

# Sammenheng mellom for-injeksjon og bergmassekvalitet i jernbanetunneler på Farriseidet-Porsgrunn prosjektet

**Kaisa Kristina Herfindal**

Tekniske geofag

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Krishna Kanta Panthi, IGB

Medveileder: Tom Frode Hansen, Jernbaneverket

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for geologi og bergteknikk





Your ref.: MS/N18T27/IGB/KKHKP

Date: 09.01.2014

**TGB4930 INGGEOL/BERGMEK - MSc thesis**

**for**

**Eng. geo. student Kaisa Kristina Herfindal**

**LINK BETWEEN PRE-INJECTION GROUTING AND ROCK MASS CHARACTERISTIC  
ALONG THE RAILWAY TUNNEL PROJECT FARRISEIDET - PORSGRUNN**

**Background**

The candidate has carried out project work where she tried to link MWD data with actual rock mass conditions and inflow registration carried out at the railway tunnel project Farriseidet - Porsgrunn. This project, which is under construction, also uses pre-injection grouting as controlling medium for groundwater inflow into the tunnel. A study on the link between pre-injection grout consumption, rock mass characteristics and registered groundwater inflow considered to be an interesting and relevant topic for MSc research. Extensive records of data regarding geology, parameters describing rock mass character, water inflows, pre-injection grouting records are available.

**MSc thesis task**

This MSc thesis shall study on the link between pre-injection grouting and rock mass characteristic along the railway tunnel project Farriseidet – Porsgrunn and shall cover following main issues:

- Theoretical review connected to rock mass characteristics, groundwater inflow and pre-injection techniques;
- Review project cases where pre-injection technique and other water tightening methods that are used to achieve watertight tunnels.
- Present the project case of this study. Discuss about pre-construction phase investigations and rock mass quality predictions.
- Compare predicted versus actual rock mass conditions and used construction methodology.
- Review pre-injection grouting criterions used and criterions used to control grout mass flow.

*Page: 2 of 1*

- Systematize grouting and rock mass quality data.
- Establish possible linkage between Q-parameters, grout consumption and used grout pressure.
- Finally, discuss achieved results and conclude the work.

### **Relevant computer software packages**

Relevant software as per the need.

### **Background information for the study**

- The information provided by the supervisors.
- Information, mapped data records from the project.
- Scientific papers, reports and books related to engineering geology, grouting and tunnelling.

### **Cooperating partner**

Norwegian Rail Authority (Jernbaneverket) and Sweco are the cooperating partners. Needed data, mapped geological information, water inflow and pre-injection grouting registration should be received from **Mr. Tom F. Hansen** (from rail authority) / **Ms. Anniken Hagen** (Sweco) who will also be the contact persons for this project work.

The project work is to start on January 13, 2014 and to be completed by June 10, 2014.

The Norwegian University of Science and Technology (NTNU)  
Department of Geology and Mineral Resources Engineering

January 09, 2014



Dr. Krishna K. Panthi

Associate Professor of geological engineering, main supervisor



## Sammendrag

Store deler av fremtidige tunnelprosjekter innen samferdsel i Norge er forventet å være lokalisert i tettbebygde strøk. Det vil medføre strenge krav til tetthet for vanninstrømninger. I disse tilfellene vil et godt injeksjonsarbeide være helt essensielt for å gjennomføre et vellykket prosjekt.

Hensikten med oppgaven er å undersøke om det finnes noen sammenheng, og i så fall hva slags, mellom forbruk av injeksjonsmasser, bergkvalitet og brukt trykk i injeksjonsarbeidet. Dersom det er mulig å finne en sammenheng kan det åpne for flere muligheter til å planlegge forbruket av injeksjonsmasser og unngå overforbruk. Det vil være viktig da injeksjonsarbeid er et dyrt element i tunneldriving.

For å undersøke dette er det hentet ut informasjon om kartlagt bergmassekvalitet, i form av Q-verdier, forbruk av injeksjonsmasser og oppnådd trykk for injeksjonsskjermene i Skillingsmyr- og Eidanger tunnel på jernbaneprosjektet Farriseidet-Porsgrunn. Disse faktorene er satt opp mot hverandre for å undersøke om det er noen korrelasjon.

Resultatet av undersøkelsene har ikke gitt noen tydlige korrelasjoner mellom bergmassekvalitet og forbruk av injeksjonsmasser. Det er imidlertid registrert tendenser til store forbruk ved lave Q-verdier, noe som antas å være på grunn av intenst oppknust bergmateriale. Det er også registrert en tydelig variasjon i forbruket av injeksjonsmasser for ulike bergarter. I denne undersøkelsen, et større forbruk i sandstein enn larvikitt.

I undersøkelsen av trykkets påvirkning på masseforbruket er det funnet en vag logaritmisk korrelasjon, der høyere trykk gir større forbruk. Denne sammenheng er brukt til å kategorisere forbruket av injeksjonsmasser i 6 klasser, avhengig av trykket.



## Abstract

Many of the future tunnel projects in the Norwegian transport sector are expected to be located in urban areas. This will cause strict requirements to maximum leakage of water into the tunnel. In these cases, a good quality of the pre-injection work will be essential to achieve a successful project.

The purpose of this study is to investigate whether there are any links, and if so what kind of links, between grout consumption, rockmass quality and the pressure used during the pre-injection grouting. If there are any correlations found, it may give a greater opportunity to plan grout consumption and avoid overspending masses. It will be valuable information; hence injection work is an expensive element of tunneling.

To investigate this, information about mapped rock mass quality, represented as Q-values, grout consumption and used pressure have been carried out from the two railway tunnels, Skillingsmyr tunnel and Eidanger tunnel, on the project Farriseidet – Porsgrunn.

The results of the study did not give any distinct correlation between rock mass quality and grout consumption. However, it is still registered some trend. A large grout consumption at low Q-values, which is considered a result of intense crushed rock material sealing the joints. It is also registered a significant variation in grout consumption for various rock types. In this case, a larger consumption is registered for sandstone compared to larvikite.

In the study of possible linkage between the grout pressure and grout consumption used, a slight logarithmic correlation is found. A higher grout pressure gives higher grout consumption. This relationship is used to categorize the grout consumption into six classes, depending on the grout pressure.



## Forord

Denne masteroppgaven er utført ved Instituttet for geologi og bergteknikk ved Norges teknisknaturvitenskaplige universitet (NTNU), våren 2014.

Oppgaven er gjennomført i samarbeid med Jernbaneverkets prosjektkontor for Farriseidet-Porsgrunn i Larvik, der Tom Frode Hansen og Anniken Hagen har operert som kontaktpersoner. Jeg vil rette en takk til dem for tilgang på data og oversendt informasjon.

Ved NTNU har Krishna Kanta Panthi, førsteamanuensis ved instituttet for geologi og bergteknikk, vært hovedveileder. Jeg ønsker å takke han for gode samtaler gjennom semesteret, med inspill og tips som har fått oppgaven videre.



## Innhold

Sammendrag .....	III
Abstract .....	V
Forord .....	VII
Figurliste .....	XII
Tabelliste .....	XIV
Forkorteler .....	XV
1. Innledning .....	1
2. Vann i berg .....	3
2.1 Vannets tilstedeværelse i berg .....	3
2.2 Vannets bevegelse i undergrunnen .....	3
2.2.1 Hydraulisk konduktivitet .....	4
2.2.2 Absolutt permeabilitet .....	5
2.2.3 Sprekkekonduktivitet – Loui’s ligning .....	5
2.2.3 Faktorer som virker inn på vannets bevegelse i berg .....	6
2.3 Endring i vannforholdenes påvirkning på anlegg og miljø .....	10
2.4 Kontroll- og undersøkelse av vannforhold .....	10
2.4.1 Kontrollstadier .....	10
2.4.2 Kontrollmetoder .....	11
3. Kontroll av vannlekkasje .....	13
3.1 Frysing .....	13
3.2 Full utstøping .....	15
3.3 Membran .....	15
3.4 Injeksjon .....	17
3.4.1 Kjemisk injeksjon .....	17
3.4.2 Sementinjeksjon .....	20
4. Sementinjeksjon, for-injeksjon .....	21
4.1 Tetthetskrav og stoppkriterier .....	21
4.1.1 GIN-metoden .....	21
4.1.2 Trykk .....	22
4.2 Injeksjonsmasser .....	24
4.2.1. Valg av injeksjonsmasse .....	24

4.2.2. Injeksjonsmassens materialeegenskaper .....	24
4.2.3. Injeksjonsmassenes strømning i berget .....	29
4.2.4 Forbruk av injeksjonsmasser .....	30
4.3 Utføring av injeksjon .....	31
4.3.1 Systematisk- og sporadisk injeksjon .....	31
4.3.2 Injeksjonsskjerm .....	32
4.3.2.1 System for innpumping av massene.....	33
4.4 Utstyr.....	34
4.4.1 Borerigg .....	34
4.4.2. Injeksjonsrigg.....	35
4.4.3. Pakkere .....	36
4.4.4. Øvrig utstyr - Slangere, staver og koblinger .....	37
5. Undersøkelse av bergmassekvalitet .....	39
6. Farriseidet-Porsgrunn prosjektet .....	41
6.1 Bakgrunn .....	41
6.2 Skillingsmyr tunnel .....	43
6.2.1 Geologiske og ingeniørgeologiske forhold .....	44
6.3 Eidanger tunnel .....	48
6.3.1 Geologiske og ingeniørgeologiske forhold .....	49
6.4 Injeksjonsarbeidet i tunnelene.....	54
6.4.1 Injeksjonsprosedyren .....	54
6.4.2 Injeksjonsmaterialer .....	55
7. Drivemetode.....	56
8. Metode .....	57
8.1 Virkelig kontra forventet bergmassekvalitet .....	57
8.1.1 Bakgrunnsmateriale.....	57
8.1.2 Gjennomføring.....	57
8.2 Masseforbruk i forhold til trykk og bergkvalitet .....	57
8.2.1 Bakgrunnsmateriale.....	57
8.2.2 Gjennomføring.....	58
9. Analyse av data – Resultater og diskusjon .....	63
9.1 Virkelig kontra forventet bergmassekvalitet .....	63



9.1.1 Skillingsmyr tunnel .....	63
9.1.2 Eidanger tunnel .....	64
9.2 Forbruk av injeksjonsmasser .....	66
9.2.1 Masseforbruket generelt.....	66
9.2.2 Volum av injeksjonsmasser i forhold til Q-verdi.....	68
9.2.3 Volum av injeksjonsmasser i forhold til utvalgte parametere i Q-systemet.....	70
9.2.4 Volum av injeksjonsmasser i forhold til oppnådd trykk .....	72
9.2.5 Forbruk av injeksjonsmasser i forhold til trykk og sprekkefylling .....	75
10. Samlet diskusjon .....	76
11. Konklusjon.....	78
12. Videre arbeid.....	79
Referanser .....	80

## Figurliste

Figur 2-1 Omtrentlig hydraulisk konduktivitet i noen bergarter (Brattli, 2009).....	4
Figur 2-2 Parallellplate-prinsippet, med sprekkeåpning e (Brattli, 2009) .....	6
Figur 2-3 Hydraulisk konduktivitet med dypet (Nilsen & Broch, 2009).....	7
Figur 2-4 Forkastning med illustrasjon av kjerne, detruksjonsone og slepesone (Fossen & Gabrielsen, 2005).....	8
Figur 2-5 Sammenheng mellom lekkasje, toppografi og løsmassedekke (Cesano, et al., 2000) .....	9
Figur 2-6 Lugeontesten (Nilsen & Broch, 2009).....	12
Figur 2-7 Sonderboring (Nilsen & Thidemann, 1993) .....	12
Figur 3-1 Installasjon av fryserør i løsmasser eller berg. Stegvis etablering av frysehvelv, fra (i) installering av rør, deretter gradvis utvidelse av det frosne området fram til (iv) etablert hvelv (Johansson, 2009).....	14
Figur 3-2 Tunnel de Viret tildekket av vanntett membran i konstruksjonsfasen (Holter, et al., 2010) .....	16
Figur 3-3 Grunnvannsforholdene i Romeriksporten (Panthi, 2011) .....	19
Figur 4-1 GIN-metoden, strømningsveier (Davik, et al., 2002).....	22
Figur 4-2 GIN-metoden, bestemmelse av stoppkriterier (Lombardi, 1996).....	22
Figur 4-3 Hydraulisk splitting (Myrvang, 2001).....	23
Figur 4-4 Maksimal kornstørrelse bør ikke overstige 1/3 av sprekkeåpningen (Tolppanen & Syrjänen, 2003) .....	25
Figur 4-5 Rheologiske lover for Bingham og Netron væsker (Lombardi, 1985) .....	26
Figur 4-6 Strømning i forhold til vegg (Barton, 2002) .....	29
Figur 4-7 Systematisk for-injeksjon (Panthi, 2014) .....	31
Figur 4-8 Injisering av en skjerm (Hognestad, et al., 2010) .....	32
Figur 4-9 Sperreskjerm (Tolppanen & Syrjänen, 2003) .....	33
Figur 4-10 Rekkefølgen på injisering av hullene i en norsk tunnel (Hansen, 2013) .....	34
Figur 4-11 Tunnelrigg (Solerød, 2011) .....	34
Figur 4-12 Injeksjonsrigg (Tolppanen & Syrjänen, 2003).....	35
Figur 4-13 Utdrag av logg fra injeksjonsrigg .....	36
Figur 4-14 Prinsippet for montering av pakkere (Hognestad, et al., 2010).....	37
Figur 6-1 InterCity triangelet (Jernbaneverket, 2012) .....	42
Figur 6-2 Oversikt over driveretninger på Skillingsmyr entrepriser, med Skillingsmyrtunnel innenfor grønn firkant (Jernbaneverket, 2013).....	43
Figur 6-3 Lengdeprofil, Skillingsmyrtunnel .....	45
Figur 6-4 Løsmassekart over Skillingsmyrtunnel (SWECO, 2012).....	46
Figur 6-5 Oversikt bilde Eidanger tunnel .....	48
Figur 6-6 Lengdeprofil, Eidanger tunnel .....	50
Figur 6-7 Løsmassekart, Eidanger tunnel (SWECO, 2013) .....	51
Figur 6-8 Injeksjonsprosedyre Skillingsmyr-og Eidanger tunnel (Hansen, 2013) (Mork, 2014) .....	54

Figur 6-9 Rekkefølgen på injiserte hull, vist med røde piler (Mork, 2014) .....	55
Figur 7-1 Konvensjonell tunneldriving (Trafikverket, 2010) .....	56
Figur 8-1 Tunnellengden injeksjonsskjermen dekker .....	58
Figur 8-2 Bestemmelse av en samlet Q-verdi for hele injeksjonsskjermen .....	59
Figur 8-3 GIN-metodens strømningsveier (Davik, et al., 2002) .....	61
Figur 9-1 Forventet bergmassekvalitet mot den virkelige kartlagt kvaliteten på stuff, Skillingsmyr tunnel.....	63
Figur 9-2 Profil Skillingsmyr tunnel, men områdene det er hentet data fra markert med blå. Svakhetssonene er markert der rød tilsier en bredde på 3-5 meter og grønn tilsier bredde på 5-10 meter .....	64
Figur 9-3 Forventet bergmassekvalitet mot den virkelige kartlagte kvaliteten på stuff, Eidanger tunnel.....	65
Figur 9-4 Profil Eidanger, med området det er hentet data fra markert med blått. Svakhetssonene er markert der rød tilsier en bredde på 3-5 meter, oransje tilsier 1-3 meter og grønn 5-10 meters bredde. Forøvrig er gult område sandstein og grønn kalkstein/leirskif .....	65
Figur 9-5 Masseforbruk langs profilet i Skillingsmyr tunnel, i larvikitt .....	66
Figur 9-6 Masseforbruket langs profilet i Eidanger tunnel, i sandstein .....	67
Figur 9-7 Sammenheng mellom masseforbruk og injeksjonstid .....	67
Figur 9-8 Sammenheng mellom forbrukte injeksjonsmasser og Q-verdi for begge tunnelene samlet.....	69
Figur 9-9 Sammenheng mellom forbrukt injeksjonsmasse og Q-verdi, med tunnelene separert.....	69
Figur 9-10 Sammenheng mellom forbrukt injeksjonsmasse og $J_n/(J_r*J_a)$ .....	71
Figur 9-11 Sammenheng mellom forbrukt injeksjonsmasse og $(J_n*P)/J_a$ .....	71
Figur 9-12 Sammenheng mellom forbrukte injeksjonsmasser og Q-verdi for begge tunnelene samlet.....	73
Figur 9-13 Sammenheng mellom forbrukt injeksjonsmasse og oppnådd trykk, med tunnelene separert .....	73
Figur 9-14 Undersøkelse av om det forekommer noen klare strømningsveier avhengig av variasjon i $J_n$ .....	75

## Tabelliste

Tabell 2-1 Oversikt over vannets måter å forekomme i berg, og vannets betydning for anlegg i berg (Nilsen & Broch, 2009) .....	3
Tabell 4-1 Tetthetskrav (Klüver & Kveen, 2004) .....	21
Tabell 4-2 Kornstørrelser for ulike sementtyper (Hognestad, et al., 2010) .....	25
Tabell 4-3 Forholdet mellom relativ reaksjonshastighet og temperatur (Klüver, 2000).....	27
Tabell 4-4 Sammenheng mellom bergklasser og forventet injeksjonsmengde (Klüver, 2000) .....	30
Tabell 6-1 Fordeling av sporadisk og systematisk injeksjon langs tunneltraséene (SWECO, 2012) (SWECO, 2012) (SWECO, 2013) .....	55
Tabell 6-2 Injeksjonsmidlene det benyttes i tunnelene .....	55
Tabell 8-1 Inndeling av grupper ut fra Ja verdi .....	62
Tabell 9-1 Oversikt over forventet og virkelig fordeling av bergmassekvalitet, Skillingsmyr tunnel.....	63
Tabell 9-2 Ovrstikt over forventet og virkelig fordeling av bergmassekvalitet, Eidanger tunnel .....	64
Tabell 9-3 Gjennomsnittlig forbruk av injeksjonsmasser i Skillingsmyr og Eidanger tunnel ...	67
Tabell 9-4 Klassifisering av mengdeforbruk i forhold til trykk .....	74

## Forkorteler

NIVA	Norsk Institutt for Vannforskning
v/c	Vann/sement
NGU	Norges geologiske undersøkelser
MWD	Measurment while drilling
GIN	Grouting intensity number
RQD	Oppsprekningstall (Rock Quality Designation)
J <sub>n</sub>	Tall for sprekkesett
J <sub>a</sub>	Tall for sprekkefylling
J <sub>r</sub>	Sprekkeruhetstall
J <sub>w</sub>	Sprekkevannsfaktor
SRF	Spenningsfaktor
K	hydraulisk konduktivitet
v	væskens gjennomsnittlige strømningshastighet
i	hydraulisk gradient
p <sub>c</sub>	nødvendig pumpetrykk
σ <sub>H2</sub>	minste horisontalspenning
σ <sub>H1</sub>	Største horiatontalspenning
σ <sub>t</sub>	strekkstyrke
e	sprekkeåpning
g	tyngdens akslerasjon
ρ	væskens densitet
μ	væskens dynamiske viskositet
ν	væskens kinematiske viskositet
k	absolutt permeabilitet
τ	skjærstyrke [Pa]
dv/dx	skjærhastighet [sek <sup>-1</sup> ]
η	viskositet [Pa sek]
c	Kohesjon [Pa]
P	Injeksjonstrykk



## 1. Innledning

Hensikten med denne oppgaven er å se om det finnes en sammenheng, og i tilfelle hva slags sammenheng, mellom bergkvalitet, mengde nødvendig injeksjonsmateriale og brukt trykk i injeksjonsarbeid.

Det er gjort gjennom:

- En litteraturstudie av vannets opptreden i berg. Dette fordi vannets opptreden er avgjørende for injeksjonsarbeid. Det er sett på eksempler for å kontrollere vanninnstrømmning i tunneler med hovedfokus på for-injeksjon.
- En studie av geologi, kartlagt bergkvalitet, grunnvannsforhold og injeksjonsrapporter fra to tunneler med ulike geologiske forhold på jernbaneprosjektet Farriseidet-Porsgrunn.
- En vurdering av sammenhengen mellom bergmassekvaliteten, trykket og for-injeksjonen ved å sette opp grafer over trykk, kartlagt bergkvalitet og inngang av injeksjonsmasser fra jernbaneprosjektet.

Jernbaneprosjektet er presentert med bakgrunn i forundersøkelsene. Disse er også sammenliknet med de virkelige forholdene som er møtt på under driving, knyttet til bergmassekvalitet.

I en større sammenheng vil oppgaven være aktuell da store deler av de fremtidige tunnelprosjektene innen samferdsel i Norge er forventet å være lokalisert i tettbebygde strøk. Det vil medføre strenge krav til tetthet. Ofte vil disse tunnelene være gruntliggende, og svært dårlige bergforhold kan forekomme. I disse tilfellene vil et godt gjennomført injeksjonsarbeide være helt essensielt for å gjennomføre et vellykket prosjekt (Setsaa & Davik, 2001).

Dersom det er mulig å finne en sammenheng mellom masseforbruket og andre faktorer åpner det for flere muligheter til å planlegge forbruket og unngå overforbruk. Det vil være viktig da injeksjonsarbeid er et dyrt element i tunneldriving (Klüver & Kveen, 2004).





## 2. Vann i berg

Ved driving av anlegg i berg er det viktig å ha god oversikt over vannforholdene i området, og da spesielt grunnvannsforholdene, da anlegg i de fleste tilfeller befinner seg under grunnvannsspeilet. Hvordan man påvirker, eller i størst mulig grad klarer å unngå å påvirke vannforholdene vil ha stor betydning både under driving og for anvendelse av ferdig anlegg. Samtidig vil det ha stor betydning for overliggende områder dersom områder dreneres og grunnvannet senkes (Løset, 2006).

I dette kapitlet vil det bli sett nærmere på vannets tilstedeværelse i berg, hvordan det beveger seg, hvordan denne bevegelsen påvirker anlegg og miljø, og hvordan det er mulig å holde oversikt over vannforholdene.

### 2.1 Vannets tilstedeværelse i berg

Vann kan forekomme i bergmassen på flere ulike måter, og vil ut fra det ha ulik betydning for anleggsvirksomhet i undergrunnen. I tabell 2-1 er forekomstmåtene og betydningen på undergrunnsdriving presentert (Nilsen & Broch, 2009):

Tabell 2-1 Oversikt over vannets måter å forekomme i berg, og vannets betydning for anlegg i berg (Nilsen & Broch, 2009)

Forekomstmåte	Betydning på undergrunnsdriving
Kjemisk bundet i mineraler	Ingen betydning
Absorbent i mineraler	I forbindelse med svelleleire
Mineraloverflatebundet	Kan ha betydning ved svakt permeable, meget finkornede sedimenter
Kapillært bundet	Kan oppstå store vannmengder ved noen spesielle tilfeller (f.eks i unge sandstein)
Fritt i sprekker og åpninger	Stor betydning

Videre i denne oppgaven er det fokusert på vann som beveger seg fritt i sprekker og åpninger, da det er denne typen vann som i størst grad vil ha betydning for driving under bakken og ferdige anlegg (Nilsen & Broch, 2009).

### 2.2 Vannets bevegelse i undergrunnen

For å få et bedre bilde av vannets bevegelse i berg vil det i dette avsnittet først bli sett nærmere på begrepene hydraulisk konduktivitet og sprekkekonduktivitet. Deretter vil det bli sett på faktorene som har størst innvirkning på vannets bevegelse i berg; geologi, oppsprekning og spenningstilstand (Davik, et al., 2002).

### 2.2.1 Hydraulisk konduktivitet

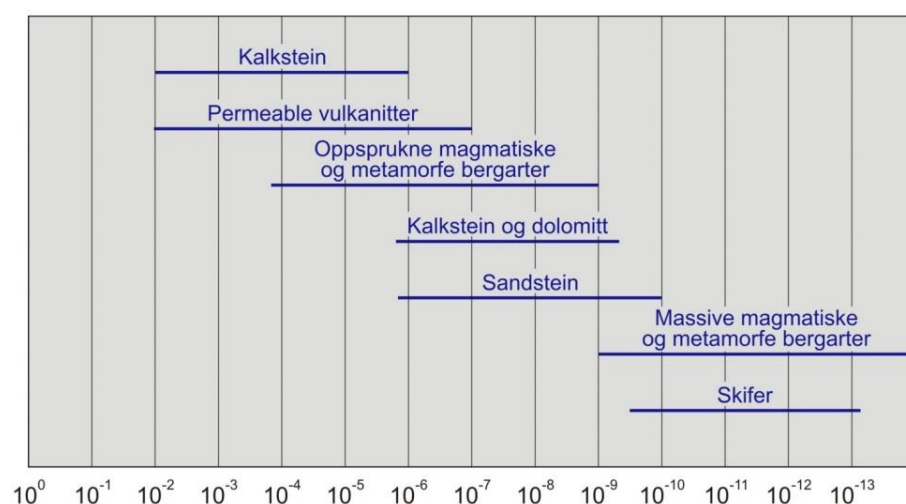
Hydraulisk konduktivitet er en parameter som forteller noe om hvordan en væske strømmer i et porøst medium. Det skiller seg fra det mer kjente begrepet permeabilitet med at det istedenfor å kun ta hensyn til det porøse mediets strømningssegenskaper også inkluderer væskens strømningssegenskaper (Brattli, 2009).

Den hydrauliske konduktiviteten er definert i Darcy's ligning for laminær strømming i et homogent porøst medium.

$$K = \frac{v}{i}$$

Der:  $K$  = hydraulisk konduktivitet [m/s]  
 $v$  = væskens gjennomsnittlige strømningshastighet [m/s]  
 $i$  =  $dh/dl$  = hydraulisk gradient

Det at den hydrauliske konduktivitet avhenger av både materialstrukturen til bergarten eller bergmassen, og egenskapene til strømningsmediet gjør at det ikke er en materialkonstant (Nilsen & Broch, 2009). Det er likevel foreslått en omtrentlig hydraulisk konduktivitet for en del bergarter, vist i figur 2-1. Det er viktig å være klar over at dette kun er veiledende verdier, da forholdene i stor grad kan variere i forhold til oppsprekking og andre situasjonsavhengige faktorer (Brattli, 2009).



Figur 2-1 Omtrentlig hydraulisk konduktivitet i noen bergarter (Brattli, 2009)

Darcys ligning er bedre tilpasset løsmasser enn bergmasser. Det kommer av at gjennomstrømmingen i løsmasser i større grad avhenger av poresystemet, mens bergmassenes strømninger generelt vil avhenge av sprekkesystemer (Brattli, 2009). I tillegg vil bergmasser sjeldent være et homogent med en lineærgjennomstrømming, slik Darcys ligning forutsetter.

### 2.2.2 Absolutt permeabilitet

En parameter som er materialkonstant er den absolutte permeabiliteten. Den beskriver en bergmasses evne til å bli gjennomtrengt og avhenger kun av bergets materialspesifikke egenskaper; effektiv porøsitet, porestørrelse og -form, kornfordeling, tekstur, sementeringsgrad, oppsprekningsgrad, leirbelegg på sprekker osv (Nilsen & Broch, 2009).

Sammenhengen mellom den hydrauliske konduktiviteten og absolutt permeabilitet er definert som (Nilsen & Broch, 2009):

$$K = \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot k = \frac{g}{\nu} \cdot k$$

Der:	$K =$ hydraulisk konduktivitet	$[m/s]$
	$\rho =$ densitet av strømningsmediet	$[N/m^3]$
	$g =$ tyngdens akselerasjon	$[m/s^2]$
	$\mu =$ dynamisk viskositet av strømningsmediet	$[N/(m \cdot s)]$
	$\nu =$ kinematisk viskositet ( $\mu/\rho$ )	$[m^2/s]$
	$k =$ absolutt permeabilitet	$[m^2]$

### 2.2.3 Sprekkekonduktivitet – Loui's ligning

Vann vil alltid følge minste motstands vei, noe som gjerne tilsier sprekker eller andre kanaler i en bergmasse (Klüver & Kveen, 2004). Konduktiviteten i berg vil derfor, som tidligere nevnt, i stor grad være påvirket av oppsprekking, sprekkebredde, retning på sprekke og sprekkekarakter. Med bakgrunn i det vil de aller fleste bergmasser avvike fra Darcys lov, som er tilpasset porøse medier. I berg bør man isteden se på sprekkekonduktivitet (Brattli, 2009).

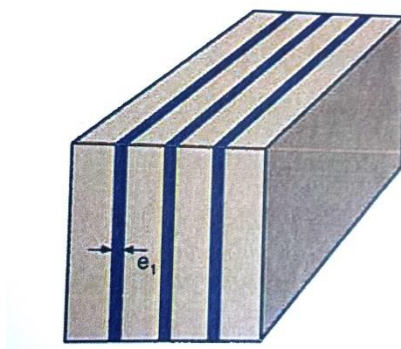
Det er utført omfattende studier av vannstrømning langs sprekker. Det har ført til et stort antall modeller (Nilsen & Broch, 2009). En kjent modell er Louis' ligning, der det er lagt vekt på sprekkeåpningen (Nilsen & Thidemann, 1993).

$$v = \frac{e^2 \cdot \rho \cdot g}{12\mu} \cdot i = \frac{g \cdot e^2}{12\nu}$$

Der:	$v =$ Darcy hastighet
	$e =$ sprekkeåpning
	$g =$ tyngdens akslerasjon
	$\rho =$ væskens densitet
	$\mu =$ væskens dynamiske viskositet
	$\nu =$ væskens kinematiske viskositet
	$i =$ effektiv hydraulisk gradient

Det er noen svakheter ved modellen. Ligningen bygger på parallellplate-prinsippet der enkeltsprekke sees på som plane åpninger mellom to parallelle plater, illustrert i figur 2-2.

En så enkel geometri vil aldri forekomme i naturlige sprekker. Samtidig forutsetter likningen en stabil og laminær fluidstrøm, noe som gjennom undersøkelser i laboratoriet har vist seg å sjeldent være tilfelle (Nilsen & Broch, 2009). Det tas heller ikke hensyn til sprekkeoverflatens ruhet, noe som vil variere stort fra det idealiserte parallellplate-prinsippet (Nilsen & Broch, 2009).



Figur 2-2 Parallellplate-prinsippet, med sprekkeåpning  $e$  (Brattli, 2009)

Til tross for alle de ulike modellene som er utviklet, er det ikke mulig å bestemme sprekkekonduktiviteten annet enn empirisk. Det bunner i at sprekkeåpninger aldri er konstante, fullstendig kontinuerlige eller har lik ruhet (Nilsen & Broch, 2009). Modellene viser likevel viktig informasjon for å forstå hvordan vann strømmen gjennom sprekker (Nilsen & Thidemann, 1993).

### 2.2.3 Faktorer som virker inn på vannets bevegelse i berg

Siden vanngjennomstrømningen kan være så varierende, er faktorer som påvirker strømmingen nærmere undersøkt. I Holmøy (2008) er det skissert 5 geologiske faktorer som vil ha stor betydning for innlekkasjer av vann i tunneler:

- Sprekkekarakter
- Spenningstilstand
- Forkastninger
- Eruptivganger
- Topografi og løsmasseoverdekning

#### 2.2.3.1 Sprekkekarakter

Sprekkesystemene vil være viktige, da det er via disse mesteparten av vannet strømmen. En av faktorene innenfor dette er sprekkeåpning. Den avhenger av bergmassens mekaniske egenskaper. I korte trekk kan det sies at harde stive bergarter i større grad vil sprekke opp og danne store sprekkeåpninger, enn myke bergarter. På den måten vil de harde bergartene lede større mengder vann. Samtidig kan variasjonen innenfor like bergartstyper være stor, avhengig av den geologiske utviklingshistorien (Løset, 2006).

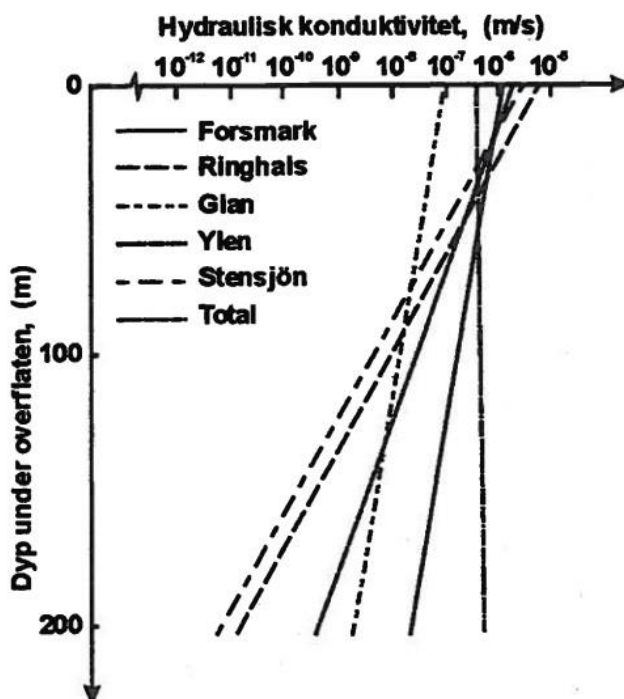
En annen viktig faktor som vil fortelle noe om utholdenheten til vannkanaler er sammenkobling av sprekkesystem. Den vil avhenge av lengden på sprekke, orienteringen og avstanden mellom dem. Slike systemer kan tettes igjen av sprekkefyllinger. Særlig kan leire forseile sprekke fullstendig, men det forekommer også sprekkefyllinger som kan være med på å danne vannførende kanaler over tid. Kalsitt som sprekkefylling kan eksempelvis løses opp og danne kanaler.

Ruheten på sprekke vil også innvirke på den hydrauliske konduktiviteten. Dersom ruheten er høy mellom to kontaktflater kan det forekomme mange små kanaler. Hvis disse kontaktflatene er påført et stort felles trykk, trengs det ikke mer enn små skjærkrefter for å skape hulrom vann kan strømme gjennom. Alt i alt er dette kompliserte mekanismer, og det er fremdeles ikke funnet noen fullstendig sammenheng mellom geometrien til åpninger, kontaktflater, påførte spenninger og den hydrauliske konduktiviteten (Holmøy, 2008).

### 2.2.3.2 Spenningstilstand

Spenningstilstanden vil ha størst betydning i bergmasser med høy oppsprekking (Davik, et al., 2002). I Løseth (2006) forklares det ved at spenningstilstanden gir informasjon om hvilke retninger det kan forkommer åpne sprekker, og dermed også vannlekkasjer.

Som et resultat av tyngdekraften vil spenningen øke med dypet, da de overliggende massene vil bli større. Det fører til at de fleste sprekker i dypet er lukket, noe som igjen fører til en reduksjon i hydraulisk konduktivitet med dypet, vist i figur 2-3 (Nilsen & Broch, 2009).

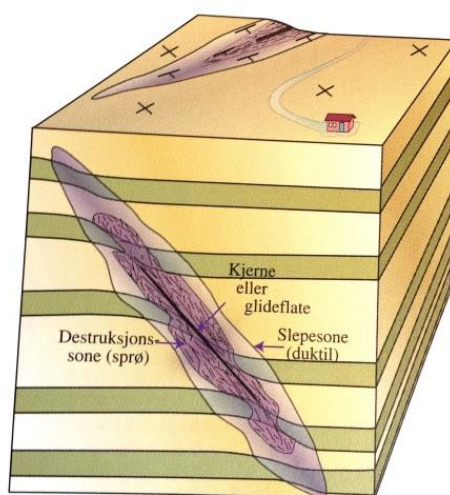


Figur 2-3 Hydraulisk konduktivitet med dypet (Nilsen & Broch, 2009)

Tektonisk aktivitet og deformasjoner rundt tunnelåpninger kan også virke inn på spenningsforholdene og påvirke vannføringen. Det skjer ved at både deformasjon og tektonisk aktivitet kan skape bevegelse langs sprekker og forkastninger. Disse bevegelsene kan øke sprekkeåpninger og derav også øke den hydrauliske konduktiviteten (Løset, 2006).

### 2.2.3.3 Forkastninger

Erfaringer viser at den største risikoen for at det skal oppstå store innlekkasjer av vann er knyttet til forkastningssoner (Holmøy, 2008). Slike soner deles i tre, relatert til strukturen; forkastningskjerne, destruksjonssoner og slepesone, illustrert i figur 2-4. Forkastningssonen er intenst oppknust, mens destruksjonssonen består av deformasjonsbånd eller små brudd. Sleppesonen ytterst forekommer ikke bestandig, men i tilfeller der den gjør vil den opptre ved at lagene er rotert inn mot forkastningen (Fossen & Gabrielsen, 2005).



Figur 2-4 Forkastning med illustrasjon av kjerne, destruksjonszone og slepesone (Fossen & Gabrielsen, 2005)

Det er utført en rekke studier på vanninnlekkasjer knyttet til forkastninger. En av dem som har studert dette er Selmer-Olsen som undersøkte sprekker med stor vannføring i 11 tunneler sør i Norge. Studiene hans konkluderte med følgende punkter, som i senere tid har blitt bekreftet i tunneldriving (Holmøy, 2008):

- 85% av sprekken hadde et fall over  $70^\circ$
- Vinkelen mellom sprekker med stor vannføring og hovedforkastningen var  $45^\circ \pm 15^\circ$
- Normalt ga kun ett sprekkesett store vannlekkasjer
- Kontinuerlige sprekker og knusningssoner gav store vannlekkasjer
- Målt vanntrykk korresponderte med den overliggende bergmassen
- De høyeste vannlekkasjene fant sted i sprø bergmasser
- Den høyeste vannlekkasjen var i kanaler av sprekker med kalsittfylling

### 2.2.3.3 Eruptivganger

Eruptivganger kan også være med på å øke den hydrauliske konduktiviteten. Disse gangene dannes ved at vulkanske smeltmasser trenger inn i sprekker og stivner. Stivningen av massene kan føre til volumreduksjon, noe som igjen kan føre til dannelse av åpne sprekker mellom eruptivgangen og sideberget. Ofte er slike ganger orientert vinkelrett på minste hovedspenning. Derav kan effekten forsterkes. I tillegg er eruptivganger ofte mer oppsprukket enn sideberget, og kan derav være soner med høy hydraulisk konduktivitet (Løset, 2006).

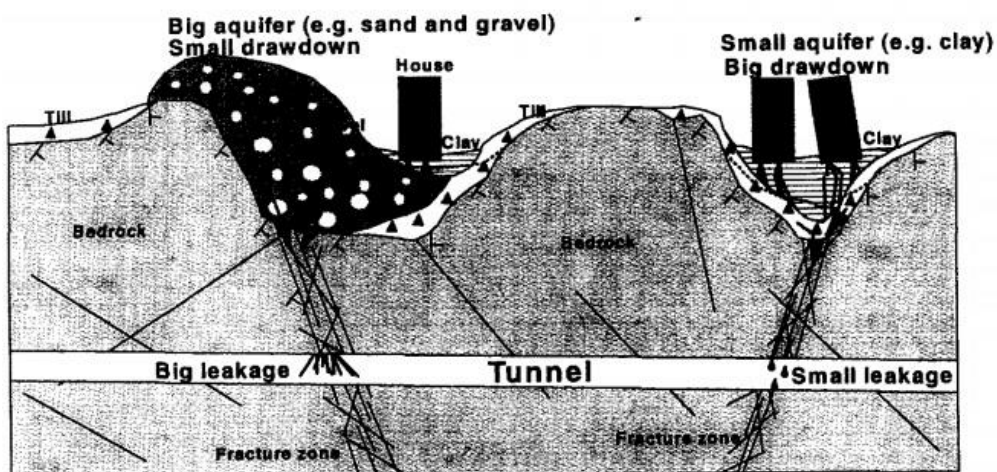
### 2.2.3.4 Topografi og løsmasseoverdekning

Ved driving av tunneler i berg vil også løsmassedekket i overkant av tunnelen og topografien ha innvirkning på muligheten til- og størrelsen på innlekkasjer av vann.

Det er utført studier av dette i Bolmen tunnel sør i Sverige. Disse studiene har vist at store og små vannlekkasjer avhenger av ulike prosesser. Små vannlekkasjer knyttes i hovedsak til vann som er lagret i berget, mens de store lekkasjene i større grad avhenger av overliggende områder (Cesano, et al., 2000).

Topografien og løsmasseoverdekningen ble i det samme studiet påvist å ha følgende påvirkning (Cesano, et al., 2000):

- Terrengets daler og depresjoner har høyere oppsprekkning enn de omkringliggende toppene. Det gir en større vannledende mulighet, vist i figur 2-5.
- Løsmassenes kornstørrelse, sammensetning og tykkelse vil påvirke størrelsen av lekkasjen. Finkornet leirmateriale vil ha en impermeabel karakter og gi små lekkasjer, mens sand og grus materiale vil ha en høyere permeabilitet og gi muligheter til større lekkasjer fra terrenget og ned i tunnelen, vist i figur 2-5.



Figur 2-5 Sammenheng mellom lekkasje, topografi og løsmassedekke (Cesano, et al., 2000)



## 2.3 Endring i vannforholdenes påvirkning på anlegg og miljø

Ved driving av anlegg i berg åpnes store områder under bakken. I de fleste tilfeller vil disse områdene, som tidligere nevnt, befinne seg under grunnvannsspeilet. Det kan føre til innlekkasjer av vann og senking av grunnvannsspeilet. Det kan igjen resultere i skader på både anlegget, miljøet og potensiell bebyggelse i overliggende område. I forbindelse med det ytre miljøet vil en grunnvannsenkning føre til følgende problemer (Klüver & Kveen, 2004):

- Reduksjon i løsmassenes poretrykk og derav gi setninger
- Drenering av brønner, tjern, vann og vassdrag over tunnelen
- Grunnvannsdrenering som påvirker floraen og faunaen ved tunnelen
- Generell tapping av grunnvannsmagasiner

For det indre miljøet i berganlegg vil innlekkasjer av vann reise problemstillinger i forhold til sikringsarbeid for anleggsbemanningen under driving og for ferdig anlegg (Klüver, 2000b). Under drivingen kan store innlekkasjer også gi driftsproblemer (Davik, et al., 2002).

## 2.4 Kontroll- og undersøkelse av vannforhold

### 2.4.1 Kontrollstadier

For til enhver tid å ha oversikt over vannforholdene gjøres det undersøkelser på forprosjekt stadiet, under drivingen og som kontroll i etterkant. Dette er beskrevet som følger (Davik, et al., 2002):

På forprosjektstadiet er det ønskelig å kartlegge vannforholdene for å kunne se om det skjer noen endringer, samt forutsi omfanget av innlekkasjer i anlegget og behovet for tetningsarbeid. Det gjøres i store prosjekter ved vanntapsmålinger på kjerneboringer. I tillegg kartlegges, og undersøkes oppsprekking, sprekkefyllinger og grunnvannstand. I forbindelse med grunnvannet vil det være viktig å innhente informasjon over lang tid, ideelt minst to år, for å registrere variasjoner med årstider som svinger med klima og nedbør.

Under driving undersøkes vannforholdene fortløpende for å se om de stemmer med det forventede, og gjøre det mulig å tilpasse drivinga for kommende forhold. Det gjøres i form av vanntapsmålinger på eller ved stuff.

I etterkant av drivingen og tetting av lekkasjer kontrolleres det om arbeidet er tilfredsstillende. Det kan gjøres i form av vanntapsmålinger i borhull eller måling av innlekkasje i borhull.



## 2.4.2 Kontrollmetoder

Det finnes ulike måter å måle vannforholdene i geologiske masser. For å finne den hydrauliske konduktiviteten til løsmasser kan det benyttes permeameter, da den i hovedsak avhenger av porøsitet. Dersom konduktiviteten til enkeltsprekker skal måles, kan det gjøres i laboratoriet. Det er derimot mer krevende å bestemme konduktiviteten til en større bergmasse, da det er en kompleks masse som kan ha store lokale variasjoner. Det er mulig å måle konduktivitet i borhull ved utpumping eller innpressing av vann, men den vil i stor grad være avhengig av hvilke sprekker borhullet treffer, og derfor ha en stor grad av usikkerhet (Nilsen & Broch, 2009). Det er sett litt nærmere på to undersøkelser for å undersøke vannforholdene; Lugeontesten og vannstrøm i sonderboring.

### 2.4.2.1 Lugeontest

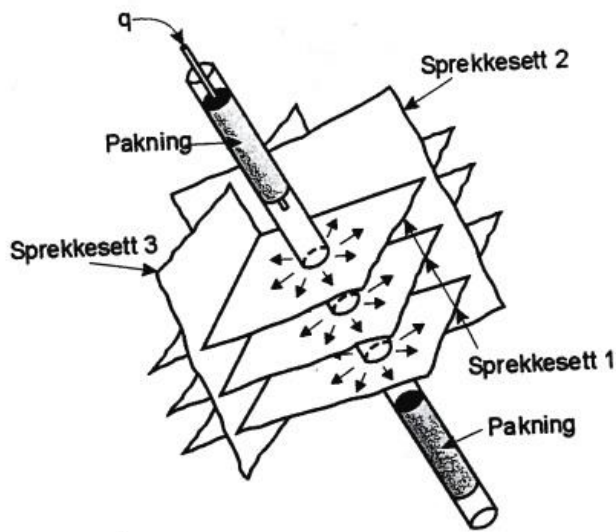
Den mest brukte vanntapsmålingen i Norge og til dels i utlandet er Lugeontest (Davik, et al., 2002). Testen går ut på at den hydrauliske konduktiviteten i bergmassen vurderes ut fra en Lugeon-verdi (L). Denne verdien bestemmes ved å måle volumet av vann som pumpes inn i et borhull i en 5-minutters periode ved konstant overtrykk på 10bar. Det gjøres gjentatte målinger, helt til det er en stasjonær tilstand og to etterfølgende måleperioder viser lik mengde innpumpet vann (Davik, et al., 2002). Mengden av det innpumpede vannet deles på lengden det er pumpet inn over og hvor lang tid innpumpingen foregikk, for å bestemme Lugeon-verdien. Verdien oppgis som vanntap i l/min. pr. m borhull (Nilsen & Broch, 2009).

Erfaringsmessig har det vist seg å være en sammenheng mellom Lugeon-verdien og den hydrauliske konduktiviteten. Den er gitt ved (Nilsen & Broch, 2009):

$$1 \text{ Lugeon} = (1 \text{ l} * 10\text{bar} / \text{m} / \text{min}) = 1 * 10^{-7} \text{ m/s}$$

En svakhet med metoden er at den ved store lengder kan gi misvisende resultater, i tilfeller der små områder langs hullengden er svært vannførende, mens det resterende er tett. Da vil den store lekkasjen i et punkt fordeles over hele lengden og gi et bilde av at det er en moderat eller liten innlekkasje. Det anbefales derfor å bruke en beregningslengde på 3-5 meter selv om vannet er pumpet inn over lengre hullengder. Det kan akademisk settes et spørsmålstegn ved hvorvidt det er riktig å gjøre det på den måten, men det anbefales særlig dersom det er moderat/lite oppsprukne grunnfjellsgneiser (Davik, et al., 2002).

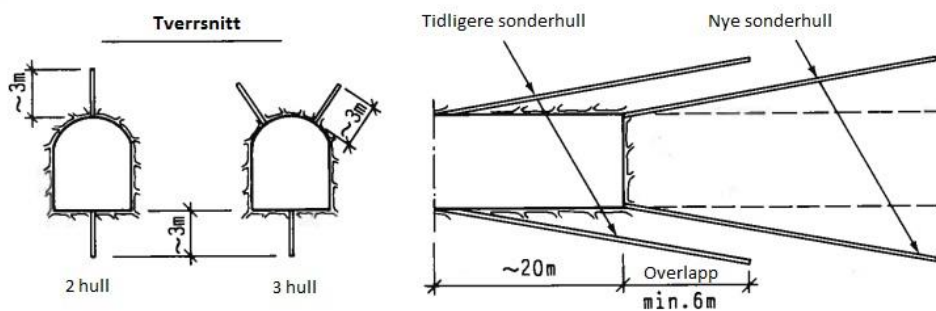
Utførelsen av vanntapsmålingene kan variere. Det kan gjøres både med en og to pakkere, under boringen eller seksjonsvis etter ferdigboret hull, og over intervaller fra 3 meter opp til hele borhull. Disse metodene varierer i pris og resultatene varierer i nøyaktighet. Det er derfor viktig at metoden som er benyttet beskrives (Nilsen & Broch, 2009). Det vanligste er intervaller på 5-10 meter. Figur 2-6 viser hvordan testen utføres med to pakkere og god kommunikasjon mellom de ulike sprekkesettene.



Figur 2-6 Lugeontesten (Nilsen & Broch, 2009)

#### 2.4.2.2 Vannstrøm fra sonderboring

Ved tunneldriving benyttes det sonderboringer på stoff for å undersøke vannforholdene for kommende salver. Boringene blir utført med jevne mellomrom så det blir en overlapp mellom dem, vist i figur 2-7. I hullene kan det utføres Lugeontest, men det vanligste er å måle volumet av vannstrømmen som renner ut. Disse målingene kan benyttes til å planlegge kommende driving og tetningsarbeid (Nilsen & Thidemann, 1993). Metoden har en svakhet ved at innstrømningen i stor grad vil avhenge av hvilke kanaler borhullene krysser.



Figur 2-7 Sonderboring (Nilsen & Thidemann, 1993)

### 3. Kontroll av vannlekkasje

For å forhindre innlekkasje av vann i tunneler benyttes ulike metoder og materialer. Noen velkjente metoder er:

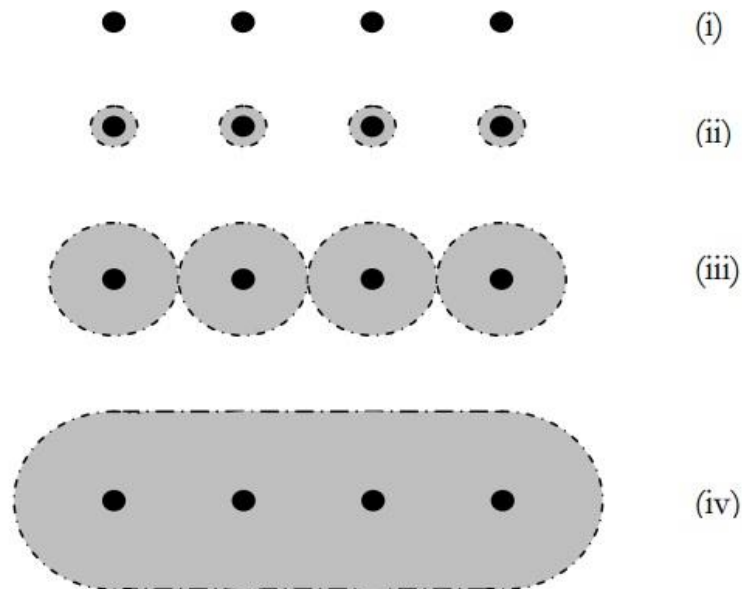
- Frysing
- Full utstøping
- Membran
- Injeksjon
  - Kjemisk
  - Sement

I det følgende er disse metodene, og erfaringer gjort ved bruk dem, kort beskrevet. Sementinjeksjon er den mest benyttede metoden for tetting av norske tunneler (Hognestad, et al., 2010). I denne oppgaven er det fokusert mest på sementinjeksjon i form av forinjeksjon. Metoden er nærmere beskrevet i kapittel 4.

#### 3.1 Frysing

En metode som kan benyttes for midlertidig å tette igjen området rundt en tunnelutgravning er frysing. Den benyttes sjeldent i Norge, men kan i tilfeller der det drives gjennom områder med spesielt krevende stabilitetsproblemer være aktuelt. Det er særlig i forbindelse med utrasing på stuff, i områder med minimal overdekning eller ved dårlig fjellkvalitet, der andre metoder ikke strekker til, at frysing benyttes (Nilsen & Broch, 2009).

Frysing utføres ved at det bores en skjerm rundt tunnelprofilet der det installeres fryserør. Disse fryserørene inneholder i dag hovedsakelig saltlake. Saltlaken sirkulerer i fryserørene og trekker ut varmen fra det omkringliggende berget (Nilsen & Broch, 2009). På den måten fryses området ned og det dannes et hvelv rundt tunnelprofilet, som vist i figur 3-1 nedenfor.



Figur 3-1 Installasjon av fryserør i løsmasser eller berg. Stegvis etablering av frysehvelv, fra (i) installering av rør, deretter gradvis utvidelse av det frosne området fram til (iv) etablert hvelv (Johansson, 2009)

Når frysehvelvet er etablert drives tunnelen videre med korte salvelengder. Etter hver salve installeres permanent sikring, som regel i form av full utstøpning. Fryseaggregatet slås først av når denne sikringen er på plass.

Som frysemedium har det tidligere vært benyttet freon, men på grunn av stoffets negative miljøpåvirkning er dette ikke lenger i bruk. Saltlaken kan imidlertid erstattes med flytende nitrogen i tilfeller der det er behov for en raskere nedfrysning (Nilsen & Broch, 2009).

Frysing er en midlertidig sikringsmetode som tilbakestilles til naturen når fryseaggregatet slås av. Det vil derfor ikke påvirke grunnvannstanden eller grunnvannets kvalitet (Harris, 1995). Samtidig vil det være avhengig av installering av annen permanent sikring i etterkant (Nilsen & Broch, 2009). Det er også en metode som ikke går direkte på de vannførende sprekkesettene i berget, men heller danner en kontinuerlig barriere hvor vann ikke kan trenge gjennom (Harris, 1995).

Årsaken til at frysing ikke benyttes i større grad er i hovedsak at det er tidkrevende og kostbart. Samtidig stilles det strenge krav til borenøyaktigheten for å oppnå gode resultater, og det er i seg selv kun en midlertidig løsning. Det er imidlertid tilfeller der frysing er det eneste mulige alternativet (Nilsen & Broch, 2009), se neste avsnitt.

Et eksempel på frysing i Norge er fra drivingen av det søndre løpet i Oslostunnelen. Der ble frysing benyttet for kryssing av dyprenne under rådhusplassen der fjellkvaliteten var ekstremt dårlig. Det ble boret to rader med totalt 72 borhull, av lengde 18-29m, i heng og vegger. Via disse ble det etablert et frosthvelv med en tykkelse på 2 meter og temperatur på ca. minus 15°C. Etableringen av frosthvelvet tok 3 uker, og drivingen gjennom det og

etableringen av den permanente sikringen i frostsone tok ca. 8 uker. Noe som viser at det er en omfattende og tidkrevende prosess (Nilsen & Broch, 2009).

### 3.2 Full utstøping

Full utstøping kan benyttes som tetningsmetode i tunneler dersom innlekkasjene er små, og en avskjerming er vurdert mer økonomisk gunstig enn 100 % tetting av området rundt tunnellopet (Davik, et al., 2002). Et problem med denne metoden er drenering av det overliggende området og senkning av grunnvannet. Det er umulig å forhindre en senkning under drifingen, og det kan være nødvendig med vanninfiltrasjon som et supplement for å skåne området. Denne metoden vil kun være et alternativ dersom kravene til tetting er små og de overliggende områdene ikke kan ta skade av drenering og grunnvannssenkning. Det er med andre ord en lite benyttet metode i dagens tunneldriving.

Det er også krevende å oppnå en tilfredsstillende kvalitet på betongen. For å få til dette bør innlekkasjen reduseres så mye som mulig før man starter støpningen. Det kan gjøres tiltak for å drenere vekk vannet ved å legge inn rør, slanger eller drensmatter mellom fjellet og støpen. Eventuelt kan det lages drenshull i støpen som kan tettes igjen når det er oppnådd tilstrekkelig styrke (Davik, et al., 2002).

### 3.3 Membran

En metode av nyere tid er permanent tetting av tunneler ved hjelp av en impermeabel membran. Denne metoden er utviklet og etablert over de siste ti årene. Det utføres ved påføring av fiberarmert sprøytbetong direkte på det utsprengte berget, deretter sprøytes det på en membran med en tykkelse på minst 2mm for å oppnå fullstendig tetningseffekt, før det påføres et nytt lag fiberarmert sprøytbetong. På den måten vil membranen bli innleiret mellom de to sementlagene, i en sandwich-struktur. Installasjonen vil ha en både tettende og stabiliserende effekt på berget (Holter, et al., 2010).

Et viktig element i konstruksjonen er bindingen mellom sementlagene og membranen. For at dette skal være en god metode må bindingen være helt impermeabel, så de tre lagene vil fungere som ett, og få en kontinuerlig sammenhengende karakter og derav unike vanntettende egenskaper (Holter, et al., 2010).

Membran er fremdeles en forholdsvis ny tetningsmetode, men den er allerede tatt i bruk i flere tunnelprosjekter internasjonalt. Eksempler på dette er veitunnelen «A3 Hindhead tunnel» i England og «de Viret tunnelen» under Lausanne katedralen på den nye Metro M2 linjen i Sveits (Holter, et al., 2010). I Norge prøves metoden ut i seksjoner av tunneler på Fellesprosjektet ved Minnesund og ved T-forbindelsen i Haugesund i disse dager (Holter, 2011), og er også tidligere benyttet i Norge både med og uten hell (Davik, et al., 2002).

Metoden har vist seg å være et kostnads-effektivt alternativ til de tradisjonelle tetningsmetodene i flere situasjoner der de tradisjonelle metodene møter vanskeligheter eller begrensninger (Holter, et al., 2010).

For å få en større forståelse er det sett litt nærmere på «de Viret» tunnelen i Sveits. Der ble etableringen av membranen gjort på følgende måte (Holter, et al., 2010):

1. Utglatting av ujevnheter i den primært påførte sprøytebetongen
2. Manuell påspraying av vanntett membran, men håndholdt utstyr
3. Drenering og injisering av lekkasjepunkter i membranen
4. Etablering av stål-forsterkede inverse strukturer
5. Påføring av et 15cm tykt fiberarmert sprøytbetonglag direkte på membranen i veggene og i hengen.
6. Påføring av et 4cm tykt sprøytbetonglag uten fiberarmering

Det er viktig med kvalitetskontroll under påføring av membran, da den formes i det den påføres. Da «Tunnel de Viret» ble bygget var det streng oppfølging i form av visuell sjekk fra plattform for å se til at membranen var fullstendig dekkende, manuell sjekk av punkter for å kontrollere membrantykkelsen og måling av gjennomsnittlig membranforbruk ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ). Figur 3-2 viser Tunnel de Viret dekket av membranen under konstruksjonen.



Figur 3-2 Tunnel de Viret tildekket av vanntett membran i konstruksjonsfasen (Holter, et al., 2010)

Ved avviksmålinger fra overnevnte kontroller ble det satt i gang justeringer for å oppnå nødvendig tykkelse og dekning. Avvik oppstår særlig i irregulære områder. Kvalitetskontroll av disse områdene ble utført ved å ta ut prøver fra veggen i områder der membran lå i en kurve. I disse prøvene ble tykkelsen sjekket, kjerneprøver undersøkt og tester av membranens strekkfasthet tatt ut, før det siste sementlaget ble påført.

I tunnelen i Sveits ble det oppnådd følgende resultater (Holter, et al., 2010):

- Teknisk suksess
- Betydelige innsparinger i kostnader og tid
- En reduksjon av tunnelprofilen

- Betydelig reduksjon av sementforbruk og eliminering av kostnader knyttet til forskalling
- 2 måneders reduksjon i byggetid ift den originale planen
- En total pengesparing på ca 700 000CHF for den 275m lange tunnelen
- Etter 2 år er det ikke registrert noen defekter eller lekkasjer

### 3.4 Injeksjon

Injeksjon er den mest brukte metoden for å forhindre innlekkasjer av vann i norske tunneler. Det går i korte trekk ut på at det injiseres masser gjennom borhull for å tette igjen hulrom og sprekker i berget, og på den måten redusere bergets konduktivitet. Det kan også i sjeldnere tilfeller benyttes for å øke stabiliteten, da særlig i forbindelse med knusningssoner (Nilsen & Broch, 2009).

Det er vanlig å dele opp injeksjon i to grupper etter massene som injiseres i berget; kjemisk injeksjon og sementinjeksjon (Nilsen & Broch, 2009).

#### 3.4.1 Kjemisk injeksjon

Kjemisk injeksjon kom på markedet midt på 1950-tallet, med en større praktisk anvendelse enn sementinjeksjon som da hadde vært brukt siden starten av 1900-tallet. Fordelen med de kjemiske injeksjonsmidlene ligger i en større inntrengningsevne, slik at tynne sprekker, som sementbaserte midler ikke trenger inn i kan tettes (Davik, et al., 2002).

Det er blitt presentert flere ulike kjemiske midler opp gjennom årene, men de har vært preget av svakheter, noe som har ført til at de raskt er blitt fjernet. Det blir derfor oftest benyttet som en mindre del av injeksjonsmidlene i kombinasjon med sementbaserte midler. Hovedgrunnene er (Davik, et al., 2002):

- Sviktende langtidsstabilitet
- Miljøskader for brukere og omgivelser
- Pris

Det er særlig de miljøskadelige effektene som har redusert bruken av kjemisk injeksjon. I følge arbeidsmiljøloven kreves det at "giftige og andre helseskadelige stoffer ikke skal brukes dersom de kan erstattes med stoffer som er mindre skadelige for arbeidstakeren" Davik et.al (2002, s. 94) Det har gjort de over 200 ulike kjemiske injeksjonsmidlene som er testet ut mindre attraktive, da de har vist til å være mer eller mindre:

- Giftige
- Etsende
- Allergifremkallende
- Kreftfremkallende

Et lite unntak er noen midler fra dyre- og plantederivater. De kan være risikofrie, men er til gjengjeld lite permanente (Davik, et al., 2002).

I forbindelse med pris er de kjemiske injeksjonsmidlene 2-10 ganger dyrere enn de sementbaserte per volumenhet. Til tross for dette skiller ikke prisen på hele injeksjonsarbeidet seg stort fra hverandre da man ved bruk av kjemiske injeksjonsarbeid benytter mindre volum (Davik, et al., 2002). Det er derfor prismessig et konkurransedyktig produkt.

De viktigste anvendelsesområdene for kjemisk injeksjon er (Davik, et al., 2002):

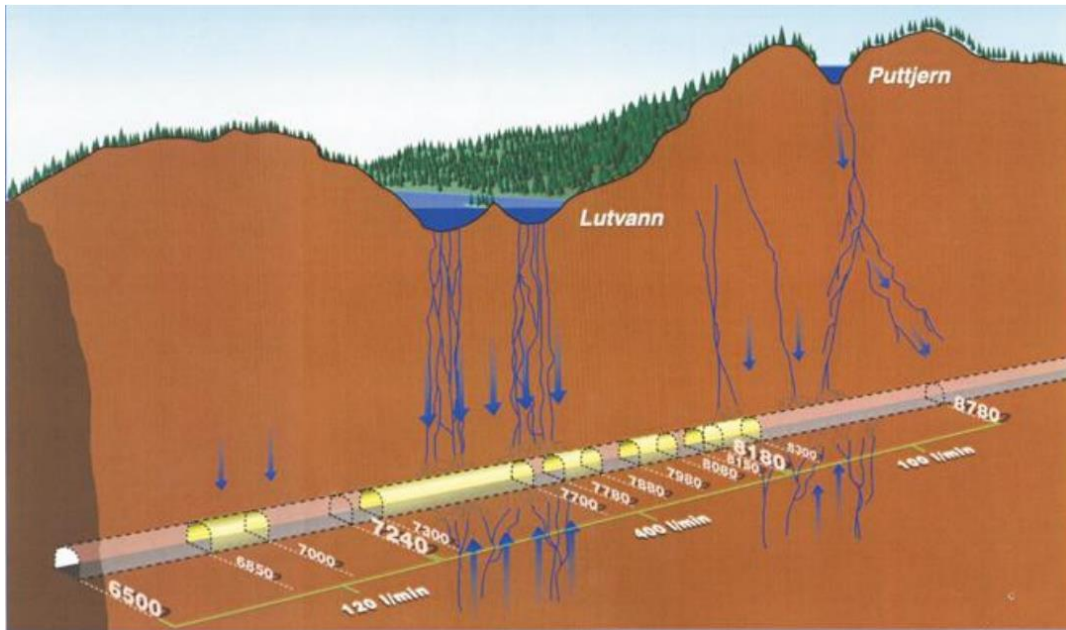
- Ved strenge tetthetskrav
- Ved behov for å begrense spredning av injeksjonsmateriale pga økonomi eller miljø
- Ved kritiske tidsaspekter for injeksjon
- Ved behov for forsterkning i bergmassen i tillegg til tetting
- Ved etterinjeksjon, der det er bevist bedre effekt med kjemiske enn sementbaserte midler

Et kjent eksempel på uheldig bruk av kjemisk injeksjon i Norge er i forbindelse med Gardermoprosjektet, i jernbanetunnelen Romeriksporten på 1990-tallet. Der ble det kjemiske middelet Rhoca-Gil beskrevet i anbudsdokumentene og klarert med byggherre før oppstart. (Mydske, et al., 1999). Byggherren var i dette prosjektet ikke kjent med at tetningsmiddelet kunne medføre betydelige giftige utslipp, da Rhoca-Gil inneholder det giftige stoffet akrylamid.

Den kjemiske injeksjonen var planlagt som et supplement til den sementbaserte. Det skulle brukes i forbindelse med områder der fjellkvaliteten var spesielt dårlig og tetningskravene ikke ble oppnådd med den sementbaserte injeksjonen.

Resultatet av tetningsarbeidet ble ikke tilfredsstillende. Det oppstod flere store innlekkasjer bak stuff. Norsk Institutt for vannforskning (NIVA) utarbeidet en lekkasjeprofil langs tunnelens lengdeakse, med utgangspunkt i 14 målinger de utførte i tunnelen. Det viste at en kritisk lengde på 462m, der det var antatt lekkasje på 18L/min/100m, hadde lekkasje på 440L/min/100m. Samtidig hadde den resterende, antatt ferdigstilte, tunnallengden på ca. 13km, en innlekkasje som i snitt lå tett opp mot 18L/min/100m. På grunnlag av dette krevde NIVA søksmål om konsesjon (Mydske, et al., 1999). Figur 3-3 illustrerer problemene det ble møtt på under drivingen i forhold til vanninnstrømning.





Figur 3-3 Grunnvannsforsørene i Romeriksporten (Panthi, 2011)

Årsaken til at injeksjonsarbeidet ikke oppnådde tilfredsstillende resultater ble i stor grad vurdert til å ligge i de stramme tidsrammer for tunneldrivingen, for å få den ferdigstilt til åpningen av den nye hovedflyplassen. Dette førte til at de kjemiske injeksjonsmidlene ble benyttet i større omfang enn planlagt og i forbindelse med større sprekker og vannlekkasjer enn forskrevet. I områder med stor vannføring resulterte dette i uttynning av injeksjonsmassene så de ikke herdet som forutsatt. I tillegg er de dårlige resultatene vurdert til å skyldes mangelfulle forundersøkelser som ikke avdekket en mer kompleks geologi enn forventet.

Da konsesjonen kom hadde miljøaspektet ved bruk av Rhoca-Gil også kommet frem, da det rundt samme tid førte til betydelige giftige utslipp i en tunnel under Hallandåsen i Syd-Sverige. Derav ble etter-injeksjon med sementbaserte injeksjonsmidler utført for å oppnå tetningskravene NIVA hadde satt.

Miljøproblemene kommer av at Rhoca-Gil kan gi giftige utslipp av akrylamid ved feil bruk. I de vannførende sonene ble stoffet skylt ut av injeksjonsmassene før herding. I tillegg ble det sølt med komponenter av Rhoca-Gil før det var blandet sammen og klart til bruk (Mydske, et al., 1999). Disse utslippene og utskyllingen ble tatt opp i drenevannet og ført videre ut Alnaelva og Oslofjorden der de kan ha hatt påvirkning på vannlevende organismer i elva og begrensede områder av fjorden (Weideborg, et al., 2001).

I ettertid har det blitt forbudt med bruk av Rhoca-Gil i Norge, da det er usikkerheter rundt giftigheten ved større mengder av stoffet (Uggerud & Slinde, 2009).

Til slutt endte prosjektet opp med en 10 måneders forsinkelse. Byggeprisen som var beregnet til 540 mill NOK endte på 1,3 mrd NOK, med etter-injeksjon og forlenget byggetid (Mydske, et al., 1999).

### 3.4.2 Sementinjeksjon

Sementinjeksjon er den mest benyttede metoden for tetting av norske tunneler (Hognestad, et al., 2010). Det kan utføres både framfor stuff, såkalt for-injeksjon, og bak stuff, etter-injeksjon. I denne oppgaven er det fokusert på for-injeksjon, beskrevet nærmere i kapittel 4. Etter-injeksjon er kun presentert i korte trekk.

#### *Etter-injeksjon*

Etter-injeksjon benyttes for å stoppe lokale innlekkasjer bak stuff. Oftest er det tilknyttet knusningssoner, områder med dårlig bergmassekvalitet eller områder som er negativt påvirket av sprengningsarbeidet. Da arbeidet utføres lokalt benyttes det normalt kortere borhull enn ved for-injeksjon og de bores i et tettere mønster (Tolppanen & Syrjänen, 2003).

Erfaringsmessig har det vist seg å gå med store injeksjonsmasser, og ved flere tilfeller oppnås det kun en forflytning av lekkasjeproblemene ved etter-injeksjon (Klüver & Kveen, 2004). Prismessig har det vist seg å være 3-10 ganger dyrere enn for-injeksjon. På bakgrunn av dette foretrekkes for-injeksjon, som er en mer effektiv metode. Benyttelse av etter-injeksjon bør begrenses til å kun brukes som et supplement dersom det oppstår lekkasjer bak stuff, til tross for utført for-injeksjon (Tolppanen & Syrjänen, 2003).

## 4. Sementinjeksjon, for-injeksjon

I denne oppgaven er det sett nærmere på for-injeksjon da det, som tidligere nevnt, er den mest brukte metoden for tetningsarbeid i Norge. I Klüvers intern rapport nr. 2151 sies det at “..forinjeksjon med etterfølgende tetthetskontroll er den eneste riktige måten å utføre tetteinjeksjon på.” Klüver (2000, s. 4).

Det vil i denne delen bli sett på; tetthetskrav og bestemmelse av stoppkriterier for injeksjonen, injeksjonsmassene, utforming av injeksjonsskjermen og innpumpingen av massene, før det til slutt blir sett på utstyret som benyttes. Til slutt vil det bli sett på hvordan kartlegging av fjellkvaliteten under driving er i forhold til injeksjon.

### 4.1 Tetthetskrav og stoppkriterier

Ved tunneldriving stilles det krav til tetthet. Avhengig av beliggenheten til anlegget, overliggende områder, hydrogeologiske og geologiske forhold bestemmes det hvor strenge kravene skal være (Davik, et al., 2002).

Det er utformet et forslag til inndeling av kravene for tunneler med profil T8,5, i tabell 4-1.

Tabell 4-1 Tetthetskrav (Klüver & Kveen, 2004)

Strenghet	Krav
Ekstremt strengt	Innlekkasje < 1-3 l/min/100m
Strengt	Innlekkasje < 3-7 l/min/100m
Middels strengt	Innlekkasje < 7-15 l/min/100m
Moderate krav	Innlekkasje > 15 l/min/100m

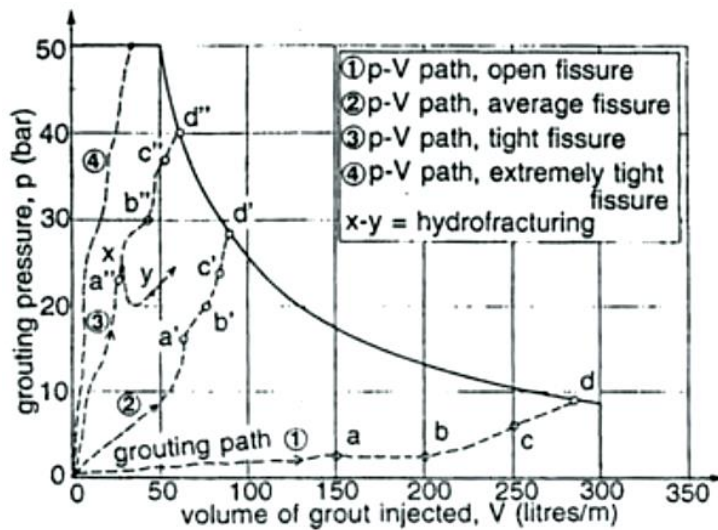
Til disse tetthetskravene bestemmes det også stoppkriterier målt i trykk og forbruk av injeksjonsmasse, for å kunne bestemme når injiseringen kan avsluttes under drivingen.

Det er sett nærmere på GIN-metoden, som kan benyttes for å bestemme stoppkriterier, og valg av trykk i injeksjonsarbeidet.

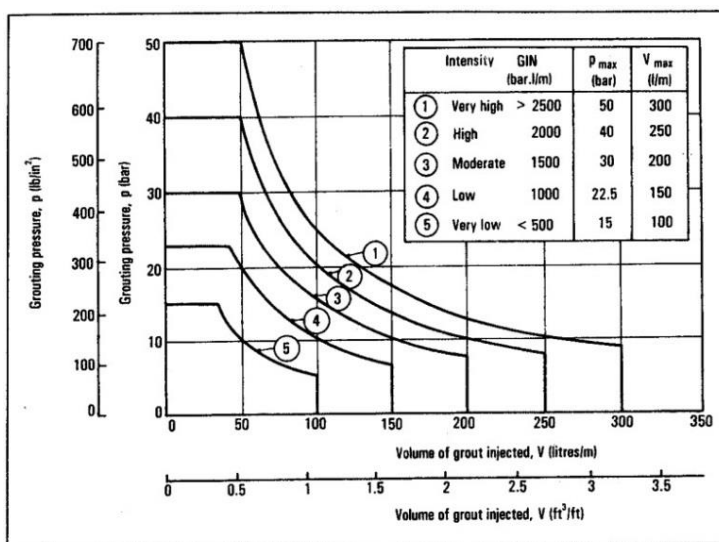
#### 4.1.1 GIN-metoden

GIN-metoden foreslår et avsluttende trykk og en maksimal masseinnngang ut fra injeksjonsintensiteten, forholdet mellom inngang per bormeter og trykk. Metoden er basert på strømningsveier, vist i figur 4-1. Den er utviklet av Lombardi og ble internasjonalt innført i 1993 (Davik, et al., 2002). I metoden tas det hensyn til geologiske og hydrogeologiske forhold, tetthetskrav og injeksjonsmetode. På den måten blir det en mer korrekt metode enn slik det normalt settes ved et spesifisert avsluttende trykk og en maksimal

sementinnngang per pakkerplassering. Figur 4-2 viser veiledning til valg av kriterier (Davik, et al., 2002).



Figur 4-1 GIN-metoden, strømningsveier (Davik, et al., 2002)



Figur 4-2 GIN-metoden, bestemmelse av stoppkriterier (Lombardi, 1996)

#### 4.1.2 Trykk

Trykket er den drivende kraften bak injeksjon, og det er også i forbindelse med trykk de vanligste feilene ved for-injeksjon forekommer (Klüver, 2000a).

Den vanligste feilen er bruk av for lave trykk. Det har ved mange anlegg vært motvilje til bruk av høye trykk. Det skyldes en formening om at injeksjonstrykket er tilstrekkelig dersom det overstiger grunnvannets poretrykk, samtidig som det menes at høye trykk vil redusere stabiliteten i berget på grunn av hydraulisk splitting. Ved slike tilfeller benyttes et injeksjonstrykk på 10 bar, ved siden av det stedlige poretrykket. Erfaringsmessig har disse formeningene vist seg å være feilaktige, men det er viktig med kontinuerlig inspeksjon for å oppdage potensielle nedsettelse i stabiliteten under injeksjonen (Klüver, 2000a).

I Norge har det i senere tid blitt tatt i bruk injeksjonsmetoden “Aktiv injeksjon”. Det går ut på en kontinuerlig trykkoppbygning, opp mot det optimale trykket, gjennom injiseringen. Da defineres det optimale trykket som det høyeste trykket områdets bergkvalitet tillater (Klüver & Kveen, 2004). Det må defineres ut fra tetthetskrav, omgivelser og øvrige variabler for hvert enkelt tilfelle (Setsaa & Davik, 2001). Normalt vil det optimale trykket være opp mot 100 bar (Klüver & Kveen, 2004).

Hensikten med et høyt injeksjonstrykk er å overvinne både poretrykket og motstanden mot masseinntrengning, samt å oppnå hydraulisk splitting. I områder med høye krav til tetthet er det helt nødvendig med hydraulisk splitting for å oppnå kravene.

#### 4.1.2.1 Hydraulisk splitting

Hydraulisk splitting i borhullene oppstår som et resultat av trykkøkning inne i hullet. Størrelsen på trykk som skal til for å gi en sprekk vil avhenge av spenningstilstanden i området og bergets strekkfasthet. I forbindelse med et vertikalt borhull er trykket som skal til for å oppnå splitting gitt ved (Myrvang, 2001):

$$p_c = 3\sigma_{H2} - \sigma_{H1} + \sigma_t$$

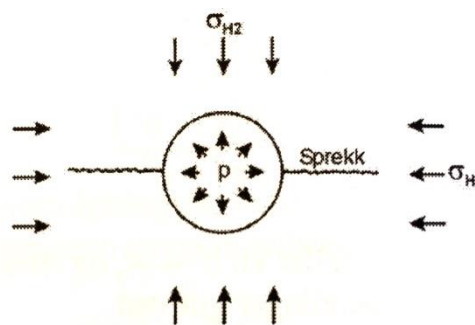
Der:  $p_c$  = nødvendig pumpetrykk

$\sigma_{H2}$  = minste horisontalspenning

$\sigma_{H1}$  = Største horisontalspenning

$\sigma_t$  = strekkstyrke

Bruddplanet i disse vertikale borhullene vil ved slike tilfeller gå vertikalt, parallelt med  $\sigma_{H1}$ , vist i figur 4-3.



Figur 4-3 Hydraulisk splitting (Myrvang, 2001)

Bruk av hydraulisk splitting i injeksjonsarbeidet har blitt motargumentert med at det reduserer bergmassens stabilitet. Erfaringsmessig har dette vist seg ikke å være tilfellet i vanlige tunnelprofiler som T9 og liknende, da injeksjonstrykket avtar kraftig med avstand fra injeksjonshullet (Klüver, 2000b).

Hydraulisk splitting er ved noen tilfeller vurdert til å være helt nødvendig for å oppnå tetthetskravene. Det kommer av at borhullene det injiseres i ikke krysser alle kanalene i berget. Dermed vil de ikke kunne kommunisere og tette alle kanalene uten en åpning som

binder kanalene sammen med borhullet. Det kan være åpning av eksisterende sprekker eller dannelse av nye (Klüver, 2000a).

#### **4.1.2.2 V/c-forhold**

V/c-forholdet, vann/semest-forholdet, i en injeksjonsmasse er forholdet mellom vekten av vannet og vekten av tørr semest (Davik, et al., 2002). Det har stor innvirkning på injeksjonsmassenes flyte- og inntrengningsegenskaper, og blir derfor avgjørende for injeksjonsmassens evne til å bygge opp trykk (Klüver & Kveen, 2004).

Et lavt v/c-forhold vil si en tørr masse med høy viskositet. Det vil resultere i en raskere trykkoppbygning enn høyere v/c-forhold (Davik, et al., 2002). I tillegg vil et lavt v/c-forhold gi en raskere avbinding. Dette er viktige faktorer da injeksjonstid og herdetid er de dyreste elementene ved injeksjonsarbeidet (Klüver, 2000a).

Et høyt v/c-forhold viser til vannholdig masse med lav viskositet. I slike forhold vil injeksjonsmassene i de fleste tilfeller ha en bedre inntrengningsevne (Davik, et al., 2002). Ved siden av en bedre inntrengningsevne har et høyt v/c-forhold også noen negative effekter. Det vil ta lenger tid både før herdeprosessen starter og med selve herdeprosessen, kvaliteten på den herdete massen vil bli nedsatt. Det er også erfart en tendens til fjernttransport av massene, noe som vil redusere trykkoppbygningen og tetteeffekten nær tunnelen (Klüver, 2000b).

Med disse egenskapene kan justeringer i v/c-forholdet benyttes til å styre trykkoppbygningen.

## **4.2 Injeksjonsmasser**

### **4.2.1. Valg av injeksjonsmasse**

Valg av injeksjonsmasser baseres på tetthetskrav til anlegget samt de geologiske- og hydrogeologiske forholdene (Davik, et al., 2002). Det er særlig bergartstype og tilstedeværelse av fyllinger, og da spesielt impermeabel leire, i sprekken som avgjør hva slags semesttype som velges for det aktuelle prosjektet. Samtidig er det ønskelig å begrense området injeksjonsmassene transporteres til, så det er berget rundt profilet som tettes, og ikke langt unna (Klüver & Kveen, 2004).

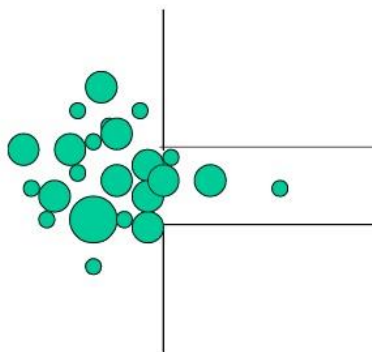
### **4.2.2. Injeksjonsmassens materialegenskaper**

Injeksjonsmassene har en rekke ulike materialegenskaper. De viktigste for injeksjonsmassene er inntrengningsevnen, flyteegenskaper, og herding. Disse avhenger av (Davik, et al., 2002):

- Partikkelstørrelse
- Reologiske egenskaper
- Herdetid
- Styrke og permeabilitet av herdet masse

#### 4.2.2.1. Partikkelstørrelse

Kornstørrelse vil ha stor betydning for sementens inntrengningsevne, da de groveste kornstørrelsene ikke kan trenge inn i de tynneste sprekke (Hognestad, et al., 2010). En tommelfingerregel sier at den maksimale kornstørrelsen i injeksjonsmassene ikke skal overstige 1/3 av den minste sprekkes sprekkeåpning for å oppnå en god inntrengning, vist i figur 4-4 (Tolppanen & Syrjänen, 2003).



Figur 4-4 Maksimal kornstørrelse bør ikke overstige 1/3 av sprekkeåpningen (Tolppanen & Syrjänen, 2003)

#### Sementtyper

Ut fra kornstørrelse kan sementtypene deles inn i tre hovedgrupper; industrisement, mikrosegment og ultrafin sement, vist i tabell 4-2 (Hognestad, et al., 2010). Disse kan igjen deles inn i flere undergrupper ut fra kornstørrelser og egenskaper, og leveres av ulike leverandører (Klüver & Kveen, 2004).

Tabell 4-2 Kornstørrelser for ulike sementtyper (Hognestad, et al., 2010)

Sementtype	Kornstørrelse
Industrisement	$d_{95} > 20\mu\text{m}$
Mikrosegment	$d_{95} < 20\mu\text{m}$
Ultrafin sement	$d_{95} < 10\mu\text{m}$

De tre sementtypene er beskrevet nærmere basert på (Hognestad, et al., 2010).

#### *Standard injeksjonssement/industrisement*

Standard injeksjonssement, også kjent som industrisement eller Rapidsement, er den mest benyttede injeksjonsmassen i Norge. Den kjennetegnes ved en kornstørrelse  $d_{95} > 20\mu\text{m}$ .

Ved start i injeksjonsarbeidet benyttes det gjerne et v/c-forhold på 0,8 eller 1. Ved v/c-forhold over 0,6-0,7 forekommer det normalt malt mye bleeding i industrisement. Derfor vil det for å unngå dette være viktig med tilsetning av stabiliserende. Bleeding og tilsetningsstoffer er forklart nærmere senere i oppgaven.

Industrisement benyttes også ved andre formål enn til kun tetningsmiddel i tunneler. Det er derfor ikke et spesialtilpasset materiale.



### Mikrosement

Sementer med kornstørrelse  $d_{95} < 20 \mu\text{m}$  er definert som mikrosemeter. I Norge har de mest anvendte mikrosementene en kornstørrelse  $d_{95} < 16 \mu\text{m}$ , men innenfor kornstørrelsen finnes det mange ulike type mikrosemeter med stor variasjon i egenskaper. Eksempelvis kan det være store variasjoner i herdetiden, og stabiliteten kan variere fra nærmest eliminert fare for bleeding ved  $v/c$ -forhold på 1 til over 10 % fritt vann ved de samme  $v/c$ -forholdene.

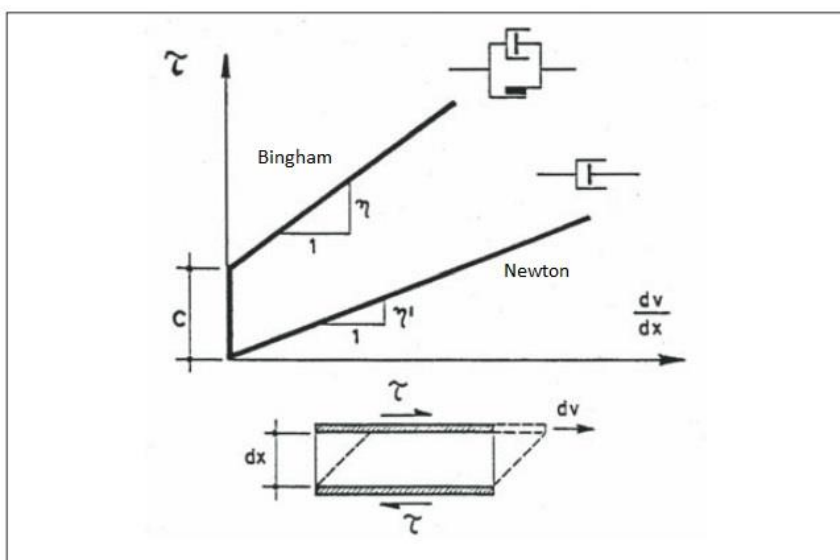
Noe som skiller mikrosementene fra industrisementen er at de små kornstørrelsene gir en større spesifikk overflate. Et resultat av dette er en større fare for fnokking, sammenklumping av partikler (Bragel, et al., 1995), som kan redusere inntrengningsevnen til massen. For å forhindre dette stilles det strengere krav til mikrosementens blandeoppsatt (Hognestad, et al., 2010).

### Ultrafin sement

De ultrafine sementene kjennetegnes ved en kornstørrelse  $d_{95} < 10 \mu\text{m}$ , og vil dermed ha en høyere inntrengningsevne enn de to overnevnte. Det benyttes derfor i områder med svært høye tetthetskrav. Et problem med de ultrafine sementene er at disse vil ha en enda større spesifikk overflate enn mikrosementene og dermed ha en enda større fare for fnokking.

#### 4.2.2.2 Reologiske egenskaper

De reologiske egenskapene beskriver massenes flyteeenskaper. I en stabil sementsuspensjon er det ingen separasjon mellom vannet og sementen. En slik suspensjon vil følge Birghams lov. Dersom suspensjonen er ustabil, vann og sement har skilt seg, vil massens oppførsel være uforutsigbar. Den vil da veksle mellom å følge Newtons og Birghams væskelov, eller et sted midt mellom (Lombardi, 1985). Newton's væskelov beskriver vannets bevegelse. Både Newtons og Birghams væskelov er vist i figur 4-5.



Figur 4-5 Rheologiske lover for Bingham og Newton væsker (Lombardi, 1985)



Brighams væskelov (Lombardi, 1985):

$$\tau = c + \eta \, dv/dx$$

Newtons væskelov (Lombardi, 1985):

$$\tau = \eta \, dv/dx$$

Der:  $\tau$  = skjærstyrke [Pa]  
 $dv/dx$  = skjærhastighet [sek<sup>-1</sup>]  
 $\eta$  = viskositet [Pa sek]  
 $c$  = Kohesjon [Pa]

Ut fra Bingham's lov kommer det fram at sementsuspensjonens flyteevne avhenger av viskositeten til massen og kohesjonen. Det er kohesjonen som skiller denne massen fra et newtonsk fluid (Lombardi, 1985).

Dette er et teoretisk bilde som forutsetter laminær strømnig. I virkeligheten vil sementsuspensjonens strømnig variere. Ved høye hastigheter vil den også gå fra å være laminær til turbulent (Davik, et al., 2002).

#### 4.2.2.3 Herdetid, styrke og permeabilitet av herdete masser

##### Herdetid

Hvor lang tid sementsuspensjonen bruker på å herde har stor innvirkning på kostnadene for injeksjonsarbeidet. I tillegg til overnevnte v/c-forhold, tilsetningsstoffer og sementtyper vil temperaturen på vannet og sementen, både før og under blandingen, samt temperaturen i berget ha innvirkning på herdetiden (Klüver, 2000b). Tabell 4-3 viser den relative sammenhengen mellom sementens relative reaksjonshastighet og temperatur.

Tabell 4-3 Forholdet mellom relativ reaksjonshastighet og temperatur (Klüver, 2000a)

Temperatur [°C]	5	10	20	35
Relativ reaksjonshastighet	0,3	0,5	1,0	2,0

Kornstørrelsen virker inn på herdetiden der en økende kornstørrelse gir økning i herdetiden. Eksempelvis har en standard industrisement under normale forhold en herdetid på 8-10 timer, mens en rask mikrosegment størkner på rundt 2 timer ved like forhold (Hognestad, et al., 2010).

V/c-forholdet virker inn på herdetiden ved at sementsuspensjonens herdetid øker ved et økende v/c-forhold.

## Styrke og permeabilitet av herdede masser

For at injeksjonsarbeid skal være vellykket må de herdede massene være tette og ha en tilfredstillende styrke. Styrken på den herdede injeksjonsmassen må i korte trekk være sterk nok til å motstå vanntrykket i bergrommet (Davik, et al., 2002).

### *4.2.2.4 Optimalisering av injeksjonsmassene*

#### *Tilsetningsstoffer*

Det stilles funksjonskrav til injeksjonsmassene. Disse går ut på at massene skal være stabile, de skal flyte lett og størkne så raskt som mulig når de har trengt inn i berget. For å optimalisere disse egenskapene blandes sementen med ulike tilsetningsstoffer. Disse er presentert i det følgende, med bakgrunn i (Hognestad, et al., 2010)

#### *Stabiliserende stoffer*

Det at injeksjonsmassene skal være stabile vil si at de skal kunne holde på vannet og ikke separeres så sementen synker til bunns mens vannet flyter på toppen. Separasjon kalles også for "bleeding". Problemet med separasjon i injiserte områder er at det kan skapes vannførende kanaler som igjen kan gi lekkasjer. Det blandes derfor inn stabiliserende tilsetningsstoffer i sementen for å forhindre dette.

Det mest brukte stabiliserende tilsetningsstoffet i Norge er silikaslurry. Det er en suspensjon av amorft silisiumoksid med svært små partikkelstørrelser løst i vann. De små partikkelstørrelsene gjør at inntrengningsevnen til injeksjonsmassen ikke reduseres. Ved tilsetning av silikaslurry vil man kunne øke v/c-forholdet i massene som pumpes inn uten å ødelegge stabiliteten. Doseringen ligger normalt rundt 5-10% av sementvekten, forutsatt at det er 50% tørrstoff i silikaslurrien.

Internasjonalt benyttes også bentonitt som tilsetningsstoff for å stabilisere sementen. Det er en leire som gjør sementen både stabil og glatt. Grunnen til at det i Norge foretrekkes silikaslurry er i stor grad partikkelformen til bentonitt. Partiklene er flakformet, og vil dersom de havner på tvers ha større diameter enn sementen, og redusere inntrengningsevnen.

En negativ effekt av begge de stabiliserende tilsetningsstoffene er en forlenget herdetid. Det er også viktig å se til at viskositeten ikke øker for mye ved tilsetning av stoffene, da en økende viskositet tilsier seigere masse og dårligere inntrengningsevner.

#### *Superplastiserende stoffer*

Superplastiserende stoffer, også kalt dispergerende stoffer, tilsettes sementen for at sementpartikler skal dispergere og ikke henge sammen i klumper. Stoffene virker ved at de løser opp de elektriske bindingene, slik at injeksjonsmassen blir finere og inntrengningsevnen større. Normalt tilsettes det 1,5-2% av sementvekten.

Rekkefølgen på tilsetning av de ulike komponentene og tilberedelse av injeksjonsmassen gjøres på følgende måte:

1. Vann og superplastiserende stoffer puttes i blanderen
2. Tilsetting av sement og eventuelt silikaslurry
3. Blanding av massen, anbefalt 2 minutter

Det er viktig at massen ikke blandes for lenge, da utviklet friksjonsvarme i blanderen kan føre til at sementen herder på stedet. Økende temperaturer fra andre kilder eller i området kan også framprovosere tidligere herding. Som tommelfingerregel sies det at størkningstiden halveres for hver 10°C temperaturøkning.

#### *Akselerator/styrt herding*

Tilsetting av akselerator, også kalt styrt herding, benyttes ved store innganger uten oppnåelse av mottrykk, eller som et hjelpemiddel ved utganger i- og bak stuff. Det er en forholdsvis ny metode, og går ut på å kontrollere herdetiden til injeksjonsmassene. Dersom det brukes på riktig måte kan de gi store innsparinger av både injeksjonsmasser og pumpetid.

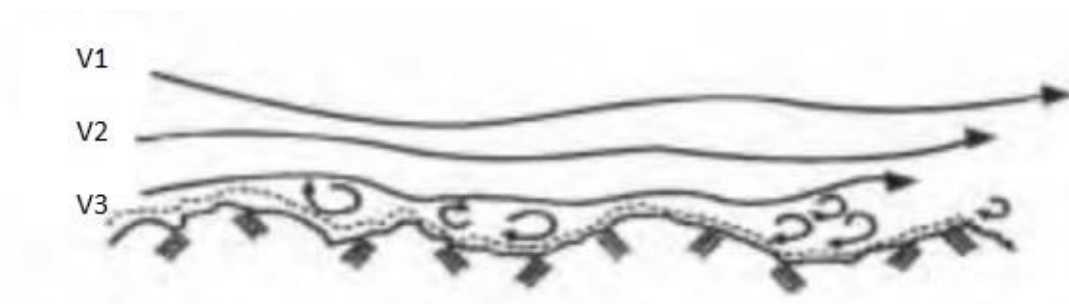
Normalt benyttes det alkalifrie akseleratorer i Norge. Det er en tilsvarende type til det som benyttes i forbindelse med sprøytebetong. I utlandet er den mest benyttede akseleratoren kaliumklorid, men det er flere andre stoffer som også benyttes (Tolppanen & Syrjänen, 2003).

Tilsettingen av akselerator foregår normalt ved at den pumpes via en egen linje, gjennom et munnstykke plassert framme på staven. Det forhindrer problemer med herding i slanger og utstyr. Ved tilsetting herder injeksjonsmassene raskere og hjelper dermed til med å raskere oppnå ønsket mottrykk (Hognestad, et al., 2010).

#### **4.2.3. Injeksjonsmassenes strømming i berget**

I tillegg til de reologiske egenskapene til injeksjonsmassene avhenger strømmingen i berg i stor grad av sprekkefyllinger og sideberget. Ruheten på sideflatene vil kunne påvirke strømmingen, da en glatt sprekke vil gi mindre penetrasjonsmotstand enn en ru (Davik, et al., 2002).

I åpne sprekker vil strømningshastigheten påvirkes av både veggruhet, avstand til vegger og kontaktpunkter (Barton, 2002). Figur 4-6 viser hvordan en ru vegg påvirker strømmingen, med høyest hastighet (V1) lengst unna veggen.



Figur 4-6 Strømming i forhold til vegg (Barton, 2002)

#### 4.2.4 Forbruk av injeksjonsmasser

Masseinngangen er ved siden av injeksjonsmassenes materialfysiske egenskaper, diskutert i avsnitt ovenfor, direkte avhengig av injeksjonstrykk og pumpetid, som igjen i stor grad avhenger av bergmassens egenskaper (Davik, et al., 2002). I dette avsnittet blir det derfor sett på masseforbruket i forhold til bergmassens egenskaper. Som tidligere nevnt er det tilstedeværelsen av sprekker og sprekkefyllinger som i stor grad avgjør størrelsen på nødvendige injeksjonsmasser for å oppnå det forhåndsbestemte trykket og et godt tetningsarbeid.

I Klüver (2000) er det presentert en inndeling av bergmassene med bakgrunn i injeksjonsarbeid. Til hver av disse gruppene er forventet forbruk av injeksjonsmasser vurdert, presentert i tabell 4-4.

Tabell 4-4 Sammenheng mellom bergklasser og forventet injeksjonsmengde (Klüver, 2000a)

Bergklasse	Sprekkeforhold	Forventet injeksjonsmengde
A	Åpne sprekker, uten vesentlig sprekkebelegg	Høyt masseforbruk
B	Kanaltendens, sprekker med sprekkefylling	Middels masseforbruk
C	Små kanaler og sprekker, høy grad av sprekkefylling	Lavt masseforbruk
D	Variasjon, tektonisk påvirkning eller karstfenomener	Meget stor til meget små

Når det sees på masseforbruket bør man være klar over at store mengder går med til å fylle injeksjonshullene før massene trenger inn i sprekker og åpninger i berget. Eksempelvis vil det ved en diameter på 51mm gå med ca 3,7kg injeksjonsmasser per løpemeter av hullet. Ved å se på en hel skjerm bestående av 30 injeksjonshull med en lengde på 25 meter tilsvarer dette ca 1,6 tonn sement (Klüver, 2000a).

Forbruket av injeksjonsmasser vil naturlig variere stort, men et normalforbruk vil ligge mellom 200-1000kg for hver meter i tunnelen i en tofelts veitunnel i norske forhold med T9 profil, dersom v/c-forholdet er 0,75 og sementens egenvekt er 1,75.

Influenssonen til tunnelen vil også ha innvirkning på masseforbruket, der en større influenssone vil medføre behov for større injeksjonsmengder. I tillegg forekommer det fjernttransport av masser utenfor influenssonen. Det forekommer særlig der injeksjonshullene bores med stor vinkling på tunnelaksen og berget har sprekkesett med stor utholdenhet (Klüver, 2000b).

Når hele bergmassen sees på vil injiserbare sprekker og åpninger i de fleste tilfeller kun utgjøre en andel på 0,2 til 1% av den totale bergmassen. Det fører til at forbruket av injeksjonsmasser påvirkes sterkt ved kryssing av spesielle soner med betraktelig økning i oppsprekking som for eksempel knusningssoner (Klüver, 2000a).

### 4.3 Utføring av injeksjon

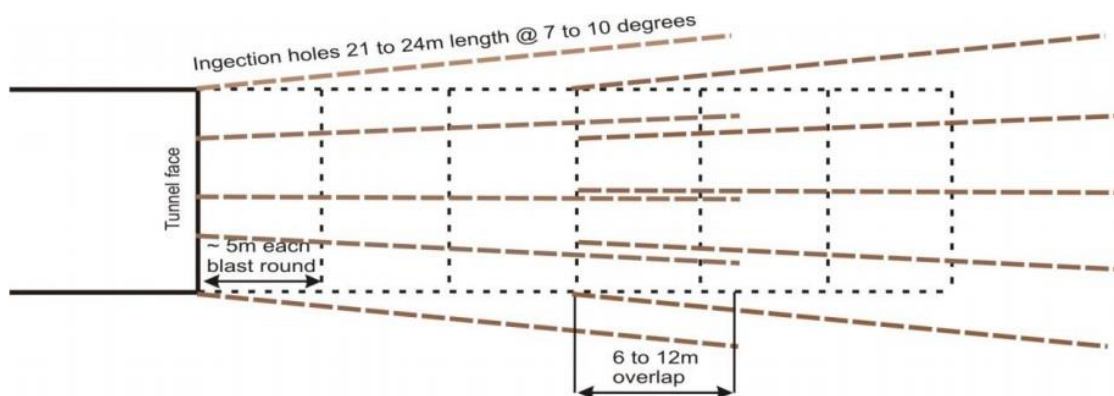
Det finnes en rekke ulike systemer for utførelsen av injeksjonsarbeidet. Det kan skilles mellom systematisk og sporadisk injeksjon, ulike design på injeksjonsskjermen og varierende teorier på system for innpumping av massene.

#### 4.3.1 Systematisk- og sporadisk injeksjon

Man kan skille mellom to typer for-injeksjon (Klüver & Kveen, 2004):

- Systematisk
- Sporadisk

Ved systematisk injeksjon injiseres det injeksjonsskjermer med jevne mellomrom så det oppstår en overlapp, vist i figur 4-7. På den måten oppnås det en sammenhengende skjerm langs hele tunnallengden (Åndal, et al., 2001). Overlappen vil variere avhengig av tunneldimensjoner, geologiske forhold og tetningskrav. I områder der kravene til tetthet er strenge er systematisk forinjeksjon sterkt anbefalt (Davik, et al., 2002).

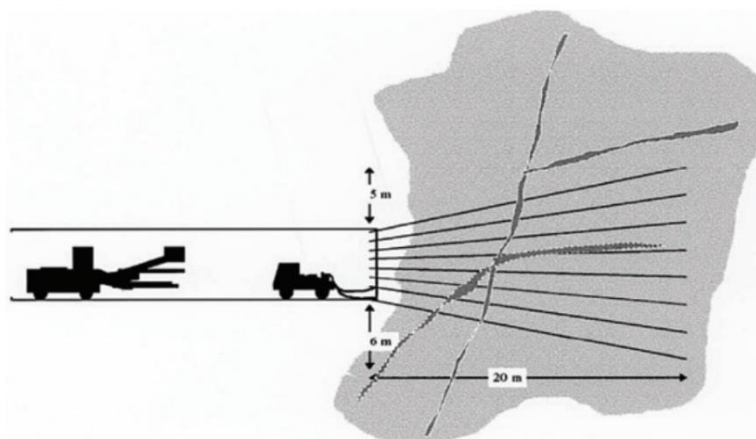


Figur 4-7 Systematisk for-injeksjon (Panthi, 2014a)

Sporadisk injeksjon, vil si injeksjon ved behov. Det blir fortløpende vurdert ut fra vanntapsmålinger på stuff. En stor risiko med sporadisk injeksjon er forflytting av vannlekkasjer. Når det injiseres presses vannet ut av den injiserte sonen, noe som kan føre til at de blir presset inn i områder som ikke er injisert bak stuff, og skape innlekkasjer der (Hognestad, et al., 2010).

### 4.3.2 Injeksjonsskjerm

Utformingen av injeksjonsskjermer bestemmes i stor grad ut fra sprekkesystemene i det aktuelle området. En ideell skjerm krysser de sprekke og sleppene som gir optimal kommunikasjon ut i områdene som skal tettes (Klüver & Kveen, 2004). Figur 4-8 viser forinjisering i en injeksjonsskjerm.



Figur 4-8 Injisering av en skjerm (Hognestad, et al., 2010)

Utformingen av injeksjonsskjermen går i hovedtrekk ut på valg av antall injeksjonshull, hullengde og stikking samt avstand mellom hullene.

Antall hull avhenger av tunnelprofilen, men vil normalt ligge rundt 10-30 (Tolppanen & Syrjänen, 2003). Kommunikasjonen mellom hullene og ut i berget vil være avgjørende for hvor mange hull det er behov for. Ved god kommunikasjon kan eksempelvis antall hull fordelaktig reduseres (Klüver, 2000a).

Hullengden vil normalt være mellom 18 og 23 meter (Hognestad, et al., 2010). De korteste hullengdene benyttes i områder med dårlig bergkvalitet, liten overdekning eller ved tungt injiserbart berg (Tolppanen & Syrjänen, 2003) (Klüver & Kveen, 2004). Ved de motsatte forholdene, god overdekning, og lett injiserbart berg kan det benyttes større hullengde (Klüver & Kveen, 2004).

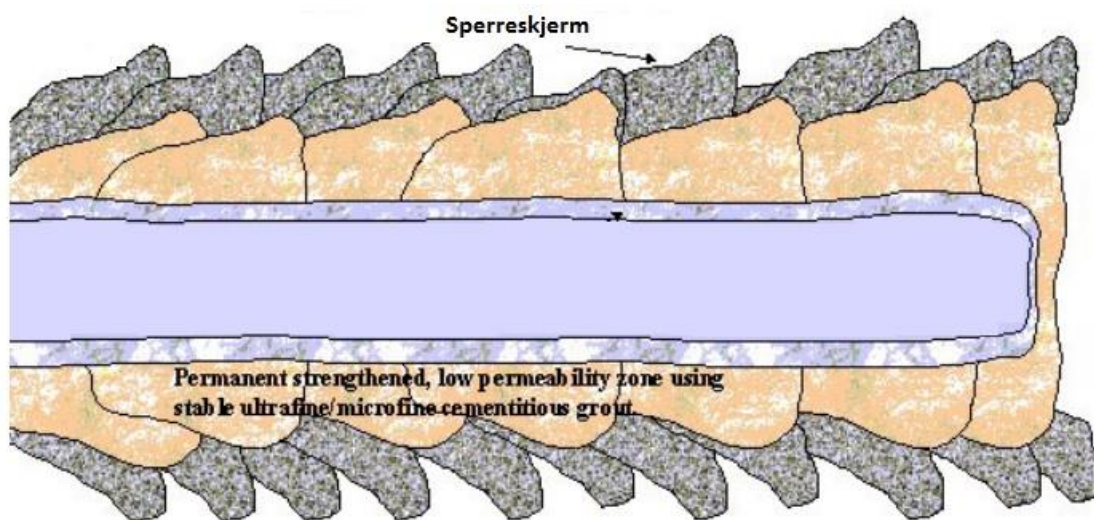
Hullenes vinkling på tunnelaksen vil bestemme tykkelsen på skjermen. Vanligvis er de vinklet mellom  $5^\circ$  og  $10^\circ$  på tunnelaksen (Davik, et al., 2002). For å unngå punktering av skjermen, bør denne tykkelsen overgå boltelengden (Tolppanen & Syrjänen, 2003). I områder med høye spenninger rundt tunnelåpningen er det også ønskelig med en skjerm som strekker seg forbi området der bergmassens styrke overskrides av spenningene. Hvor langt ut det er, avhenger av størrelsen på spenningene og bergmassens styrke.

For at skjermen skal bli som planlagt er det viktig å kontrollere at ikke retningen av hullet påvirkes av bergmassene og avbøyes under boringen. En slik avbøyning vil ødelegge skjermens geometri (Tolppanen & Syrjänen, 2003).

Avstandene mellom hullene i skjermen vil som alle de andre bestemmelsene også avhenge av de lokale forholdene og tetthetskravene til anlegget, men har normalt en avstand på 1-3 meter fra hverandre rundt profilet (Tolppanen & Syrjänen, 2003). I tillegg er det innført krav om injeksjonshull i stuff (Statens vegvesen Veg- og transport avdelingen, 2010). Det er vurdert som en billig forsikring for å unngå lekkasjer i front, særlig ved store profil (Åndal, et al., 2001).

#### 4.2.1 Sperreskjerm

Ved liten overdekning, eller dårlig bergkvalitet kan det injiseres en sperreskjerm før den normale for-injeksjonen utføres, vist i figur 4-9. Hensikten med en sperreskjerm er å redusere fjerntransportering av injeksjonsmasser, og gjøre det mulig å øke injeksjonstrykket (Tolppanen & Syrjänen, 2003).



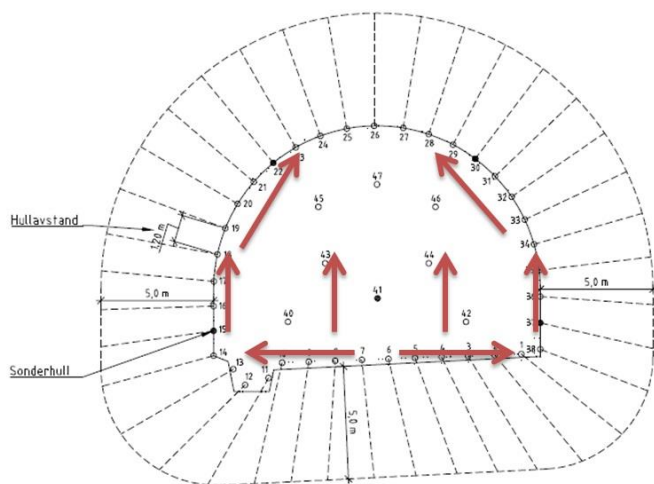
Figur 4-9 Sperreskjerm (Tolppanen & Syrjänen, 2003)

#### 4.3.2.1 System for innpumping av massene

Det finnes en rekke ulike ideer om hvordan innpumpingen av injeksjonsmassene skal utføres, da særlig i hvilken rekkefølge man skal injisere hullene. I Skandinavia opereres det med følgende ulike metoder (Tolppanen & Syrjänen, 2003):

- I Finland starter de nede i hjørnene og fortsetter rundt profilet
- I Sverige gjøres det vanntapsmålinger i alle injeksjonshullene. Hullet med høyest innlekkasje injiseres først, og deretter hullet med nest størst innlekkasje osv.
- I Norge er det vanligste å starte med sålen, og deretter jobbe seg oppover mot det midterste hullet i hengen, og på den måten presse vannet oppover, vist i figur 4-10 (Klüver, 2000a). Hullene kan injiseres ett etter ett, eller parvis, avhengig av tilgjengelige linjer, men dersom bergforholdene er dårlige bør kun et hull injiseres av gangen, til tross for tap i tid (Tolppanen & Syrjänen, 2003).





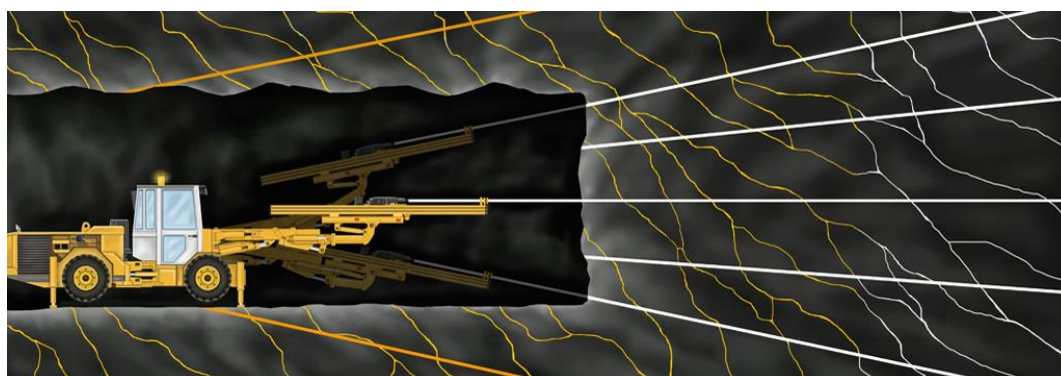
Figur 4-10 Rekkefølgen på injisering av hullene i en norsk tunnel (Hansen, 2013)

## 4.4 Utstyr

Det er sett nærmere på hovedtrekkene ved det viktigste utstyret og komponentene som benyttes i injeksjonsarbeid, fra boring av injeksjonshullene, blanding av injeksjonsmasser, opprøring av massene før pumping gjennom slanger inn i injeksjonshullene som er avgrenset med pakkere, og den automatiske loggingen gjennom hele injeksjonen. I tillegg til utstyret og komponentene som er presentert her finns det utallige produsenter i verden med noe ulike varianter (Tolppanen & Syrjänen, 2003).

### 4.4.1 Borerigg

Injeksjonshullene i de fleste tunneler og bergrom bores med tunnelrigger, vist i figur 4-11. Disse kan variere mye i størrelse og ha varierende antall bommer. Det vanligste er to- og treboms rigger, og de er godt egnet til normale injeksjonsskjermer med en hullengde på 18-24m (Hognestad, et al., 2010).



Figur 4-11 Tunnelrigg (Solerød, 2011)

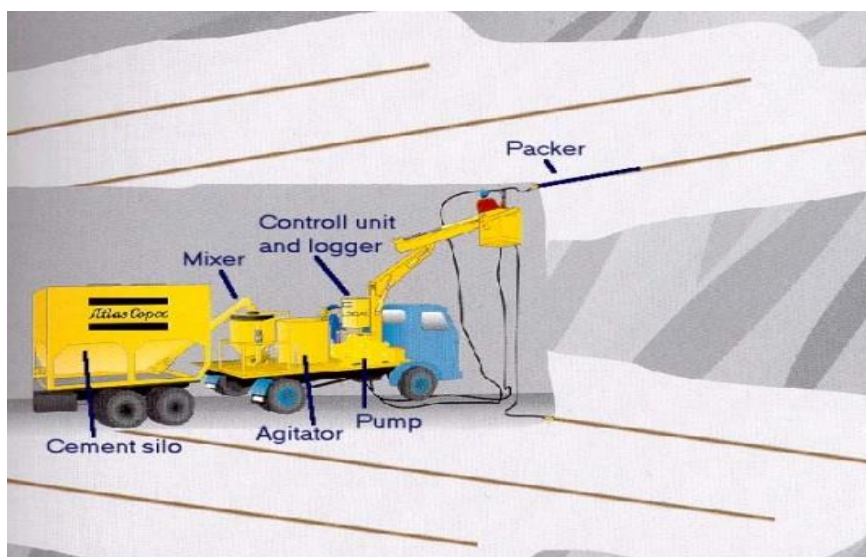
Et forholdsvis nytt utstyr på borriggeren er MWD (Measurement while drilling), på norsk kalt borparametertolkning. Det går ut på at borparametere som; matetrykk, rotasjonstrykk, inndrift, borproblemer, tap av spylevann og vanninnbrudd skal logges automatisk under



boringen, for deretter å bli kalibrert og tolket ved hjelp av en programvare. Tolkningene vil gi informasjon om vannforhold, oppsprekkingsgrad og variasjon i hardhet i berget. Denne informasjonen kan utnyttes til å tilpasse injeksjonen til forholdene (Hognestad, et al., 2010).

#### 4.4.2. Injeksjonsrigg

En standard moderne injeksjonsrigg er utstyrt med; siloer, blandere, agitatorer, injeksjonspumper, automatisk loggesystem og ofte en arbeidsplattform. Det hele er montert på en lastebil for å lett kunne transportere systemet, vist i figur 4-12. Dersom det stilles krav om samtidig injeksjon av flere sementtyper bør man i tillegg utstyre riggen med ekstra siloer, flere blandere, kar for mellomlagring av injeksjonsmasser og flere injeksjonspumper, for å gjøre det mulig å alternere mellom de ulike sementtypene så effektivt som mulig (Hognestad, et al., 2010).



Figur 4-12 Injeksjonsrigg (Tolppanen & Syrjänen, 2003)

##### 4.4.2.1. Siloer

Siloer er tanker der sementen oppbevares før den blandes. Dersom det benyttes ulike sementer, som for eksempel mikrosement og industrisement, vil det være behov for to siloer.

Den vanligste måten å få leveranser av sement er i storsekker. Disse åpnes ved hjelp av en kniv som skal være montert over siloen, og deretter tømmes massene rett i siloen før den lukkes med et lokk. Det er viktig at lokket er helt tett, så vann ikke kommer til (Hognestad, et al., 2010).

##### 4.4.2.2. Blandere

Sement, vann og tilsetningsstoffer blandes sammen i blandere. Det finnes en rekke ulike blandere, men de viktigste faktorene for å oppnå god kvalitet på blandingen er blandetiden og rotasjonshastigheten (Tolppanen & Syrjänen, 2003). For sementsuspensjoner anbefales det å benytte en høyhastighetsaktivator som kan skille enkeltkornene fra hverandre. De har over 1500 rotasjoner per minutt, og blandetiden er på ca 2min. (Hognestad, et al., 2010).

#### 4.4.2.3. Agitatorer

Agitatorer er tanker for mellomlagring av ferdigblandede injeksjonsmasser med. De er utstyrt med omrører for å opprettholde kvaliteten på massene. Før det lages nye blandinger bør agitatorene alltid tømmes for å forsikre at man til enhver tid har så fersk injeksjonsmasse som mulig (Hognestad, et al., 2010).

Det er viktig å være klar over at injeksjonssement er en ferskvare, så lagringsforhold og lagringstid vil ha en innvirkning på kvaliteten. Særlig for de finkornede mikroementene, som er ekstra ømfintlig (Klüver & Kveen, 2004).

#### 4.4.2.4. Injeksjonspumper

Injeksjonspumpene skal pumpe injeksjonsmassene inn i berget og bør ha kapasitet til å pumpe 100 liter per minutt ved 80% av det maksimale tillatte trykket (Hognestad, et al., 2010).

#### 4.4.2.5. Automatisk loggsystem

Den automatiske loggingen på injeksjonsriggen logger informasjon om hvor stort forbruket a de ulike sementreseptene er, trykket og når injeksjonen starter og stopper for de ulike blandingene (Hognestad, et al., 2010). Et eksempel på utdrag fra en slik logg er vist i figur 4-13.

LOGAC		WORKSITE: 0000	Grouting Report								Atlas Copco			
		SECTION: KJONNASEN HOYRE												
		PRINTOUT DATE: 19.11.2013												
	HOLE NO.	HOLE LENGTH [m]	STAGE NO.	RECIPE NO.	INJECTION NO.	W/C	CODE	DATE [yyyy:mm:dd]	START TIME [hh:mm:ss]	STOP TIME [hh:mm:ss]	LOGGING TIME [hh:mm:ss]	VOLUME [Litre]	PRESSURE [Bar]	CHECKSUM
1	1	23.0	1	5	0		None	2013:11:15	10:49:11	11:23:52	00:34:41	464.9	34.8	OK
2	1	23.0	1	8	0		None	2013:11:15	11:23:56	13:47:03	02:23:07	1630.3	73.1	OK
3	1	23.0	1	8	0		None	2013:11:15	13:47:08	15:02:58	01:15:50	974.5	9.4	OK
4	2	23.0	1	5	0		None	2013:11:15	10:48:47	11:20:16	02:31:29	408.5	53.5	OK
5	2	23.0	1	8	0		None	2013:11:15	11:20:20	12:13:28	00:53:08	826.1	86.1	OK
6	3	23.0	1	5	0		None	2013:11:15	07:15:00	07:51:08	00:36:08	437.4	0.0	OK
7	3	23.0	1	8	0		None	2013:11:15	07:51:28	10:48:57	02:57:29	773.8	0.0	OK
8	3	23.0	3	8	0		None	2013:11:15	12:17:01	12:24:35	00:07:34	75.5	3.2	OK

Figur 4-13 Utdrag av logg fra injeksjonsrigg

#### 4.4.2.6. Arbeidsplattform

For å komme til alle injeksjonshullene er det behov for en arbeidsplattform i form av en personløfter, vist i figur 4-12 ovenfor. En slik løfter bør ha en rekkevidde så alle stavene kan nås uten at injeksjonsriggen må flyttes (Hognestad, et al., 2010).

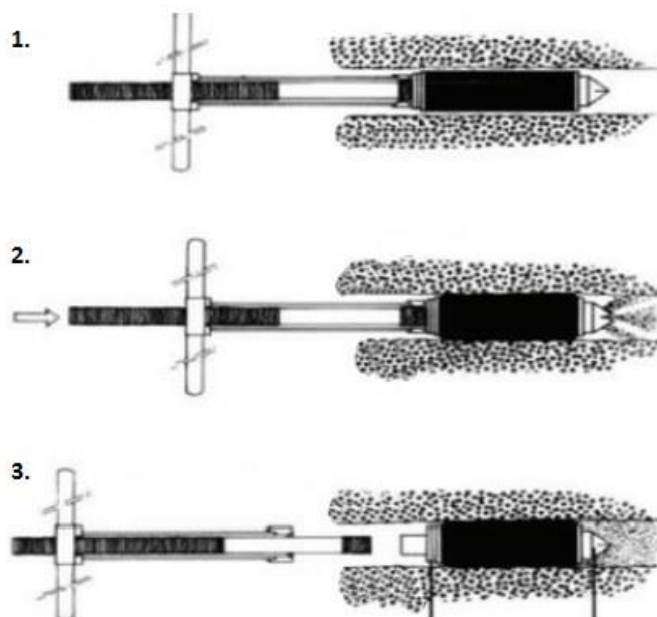
#### 4.4.3. Pakkere

Pakkeres oppgave er å sperre av hele- eller deler av borhull, for å gjøre det mulig å styre hvor injeksjonsmassene presses inn (Tolppanen & Syrjänen, 2003).

Det finnes en rekke ulike pakkere. Det skilles mellom pakkere for høye trykk (60-100bar) og lave trykk (<60bar), enkelt- og dobbelpakkere, og engangs- og flergangspakkere.

I Norge er det vanligst å bruke engangspakkere (Hognestad, et al., 2010).

Selve monteringen av pakkerne skjer i tre trinn, vist i figur 4-14.



Figur 4-14 Prinsippet for montering av pakker (Hognestad, et al., 2010)

I NFFs håndbok 06 (Hognestad, et al., 2010) "Berginjeksjon i praksis" er de tre trinnene beskrevet på følgende måte.

Først benyttes det en injeksjonsstav til å plassere pakkeren i borhullet. Vanligvis plasseres den 1,5-2,5 meter fra borhullsåpningen, med en injeksjonsstav på 3 meter, men det kan variere avhengig av bergmassekvaliteten og pakkerplasseringen.

Deretter ekspanderer pakkeren og spenner seg opp i hullet, før injeksjonsmassene pumpes inn via en ventil i front av pakkeren. Ved injeksjon i områder med store vannmasser i berget, kan denne ventilen også brukes til å drenere ut vann når pakkeren skal plasseres, for å gjøre plasseringen lettere.

Når hullet er ferdig injisert kan injeksjonsstaven tas av, vaskes og brukes på nytt, mens pakkeren forblir i hullet.

#### 4.4.4. Øvrig utstyr - Slinger, staver og koblinger

Stavene benyttes som tidligere nevnt for å plassere og spenne fast pakkerene. Det finnes mange ulike type staver, med lengde fra 1-6meter. Det er viktig at stavene som brukes er tilpasset pakkerene, så de blir festet godt i hverandre. I tillegg er det viktig å feste stavene i stoffen med kjetting for å forhindre at de ved feil skal kunne skyterut av hullene (Hognestad, et al., 2010).

Det er ønskelig at slangene som benyttes er så korte som mulig, da både faren for herding og trykktapet øker med lengden til slangen. For at trykktapet skal være så lite som mulig er

den indre diameteren i slangen også tilpasset, normalt er den på  $\frac{3}{4}$ ". I tillegg er det viktig med en kvalitet som tåler et trykk på 100bar (Hognestad, et al., 2010).

Koblingene som brukes er ulike for trykk over og under 60 Bar. Ved høye trykk benyttes det normalt hydraulikk-kraner og injeksjonsslangen skrues rett på staven, mens det ved lavere trykk benyttes hurtigkoblinger og kuleventiler (Hognestad, et al., 2010).

## 5. Undersøkelse av bergmassekvalitet

For å kunne se nærmere på korrelasjonen mellom bergmassekvalitet og forbruk av injeksjonsmasser, er det i dette avsnittet presentert det mest brukte kartleggingssystemet for bergmassekvalitet i Norge, Q-systemet.

Q-systemet benyttes for å klassifisere bergmasser med en Q-verdi ut fra 6 ulike parametere som avgjør bergets stabilitet. Ut fra denne klassifiseringen er det utviklet en modell basert på erfaringsdata, der det anbefales sikringstiltak ved bestemte Q-verdier, og informasjon om bergrommets geometri og ESR verdi. ESR verdien forteller hva slags sikkerhetskrav det stilles til anlegget (NGI, 2013).

Q-verdien beregnes ved følgende likning (NGI, 2013):

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

Der:	<i>RQD</i>	<i>Oppsprekningstall</i>
	<i>J<sub>n</sub></i>	<i>Tall for sprekkesett</i>
	<i>J<sub>r</sub></i>	<i>Sprekkeruhetstall</i>
	<i>J<sub>a</sub></i>	<i>Tall for sprekkefylling</i>
	<i>J<sub>w</sub></i>	<i>Sprekkevannsfaktor</i>
	<i>SRF</i>	<i>Spenningsfaktor</i>

Disse faktorene tallfestes ut fra oversikt i vedlegg 5. Q-verdien beregnes til en verdi mellom 0,001 og 1000, der 1000 er bergklasse A, ekstremt godt berg og 0,001 er bergklasse G, eksepsjonelt dårlig berg. Denne verdien plottes mot geometrien delt på ESR i et sikringskart, vedlegg 5, for bestemmelse av sikringskategori.

Denne sikringskategorien angir anbefalt permanent sikring (NGI, 2013).

Utviklingen av Q-systemet startet ved NGI i 1971, og første publikasjon ble presentert av Barton, Lien og Lunde i 1974. Gjennom tidene har det skjedd en stadig utvikling av teknologi og sikringsfilosofi, derav har Q-systemet blitt revidert flere ganger, og er stadig i endring for å hele tiden holde følge med dagens sikringsmuligheter og krav. I senere tid har det særlig kommet nye bolter på markedet og fiberarmert sprøytebetong har blitt utviklet. Det har ført til endring i sikringsprosedyrer. Eksempelvis har store utstøpinger blitt erstattet med fiberarmerte sprøytebetongbuer. Kravene til sikkerhet har også økt, noe som særlig har resultert i et høyere forbruk av sprøytebetong (NGI, 2013).

Det er Dr. Nick Barton som har videreutviklet og forbedret systemet, i hovedsak assistert av Eystein Grimstad, men også av Fredrik Løset. Noe som har resultert i at systemet i dag er kjent og brukt verden over. Den siste oppdateringen på systemet ble gjort i 2013. (NGI 2013)

Klassifiserings systemene innehar alle noen felles svakhetstrekk (Nilsen & Broch, 2009):

- Der det tallfestes egenskaper er det i noen tilfeller svært krevende å sette et tall.
- Kun noen av forholdene som har med stabilitet å gjøre blir tatt med
- Vurderinger av parametere er subjektive, og kan derav føre til store variasjoner
- Metodene blir fort konservative, da de bygger på erfaringer, og derav sikring på lik måte som det har blitt utført tidligere

## 6. Farriseidet-Porsgrunn prosjektet

I denne oppgaven er det valgt å se nærmere på to utvalgte tunneler i Farriseidet-Porsgrunn prosjektet. Valget falt på Skillingsmyr og Eidanger tunnel, da de er lokalisert i ulike geologiske forhold. Det vil åpne opp for muligheter til å i større grad kunne sammenlikne de geologiske forholdenes innvirkning på injeksjonsarbeidet. I det følgende vil det bli sett nærmere på prosjektet og de to tunnelene.

### 6.1 Bakgrunn

Skillingsmyrtunnel og Eidangertunnel inngår i utbyggingen av Vestfoldbanen, som to av syv tunneler på Farriseidet-Porsgrunn prosjektet. I dag går banen mellom Porsgrunn og Larvik langs samme trasé som da den ble bygget i 1881. Banen går i sidebratt terreng, med høye- og bratte skjæringer og store fyllinger. Hastigheten langs dagens trasé er lav og kvaliteten på banen er så dårlig at mange av togavgangene mellom Porsgrunn og Larvik er erstattet med buss (Jernbaneverket, 2013a). Utbyggingen vil erstatte dagens jernbane som tar 34 minutter, og redusere reisetiden ned til 12 minutter. Samtidig vil rasfarlige strekninger, utdaterte tunneler og 30 planoverganger fjernes. Noe som vil øke sikkerheten på strekningen (Jernbaneverket, 2013b). Utbyggingen vil også øke kapasiteten og gi stor miljøgevinst inn mot Oslo, som en del av InterCity triangelet (Jernbaneverket, 2012).

I stor skala inngår strekningen som nevnt i InterCity triangelet som det er vist et utdrag av i figur 6-1. Triangelet vil møte befolkningsveksten som vil kreve et forbedret kollektivtilbud, da det ikke vil være nok areal til å bygge ut et veinett som kan bære den trafikkveksten befolkningsveksten fører med seg. Samtidig vil InterCity triangelet øke hastigheten og gjøre det mulig med dagpendling over større strekninger og fra flere østlandsbyer, så bosettingen kan spres, og gjøre bo- og arbeidsmarkedet rundt Oslo større (Jernbaneverket, 2012).



Figur 6-1 InterCity triangelet (Jernbaneverket, 2012)

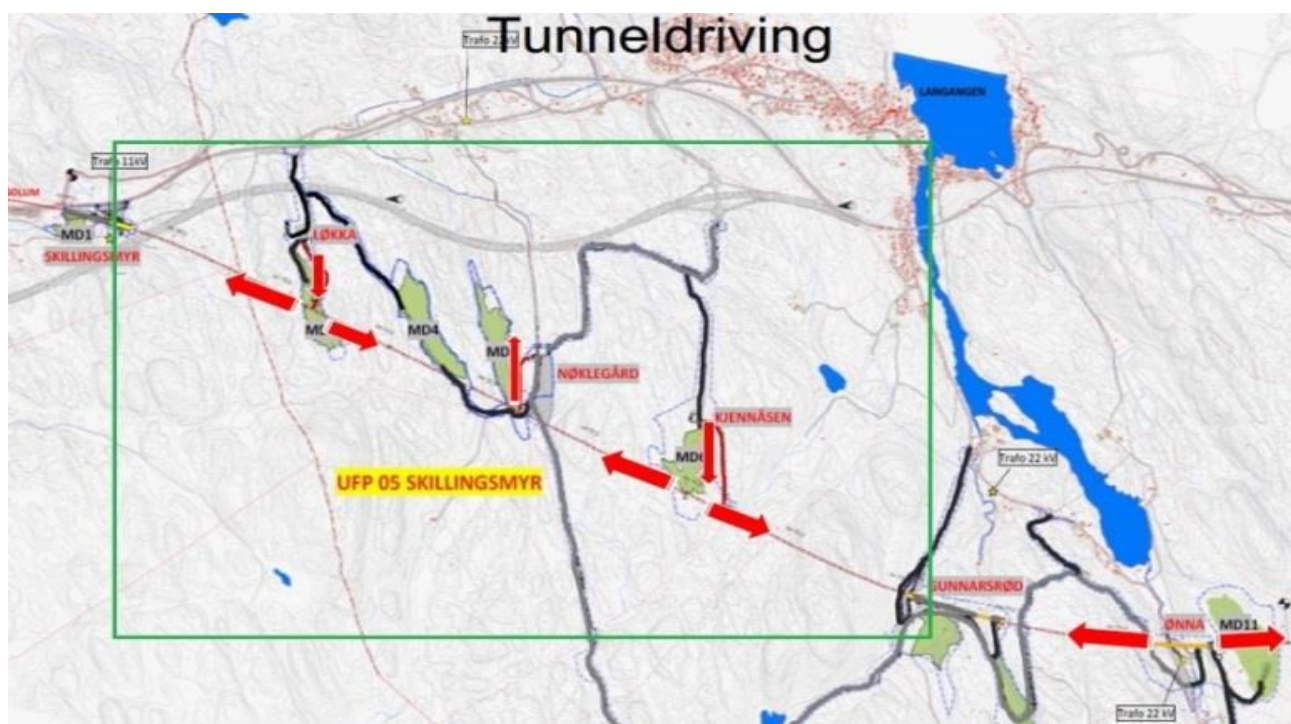


## 6.2 Skillingsmyr tunnel

Skillingsmyrtunnel er lokalisert på fylkesgrensen mellom Telemark og Vestfold, og inngår i Skillingsmyr entreprise, UFP05. Det er Veidekke som har skrevet kontrakt for denne entreprisen, og Jernbaneverket som eier prosjektet. Tunnelen har en total lengde på 3760m. Den er dimensjonert for dobbeltspor og en hastighet på 250km/t. Det teoretiske sprengningstverrsnittet til tunnelen er på 133 m<sup>2</sup>, og hele tunnelstrekningen er drevet konvensjonelt.

I tillegg til hovedtunnelen bygges det 3 tverrslagstunneler. Der to av disse, Løkka og Kjennåsen, drives utenfra og ned til hovedløpet med et teoretisk sprengningstverrsnitt på 25m<sup>2</sup>, mens den siste, Nøklegård, drives innenfra og ut med et teoretisk sprengningstverrsnitt på 53m<sup>2</sup>. Oppstarten av byggingen var i januar 2013 og prosjektet skal være ferdigstilt i september 2016 (Jernbaneverket, 2013c).

Figur 6-2 viser hvilke retninger drivingen er planlagt. Drivingen ble startet opp med tverrslagstunnelene på Løkka og Kjennåsen. Da disse var drevet ned til hovedløpet ble det etablert to stuffer i hver sin retning på hovedløpet, så det drives på 4 stuffer totalt. Per dags dato, 12.05.14, er Kjennåsen og Løkka tverrslag drevet ned til hovedløpet og det er ved Løkka drevet totalt 1697 meter av hovedløpet, mens det i området ved Kjennåsen er drevet 1004 meter av hovedløpet. Tilsammen tilsier det 71,8% av den totale tunnellengden.



Figur 6-2 Oversikt over driveretninger på Skillingsmyr entreprise, med Skillingsmyrtunnel innenfor grønn firkant (Jernbaneverket, 2013c)

## 6.2.1 Geologiske og ingeniørgeologiske forhold

Presentasjonen av de geologiske og ingeniørgeologiske forholdene er basert på den ingeniørgeologiske rapporten for Entreprise UFP05 Skillingsmyr (SWECO, 2012a)

### 6.2.1.1 Forundersøkelser

Følgende forundersøkelser er gjort i forbindelse med detaljplanlegging for enkeltspor i 2000-2001 og i forbindelse med byggeplan for dobbeltspor i 2010:

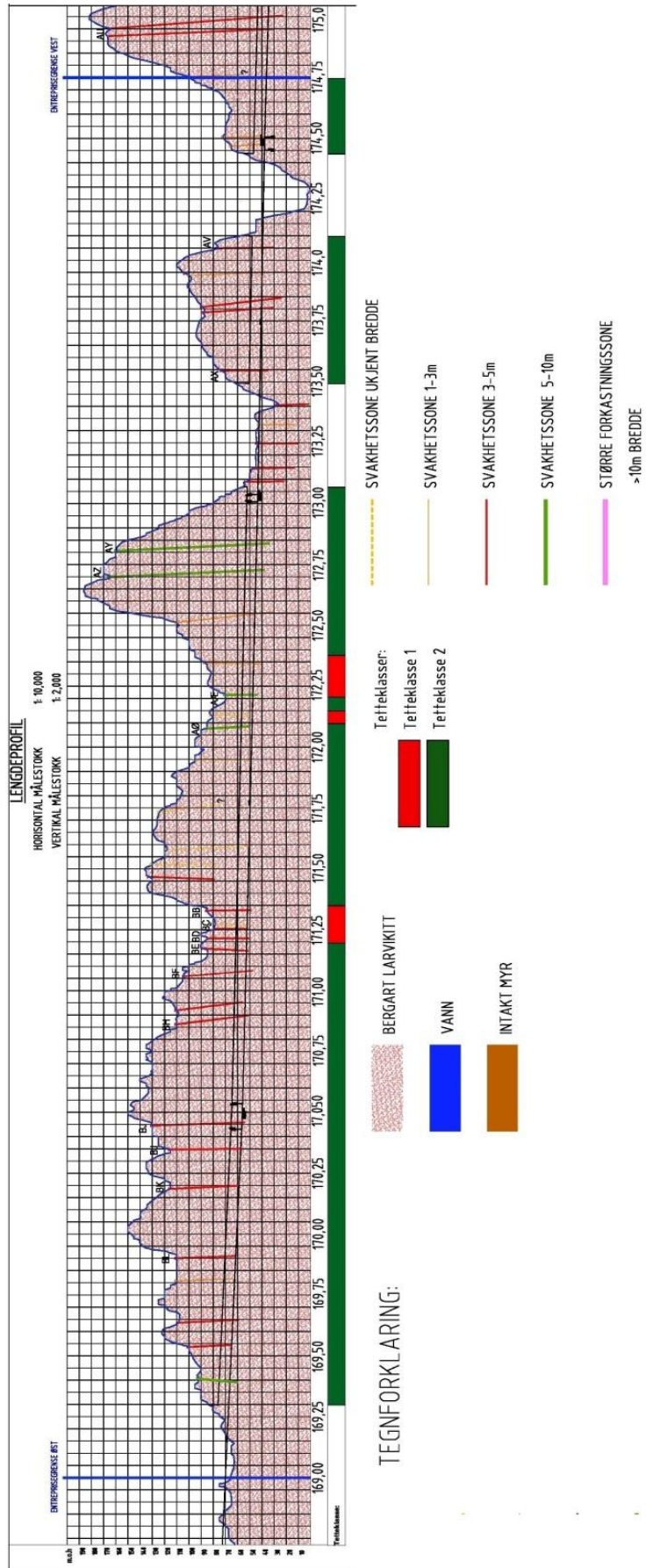
- Ingeniørgeologisk kartlegging
- Flyfototolkning
- Grunnboring
- Refraksjonsseismiske undersøkelser
- Kjerneboringer
- Brønnboringer
- Laboratoriums undersøkelser

### 6.2.1.2 Regionalgeologi

Området prosjektet ligger i er en del av Oslofeltet og består av bergarter fra tidsepokene kambro-silur og karbon-perm omgitt av prekambrisk grunnfjell i øst og vest på hver sin side av en N-S orientert forkastningssone. I hovedsak ligger traseen i ulike typer av dypbergarten larvikitt, med unntak av helt vest der det er omdannede sedimentære bergarter.

### 6.2.1.3 Topografi

Topografien i området er kupert, som vist i lengdeprofilet i figur 6-3, og vedlegg 9. Dette skyldes dannelse av kløfter i larvikittens svakhetssoner, samt isbreerosjon. Kløftene er i hovedsak trange med et rettlinjert forløp orientert N-S, NV-SØ og Ø-V, med bratte fjellskråninger i sidene. Isbrebevegelsen var mot S-SØ, noe som har ført til bratte sider S-SØ og relativt slake sider N-NV på koller.



Figur 6-3 Lengdeprofil, Skillingsmyrtunnel

#### 6.2.1.4 Løsmasser

I følge NGUs kvartærgeologiske kart, er det generelt lite løsmasser i overkant av tunnelen, det er mye bart fjell med innslag av tynne lag av torv, forvitningsmateriale eller morenemateriale, vist i figur 6-4. Dalene skiller seg ut med et tykkere løsmassedekke, bestående av et tynt morenedekke med overliggende torv eller myr.



Figur 6-4 Løsmassekart over Skillingsmyrtunnel (SWECO, 2012a)

#### 6.2.1.5 Bergarter

Larvikitten som nesten hele Skillingsmyr tunnel går gjennom er i hovedsak massiv og grovkornet bestående av blant annet feltspat, pyroksen, biotitt og amfibol. Den opptrer for det meste ved en grå til grå-blå farge, men i områder nær sprekksoner er den ofte hydrotermalt omdannet og får en svakt rødlig farge. I bergmassen opptrer grovkornet pegmatitter i lommer og ganger som følger hovedsprekkeretningen, og permiske eruptivganger av ulik type, tykkelse, og utstrekning som gjennomsetter berget. Det er særlig observert finkornede, mørke grå-sorter diabasganger og rombeporfyr-ganger som følger sprekker i nord-syd retning. Disse gangene kan ha en tykkelse på 0,5-15m. Enkelte av eruptivgangene i Oslofeltet er sterkt oppknust. Det kan enten føre til en høy permeabilitet, eller omdanning til tette leirsoner. Det vil gi to helt forskjellige resultater knyttet til fare for innlekkasje av vann. Stabilitetsmessig vil begge utfallene skape problemer under tunneldrivingen. Svakhetssoner i larvikitten forekommer generelt i forkastninger og sprekksoner. Under drivingen er det kartlagt flere sprekker med leir.



### 6.2.1.6 Oppsprekking

I følge den geologiske rapporten SWECO har utarbeidet er oppsprekkingen vurdert fra tidligere kartlegging langs tunneltraséen. Det er observert steiltstående- og sub-horisontale sprekker med en generelt stor til meget stor sprekkeavstand på 0,5-3m på de steiltstående og 0,5-1,5m på de sub-horisontale sprekke i larvikitten. I eksisterende tunneler i området er det observert sprekkeavstand på 5m utenfor sprekkesoner. For syenittporfyrene og diabasgangene er sprekkeavstanden noe lavere, på henholdsvis under 0,15m for syenittporfyrene, og 0,1-0,5m for diabasgangene.

Orienteringen og fallet til hovedsprekkesettene og eruptivgangene er som følger.

- Hovedsprekkesett:
  - Orienteret N-S med et middels fall mot V
  - Orienteret NS-SV med steilt fall både mot N og S
- Eruptivganger:
  - Orienteret N-S og faller mot V

### 6.2.1.7 Grunnvann

Larvikitt er i utgangspunktet grovkornet, massiv, med lav primærporøsitet. Ut fra vanntapsmålingene i borehull er det registrert moderat permeabilitet. Områdene der permeabiliteten øker er ofte tilknyttet områder nær overflaten i sprekkesoner.

I Skillingsmyrtunnel er det satt to ulike tettningskrav langs tunneltraséen, vist i figur 6-3 ovenfor.

Tettningsklasse 1: Krav på tetting ved 10l/min/100m, krever systematisk forinjeksjon, planlagt ved passering nær myrområder

Tettningsklasse 2: Krav på tetting ved 20l/min/100m, krever systematisk sonderboring og injeksjon ved behov

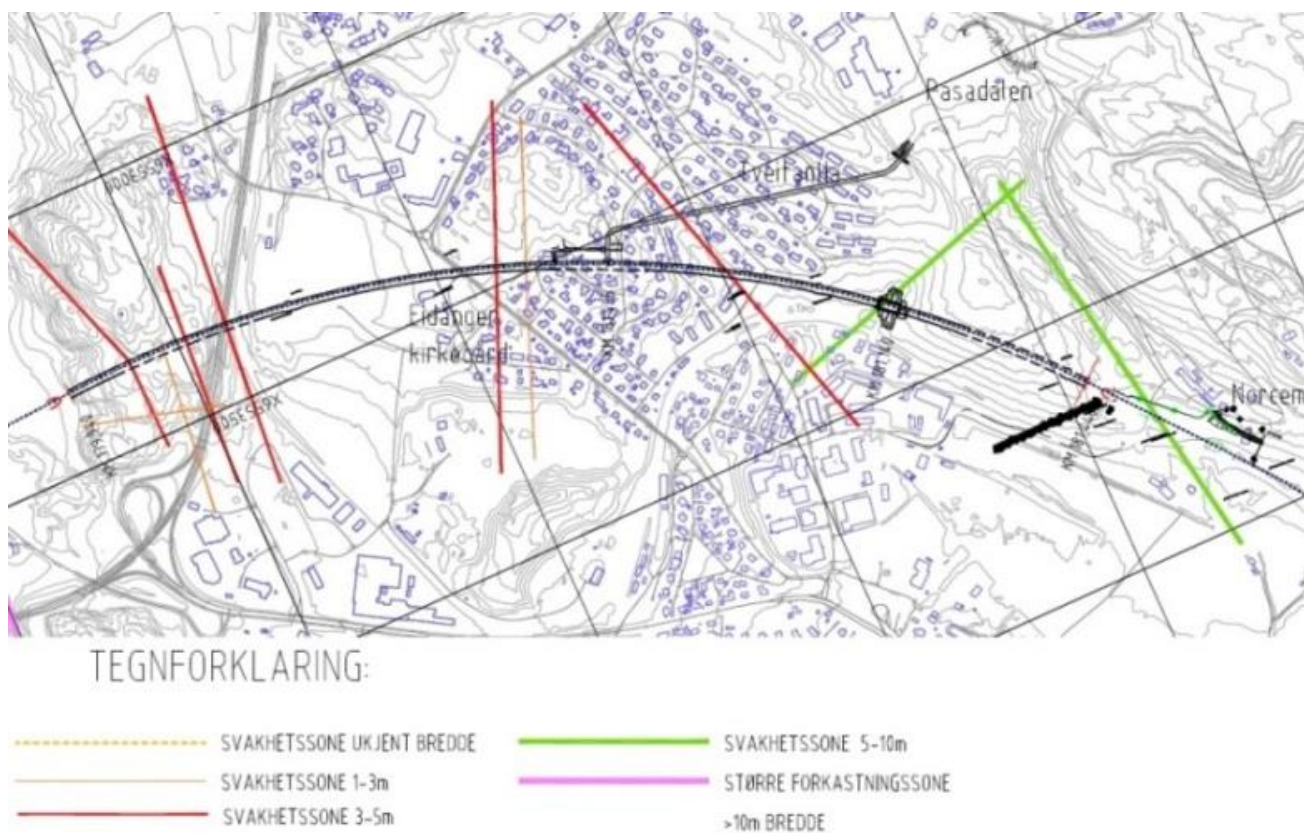
Kravene er moderate til middels, da det ikke er noen overliggende bebyggelse i området som kan påvirkes av drivingen. Det må likevel tas hensyn til skader fra uønsket drenering av overflaten, intakte myrområder og grunnvann.

### 6.3 Eidanger tunnel

Eidanger tunnel er lokalisert i Porsgrunn, fra Herregårdsbekken i øst og inn mot Porsgrunn stasjon i vest. Den inngår i hovedsak i Eidanger entreprise, UFP08, men har også 500 meter i Storberget entreprise, UFP07 i den østre delen av tunnelen. Det er Implenia som har skrevet kontrakt for UFP08, NCC for UFP07, og Jernbaneverket som eier prosjektet. Tunnelen har en total lengde på 2080m. Den er dimensjonert for dobbeltspor og en hastighet på 250km/t. Det teoretiske sprengningstverrsnittet til tunnelen er på 132,4 m<sup>2</sup> og netto tunneltverrsnitt ca. 94,1m<sup>2</sup>. Tunnelstrekningen er drevet konvensjonelt, med unntak av et lite område ved Tveitanlia der det på grunn av forsenkninger i terrenget vil bli drevet som "cut and cover".

I tillegg til hovedtunnelen bygges det en tverrslagstunnel ved Pasadalen og en parallell rømningstunnel fra krysningspunktet, mellom hovedløpet og tverrslagstunnelen, østover til et nytt krysningspunkt med hovedløpet 1000 meter fra det østre påhugget, vist i figur 6-5. På den måten vil kravet om rømningstilstand for hver tusende meter være tilfredsstillt. Totalt vil tverrslagstunnelen og rømningstunnelen være på ca. 780meter.

Tunnelen vil, av Implenia, bli drevet på to stuffer etablert der tverrslaget kommer ned til hovedløpet, og en stoff fra Norcem. De ca. 500 meterne NCC har, blir drevet fra det østre påhugget i Herregårdsbekken. Per dags dato 12.05.14, er det drevet 405 meter på tverrslaget ved Pasadalen, 268 meter fra Norcem og 544 meter fra påhugget i Herregårdsbekken.



Figur 6-5 Oversiktobilde Eidanger tunnel

### 6.3.1 Geologiske og ingeniørgeologiske forhold

Presentasjonen av de geologiske og ingeniørgeologiske forholdene er basert på den ingeniørgeologiske rapporten for Entrepriise UFP08 Eidanger (SWECO, 2013)

#### 6.3.1.1 Forundersøkelser

Som grunnlagsmateriale for prosjektering av tunnelene foreligger ingeniørgeologisk kartlegging, grunnboringer, refraksjonsseismiske målinger, kjerneboringer, brønnboringer og laboratorieundersøkelser.

Det ble i 2000-2001 utarbeidet en detaljplan for enkeltsporet linje. Fra denne perioden var det særlig fokus på løsmassemektigheter og bergoverdekning langs tunnelen, og det foreligger resultater fra:

- Ingeniørgeologisk kartlegging
- Geotekniske undersøkelser av løsmasser og dybder til berg i påhuggsområder
- 7 refraksjonsseismiske profiler i 3 områder
- 1 kjerneborhull
- 1 brønnborhull

Ved utarbeidelsen av byggeplan for dobbeltsporet linje i 2010-2011 ble det gjort supplerende undersøkelser i form av:

- Ingeniørgeologiske befaringer
- Geotekniske undersøkelser av løsmasser og dybder til berg i påhuggsområder

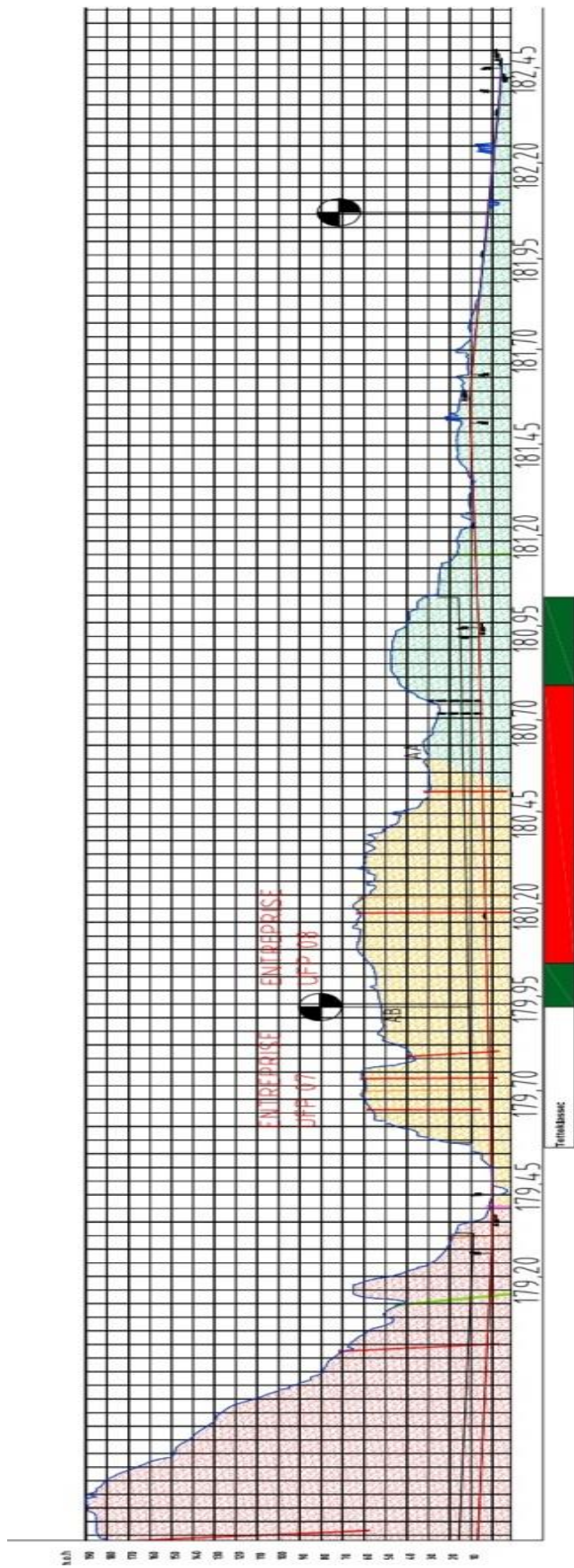
#### 6.3.1.2 Regionalgeologi

Eidanger tunnel ligger i de samme regionalgeologiske forholdene som Skillingsmyr tunnel, presentert i avsnitt 5.2.1.2. Forskjellen på de to tunnelene, er at Skillingsmyr er lokalisert i dypbergarten larvikitt, mens Eidanger tunnel ligger i de østlige områdene med sedimentære bergarter, påvirket av kontaktmetamorfose.

#### 6.3.1.3 Topografi

Topografien langs traseen er vist i figur 6-6 og vedlegg 10. Landskapet er preget av bergartene og deres strukturer. Larvikittens svakhetssoner forekommer som trange kløfter, ofte rettlinjert med bratt sideberg. Disse kløftene er orientert N-S, NV-SØ, Ø-V.

Isbreerosjon har også preget topografien. Breens bevegelse har vært mot S-SØ, og resultert i koller med en bratt S-SØ side og slak N-NV side.



TEGNFORKLARING:

- SYNHETSSONE UKJENT BREDE
- SYNHETSSONE 1-3m
- SYNHETSSONE 3-5m
- SYNHETSSONE 5-10m
- STØRRE FORKASTNINGSSONE
- 10m BREDE

BERGART:

- LARYKITT
- SANDSTEN
- KALKSTEINVERSKIFER

- Cut and cover

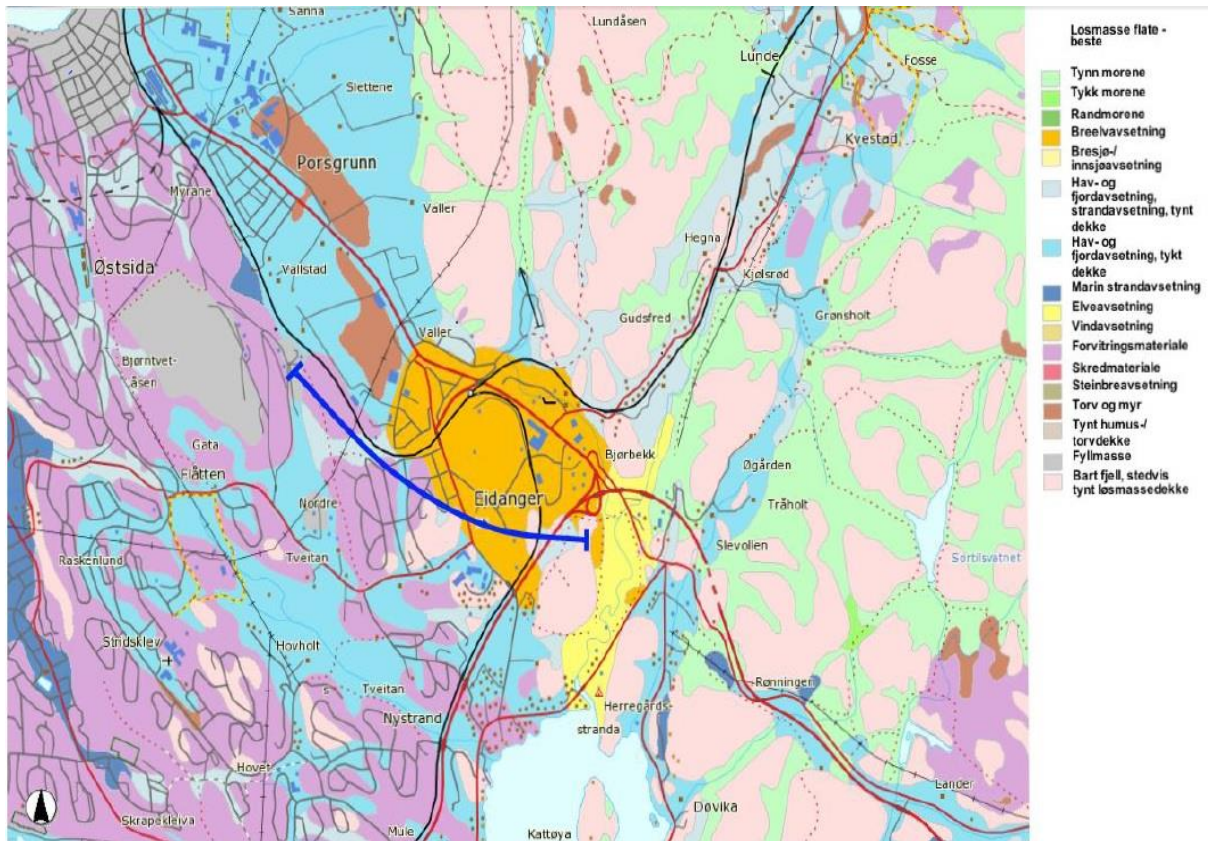
Tettbælt	
	Tettbælt 1
	Tettbælt 2

Figur 6-6 Lengdeprofil, Eidanger tunnel



### 6.3.1.4 Løsmasser

Figur 6-7 viser NGU's kart over løsmasser i området rundt Eidanger tunnel (tegnet inn med blå linje). Det viser et område med tykke breelvavsetninger ved Eidanger kirke, forvittringsmateriale og marine avsetninger i terrengets forsenkninger.



Figur 6-7 Løsmassekart, Eidanger tunnel (SWECO, 2013)

### 6.3.1.5 Berggrunnen

Bergartene langs hovedtunnelen, tverrslag og rømningstunnel er som vist i figur 6-6 kalkstein, leirskifer og sandstein.

Sandsteinene i området betegnes ofte som Ringerikesandstein. Den er lysgrå, finkornet og lagdelt kvartsittisk. Denne lagdelingen har generelt en helning på 20° mot NØ, men i den østlige delen som grenser mot larvikitten øker helningen til 60°.

Kalksteinen og leirskiferen dekker den vestre delen av tunnelen uten noen skarp grense seg imellom. Disse er lagdelt 15-20° mot Ø.

I området er det også larvikitt som har påvirket de sedimentære bergartene, sandstein, silt og leirskiferlag, gjennom kontaktmetamorfose. Omvandlingen har gjort bergartene hardere, til såkalt hornfels. Det er ulik grad av omdanning, avhengig av nærhet til larvikitten. Det er også funnet eruptivganger av diabas og syenittporfyr i de sedimentære bergartene.

Fyllinger i sandstein generelt kan ha variasjoner, de kan være sand- og siltig og ha høy hydraulisk konduktivitet. Samtidig kan det forekomme sementering i sprekker og åpninger. Oppløst materiale transporteres med porevann og utkrystalliserer i åpninger, slik at det blir tett berg og reduksjon i den hydrauliske konduktiviteten. I området ved Eidanger tunnel er det forekomster av kalsitt og kvarts, noe som er et av de vanligste sementerende materialene (Jensen, 2006).

### 6.3.1.6 Oppsprekking

Oppsprekkingen langs traséen er vurdert av SWECO ut fra tidligere kartlegging i forbindelse med planlegging av enkeltsporet jernbane på strekningen. Rapporten SWECO har utarbeidet viser til sedimentære bergarter med en lagdeling orientert med strøk NNV-SSØ og slakt fall mot Ø. Langs denne lagdelingen kan det forekomme noen kraftig oppsprekte lag i sandsteininformasjonen. I tillegg er det to steiltstående sprekkesett orientert med strøk NNØ-SSV og Ø-V.

Sprekkeavstanden og de steiltstående sprekkenes karakter er noe ulik for bergartene langs traséen:

- Sandstein
  - Sprekkeavstand liten til moderat (fra 0,1-0,3m opptil 0,5-1m)
  - De steiltstående sprekkenes sprekkplan er plane til noe hakkete og glatte
  - Mest markerte sprekkesettet
    - Strøk Ø-V med steilt fall mot S
    - NNØ-SSV med moderat fall mot V
  - Lagdelingssprekker
    - Strøk NV-SØ til NNV-SSØ med fall på 20-60° mot Ø (Fallet er størst ved Herregårdsbekken og avtar mot Tveitanlia.)

- Kalk/Leirsteinslagene
  - Sprekkeavstand 0,3-3m (større enn sandsteinen)
  - De steiltstående sprekkenes sprekkeplan er bølgete og rue
  - Mest markerte sprekkesettet
    - Lagdelingssprekkene med strøk NV-SØ til N-S med fall på 15-25° mot NØ

#### **6.3.1.7 Grunnvann**

Sandstein kan generelt ha høy primær porøsitet dersom den ikke er omvandlet. Typen romrikesandstein som befinner seg i dette området har erfaringsmessig konsentrerte lekkasjer ved sprekkesoner.

Kalkstein som ikke har utviklet karst er ofte lite oppsprukket og fører lite vann. I Oslofeltet er det ikke vanlig med karst. Kalksteinen langs denne tunneltraséen er blandet med leirskifer. Ved slike tilfeller i Oslofeltet forekommer vannlekkasjer erfaringsmessig langs skifer grensen. Det skyldes at skifer regnes som tettere enn kalkstein og sandstein.

I Eidanger tunnel opereres det, som i Skillingsmyr, med to tettningsklasser.

Tettningsklasse 1: Krav på tetting ved 10l/min/100m, krever systematisk forinjeksjon, planlagt ved passering nær myrområder

Tettningsklasse 2: Krav på tetting ved 20l/min/100m, krever systematisk sonderboring og injeksjon ved behov

Områdene de ulike tettningsklassene er benyttet i langs traséen er vist i figur 6-6 ovenfor.

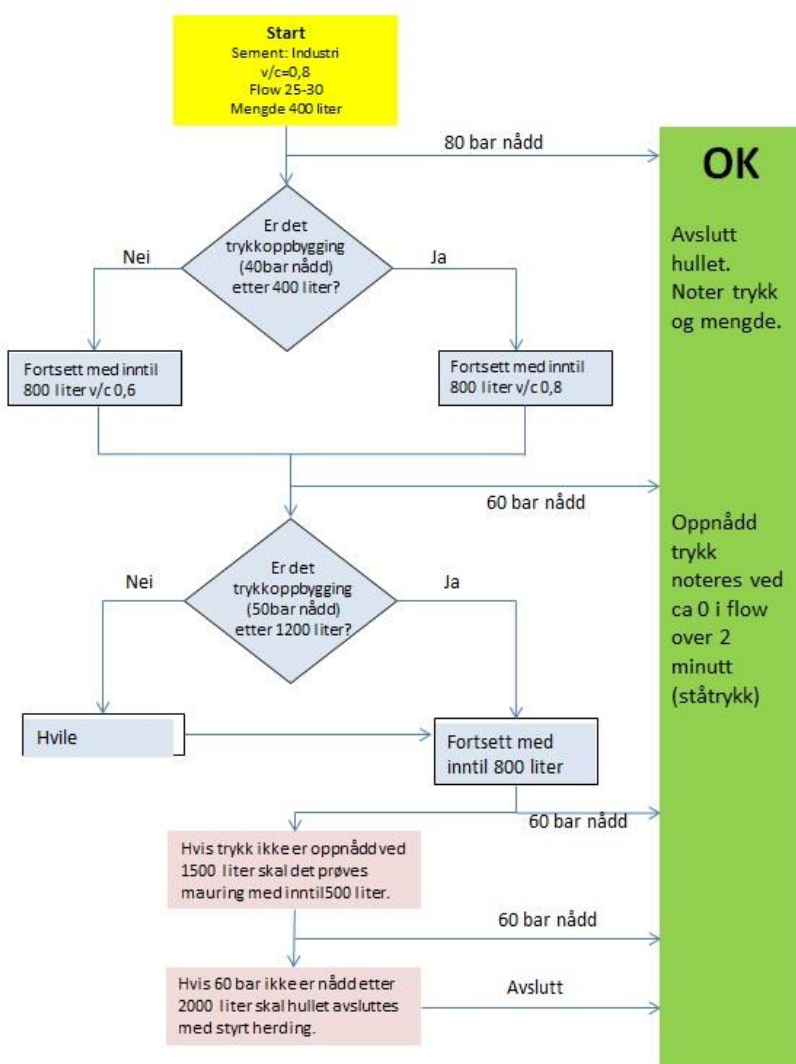
De strengeste kravene på strekningen, tettningsklasse 1, benyttes i forbindelse med passering av boligområdet ved Tveitanlia. Der tas det ekstra hensyn for å forhindre mulig drenering av grunnvann, som igjen kan føre til setningskader på bebyggelsen.

## 6.4 Injeksjonsarbeidet i tunnelene

Injeksjonsarbeidet i de to tunnelene er i korte trekk presentert i følgende avsnitt, ved prosedyre benyttet injeksjonsmateriale.

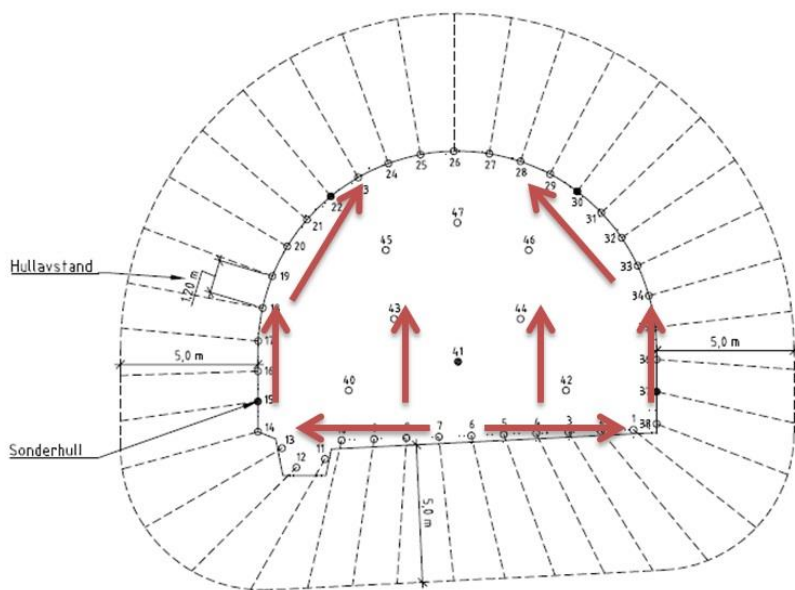
### 6.4.1 Injeksjonsprosedyren

I begge tunnelene benyttes aktiv injeksjon for å oppnå tetthetskravene. Et utgangspunkt for injeksjonsprosedyren vist i figur 6-8, dette kan ved behov avvikes og tilpasses enkelttilfeller.



Figur 6-8 Injeksjonsprosedyre Skillingsmyr-og Eidanger tunnel (Hansen, 2013) (Mork, 2014)

Rekkefølgen på pumping av injeksjonshullene er vist i figur 6-9. Pumpingen skal starte i sålen, bevege seg opp i veggene og ta hengen til slutt. Dette gjøres for å presse vannet opp og frem, da injeksjonsmassene er tungere enn vann. Rekkefølgen på hullene kan endres dersom det er gjennomgang mellom hull. I utgangspunktet skal gjennomgang stoppes med hvile til massene herder, men i områder der det ikke er tilstrekkelig vurderes mauring for å tette igjen (Mork, 2014).



Figur 6-9 Rekkefølgen på injiserte hull, vist med røde piler (Mork, 2014)

Det benyttes både sporadisk og systematisk injeksjon i tunnelene. Fordelingen av bruket er presentert i tabell 6-1.

Tabell 6-1 Fordeling av sporadisk og systematisk injeksjon langs tunneltraséene (SWECO, 2012a) (SWECO, 2012b) (SWECO, 2013)

	Sporadisk [m]	Systematisk [m]
<b>Skillingsmyr</b>	3400	380
<b>Eidanger</b>	970	1030

I områdene det er innhentet data fra i denne oppgaven er det i hovedsak benyttet sporadisk injeksjon, med unntak av en 50 meters sone i Skillingsmyr tunnel.

### 6.4.2 Injeksjonsmaterialer

Injeksjonsmateriale det er lagt opp til å benytte i tunnelene er presentert i tabell 6-2. En detaljert oversikt over det som per dags dato er benyttet finnes i vedlegg 1.

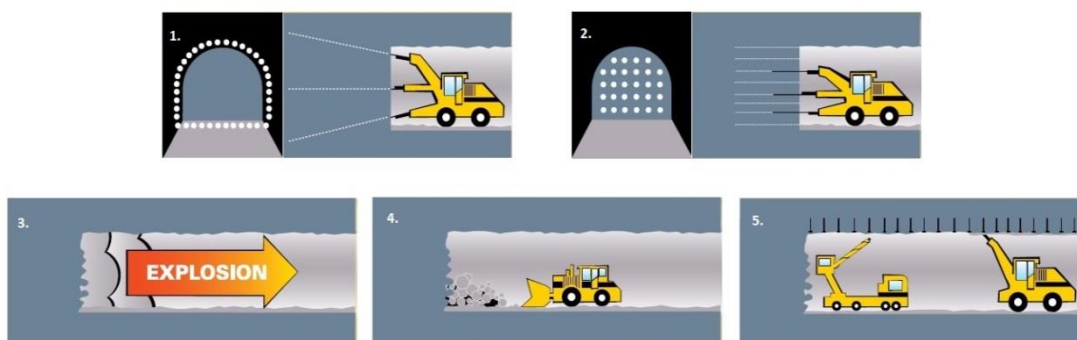
Tabell 6-2 Injeksjonsmidlene det benyttes i tunnelene

Skillingsmyr	Eidanger
Industrisement	Industrisement
Mikrosement 800T	Mikrosement 800T
SP	TanCem MSS
Meyco MS 600	TanCem 60
Meyco SA 162	

## 7. Drivemetode

Både Skillingsmyr- og Eidangertunnel er drevet konvensjonelt, med boring og sprengning. Det vil i korte trekk gå ut på at tunnelen drives i en syklus på 5 trinn, vist i figur 7-1:

1. Sonderboring og potensiell injeksjonsskjerm
2. Salveboring og ladning
3. Sprengning
4. Lasting
5. Rensk og sikring



Figur 7-1 Konvensjonell tunneldriving (Trafikverket, 2010)

Sonderhull bores med en stikning på 12° i vegg og heng, og 0° på stoff, plasseringer er vist i vedlegg 2 og 3, for å måle vanninnstrømning. Dersom denne vanninnstrømningen overstiger kravene for området bores det en injeksjonsskjerm og hullene pumpes med sementinjeksjon. Når injeksjonsskjermen er herdet bores det kontrollhull for å kontrollere at skjermen er tett.

Deretter bores salvehullene på stoff. Disse pumpes med sprengstoff, og salven sprenges ut.

Utsprengte masser blir lastet og kjørt ut til etablerte deponier.

Til slutt renskes og kartlegges berget i det nyutsprengte området, før det sikres med bakgrunn bestemt sikringsklasse i kartleggingen.



## 8. Metode

Metodedelen er delt i to. I den første delen er det sett på hvorvidt den kartlagte bergmassekvaliteten under driving stemmer overens med den forventede bergmassekvaliteten. I den andre delen er det sett på forbruket av injeksjonsmasser i forhold til trykk og bergmassekvalitet.

### 8.1 Virkelig kontra forventet bergmassekvalitet

#### 8.1.1 Bakgrunnsmateriale

Ved vurdering av hvorvidt de virkelige forholdene stemmer overens med det som er forventet er det innhentet data fra:

- Ingeniørgeologiske rapporter levert av SWECO
- Kartlagt geologi, framstilt i NovaPoint, levert av JBV

#### 8.1.2 Gjennomføring

I de ingeniørgeologiske rapportene for Skillingsmyr og Eidanger har SWECO satt opp en prognose over hvor stor andel av tunnallengden det forventes faller innunder bergklasser fra ekstremt bra (bergklasse A/B) til ekstremt dårlig kvalitet (bergklasse F) i Q-systemet.

For å undersøke hvor godt denne prognosen stemmer med de virkelige forholdene er det beregnet hvor stor prosentandel av det kartlagte berget som under driving har falt innunder de samme kategoriene.

Da dataene ble innhentet var det drevet 71,8 % av den totale tunnallengden i Skillingsmyr tunnel. I Eidanger tunnel er det kun hentet ut data fra NCC sin del av tunnelen, som utgjør 26 % av den totale lengden. Men det er satt opp en egen prognose for NCC sin del, som er ferdig drevet. Derav blir det en fullverdig sammenlikning i Eidanger-, men ikke i Skillingsmyr tunnel.

### 8.2 Masseforbruk i forhold til trykk og bergkvalitet

#### 8.2.1 Bakgrunnsmateriale

For å undersøke om det er noen sammenheng mellom forbruket av injeksjonsmasser og bergarter, bergmassekvalitet og trykk er det hentet inn data fra:

- Injeksjonsrapporter levert av Vegdekke og NCC
- Kartlagt geologi, framstilt i NovaPoint, levert av JBV

Som bakgrunnsmateriale for de ulike modellene er det ut fra injeksjonsrapportene og den kartlagte geologien for hver injeksjonsskjerm, som vist i vedlegg 4, beregnet:

- Totalt injeksjonsmasseforbruk per løpemeter
- Gjennomsnittlig bergmassekvalitet presentert i Q-verdi, Jn, Ja og Jr
- Gjennomsnittlig trykk

## 8.2.2 Gjennomføring

For å kunne se på masseforbruk i forhold til trykk og bergkvalitet er det i denne oppgaven gjort flere ulike undersøkelser for å se om det er mulig å finne noen sammenhenger.

I de følgende avsnittene er hver enkelt undersøkelse nærmere presentert.

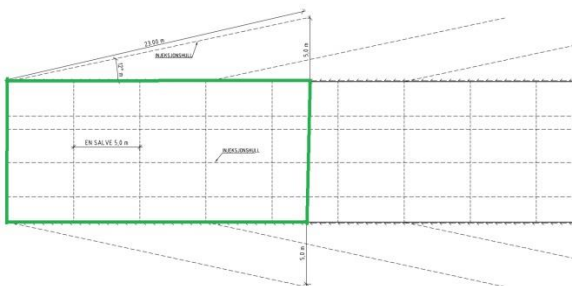
Det er i denne oppgaven benyttet excel, med stolpediagram og spredningsdiagram. Stolpediagrammene er benyttet for å visualisere mengder. Spredningsdiagrammene er brukt for å undersøke om det er noen sammenheng mellom faktorer. I disse spredningsdiagrammene er de best tilpassede trendlinjene lagt inn, med funksjon for trenden og  $R^2$ .  $R^2$  angir hvor godt tilpasset trenden er, med andre ord, hvor god sammenheng det er mellom faktorene.  $R^2$  har en verdi fra 0-1, der 1 er fullstendig sammenheng, mens 0 viser ingen sammenheng. For at det skal være en god sammenheng bør  $R^2$  være større enn 0,7 (Panthi, 2014).

### 8.2.2.1 Masseforbruk generelt

For å kunne sammenlikne forbruket av injeksjonsmassene med trykk og bergmassekvalitet er det først sett på masseforbruket i tunnelene generelt.

Det er valgt å se på hver skjerm for seg, og masseforbruket er bestemt som funksjon av lengden injeksjonsskjermen dekker i tunnelen, vist i figur 8-1. Det gjøres for å lettere kunne relatere skjermene til observasjoner i tunnelen under driving.

For at masseforbruket i skjermene skal kunne sammenliknes må også stikningen på borhullene være lik, så det ikke forekommer store variasjoner i skjermenes rekkevidde.



Figur 8-1 Tunnellengden injeksjonsskjermen dekker

Forbruket av injeksjonsmasser i hver enkelt injeksjonsskjerm er visualisert i stolpediagram for å få et bilde av størrelsen på massene som går inn i berget. De to tunnelene er skilt fra hverandre i hvert sitt diagram, for å kunne se på forskjellen mellom inngang i sandstein og larvikitt. Det muligjgjøres fordi dataene fra i Skillingsmyr tunnel ligger i larvikitt, mens områdene det er innhentet data fra i Eidanger tunnel ligger i sandstein. Sammenlikningen muligjgjøres også fordi tunnelene er drevet på tilnærmet lik måte, med lik injeksjonsprosedyre. Det er kun noe forskjell i injeksjonsmassene, da det benyttes ulike leverandører, men begge er basert på industrisement.



Det er også undersøkt sammenhengen mellom forbruk av injeksjonsmasser og tid det tar å pumpe inn massene i et spredningsplott, for å få et bilde av tidsforbruket.

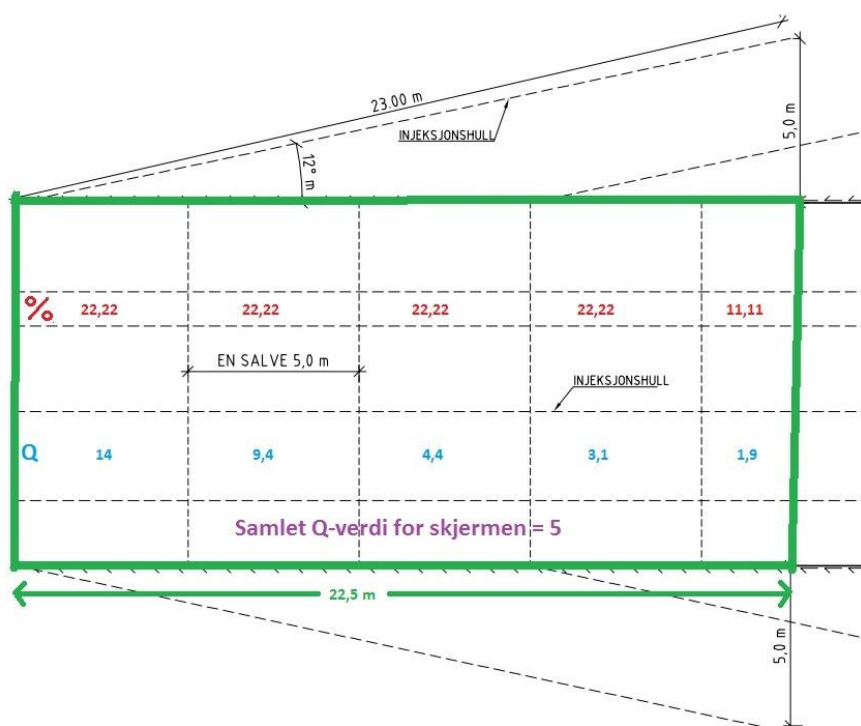
### 8.2.2.2 Masseforbruk i forhold til bergkvalitet, Q-systemet

Når masseforbruket skal sammenliknes med bergmassekvaliteten er innhentede data fra ingeniørgeologisk kartlegging på stoff benyttet. I prosjektet kartlegges det med det velkjente Q-systemet, som klassifiserer bergmassen etter ulike bergmassekvaliteter og sikringsklasser, vist i vedlegg 5. Undersøkelsen av sammenheng ved bruk av Q-systemet er inndelt i to deler, masseforbruket settes opp mot:

- Q-verdier
- Utvalgte parametere i Q-systemet

For å kunne sammenlikne verdiene fra Q-systemet med masseforbruket i en skjerm må det bestemmes én Q-verdi, og én verdi for de ulike parameterne i Q-systemet for hver skjerm.

I tunnelen er Q-verdien, med parameterne sine, kartlagt for hver salve. Det tilsier områder på ca. 5 meter. Injeksjonsskjermene dekker i motsetning ca. 22,5 meter tunnellengde. Derfor er det bestemt en gjennomsnittlig verdi for hele skjermen ved å se på hvor stor prosentandel av skjermmlengden hver kartlagt verdi utgjør. Det er vist et eksempel i figur 8-2.



Figur 8-2 Bestemmelse av en samlet Q-verdi for hele injeksjonsskjermen

### Sammenheng med bergmassekvaliteten, Q-verdien

Q-verdien for hver enkelt skjerm er beregnet og satt opp mot forbruket av injeksjonsmasser i et spredningsplott. På den måten kan det undersøkes om det finnes noen sammenheng.

## Sammenheng med utvalgte parametere i Q-systemet

Q-systemet består av en rekke ulike parametere. Noen av disse parameterne antas å ikke være av betydning for inngangen av injeksjonsmasser. Det er derfor valgt å fjerne disse fra undersøkelsen, for å unngå forstyrrelser. Inngangen er, som tidligere forklart, i stor grad avhengig av sprekke i berget; antallet, karakteren og fyllingen i dem. Det er derfor valgt ut parametere i Q-systemet som har med dette å gjøre:

- $J_n$  = Tall for sprekkesett
- $J_r$  = Sprekkeruhetstall
- $J_a$  = Tall for sprekkefylling

Det er vurdert hvorvidt disse verdiene bør brukes for å undersøke om det finnes noen sammenheng, og om de teoretisk har en positiv eller negativ virkning på forbruket av injeksjonsmasser. Med bakgrunn i vurderingene er det utformet to funksjoner for å vurdere sammenhengen mellom forbruk av injeksjonsmasser og sprekkenes antall og egenskaper.

RQD verdien sier også noe om oppsprekningen i området, men er her vurdert bort. Det kommer av at den kan gi misvisende informasjon om oppsprekningsforholdene i et område. Eksempelvis vil det i et område med jevn oppsprekning på 11cm avstand mellom sprekke være en RQD verdi på 100, mens det ved 9cm avstand mellom sprekke vil være en verdi på 0 (justeres til 10 ved utregning av Q-verdi) (Nilsen & Broch, 2009). For å beskrive oppsprekningsforholdene er  $J_n$  vurdert til å gi et bedre bilde på forholdene.

Antall sprekkesett,  $J_n$ , er vurdert til å ha en stor innvirkning. Det antas at forbruket av injeksjonsmasser vil øke med et økende antall sprekkesett. Det vil gi flere veier for injeksjonsmassene å strømme og større volum å fylle.

Sprekkeruhetstallet,  $J_r$ , er valgt som en betydelig faktor for injeksjonsmassenes strømning inn i berget. Ved en økende ruhet vil penetrasjonsmuligheten og injeksjonslengden reduseres (Davik, et al., 2002). Det antas derfor at en økende ruhet vil redusere forbruket av injeksjonsmasser.

Sprekkefyllinger,  $J_a$ , er tidligere diskutert i forbindelse med vanninnstrømninger. En økning i  $J_a$  tilsier en tettere sprekkefylling, noe som vil redusere vanninnstrømning, og også inngangen av injeksjonsmasser. Åpne sprekker, lav  $J_a$ , vil i motsetning gi mulighet for inngang av store injeksjonsmasser.

Ut fra dette er følgende funksjon satt opp til sammenlikning med injeksjonsforbruket:

$$\frac{J_n}{J_r * J_a}$$

Funksjonen blir satt opp mot masseforbruket i et spredningsplot, for å undersøke om det er noen sammenheng mellom masseforbruket og de kartlagte sprekkenes egenskaper.

I den andre utformede funksjonen er sprekkeruheten ekskludert og det oppnådde trykket i skjermen er inkludert. Det gjøres for å se nærmere på sprekkefyllingenes betydning.

Trykkoppnåelsen i skjermene er inkludert da det, som tidligere nevnt i oppgaven, er naturlig å anta at masseforbruket vil øke med et økende trykk.

Ut fra dette er følgende funksjon satt opp for å sammenlikne forbruket av injeksjonsmasser med tilstedeværelsen av sprekker, fyllinger og trykk:

$$\frac{Jn * P}{Ja}$$

Denne funksjonen er også satt opp mot forbruket av injeksjonsmasser i et spredningsplott, for å undersøke om det finnes noen korrelasjon.

### 8.2.2.3 Masseforbruk i forhold til trykk

For hver skjerm bores og pumpes det rundt 40 hull. I injeksjonsrapportene er det oppgitt et slutt-trykk for hvert enkelt hull. For å undersøke om det er noen sammenheng mellom masseforbruket og trykkoppnåelsen er det beregnet et gjennomsnittlig trykk for hver enkelt skjerm.

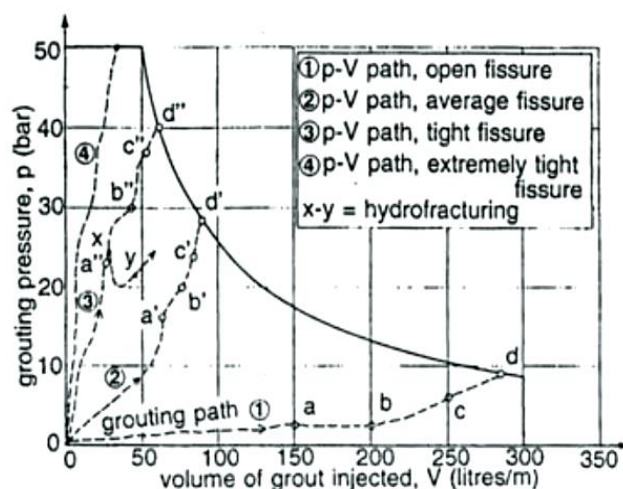
Trykket er satt opp mot forbruket av injeksjonsmasser i et spredningsplot. I plottet er det tilpasset en trendlinje for å undersøke sammenhengen.

### 8.2.2.4 Masseforbruk i forhold til trykk ut fra sprekkefyllinger, Ja

Strømningsveiene og da særlig sprekkefyllingen er antatt å ha stor betydning for inngangen av injeksjonsmasser. Det er derfor gjort en undersøkelse basert på GIN-metoden, der skjermene er delt inn i ulike grupper avhengig av sprekkefyllingene.

Det er ønskelig å undersøke om skjermene med lave verdier for Ja vil gi store innstrømninger av masser ved lave trykk, ved lave nummer i GIN-metoden, figur 8-3. Tilsvarende om en økende Ja, vil gi en brattere stigning på grafen, og med det indikere en større inntrengningsmotstand.

Det er i de innhentede dataene liten variasjon i Ja. Det er derfor med bakgrunn i anbefalinger fra (Panthi, 2014), delt inn skjermene i tre grupper, vist i tabell 8-1.



Figur 8-3 GIN-metodens strømningsveier (Davik, et al., 2002)

Tabell 8-1 Inndeling av grupper ut fra Ja verdi

Ja	Gruppe
0,75-2,90	1
3,00-3,90	2
4,00-6,00	3

For hver av gruppene er det laget et spredningsplott for å undersøke sammenhengen.

## 9. Analyse av data – Resultater og diskusjon

### 9.1 Virkelig kontra forventet bergmassekvalitet

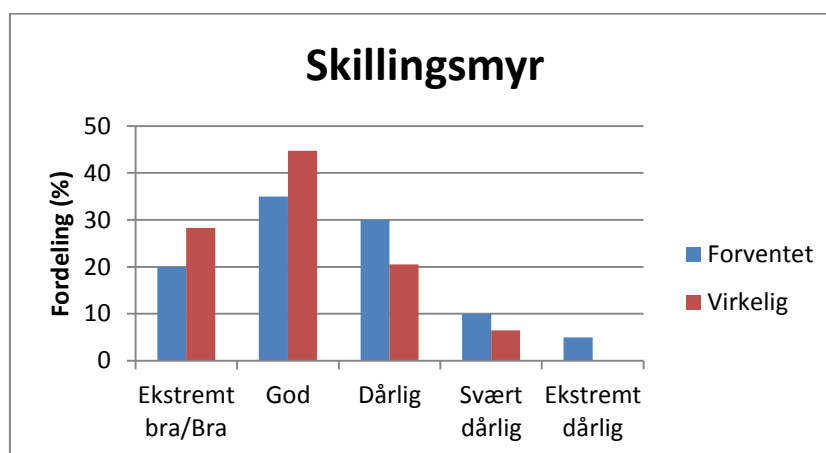
I dette avsnittet er sammenlikningen av den forventede bergmassekvaliteten og de virkelige forholdene kartlagt på stoff presentert.

#### 9.1.1 Skillingsmyr tunnel

I tabell 9-1 og figur 9-1 er resultatene fra sammenlikningen av forventet kontra virkelig bergmassekvalitet presentert for Skillingsmyr tunnel.

Tabell 9-1 Oversikt over forventet og virkelig fordeling av bergmassekvalitet, Skillingsmyr tunnel

Sikringsklasser	Klasse I	Klasse II	Klasse III	Klasse IV	Klasse V
Q-verdi	10-100	4-10	1-4	0,1-1	0,01-0,1
Bergmasseklasse (NGI, 2013)	A/B (Ekstremt bra/Bra)	C (God)	D (Dårlig)	E (Svært dårlig)	F (Ekstremt dårlig)
Forventet	20 %	35 %	30 %	10 %	5 %
Virkelig	28,3 %	44,7 %	20,5 %	6,5 %	0,1 %

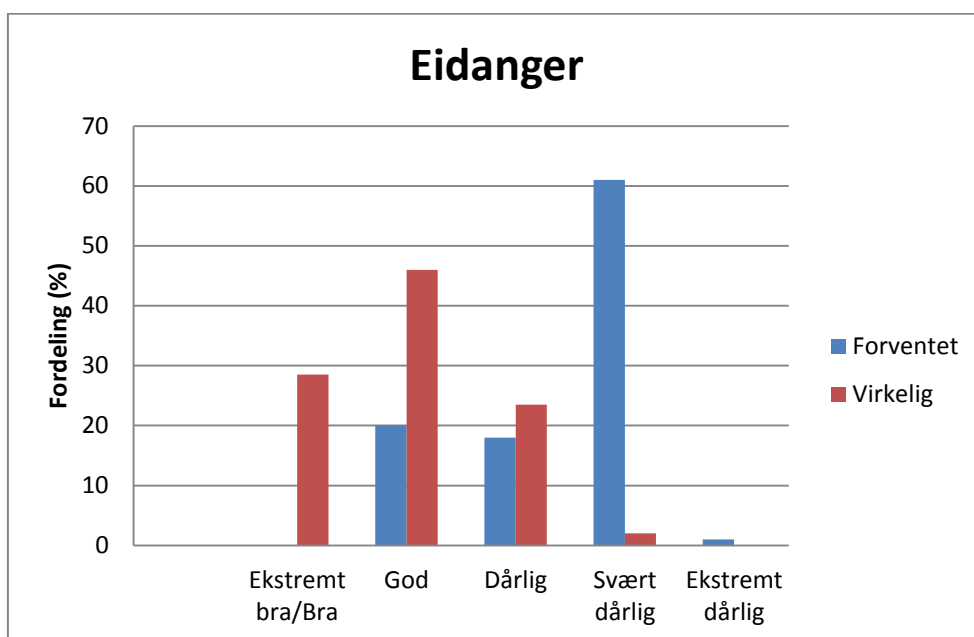


Figur 9-1 Forventet bergmassekvalitet mot den virkelige kartlagt kvaliteten på stoff, Skillingsmyr tunnel

I fremstillingen kommer det fram at berget det er møtt på under drivingen er bedre enn forventet.

Det er, som tidligere nevnt, kun innhentet data fra 71,8 % av tunnelen. Det kommer av at tunnelen per dags dato ikke er ferdig drevet. På grunn av dette vil denne tabellen kun vise hvor store prosentandeler som fram til nå er kartlagt av de ulike sikringsklassene.

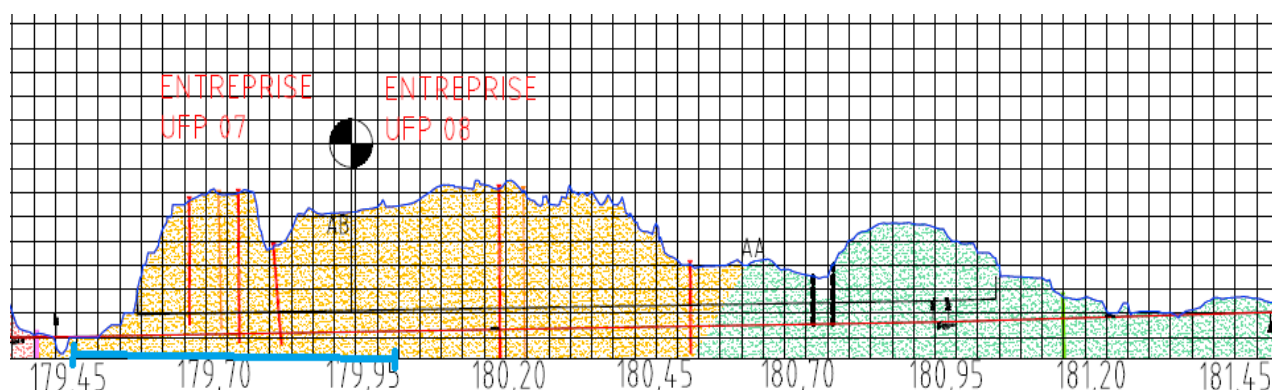




Figur 9-3 Forventet bergmassekvalitet mot den virkelige kartlagte kvaliteten på stoff, Eidanger tunnel

I fremstillingen kommer det fram at berget det er møtt på under drivingen er betraktelig bedre enn forventet.

I Eidanger tunnel er hele lengden prognosen er satt opp for ferdig drevet. Den resterende delen av tunnelen som drives av Implenia har en egen prognose, men det er naturlig å anta at det vil møtes bedre forhold enn forventet videre i sandsteinen, da sandsteinen i området har bedre kvalitet enn forventet. Ovresikt over området det er hentet data fra er vist med blå linje i figur 9-4.



Figur 9-4 Profil Eidanger, med området det er hentet data fra markert med blått. Svakhetssonene er markert der rød tilsier en bredde på 3-5 meter, oransje tilsier 1-3 meter og grønn 5-10 meters bredde. Forøvrig er gult område sandstein og grønn kalkstein/leirskif

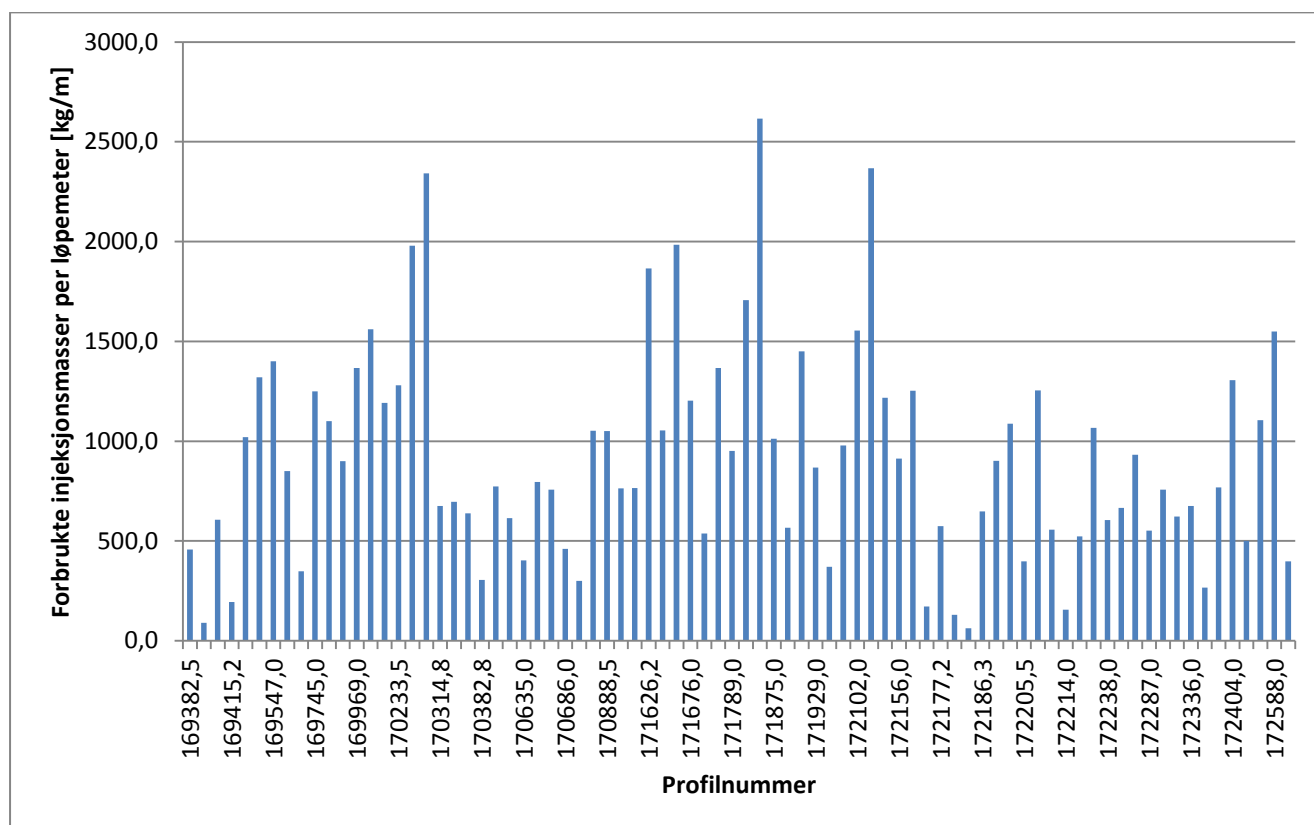
## 9.2 Forbruk av injeksjonsmasser

Resultatene fra undersøkelsen av injeksjonsmasseforbruket og om det finnes noen sammenheng mellom forbruket og bergarter, bergmassekvalitet, og trykk er presentert i de følgende avsnittene.

### 9.2.1 Masseforbruket generelt

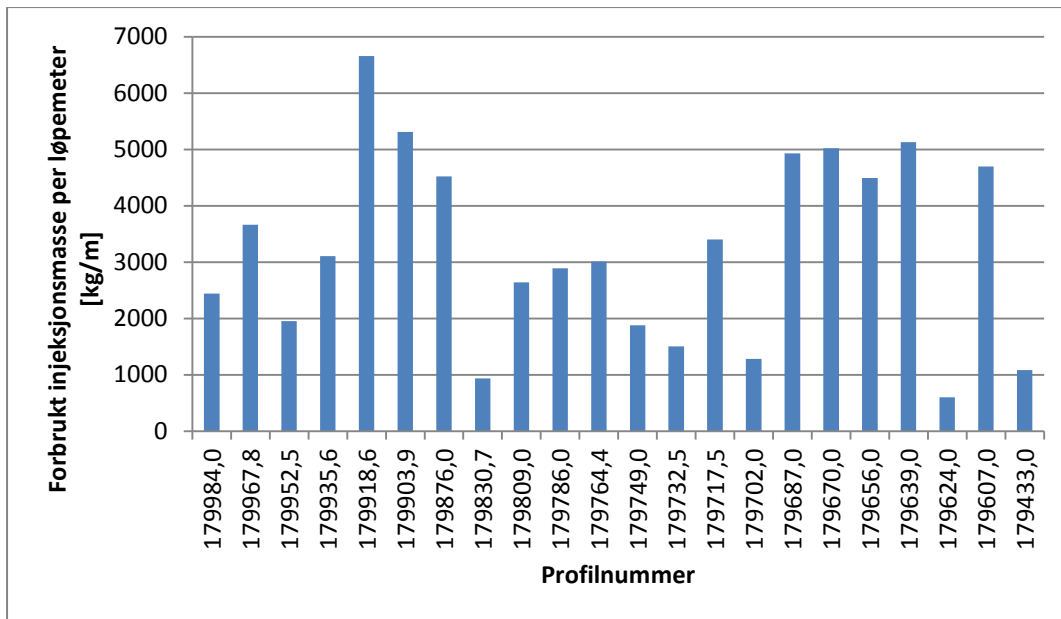
#### Resultat

Oversikt over masseforbruket i hver enkelt injeksjonsskjerm i Skillingsmyr- og Eidanger tunnel er presentert i figur 9-5 og 9-6. Utfyllende data finnes i vedlegg 1. Det gjennomsnittlige forbruket for tunnelene er presentert i tabell 9-3, og masseforbruket i forhold til tiden i figur 9-7.



Figur 9-5 Masseforbruk langs profilet i Skillingsmyr tunnel, i larvikitt

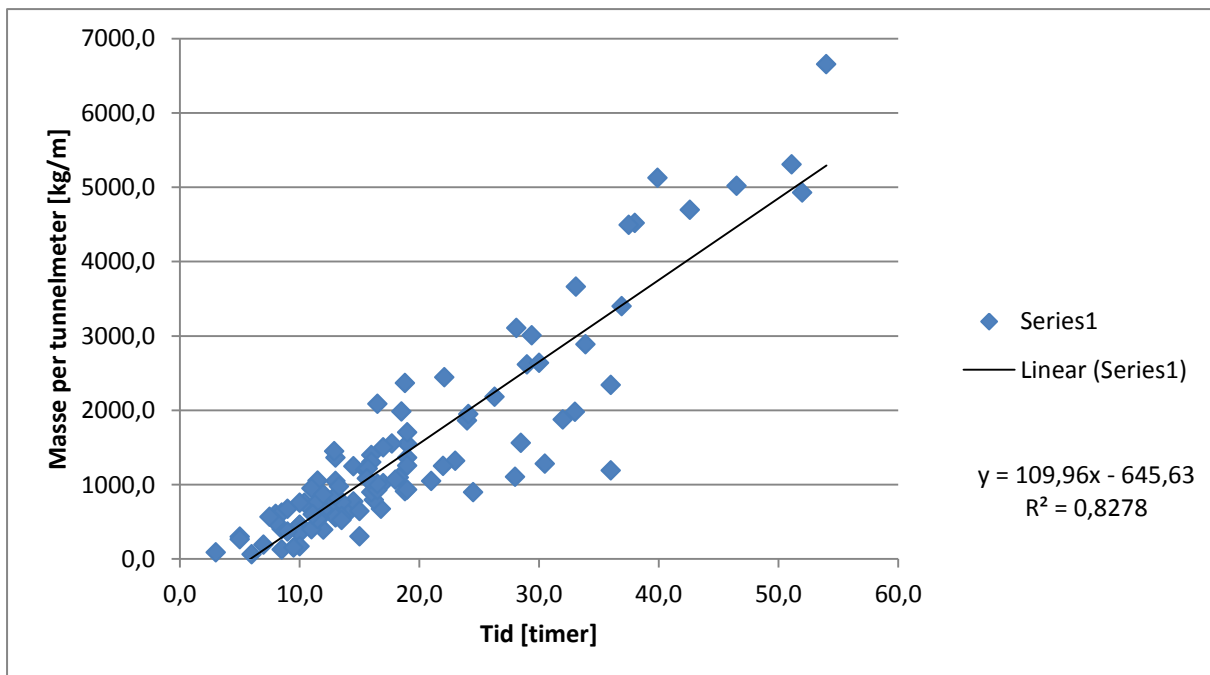




Figur 9-6 Masseforbruket langs profilet i Eidanger tunnel, i sandstein

Tabell 9-3 Gjennomsnittlig forbruk av injeksjonsmasser i Skillingsmyr og Eidanger tunnel

Tunnel	Bergart	Gjennomsnittlig Forbruk [kg/m]
Skillingsmyr	Larvikitt	917,1
Eidanger	Sandstein	3233,6



Figur 9-7 Sammenheng mellom masseforbruk og injeksjonstid

## **Diskusjon**

Ut fra figur 9-5 og 9-6 kommer det fram at forbruket av injeksjonsmasser i Eidanger er mye større enn i Skillingsmyr. Det gjennomsnittlige forbruket av injeksjonsmasser per meter er over dobbelt så stort i Eidanger, vist i tabell 9-3.

Årsaken til denne store forskjellen kan ligge i bergartenes ulike karakter. Sandsteinen har generelt en høyere primær porøsitet enn larvikitten som generelt er massiv.

Begge grafene viser generelt en varierende masseinnngang, noe som kan skyldes at massinngangen i stor grad avhenger av hva slags sprekker og åpninger borhullene krysser, eller klarer å få åpnet ved hydraulisk splitting. Det kommer fram at det til tross for lik bergartstype er det store lokale variasjoner.

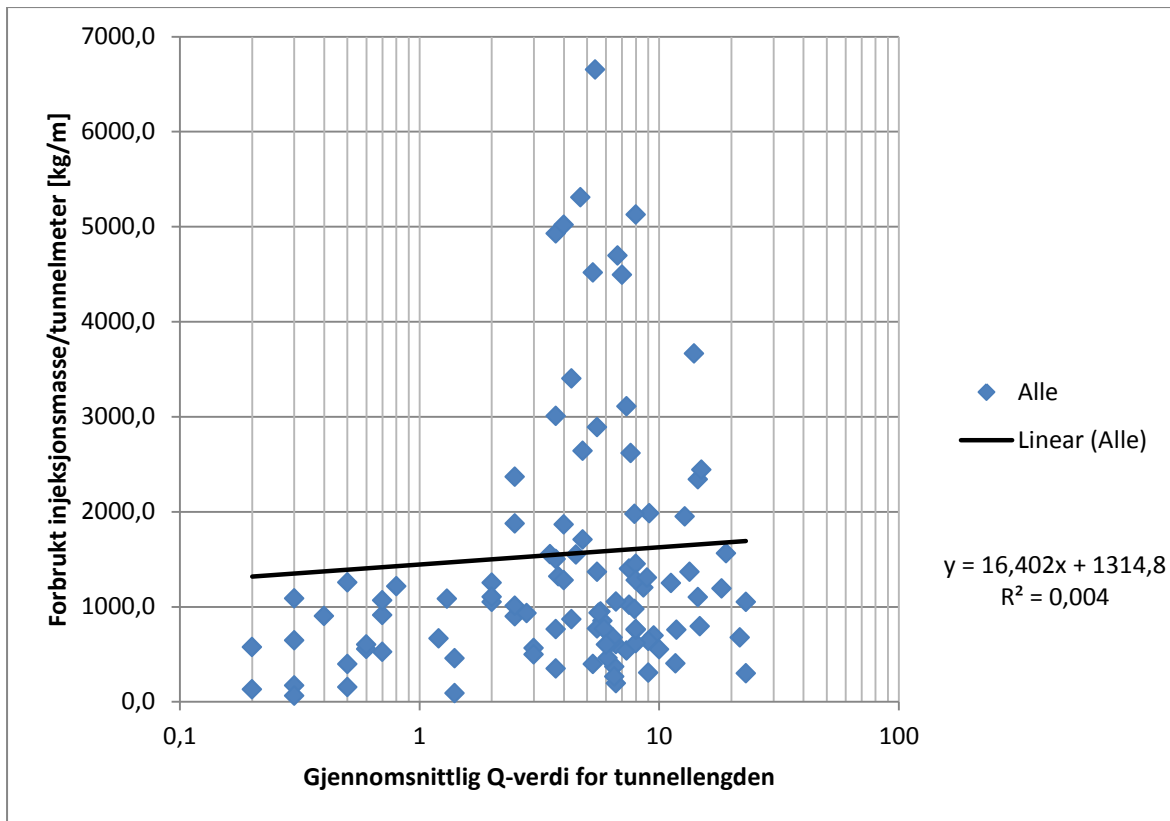
Larvikitten er som tidligere nevnt gjennomsluttet av eruptivganger som kan være enten sterkt oppknuste og omdannet til leirsoner eller mindre oppknust med høy permeabilitet. Hvilke soner av disse gangene det injiseres over kan gi stor variasjon. Sandsteinens sprekkefyllinger kan også variere fra tette sedimenterte fyllinger til siltige og sandige fyllinger med stor hydraulisk konduktivitet.

I figur 9-7 kommer det fram en forventet og naturlig klar trend mellom hvor store masser som pumpes inn og hvor lang tid det pumpes. Inngangen av masser er naturlig større desto lenger det pumpes. Det gir et bilde av at injeksjonsmassene pumpes inn med et jevnt tempo. Grafen viser at det pumpes ca. 110kg injeksjonsmidler per meter i tunnelen i timen.

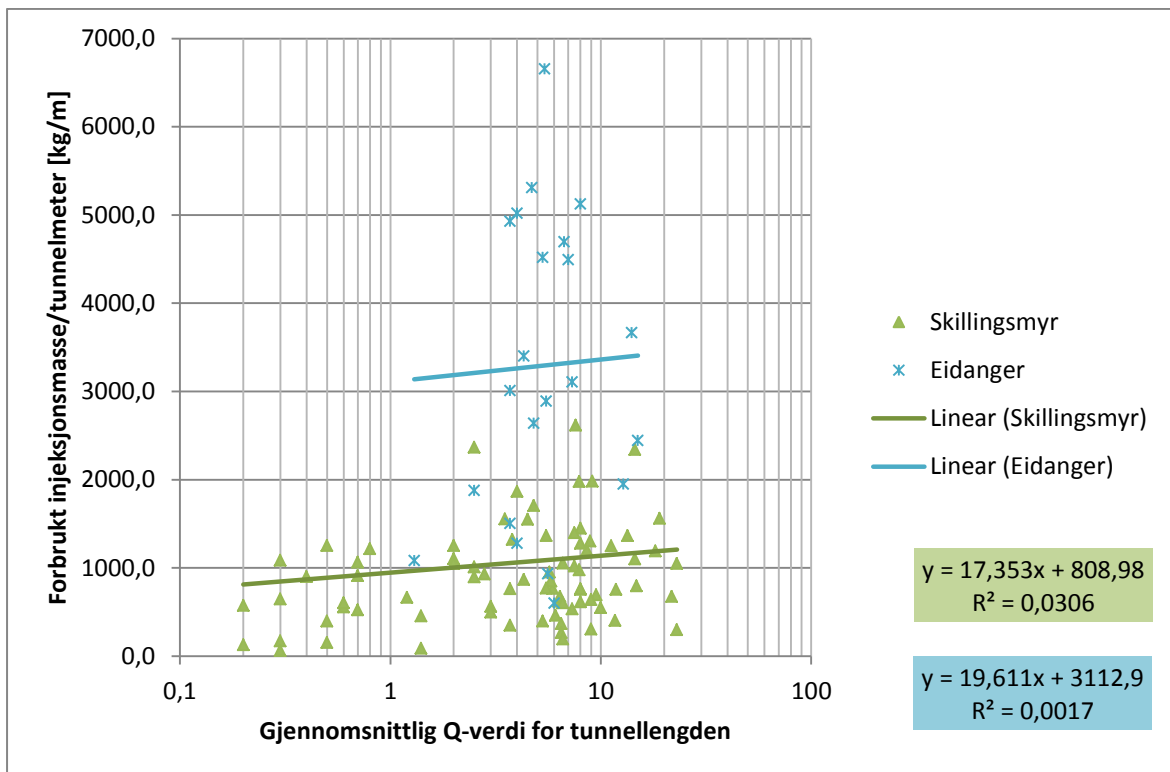
### **9.2.2 Volum av injeksjonsmasser i forhold til Q-verdi**

#### **Resultater**

Undersøkelsen av sammenheng mellom Q-verdi og forbruk av injeksjonsmasser har gitt resultatene presentert i figur 9-8 og 9-9. Detaljert oversikt over de benyttede dataene finnes i vedlegg 4.



Figur 9-8 Sammenheng mellom forbrukte injeksjonsmasser og Q-verdi for begge tunnelene samlet



Figur 9-9 Sammenheng mellom forbrukt injeksjonsmasse og Q-verdi, med tunnelene separert

## Diskusjon

I plottet for undersøkelse av sammenheng mellom Q-verdi og inngang av injeksjonsmasser generelt, figur 9-8, er det vist en stor spredning av dataene og ingen klar trend. Det er likevel tegnet inn den best tilpassede lineære sammenhengen.

Til tross for at den lineære sammenhengen har stor usikkerhet viser den en mulig forklarlig trend;

Ved de laveste Q-verdiene, der bergkvaliteten er kategorisert som dårligst, vil det i de fleste tilfeller være svakhetssoner. I slike soner er en mulig forklaring på det reduserte forbruket intenst oppknuet bergmateriale. Dette oppknuete materialet kan tette sprekker og forhindre inngang av injeksjonsmasser.

Med en økende Q-verdi øker forbruket av massene. Det vil være naturlig å tro at dette skyldes åpning av sprekker, og grovere sprekkefyllinger. Dersom det hadde vært kartlagt enda høyere Q-verdier, antas det at grafen ville snudd og gått nedover igjen. Det kommer av at det ved de høyeste Q-verdiene vil være minimalt med sprekker, og de som forekommer vil være lukket.

I plottet der tunnelene, og da også bergartene, er fraskilt hverandre, figur 9-9, kommer ulikheten i masseforbruket, diskutert i avsnitt 9.2.1, tydelig fram.

Grafen viser at de laveste Q-verdiene med lavt masseforbruk forekommer i larvikitten. Det stemmer godt overens med antakelsen om at den lave inngangen av injeksjonsmasser ved de laveste Q-verdiene kan skyldes leirmineraler i sprekkenes.

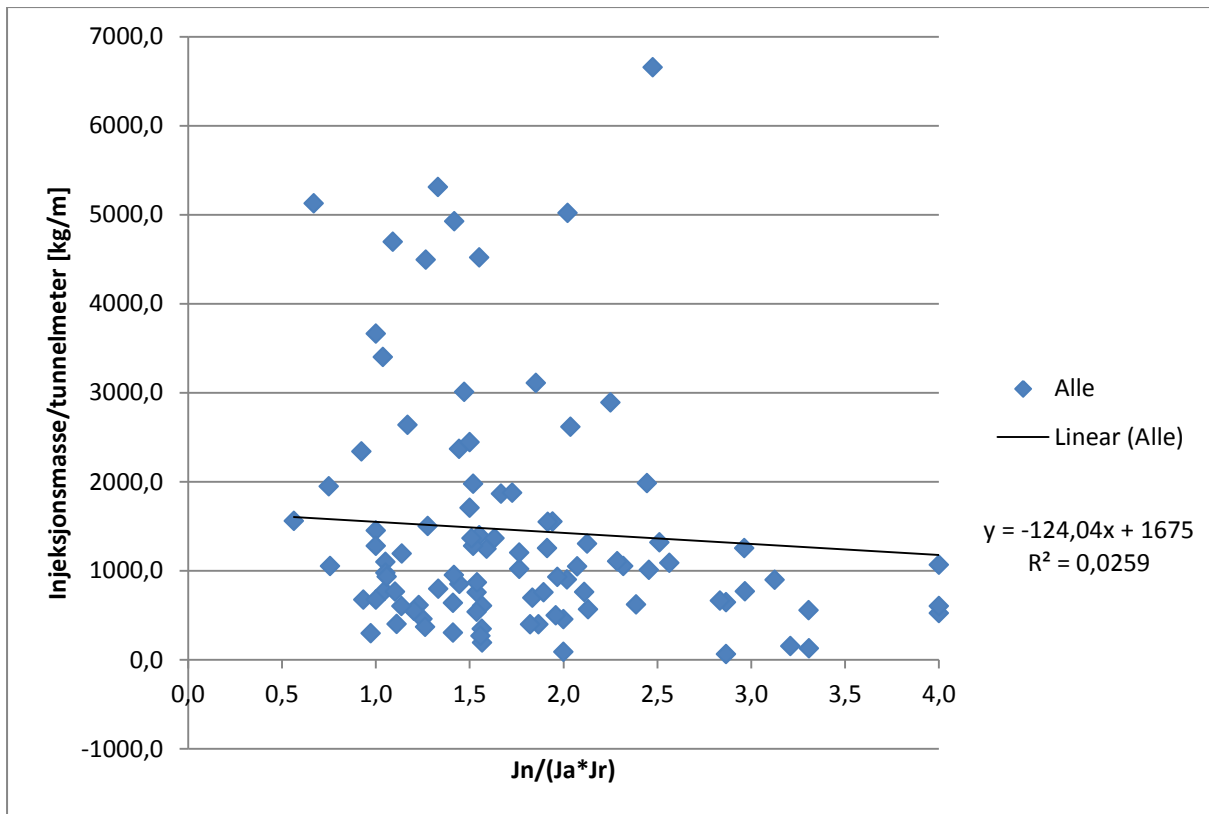
Det kommer også frem en større variasjon i masseforbruket i Eidanger tunnel, enn i Skillingsmyr tunnel, samtidig som bergkvaliteten i Eidanger tunnel har en mindre variasjon enn den har i Skillingsmyr tunnel. Det viser at det er en større sammenheng mellom forbruk av injeksjonsmasser og bergmassekvalitet i larvikitt enn i sandstein.

Til tross for stor variasjon i masseforbruk i de ulike tunnelene, ligger trendene forholdsvis parallelt, det kan tyde på at masseforbruket endrer seg tilnærmet likt ved endring i Q-verdi. Samtidig må det nevnes at begge trendene har en dårlig tilpasning med  $R^2$  på henholdsvis 0,0017 og 0,0314. Det er med andre ord ikke registrert noen klar sammenheng mellom Q-verdi og forbruk av injeksjonsmasser.

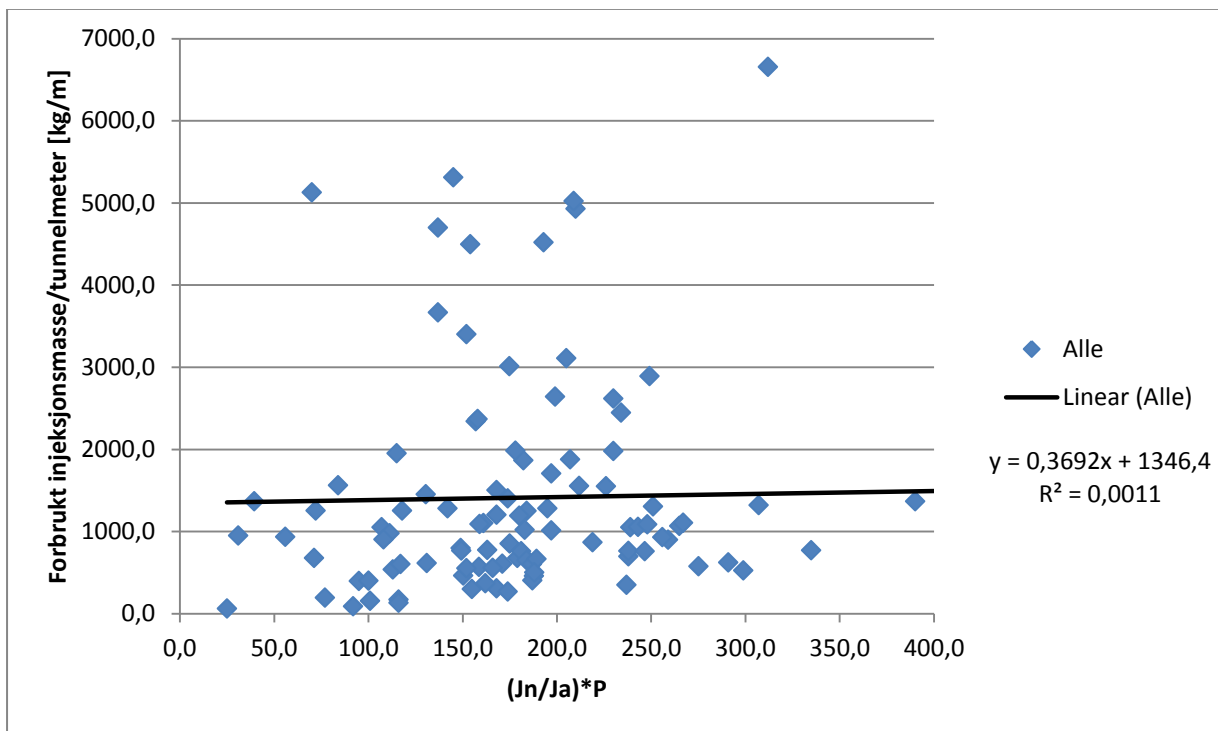
### 9.2.3 Volum av injeksjonsmasser i forhold til utvalgte parametere i Q-systemet

#### Resultater

Undersøkelsen av sammenheng mellom  $J_n/(J_a \cdot J_r)$  og forbruk av injeksjonsmasser har gitt resultatene presentert i figur 9-10, mens resultatene fra sammenhengen med  $(J_n \cdot P)/J_a$  er presentert i figur 9-11. Oversikt over dataene som er benyttet finnes i vedlegg 4.



Figur 9-10 Sammenheng mellom forbrukt injeksjonsmasse og  $J_n/(J_r \cdot J_a)$



Figur 9-11 Sammenheng mellom forbrukt injeksjonsmasse og  $(J_n \cdot P)/J_a$

## Diskusjon

I grafen, figur 9-10, viser trenden at forbruket av injeksjonsmasser reduseres med en økning i likningen  $J_n/(J_a \cdot J_r)$  som beskriver sprekkens tilstedeværelse og ulike egenskaper. Det er motsatt av forventningene om at masseforbruket skulle øke med funksjonen.

For å undersøke dette nærmere ble hver av faktorene  $J_n$ ,  $J_a$  og  $J_r$  i forhold til masseforbruk, sett nærmere på separat, vist i vedlegg 6. Ingen av disse viser noen klar trend eller sammenheng, men den best tilpassede trenden viser i alle tilfellene motsatt utfall enn forventet.

En forklaring på dette kan være fokuset under kartleggingen på stuff. Det kartlegges med hovedfokus på stabilitet og sikringsomfang, og ikke med tanke på injeksjonsbehov. I tillegg er kartleggingen utført på injisert berg. Det kan føre til at områdene oppfattes noe annerledes enn slik de opprinnelig var da injiseringen fant sted. Eksempelvis kan sprekker som opprinnelig var åpne være fylt med injeksjonsmasser, og kartlegges som tette. I tillegg er det en subjektiv kartlegging, noe som kan gi noe variasjon, men det alene vil antakeligvis ikke være nok til å snu en trend.

I grafen for undersøkelse av mulig sammenheng mellom forbruket av injeksjonsmasser og  $(J_n \cdot P)/J_a$  som beskriver forholdet mellom sprekkens tilstedeværelse, fylling og trykk som er oppnådd, vist i figur 9-11, er det en dårlig tilpasset trend, og stor spredning av data. Det vises altså ingen klar sammenheng mellom funksjonen og den forbrukte injeksjonsmassen.

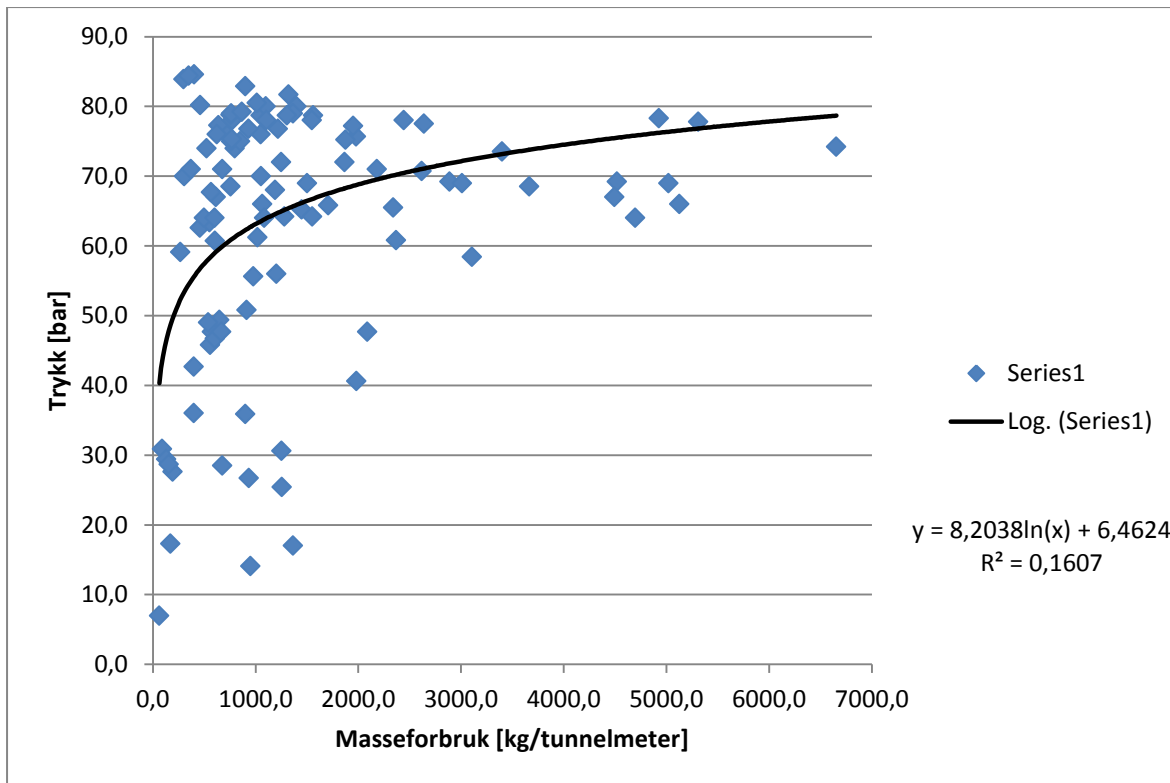
Til tross for en lite tydelig trend viser den lineære funksjonen en tendens til at et økende antall sprekkesett ( $J_n$ ), økende trykk ( $P$ ) og reduksjon av sprekkefyllinger ( $J_a$ ) i kombinasjon vil øke forbruket av injeksjonsmasser. Det skyldes trolig trykkets trykkets innvirkning.

En stor svakhet ved alle grafene der det er benyttet  $Q$ -verdier og parametere fra  $Q$ -systemet er måten disse verdiene er bestemt på. Når det brukes én verdi for områder med en lengde i overkant av 20 meter kan variasjoner innad i dette intervallet fort forsvinne. Eksempelvis kan lokale soner med både ekstremt godt berg og ekstremt dårlig berg inngå i en slik lengde, og hele sonen ender opp med å registreres med en middels bergmassekvalitet.

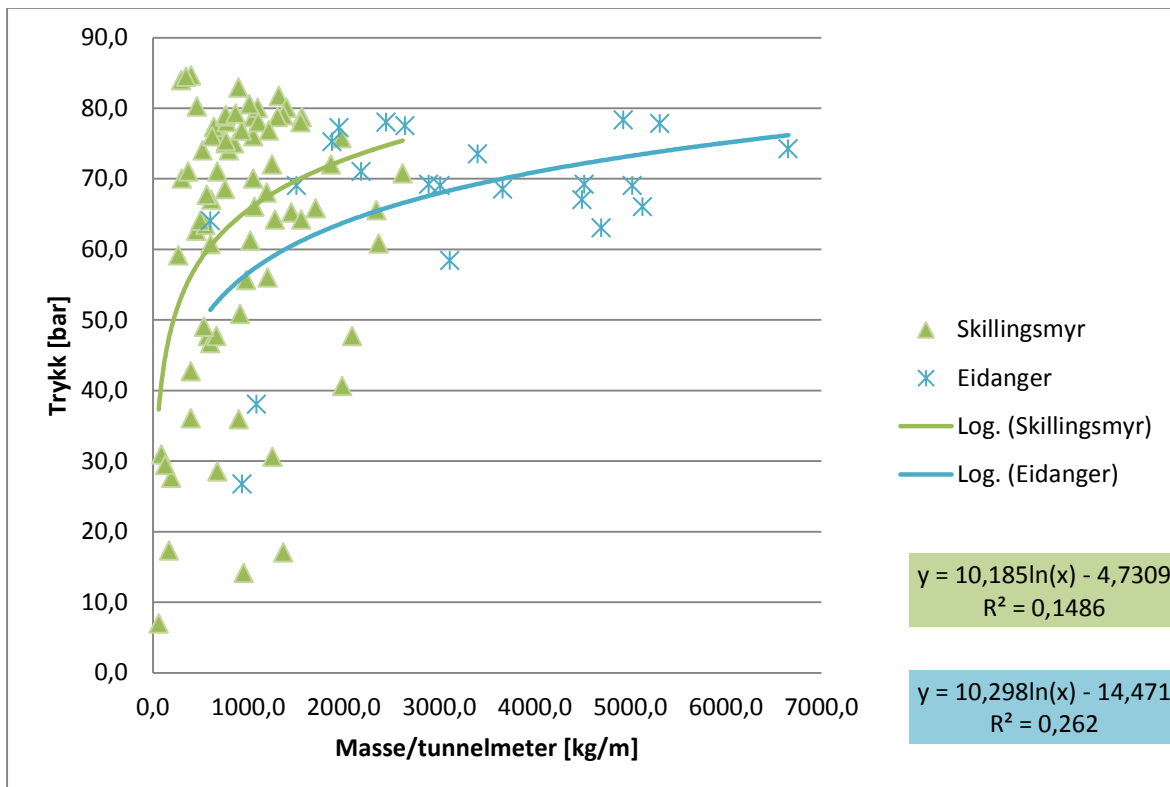
### 9.2.4 Volum av injeksjonsmasser i forhold til oppnådd trykk

#### Resultater

Resultatene fra undersøkelsen av sammenheng mellom forbruk av injeksjonsmasser og oppnådd trykk er presentert i figur 9-12 og 9-13. Oversikt over dataene som er benyttet i grafene finnes i vedlegg 1.



Figur 9-12 Sammenheng mellom forbrukte injeksjonsmasser og Q-verdi for begge tunnelene samlet



Figur 9-13 Sammenheng mellom forbrukt injeksjonsmasse og oppnådd trykk, med tunnelene separert

## Diskusjon

I plottet for undersøkelse av sammenheng mellom oppnådd trykk og inngang av injeksjonsmasser generelt, figur 9-12, er det ikke funnet noen klar sammenheng. Det har kun kommet fram tendenser, vist ved inntegnet logaritmisk trend.

Det kommer fram at forbruket av injeksjonsmasser øker med økende trykk. Det antas å komme av at et høyere trykk overviner større motstander mot inntrengning. Dette er også illustrert i vedlegg 7.

Grafen viser at masseforbruket ved høye trykk øker mye ved små trykkøkninger. Det kan komme av at det i dette datasettet kun er hentet ut data fra aktiv injeksjon. Alle skjermene er derfor forsøkt injisert opp til et trykk på 80 bar. Dermed vil også de fleste dataene, og den største variasjonen, være ved de høye trykkene.

Variasjonen i masseforbruk ved høyt trykk kan også komme av hvor vellykket den hydrauliske splittingen har vært, og hvor gode muligheter det er for åpninger og sprekker i området.

Ut fra grafen er det, som vist i tabell 9-4, forsøkt å kategorisere masseforbruket ut fra trykkene.

Tabell 9-4 Klassifisering av mengdeforbruk i forhold til trykk

Trykk [bar]	Masseforbruk [kg/m]	Klasse
<20	60 – 1370	1
20-40	90 – 1980	2
40-50	400 – 2090	3
50-60	270 – 3110	4
60-70	310 – 5130	5
>70	400 – 6650	6

I plottet der tunnelene, og da også bergartene, er fraskilt hverandre, figur 9-13, kommer det fram at det heller ikke er noen klar trend for noen av bergartene separat. Samtidig er de separate trendene forholdsvis parallelle. Det kan tolkes som at det er en viss korrelasjon, som ligger på ulike nivå ved ulike bergarter. Det kunne vært interessant å teste flere ulike bergarter, og benytte et større datasett for å undersøke dette nærmere.

Plottet viser en større variasjon i trykkoppnåelse i larvikitten enn i sandsteinen. Det kan skyldes bergets karakter, men også størrelsen på datasettene.

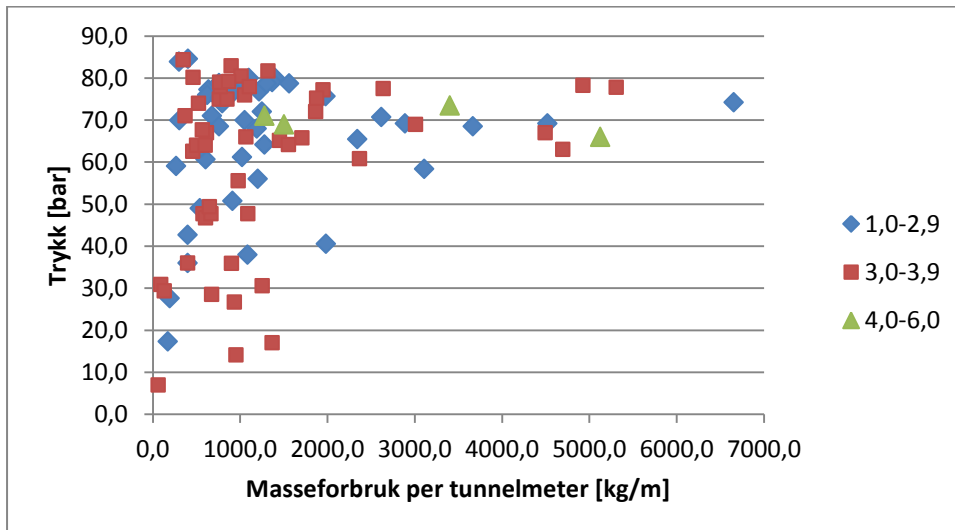
For å kunne undersøke korrelasjonen mellom trykk og inngang av injeksjonsmasser bedre, kunne det vært ønskelig å integrere data fra tunneler som er drevet med lavere stopptrykk.



## 9.2.5 Forbruk av injeksjonsmasser i forhold til trykk og sprekkefylling

### Resultater

Resultatet fra undersøkelsen om det vil være ulik korrelasjon mellom trykk og forbruk ved ulike verdier for  $J_n$ , er presentert i figur 9-14. Oversikt over dataene det er benyttet i plottet finnes i vedlegg 8.



Figur 9-14 Undersøkelse av om det forekommer noen klare strømningsveier avhengig av variasjon i  $J_n$

### Diskusjon

I plottet kommer det ikke frem noen forskjell i strømningsveier ved ulike sprekkefylling. Det kan komme av at variasjonen i sprekkefyllingen er liten, noe som igjen kan skyldes at det brukes en gjennomsnittlig verdi for  $J_n$  innenfor store intervaller.

I tillegg kan fokuset under kartleggingen også påvirke resultatene. Under kartleggingen på stoff er det fokusert på sprekkenes som gir størst problemer knyttet til stabilitet og ikke sprekkenes evne til å lede vann.

Undersøkelsen er også basert på et lite datagrunnlag.

For å kunne gjøre en bedre sammenlikning burde det vært undersøkt inngang av injeksjonsmasser ved tydelige svakhetssoner og innenfor korte intervaller avgrenset med pakkere i injeksjonshull, og kartlegging fokusert på vannførende sprekker.

## 10. Samlet diskusjon

Ved undersøkelsen av forventet kontra virkelig bergmassekvalitet er det i begge tunnelene kartlagt bedre forhold enn forventet, særlig i Eidanger tunnel. I Skillingsmyr tunnel er sammenlikningen mangelfull, da de forventede prosentandelene for de ulike bergkvalitetsklassene er basert på hele tunnelen, mens de kartlagte kun er basert på de 71% av lengden, da det var så mye som var drevet da dataene ble hentet ut.

Generelt er det ikke kommet fram noen tydelig korrelasjon mellom hverken bergartskvalitet, trykk eller utvalgte parametere og forbruk av injeksjonsmasser.

Det er likevel kommet fram noen tendenser:

- Forbruket av injeksjonsmasser har vist seg å avhenge av hva slags bergarter det injiseres i. Det indikerer at bergartenes struktur og egenskaper har betydning for muligheten til inngang av masser
- Lave inngang av injeksjonsmasser ved lave Q-vedier. Dette antas å komme av tetting av sprekker på grunn av intenst nedknust materiale i svakhetssoner.
- En svak logaritmisk korrelasjon mellom trykk og forbruk av injeksjonsmasser

Årsaken til at det ikke er funnet noen tydelige korrelasjoner mellom forbruk av injeksjonsmasser, bergkvalitet og trykk kan skyldes forenklinger og svakheter ved de benyttede modellene:

- Tilpasningen av Q-verdiene og Q-systemets parametere til en hel injeksjonslengde gir store tap av informasjon om lokale variasjoner. For å oppnå en bedre sammenlikning bør variasjonen langs intervallene tas med i beregningene. For å få en bedre kontroll på sammenlikningene kunne injeksjonsskjermene vært delt opp i seksjoner, og inngangen av masser undersøkt over mindre lengder.
- Kartleggingen med Q-systemet har fokus på stabilitet og ikke innlekkasje av vann. Det burde derfor også ideelt vært kartlagt spesifikt med fokus på områdenes vannførende egenskaper.
- Det er ikke tatt hensyn til variasjoner i v/c-forholdet. Det vil ha stor betydning på inntrengningsevnen til injeksjonsmassene og derav også masseforbruket.
- Det er ikke tatt hensyn til at det i noen av skjermene er benyttet mikrosegment, det vil gi en økt inntrengning og større forbruk av masser.
- Antall hull i skjermen er noe varierende. Det er ikke tatt hensyn til disse variasjonene, selv om et økt antall injeksjonshull kan gi større masseforbruk da hullene i seg selv skal fylles samtidig som kan gi bedre kommunikasjon med flere sprekkesystemer. Ved aktiv injeksjon skal det ideelt sett skapes kontakt mellom sprekkesett, noe som vil redusere betydningen av små variasjoner i antall injeksjonshull.
- Det er ikke tatt hensyn til at det i en liten seksjon ved Kjennåsen i Skillingsmyr tunnel er benyttet systematisk injeksjon, da det i de resterende områdene det er innhentet

data fra er injisert sporadisk. Det kan gi noe ulike forhold, da det ved systematisk injeksjon injiseres mot noe. Det fører til at trykket lettere kan oppnås og masseforbruket kan reduseres.

- Det er mange tunneler på Farriseidet-Porsgrunn prosjektet. Det ville gitt bedre sammenlikningsgrunnlag dersom flere data var brukt og hele prosjektet ferdig drevet. Det gir muligheter til innhenting av et stort datasett innenfor et lite geografisk område.

## 11. Konklusjon

- Bergmassekvaliteten er bedre enn prognosene tilsier, for de to vurderte tunnelene
- Det er ikke funnet noen klar korrelasjon mellom kartlagt bergmassekvalitet og forbruk av injeksjonsmasser
  - Parameterene i Q-systemet har ikke vist forklarbare trender i forhold til masseforbruket, noe som kan skyldes for lite datasett og forenklinger i sammenlikningsgrunnlaget.
  - Kan finnes en vag korrelasjon mellom forbruket av injeksjonsmasser og Q-verdier i svakhetssoner. Forbruket reduseres knyttet til tetting av sprekker og åpninger på grunn av intenst oppknust berg
- Klare indikasjoner på at forbruket varierer avhengig av bergarter, her larvikitt og sandstein. Men grunnlaget er for lite til å si noe om dette er gjeldene for flere ulike bergarter
- Det er observert en vag logaritmisk korrelasjon mellom oppnådd trykk og forbruk av injeksjonsmasser.

## 12. Videre arbeid

I denne oppgaven er det ikke kommet frem noen tydelige sammenhenger mellom bergmassekvalitet og forbruk av injeksjonsmasser. Det er samtidig heller ikke grunnlag for å si avkrefte noen sammenheng. For å undersøke dette videre anbefales følgende:

- Inkludere informasjon om benyttede v/c-forhold, samt injeksjonsmassene
- Gjøre en grundigere kartlegging over kortere lengder med fokus på bergets vannledende egenskaper og evne til å ta til seg injeksjonsmasser
- Benytte et større datasett med større variasjoner

For å grundigere kunne undersøke forholdet mellom trykk og inngang av injeksjonsmasser, og gi en bedre kategorisering bør det videre:

- Inkluderes informasjon om injeksjonsmaterialet
- Inkluderes data fra områder der det er injisert med lavere trykk
- Inkluderes informasjon om hvordan injeksjonsarbeidet utføres
- Inkluderes større datamengder

## Referanser

- Barton, N., 2002. *Teoretisk og empirisk forståelse av forinjisering og mulighet for redusert sikringsmengde i utvalgte tunnelstrekninger, Internrapport nr. 2323*, s.l.: Statens vegvesen, Vegdirektoratet.
- Bragel, T. H., Boyd, R. & Dahl, R., 1995. *En vandring i tid og rom: geologien i Narvik*. s.l.:Norges Geologiske Undersøkelse.
- Brattli, B., 2009. *Fysisk og kjemisk hydrogeologi - Tredje utgave*. s.l.:NTNU, Institutt for geologi og bergteknikk.
- Cesano, D., Olofsson, B. & Bagtzoglou, A. C., 2000. Parameters Regulating Groundwater Inflows into Hard Rock Tunnels - a Statistical study of the Bolmen Tunnel in Southern Sweden. *Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 2*, pp. 153-165.
- Davik, K. I. et al., 2002. *Berginjeksjon - Håndbok nr. 01*. s.l.:Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk - NFF.
- Fossen, H. & Gabrielsen, R. H., 2005. *Strukturgeologi*. s.l.:Fagbokforlaget.
- Hansen, T. F., 2013. *Oppstartsmøte injeksjon UFP05, PowerPoint presentasjon*, s.l.: Jernbaneverket.
- Harris, J. S., 1995. *Ground Freezing in Practic*. s.l.:Thomas Telford Services Ltd, Thomas Telford House, 1 Heron Quay, London E14 4JD.
- Hognestad, H. O. et al., 2010. *Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg - Håndbok nr.06*. s.l.:Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk - NFF.
- Holmøy, K. H., 2008. Significance of geological parameters for predicting water leakage in hard rock tunnels.
- Holter, K. G., 2011. *PhD / forskningsprosjekt: Vanntett permanent bergsikring til underjordsanlegg basert på membran i kombinasjon med sprøytebetong, presentasjon holdt ved Teknologidagene 13.10.11*, Trondheim: s.n.
- Holter, K. G., Bridge, R. & Tappy, O., 2010. Design and construction of permanent waterproof tunnel lining base don sprayed concrete and spray-applied double-bounded membrane. *Proseedings of 11th international conference underground constructions*, pp. 121-126.
- Jensen, E. S., 2006. *Bergarter og mineraler*. s.l.:N.W. DAMM & SØN AS.
- Jernbaneverket, 2012. *InterCity Gjør østlandet til et arbeidsmarked*. [Internett] Available at: <http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/24171/130502%20->

[%20Infom%C3%B8te%20UFP01.pdf](#)

[Funnet 6 februar 2014].

Jernbaneverket, 2013a. *Farriseidet - Porsgrunn*. [Internett]

Available at: <http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/22402/Brosjyre%20Farriseidet%20-%20Porsgrunn%202013%202.%20opplag%20web.pdf>

[Funnet 6 februar 2014].

Jernbaneverket, 2013b. *Modernisering av vestfoldbanen, Larvik - Porsgrunn på 12 minutter*. [Internett]

Available at: <http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/24171/130502%20-%20Infom%C3%B8te%20UFP01.pdf>

[Funnet 6 februar 2014].

Jernbaneverket, 2013c. *UFP05 Skillingsmyr*. [Internett]

Available at:

<http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/22399/Presentasjon%20Tom%20Frode%20Hansen.pdf>

[Funnet 6 februar 2014].

Johansson, T., 2009. *Artificial Ground Freezing in Clayey Soils - Laboratory and field studies of deformations during thawing at the Bothnia line*, s.l.: the Royal Institute of Technology (KTH), division of Soil- and Rock Mechanics.

Klüver, B. H., 2000a. *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Delprosjekt C: Tetteteknikk. Intern rapport nr. 2151*. s.l.: Statens vegvesen, Vegdirektoratet.

Klüver, B. H., 2000b. *Delprosjekt C: Tetteteknikk, Berginjeksjon, Intern rapport nr. 2151*, s.l.: Statens vegvesen, vegteknisk avdeling.

Klüver, B. H. & Kveen, A., 2004. *Berginjeksjon i praksis, Publikasjon nr 104*. s.l.: Vegdirektoratet, teknologiavdelingen.

Lombardi, G., 1985. *Some theoretical considerations on cement rock grouting*, s.l.: Lombardi Engineering Ltd.

Lombardi, G., 1996. Selecting the grouting intensity. *The International Journal on Hydropower & Dams, Volume Three, Issue Four*, pp. 62-66.

Løset, F., 2006. *Norges tunnelgeologi*. s.l.: NGL.

Mork, G., 2014. *Injeksjonsseminar UFP 08, PowerPoint presentasjon, mai 2014*, s.l.: Jernbaneverket.

Mydske, P. K. et al., 1999. *Gardemoprojektet, Evaluering av planlegging og gjennomføring*, s.l.: Statens forvaltningstjeneste, Statens trykning.

- Myrvang, A., 2001. *Bergmekanikk*. Trondheim: Norges teknisk- naturvitenskaplige universitet, NTNU, Institutt for geologi og bergteknikk.
- NGI, 2013. *Using the Q-system*. s.l.:NGI.
- Nilsen, B. & Broch, E., 2009. *Ingeniørgeologi - berg, Grunnkurskompendium*. s.l.:tapir akademisk forlag.
- Nilsen, B. & Thidemann, A., 1993. *Rock Engineering*. s.l.:Norwegian Institute of Technology, division of Hydraulical Engineering.
- Panthi, K. K., 2011. *Vann i berg, forelesning i emnet TGB4185 ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet, NTNU*, s.l.: s.n.
- Panthi, K. K., 2014a. Analysis on the pre-injection grout consumption at Strindheim Road Tunnel Project, Trondheim, Norway. *Rock Mechanics and Rock Engineering – Structures on and in Rock Masses; Eurock 2014*.
- Panthi, K. K., 2014. *Personlig kommunikasjon [Intervju]* (4 6 2014).
- Setsaa, A. & Davik, K. I., 2001. *Samfunnstjenlige vegtunneler 1998-2001 - SLUTTRAPPORT, Publikasjon nr. 97*. s.l.:Vegdirektoratet, vegteknisk avdeling.
- Solerød, A. W., 2011. *Vegvesen*. [Internett]  
Available at: <http://www.vegvesen.no/Vegprosjekter/ringvegvest/Fakta/Tunnelbygging> [Funnet 12. April 2014].
- Statens vegvesen Veg- og transport avdelingen, 2010. *Vegtunneler - Håndbok nr. 21*, s.l.: Statens vegvesen, Vegdirektoratet.
- SWECO, 2012a. *UVB Vestfoldbanen, UFP-05 Skillingsmyr, Tilbudsdokument*, s.l.: SWECO.
- SWECO, 2012b. *UVB Vestfoldbanen, UFP-07 Storbergetentreprisen, Fagrapport ingeniørgeologi*, s.l.: Jernbaneverket.
- SWECO, 2013. *UVB Vestfoldbanen, UFP-08 Eidanger, Tilbudsdokument*, s.l.: SWECO.
- Tolppanen, P. & Syrjänen, P., 2003. *hard Rock Tunnel Grouting Practice in Finland, Sweden, and Norway - Literature Study*, s.l.: Finnish Tunnelling Association.
- Trafikverket, 2010. *BanaVäg i Väst, En tidning om utbyggnaden av väg och järnväg mellan Göteborg och Trollhättan*. [Internett]  
Available at: [http://www.trafikverket.se/PageFiles/35205/projekttidning\\_nr1\\_2010.pdf](http://www.trafikverket.se/PageFiles/35205/projekttidning_nr1_2010.pdf) [Funnet 24 april 2014].



Uggerud, E. & Slinde, E., 2009. *Store Norske Leksikon*. [Internett]  
Available at: <http://snl.no/akrylamid>  
[Funnet 5 april 2014].

Weideborg, M. et al., 2001. Environmental risk assessment of acrylamide and methylolacrylamide from a grouting agent used in the tunnel construction of romeriksporten, norway. *Water Research*, pp. 2645-2652.

Åndal, T., Andersson, H. & Aasen, O., 2001. *Injeksjon - erfaringer fra utførte tunnelprosjekter*, Internrapport nr. 2233, s.l.: Statens vegvesen, Vegdirektoratet.

## Vedlegg

- Vedlegg 1 Oversikt over injeksjonsmasser og trykk
- Vedlegg 2 Tegning, sonderboring og injeksjon – Skillingsmyr tunnel
- Vedlegg 3 Tegning, sonderboring og injeksjon – Eidanger tunnel
- Vedlegg 4 Oversikt over beregnede Q-verdier i skjermene
- Vedlegg 5 Q-systemet
- Vedlegg 6 Grafisk framstilling av forholdet mellom masseforbruk, Ja, Jn og Jr
- Vedlegg 7 Grafisk framstilling av forholdet mellom trykk og masseforbruk
- Vedlegg 8 Oversikt over de ulike gruppene inndelt etter Ja
- Vedlegg 9 Oversiktstegning Skillingsmyr tunnel
- Vedlegg 10 Oversiktstegning Eidanger tunnel

## Løkka høyre

Profilnummer	Hull lengde [m]	Tunnellengde [m]	Pr.nr stopp	Volum [kg]					Tid [t]	Gj. Snitt. trykk [bar]	Masse/tunnellengde [kg/m]
				Industrisement [kg]	Mikrosement 800T [kg]	Tamcem MSS [kg]	Tamcem 60 [kg]	Totalt [kg]			
170200,1	23	22,5	170222,6	23351,9		3157,5	306,3	26815,7	36,3	68,9	1191,9
170233,5	23	22,5	170256,0	25480,2		3029,1	297,6	28806,9	30,5	64,2	1280,5
170233,0	23	22,5	170255,5	41710,1		2415,5	388,8	44514,4	33,0	75,7	1978,6
170282,0	23	22,5	170304,5	46683,6		5465,4	521,5	52670,5	36,0	65,5	2341,2
170314,8	23	22,5	170337,3	13542,7		1478,3	181,7	15202,7	16,8	71,1	675,8
170348,3	23	22,5	170370,8	14000,4		1492,0	160,4	15652,8	13,0	76,3	695,8
170382,7	23	22,5	170405,2	12939,3		1275,4	159,1	14373,8	14,0	77,3	638,9
170382,8	23	22,5	170405,2		6791,4		89,7	6881,1	15,0	70,0	305,9
170466,4	23	22,5	170488,9	15669,2		1534,8	174,7	17378,7	14,5	78,1	772,5
170500,0	23	22,5	170522,5	11983,3		1668,0	171,6	13822,9	14,0	67,0	614,4
170635,0	23	22,5	170657,5	8201,3		762,8	97,3	9061,4	8,5	84,6	402,8
170651,7	23	22,5	170674,2	16095,9		1612,5	200,3	17908,7	16,2	74,6	796,0
170669,4	23	22,5	170691,9	15346,2		1503,0	170,4	17019,6	10,4	78,8	756,5
170686,0	23	22,5	170708,5	8991,4		1242,2	138,0	10371,6	10,0	80,2	461,0
170804,0	23	22,5	170826,5	6086,3		583,5	67,9	6737,7	5,0	83,9	299,5
170820,0	23	22,5	170842,5	21223,7		2195,8	241,0	23660,5	13,0	78,7	1051,7
170888,5	23	22,5	170911,0	21442,6		2157,8	47,0	23647,4	21,0	76,9	1051,1
170923,0	23	22,5	170945,5	15503,7		1501,2	169,0	17173,9	12,0	75,4	763,4
170940,0	23	22,5	170962,5	15513,6		1520,5	176,1	17210,2	13,5	79,6	765,0

## Løkka venstre

Profilnummer	Hull lengde [m]	Tunnellengde [m]	Pr.nr stopp	Volum [kg]					Tid [t]	Gj. Snitt. trykk [bar]	Masse/tunnellengde [kg/m]
				Industrisement [kg]	Mikrosement 800T [kg]	Tamcem MSS [kg]	Tamcem 60 [kg]	Totalt [kg]			
169382,5	23	22,5	169405,0	9202,1		943,0	122,4	10267,5	10,0	62,6	456,4
169382,5	23	22,5	169405,0		1998,0		26,4	2024,4	3,0	30,9	90,0
169415,2	23	22,5	169437,7	12303,2		1181,6	136,6	13621,4	8,0	60,7	605,5
169415,2	23	22,5	169437,7		4315,6		57,0	4372,6	7,0	27,6	194,4
169428,1	23	22,5	169450,6	20705,8		2034,7	217,8	22958,3	17,0	61,2	1020,5
169497,0	23	22,5	169519,5	26679,6		2705,8	326,6	29712,0	23,0	81,7	1320,7
169547,0	23	22,5	169569,5	28294,0		2890,3	299,6	31483,9	16,0	80,4	1399,4
169647,7	23	22,5	169670,2	17124,3		1826,5	186,6	19137,4	13,0	75,9	850,6
169665,0	23	22,5	169687,5	7078,0		679,3	88,6	7845,9	10,0	84,4	348,7
169745,0	23	22,5	169767,5	25173,4		2656,5	262,2	28092,1	14,5	72,6	1248,7
169762,0	23	22,5	169784,5	21902,7		2564,7	275,2	24742,6	18,3	80,6	1099,8
169848,2	23	22,5	169870,7	18202,9		1811,9	213,7	20228,5	16,0	82,9	899,1
169969,0	23	22,5	169991,5	27535,0		2897,3	312,4	30744,7	19,0	79,6	1366,6
170003,2	23	22,5	170025,7	31100,2		3650,3	373,8	35124,3	28,5	78,7	1561,3

## Kjennåsen høyre

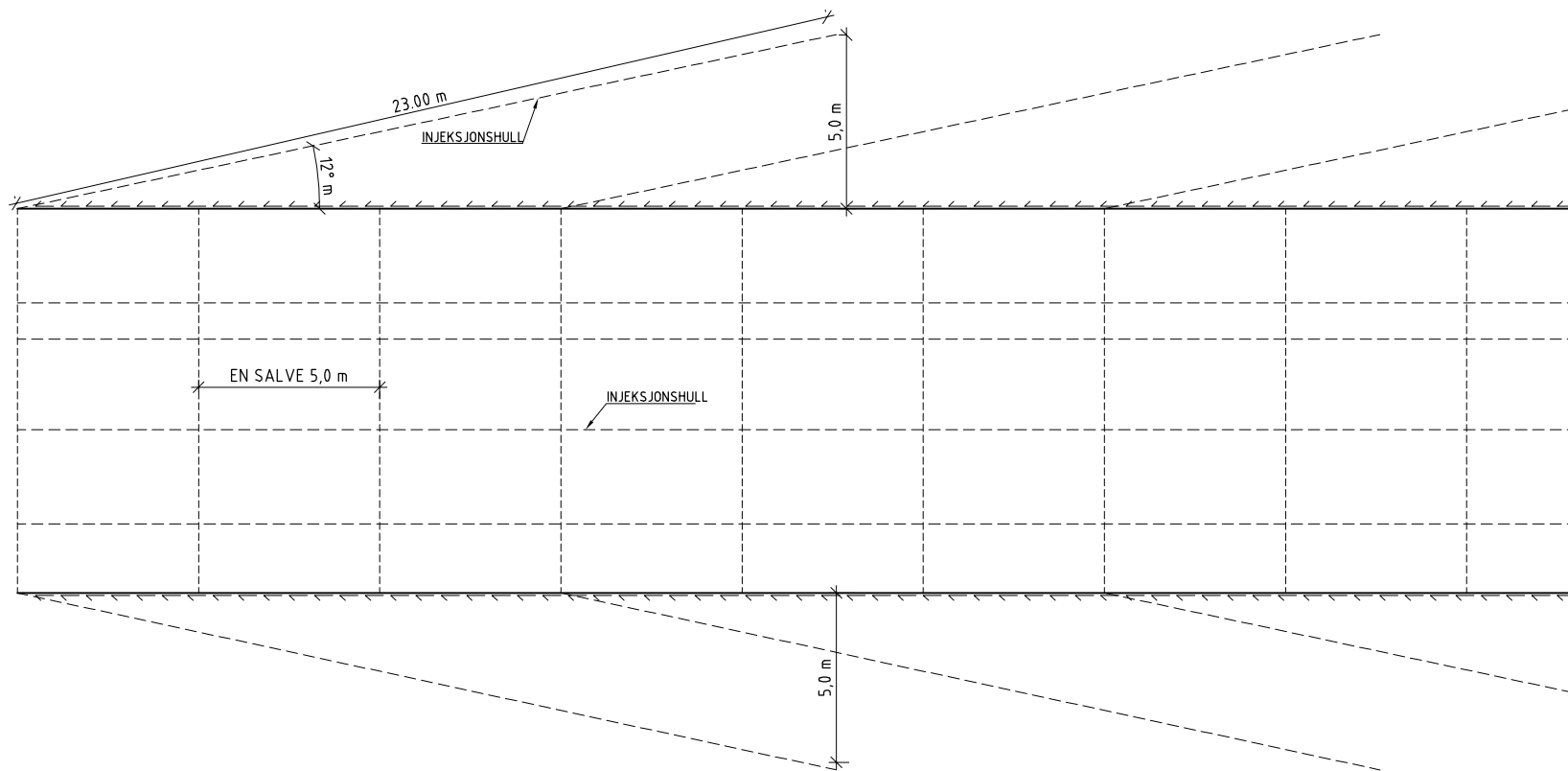
Profilnummer	Hull lengde [m]	Tunnellengde [m]	Pr.nr stopp	Volum [kg]					Tid [t]	Gj. Snitt. trykk [bar]	Masse/tunnellengde [kg/m]
				Industrisement [kg]	Mikrosegment 800T [kg]	Tamcem MSS [kg]	Tamcem 60 [kg]	Totalt [kg]			
172085,0	23	22,5	172107,5	25114,8		2776,2	293,2	28184,2	22,0	30,6	1252,8
172175,0	23	22,5	172197,5		3814,8		50,4	3865,2	10,0	17,3	171,8
172177,2	23	22,5	172199,7	11629,8		1166,5	144,9	12941,2	13,5	47,7	575,2
172186,3	23	22,5	172208,8		2885,1		38,1	2923,2	8,5	29,4	129,9
172186,3	26	25,4	172211,7		1565,8		20,7	1586,5	6,0	7,0	62,4
172186,3	26	25,4	172211,7	14724,5		1588,5	165,0	16478,0	15,0	49,4	647,9
172196,0	17	16,6	172212,6	6013,8	8190,9	606,1	167,5	14978,3	24,5	35,9	900,8
172196,0	14	13,7	172209,7	25529,7		2779,6	281,0	28590,3	16,5	47,7	2087,8
172205,5	14	13,7	172219,2		5375,4		71,0	5446,4	12,0	42,7	397,7
172206,6	21	20,5	172227,1	22985,4		2546,7	260,1	25792,2	19,6	25,4	1255,6
172214,0	23	22,5	172236,5	11279,4		1124,6	130,5	12534,5	13,0	45,8	557,2
172214,0	21	20,5	172234,5		3149,7		41,6	3191,3	9,5	28,7	155,4
172224,0	23	22,5	172246,5	10616,3		1024,1	137,9	11778,3	13,5	74,9	523,5
172224,0	23	22,5	172246,5	21280,5		2434,0	272,6	23987,1	18,0	66,4	1066,2
172238,0	23	22,5	172260,5	12217,7		1216,6	161,7	13596,0	11,6	46,7	604,3
172254,0	23	22,5	172276,5	13365,5		1431,6	185,3	14982,4	12,0	47,7	666,0
172270,0	23	22,5	172292,5	18452,8		2243,3	250,4	20946,5	16,5	76,8	931,1
172287,0	23	22,5	172309,5	11210,3		1053,0	137,6	12400,9	11,7	63,4	551,2
172302,0	23	22,5	172324,5	15344,5		1539,9	160,8	17045,2	10,0	68,5	757,7
172318,2	23	22,5	172340,7	12660,6		1203,0	142,9	14006,5	8,5	76,4	622,6
172336,0	23	22,5	172358,5	13728,8		1296,8	167,4	15193,0	9,3	28,5	675,3
172353,5	23	22,5	172376,0	5487,3		467,2	65,8	6020,3	5,0	59,1	267,6
172371,0	23	22,5	172393,5	15585,6		1536,9	163,9	17286,4	11,5	75,3	768,4
172404,0	23	22,5	172426,5	26442,1		2652,0	270,5	29364,6	16,0	78,7	1305,2
172541,0	23	22,5	172563,5	10183,4		936,5	124,1	11244,0	8,0	64,1	499,8
172559,0	23	22,5	172581,5	22054,1		2475,2	332,8	24862,1	28,0	78,0	1105,1
172588,0	23	22,5	172610,5	30110,0		4344,7	405,6	34860,3	19,0	78,9	1549,5
172606,4	23	22,5	172628,9	8073,2		766,1	114,9	8954,2	11,0	36,7	398,0

## Kjennåsen venstre

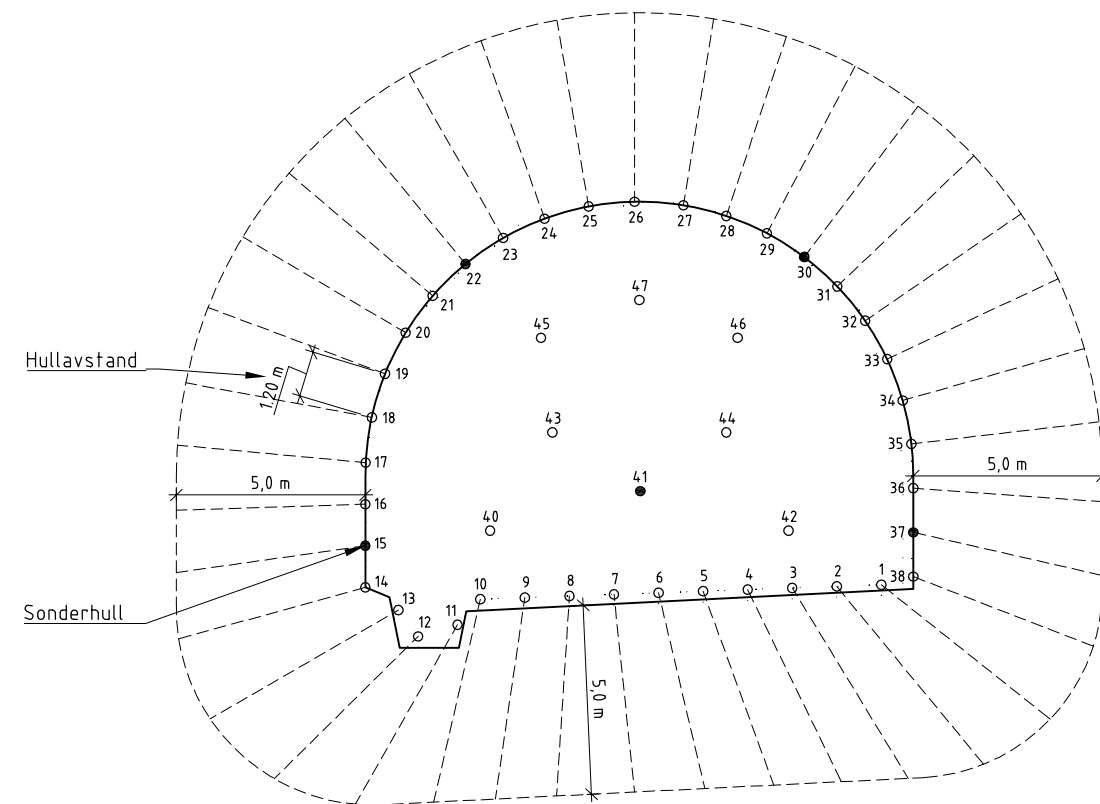
Profilnummer	Hull lengde [m]	Tunnellengde [m]	Pr.nr stopp	Volum [kg]					Tid [t]	Gj. Snitt. trykk [bar]	Masse/tunnellengde [kg/m]
				Industrisement [kg]	Mikrosement 800T [kg]	Tamcem MSS [kg]	Tamcem 60 [kg]	Totalt [kg]			
171626,2	23	22,5	171648,7	37512,8		4019,9	426,8	41959,5	24,0	72,9	1865,1
171642,0	23	22,5	171664,5	21220,8		2234,3	233,6	23688,7	11,5	70,1	1053,0
171660,0	23	22,5	171682,5	39788,0		4397,1	430,8	44615,9	18,5	40,6	1983,2
171676,0	23	22,5	171698,5	24192,3		2579,1	280,9	27052,3	15,5	56,0	1202,5
171761,0	23	22,5	171783,5	10932,9		1023,8	128,3	12085,0	11,5	49,0	537,2
171772,8	23	22,5	171795,3	27687,9		2762,4	292,6	30742,9	13,0	17,4	1366,5
171789,0	23	22,5	171811,5	19303,8		1880,0	210,8	21394,6	11,0	14,1	951,0
171806,2	23	22,5	171828,7	34565,5		3489,7	339,0	38394,2	19,0	65,8	1706,6
171841,5	23	22,5	171864,0	52074,0		6293,2	501,2	58868,4	29,0	70,7	2616,7
171875,2	23	22,5	171897,7	20559,3		1950,7	244,9	22754,9	16,5	80,5	1011,4
171878,0	23	22,5	171900,5	11509,6		1112,3	129,9	12751,8	7,5	67,7	566,8
171912,0	23	22,5	171934,5	29357,5		2968,9	300,8	32627,2	12,9	65,2	1450,3
171929,0	23	22,5	171951,5	17426,2		1888,2	212,5	19526,9	12,0	79,2	868,0
171945,8	23	22,5	171968,3	7481,2		751,6	91,7	8324,5	9,0	71,6	370,0
172037,8	23	22,5	172060,3	19769,5		2007,9	221,9	21999,3	13,3	55,6	977,9
172102,0	23	22,5	172124,5	31159,7		3446,2	344,6	34950,5	17,7	64,2	1553,5
172119,7	14	13,7	172133,4	29113,4		3015,8	293,5	32422,7	18,8	60,8	2367,6
172136,0	26	25,4	172161,4	27952,7		2714,7	302,5	30969,9	15,7	76,8	1217,8
172156,0	26	25,4	172181,4	20744,6		2193,0	283,2	23220,8	18,8	50,8	913,1

## Eidanger:

Profilnummer	Hull lengde [m]	Tunnellengde [m]	Pr.nr stopp	Volum [kg]						Tid [t]	Gj. Snitt. trykk [bar]	Masse/tunnelmeter [kg/m]
				Industrisement [kg]	Mikrosement 800T [kg]	SP 1,5% av sementvekt [kg]	Meyco MS 660 (Mikrosilika) 10% av sementvekt [kg]	Meyco SA 162 akselerator [kg]	Totalt [kg]			
179984,0	23	22,5	180006,5	49301		740	4930		54971	22,1	78,1	2443,4
179967,8	23	22,5	179990,3	73946		1109	7395		82450	33,1	68,5	3664,9
179952,5	23	22,5	179975,0	39341		590	3934		43865	24,1	77,2	1949,8
179935,6	23	22,5	179958,1	62722		941	6272		69935	28,1	58,4	3108,6
179918,6	23	22,5	179941,1	134260		2014	13426		149700	54,0	74,2	6654,1
179903,9	23	22,5	179926,4	107130		1607	10713		119450	51,1	77,8	5309,5
179876,0	20	19,6	179895,6	79283		1189	7928		88400	38,7	69,2	4518,7
179830,7	23	22,5	179853,2	18859		283	1886		21028	19,6	26,7	934,7
179809,0	23	22,5	179831,5	53267		799	5327		59393	30,0	77,5	2640,0
179786,0	23	22,5	179808,5	58297		874	5830		65001	33,9	69,2	2889,3
179764,4	23	22,5	179786,9	60719		911	6072		67702	29,4	69,9	3009,3
179749,0	23	22,5	179771,5	37880		568	3788		42236	32,3	75,2	1877,4
179732,5	23	22,5	179755,0	30336		455	3034		33825	17,1	69,4	1503,5
179717,5	23	22,5	179740,0	68638		1030	6864		76532	36,9	73,5	3401,8
179702,0	23	22,5	179724,5	44000		660	4400		49060	26,3	71,4	2180,7
179687,0	23	22,5	179709,5	99725		1451	9673		110849	52,0	78,3	4927,2
179670,0	23	22,5	179692,5	101299		1519	10130		112948	46,5	69,1	5020,5
179656,0	23	22,5	179678,5	90689		1360	9069		101118	37,5	67,6	4494,7
179639,0	23	22,5	179661,5	103440		1552	10344		115336	39,9	66,1	5126,6
179624,0	23	22,5	179646,5	12162		181	1216		13559	11,1	64,4	602,7
179607,0	23	22,5	179629,5	94767		1422	9477		105666	42,6	63,0	4696,8
179433,0	24	23,5	179456,5	22831		342	2283		25456	15,6	38,2	1084,4



**LENGDESNIITT**  
1:100



**SNITT**  
1:100

TABELL OVER HULLANSETT, RETNING I FORHOLD TIL TUNNELAKSEN OG LENGDER

HULL NR.	PRIMÆRSKJERM	TUNNELAKSE	LENGDE
SÅLE: 1 - 13		12°	23m
VEGG/HENG: 14 - 38		12°	23 m
STUFF: 40 - 47		0°	23 m
<b>SONDERBORHULL</b>			
TETTHETSKLASSE 1: INGEN SYSTEMATISK SONDERBORING			
TETTHETSKLASSE 2: BORES SYSTEMATISK SOM HULL NR. 15, 22, 30, 37, 41			

TABELL OVER TETTHETSKLASSE OG INJEKSJON I ULIKE DELSTRENINGER I HOVEDTUNNEL

Tetthetsklasse	Krav til lekkasje inn i tunnelen	Prognoser for tetthetsklasser og injeksjon i hovedtunnelen			Tettestrategi
Tetthetsklasse 1	maks. 10 l/min	Skillingsmyr tunnel pelnr. 171,200 – pelnr. 171,350	150 m	380 m	Systematisk injeksjon
		Skillingsmyr tunnel pelnr. 172,100 – pelnr. 172,150	50 m		
		Skillingsmyr tunnel pelnr. 172,210 – pelnr. 172,390	180 m		
Tetthetsklasse 2	maks. 20 l/min	Skillingsmyr tunnel pelnr. 169,300 – pelnr. 171,200	1900 m	4010 m	Sporadisk (behovsprøvd) forinjeksjon
		Skillingsmyr tunnel pelnr. 171,350 – pelnr. 172,100	750 m		
		Skillingsmyr tunnel pelnr. 172,150 – pelnr. 172,210	60 m		
		Skillingsmyr tunnel pelnr. 172,390 – pelnr. 173,080	415 m		
		Ønnsåsen tunnel pelnr. 173,500 – pelnr. 174,090	590 m		
		Storberget tunnel pelnr. 174,455 – pelnr. 174,750	295 m		

**FORKLARINGER**

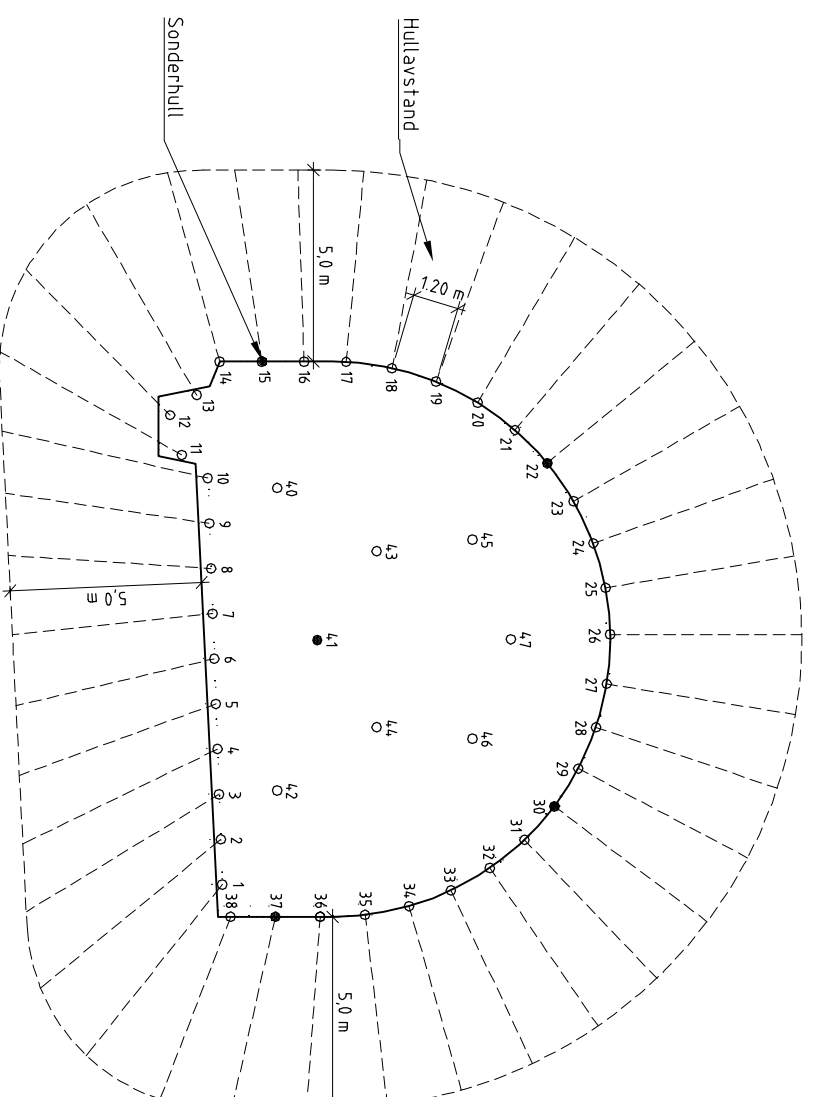
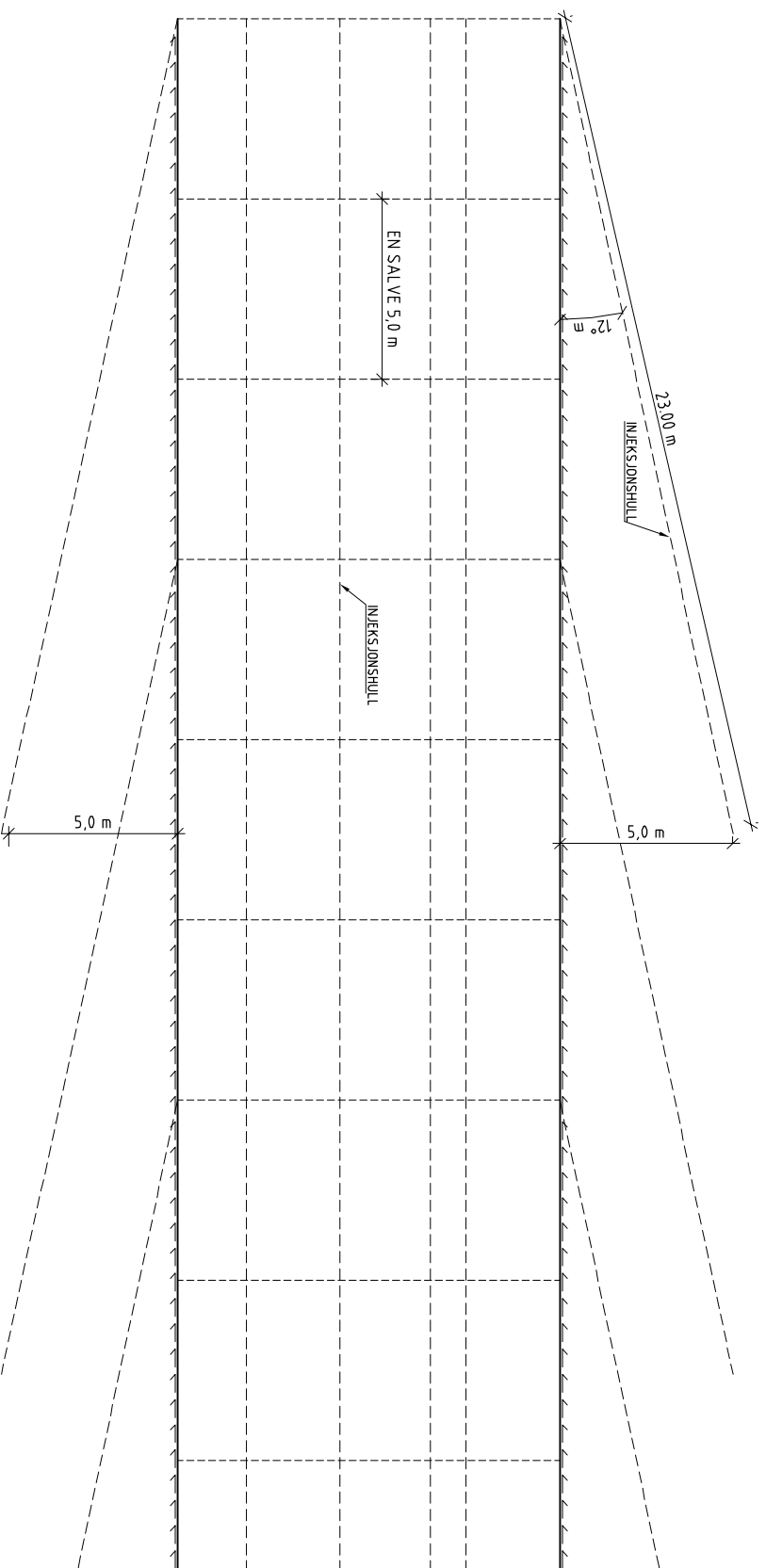
- Injeksjonshull
- Injeksjonshull
- Systematiske sonderborhull ved sporadisk forinjeksjon. Inngår som del av eventuell injeksjonsskjerm. Ellers som injeksjonshull.

**BESTEMMELSER**

- Injeksjonshullene bores 23 meter lange og med en vinkel 12 grader med tunnelaksen slik at hullene er lokalisert 5 meter radielt utenfor teoretisk sprengningsprofil. Hullavstand ved ansett er 1,2 meter.
- I hovedtunnelen og ved andre sprengningsprofiler må skjermgeometri tilpasses etter avtale med byggherren. Videre vil plassering, antall, retning og lengder av injeksjonshull og sonderborhull tilpasses fortløpende etter geologi og lokale lekkasjeforhold. Dette er forhold som vurderes av byggherrens geolog. Injeksjonsopplegg er generelt et fleksibelt system. Endringer må forventes.
- Injeksjonsopplegget for hver enkelt injeksjonsskjerm er i utgangspunktet likt for tetthetsklasse 1 og 2. Men ved systematisk forinjeksjon og tetthetsklasse 1 sonderbores det ikke systematisk, men kun etter avtale med byggherre. Ved sporadisk forinjeksjon og tetthetsklasse 2 skal byggherren ta beslutning om injeksjon på bakgrunn av innlekkasje av vann på stoff-flaten eller fra sonderborhull. Disse bores da systematisk og vil inngå som en del av injeksjonsskjermer dersom den blir etablert.
- Injeksjon for delstrekninger gitt ovenfor er antagelser og kan bli endret.

DK	JUSTERT TITTELFELT	16.5.2013	KNSK	GBI	JSB
DK	ARBEIDSTEGNING	31.8.2012	KNSK	GBI	JSB
DB	ANBUDESTEGNING	27.4.2012	KNSK	GBI	JSB
Rev.	Revisjonen gjelder	Dato	Tegnet av	Kontrollert av	Godkjent av
	BYGGEPLAN UNDERBYGNING - GEOLOGI SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL PRINSIPPTEGNING	Målestokk 1:100	Oppdragsgiver Jon S. Bævdal	Oppdragsleder Jon S. Bævdal	163940
	MODERNISERING AV VESTFOLDBANEN 12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	Tegningsnummer UVB-22-V-31050	Prosjekt Erfekt 3	Produkt UVB-22-V-31050.dwg	Rev. 02C
		Tegningsnummer			





### Vedlegg 3

TABELL OVER HULLANSETT, RETNING I FORHOLD TIL TUNNELAKSEN OG LENGDER

HULL NR.	TUNNELAKSE	LENGDE
PRIMÆRSKJERM		
SÅLE: 1-13	12°	23m
VEGG/HENG: 14 - 38	12°	23 m
STUFF: 40 - 47	0°	23 m
<b>SONDERBORHULL</b>		
TETTHETSKLASSE 1: INGEN SYSTEMATISK SONDERBORING		
TETTHETSKLASSE 2: BORES SYSTEMATISK SOM HULL NR. 15, 22, 30, 37, 41		

TABELL OVER TETTHETSKLASSER OG INJEKSJON I ULIKE DELSTRENINGER I HOVEDTUNNELN

Tetthetsklasse	Krav til lekkasje inn i tunnelen	Prognoser for tetthetsklasser og injeksjon i hovedtunnelen	Tettestrategi
Tetthetsklasse 1	maks. 10 l/min	Eidangertunnelen pelnr. 180,100 – pelnr. 181,130	Systematisk injeksjon
Tetthetsklasse 2	maks. 20 l/min	Eidangertunnelen pelnr. 179,940 – pelnr. 180,100	Sporadisk (behovsprøvd) injeksjon
		Eidangertunnelen pelnr. 181,130 – pelnr. 181,460	330 m

#### FORKLARINGER

- Injeksjonshull
  - Injeksjonshull
  - Systematiske sonderborhull ved sporadisk forinjeksjon
- Inngår som del av eventuelt injeksjonsskjem. Ellers som injeksjonshull.

#### BESTEMMELSER

- Injeksjonshullene boret 23 meter lange og med en vinkel 12 grader med tunnelaksen slik at hullendene er lokalisert 5 meter radielt utenfor teoretisk sprengningsprofil. Hullavstand ved ansett er 12 meter.
- I hovedtunnelen og ved andre sprengningsprofiler må skjermgeometri tilpasses etter avtale med byggherren. Videre vil plassering, antall, retning og lengder av injeksjonshull og sonderborhull tilpasses fortløpende etter geologi og lokale lekkasjeforhold. Dette er forhold som vurderes av byggherrens geolog. Injeksjonsopplegg er generelt et fellesbait system. Endringer må forvenhes
- Injeksjonsopplegget for hver enkelt injeksjonsskjerm er i utgangspunktet likt for tetthetsklasse 1 og 2. Men ved systematisk forinjeksjon og tetthetsklasse 1 sonderboret det ikke systematisk, men kun etter avtale med byggherren. Ved sporadisk forinjeksjon og tetthetsklasse 2 skal byggherren ta beslutning om injeksjon på bakgrunn av innlekkasje av vann på stoff-flaten eller fra sonderborhull. Disse boret da systematisk og vil inngå som en del av injeksjonsskjermen dersom den blir etablert.
- Injeksjon for delstretninger gift overfor er anngjøser og kan bli endret.

BYGGERPLAN		Tegningsnr.		Rev.	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		UVR-22-V-34050		01C	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		Tegningsdato		Tegningsnr.	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	
SONDERBORING OG INJEKSJON, HOVEDTUNNEL		Tegningsnr.		Rev.	
No. Prosjektgjører		Tegningsnr.		Rev.	
BYGGERPLAN		UVR-22-V-34050		01C	
UNDBBYGNING - GEOLOGI		Tegningsdato		Tegningsnr.	
PLAN OG PROFIL, PRINSIPPTEGNING		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN		12.2 TELEMARK GRENSE - PORSGRUNN	

## Vedlegg 4

### Løkka Høyre

Profilnummer	Hull lengde [m]	Q-verdi	RQD	Jn	Jr	Ja	Injeksjonsmasse/tunnelmeter	Jn/(Ja*Jr)	Trykk (P)	(Jn/Ja)*P
169382,5	23	1,4	66,7	10,2	1,5	3,4	456,4	2,0	62,6	187,8
169382,5	23	1,4	66,7	10,2	1,5	3,4	90,0	2,0	30,9	92,7
169415,2	23	6,6	78,3	7,9	1,8	2,8	605,5	1,6	60,7	171,3
169415,2	23	6,6	78,3	7,9	1,8	2,8	194,4	1,6	27,6	77,9
169428,1	23	7,5	81,1	8,4	1,7	2,8	1020,5	1,8	61,2	183,6
169497,0	23	3,8	76,3	11,3	1,5	3	1320,7	2,5	81,7	307,7
169547,0	23	7,5	85,3	6,3	1,4	2,9	1399,4	1,6	80,4	174,7
169647,7	23	5,8	73,8	7,4	1,6	3,2	850,6	1,4	75,9	175,5
169665,0	23	3,7	70	10,7	1,8	3,8	348,7	1,6	84,4	237,7
169745,0	23	11,2	78,1	5,6	1,6	2,2	1248,7	1,6	72,6	184,8
169762,0	23	14,5	84,2	5,6	1,9	2,8	1099,8	1,1	80,6	161,2
169848,2	23	2,5	74,6	10	1	3,2	899,1	3,1	82,9	259,1
169969,0	23	13,4	69,2	9,8	3	2	1366,6	1,6	79,6	390,0
170003,2	23	19,1	81,9	3	1,9	2,8	1561,3	0,6	78,7	84,3

### Løkka Venstre

Profilnummer	Hull lengde [m]	Q-verdi	RQD	Jn	Jr	Ja	Injeksjonsmasse/tunnelmeter	Jn/(Ja*Jr)	Trykk (P)	(Jn/Ja)*P
170200,1	23	18,2	81,6	5,5	2,3	2,1	1191,9	1,1	68,9	180,5
170233,5	23	8	73,7	7,9	2	2,6	1280,5	1,5	64,2	195,1
170233,0	23	7,9	73,8	7,9	2	2,6	1978,6	1,5	75,7	230,0
170282,0	23	14,5	81	6	2,6	2,5	2341,2	0,9	65,5	157,2
170314,8	23	21,7	82,4	5,3	2,7	2,1	675,8	0,9	71,1	179,4
170348,3	23	9,5	68,9	7,8	1,7	2,5	695,8	1,8	76,3	238,1
170382,7	23	9,3	80,3	6	1,7	2,5	638,9	1,4	77,3	185,5
170382,8	23	9,3	80,3	6	1,7	2,5	305,9	1,4	70,0	168,0
170466,4	23	5,5	64,5	6,7	2	3,2	772,5	1,0	78,1	163,5
170500,0	23	8,2	85,2	5,9	1,6	3	614,4	1,2	67,0	131,8
170635,0	23	11,7	82,6	6	2	2,7	402,8	1,1	84,6	188,0
170651,7	23	14,8	85,2	4,4	1,5	2,2	796,0	1,3	74,6	149,2
170669,4	23	8,3	83,8	6	1,5	2,6	756,5	1,5	78,8	181,8
170686,0	23	6,1	77,7	6	1,5	3,2	461,0	1,3	80,2	150,4
170804,0	23	23	91,2	3,7	1,9	2	299,5	1,0	83,9	155,2
170820,0	23	23	87,7	3	1,8	2,2	1051,7	0,8	78,7	107,3
170888,5	23	2	50,9	11,2	1,5	3,6	1051,1	2,1	76,9	239,2
170923,0	23	3,7	65,6	9,5	1,5	3	763,4	2,1	75,4	238,8
170940,0	23	8,7	81,6	6	1,7	3,2	765,0	1,1	79,6	149,3

## Kjennåsen høyre

Profilnummer	Hull lengde [m]	Q-verdi	RQD	Jn	Jr	Ja	Injeksjonsmasse/tunnelmeter	Jn/(Ja*Jr)	Trykk (P)	(Jn/Ja)*P
171626,2	23	4,9	66,3	7,5	1,5	3	1865,1	1,7	72,9	182,3
171642,0	23	6,6	73,4	8	1,5	2,3	1053,0	2,3	70,1	243,8
171660,0	23	9,1	73,2	8,8	1,8	2	1983,2	2,4	40,6	178,6
171676,0	23	8,6	77,9	7,2	1,7	2,4	1202,5	1,8	56,0	168,0
171761,0	23	7,3	74,6	6	1,5	2,6	537,2	1,5	49,0	113,1
171772,8	23	5,5	73,5	6,8	1,5	3	1366,5	1,5	17,4	39,4
171789,0	23	5,7	71,7	6,8	1,6	3	951,0	1,4	14,1	32,0
171806,2	23	4,8	65,2	9	2	3	1706,6	1,5	65,8	197,4
171841,5	23	7,6	73,8	7,5	1,6	2,3	2616,7	2,0	70,7	230,5
171875,2	23	2,5	56,8	8,1	1	3,3	1011,4	2,5	80,5	197,6
171878,0	23	3	59	7,5	1,1	3,2	566,8	2,1	67,7	158,7
171912,0	23	8,2	74,7	6	2	3	1450,3	1,0	65,2	130,4
171929,0	23	4,3	65,2	9,7	1,8	3,5	868,0	1,5	79,2	219,5
171945,8	23	6,5	73,8	7,5	1,8	3,3	370,0	1,3	71,6	162,7
172037,8	23	7,9	75,3	6	1,9	3	977,9	1,1	55,6	111,2
172102,0	23	3,5	58,3	9,9	1,7	3	1553,5	1,9	64,2	211,9
172119,7	14	2,5	43	9,1	1,8	3,5	2367,6	1,4	60,8	158,1
172136,0	26	0,8	45,4	29,9	1,3	2,6	1216,8	8,8	76,8	883,2
172156,0	26	0,7	42,2	35,6	1,2	2,1	913,1	14,1	50,8	861,2

## Kjennåsen venstre

Profilnummer	Hull lengde [m]	Q-verdi	RQD	Jn	Jr	Ja	Injeksjonsmasse/tunnelmeter	Jn/(Ja*Jr)	Trykk (P)	(Jn/Ja)*P
172085,0	23	2	49,4	13,1	1,3	3,4	1252,8	3,0	30,6	117,9
172175,0	23	0,3	35	19,6	1,2	2,9	171,8	5,6	17,3	116,9
172177,2	23	0,2	34,4	17,3	1,1	3	575,2	5,2	47,7	275,1
172186,3	23	0,2	35,2	12,7	1,2	3,2	129,9	3,3	29,4	116,7
172186,3	26	0,3	38,6	12,3	1,3	3,3	62,4	2,9	7,0	25,9
172186,3	26	0,3	38,6	12,3	1,3	3,3	647,9	2,9	49,4	184,1
172196,0	17	0,4	45,7	10,6	1,5	3,5	900,8	2,0	35,9	108,7
172196,0	14	0,3	41,6	11	1,3	3,3	1087,8	2,6	47,7	159,0
172205,5	14	0,5	39,1	5,6	1,2	2,5	397,7	1,9	42,7	95,6
172206,6	21	0,5	55,4	10,9	1,5	3,8	1255,6	1,9	25,4	72,9
172214,0	23	0,6	55,8	12	1,1	3,3	557,2	3,3	45,8	166,5
172214,0	21	0,5	54,9	12	1,1	3,4	155,4	3,2	28,7	101,3
172224,0	23	0,7	61,2	12	1	3	523,5	4,0	74,9	299,6
172224,0	23	0,7	61,2	12	1	3	1066,2	4,0	66,4	265,6
172238,0	23	0,6	58	12	1	3	604,3	4,0	46,7	186,8
172254,0	23	1,2	74,1	11,9	1,4	3	666,0	2,8	47,7	189,2
172270,0	23	2,8	73,7	9,7	1,7	2,9	931,1	2,0	76,8	256,9
172287,0	23	10	78	6,5	2	2,7	551,2	1,2	63,4	152,6
172302,0	23	11,8	81	7,2	1,9	2	757,7	1,9	68,5	246,6
172318,2	23	6,3	71	8,4	1,6	2,2	622,6	2,4	76,4	291,7
172336,0	23	6,4	57,3	7,5	2,5	3	675,3	1,0	28,5	71,3

172353,5	23	6,5	65,3	7,4	1,9	2,5	267,6	1,6	59,1	174,9
172371,0	23	5,9	69,3	8,9	1,5	2	768,4	3,0	75,3	335,1
172404,0	23	8,9	81,3	6,7	1,5	2,1	1305,2	2,1	78,7	251,1
172541,0	23	3	58	9,7	1,5	3,3	499,8	2,0	64,1	188,4
172559,0	23	2	53,7	12	1,5	3,5	1105,1	2,3	78,0	267,4
172588,0	23	4,5	79,9	9,2	1,5	3,2	1549,5	1,9	78,9	226,8
172606,4	23	5,3	75	8,2	1,5	3	398,0	1,8	36,7	100,3

## Eidanger

Profilnummer	Hull lengde [m]	Q-verdi	RQD	Jn	Jr	Ja	Injeksjonsmasse/tunnelmeter	Jn/(Ja*Jr)	Trykk (P)	(Jn/Ja)*P
179984,0	23	15	90	6	2	2	2443,4	1,5	78,1	234,3
179967,8	23	14	85,2	5	2	2,5	3664,9	1,0	68,5	137,0
179952,5	23	12,8	83,8	4,5	2	3	1949,8	0,8	77,2	115,8
179935,6	23	7,3	76	8,8	1,9	2,5	3108,6	1,9	58,4	205,6
179918,6	23	5,4	69,9	10,1	1,7	2,4	6654,1	2,5	74,2	312,3
179903,9	23	4,7	68,8	6,9	1,4	3,7	5309,5	1,3	77,8	145,1
179876,0	20	5,3	65,6	8,1	1,8	2,9	4518,7	1,6	69,2	193,3
179830,7	23	5,6	63	7,2	2	3,4	934,7	1,1	26,7	56,5
179809,0	23	4,8	66	9	2,2	3,5	2640	1,2	77,5	199,3
179786,0	23	5,5	69,1	9	1,6	2,5	2889,3	2,3	69,2	249,1
179764,4	23	3,7	68,7	9	1,7	3,6	3009,3	1,5	69,9	174,8
179749,0	23	2,5	62,6	10,5	1,6	3,8	1877,4	1,7	75,2	207,8
179732,5	23	3,7	71,7	9,7	1,9	4	1503,5	1,3	69,4	168,3
179717,5	23	4,3	69,9	8,3	2	4	3401,8	1,0	73,5	152,5
179702,0	23	4,4	68,3	8	2	4	1280,7	1,0	71,4	142,8
179687,0	23	3,7	62,2	9,7	1,9	3,6	4927,2	1,4	78,3	211,0
179670,0	23	4,1	65,3	9,1	1,5	3	5020,5	2,0	69,1	209,6
179656,0	23	7	71,4	7,3	1,8	3,2	4494,7	1,3	67,6	154,2
179639,0	23	8,3	75,6	6	1,6	5,6	5126,6	0,7	66,1	70,8
179624,0	23	6	72,7	6	1,6	3,3	602,7	1,1	64,4	117,1
179607,0	23	6,7	78,043	7,304	2	3,348	4696,8	1,1	63,0	137,4
179433,0	24	1,3	54,7	11,7	1	1,8	1084,4	6,5	38,2	248,3



# Parameterverdier for Q-systemet

## Vedlegg 5

1	Oppsprekkingstall (Rock Quality Designation)	pr. m <sup>3</sup>	RQD
A	Meget sterkt oppsprukket	>27	0-25
B	Sterkt oppsprukket	20-27	25-50
C	Moderat oppsprukket	13-19	50-75
D	Lite oppsprukket	8-12	75-90
E	Meget lite oppsprukket	0-7	90-100

Anm.: i) Når RQD er ≤ 10 (inkludert 0), blir verdien 10 brukt ved utregning av Q-verdi  
ii) RQD-intervaller på 5, dvs. 100, 95, 90 osv er tilstrekkelig nøyaktig

2	Tall for sprekkesett	J <sub>n</sub>
A	Massivt, ingen eller få sprekker	0,5-1,0
B	Ett sprekkesett	2
C	Ett sprekkesett + sporadiske sprekker	3
D	To sprekkesett	4
E	To sprekkesett + sporadiske sprekker	6
F	Tre sprekkesett	9
G	Tre sprekkesett + sporadiske sprekker	12
H	Fire eller flere sprekkesett, meget sterkt oppsprukket, sukkerbitberg osv	15
E	Oppknust berg, jordaktig	20

Anm.: i) Ved tunnelkryss brukes (3 x J<sub>n</sub>)  
ii) I portaler brukes (2 x J<sub>n</sub>)

3	Sprekkeruhetstall	J <sub>r</sub>
a) Bergkontakt, og b) bergkontakt før 10 cm skjærdeformasjon		
A	Diskontinuerlig, hakkete (ru eller glatte)	4
B	Ru, bølgete	3
C	Glatte, bølgete	2
D	Glidespeil, bølgete	1,5
E	Ru, plane	1,5
F	Glatte, plane	1
G	Glidespeil, plane	0,5

Anm.: Første del av beskrivelsen (Ru, glatt etc.) gjelder ruhet/glatthet  
Andre del gjelder ujevnheter i størrelsesorden dm, m.

c) Ingen bergkontakt ved skjærdeformasjon		
H	Sprekkefylling med leir, silt, sand, grus eller knust berg tykk nok til å hindre bergkontakt	1

Anm.: i) Når sprekeavstanden i det aktuelle sprekkesettet er mer enn 3 m adderes 1 til ruhetstallet  
ii) J<sub>r</sub>=0,5 brukes for plane sprekker med glidespeil og lineasjon der lineasjon er orientert langs sannsynlig bevegelsesretning

4	Tall for sprekkefylling	Φ <sub>r</sub> (ca)	J <sub>a</sub>
a) Bergkontakt			
A	Sammenvokste sprekker med harde mineraler som kvarts, feltspat, epidot		0,75
B	Uomvandlede sprekkeflater, bare overflateoksidasjon	25-35°	1
C	Svakt omvandlede sprekkeflater. Uoppbløtlig mineralbelegg, sandpartikler, oppknust berg, uten leir.	25-30°	2
D	Siltig eller sandig sprekkebelegg, litt leir (ikke svelleleire)	20-25°	3
E	Oppbløtlig leirbelegg med lav friksjon f.eks kaolinitt eller glimmer. Også kloritt, talk, gips, grafit o.a. Kun små mengder svelleleire.	8-16°	4
b) Bergkontakt før 10 cm skjærdeformasjon (tynn mineralfylling)			
F	Sandige partikler, oppknust berg, ikke leir	25-30°	4
G	Sterkt overkonsolidert (hardpakket), uoppbløtlig fylling av leirmateriale (kontinuerlig, tykkelse < 5 mm)	16-24°	6
H	Middels eller litt overkonsolidert fylling av oppbløtlig leirmateriale (kontinuerlig, tykkelse < 5 mm)	12-16°	8
J	Fylling av svelleleire (kontinuerlig, tykkelse < 5 mm). Ja-verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	8-12
c) Ingen bergkontakt ved skjærdeformasjon (tykk mineralfylling)			
K	Soner og bånd av knust eller desintegert berg og leir. Sterkt overkonsolidert (hardpakket) uoppbløtlig fylling.	16-24°	6
L	Soner og bånd av knust eller desintegert berg og leir. Middels til litt overkonsolidert uoppbløtlig fylling.	12-16°	8
M	Soner og bånd av leir eller knust eller desintegert berg. Ja-verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	8-12
N	Tykke, kontinuerlige soner eller bånd med leir, silt eller sand. Sterkt overkonsolidert (hardpakket), uoppbløtlig.	16-24°	10
O	Tykke, kontinuerlige soner eller bånd med leir. Middels til litt overkonsolidert, oppbløtlig.	12-16°	13
P	Tykke, kontinuerlige soner eller bånd med leir. Ja-verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	13-20

5	Sprekkevannsfaktor	J <sub>w</sub>
A	Tørre bergrom, fukt eller spredte drypp	1
B	Dryppregn, Stedvis utvasking av sprekkfylling.	0,66
C	Stor innlekkasje eller høyt trykk i berg med sprekker uten fylling	0,5
D	Stor innlekkasje eller høyt trykk. Utvasking av sprekkfylling.	0,33
E	Meget stor innlekkasje eller vanntrykk ved utsprenning, avtagende med tiden.	0,2-0,1
F	Meget stor innlekkasje eller vanntrykk. Ikke avtagende med tiden. Ofte utvasking av knust bergmasse	0,1-0,05

Anm.: i) Faktorene C til F er antatte. J<sub>w</sub>-verdien økes når dreneringstiltak blir utført  
ii) Spesielle stabilitetsproblemer ved isdannelse er ikke vurdert

6	Spenningsfaktor	SRF	
a) Svakhetssoner som skjærer tunnelen og som kan medføre nedfall			
A	Hypig oppreden av svakhetssoner som inneholder leir eller kjemisk omvandlet berg. Avspent sideberg. Alle dybder.	10	
B	Hypig oppreden av svakhetssoner i kompetente (stive) bergarter (uten leir). Avspent sideberg. Alle dybder.	7,5	
C	Enkle svakhetssoner med eller uten leir eller kjemisk omvandlet berg. Anleggets dybde ≤ 50 m.	5	
D	Ukonsoliderte, åpne sprekker, sterkt oppsprukket, sukkerbitberg. Alle dybder.	5	
E	Enkle svakhetssoner med eller uten leir eller kjemisk omvandlet berg. Anleggets dybde > 50 m.	2,5	

Anm.: i) SRF-verdiene reduseres med 25-50% når svakhetssonene bare innvirker på stabiliteten, men ikke skjærer anlegget.

b) Harde, kompetente bergarter, bergtrykkproblemer				
H	Lave spenninger, åpne sprekker. Utfall av blokker pga. lav spenning. Vanligvis nær overflaten.	>200	<0,01	2,5
J	Middels høye spenninger, gunstige spenningsforhold.	200-10	0,01-0,3	1
K	Høye spenninger. Vanligvis gunstige stabilitetsforhold. Kan være ugunstig for veggstabilitet.	10-5	0,3-0,4	0,5-2
L	Moderat avskalling etter mer enn 1 time i massivt berg.	5-3	0,5-0,65	5-50
M	Avskalling og bergslag etter få minutter i massivt berg.	3-2	0,65-1	50-200
N	Intenst bergslag og umiddelbart dynamisk deformasjonsbrudd i massivt berg.	<2	>1	200-400

Anm.: ii) I tilfeller med sterkt anisotrop, jomfruelig spenningsfelt (dersom målinger foreligger): når  $5 \leq \sigma_1 / 10 \leq \sigma_3$ , reduseres  $\sigma_c$  til 0,75  $\sigma_c$ . Når  $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$ , reduseres  $\sigma_c$  til 0,5  $\sigma_c$ , hvor  $\sigma_c$  = ensial trykkfasthet,  $\sigma_1$  og  $\sigma_3$  er henholdsvis største og minste hovedspenning og  $\sigma_0$  = maksimal tangentialspenning (antatt fra elastisitetsteorien).  
iii) Når tunnelhengens dybde under fjelloverflaten er mindre enn spennvidden, økes SRF fra 2,5 til 5, unntatt ved høye horisontalspenninger (se H)

c) Tyteberg, plastisk flytning av inkompetente bergarter under påvirkning av høye spenninger				
O	Moderat tyteberg		1-5	5-10
P	Intens tyteberg		>5	10-20

Anm.: iv) Tilfeller av tyteberg kan forekomme for dybder H>350 Q<sup>1/3</sup> (Singh et al., 1992). Bergmassenes trykkfasthet kan estimeres fra  $scm \approx sc/100 \times 0,7 \times g \times Q^{1/3}$  (MPa) hvor g = bergartens egenvekt i kN/m<sup>3</sup>, og scm = bergmassens trykkfasthet.

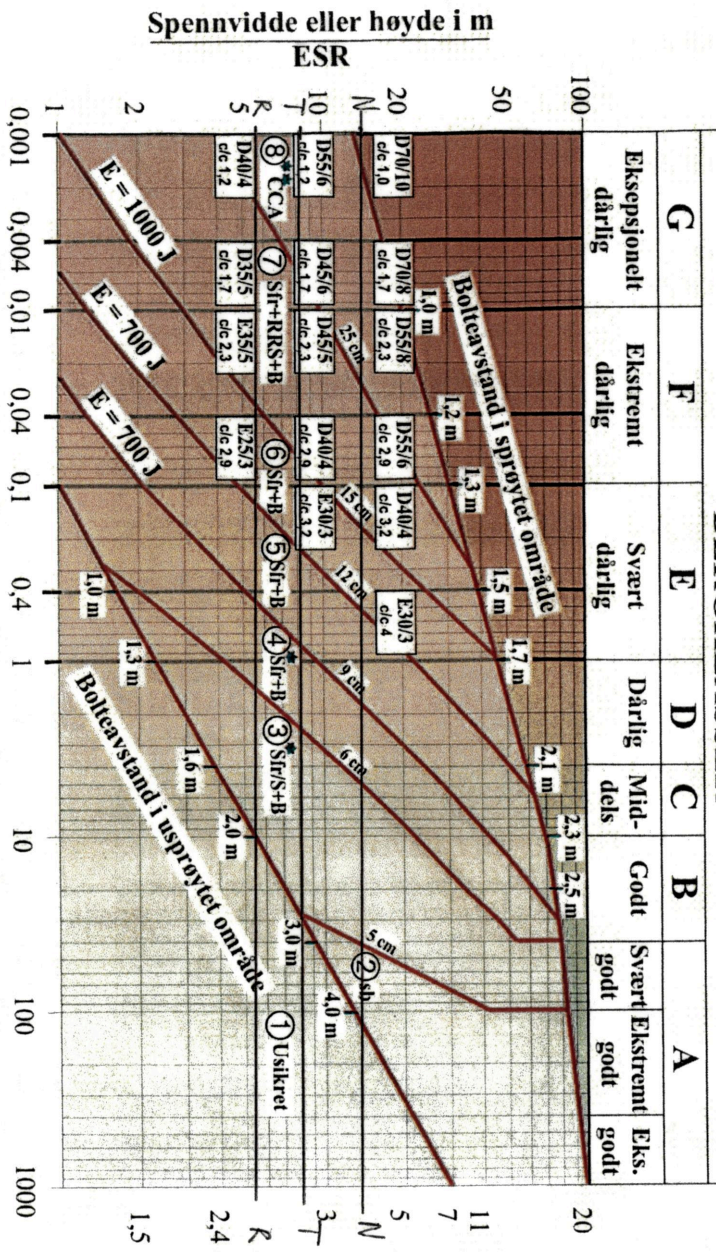
d) Svellende berg: Kjemisk svelleaktivitet som avhenger av tilgangen på vann				
R	Moderat svelling			5-10
S	Intens svelling			10-15

Anm.: For J<sub>r</sub> og J<sub>a</sub> brukes verdier fra det sprekkesettet som er mest ugunstig for stabiliteten både med hensyn til orientering og skjærstyrke,  $\tau = \sigma_n \tan^{-1}(J_r/J_a)$ . Velg sprekkesett eller diskontinuitet hvor utglidning mest sannsynlig vil skje.

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



## BERGKLASSER



N = NORMAALPROFIL HUVUDLØP  
 T = PROFIL TVERRSLAG  
 R = PROFIL RØNNINGSTUNNEL

### SIKRINGSKATEGORIER

- 1) Usikret
- 2) Spredt bolting, sb
- 3) Systematisk bolting og varmet eller fiberarmert sprøytebetong, 5-6 cm, Sfr/B+S
- 4) Fiberarmert sprøytebetong og bolting, 6-9 cm, Sfr+B
- 5) Fiberarmert sprøytebetong og bolting, 9-12 cm, Sfr (E700)+B
- 6) Fiberarmert sprøytebetong og bolting, 12-15 cm, Sfr (E700)+B
- 7) Fiberarmert sprøytebetong > 15 cm + armerte ribber av sprøytebetong og bolting, Sfr (E1000)+RRS+B
- 8) Betongutsløpning, CCA eller Sfr (E1000)+RRS+B

Boltene er 20 eller 25 mm i diameter

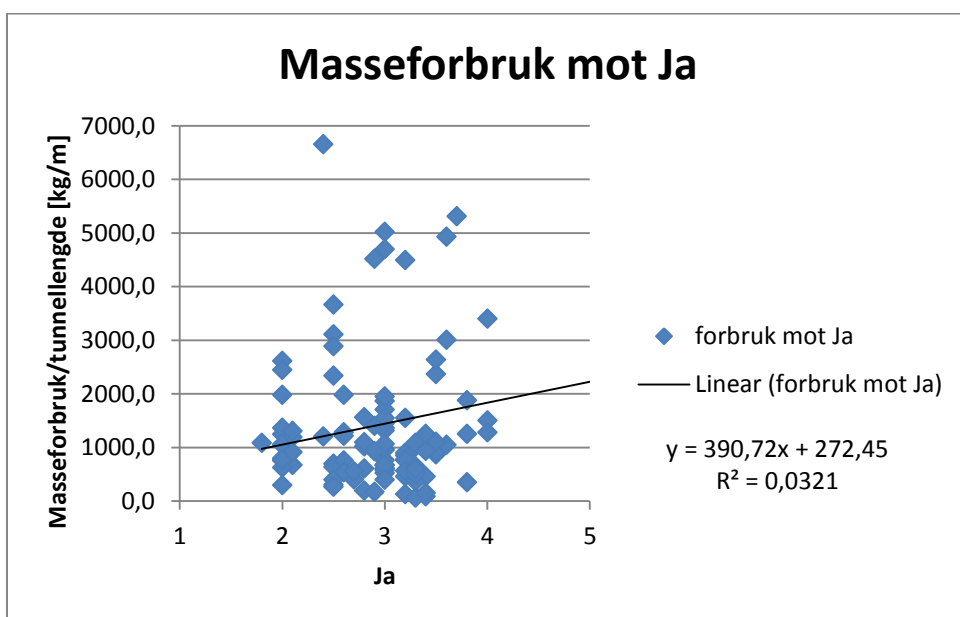
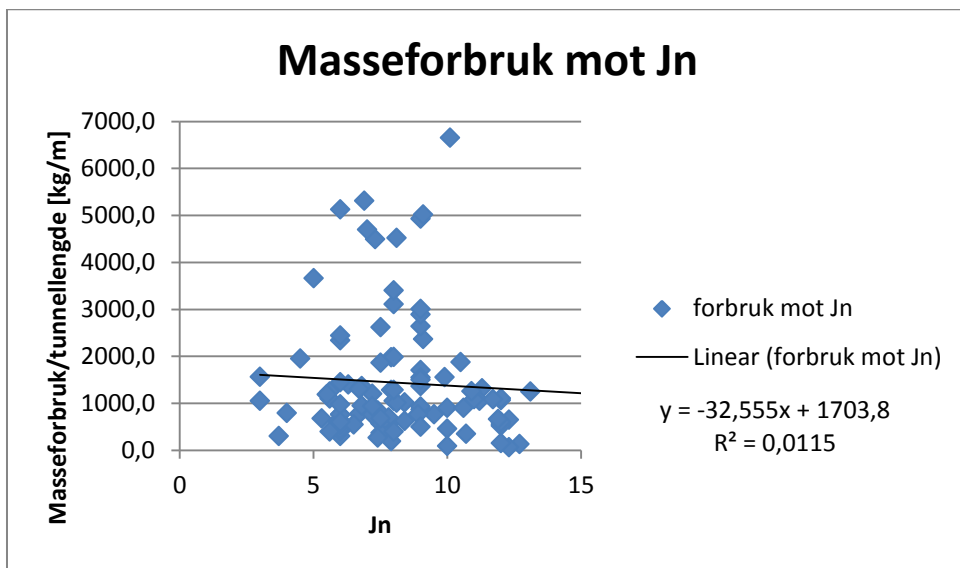
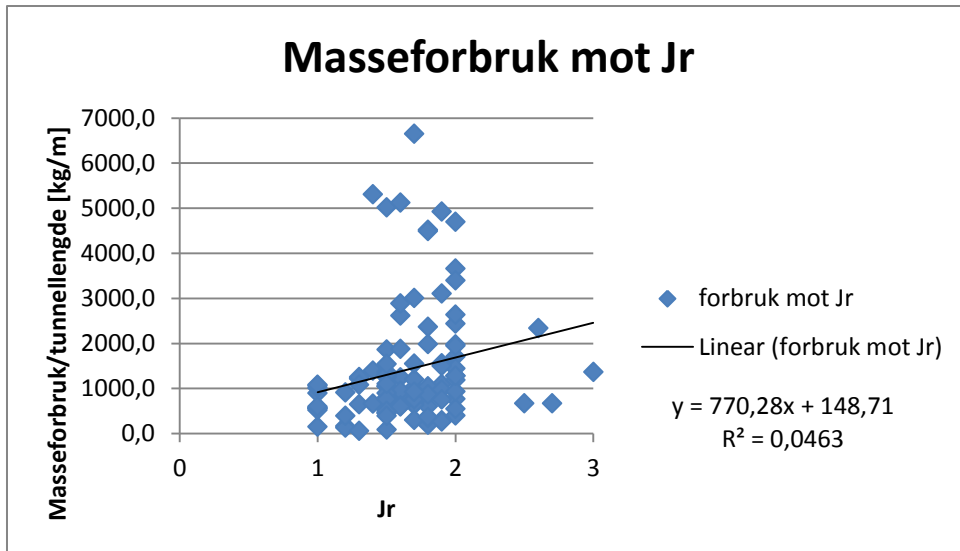
E) Energiabsorpsjon i fiberarmert sprøytebetong ved 25 mm nedbøyning i platetest

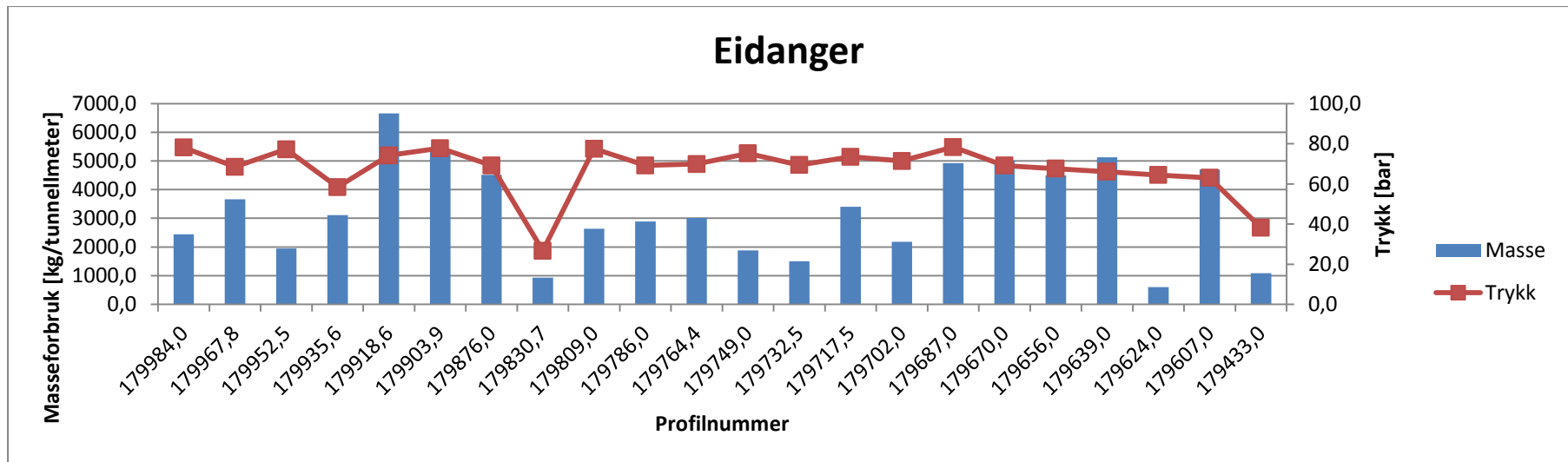
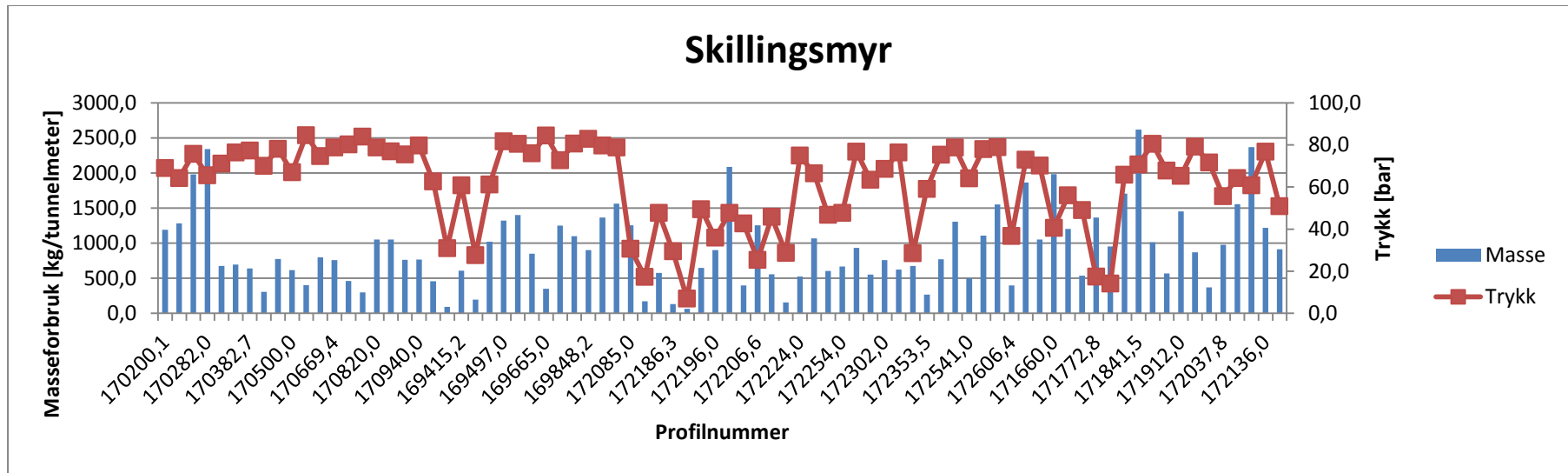
D45/6
dic 1,7

= RRS (sprøytede buer) med 6 armeringsjern i dobbelt lag, i 45 cm tykke buer med senter/senter-avstand 1,7 m. Hvert rektangel er relatert til Q-verdien i venstre sidekant av rektangelet.  
(Se tekst for nærmere forklaring)

- ★) Opp til 10 cm ved store spennvidder
- ★★) Eller Sfr+RRS+B

## Vedlegg 6







## Vedlegg 8

Ja: 1,0-2,9	Profilnummer	Ja	Injeksjonsmasse/tunnelmeter [kg/m]	Trykk [bar]
	169415,2	2,8	605,5	60,7
	169415,2	2,8	194,4	27,6
	169428,1	2,8	1020,5	61,2
	169547,0	2,9	1399,4	80,4
	169745,0	2,2	1248,7	72,6
	169762,0	2,8	1099,8	80,6
	169969,0	2	1366,6	79,6
	170003,2	2,8	1561,3	78,7
	170200,1	2,1	1191,9	68,9
	170233,5	2,6	1280,5	64,2
	170233,0	2,6	1978,6	75,7
	170282,0	2,5	2341,2	65,5
	170314,8	2,1	675,8	71,1
	170348,3	2,5	695,8	76,3
	170382,7	2,5	638,9	77,3
	170382,8	2,5	305,9	70,0
	170635,0	2,7	402,8	84,6
	170651,7	2,2	796,0	74,6
	170669,4	2,6	756,5	78,8
	170804,0	2	299,5	83,9
	170820,0	2,2	1051,7	78,7
	171642,0	2,3	1053,0	70,1
	171660,0	2	1983,2	40,6
	171676,0	2,4	1202,5	56,0
	171761,0	2,6	537,2	49,0
	171841,5	2,3	2616,7	70,7
	172136,0	2,6	1216,8	76,8
	172156,0	2,1	913,1	50,8
	172175,0	2,9	171,8	17,3
	172205,5	2,5	397,7	42,7
	172270,0	2,9	931,1	76,8
	172287,0	2,7	551,2	63,4
	172302,0	2	757,7	68,5
	172318,2	2,2	622,6	76,4
	172353,5	2,5	267,6	59,1
	172371,0	2	768,4	75,3
	172404,0	2,1	1305,2	78,7
	172606,4	3	398,0	36,7
	179967,8	2,5	3664,9	68,5
	179935,6	2,5	3108,6	58,4
	179918,6	2,4	6654,1	74,2
	179876,0	2,9	4518,7	69,2
	179786,0	2,5	2889,3	69,2
	179433,0	1,8	1084,4	38,2

Ja: 3,0-3,9	Profilnummer	Ja	Injeksjonsmasse/tunnelmeter [kg/m]	Trykk [bar]
	169497,0	3	1320,7	81,7
	170500,0	3	614,4	67,0
	170923,0	3	763,4	75,4

171626,2	3	1865,1	72,9
171772,8	3	1366,5	17,4
171789,0	3	951,0	14,1
171806,2	3	1706,6	65,8
171912,0	3	1450,3	65,2
172037,8	3	977,9	55,6
172102,0	3	1553,5	64,2
172177,2	3	575,2	47,7
172224,0	3	523,5	74,9
172224,0	3	1066,2	66,4
172238,0	3	604,3	46,7
172254,0	3	666,0	47,7
172336,0	3	675,3	28,5
172606,4	3	398,0	36,7
179952,5	3	1949,8	77,2
169382,5	3,4	456,4	62,6
169382,5	3,4	90,0	30,9
169647,7	3,2	850,6	75,9
169665,0	3,8	348,7	84,4
169848,2	3,2	899,1	82,9
170466,4	3,2	772,5	78,1
170686,0	3,2	461,0	80,2
170888,5	3,6	1051,1	76,9
170940,0	3,2	765,0	79,6
171875,2	3,3	1011,4	80,5
171878,0	3,2	566,8	67,7
171929,0	3,5	868,0	79,2
171945,8	3,3	370,0	71,6
172119,7	3,5	2367,6	60,8
172085,0	3,4	1252,8	30,6
172186,3	3,2	129,9	29,4
172186,3	3,3	62,4	7,0
172186,3	3,3	647,9	49,4
172196,0	3,5	900,8	35,9
172196,0	3,3	1087,8	47,7
172541,0	3,3	499,8	64,1
172559,0	3,5	1105,1	78,0
179903,9	3,7	5309,5	77,8
179830,7	3,4	934,7	26,7
179809,0	3,5	2640	77,5
179764,4	3,6	3009,3	69,9
179749,0	3,8	1877,4	75,2
179687,0	3,6	4927,2	78,3
179656,0	3,2	4494,7	67,6
179624,0	3,3	602,7	64,4
179607,0	3,3	4696,8	63,0

Ja: 4,0-6,0	Profilnummer	Ja	Injeksjonsmasse/tunnelmeter [kg/m]	Trykk [bar]
	179639,0	5,6	5126,6	66,1
	179732,5	4	1503,5	69,4
	179717,5	4	3401,8	73,5
	179702,0	4	1280,7	71,4







# TEGNFORKLARING:

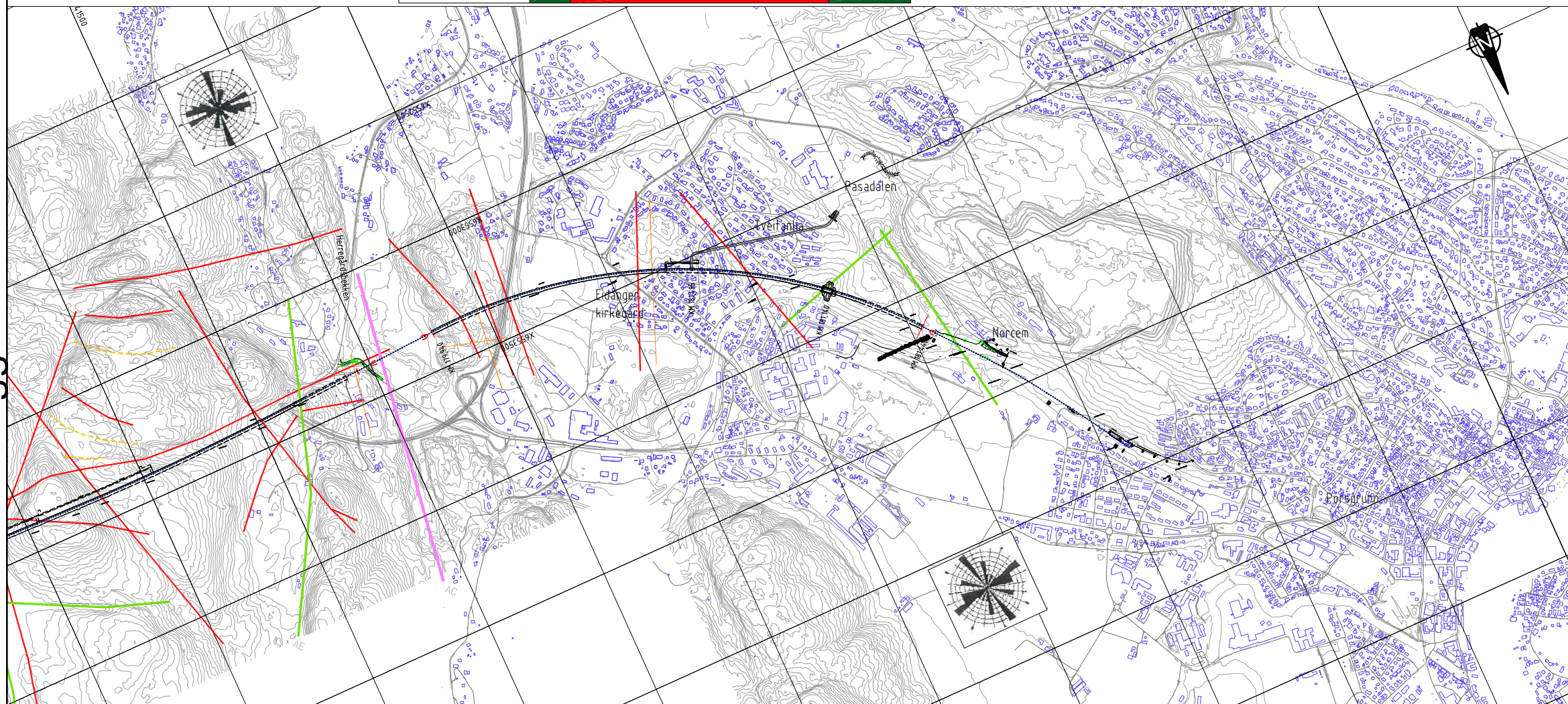
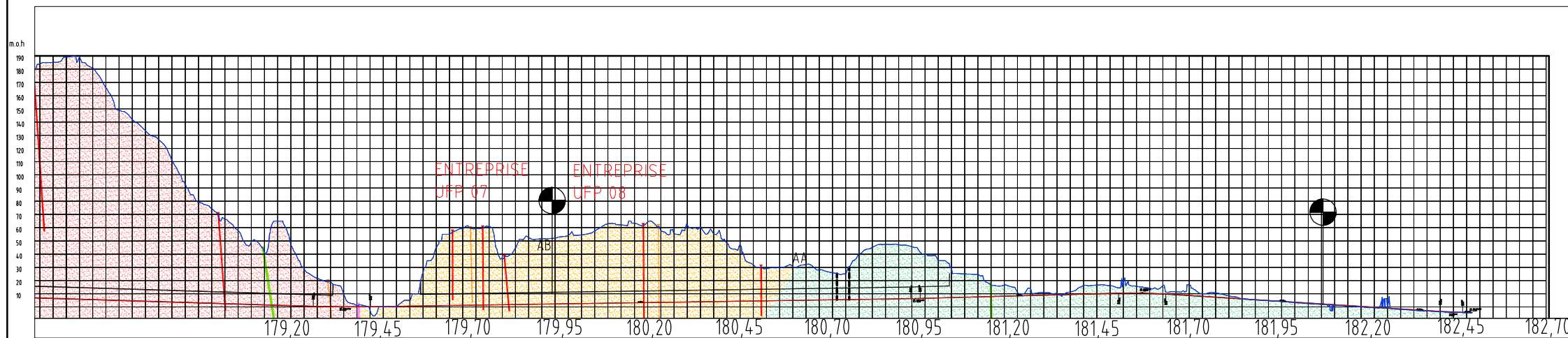
- - - - - SVAKHETSSONE UKJENT BREDD
- SVAKHETSSONE 1-3m
- SVAKHETSSONE 3-5m
- SVAKHETSSONE 5-10m
- STØRRE FORKASTNINGSSONE >10m BREDD

## BERGART:

- LARVIKITT
- SANDSTEIN
- KALKSTEIN/LEIRSKIFER

Cut and cover

Tetteklasse	
	Tetteklasse 1
	Tetteklasse 2



Vedlegg 10

Referanse sprekkeroser:  
NVK Vandbygn. 2001a, Parsell 12.2, Detaljplan, UFP02-4-R-0000014

01C	Arbeidstegning	30.04.2013	KNSK	GBI	JSB
00B	Arbeidstegning	04.02.2013	KNSK	GBI	JSB
Rev.	Revisjonen gjelder	Data	Tegnet av	Kontrollert av	Godkjent av
BYGGEPLAN UNDERBYGNING – GEOLOGI PLAN OG PROFIL KM.179,940–182,858 INGENIØRGEOLOGISK KART, HOVEDTUNNEL		Målestokk: H: 1:10,000 V: 1:2,000	Oppdragsnr.: 163940	Oppdragsleder: Jon S. Boodstø	Rev.:
MODERNISERING AV VESTFOLDBANEN 12.2 TELEMARK GRENSE – PORSGRUNN		Produzent: sweco	Prod.tegning.nr.: UVB-22-V-34001.dwg	Tegningsnummer: UVB-22-V-34001	01C
Jernbaneverket		Tegningsnummer:		Rev.:	