

SBF2016A0580 - Åpen

Rapport

Erfaringer med injeksjon

E134 Mælefjelltunnelen

Forfatter

Kristin Hilde Holmøy



Rapport

Erfaringer med injeksjon

E134 Mælefjelltunnelen

EMNEORD:
Injeksjon
Vannlekkasjer
MælefjelltunnelenVERSJON
3.0DATO
2017-11-16FORFATTER
Kristin Hilde HolmøyOPPDRAGSGIVER(E)
Statens vegvesen Region sørOPPDRAGSGIVERS REF.
Trond ØygardenPROSJEKTNR
10209993ANTALL SIDER OG VEDLEGG:
34 s + 4 Vedlegg**SAMMENDRAG**

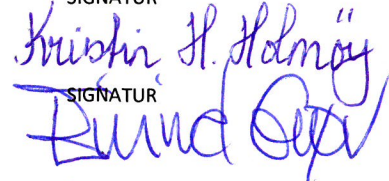
I forbindelse med drivingen av Mælefjelltunnelen har det vært store utfordringer med mye vannlekkasjer og høyt vanntrykk. Injeksjonen har vært utfordrende på grunn av varierende strukturgeologiske forhold. I noen forkastningssoner har det vært åpne sprekker og hulrom som har ført til store injeksjonsmengder. Mens i andre områder har det vært utfordringer med svært tynne sprekker/kanaler med leire og høyt vanntrykk som har gitt problemer med å oppnå inntrengning og tetting.

Det ble i desember 2016 laget en prognose for vannlekkasjer og fremdrift for den gjenstående tunnelstrekningen. Prognosen er presentert og sammenlignet med faktiske forhold påtruffet.

I foreliggende rapport er erfaringer med utført injeksjon oppsummert. Det har vært fokus på spesielt to svakhetssoner; breksjesonen (pel nr. 14914 – 14880) og gropa (pel nr. 13452 – 13235). I foreliggende rapport er de strukturgeologiske forholdene i sonene samt utfordringer med injeksjonsopplegget beskrevet.

UTARBEIDET AV
Kristin H. HolmøyKONTROLLERT AV
Eivind GrøvGODKJENT AV
Lisbeth AlnæsRAPPORTNR
SBF2016A0580ISBN
978-82-14-06113-0GRADERING
Åpen

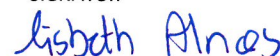
SIGNATUR



SIGNATUR



SIGNATUR

GRADERING DENNE SIDE
Åpen

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1.0	2016-12-06	Erfaringer med injeksjon –E134 Mælefjelltunnelen

2.0	2017-09-14	Erfaringer med injeksjon –E134 Mælefjelltunnelen
-----	------------	--

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
3.0	2017-11-16	Erfaringer med injeksjon –E134 Mælefjelltunnelen

Innholdsfortegnelse

1	Bakgrunn og målsetning	5
2	Prosjektbeskrivelse.....	5
	2.1 Injeksjonsomfang	6
3	Geologi	8
	3.1 Svakhetszone pel nr. 14914-14880.....	9
	3.2 Svakhetszone pel nr. 13452-13235 (Gropa)	10
4	Gjennomføring av injeksjonen	13
	4.1 Sonderboring.....	13
	4.2 Gjennomføring av injeksjon	14
	4.2.1 Akselerert herding	14
	4.2.2 Stoppkriterier.....	15
	4.3 Utstyr	15
	4.3.1 Ombygging av utstyr på grunn av høyt vanntrykk.....	15
	4.4 Samarbeid og rollefordeling mellom SVV og NCC	16
	4.5 Forslag til ny injeksjonsprosedyre fra Garshol	16
5	Gjennomføring av injeksjon i svakhetszone pel nr. 14914-14880	17
6	Sammenstilling av vannlekkasjer i de to sonene som er studert.....	18
7	Gjennomføring av injeksjon i svakhetszone pel 13452-13235.....	19
	7.1 Jekking av stoffen – pel nr. 13302 - 13290	19
	7.2 Kjemisk injeksjon.....	23
8	Prognose for vannlekkasjer og fremdrift de siste 1250 m av tunnelen.....	23
	8.1 Bakgrunn og oppsummering av prognosen	23
	8.2 Sammenligning mellom prognose og virkelige forhold	25
	8.2.1 Gvammen (pel nr. 11457-12065)	25
	8.2.2 Århus (pel nr. 12694 – 12065)	25
	8.2.3 Erfaring med prognosen	26
9	Studie av utvalgte injeksjonsrunder	27
	9.1 Skjerm pel nr. 14898	27
	9.2 Skjerm pel nr. 14892	29
	9.3 Skjerm pel nr. 13403	29
	9.4 Skjerm pel nr. 13380	30

10	Diskusjon og oppsummering	31
11	Avsluttende kommentarer	33
12	Konklusjon	33
13	Dokumentasjon/referanser	33

Vedleggsliste

Vedlegg 1: Oversikt over injeksjonsskjermer og medgatte mengder fra Gvammen og Århus (Novapoint utskrift)

Vedlegg 2: Notat 15/206697. "Svakhetssone i tunnelen 27.05.2015-28.07.2015, pel 14914-14880. Driving og sikring gjennom svakhetssonen."

Vedlegg 3: Knut Garshol, 2017: "Mælefjelltunnelen gjenstående 628 m driving. Optimalisering av forinjeksjon. Del 2: Oppsummering. Rev. 01 – 9. februar 2017."

Vedlegg 4: SINTEF Rapport SBF2016F0581 "Prognose for vannlekkasjer og fremdrift frem mot gjennomslag (ca. 1250)"

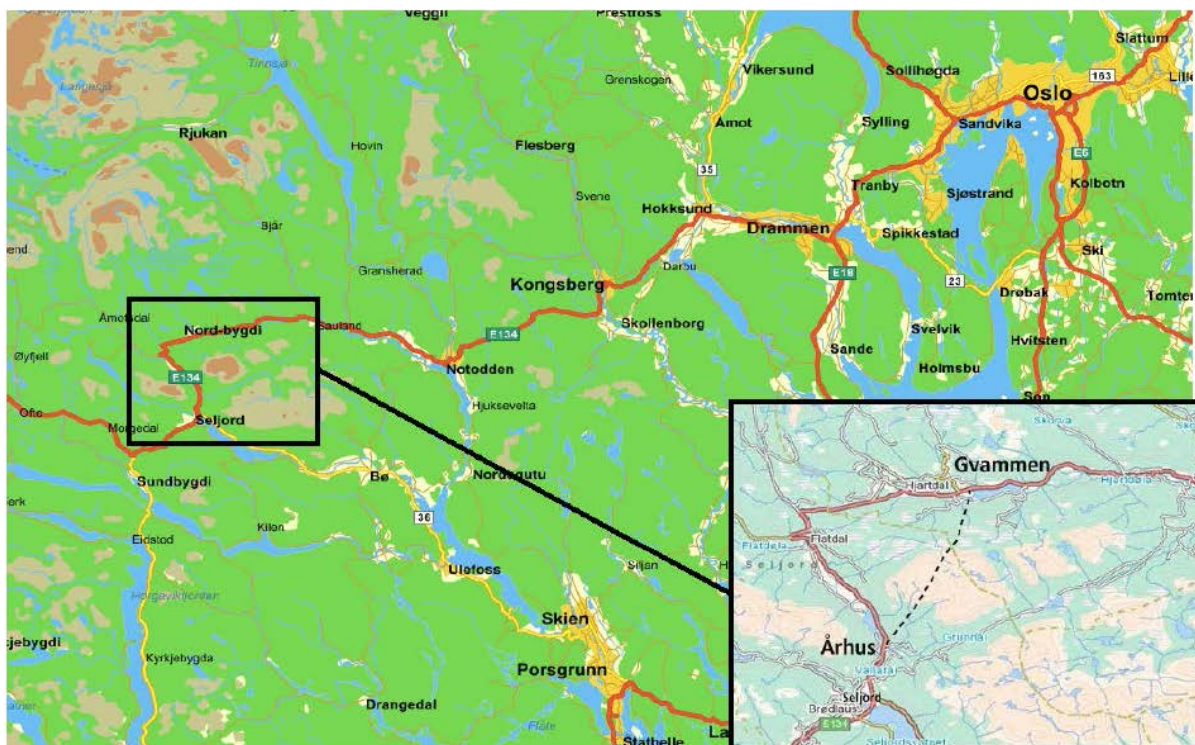
1 Bakgrunn og målsetning

I forbindelse med drivingen av Mælefjell-tunnelen har det vært store utfordringer med mye vannlekkasjer og høyt vanntrykk. Injeksjonen har vært utfordrende, og flere metoder og injeksjonsmidler har vært prøvd. Statens vegvesen Region sør og vegdirektoratet har derfor bestilt en rapport som oppsummerer de utfordringer og erfaringer som er gjort i forbindelse med injeksjon ved Mælefjell-tunnelen.

Ingeniørgeologene Valeria Lindvåg og Morten Thorbjørnsen samt kontrollingeniørene Arvid Eikeland og Magne Heggem har bidratt med innspill og dokumentasjon. Sammenstilling og analyser er utført av SINTEF Byggforsk v/senior forsker Kristin H. Holmøy. I forbindelse med arbeidet med denne erfaringsrapporten er det også utført intervju av representanter fra både SVV og NCC.

2 Prosjektbeskrivelse

Prosjekt E134 Gvammen-Århus består av en tunnel og tilførselsveger mellom Gvammen i Hjartdal kommune og Århus i Seljord kommune i Telemark. Tunnelen under Mælefjell er 9.4 km lang. Fig. 1 viser oversiktskart over prosjektområdet.



Figur 1 Oversiktskart som viser lokalitet av Mælefjell-tunnelen

2.1 Injeksjonsomfang

Tunneldrivingen har foregått fra begge sider, Århus og Gvammen, med gjennomslagssalve ved profil nr. 12069,5 – 16065,6 den 3. mai 2017.

Størst utfordringer med vann og omfattende injeksjon har det vært på Århus-stuffen. På Gvammen-stuffen er det utført 28 skjerner og totalt 352 m har blitt injisert, det vil si 6% av tunnelstrekningen på Gvammen-sida. På Århus-stuffen derimot er det utført totalt 147 skjerner og 1231 m har blitt injisert, det vil si 37% av tunnelstrekningen på Århus-sida. Totalt har 17% av tunnellengden blitt injisert.

Totalt for hele tunnelen er det medgått 2 937,6 tonn industrisement, 1 520,5 tonn mikrofin sement og 224 tonn ultrafin sement. I Tabell 1 er medgåtte mengder for injeksjonssementer for Århus og Gvammen-stuffen gitt. I konkurransegrunnlaget lå det inne kun 200 tonn industrisement og 5 tonn av henholdsvis mikro- og ultrafin sement. Det har blitt brukt størst mengder injeksjonssement på Århus-stuffen.

Tabell 1 Medgåtte mengder injeksjonssementer ved Mælefjelltunnelen

Stoff	Industrisement	Mikrofin sement	Ultrafin sement	Totalt
Gvammen	162 tonn	157 tonn	60,5 tonn	379,4 tonn
Århus	2 775,6 tonn	1 363,5 tonn	163,5 tonn	4 302,7 tonn
Totalt	2 937,6 tonn	1 520,5 tonn	224 tonn	4 682,1 tonn

I Tabell 2 og 3 vises en oversikt over strekninger hvor det har vært utført injeksjon på henholdsvis Gvammen- og Århus-stuffen.

Det er laget tabeller som viser medgåtte mengder av injeksjonssementer fordelt på skjerner langs tunnelen. Disse er vedlagt rapporten (Vedlegg 1).

Tabell 2 Oversikt som viser hvor det har vært injisert på Gvammen-stuffen

GVAMMEN Pel nr.		Antall m tunnel	Antall skjerner
Fra	Til		
6108	12066		
6381	6405	24	1
6687	6711	24	1
7182	7203	21	1
7232	7264	32	2
9104	9128	24	4
10095	10119	24	1
11407	11425	18	1
11591	11609	18	1
11598	11616	18	1

11659	11683	24	1
11739	11808	69	9
11866	11907	41	4
12059	12074	15	1

Tabell 3 Oversikt som viser hvor det har vært injisert på Århus-stuffen

ÅRHUS		Antall m tunnel	Antall skjermer
Pel nr.			
Fra	Til		
15404	12066		
15337	15262	75	4
15195	15164	31	3
15146	15119	27	1
14962	14738	224	22
14325	14294	31	4
13988	13964	24	1
13909	13885	24	1
13882	13858	24	1
13764	13728	36	3
13462	13433	29	4
13422	13259	163	33
13249	13225	24	1
13120	13096	24	1
13013	12978	35	2
12922	12898	24	1
12855	12831	24	1
12822	12717	105	33
12716	12692	24	1
12552	12534	18	1
12488	12450	38	3
12429	12345	84	9
12316	12263	53	5
12259	12184	75	11
12089	12074	15	1

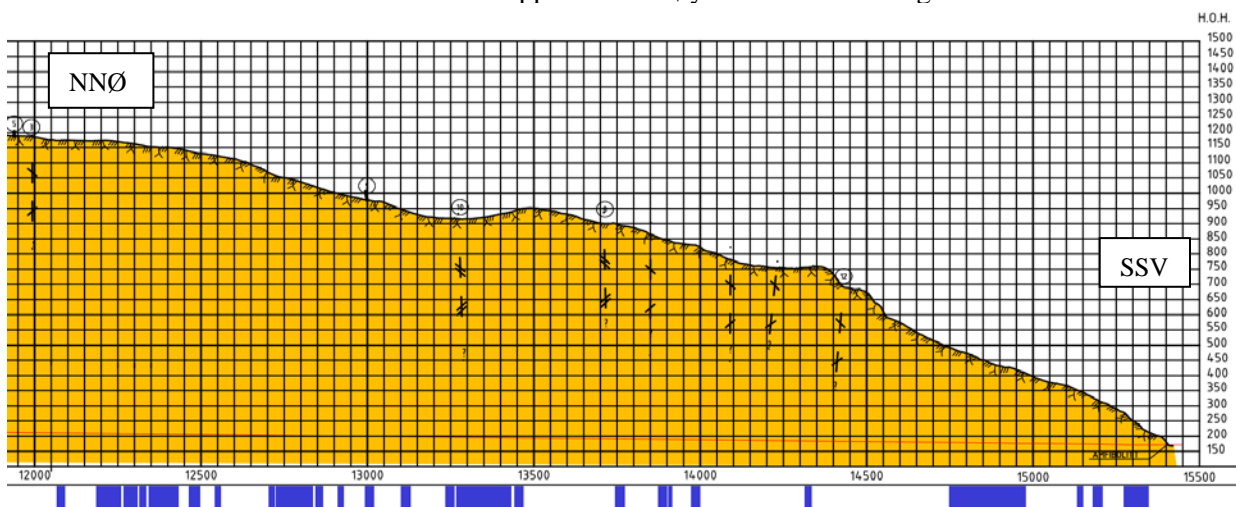
3 Geologi

Bergmassen i Mælefjell består hovedsakelig av kvartsitt, gjennomsett av sporadiske større eller mindre intrusjoner av metagabbro og diabas. Det er to dominerende sprekkeseett i tunnelen i tillegg til sporadiske sprekker:

- Sprekkesett 1 er den opprinnelige benkningen i kvartsitten, og den har strøk N40°- 50°Ø med fall 35°- 45° grader mot SØ
- Sprekkesett 2 har sørøstlig strøk N120°-140°Ø med steilt fall mot SV

Sprekkeflatene har ofte leirbelegg eller mineralfylling (kloritt, glimmer, kvarts). I nærheten av de tektoniske bruddsonene ble det under tunneldrivingen registrert opp til 3-4 sprekkeseett. Bergmassen i tunnelen varierer fra meget massiv til middels til sterkt oppsprukket, og kvartsittens fysiske egenskaper (høy stivhet og sprøhet) gjør at sprekker er utholdende og kan fortsette helt til terrengoverflaten. Dette fører til at det på strekninger i tunnelen har vært store vannlekkasjer og høyt vanntrykk. Bergmassekvaliteten har i store deler av tunnelen vært bra til svært bra med Q-verdier typisk mellom 10 og 100.

Under driving av Mælefjelltunnelen fra Århus-stuffen ble det påtruffet flere vannførende soner med varierende mektighet, innlekkasjemengder og vanntrykk. Figur 2 viser lengdeprofil for strekningen mellom pel nr. 12000 til 15404 fra Århus-siden med antatte svakhetssoner, der strekninger med høy innlekkasje er merket med blå farge. Lengdesnittet er hentet fra SWECO's ingeniørgeologiske rapport (SWECO, 2014). Som det fremgår er det påtruffet vannlekkasjer i partier av tunnelen med varierende overdekning og de to svakhetssonene som er beskrevet i denne rapporten har høyst ulik overdekning.



Figur 2 Lengdeprofil av strekningen fra ca. pel nr. 12000 til påhugg ved Århus-siden. Modifisert lengdesnitt fra SWECO (2014)

I foreliggende rapport beskrives driving og injeksjon i de to mest utfordrende sonene med høyt vanntrykk:

1. Svakhetszone pel nr. 14914-14880
2. Sone pel nr. 13452-13235

I Figur 3 vises plassering av de to sonene på plankart (SWECO, 2014). På samme kart vises også beliggenheten av trykktunnelen ved Grunnåi kraftverk der det i 2004/2005 ble erfart store utfordringer med vannlekkasjer og svakhetssoner. Disse vannlekkasjene ble påtruffet der svakhetszone 8 (kalt Kvennhusåi) krysser trykktunnelen (ved pilspissen i Figur 3).



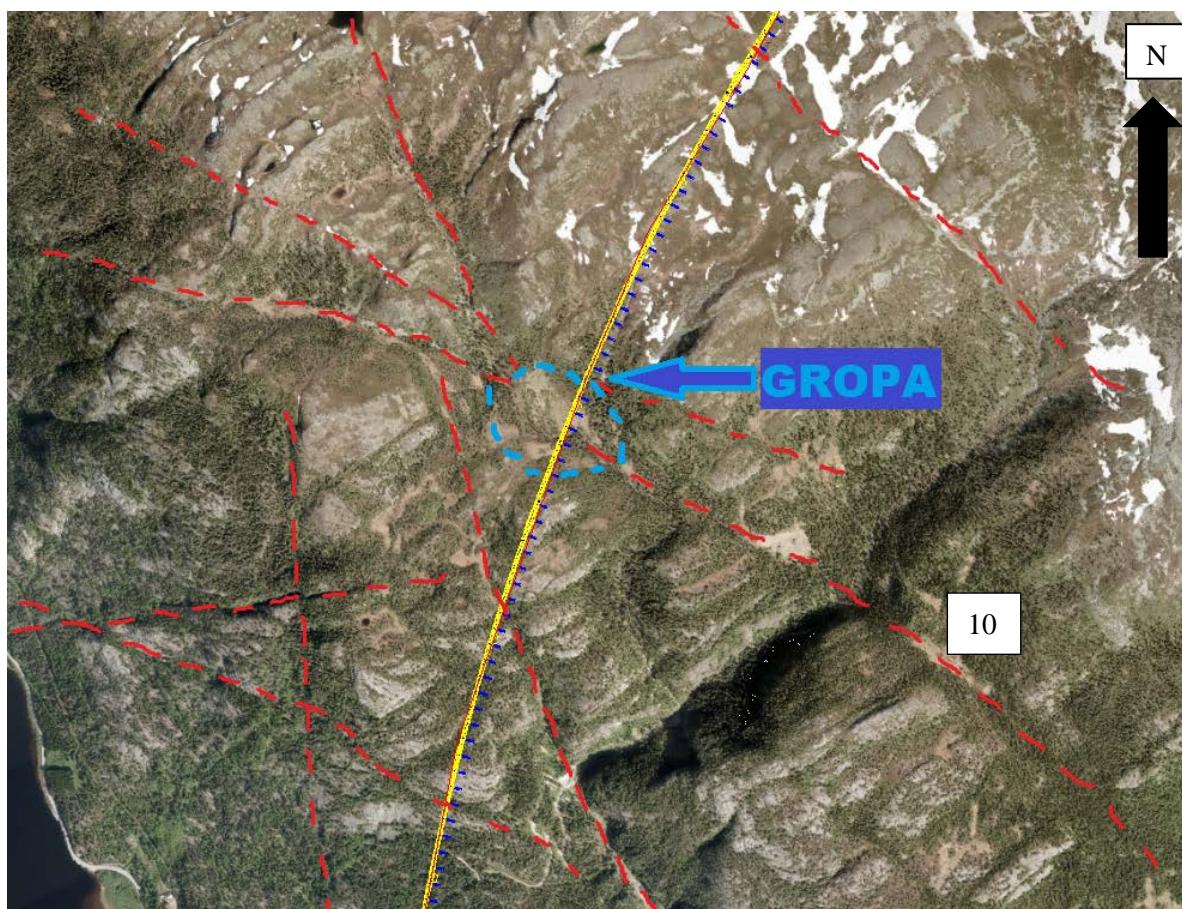
Figur 4 Eksempel på porøs bergmasse og knusningsmateriale fra breksjesonen

Utførelse av injeksjonsarbeider og driving gjennom sonen er beskrevet i SVV's notat 15/206697, se Vedlegg 2.

3.2 Svakhetszone pel nr. 13452-13235 (Gropa)

Over denne strekningen ble tunnelen drevet gjennom parti bestående av flere store og mindre tektoniske bruddsoner som krysser hverandre og topografiske har dette området dermed fasong som en grop i terrenget. Hovedbruddsonen er påvist ved strukturgeologiske kartlegging og er merket som lineament nr. 10 i den ingeniørgeologiske rapporten (SWECO, 2014). Hovedbruddsonen ser ut til å være en kraftig sidelengsforkastning (wrench fault) som strekker seg fra Lifjell i sørøst til Flatdal i nordvest. Den har fall på 80-85 grader mot sørvest, og påvirket bergmassen i en strekning på ca. 200m i tunnelen. Sonen er komplisert med sekundære forkastninger og mindre tektoniske brudd, se Figur 5 og 6.

Bergoverdekningen over sonen er rundt 700-750m. Høyeste vanntrykk målt var 52 bar.

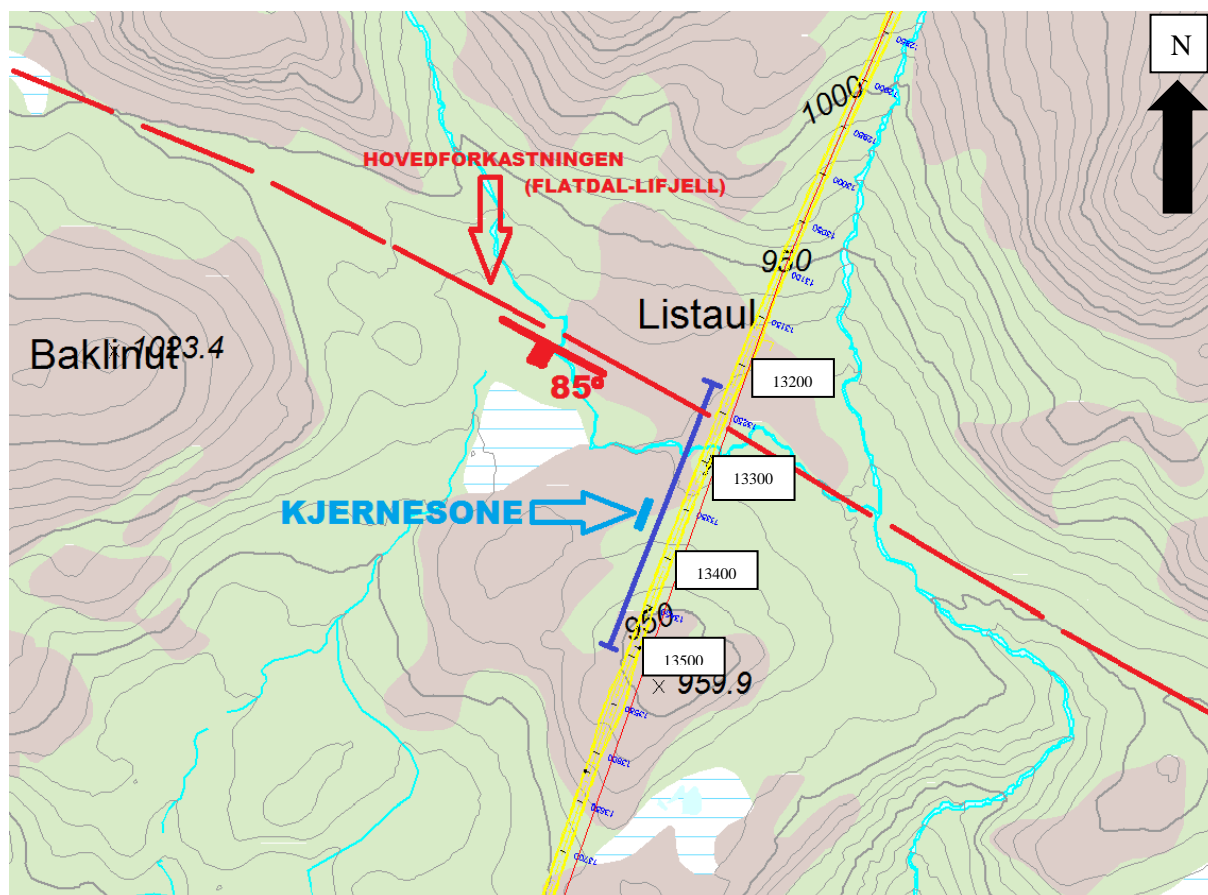


Figur 5 Struktureologisk tegning fra SVV

Sonen danner en forsenkning, og er veldig godt synlig i terrenget. Vannførende sprekkesett er orientert stort sett parallelt med hovedforkastningen, og består av steiltstående sprekker med varierende tetthet og permeabilitet.

Bergmassen i sonen varierer fra nesten uomdannet kvartsitt med sjeldne sporadiske sprekker til sterkt oppknust leirinfisert bergmasse. Det finnes også flere gabbrointrusjoner i området, som skapte problemer for injeksjonsarbeidene.

Den første innlekkasjen ble truffet ved sonderboring fra pel nr. 13462 den 4.mars 2016, der det var målt vanntrykk på 48 bar.



Figur 6 Strukturgeologisk og topografisk tegning over sonen, SVV

Mesteparten av bergmassen mellom pel nr. 13452 og 13235 bestod av det som kan karakteriseres som «sideberg»; mindre påvirket kvartsitt med sprekker fylt med jernholdig leiraktig belegg. De leirfylte sprekkeene begrenset vannlekkasjene til tynne kanaler. Kombinert med høyt vanntrykk gjorde det injeksjonsarbeidene svært utfordrende se Figur 7 og 8.



Figur 7 Kvartsitt med tynne sprekker fylt med leirholdig materiale



Figur 8 Tynne sprekker i kvartsitten med leiraktig belegg

4 Gjennomføring av injeksjonen

4.1 Sonderboring

I prosess 31.6 i kapittel D i kontrakt står det at "Dersom flere hull i en sonderboringsskjerm gir innlekkasje og totallekkasje fra alle hull i skjermen er mer enn 6 l/min, skal byggherren varsles og injeksjon foretas. Dersom kun et hull gir lekkasje er grensen for varsling 4 l/min. Byggherre avgjør om det skal injiseres."

I praksis bores det som oftest 4 sonderhull. Erfaring har vist at påtruffet innlekkasje på 4 sonderhull ofte enten er tørt/ubetydelig sig eller det er godt over 6 l/min totalt slik at antallet sonderhull har

minimal innflytelse på resultatet av innlekkasjekravet. Vannlekkasjene blir målt enten via en slange i en bøtte eller gjennom en montert stav. Vanntrykket måles som oftest også gjennom en montert stav og påkoblet manometer. Ved store vannmengder har det vist seg å ikke være mulig å måle med manometer, da har man måttet lese av mottrykket på injeksjonsriggen ved oppstart injeksjon.

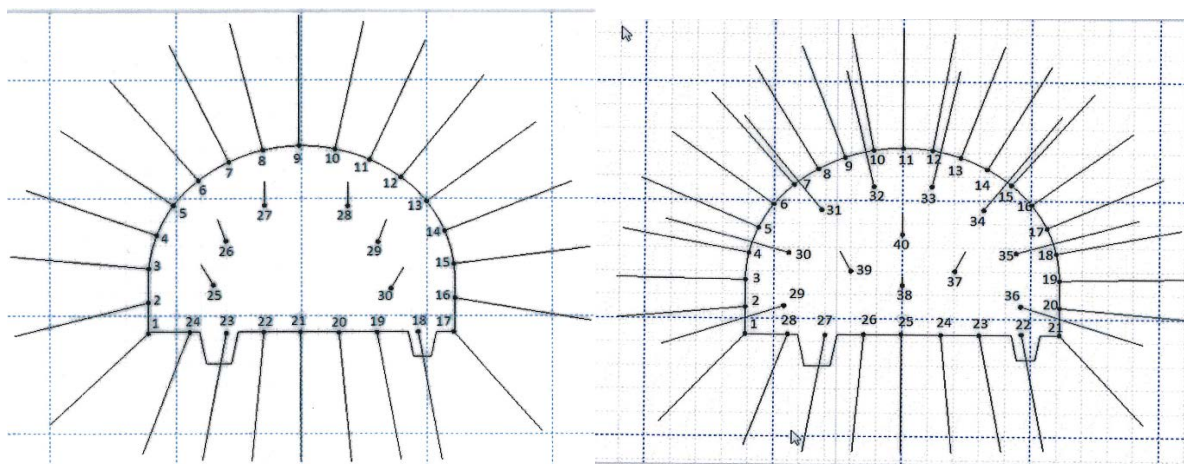
4.2 Gjennomføring av injeksjon

Hullengde på injeksjonsskjermene har variert fra 18m til 30m og ble tilpasset etter forholdene.

Ved innlekkasjemengder på noen hundre l/min ble det boret skjerm på 24 meters lengde. Dersom innlekkasjemengdene var over 500 til flere tusen l/min, ble det stort sett boret skjerm med kortere hull-lengder (18m). Stikning på skjermene var 5-6m, 6m ved store innlekkasjer og høyt trykk.

Det har stort sett vært benyttet to borplaner for injeksjonsskjerm:

Sonder 1 (30 hull) ble mest benyttet; typisk ved vannlekkasjer mellom 10 og 500 l/min. Sonder 2 (40 hull) ble brukt der det var vanskelig å få inn injeksjonsmasse pga. tynne sprekker og høyt trykk. Begge skjermtypene har borhull i stoffen, se Figur 9.



Figur 9 Injeksjonsskjerm; Sonder 1 til venstre og sonder 2 til høyre

Ved store innlekkasjer (eksempelvis mellom 500 og 1000 l/min) under høyt trykk ble det boret færre hull i første injeksjonsomgang (kuttet ut borhull i stoffen også) for å redusere innlekkasjene og lette arbeidet ved neste injeksjonsomgang. Borplan Sonder 2 ble ofte benyttet på siste omgang, med tanke på å tette de siste små sprekkenene. Ved bruk av ultrafin sement ble også Sonder 2 benyttet.

4.2.1 Akselerert herding

Ved å tilsette akselerator kan man styre og fremskynde herding i sementblandinga. Type akselerator som er brukt er Master Roc SA168. Mengde som kan tilsettes er mellom 0,5 og 11%. I Mælefjelltunnelen har mengden vanligvis variert mellom 2 og 5%. Akseleratoren blir tilsatt gjennom et akseleratormunnstykke som er montert fremme på injeksjonsstaven. Akseleratorpumpa er en slave av injeksjonspumpa, men kan også styres manuelt ved behov.

Styrt herding ble hovedsakelig benyttet i svakhetssonen ved pel nr. 14914-14880. På grunn av kort avstand til sonen (3-5m) kom injeksjonsmassen raskt inn i sonen og det var mulig å bruke maksimal innblanding av akselerator. Siden styrt herding med akselerator ikke er blitt brukt mye var det variasjoner i kunnskapsnivå mellom stofflagene. Men det opplyses om at BASF sto for opplæring av mannskap i starten av injeksjonsarbeidet på Århus-stuffen. Flere har også vært på injeksjonskurs i regi av NFF.

Styrt herding er også blitt brukt ved etterinjeksjon for å tette lekkasjer i boltehull og ved større utganger i stuff.

Under injeksjon med hullengder på 15 til 24m har akselerator gitt dårlig resultat på grunn av groing/tidlig herding i hull. Bruk av styrt herding førte ofte til at flere nabohull blitt støpt igjen og ødelagt dersom det var forbindelse mellom hullene.

Byggherre har bestilt styrt herding og medgått mengde har blitt registrert på skjemer som viser hvilke hullnummer akseleratoren ble brukt på. Det synes som bestilt mengde stemmer med forbrukt mengde.

4.2.2 Stoppkriterier

Sluttrykk er benyttet som eneste stoppkriterium ved store innlekkasjemengder og høyt vanntrykk. Det synes som både byggherre og entreprenør har en felles oppfatning om at akseptabelt mottrykk/ståtrykk må oppnås for å få skjermene til å virke/bli tette. Bestilt trykk ved avslutning injeksjon har variert, oftest har det vært 70 til 80 bar. Da vanntrykket økte opp mot 75 til 80 bar ble det bestilt sluttrykk opp mot 110 bar. Effektivt injeksjonstrykk er da 20-25 bar.

Ved innlekkasjer på flere tusen liter pr minutt ble det boret 8-9 hull rundt profilet for å unngå å få for mye vann mot stuffen og for å redusere mesteparten av innlekkasjemengden. Ved å bore for mange injeksjonshull i områder med høyt vanntrykk kan det komme alvorlig mye vann fra stuffen, siden pakkere står kun 3-4m inne.

Erfaring har vist at det var behov for å bruke flere skjerner ved store vannmengder og høyt trykk på vannet, der den første skjermen med få hull kun reduserer innlekkasjen. Borplan Sonder 2 kan benyttes på slutten, for å tette de tynneste sprekkene.

4.3 Utstyr

Det var benyttet 2 injeksjonsrigger fra Atlas Copco, med 3 og 4 linjer.

Injeksjonspumpene 110-B22, max trykk på disse er 110 bar.

Pumpekapasitet på 1 pumpe er 120 l/min, men blandekapasitet begrenser det til 25 l/min på riggen med 4 linjer og til 35 l/min på den med 3 linjer.

Injeksjonsstavene er levert av Codan, 3 og 4 meters lengde, med godkjente kraner og koblinger. Det er blitt brukt mest 3 meters lange staver, men mot slutten av prosjektet har 4 meters staver blitt brukt mer og mer.

Injeksjonspakkere Codan, Ø64mm for injeksjonshull og Ø48mm for salvehull.

Injeksjonsslengene – 2 lags hydrauliske slanger med max trykk 400 bar.

4.3.1 Ombygging av utstyr på grunn av høyt vanntrykk

Da det har vært store mengder vann og høyt vanntrykk over tid, ble det nødvendig å gjøre tiltak for å øke sikkerheten for arbeiderne og forbedre gjennomføringen av injeksjonen. Det høye vanntrykket medførte problemer med injeksjonsutstyret som for eksempel injeksjonspakkere og staver. Det var problemer med å få ført injeksjonsstavene inn i injeksjonshullet og det var flere tilfeller hvor stavene bøyd seg. Pakkerne tålte heller ikke det høye vanntrykket; gummien på pakkere var for dårlig festa på innerrøret og ble pressa over skive bak på pakkere og inn på staven av vanntrykket.

Det ble derfor i samarbeid med leverandører gjort forbedringer både på injeksjonsstaver og pakkere:

- forsterka staver med tykkere stål som tåler mer
- påsveisa styrepinner for å lede pakker og stav inn i injeksjonshull (se Figur 10)
- bedre festing i fremkant av gummien på pakkere for å låse den fast til innerrøret
- forsterka låsing (låsebrikke) av pakker (se Figur 10)



Figur 10 Forsterka låsing av gummi på pakker til venstre og påsveisa styrepinner til høyre.

Det var også utfordrende å få komme til å stramme til pakkere med muttertrekker eller fastnøkkel. Det ble derfor laget en overgang som ble montert på boreriggen. Dermed ble det mulig å stramme til injeksjonsstavene forsiktig med rotasjonen på boremaskina. Dette økte sikkerheten for arbeiderne i stor

4.4 Samarbeid og rollefordeling mellom SVV og NCC

Statens vegvesen har laget en injeksjonsprosedyre for Mælefjelltunnelen. Men denne er ikke fulgt i særlig grad. Den aktuelle løsningen/metoden for injeksjon ble valgt for hver enkelt skjerm i samarbeid mellom kontrollingeniør/ingeniørgeolog og formann/bas, der det ble tatt hensyn til innlekkasjemengden, vanntrykk, geologiske forhold og erfaringer fra tidligere skjerner ved lignende forhold. For hver injeksjonsomgang ble det levert en kontrollørmelding som beskriver i korte trekk hvordan injeksjonen skulle utføres.

I kontrollørmeldingene blir det vist til prosess nr. i kontrakt som beskriver utførelse av injeksjonsboring og injeksjon.

4.5 Forslag til ny injeksjonsprosedyre fra Garshol

Utfordrende injeksjon med store vannlekkasjer og høyt vanntrykk har gjentatte ganger skapt problemer på Århus-stuffen. Det er utarbeidet en ny injeksjonsprosedyre av uavhengig konsulent Knut Garshol datert 9. februar, se Vedlegg 3. I prosedyren presenteres forslag om hovedsakelig bruk av mikrosegment og supplering av ultrafin sement ved tynne sprekker. Prosedyren kommer med konkrete forslag til stoppkriterier. Første stoppkriterium er at trykk ved avslutning av injeksjon skal være 30 til 50 bar over vanntrykket målt ved

oppstart injeksjon. Andre stoppkriterier går på mengdebegrensning per enkelthull avhengig av opprinnelig innlekkasje i borehullene:

- | | |
|--------------------------------------|-----------------------|
| - Innlekkasje borhull < 100 l/min | Mengdestopp 3 000 kg |
| - Innlekkasje borhull 100-400 l/min | Mengdestopp 3 000 kg |
| - Innlekkasje borhull 400-1000 l/min | Mengdestopp 6 000 kg |
| - Innlekkasje borhull > 1000 l/min | Mengdestopp 10 000 kg |

I tillegg beskrives en reduksjon i vann/sement-forholdet avhengig av opprinnelig innlekkasje i borehullene og medgåtte mengder. Dette synes i tråd med det som er praktisert også tidligere.

Observasjoner gjort etter at injeksjonsprosedyren foreslått av Garshol ble innført er imidlertid at den nye injeksjonsprosedyren ikke ble fulgt, spesielt i forhold til begrensning av mengder per injeksjonshull. Det er enighet mellom entreprenør og byggherre (utførende og kontrollør på stuff) om at mengdebegrensning som foreslått av Garshol ikke er riktig for dette prosjektet.

5 Gjennomføring av injeksjon i svakhetssone pel nr. 14914-14880

Under driving av Mælefjelltunnelen fra Århus-stuffen ble det påtruffet en vannførende svakhetssone med svært stor innlekkasje i slutten av mai 2015. Figur 11 viser eksempel på innlekkasje påtruffet ved pel nr. 14914. Sonen måtte injiseres med 11 skjermene, hvorav 7 av disse skjermene ble utført på pel nr. 14898 alene. Totalt ble det brukt i overkant av en måned å passere svakhetssonen (pel nr. 14914-14880). Innlekkasjemengden på de første skjermene var opptil 1000 l/min pr hull, med vanntrykk målt til 8-10 bar (tilsvarende 80-100 meter vanntrykk). Det ble brukt over 915 tonn injeksjonsmasse (ca. 685 tonn industrisement og ca. 230 tonn mikrosement) fordelt på 11 skjermene. Det ble ikke brukt ultrafin sement eller kjemisk injeksjon i sonen.



Figur 11 Eksempel på innlekkasje påtruffet ved pel nr. 14914

Bergmassen i svakhetssonen mellom pel nr. 14914 og 14880 er kjennetegnet av store åpne sprekker/hulrom som krever store injeksjonsmengder for å tette bergmassen. Det mest ekstreme eksempelet er en injeksjonsomgang der det ble injisert 240 tonn på en skjerm (pel nr. 14898) og medgått tid var 135 timer. En

mer detaljert beskrivelse av utført injeksjon skjerm for skjerm kan finnes i SVVs' notat 15/206697 (Vedlegg 2).

6 Sammenstilling av vannlekkasjer i de to sonene som er studert

Det er ikke registrert systematisk hvor mye vannlekkasje som er påtruffet i de forskjellige injeksjonsskjermene. Heller ikke for sonderboring er det registrert eksakte mengder innlekkasje på alle stoffene. Dette kommer delvis av at det er praktisk vanskelig og enkelte ganger umulig å utføre målinger av mengder som overskrider et par 100 l/min.

Det ble derfor valgt å dele innlekkasjer på injeksjonsskjermene inn i 3 kategorier: 100-400 l/min, 400-1000 l/min og >1000 l/min. I tillegg er det lagt til informasjon om hvor høyt vanntrykk som ble registrert samt korte kommentarer om geologi, se Tabell 4 og 5. Dette gir følgende oversikt for de to sonene:

Tabell 4: Oversikt over vannlekkasjer for sone mellom pel nr. 14914 og 14880

Sone 14914-14880				
Pel nr.	l/min	Vanntrykk (bar)	Kategori	Kommentar
14914	flere tusen l/min	8	>1000	Svakhetssone (Q-verdi 0,5-3,3)
14902	flere tusen l/min	8	>1000	Svakhetssone (Q-verdi 0,5-3,3)
14892	800-1000 l/min		400-1000	Svakhetssone (Q-verdi 0,5-3,3)

Tabell 5 Oversikt over vannlekkasjer for sone mellom pel nr. 13452 og 13235

Sone 13452-13235				
Pel nr.	l/min	Vanntrykk (bar)	Kategori	Kommentar
13462	flere tusen l/min	48	>1000	
13425	150-200 l/min	ikke trykk	100-400	
13408	200-400 l/min	52	100-400	tynne sprekker
13403	200-400 l/min	36-40	100-400	tynne sprekker
13385	flere tusen l/min	45	>1000	store åpne sprekker
13380	flere tusen l/min	45	>1000	store åpne sprekker
13348	100-200 l/min	ikke målt	100-400	tynne sprekker
13327	flere tusen l/min	50	>1000	åpne sprekker
13314	>1000 l/min	45	>1000	trange innganger i øvre del av skjermen
13308	200-400 l/min	høyt, ikke målt	100-400	trange sprekker
13302	flere hundre l/min	høyt, ikke målt	400-1000	
13296	flere tusen l/min	høyt, ikke målt	>1000	
13292	over tusen l/min	høyt, ikke målt	>1000	
13288	over tusen l/min	høyt, ikke målt	>1000	
13277	flere hundre l/min	høyt, ikke målt	100-400	svakhetssone

For sone 13452-13235 er det registrert Q-verdi mellom 6 og 17 som tilsvarer middels til godt berg. I tillegg er det noen gabbroganger. I artikkelen som ble presentert på World Tunnel Conference i Bergen er sammenhengen mellom geologi og vannlekkasjer studert mer i detalj (Holmøy og Lindvåg, 2017).

7 Gjennomføring av injeksjon i svakhetszone pel 13452-13235

For å komme gjennom sonen ble det utført totalt 39 injeksjonsskjermer fra 19 stuffer fra 5.mars 2016 til 16.juni 2016. Totalt ble det brukt 443 tonn industrisement, 170 tonn mikrosegment og 44,8 tonn ultrafin sement i denne sonen. I tillegg ble totalt ca. 3000 l kolloidal silika brukt på to skjermer.

I forbindelse med driving gjennom svakhetszone pel 13452-13235 (også kalt gropa) er det to typer bergmasse med forskjellig karakteristika og utfordringer:

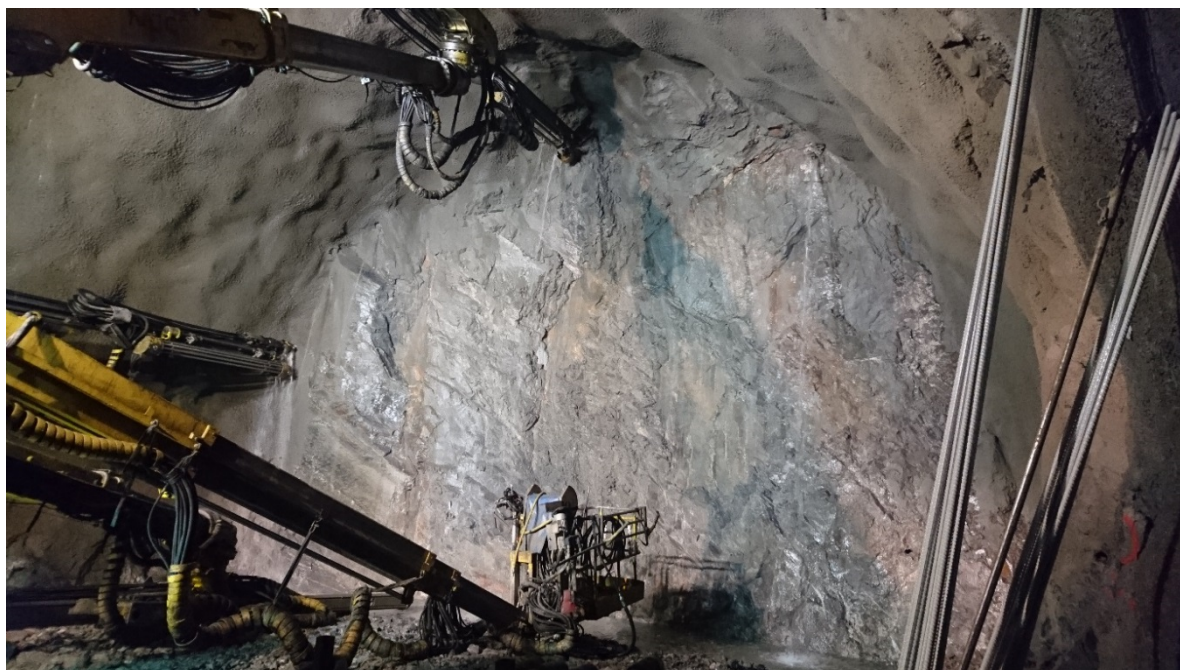
- Åpne sprekker, innlekkasje over 1000 l/min pr. skjerm, leirfylling, høyt vanntrykk – høyt forbruk pr skjerm opptil 40-100 tonn sement.
- Tynne leirfylte sprekker, høyt trykk, innlekkasje noen hundre l/min pr. skjerm – problemer med å få inn masse, mindre forbruk. Vanlig type bergmasse lokalisert på sidene av hovedforkastningen.

I den videre beskrivelsen er det valgt å beskrive injeksjonen utført på en strekning hvor det ble erfart jekking av stoffen. Jekkingen skjedde i forbindelse med en oppsprukket gabbrogang der det ble boret på flere tusen liter/minutt på sonderhull. Det ble ikke observert jekking i vegg eller heng.

7.1 Jekking av stoffen – pel nr. 13302 - 13290

Langs en sterkt forvitret gabbrogang fra ca. pel 13302 til 13285 ble det påtruffet vannlekkasjer. Gabbrogangen ligger tilnærmet konformt med omgivende kvartsitt. Sideberget (kontaktssonen) til intrusjonen var også omdannet, og vertikalsprekkene i kvartsitten var fylt med bløt leire.

Den 11.mai 2016 ble det problemer med jekking av stoffen i forbindelse med injeksjon. Det ble bestemt å pumpe resterende hull med lavere "flow" og trykk. Etter injeksjonen ble det tatt en opprettingsalve.



Figur 12 I stoffen ved pel nr. 13302 oppsto det jekking

Etter opprettingsalva (pel nr. 13297) skjærer gabbrogangen stoffen i venstre side (se Figur 12). Stoffen var tørr og jevn i begynnelsen. Gabbrogangen så normal ut, det var ikke tegn til svakhet. Det ble boret sonderhull, og det ble påtruffet innlekkasje (flere tusen l/min) på 18m i høyre side. Det ble bestilt skjerm

med 30 hull a 24 m (borplan Sonder 1). Det ble brukt industrisement på høyre side og mikrosegment på venstre siden det var små sprekker og lite lekkasje der. Det oppstod utrasing fra gabbrogangen under injeksjonen, og det utviklet seg et stort hull i stuffen, se Figur 13.



Figur 13 Utfall av forvitret bergmasse fra gabbrogang pel nr. 13297 (13. mai)

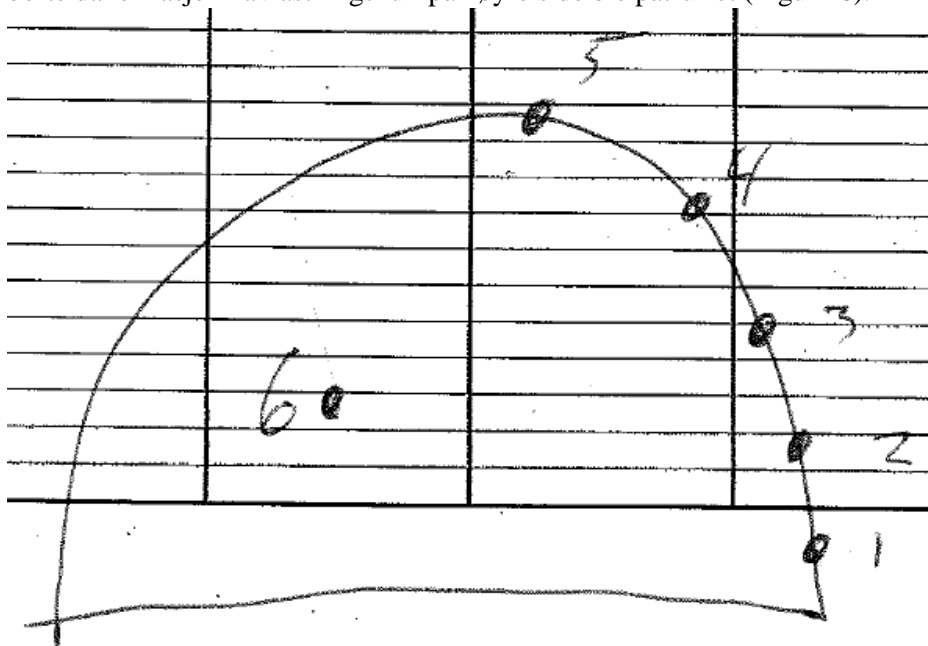
Det ble boret kontrollhull, og det var ca. 10 l/min pr. hull fra 18m, deretter ble det tatt en opprettingsalve. Etter opprettingsalva ble det bestilt skjerm, 30 hull a 24 m siden lekkasjen på kontrollhull var forholdsvis liten. Injeksjonen startet kl. 20.00 den 18.mai, etter ca.4 timer oppstod det en kraftig lekkasje fra gabbrogangen i stuffen opptil 1000 l/min. Se Figur 14.



Figur 14 Pigging etter opprettingsalve ved pel nr. 13292 til venstre. Lekkasje fra gabbrogang til høyre

Det viste seg å være vanskelig å få tettet lekkasjen. Det ble prøvd med styrt herding, men det fungerte hverken med styrt herding eller med tykk injeksjonsmasse (v/c lik 0,5 eller mindre). Det ble også brukt sagflis i et forsøk på å stoppe lekkasjen.

Etter denne skjermen ble det bestilt en ny skjerm med tilpasset utforming for å avlaste lekkasjen i stoffen, se Figur 14. Det ble også boret ett hull nr. 6 inn mot kontaktsonen i gabbrogangen som førte vann i stoffen. Kilden til lekkasjen ble påtruffet på 18-19 meter i høyre side, se Figur 15. Lekkasjen i stoffen ble nesten borte da lekkasjen i avlastningshull på høyre side ble påtruffet (Figur 16).



Figur 15 Skjerm pel nr. 13392 (20. mai)



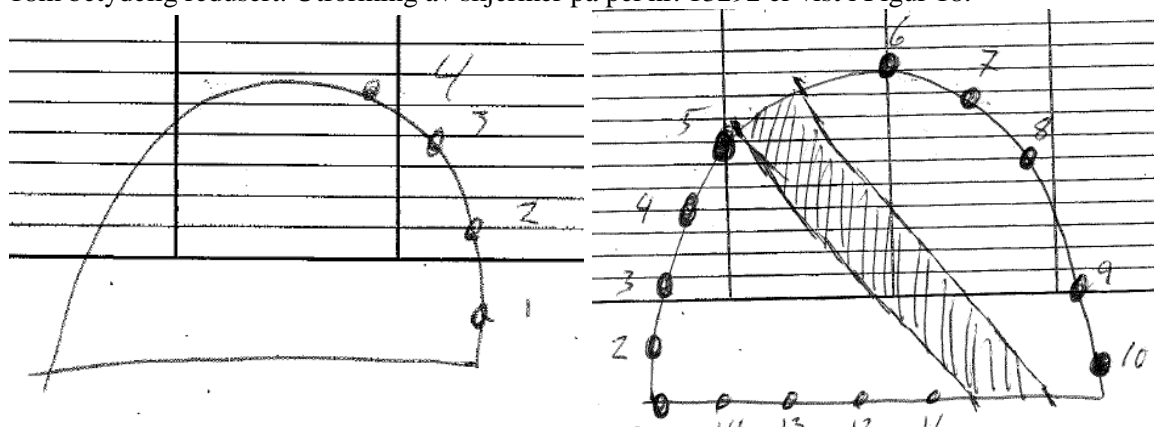
Figur 16 Mye lekkasje i avlastningshull på høyre side

Det ble også bestemt å sprute inn hull i stoffen med 10m³ fiberarmert E1000 sprøytebetong for å forsterke gabbrogangen, se Figur 17.



Figur 17 Hull i stoffen ved pel nr. 13292 som ble spruta inn (21. mai)

Etter pumping av 2 skjermer med tilpasset utforming ble utgangene i stoffen borte og hovedlekkasjen på 18m betydelig redusert. Utforming av skjermer på pel nr. 13292 er vist i Figur 18.



Figur 18 Utforming av skjerm nr. 2 pel nr. 13292 (21.mai) til venstre. Skjerm nr. 5 pel nr. 13292 (24.mai) til høyre

Den 24.mai ble det boret 14 hull rundt i profilet for å unngå utganger i stoffen, total innlekkasje var betydelig mindre på denne skjermen.

Etter denne skjermen ble det tatt ei opprettingsalve og stoffen ble sprutet med 15m³ E1000 sprøytebetong for å unngå jekking og utganger.

7.2 Kjemisk injeksjon

MasterRoc MP 325 er et en-komponents injeksjonssystem basert på nanometrisk kolloidalsilikasuspensjon som blir brukt for å tette fine sprekker i berg. Dette kjemiske injeksjonsmidlet ble testet i svakhetssonen ved pel nr. 13408.

I dette området ble det erfart utfordringer med å få injeksjonssementen inn i bergmassen. Det ble registrert 35-40 bar vanntrykk og bergmassen bestod av tynne leirfylte sprekker som gav små vannmengder. Det ble observert tynne vannstråler både fra stoffen og helt nede i liggen og i grøftene.

På den første skjermen var det totalt 14 hull, og det ble pumpet inn fra 0 til 946 l pr. hull, men det var problemer med å oppnå inntrengning i bergmassen. Totalt forbruk var 2300 liter. På den andre skjermen ble det pumpet på 5 hull med totalt forbruk 700 l.

Det ble prøvd å pumpe rent vann også, men det var ikke mulig å få inntrengning med vann heller. Det ble også prøvd å pumpe inn tynn mikrosement på denne stoffen, men det var heller ikke mulig. Til slutt ble det brukt ultrafin sement med diverse resepter og lav flow/strømning.

Etter at salve ble skutt, ble det observert at kolloidal silikaen kom tytende ut igjen av tynne sprekker. Det er fortsatt en god del drypp i dette området etter at injeksjonen ble avsluttet.

8 Prognose for vannlekkasjer og fremdrift de siste 1250 m av tunnelen

Høsten 2016 ble SINTEF bedt om å lage en prognose for hvor mye vannlekkasjer som kunne forventes på gjenstående tunnelstrekning (SINTEF, 2016) Rapporten er lagt ved som Vedlegg til foreliggende rapport (Vedlegg 4). Rapporten tok utgangspunkt i status den 2. desember da var tunneldrivingen kommet til pel nr. 11457 (Gvammen) og 12712 (Århus). Basert på prognosen for vannlekkasje ble det også utarbeidet et estimat for fremdrift på begge stoffene. Prognosen ble brukt som grunnlag for planlegging og optimalisering frem mot gjennomslag (1250 m gjensto). I dette kapitlet blir hovedpunktene i prognosen presentert først og deretter blir prognosen sammenlignet med virkelige forhold påtruffet i tunnelen.

8.1 Bakgrunn og oppsummering av prognosen

Det ble foretatt en gjennomgang av tilgjengelig informasjon om strukturgeologiske forhold i området Gvammen-Århus. I tillegg ble det utført en studie av hvor det ble påtruffet vannlekkasjer i tunnelen frem til desember 2016. Dette for å se om det fantes noen forklaring på hvorfor det er møtt vannlekkasjer akkurat der. Det ble tatt utgangspunkt i at det for dype tunneler ofte oppstår store vannlekkasjer langs markerte forkastningssoner (Holmøy, 2008).

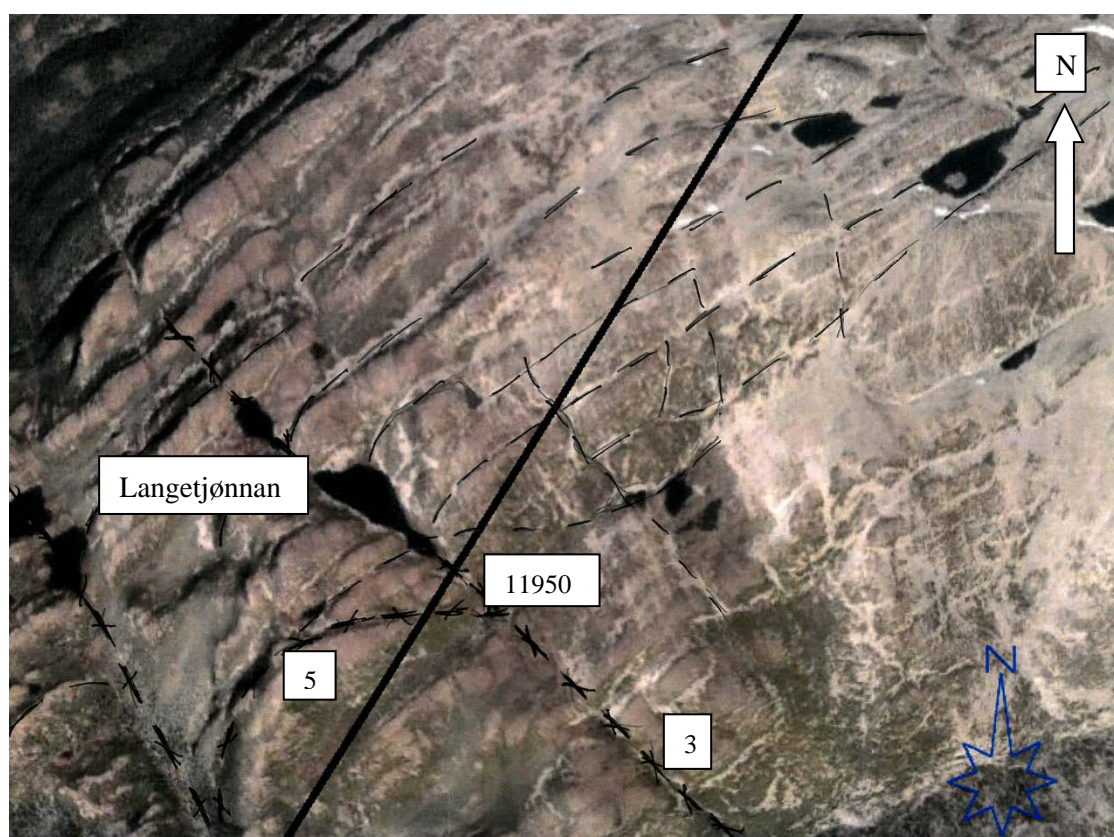
Det er vanskelig å lage prognoser for vannlekkasjer i tunneler, det ble derfor valgt å dele inn forventede vannlekkasjer i klasser med intervall gitt i l/min innlekkasje påtruffet på sonder- og injeksjonshull (før injeksjon blir utført). Klassene ble her satt til:

- Lite vann: 0-50 l/min
- Medium vann: 50-400 l/min
- Mye vann: 400-1000 l/min
- Veldig mye vann: > 1000 l/min

De mest vannførende sonene og sprekkeene i Mælefjelltunnelen er påtruffet i svakhetssoner som er parallelt eller tilnærmet parallelt N120°-140°Ø, og gjerne hvor flere svakhetssoner krysses, som for eksempel i gropa

(pel nr. 13452-13235). Strøkkretningen N120°-140°Ø er sammenfallende med strøkkretningen på forkastningssonen hvor det ble påtruffet mye vann i trykkunnelen ved Grunnåikraftverk (Buen og Halvorsen, 2005). Den andre strøkkretningen er parallellt lagdelingen i kvartsitten; denne sprekketretningen har imidlertid ikke vært spesielt vannførende.

Om man studerer denne strekningen i stereoskop kan man tegne opp og tolke svakhetssonene som vist i Figur 19. Her er de tolkede strukturene tegnet inn på et utsnitt hentet fra norgei3d.no. Den tykke svarte streken er tunneltraseen. Svakhetszone 3 antas å ha vertikalt fall og krysser tunnelen ved pel nr. 11950.



Figur 19 Tolkning av strukturegeologien i området, (tykk svart strek er tunneltraseen).

Ut fra den strukturegeologiske tolkningen kan det se ut som det er et skille ved Langetjønnan og svakhetszone 3. Det ble forventet ut fra erfaringer fra tidligere kryssinger av svakhetssoner i Mælefjelltunnelen med retning NV-SØ at det kunne bli vannlekkasjer i svakhetszone 3. På Århus-stuffen ble det forventet at det ville fortsette med middels store vannlekkasjer (50 til 400 l/min) inntil man nærmet seg svakhetszone 3.

På Gvammen-stuffen ble det forventet lite vann (0 til 50 l/min) frem til ca. pel nr. 11800. Derfra kunne man forvente en gradvis økning av vannlekkasjer (50 til 400 l/min) frem til 11900. Mellom pel nr. 11900 og 12050 kan bergmassen være påvirket av svakhetszone 3 og kryssingen med svakhetszone 5. Det ble derfor forventet at denne strekningen kunne påtreffe veldig mye vann (>1000 l/min) over en strekning på ca. 150 m.

Deretter ble fremdrift og injisert sementmengde (gitt i tonn) per uke for begge stuffene satt opp i et XY-plott, ett for hver stuff. En trendlinje ble kalkulert i excel, og denne ble anvendt for å estimere hvilken fremdrift som kunne forventes ut fra injeksjonsinnsats (SINTEF, 2016).

Om man illustrerer prognose for vannlekkasjer og fremdrift fordelt på gjenstående tunnelstrekning den 2. desember 2016 ble det som vist i tabell 6.

Tabell 6 Prognose for vannlekkasje og fremdrift langs gjenstående tunnelstrekning (SINTEF, 2016)

Pel nr (*1000)	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7
Vann (l/min)	0-50				50-400	>1000	400-1000	50-400						
Fremdrift (m/uke)	65				35	7,5	15	35						
Uker på strekning	5-6				3	20	6-7	16						

8.2 Sammenligning mellom prognose og virkelige forhold

8.2.1 Gvammen (pel nr. 11457-12065)

På Gvammen-stuffen ble det injisert 2 skjermer mellom profil nr. 11590 og 11685. Fra profil nr. 11739 ble det påtruffet økende mengde innlekkasje av vann og injeksjon (11 skjermer) frem til tunnelen kom inn i gabbro ved ca. profil nr. 11800. I gabbroen var det ingen nevneverdig innlekkasje, men vann ble igjen påtruffet i overgangen til kvartsitt ved profil nr. 11866. Det er ikke utført nøyaktige målinger av mengde vann som er påtruffet i injeksjonshullene. Videre har det vært lite vann, og det er kun utført en injeksjonsskjerm ved profil nr. 12059 før drivingen ble avsluttet den 19. mars.

Fremdriften var noe lavere enn estimert i forbindelse med vannlekkasjer påtruffet rundt pel nr. 11600 (ved juletider). Ved pel nr. 11739 og videre frem mot pel nr. 11800 var det økende innlekkasje og fremdriften fortsatte å ligge lavere enn prognosen tilsa. Fremdriften på Gvammen-stuffen lå på mellom 20 og 35 m/uke for strekninger med vannlekkasjer. Strekningen med vannlekkasjer kom noe tidligere enn forventet. Mellom pel nr. 11900 og 12050 var det prognostisert fremdrift ned i 7,5 m/uke. På denne strekningen er virkelig fremdrift god.

Totalt ble det brukt 15 uker å drive tunnelen fra pel nr. 11457 til pel nr. 12065 mot 29 uker som prognostisert. Hovedgrunnen til det positive avviket er at vannlekkasjene ikke skapte så store utfordringer som man fryktet, med en inndrift ned mot 7,5 m/uke som ble prognostisert mellom pel nr. 11900 til 12050. Om denne sonen hadde blitt vurdert mindre omfattende og med en inndrift på 20 m/uke ville prognosen og faktisk fremdrift omtrent stemt overens.

8.2.2 Århus (pel nr. 12694 – 12065)

Mellom profil nr. 12717 til 12488 var det tilnærmet tørt, og ikke behov for injeksjon, med unntak av en skjerm ved profil nr. 12552. Fra profil nr. 12488 ble det igjen behov for injeksjon, og på flere stuffer ble det nødvendig med to skjermer for å tilfredsstille tetthetskravet. Vannlekkasjene fortsatte med størst utfordringer mellom profil nr. 12259 og 12184.

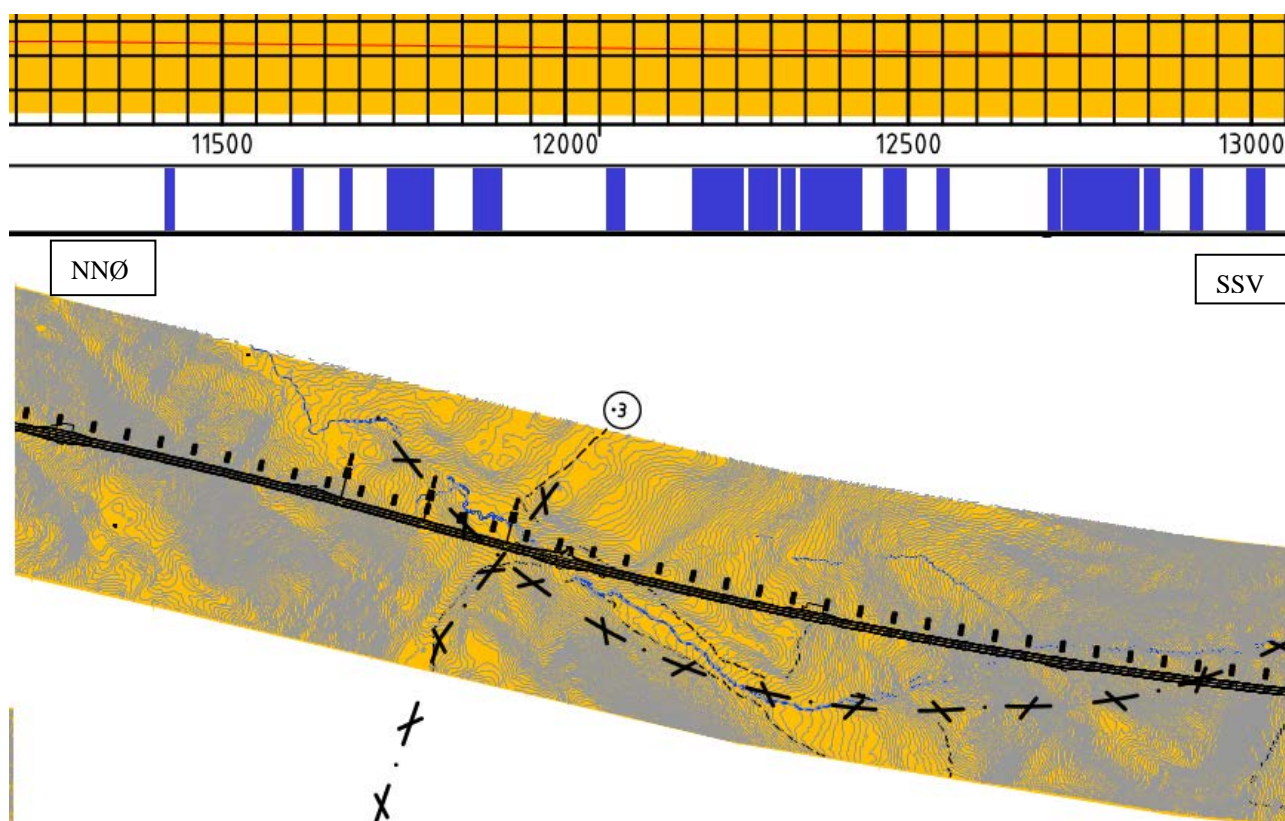
Fremdriften lå noe høyere enn prognostisert et godt stykke, men da det igjen ble behov for injeksjon gikk fremdriften ned mot rundt 20 m/uke, og fra ca. pel nr. 12400 ble prognostisert fremdrift og faktisk fremdrift omtrent like. På strekningen med størst utfordringer med injeksjon rundt pel nr. 12200 var fremdriften 27 m bak prognostisert. Ved avslutning av tunneldrivingen var virkelig fremdrift 26 m foran prognostisert. Totalt ble det brukt 22 uker å drive Århus-stuffen fra pel nr. 12694 til 12065 mot 21 uker som prognostisert. Prognosen stemte veldig godt for Århus-stuffen totalt sett.

8.2.3 Erfaring med prognosen

Dessverre ble det ikke registrert hvor mye vannlekkasjer som ble påtruffet på alle sonderboringshull eller injeksjonshull. Dermed er det ikke mulig å finne eksakt hvilke strekninger som utmerket seg med ekstra mye vannlekkasjer. Dette gjør det også vanskelig å få lærdom om hvilke geologiske parametere som gir størst vannlekkasjer og utfordringer med å tette bergmassen.

For Mælefjelltunnelen er det på strekningen for prognosen to svakhetssoner som ut fra utført geologisk kartlegging i dagen dominerer; svakhetszone 3 og 5 (buet), se ingeniørgeologisk kart og lengdeprofil i Figur 20. På lengdeprofilen er strekningene hvor det ble utført injeksjon markert med blått. Bergoverdekningen på denne strekningen er rundt 1000 m. Det er derfor svært vanskelig å forutsi hvor svakhetssoner faktisk vil krysse tunnelen. Et lite avvik i forhold til forventet fall vil gi stor variasjon i hvor svakhetssonen vil treffe tunnelen. (En grad feil gir nesten 20 m forskyvning på tunnelnivå).

Svakhetszone 5 er buet med sannsynlig fall mot ØSØ, og svakhetssonen kan se ut som den har tilnærmet samme orientering som benkningen i kvartsitten. Om fallet er moderat (35° - 45°) som i kvartsitten vil svakhetssonen krysse over tunnelnivået. Det er dermed sannsynlig at det er svakhetssoner som er parallell svakhetszone 3 som har gitt mest vannlekkasjer, eller det kan være en svakhetszone som følger elveleiet og har steilt fall. Men dette er svært vanskelig å vite ut fra kun overflatekartlegging.



Figur 20 Lengdeprofilen øverst viser strekninger med injeksjon (blått) og nederst vises ingeniørgeologisk kart med inntegnede svakhetssoner (Sweco, 2014)

Ingeniørgeologisk kartlegging utført i tunnelen viser at vannlekkasjene oppsto i bergartsgrenser mellom metagabbro og kvartsitt samt i sprekker/slepper med NV-SØ retning (parallelt svakhetszone 3).

Selv om det viser seg å være svært vanskelig å treffe 100% på prognose for vannlekkasjer og fremdrift mener byggeledelsen at det var svært nyttig at det ble laget en prognose for vannlekkasjer og fremdrift, da dette gav god støtte i form av at det var forventet vannlekkasjer og strekninger med utfordrende injeksjon. Og det opplevdes som positivt når fremdriften var bedre enn prognostisert.

9 Studie av utvalgte injeksjonsrunder

Medgåtte injeksjonsmengder (gitt i liter) og trykkutvikling under injeksjonen for hvert enkelt borhull blir registrert på injeksjonsriggen. I denne rapporten er 4 skjermer valgt ut for å se om injeksjonsforløpet er påvirket av vanntrykk, mengde innlekkasje og geologiske parametere (åpne sprekker mot fylte/tynne sprekker).

Ideelt skal en injeksjonsomgang utføres slik at tilstrekkelig injeksjonsmasse injiseres og tetter åpne sprekker og hulrom i bergmassen. For å oppnå tilstrekkelig inntrengning av injeksjonsmasse er det nødvendig å bruke et trykk på injeksjonsriggen som overstiger vanntrykket i borhullet man injiserer. I det videre arbeidet er det valgt ut 4 skjermer som er studert, se Tabell 7.

Tabell 7 Oversikt over skjermer som er studert.

Pel nr. (dato start inj.)	Sprekketyper/sone	Vanntrykk	Innlekkasje	Medgått mengde (kg)*
14898 (06/06/15)	Svakhetssone m/åpne sprekker/hulrom	8 bar	Flere 1000 l/min	310 185
14892 (30/06/15)	Svakhetssone	8 bar	400-1000 l/min	19 474
13403 (01/04/16)	"Gropa", tynne sprekker	36-40 bar	100-400 l/min	6 999
13380 (18/04/16)	"Gropa", store åpne sprekker	45 bar	>1000 l/min	74 975

*Totalt medgåtte mengder både industrisement og mikrosegment (ultrafin sement er ikke brukt her).

9.1 Skjerm pel nr. 14898

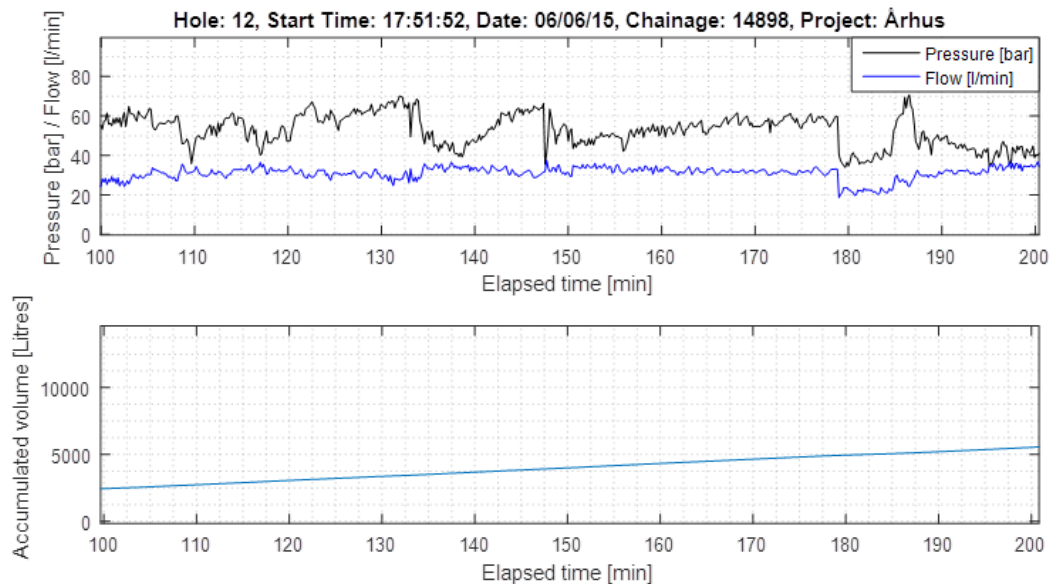
Skjermen som er studert her er skjerm nr. 2 av totalt 7 skjermer på pel nr. 14898, og er skjermen hvor det har gått mest injeksjonsmengder. Totalt medgåtte mengder er drøyt 310 tonn, hvorav 239 tonn var industrisement og 71 tonn var mikrosegment. Det er også brukt styrt herding med alkalifri akselerator (1260 kg) og muring (40 kg). Vanntrykket ble målt til 8 bar. Det var tydelig at området som ble injisert hadde store åpne sprekker og noen "hulrom" som "måtte" fylles opp. Totalt medgått tid på skjermen var 135 timer.

Når man studerer strømning i forhold til trykk i denne skjermen, ser man at strømningen er veldig høy i forhold til trykket. Dette tyder på at det er store åpne kanaler som fylles. Dette kan også sees av bildet i Figur 21 som viser størknet injeksjonssement i en åpen sprekk/hulrom. Det er pumpet veldig lenge; i enkelte hull i over 2 døgn. Medregnet i pumpetiden er også pauser. I flere borhull er det tatt pauser på ca. 1 time i injeksjonen for å la borhullet "hvile". Når trykket økes øker også strømningen mye med en gang før det avtar raskt som forventet.



Figur 21 Injeksjonsement som er størknet i et åpent rom i svakhetssone (brenksjesonen)

Det kan sees at det har skjedd jekking i bergmassen. Dette kan sees ved at trykket går ned samtidig som strømmingen enten er den samme eller går opp. Flere eksempel er vist i Figur 22.

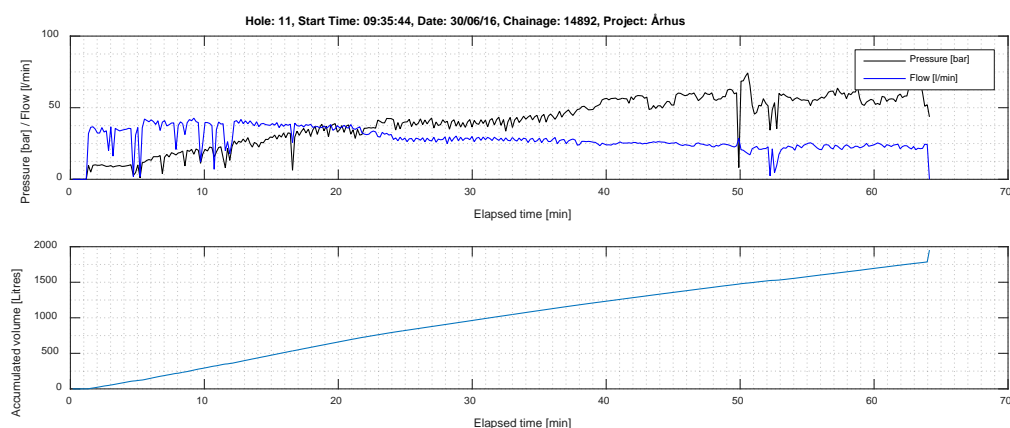


Figur 22 Eksempel på jekking i borhull 12

9.2 Skjerm pel nr. 14892

Denne skjermen er en av de siste skjermene som ble injisert i svakhetssonen (breksjesonen). Området er preget av oppknust og porøst materiale med brunfarget knusningsmateriale. Det ble brukt forbolter og buer samt Ischebeck stag (pel nr. 14890) i den videre drifvingen for å komme gjennom svakhetssonen. De største åpne kanaler / "hulrom" var fylt opp gjennom injeksjonen som ble utført ved pel nr. 14898, og det ble injisert totalt 19,5 tonn med mikrosement for å tette de siste åpne kanalene. Innlekkasjen på injeksjonsskjermen er estimert til mellom 400 og 1000 l/min, og vanntrykket ble målt til 8 bar.

Ved å studere strømnings- og trykkurver kan man se at det for flere borhull er en normal trykkoppbygging samtidig som strømmingen avtar. Men på enkelte borhull finnes det eksempler der trykket plutselig går ned samtidig som strømmingen fortsetter på samme nivå. Dette kan bety at det har vært jekking i borhullet. Eksempel på kurve er vist i Figur 23.



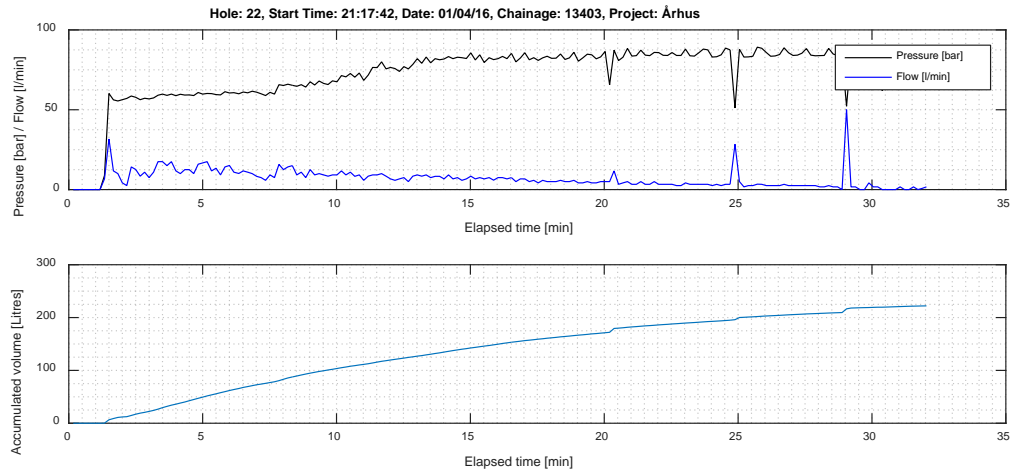
Figur 23 Eksempel fra borhull 11 i skjerm ved pel nr. 14892

9.3 Skjerm pel nr. 13403

Det er medgått totalt 7 tonn mikrosement i skjermen ved pel nr. 13403. Dette er moderate mengder sement sammenlignet med de andre skjermene som er studert her. Men når man sammenligner med skjerm utført i svakhetssonen "Gropa" er det mange skjerm med mikrosement hvor mengden varierer mellom 2 og 9 tonn. Det ble observert innlekkasjer i borehullene fra 5 til 10 l/min samtidig som det er registrert vanntrykk mellom 35 og 45 bar.

Dette kommer mest sannsynlig av svært små åpninger langs vannførende sprekkeplan. Slike forhold gjør det vanskelig å få sementbaserte injeksjonsmidler til å penetrere inn i sprekker i bergmassen. Det er også derfor utført injeksjon med MasterRoc MP 325 i dette området (pel nr. 13408).

Når man studerer strømnings- og trykkurvene for denne skjermen ser man en jevn reduksjon av strømning (flow) samtidig som trykket øker over tid. Mot slutten er strømmingen omtrent lik null, noe som betyr at det er oppnådd ståtrykk på ca. 80 bar (det vil si at trykket holder seg konstant ved tilnærmet null strømning). Med et vanntrykk på ca. 40 bar gir dette et effektivt injeksjonstrykk på omkring 40 bar. Det ser ikke ut til å være tydelige tilfeller av hydraulisk jekking i denne skjermen. Eksempel på registrerte kurver er vist i Figur 24.

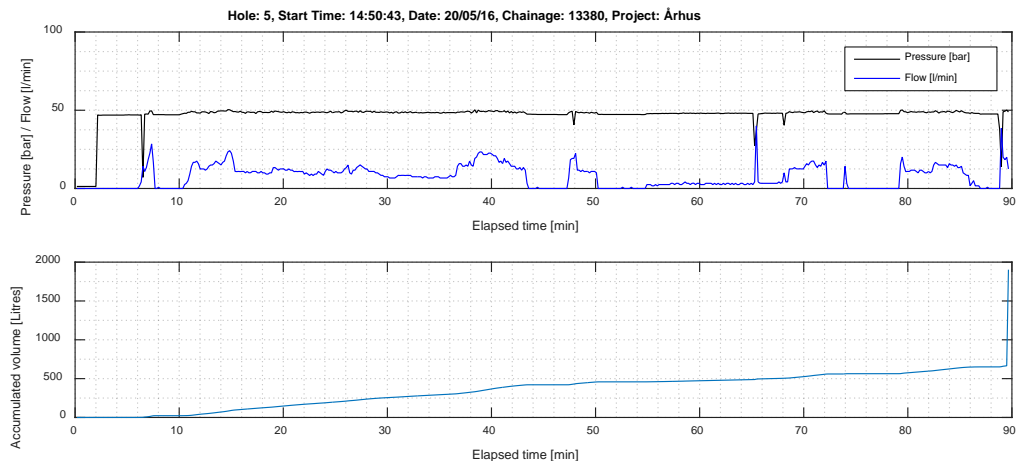


Figur 24 Eksempel fra borhull 22 i skjerm ved pel nr. 13403

9.4 Skjerm pel nr. 13380

Det ble pumpet 67 tonn industrisement og 7,7 tonn mikrosegment på skjermen ved pel nr. 13380. Det ble også brukt 10 kg mauring i et forsøk på å oppnå motstand der det ikke bygde seg opp trykk ved injeksjon. Vannlekkasjene var på flere 1000 l/min samtidig som vanntrykket ble registrert til 45 bar. Skjermen har flere hull der det ble pumpet lenge, og totalt medgått tid på skjermen var 44 timer.

Ved å studere strømningsforløp og trykkutvikling i noen utvalgte borhull kan man se at det i flere borhull er blitt injisert med trykk på rundt 50 bar over lang tid uten å oppnå høyere trykk. Samtidig er det tilfeller der strømmingen øker uten at trykket øker, og det kan tyde på jekking. Men det kan også være at trykket er satt til å være konstant på 50 bar og så har strømmingen blitt justert manuelt. Bestilt sluttrykk for skjermen var 90 bar. Et utdrag av injeksjonsforløpet i borhull 5 er vist i Figur 25. Det er ikke avslutningen av borhull 5 som er vist, dette er kun et lite utdrag av hele injeksjonsforløpet i borhull 5.



Figur 25 Eksempel fra borhull 5 i skjerm ved pel nr. 13380

10 Diskusjon og oppsummering

Studier av de to svakhetssonene mellom pel nr. 14914-14880 (breksjesonen) og pel nr. 13452-13235 (gropa) samt noen andre eksempler viser at injeksjonen har vært utfordrende. Det er to naturgitte forhold som har medført utfordringer ved injeksjonsarbeidet:

- Åpne sprekker / hulrom kombinert med høyt trykk som har ført til store injeksjonsmengder
- Tynne sprekker / kanaler kombinert med leire og høyt trykk

Så store lekkasjer og trykk har vært erfart at det er på grensen av hva utstyret kan tåle (problemer med å få satt inn staver) samt at det er utfordrende i forhold til HMS. Åpne sprekker og høyt forbruk av injeksjonsmasse ble eksempelvis erfart i tilknytning til breksjesonen mellom pel nr. 14914 og 14880 samt i kjernesonen av gropa pel nr. 13350 til 13400. I strekningene rett før og etter kjernesonen ble det derimot registrert at det i flere skjærmer var tynne og leirfylte sprekker som var vanskelige å tette. Disse relativt raske endringene i geologien gjør det ekstra utfordrende å følge opp og optimalisere injeksjonen.

Ved store lekkasjer og høyt trykk har det også vært erfart at det i første injeksjonsrunde er lurt å ikke bore for mange hull totalt samt unngå/ redusere antall injeksjonshull i stoffen. Dette fordi det har oppstått problemer når stavene er plassert og stengt ved at vannet finner seg nye veier ut i stoffen. I tillegg er det viktig at selve stoffen er mest mulig rett, fordi en slik fasong reduserer faren for at vannlekkasjer kommer ut i stoffen. Ved første injeksjonsomgang går det ofte lett inn injeksjonsmasse, men ved kontrollboring er vannlekkasjene fortsatt store. Ved andre omgang er de største sprekke/kanalene fylt opp, og inngangen noe lavere.

Utfordringer ved høye trykk og store vannlekkasjer har satt både utstyr og mannskap på prøve. Det er gjort tilpasninger både på pakkere og staver for å klare å få de plassert i injeksjonshullene. Det er også erfart at det er nødvendig å bruke 4 meter lange staver for å redusere faren for injeksjonsutganger på stoff.

Det er blitt forsøkt å bruke kolloidal silika for å tette de aller tynneste sprekke/kanalene, men dette var ikke vellykket. Kolloidal silika ga ikke så god inntrengning som forventet samt at materialet sannsynligvis ble delvis utvasket og dermed fikk man ufullstendig herding i bergmassen.

Erfaringer med BASF sin mikrosegment når den injiseres på tynne sprekker indikerer at den herder for fort når strømmingen blir lav. Utover dette har produktet vist at det fungerer bra. Det ble prøvd med Norcem sin mikrosegment (nedmalt industrisement) som er finere og silikabasert. Det har imidlertid ikke lyktes å få inn større mengder av dette produktet enn BASF's produkt. Norcem sitt produkt har lang herdetid, 12 til 18 timer, som er for lenge i den gitte situasjon. Ultrafin sement er blitt benyttet i mindre mengder i noen områder, men det som har fungert best er en kombinasjon av vanlig industrisement og BASF sin mikrosegment.

Problemene ved driving av trykktunnelen til Grunnåi kraftverk er beskrevet i en artikkel presentert på bergmekanikkdagen 2005 (Buen og Halvorsen, 2005). Også her ble det rapportert om store utfordringer i forbindelse med drivingen gjennom to forkastningssoner med høyt vanntrykk og dårlig bergmassekvalitet med leire som medførte at det måtte injiseres i flere omganger på samme stoff. Ved en anledning måtte de gi opp stoffen og drive en "by-pass" for å komme gjennom. Buen og Halvorsen mente at grunnen til at injeksjonen var så vanskelig var tilstedeværelse av leirmateriale i sonene. Det ble konkludert med at det var nødvendig med mikrosegment for å tette de fineste kanalene. Også i Grunnåi ble det registrert pulserende innlekkasje: "Pulserende lekkasje og ny lekkasje i tidligere tørre hull indikerer at leirmaterialet eroderes. At det bygges opp og brytes ned filtre og at erosjon kan starte på kanaler som er så fine at heller ikke mikrosegment har blokkert disse." Dette er interessant og situasjonen som er beskrevet her kan være det samme fenomenet som er erfart i Mælefjellet.

Det diskuteres i fagmiljøet om hydraulisk jekking er positivt eller negativt. I Norge har den dominerende oppfatningen vært at høyt injeksjonstrykk er påkrevet for å oppnå inntrengning og tetting, uavhengig av om det medfører hydraulisk jekking. Ved injeksjon mot høyt vanntrykk er det viktig å overskride vanntrykket, det er det effektive injeksjonstrykket som er avgjørende. Ved Mælefjelltunnelen har vanntrykket gjennomgående vært høyt, ved flere anledninger er det målt opp i 80 til 85 bar. Ved så høyt vanntrykk blir det effektivt injeksjonstrykk kun 25 til 30 bar med 110 bar maksimaltrykk på injeksjonspumpa.

Det man kan se fra eksemplene som viser strømning og utvikling av trykk er at det er store forskjeller på hvordan de forskjellige stufflagene utfører injeksjonen. Det kan være mye å lære både for entreprenør og byggherre ved å anvende den informasjonen som man har tilgjengelig gjennom de ulike registreringer som blir gjort under arbeidets gang. PhD kandidat ved NTNU Helene Strømsvik har hjulpet SINTEF Byggforsk med å lage grafene som viser medgåtte mengder og trykkoppbygging som eksempler på hva man kan lese ut fra det som er registrert. Helene jobber med en doktorgrad innenfor injeksjon der hun ser spesielt på forståelsen av hva som skjer i bergmassen ved injeksjon, og hvordan man kan optimalisere injeksjonsinnsatsen (Strømsvik og Grøv, 2017). Gjennom arbeidet samarbeider hun med Bevercontrol for å utvikle en metode/programvare for å ta ut strømnings- og trykkdata som skal være til hjelp for å forstå injeksjonsprosessen bedre.

Det er ved Mælefjelltunnelen erfart store utfordringer og raske variasjoner i påtruffet bergmasse; fra tynne sprekker og lite inngang til åpne sprekker/hulrom og store innganger. Det har blitt utført flere omganger med totale injeksjonsmengder rundt 300 tonn sement fra samme stuff.

Om man regner med at bergmassen har fra 0,004 til 0,1% sprekkevolum som kan fylles med injeksjonsmasse (Klüver og Kveen, 2004) kan man utføre et regnestykke for å finne ut hvor stor prosent av bergmassen som er fylt med injeksjonsmasse ved et eksempel fra Mælefjelltunnelen. Under er det tatt utgangspunkt i 300 tonn injeksjonssement injisert fra samme stuff med 3 stk. 24 m lange skjerm (tre omganger) og 30 hull i hver skjerm. Det tas hensyn til at injeksjonshullene også fylles med injeksjonsmasse. Trekker derfor fra 2 m³ injeksjonsmasse per omgang (fylling av 30 stk. 24 m lange borehullx3 omganger). Totalt areal som skal injiseres er forenklet til en sirkelformet tunnel med radius lik 11 m. Det vil si at det injiseres 6 meter utenfor teoretisk sprengningsprofil (som tilsvarer ca. en tunnel med radius 5 meter). Det antas et v/c-forhold på 0,8, og for industrisement vil det si en egenvekt på 1,6 kg/l, se Tabell 8 for utregning av areal og volum ved injeksjon.

Tabell 8 Utregning av areal og volum ved injeksjon

Forklaring	Areal (πr^2) (r=11m) (m ²)	Volum (AxL) (m ³) – 6 m ³ *	Injeksjonsmengde (kg)	Omregning til l og m ³ (antar v/c 0,8/1,6 kg/l)
Utregnet resultat	380 m ²	9 117 m ³	300 000	187 500 l / 187,5 m ³

*fylling av 3 omganger med 30 stk. 24 m lange borehull

Om man antar at all injeksjonsmassen er brukt innenfor en radius på 6 meter utenfor teoretisk sprengningsprofil får man at injeksjonsmassen fyller 2% av det totale volumet (181,5/9 117*100). Det er 20 ganger mer enn det som er sannsynlig tilgjengelig sprekkevolum i massen som ønskes tettet.

11 Avsluttende kommentarer

En viktig erfaring ved høye trykk er at man alltid må passe på å ha tilstrekkelig avstand (to til tre salvelengder) frem til den vannførende sonen samt ha 4 eller 5 meter lange injeksjonsstaver. Ved store vannlekkasjer og høyt vanntrykk bør det vurderes å bore færre injeksjonshull på første skjerm, samt å bore avlastningshull for å klare å starte injeksjonen på en trygg måte. Flere forbedringer på injeksjonsutstyret er blitt gjort for å øke sikkerheten for arbeiderne på stuff.

Det kan stilles spørsmål ved om det kunne vært mulig å redusere antall injeksjonsomganger eller redusere injeksjonsmengdene, og hvordan skulle dette så utføres. Det rapporteres fra anlegget at styrt herding og akselerator er blitt testet uten at det ga ønsket resultat. Man kunne og se på muligheten for å bruke teknikken med sperreskjerm. Alternativt bruke en kombinasjon av polyuretan og mikrosement (også kalt flex/mix-metoden) som gjør at injeksjonsmassen ikke trenger for langt vekk fra tunnelen og området som er ønsket tettet.

Det er vår oppfatning at byggherrer bør vurdere å styre injeksjonen noe tettere, og kanskje ikke kun fokusere på sluttrykk som eneste sluttkriterie, men at tid og/eller mengde også kan være sluttkriterier. Dagens registreringsmuligheter på injeksjonsrigger gir gode muligheter for å følge opp arbeidene og bergets respons, for derigjennom å optimalisere injeksjonsarbeidene.

Situasjonen ved Mælefjelltunnelen er et potensielt hydrostatisk vanntrykk på opp mot 1000 m, og man har ved flere anledninger registrert 70 til 85 bars vanntrykk. Ved slike mottrykk i bergmassen er det reelt behov for et pumpetrykk på 120 bar eller høyere for å ha kraft til å flytte vann bakover og erstatte det med injeksjonsmasse.

12 Konklusjon

Det er blitt brukt mer injeksjonsmengder enn nødvendig ved Mælefjelltunnelen. Forsøk med styrt herding og/eller flex/mix metoden kunne vært testet ut (i større grad) på strekninger med store innganger. Innhentning av ekstern hjelp kunne med fordel vært gjort tidligere. Ved Mælefjelltunnelen ble enigheten mellom byggherre og entreprenør for stor, og det ble vanskelig å gjøre endringer av injeksjonsopplegget mot slutten av driveperioden.

Det er fordelaktig å lage prognoser for vannlekkasjer og fremdrift. Dette fører til fokus på vannlekkasjer og injeksjon, og bedre kontroll av fremdriften. Fremtidige tunnelprosjekter vil kunne ha mer detaljerte registreringer av mengde vannlekkasjer i sonderhull og injeksjonshull. Ved store lekkasjer kan lekkasjemengder gis i intervall som vist i Kapittel 6 i denne rapporten. Det foreslås at det lages en veileder for hvordan lage prognose for vannlekkasjer i tunneler.

13 Dokumentasjon/referanser

Buen B. og Halvorsen A., 2005: "Vanskelig driving gjennom lavkonsoliderte leirsoner med vann under høyt trykk – Grunnåi kraftverk". Bergmekanikkdagen 2005

Garshol, K. 2017: "Mælefjelltunnelen gjenstående 628 m driving. Optimalisering av forinjeksjon.: Rev. 01 – 9. februar 2017." 11s

Holmøy, K. H. og Lindvåg, V., 2017: "Grouting in Mælefjell road tunnel: high groundwater pressure and challenging geological conditions" Juni 2017, World Tunnel Conference, Bergen, 9s.

Holmøy, K. H., 2008: "Sammenhenger mellom ingeniørgeologiske forhold og vannlekkasjer i berg – resultat av studier av 6 norske tunneler" Bergmekanikkdagen 2008

Klüver, B.H og Kveen, A, 2004: "Berginjeksjon i praksis" Publikasjon 104, Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Vegdirektoratet, 63 s

SINTEF, 2016: "Prognose for vannlekkasjer og fremdrift frem mot gjennomslag (1250 m)" SINTEF Rapport SBF2016F0581, datert 05.12.2016, 9 sider

Strømsvik, H. og Grøv, E., 2017: "Interpretation of Pressure and Flow During Pre-Grouting in Hard Rock Tunneling" 5th International Grouting Conference i Honolulu, Hawaii, Juli 2017. 10 sider

SWECO, 2014: "Ingeniørgeologisk rapport til konkurransegrunnlaget" datert 28.04.2014, 24 sider



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no