruk vært unngått, derfor understreker analysen også behovet for en oppfølging av injeksjonsarbeidene i sanntid.

5.2 Prosedyre vurdering av injeksjonsforløp

Den opprinnelige prosedyren for vurdering av injeksjonsforløpene (Figur 3.8) ble fremstilt med utgangspunkt i at det er hull med stort forbruk og lang injeksjonstid som står for store kostnader. Tanken var at det er disse som har størst potensiale når det kommer til innsparinger. For å filtrere resultatene slik at hullene med veldig høyt forbruk ble tatt med var det naturlig å sette et høyt volumkriterie (4 000 liter), slik at hullene med absolutt største forbruket kom med.

Det er gunstig å endre injeksjonsopplegg så tidlig som mulig om det er klart at man ikke er i nærheten av å nå stoppkriteriet. På grunn av det høye volumkriteriet i prosedyren var det allerede kjent at det kom til å ta lang tid å nå stoppkriteriet. Etter 90 minutter var det medgått

en betydelig mengde masser uten at injeksjonstiden var blitt overdrevent høy, derfor var det naturlig å utføre den visuelle vurderingen på dette tidspunktet.

Ulempen med den opprinnelige prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp er at man er avhengig av å ha sluttresultatet for å gjennomføre vurderingen. Det vil si at det allerede er kjent hvilke hull som kommer til å stå for stort forbruk. En slik metode er ikke mulig å anvende i praksis da sluttresultatet aldri er kjent før injeksjonen er ferdig. Metoden la imidlertid grunnlaget for beregninger av hva som kunne spares av tid og masser om endringer i injeksjonsopplegget kunne utføres på disse hullene. Alle hull som oppfylte volumkriteriet og hadde et injeksjonsforløp som ikke var tilfredsstillende fikk utført beregninger for kombinasjonsinjeksjon.

Den opprinnelige prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp kan dermed ses på som en slags hybridløsning, da den benytter seg av pumpedataene til å filtrere ut «problemhullene» i etterkant av injeksjonen. Samtidig benyttes den visuelle vurderingen av injeksjonsforløpene som en metode i sanntid ettersom den foretas etter 90 minutters pumping, uten å se på injeksjonsforløpet etter 90 minutter.

Resultatet av vurderingene fra den opprinnelige prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp er relativt ensidig, det er kun 4 hull som viser tegn til tilfredsstillende trykkoppbygging. En grunn til dette kan være at det ble valgt å se på hull som hadde et totalt masseforbruk på over 4 000 liter. Dette er hull som etter 90 minutter stort sett har et masseforbruk på rundt 2 000 liter. Disse har derfor relativt lang pumpetid igjen etter vurderingen blir gjort. Om det hadde blitt sett bort fra volumkriteriet på 4 000 liter, og valgt å vurdere alle hull med tidsbruk på over 90 minutter ville det mest sannsynlig vært en større andel forløp som hadde havnet i kategori 1.

5.3 Visuell vurdering av injeksjonsforløp

Stoppkriteriene for denne oppgavens to prosjekter er trykk. Derfor tar den visuelle vurderingen som er presentert i denne oppgaven mye hensyn til trykkoppbygging. QP-grafen viste seg å være et nyttig verktøy i analysen. Den viser veldig tydelig trenden av injeksjonsforløpet og gjør det dermed lettere å plassere forløpet i riktig kategori. En person som ikke har erfaring i å studere injeksjonsforløp vil mest sannsynlig ha stor nytte av å kunne forholde seg til QP-grafen ettersom det er trenden i injeksjonsforløpet som er interessant.

Den visuelle vurderingen som gjennomføres er subjektiv, som betyr at resultatet vil være avhengig av hvem som gjør vurderingen. Ettersom det ikke er gitte grenseverdier som avgjør om et injeksjonsforløp er tilfredsstillende, stilles det krav til at den som gjennomfører vurderingen har erfaring med å vurdere slike grafer, og er kjent med stoppkriteriene det opereres med i prosjektet.

Vurderingene gjort i denne oppgaven ble alle gjennomført på fullstendige grafer, som betyr at utviklingen av hele injeksjonsforløpet var kjent. Det ble sett bort ifra det som skjedde etter det tidspunktet det skulle gjennomføres visuell vurdering, ettersom man i en virkelig situasjon ikke vet utviklingen av injeksjonsforløpet. Muligheten for at det som skjedde like etter vurderingspunktet ble tatt med i vurderingen er til stede, men er sett på som liten ettersom jeg var veldig klar over de potensielle problemene ved dette.

5.4 Ny prosedyre for vurdering av injeksjonsforløp

Resultatene av den opprinnelige prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp og beregningene av kombinasjonsinjeksjon viste at det lønner seg å benytte kombinasjonsinjeksjon på hull med høyt forbruk og lang pumpetid. Utfordringen med å sette metoden beskrevet i Figur 3.8 ut i praksis er som tidligere nevnt at den bygget på «fasiten» for injeksjonen. Analysen ble gjennomført i etterkant og derfor var det kjent hvilke hull som var «problemhull». Det var åpenbart at en måte å identifisere «problemhullene» måtte fremstilles.

Ved å gå gjennom hullene i kategori 2 fra den opprinnelige prosedyren viste det seg at noen skjermene skilte seg ut ved å ha flere hull involvert i høyt forbruk og lang pumpetid. Skjermene 796, 1821 og 1884 ved Hvitanesstufen, samt 1008, 798 og 14 ved Strendurstuffen skilte seg ut ved å ha tre eller flere hull som viste ikke-tilfredsstillende injeksjonsforløp. I tillegg hadde disse seks «problemskjermene» det høyeste masseforbruket i hele tunnelen, samtlige over 30 000 liter totalt medgått sementmasse. Om disse hullene kunne plukkes ut mens injeksjonen foregikk og før masseforbruket var blitt altfor høyt kunne metoden benyttes underveis i injeksjonsarbeidene.

Den nye prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp baserer seg på at en «problemskjerm» har flere hull med høyt forbruk. Når det tredje hullet i en skjerm når 1 500 kg sementmasse i forbruk, gjøres den samme visuelle vurderingen som tidligere. Vurderingen gjøres på samtlige 3 hull med forbruk over 1 500 kg, samt alle påfølgende hull som når 1 500 kg sementforbruk. Konsekvensen dette har, er at vurderingen på det første og andre hullet kan skje ganske langt

ut i injeksjonsforløpet og dermed ha stort forbruk. Men for det tredje hullet, og alle påfølgende hull, vil vurderingen gjøres relativt tidlig slik at grep tas så fort som mulig. Dette fører til at skjermen vil ha et sementforbruk på minst 4 500 kg før det gjøres endringer, noe som viste seg å være i nærheten av tilstrekkelig totalt for en del skjerner i Eysturøyartunnelen.

Anvendelsen av den nye prosedyren på injeksjonsdataene fra Eysturøyartunnelen førte til at langt flere hull ble vurdert visuelt enn ved den opprinnelige prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp. Dette var på grunn av at en del skjerner hadde mer enn tre hull med forbruk over 1 500 kg. For den praktiske gjennomføringen av den nye prosedyren betyr dette at det relativt ofte må gjøres visuelle vurderinger av injeksjonsforløpet, noe som i starten kan føles strevsomt og unyttig for den som må gjennomføre vurderingen. Men ettersom dette skjer ofte er det gode sjanser for at vurderingen vil bli en normal del av injeksjonsarbeidene, og dermed ikke ukjent og strevsomt. I tillegg vil vurderingene av injeksjonsforløpet bli enklere etter hvert som man stadig gjør flere vurderinger. Prosedyren inneholder i praksis kun to steg. Dette gjør den lett å forholde seg til, og lett å gjennomføre.

Ettersom det var noe sparsomt med data fra Lyshorntunnelen ble det ikke gjort noen grundig tids- og masseanalyse fra dette prosjektet. Men den nye prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp ble anvendt på de tre skjermene derfra. Det førte til at seks injeksjonshull fra en av skjermene ble vurdert visuelt, og at tre av hullene havnet i kategori 2 som tilsier at kombinasjonsinjeksjon burde gjennomføres. Resultatene viser at kombinasjonsinjeksjon kunne ført til nesten 5 000 kg kutt i sementforbruk og nesten 10 timer kortere injeksjonstid. Selv med et noe tynt sammenligningsgrunnlag tyder dette på at den nye prosedyren er anvendbar på andre prosjekter og i annen geologi.

For at den nye prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp skal kunne utnyttes trengs det et større datagrunnlag å teste prosedyren på. Det er sannsynlig at kravet til masseforbruk bør tilpasses hvert enkelt prosjekt basert på erfaringer for hva som er normalt massekonsum for en skjerm i det gitte området. I tillegg bør massekravet revideres underveis i tunneldrivingen når erfaringer fra injeksjonsarbeidene oppnås.

5.5 Kombinasjonsinjeksjon

I denne delen vil fordelene og utfordringene med å benytte kombinasjonsinjeksjon diskuteres. Diskusjonen rundt potensielle innsparinger vil omhandle kombinasjonsinjeksjon benyttet på hullene filtrert ut av den nye prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp. Dette er fordi denne

prosedyren er den som vil kunne bli benyttet i praksis og derfor er resultatene fra denne de mest realistiske.

Beregningene utført med kombinasjonsinjeksjon viser at det kan spares sement- og tidsbruk. Utrekningene viser at kombinasjonsinjeksjon vil minske forbruket av begge. Men om det fører til store kostnadmessige besparelser er avhengig av prissettingen. Prisene det opereres med er sett på som sannsynlige minimums- og maksimumspriser, og mest sannsynlig så ligger realiteten en plass i midten av spennet som er brukt. Det er imidlertid mulig å få andre priskombinasjoner enn de det er utført beregninger med. Eksempelvis kan timeprisen være lav, mens materialprisen er høy. Dette vil gi et annet utslag på oppnådde besparelser. Figur 4.15 og Figur 4.16 viser de potensielle innsparingene ved å benytte kombinasjonsinjeksjon. Det er verdt å merke seg at totalbesparelsene tett følger besparelsene som følge av tidskutt, noe som tyder på at tidsbruken har mest å si for den totale prisen.

Uavhengig av hvor store de potensielle besparelsene kan være rent økonomisk, er det veldig tydelig at kombinasjonsinjeksjon senker tids- og sementbruken (Figur 4.13 og Figur 4.14) for hullene det er aktuelt for. Disse figurene viser at forutsigbarheten når det gjelder tids- og sementforbruk blir bedre om kombinasjonsinjeksjon benyttes på «problemhull». Forbruket for det opprinnelige opplegge varierte fra mellom 2 000 til 12 000 kg sement, mens forbruket med kombinasjonsinjeksjon nesten utelukkende ligger på rundt 2 000 kg. Tidsbruken varierte fra mellom en time til over elleve timer med det opprinnelige opplegget, og med kombinasjonsinjeksjon er variasjonen fra to timer til drøyt fem timer. Dette viser at injeksjonsarbeidet til en viss grad blir mer forutsigbart, spesielt når det kommer til sementforbruket. Tidsbrukene på over seks timer kuttes vekk.

Sannsynligheten for at det totalt sett vil være innsparing ved å benytte kombinasjonsinjeksjon er uansett til stede. For det er ikke kun timeprisen og kiloprisen byggherren betaler entreprenøren som påløper av kostnader. Kutt i injeksjonstid vil kunne medføre positive effekter på øvrige aktiviteter ved stuff. For eksempel vil det kunne bety at boring for ny salve kan begynne tidligere, som igjen betyr raskere fremdrift. Dette vil igjen føre til tidligere ferdigstilling. Det er, som forklart i kapittel 2.1, en ressurskostnad ved stuff på oppunder 12 000 kr/time, en betydelig sum og det er derfor av interesse å effektivisere tidsbruken på stuff i størst mulig grad. I tillegg vil kutt i sementforbruket føre til at det må bestilles, produseres, fraktes og lagres mindre masser. Dette er ikke kun gunstig fra et økonomisk ståsted, men også miljømessig.

Noen utfordringer er det med å benytte kombinasjonsinjeksjon. For det første har entreprenørene i Norge i all hovedsak erfaring med sementbasert injeksjon, og det er derfor ikke utenkelig at å legge til et ukjent element i injeksjonsarbeidene vil oppleves som unødvendig og belastende. Likevel er det ikke veldig mye som skal til av ekstra utstyr eller opplæring (se kap. 2.10 og 3.7). Om kombinasjonsinjeksjon skulle innføres som standard løsning for «problemhull», ville kunnskap og erfaring om metoden sannsynligvis raskt utvikle seg. For det andre er de utførte beregningene basert på at kombinasjonsinjeksjonen medfører tilfredsstillende resultat etter en omgang. Det er ikke sikkert dette er tilfellet, men det vil kunne gjennomføres en ny omgang på relativt kort tid ettersom utstyret vil være fremme og oppsatt etter første omgang.

Når det gjelder kostnader spart på grunn av kutt i tidsbruk, er det en svakhet ved hvordan utregningen er utført. Det er tatt utgangspunkt i at en time spart på et hull tilsvarer en time spart i arbeid, noe som ikke stemmer fordi det kan injiseres på flere linjer samtidig. Ved Eysturøyartunnelen injiseres det på litt over to linjer (hull) samtidig, som betyr at å kutte tidsbruken i et hull ikke betyr at tidsbruken for skjermen kuttes. Likevel vil kutt i injeksjonstid for et hull bety kutt i injeksjonstid for en skjerm. Størrelsen av kuttet avhenger av når i injeksjonsprosessen det skjer. Om kombinasjonsinjeksjonen utføres på det siste hullet i en skjerm, og det ikke injiseres på andre hull, vil tidskuttet for hullet være lik tidskuttet for skjermen. Om kombinasjonsinjeksjon utføres på et tidligere hull i skjermen vil det bety at injeksjonen på neste hull vil kunne begynne tidligere.

5.6 Feilkilder

Analyse av injeksjon vil inneholde noen feilkilder. For det første er dataene benyttet i studiene automatisk logget på injeksjonsriggen. Det er tatt utgangspunkt i at loggetidspunkt, volumstrømning, medgått sement og trykk er korrekt. Disse dataene avhenger også av at operatøren som bemanner injeksjonsriggen under injeksjon registrerer på riggen når det skiftes injeksjonshull og injeksjonsmasse. Den visuelle vurderingen av injeksjonsforløpene er en annen mulig feilkilde, som tidligere nevnt er denne subjektiv og derfor avhenger resultatet av personen som gjør vurderingen.

En annen feilkilde er at det ikke alltid er samsvar mellom de medgåtte mengdene oppgitt i flytdiagrammet hentet fra Bever Team og de medgåtte mengdene oppgitt i sammendraget. Det er valgt å alltid stole på dataene fra flytdiagrammet da disse er de mest detaljerte.

Det er i tillegg noen tilfeldige faktorer tilknyttet injeksjon. Geologien er en av de avgjørende faktorene for injeksjonarbeidene, og det er også den det er minst kunnskap om sett fra et injeksjonsperspektiv.

6 KONKLUSJON

I denne oppgaven er pumpedata benyttet til å analysere tids- og masseforbruket ved injeksjonsarbeider. Det er i tillegg fremstilt grafer som viser trykkutviklingen og sementstrømningen for injeksjonsforløp. Disse ble brukt i en prosedyre for vurdering av injeksjonsforløp i etterkant av injeksjonsarbeidene, for å plukke ut hull som hadde veldig stort forbruk av masse til visuell vurdering. Som et grep for å kutte ned på tids- og masseforbruket for disse hullene ble beregninger for bruk av kombinasjonsinjeksjon gjennomført. Beregningene viser at det er store potensielle innsparinger å oppnå i tids- og masseforbruket, og dermed også i kostnadene.

Arbeidet med injeksjonsforløpene førte til fremstillingen av en ny prosedyre som kan benyttes mens injeksjonen foregår, og som kan brukes sammen med kombinasjonsinjeksjon til å kutte tids- og masseforbruket. Den nye prosedyren ble benyttet på data fra to forskjellige prosjekter, drevet i helt ulik geologi. Bruken av den nye prosedyren og beregninger for bruk av kombinasjonsinjeksjon viser at det er gode muligheter for å kutte tids- og masseforbruket ved begge prosjektene. Dette tyder på at prosedyren er robust nok til å fungere på prosjekter med ulike forutsetninger.

Oppgaven har vist at bruk av pumpedata er et nyttig verktøy, som med fordel kan brukes til oppfølging av injeksjonsarbeider. Videre er det utformet en prosedyre for oppfølging av injeksjonsarbeider som inneholder få punkter og er lett å gjennomføre, noe som gjør det enkelt for entreprenør og byggherre å forholde seg til den. Oppgaven påviser at besparelser i tids- og masseforbruket kan oppnås ved å følge opp injeksjonsarbeidene, og ta grep om injeksjonsforløpene ikke har tilfredsstillende utvikling.

7 FORSLAG TIL VIDERE ARBEID

Den foreslåtte prosedyren for sanntidsvurdering av injeksjonsforløp er basert på teori og utregninger. For at metoden skal kunne fungere i praksis er utprøving essensielt, i tillegg bør prosedyren anvendes på et bredere datagrunnlag. Med utgangspunkt i dette er følgende forslag til videre arbeid fremstilt:

- Praktisk gjennomføring av prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp på et tunnelprosjekt mens injeksjon foregår. For å avdekke om prosedyren er praktisk gjennomførbar og om den faktisk medfører besparelser.
- Utføre analyser på flere tunnelprosjekter i forskjellig geologi og med forskjellige krav til tetthet. Ved å øke datagrunnlaget kan prosedyren revideres og endres slik at den blir mer robust.
- Gjennomføring av prosedyren med aktive stoppkriterier (GIN eller RTGC). Om aktive stoppkriterier kan fungere sammen med prosedyren er potensialet for innsparing muligens enda større.

REFERANSER

- Aarstad, K., Skjølvold, O. og Justnes, H. (2015) TIGHT-Sement til injisering: state of the art.
- Andersson, H. (1998) *Chemical Rock Grouting: An Experimental Study on Polyurethane Foams*, Chalmers University of Technology.
- Andersson, H. (2005) *Injeksjon - erfaringer fra Jong-Askertunnelene : JA2 - Tanumtunnelen, JA1 - Skaugumtunnelen*. Vegdirektoratet.
- Beitnes, A. (1998) Sonderboring, geologisk kartlegging og tolkning som grunnlag for utførelsen, i *Berginjeksjon, Fagernes*. Norsk Bergmekanikkgruppe.
- Bever Control AS (2018) *Bever Control: Om oss*. Tilgjengelig fra: http://bevercontrol.com/norsk/om_oss/ (Hentet: 30.04 2018).
- Bogdanoff, I. (1990) Fintätning av berg, *Inst för Geoteknik B*, 90.
- Borchardt, P. og Andersson, H. (2000) *Use of polyurethane grouts in Romeriksporten, Norway - A case study* International conference; 4th, Ground improvement geosystems; Grouting soil improvement. Helsinki.
- Brattli, B. (2015) *Kompendium - Ingeniørgeologi Løsmasser*.
- Bruce, D. A. (2005) Glossary of grouting terminology, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(12), s. 1534-1542.
- Davik, K. I. et al. (2002) *Berginjeksjon*. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk.
- Eklund, D. og Stille, H. (2008) Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(4), s. 389-398.
- Garshol, K. F. (2007) *Pre-excavation grouting in tunneling*. UGC Intern.
- Geotechdata (2015) *Lugeon test*. Tilgjengelig fra: http://www.geotechdata.info/geotest/Lugeon_test.html (Hentet: 03.05 2018).
- Grøv, E. og Woldmo, O. (2012) Modern pre-grouting technology in Norway *Grouting and Deep Mixing 2012*. s. 805-815.
- Grøv, E. (2016) *Eysturøyartunnelen - Ingeniørgeologiske vurderinger*. Trondheim, Norge: SINTEF Byggforsk.
- Hansson, P. (1994) *Cementinjektering - Handbok för injekterare*. (Elforsk rapport 94:12). Sweden.
- Henn, R. og Davenport, J. C. (2005) Ultrafine cement: a critical component of a grouting program, *Tunnels & Tunnelling International*, 37(4).
- Hognestad, H. og Holter, K. (2012) Modern pre-excavation grouting for underground structures in rock *Grouting and Deep Mixing 2012*. s. 890-902.
- Hognestad, H. O. et al. (2010) *Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg*. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk.
- Holmøy, K. H., Strømsvik, H. og Rise, T. (2015) *State of the art for sementbasert forinjeksjon*. (SBF 2015 A0318).
- Huth & Wien Engineering (2012a) Injeksjonsmetode Combi Grouting®.
- Huth & Wien Engineering (2012b) Combi Grouting® - Kombinert polyuretan- og sementinjeksjon.
- Huth & Wien Engineering (2014) Teknisk datablad HA Cut CFL AF.
- Håkansson, U. (1993) *Rheology of fresh cement-based grouts*, Royal Institute of Technology, Department of Infrastructure and Environmental Engineering, Division of Soil and Rock Mechanics.
- Karol, R. H. (2003) *Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded*. Crc Press.
- Klüver, B. H. og Kveen, A. (2004) *Berginjeksjon i praksis*.
- Lombardi, G. og Deere, D. (1993) Grouting design and control using the GIN principle, *International Water Power and Dam Construction IWPCDM*, 45(6).

- Norcem AS (2018) *Produktblad - Norcem Micro*. Tilgjengelig fra: https://www.norcem.no/system/files/force/assets/document/62/bb/norcem_micro_produktdatablad_ensidig_no.pdf?download=1.
- P/F Eystur- og Sandoyartunlar (2018) *The Eysturoy tunnel*. Tilgjengelig fra: <http://www.estunlar.fo/en/about-the-tunnels/the-eysturoy-tunnel/> (Hentet: 30. April 2018).
- Pantazopoulos, I. A. *et al.* (2012) Development of microfine cement grouts by pulverizing ordinary cements, *Cement and Concrete Composites*, 34(5), s. 593-603. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.009.
- Passey, S. R. (2006) *Geological Report for the proposed Skalafjørður Tunnel, Streymoy to Eysturoy*. Torshavn, Faroe Islands.
- Python Software Foundation *Python - About us*. Tilgjengelig fra: <https://www.python.org/about/> (Hentet: 02.05 2018).
- Rafi, J. Y. og Stille, H. (2015) Basic mechanism of elastic jacking and impact of fracture aperture change on grout spread, transmissivity and penetrability, *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 49, s. 174-187. doi: 10.1016/j.tust.2015.04.002.
- Standard Norge (2000) NS-EN 12715:2000: Utførelse av spesielle geotekniske arbeider Injeksjon.
- Statens Vegvesen (2011) *Slik blir en tunnel bygget*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/ringvegvest/Fakta/Tunnelbygging> (Hentet: 01.05 2018).
- Statens Vegvesen (2014) K10 Sveгатjörn - Fanavegen. Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/attachment/713903/binary/996936?fast_title=K10+Svegatj%C3%B8rn-Fanavegen%2C+Kari+Bremnes+27.10.14.pdf.
- Statens Vegvesen (2015) Håndbok R761 *Prosesskode 1 - Standard beskrivelse for vegkontrakter*.
- Statens Vegvesen (2016) *Håndbok N500 Vegtunneler*. Statens Vegvesen.
- Stenstad, O. (1998) Utførelse av injeksjonsarbeider, i *Berginjeksjon, Fagernes*. Norsk Bergmekanikkgruppe.
- Stille, B. *et al.* (2009) Experience with the real time grouting control method, Erfahrungen mit einer Echtzeit Kontrollmethode für das Injizieren, *Geomechanics and Tunneling*, 2(5), s. 447-459. doi: 10.1002/geot.200900036.
- Stille, H., Gustafson, G. og Hassler, L. (2012) Application of New Theories and Technology for Grouting of Dams and Foundations on Rock, *An International Journal*, 30(3), s. 603-624. doi: 10.1007/s10706-012-9512-7.
- Stille, H. (2015) *Rock grouting : Theories and Applications*. Stockholm: BeFo.
- Strømsvik, H. og Grøv, E. (2017) Interpretation of Pressure and Flow during Pre-Grouting in Hard Rock Tunneling *Grouting 2017*. s. 285-294.
- Tolppanen, P. og Syrjänen, P. (2003) Hard rock tunnel grouting practice in Finland, Sweden, and Norway—Literature Study by Finnish Tunneling Association.
- Warner, J. (2004) *Practical handbook of grouting: soil, rock, and structures*. John Wiley & Sons.

VEDLEGG

INNHOLD

Vedlegg A: Pythonscript (zip-fil).....	i
Vedlegg B: Rådata fra injeksjonsriggene (zip-fil)	ii
Vedlegg C: Flytdiagrammer av injeksjonsforløpene (zip-fil)	iii
Vedlegg D: Sammendrag av injeksjonsforløpene (zip-fil).....	iv
Vedlegg E: Grafer av injeksjonsforløpene (zip-fil).....	v
Vedlegg F: Kombinasjonsinjeksjon (zip-fil).....	vi
Vedlegg G: Injeksjonsrapport fra Lyshorntunnelen (zip-fil)	vii

Vedlegg A: Pythonscript (zip-fil)

Rent tekstdokument med koden som fremstiller grafene brukt til den visuelle vurderingen av injeksjonsforløpene.

Vedlegg B: Rådata fra injeksjonsriggene (zip-fil)

Disse dataene er hentet direkte fra injeksjonsriggen, og kan kun åpnes av Bever Team. Det er en mappe for Eysturøyartunnelen og en for Lyshorntunnelen. For Eysturøyartunnelen er det to mapper, en for hver tunnelstuff. Rådataene benyttes til å fremstille flytdiagrammene (vedlegg C) og sammendragene fra injeksjonsskjermene (vedlegg D).

Vedlegg C: Flytdiagrammer av injeksjonsforløpene (zip-fil)

I dette vedlegget er alle flytdiagrammene fra begge prosjektene benyttet i oppgaven. Det er en Excel-fil per injeksjonsskjerm. Det er en mappe for Eysturøyartunnelen og en for Lyshorntunnelen. For Eysturøyartunnelen er det to mapper, en for hver tunnelstuff.

Flytdiagrammene er benyttet av Pythonscriptet i vedlegg A til å fremstille injeksjonsgrafene benyttet til den visuelle vurderingen.

Vedlegg D: Sammendrag av injeksjonsforløpene (zip-fil)

Inneholder sammendragene av injeksjonsforløpene fremstilt i Bever Team. Det er en Excel-fil for hver injeksjonsskjerm. Det er en mappe for Eysturøyartunnelen og en for Lyshorntunnelen. For Eysturøyartunnelen er det to mapper, en for hver tunnelstuff.

Vedlegg E: Grafer av injeksjonsforløpene (zip-fil)

Inneholder alle grafene for alle injeksjonsforløp ved både Eysturøyartunnelen og Lyshorntunnelen. Det er en mappe for Eysturøyartunnelen og en for Lyshorntunnelen. For Eysturøyartunnelen er det to mapper, en for hver tunnelstuff. Det er en .jpeg-fil for hvert injeksjonshull. Det er disse grafene som er brukt i den visuelle vurderingen av injeksjonsforløpene.

Vedlegg F: Kombinasjonsinjeksjon (zip-fil)

To Excel-filer som viser beregninger for kombinasjonsinjeksjon ved Eysturøyartunnelen og Lyshorntunnelen. Det er en fil per prosjekt. I excel-arkene kan man er det egne celler for sementpris, polyuretanpris og timekostnad, disse kan endres for å se hvilken effekt en prisendring har å si for totale besparelser.

Excel-filen for Eysturøyartunnelen har flere ark. Det første arket viser utregninger for alle hullene som havnet i kategori 2 etter den opprinnelige vurderingen av injeksjonsforløpene. I det andre arket er det fortsatt den opprinnelige vurderingen av injeksjonsforløp som er benyttet, men det er kun problemskjermene som er med. Det vil si at utliggerne er filtrert vekk.

Det tredje arket inneholder alle hull ved Eysturøyartunnelen som er vurdert etter den nye prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp. Det viser og hvilke hull som havner i kategori 1 og i kategori 2. Det fjerde arket inneholder av hullene fra Eysturøyartunnelen som havnet i kategori 2 etter den nye prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp.

Excel-filen fra Lyshorntunnelen inneholder kun et ark. Dette arket inneholder alle hullene som ble vurdert etter den nye prosedyren for vurdering av injeksjonsforløp. Den inneholder også utregninger for de hullene som havnet i kategori 2.

Vedlegg G: Injeksjonsrapport fra Lyshorntunnelen (zip-fil)

Injeksjonsrapport fra skjermen ved pel 11009 på Lyshorntunnelen. Dette er skjermen det ble gjort utregninger på kombinasjonsinjeksjon for, og dermed var informasjon om hullengde og pakkerplassering av interesse. Rapporten inneholder oversikt over medgatte mengder for hvert enkelt hull, disse mengdene fraviker i noen tilfeller fra mengdene logget på injeksjonsriggen. Det er ikke store forskjeller og derfor er det valgt å stole på de loggede dataene, ettersom metoden benyttet i denne oppgaven benytter seg av disse.