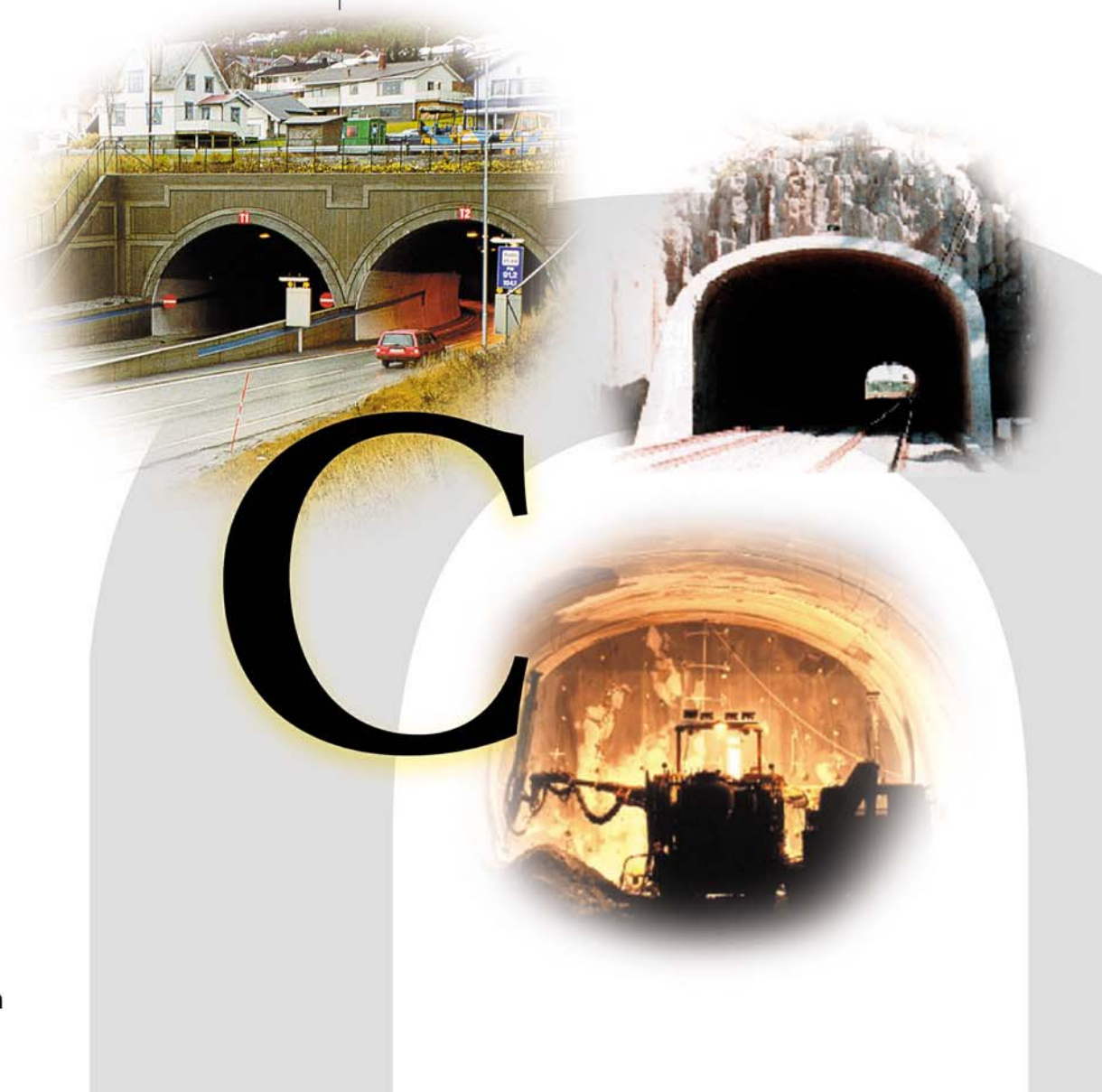


# MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE TUNNELER

Rapport nr: **2**

## Injeksjon

Erfaringer fra utvalgte tunnelprosjekter



Intern rapport nr. 2233



**Statens vegvesen**

## Injeksjon – erfaringer fra utførte tunnelprosjekter

### Sammendrag

I forbindelse med NFR-prosjektet "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler" har erfaringene fra en rekke gjennomførte tunnelprosjekter blitt samlet.

Analyse av erfaringer fra gjennomførte prosjekter er av avgjørende betydning for å kunne videreutvikle injeksjonsmetodikken. Dokumentasjon og oppdagelser fra utførte prosjekter må føres videre for verifikasjon på nye prosjekter.

Rapporten er basert på 6 godt dokumenterte tunnelprosjekter: Tåsentunnelen, Svartdaltunnelen, Storhaugtunnelen, Baneheiatunnelen og Bragernestunnelen i Norge, samt Lundbytunnelen i Sverige.

Et sammendrag av resultater er gitt på side 1-1.

Rapporten er utarbeidet av Torkild Åndal, Helen Andersson og Oddbjørn Aasen ved NVK AS (Norsk Vandbyggningskontor)

Emneord: *Tunnel ,injeksjon, erfaringer, utførte prosjekter, NFR-prosjekt*

Kontor: *Geologi- og tunnelkontoret*

Saksbehandler: *Kjell Inge Davik*

Dato: *November 2001*

*KID*

---

Statens vegvesen, Vegdirektoratet

**Vegteknisk avdeling**

Postboks 8142 Dep, 0033 Oslo

Telefon: 22 07 39 00 Telefax: 22 07 34 44

# INNHOLDSFORTEGNELSE

<b>INNHOLDSFORTEGNELSE</b>	<b>I</b>
<b>SAMMENDRAG / KONKLUSJONER</b>	<b>1-1</b>
<b>1 INNLEDNING</b>	<b>1-1</b>
1.1 BAKGRUNN	1-1
<b>2 VALG AV AKTUELLE TUNNELPROSJEKTER</b>	<b>2-1</b>
2.1 AKTUELLE TUNNELER OG KRITERIER FOR UTVALG	2-1
<b>3 METODIKK FOR INNHENTING OG BEARBEIDING AV ERFARINGER.</b>	<b>3-1</b>
3.1 INNHENTING OG GJENNOMGANG AV FORELIGGENDE DATA OG ERFARINGER	3-1
3.2 OPPLEGG FOR INTERVJU AV NØKKELPERSONER.	3-1
3.3 GJENNOMFØRING AV INTERVJUER OG SAMMENSTILLINGER.	3-3
<b>4 TÅSENTUNNELEN, OSLO</b>	<b>4-1</b>
4.1 KORTFATTET PROSJEKTBEKRIVELSE	4-1
4.2 TETTHETSKRAV OG LEKKASJEFORHOLD	4-2
4.3 RUTINEMESSIG INJEKSJON	4-2
4.4 TILPASSET INJEKSJON	4-7
4.5 OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER	4-9
<b>5 SVARTDALSTUNNELEN, OSLO</b>	<b>5-1</b>
5.1 KORTFATTET PROSJEKTBEKRIVELSE	5-1
5.2 TETTHETSKRAV OG LEKKASJEFORHOLD	5-2
5.3 TILPASSET INJEKSJON	5-2
5.4 OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER:	5-5
<b>6 LUNDBYTUNNELEN, GÖTEBORG</b>	<b>6-1</b>
6.1 KORTFATTET PROSJEKTBEKRIVELSE	6-1
6.2 TETTHETSKRAV OG LEKKASJEFORHOLD	6-2
6.3 RUTINEMESSIG INJEKSJON	6-2
6.4 TILPASSET INJEKSJON	6-9
6.5 OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER.	6-11



<b>7</b>	<b><u>STORHAUGTUNNELEN, STAVANGER</u></b>	<b>7-1</b>
7.1	KORTFATTET PROSJEKTBEKRIVELSE	7-1
7.2	TETTHETSKRAV OG LEKKASJEFORHOLD	7-2
7.3	TILPASSET INJEKSJON	7-2
7.4	OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER.	7-7
<b>8</b>	<b><u>BRAGERNESTUNNELEN, DRAMMEN</u></b>	<b>8-1</b>
8.1	KORTFATTET PROSJEKTBEKRIVELSE	8-1
8.2	LEKKASJEFORHOLD OG TETTHETSKRAV	8-2
8.3	RUTINEMESSIG INJEKSJON	8-3
8.4	TILPASSET INJEKSJON I UTVALGTE SONER	8-9
8.5	OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER.	8-12
<b>9</b>	<b><u>BANEHEIA TUNNELERNE, KRISTIANSAND</u></b>	<b>9-1</b>
9.1	KORTFATTET PROSJEKTBEKRIVELSE	9-1
9.2	LEKKASJEFORHOLD OG TETTHETSKRAV	9-2
9.3	RUTINEMESSIG INJEKSJON	9-2
9.4	TILPASSET INJEKSJON I UTVALGTE SONER	9-10
9.5	OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER:	9-14
<b>10</b>	<b><u>SAMMENSTILLING ERFARINGSUNDERSØKELSE</u></b>	<b>10-1</b>
10.1	BERGMASSE	10-1
10.2	TETTEKRAV	10-1
10.3	INJEKSJONSTRATEGI / TETTEKONSEPT	10-1
10.4	INJEKSJONSUTSTYR	10-2
10.5	INJEKSJONSSKJERM	10-2
10.6	INJEKSJONMIDDEL	10-2
10.7	INJEKSJONUTFØRELSE	10-3
10.8	INJEKSJONSKONTROLL/ DOKUMENTASJON	10-3
10.9	RESULTAT	10-4
<b>11</b>	<b><u>REFERANSER</u></b>	<b>11-1</b>

## SAMMENDRAG / KONKLUSJONER

Prosjektutvalg	<p>For et FoU-prosjekt som vil innhente og bearbeide injeksjonserfaringer er det selvfølgelig ønskelig med data fra et stort antall tunnelprosjekter. Begrensede ressurser og erkjennelsen av at mange prosjekter, spesielt de eldre, har lite erfaringer som er godt dokumentert, har begrenset det utvalg og antall tunnelprosjekter som kunne studeres.</p> <p>De 6 aktuelle tunnelprosjektene; Tåsen, Svartdalen, Lundby, Storhaug, Baneheia og Bragernes, ble derfor valgt ut fra vurdering av følgende :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Godt dokumentert utførelse og resultater</li><li>• Representative mhp dagens injeksjonsstrategi og metodevalg</li><li>• Strenge tetthetskrav</li><li>• Stor tetteinsats</li></ul>
Nøkkeldata	<p>Grove, bearbejdede nøkkeldata for det enkelte prosjekt mhp bergmasseforhold, tetthetskrav/resultater og tetteinsats er sammenstillt i tabell 1. Denne tabellen kan ved behov anvendes til grovsøk i den datamengden som rapporten representerer.</p> <p>Beskrivelse og oppsummering av erfaringene er presentert under det enkelte prosjektkapittel.</p>
Vurdering av prosjektene	<p>Alle prosjektene er gjennomført i perioden 1995 til 2000, dokumentasjonsnivået har vært høyt, og det har vært mulig å finne og intervjuer nøkkelpersoner med erfaringer fra utførelsen, i noen tilfeller både fra entreprenør, konsulent og utbygger.</p> <p>Alle prosjektene er vegtunneler, som er bygd i eller nær byområder, ofte med liten terreng- og bergmasseoverdekning og vanskelige grunnforhold.</p>
Tunnelprosjekter status	<p>Med en slik tilgang på varierte tunnelprosjekter har tidspunktet for gjennomføring av FoU-prosjektet derfor vært gunstig mhp å få gjort opp og dokumentert status for dagens injeksjonsstrategi og metodevalg ved forinjeksjon i tunnel.</p>
Tetthetskrav	<p>I løpet av samme tidsperiode har samfunnet også satt økt fokus på konsekvensene av eventuell grunnvannsenkning som tunnelprosjekter kan medføre. Krav til tetthet av tunnel er blitt konkretisert for de fleste nye prosjekter, enten for hele tunnelen, eller for antatt kritiske delstrekninger. Kravene har ofte vært strenge, noe som har medført stor tetteinsats i form av forinjeksjon. Injeksjonserfaringene som er dokumentert i disse prosjektene er knyttet til tetthetskrav som varierer fra mindre enn 2 l/min/100m tunnel (Lundby, Baneheia, Storhaug), til 3-4 l (Svartdalen og deler av Baneheia), og 10-15 l ved Bragernes og deler av Tåsen. Andre deler av Tåsen har gitt resultater over 25 l/min/100m tunnel. De fastsatte</p>

	<p>tettekrav ble oppnådd på alle prosjekter, med unntak av delstrekninger på Tåsen og Lundby-prosjektet. På disse strekninger er (permanent) vanninfiltrasjon i drift.</p>
Variasjoner i bergmasseforhold	<p>En stor ulempe med bare å studere 6 prosjekter er at fjell- og grunnvannsforholdene (bergmassen) er så forskjellige fra prosjekt til prosjekt, at gode injeksjonserfaringer fra ett prosjekt, helt sikkert ikke kan overføres til et annet uten videre. På den annen side har denne situasjon bidratt til at erfaringene dekker en viktig del av bergmassevariasjonene en har i Norge; Baneheia- og Lundby-tunnelene representeres grovt sett av gneiser av god kvalitet, med noen få knusningssoner og ekstremt liten fjelloverdekning. Bragernes og Tåsen representerer både permiske dag/gangbergarter og kambrosiluriske kalk-/leirskifre, begge hovedtyper med varierende og tildels høy insitu permeabilitet. Storhaugtunnelen har hatt en tett fyllitt, mens det på Svartdalen ble injisert i svært variert oppsprukket alunskifer og gneis, forkastningssone og sidefjell.</p>
Valg av tettestrategi (injeksjonsstrategi og program)	<p>Systematisk forinjeksjon som hovedstrategi for tetteinnsats er blitt helt vanlig for tunnelprosjekter som er pålagt strenge tetthetskrav. På noen prosjekter har dette blitt bestemt før drivingen har startet (Lundby og Storhaug), andre ganger har en valgt å basere en slik beslutning fortløpende på resultater fra sonderboringer (Bragernes, Svartdalen og delvis Tåsen og Baneheia).</p> <p>Erfaringene fra både Tåsen og Baneheia viser at sonderboring er et usikkert beslutningsgrunnlag, og en har valgt systematisk forinjeksjon uten forutgående sonderboringer. Baneheia besluttet dette tidlig i utførelsen, Tåsen burde ha gjort det, da tettekravet aldri ble nådd.</p>
Rutinemessig injeksjon og optimalisering av injeksjonsmetode	<p>Basert på den valgte tettestrategi/tettekrav og stedlige bergmasseforhold, ble det ved oppstart av tunneldrivingen for alle prosjekter etablert et injeksjonsprogram bestående av skjermgeometri, material- og utstyrbruk, utførelses- og kontrollrutiner. Etter hvert som en får erfaringer, optimaliseres metoden ved å justere en eller flere av delkomponentene. Første målet er som regel å oppnå ønsket tetthet, deretter forsøke å optimalisere metoden mhp å minimalisere tidforbruket, som ofte også gir kostnadsoptimal utførelse. På prosjektene Baneheia, og Bragernes har en ved "normale" bergmasseforhold og de aktuelle tettekrav lykkes med å oppnå ønsket tetthet på én injeksjonsomgang, noe som på disse prosjektene ble ansett for å være kostnadsminimalt.</p>
Tilpasset injeksjon	<p>Ved de fleste av prosjektene har det oppstått tetningssituasjoner som har krevd store avvik fra den rutinemessige injeksjon. Slike situasjoner har oppstått på alle prosjektene ved kryssing av knusningssoner, og har i flere tilfeller vært kombinert med liten fjelloverdekning og strenge tetthetskrav (Tåsen, Baneheia, Lundby). Tetningssituasjonene og løsningene er presentert for hvert prosjekt, og har bestått i store endringer i skjermgeometri (lange og korte skjærmer, innerskjerm og ytterskjerm), og større variasjon i materialbruk (ordinær sement, mikrosegment, polyurethan, Thermax, etc.). Den gjennomgående erfaringen er at kombinasjoner med lang ytterskjerm og kortere innerskjerm kan være en riktig trend. Ved</p>

### Injeksjonsteknikk erfaringer

Økende permeabilitet må skjerm lengden reduseres. Bruk av hjelpestoffer, først og fremst polyurethan og Thermax, har gitt gode resultater i ytre sperreskjerm (Baneheia, Lundby).

Tilsvarende tilpasninger er utført i flere tilfeller ved komplisert tunnelgeometri (tunnelkryss ved Baneheia og Lundby).

På forhånd antatte injeksjonsproblemer knyttet til driving av forskjøvne stuffer på parallelle tunneløp har vært minimale (Baneheia Svartdalen og Lundby).

De fleste tekniske komponenter som utgjør en systematisk forinjisering som tettemetode har gjennomgått en stor utvikling de siste 8-10 år. Dette dokumenteres også gjennom erfaringene fra de studerte prosjektene. Trenden i utviklingen ser ut til å ha følgende viktige elementer:

- Økning av total borekapasitet har medført at behov for større oppboringsgrad har vært gjennomførbart.
- Utvikling i bruken av superplastiserende og silikatilsetninger har bedret inntrengningsevne og pumpebetingelser både for vanlig industrisement og mikrosemeter.
- Ovennevnte har i neste omgang gitt muligheter for å benytte lavere vann/semest forhold, slik at kvaliteten og herdetiden på den plasserte injeksjonsmasse har blitt betraktelig bedret. Dette har også gitt større pumpekapasitet, målt f.eks. som tørre kg/time.
- Anvendelse av høyere maksimale injeksjonstrykk er tatt i bruk ved flere av prosjektene (målt i bar opp til 2,5 ganger dybden under terrenget i meter, max. 90 bar). Dette har økt både inntrengningsevne og injeksjonskapasitet, ut over effekten av foregående punkt.
- Flere komplette injeksjonslinjer (2-3), er tatt i bruk ved hver stoff, hver av dem med større kapasitet enn før. Dette gjelder både mhp bulktransport, oppveiling, blanding og pumping, der blanding og pumping i de fleste tilfeller har vært begrensningen.

### Forbedrings- potensiale for videre utvikling

Utnyttelse av de økte anvendelsesmuligheter som momentene beskrevet over har gitt, kan gi muligheter for å begrense antallet injeksjonsmidler og blandingsforhold som er aktuelle. Dette kan i seg selv gjøre injeksjonsprosessen mer produksjonsvennlig, og ytterligere bidra til kapasitetsøkning.

Det vil alltid være forbedringspotensiale i videreutvikling av injeksjonsutstyr og -materialer, et arbeide som også pågår.

Det synes også å være potensiale i å forsøke å optimalisere rutinemessig injisering slik at ønsket tetthet kan oppnås på én injeksjonsrunde.

For tilpasset injisering ved kryssing av knusningssoner er det et stort potensiale i å få modifisert metodene slik at en kan redusere

boreproblemer, utgang av injeksjonsmasse inn i tunnel, og stoppe ukontrollert utbredelse av injeksjonsmasse langt fra tunneltraseen.

Det er også et tankekors at en i flere tilfeller har perforert den kostbare og tidkrevende tetningsskjermen med fjellbolter til permanentsikring.

Videre er forbedringspotensialet for måling av lekkasje i tunnel åpenbart stort.

Revurdering av de på forhånd etablerte tetthetskrav er mangelfull, både i drivefasen og i ettertid, og må vurderes i forhold til oppnådd tetthet/tetteinnsats, og påvirkning på overflaten. Det bør settes fokus på at optimalt tetthetskrav ikke kan defineres på forhånd.





# MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE TUNNELER SAMMENSTILLING AV ERFARINGER

BERGMASSE FORHOLD		TETTEKRAV OG RESULTATER		HOVED-STRATEGI	TETTE-INNSATS								PROSJEKT				
Bergart / kvalitet	Grunn- vanne- trykk	Lekkasje- krav	Mål lekkasje	Sporadisk / systematisk - injeksjon	Injeksjons- middel	Injisert masse pr m injisert tunnel	Injisert masse pr m <sup>2</sup> tunnel	Bor- meter pr meter injisert tunnel	Borst meter pr m <sup>2</sup> tversnitt	Injisert masse pr hull, inkl hulltylling	Injisert masse pr meter hull	Injisert masse pr time totale injeksjons- st	Injeksjons- d time pr m injisert tunnel	Sted	Peil nr / Lengde	Tunnel- brenn- snitt	Merkeid
	m	l/min/100m	mm/100m			kg/m	kg/m <sup>2</sup>	bm/m	bm/m <sup>2</sup>	kg/hull	kg/m hull	kg/time				m <sup>2</sup>	
Gneis	20-40	2	1,8	Systematisk	Ultrafin 12, Cemerts	504 (314)	14	40		296	11 (8)	325(755)	1,54	Banehala	hala	95 (44- 87)	Krav: 60 l/min totalt, under Startpane 5-12 l/min/100m
Gneis, svekkesone		2		Systematisk	Ultrafin 12, Cemerts	629 (278)	16,5 (7,4)	203	2,2	311	9,5	450	0,74	Banehala, B1000 pel 3529-3524	16	93	33 hull pr skj. i snitt
Gneis, svekkesone		2		Systematisk	Ultrafin 12, Cemerts	601 (222)	15,8 (8,0)	70	0,75	260	10,5	434	0,72	Banehala, B1100, pel 3543-3530	47	93	27 hull pr skj. i snitt
Gneis		2		Systematisk	Ultrafin 12, Cemerts	386 (136)	11(3,8)	46	0,85	169	7	400	0,49	Banehala, B2200	58-403	89	28 hull pr skj. i snitt
Gneis		2	3,5	Systematisk	Ultrafin 12, Cemerts	432 (198)	13,5 (6,2)	36	0,69	236	9	336	0,81	Banehala, B2500	168-428	69	25 hull pr skj. i snitt
Granitt, skiflig	12-35	0,5-1	0,87	Systematisk	Inj sement Cemerts	688	52	91,8	1,02	76	6,3			Lundby, feltet 1	1180-1780 / 2040-2090	86-92	148 skjerner, 62 hull, 4682 kg pr skjern
Granitt, skiflig	30-35	2	1,5	Systematisk	Inj sement Cemerts	481	37,5	367	4,06	77	5,9			Lundby, feltet 2	1780-2040	86-92	167 skjerner, 44 hull, 3372 kg pr skjern
Granitt, skiflig	15-30	2,5	1,1	Systematisk	Inj sement Cemerts	360	29	232,5	2,58	84	5			Lundby, feltet 3	0.800-1.190	86-92	262 skjerner, 30 hull, 2527 kg pr skjern
Granitt, skiflig	5-35	0,5-2,5	1,7 (0,7)	Systematisk	Inj sement Cemerts	476	12	186,8	1,85	79	5,9			Lundby	4358	86-92	
Fyllt	10-15	0	1,8	Systematisk	Ultrafin 12, Scancoen	1014	26	130	1,85	2941(112)	7,8	163 (273)	6,22	Sorhaug	1400-1550	85	
Basaltrombeporfy	10-150 snitt -100	10/20	10,1	Systematisk	Rapid Norcem	1125	38	15	0,2	2257 (1683)	68	2744	0,41	Dragernes	hala, 2310 m (2778 m)	72-83	
Rombeporfyforkeasting	80-100	10		Systematisk	Rapid- Norcem	7001	88	101	1,28	1254	76			Dragernes	1267-1280	90	Djerringdalsforkeastingen
Kalksteinster	5-20	Syet 10/ Spør. 15-	25,7	Sporadisk	Rapid Norcem	802	26 (33)			478	24	670	0,92	Tåsen	hala tunnelen	85-89	
Syrenitt gang, oppsprukket	15-20	10	32 og 28	Systematisk	Rapid Norcem	2362/ 2839	30/38	84/98,4	1,06/1,1		28/30			Tåsen	2700-28150 2950-2862V	80	11/22 skjerner/14077 pr skjern / 1121 skjerner 15485 pr
Gneis, leiringsone, uten overdekning	18-28	0,5	0,8	Systematisk	Inj sement Cemerts, atertnj, M Taco									Lundby	2240- 2450/210	86-92	Lammtycken
Forkeasting, Ekeberg	10	8	30	Sporadisk	Rapid Rp38	2447 (1368)	37(21)	25,5	0,4	2074 (2277)	108 (130)	142/(1411)	1,71	Svartdal	645-740V	85	8 skjerner, 10 runder, 3058 kg pr skjern
Forkeasting, Ekeberg	10	8	30	Sporadisk	Rapid Rp38	1249(600)	19(0,7)	25,5	0,4	945 (888)	57 (33)	822 (762)	1,52	Svartdal	400-5550	85	13 skjerner m/30 runder, 14800kg pr skjern
Syrenitt gang, oppsprukket	10	7	14,8	Systematisk	Mikro Rhaocem 803	11900	188	380	5,9	700	31	626	19,01	Tåsen, T- baneringen	700-750	64	
Gneisakusler, forkeasting, Ekeberg	10	5	4,3	Sporadisk	Rapid Rp38	1718	50	25,5	0,4	1358	77/80	878	1,75	Svartdal	3450	85	holietunnelen

\* Går med ca 8 kg/m for et 53mm hull

Tabell 1- Data fra rundskivene

## INNLEDNING

### 1.1

#### Bakgrunn

En stor del av fremtidige tunnelprosjekter i Norge vil være knyttet til tettbebygde strøk. Slike tunneler vil ofte være grunnleggende og pålagt meget strenge tetthetskrav. Det har vært injisert mye i Norge i mange år, men det har aldri vært gjennomført en systematisk innsamling av erfaringer med injeksjonsmetodikken som er brukt på de forskjellige prosjekter.

Analyse av erfaringene fra utførte prosjekter er av avgjørende betydning for å kunne videreutvikle injeksjonsmetodikken. Det må derfor legges større vekt på å undersøke og dokumentere injeksjonserfaringer ytterligere. Deretter må konklusjoner og oppdagelser gjort på utførte prosjekter føres videre til utprøving på nye prosjekter. Dette gjelder både dokumentasjon mhp materialer, utstyr, metode, skjermgeometri og ikke minst oppnådde resultater.

Utfordringene i dette FoU-prosjektet ligger således i å undersøke injeksjonstekniske metoder og resultater både for rutinemessige utførelser og utførelser tilpasset mer spesielle, men likevel vanlig forekommende prosjektsituasjoner som:

- Liten overdekning
- Dårlig bergmassekvalitet
- Strenge tetthetskrav
- Ugunstig tunnelgeometri (to løp, kryss i plan / to plan etc)

Hovedmål for delprosjektet "Injeksjonsstrategi" er derfor å:

1. Dokumentere og analysere erfaringer med forinjisering "på stuff" både ved normale "rutinemessige" forhold og ved spesielle "tilpassede" forhold. Dette omfatter også tetningssituasjoner der anerkjent (tradisjonell) teknologi ikke har gitt gode resultater.
2. Videreutvikle utstyr, materialer og prosedyrer for optimal forinjeksjon både mhp tidskostnader og spesielle forhold.

Disse hovedmål dekker samtidig det som kan beskrives som fasene 1 og 2 for delprosjekt "Injeksjonsstrategi ved forinjisering av tunneler". Fase 1 (pkt.1) er temaet for denne rapporten.

I fase 2 (pkt. 2) vil en søke å få utprøvd og videreutviklet viktige (og mulige) problemstillinger og erfaringer som kommer fram i fase 1. Dette skal gjennomføres på nye prosjekter som blir startet opp. Fase 2 vil bli rapportert i en fremtidig rapport.

## VALG AV AKTUELLE TUNNELPROSJEKTER

### 2.1 Aktuelle tunneler og kriterier for utvalg

Ved oppstart av dette prosjektet ble det kartlagt og utført en grov vurdering de fleste tunnelprosjekter av nyere dato hvor forinjisering hadde vært en viktig komponent, se lister i vedlegg 1. Basert på denne gjennomgangen ble 6 tunnelprosjekter valgt ut for grundigere bearbeiding. Kriteriene for valget var grovt sett følgende:

- samferdselsprosjekt i tettbebygd strøk
- omfang og type strategi for forinjeksjon
- nok omfang av foreliggende erfaringsmateriale og tilgjengelige personer med førstehåndskunnskap om utførelsen

I hovedtrekk var vurderingene for de utvalgte prosjektene som følger:

- Tåsentunnelene i Oslo er et eksempel på tunneler med liten overdekning og med varierende og til dels meget permeabel bergmasse. Det var satt moderate tetthetskrav (10-20 l/min/100m). Rapporteringen fra anlegget var dessuten god med blant annet en diplomoppgave på injeksjon.
- Svartdalstunnelen i Oslo ble valgt pga komplisert tunnelgeometri (to løp og kryss med ramper), liten overdekning og vanskelige geologiske forhold gjennom Ekebergforkastningen.
- Lundbytunnelen i Göteborg er en tunnel med svært høye krav til tetthet (0,5-2,5 l/min/100m) og hvor forundersøkelsene og injeksjonsarbeidene var svært godt dokumentert. Mye av bebyggelsen over tunnelen er fundamentert på setningsømfintlige løsmasser og overdekningen er liten.
- En kort strekning av Storhaugtunnelen i Stavanger ble drevet under et område med meget strenge tetthetskrav, i en fylitt/leirskifer med meget lav permeabilitet og liten overdekning. Mye data var tilgjengelig gjennom publiserte rapporter.
- Bragernestunnelen i Drammen var under utførelse. Bergmassen var antatt å ha høy permeabilitet og lå nær andre tunneler. Tetthetskravene var differensierte, selv om overdekningen var jevnt over god.
- For Baneheiatunnelene på E18 i Kristiansand var det fra media rettet sterk fokus på injeksjonsarbeidene før byggingen tok til fordi tunnelen går like under noen vann i et populært utfartsområde. Det fantes derfor noe informasjon og data fra før byggingen tok til. Det var i tillegg utført to diplomoppgaver knyttet til injeksjon på prosjektet. Anlegget var dessuten under utførelse. Kravet til tetthet var høyt og permeabiliteten av bergmassen var forventet å være gjennomgående lav. Baneheiatunnelene ble bygget med to løp og hadde krysninger i flere plan.

For et FoU-prosjekt som skal innhente og bearbeide injeksjonserfaringer er det selvfølgelig ønskelig med et stort antall tunnelprosjekter. Til tross for begrensede ressurser og tid, samt erkjennelsen av at mange prosjekter har lite dokumenterbare erfaringer, ble det konkludert med at utvalget var akseptabelt. Totalt sett ble de 6 prosjektene også vurdert å være de mest representative tunnelprosjekter mhp dagens injeksjonsstrategi og metodevalg.

For øvrig er et antall tunneler i Osloregionen studert av NGI innen prosjekt 526521 Tetting av tunneler i tettbygde strøk (i alt 11 rapporter).

### 3 METODIKK FOR INNHENTING OG BEARBEIDING AV ERFARINGER.

#### 3.1 Innhenting og gjennomgang av foreliggende data og erfaringer

Alt foreliggende grunnlagsmateriale i form av rapporter, diplomoppgaver, datalister, etc. ble innhentet fra utbyggere, entreprenører og konsulenter. Dette ble gjennomgått spesielt mhp geologiske og hydrogeologiske forhold, injeksjonsstrategi og – metodikk, tetthetskrav og oppnådde tetteresultater. Det ble samtidig foretatt kartlegging av nøkkelpersoner i de aktuelle prosjekter og i injeksjonsmiljøet allment med tanke på senere intervjuer. I hvert tunnelprosjekt ble det tatt kontakt med nøkkelpersoner fra alle involverte parter. Dette at flere personer, sentrale under gjennomføringen, vurderte og kommenterte de innsamlede data ble ansett som meget viktig.

#### 3.2 Opplegg for intervju av nøkkelpersoner.

Etter en innledende gjennomgang av materialet, ble de utvalgte nøkkelpersonene intervjuet for å rette opp feil, misforståelser og tolkninger, samt å komplettere materialet ved behov. Det ble utarbeidet en spørsmålsliste som skulle være et standard underlag for diskusjonene ved intervjuene med nøkkelpersonene i de aktuelle prosjektene. Denne omfattet:

**Organisering:** Hvordan injeksjonsinnsatsen ble planlagt når det gjelder organisasjon etc.

**Forundersøkelser:** Hvordan informasjon fra forundersøkelsene ble brukt i planleggingen av forinjiseringen i det aktuelle tilfellet.

**Injeksjonsskjerm:** Utformingen av injeksjonsskjermen som skulle tilfredsstille det oppsatte tetthetskravet for den aktuelle bergmasse.

- Optimalt bormønster
- Optimal skjermoverlapp
- Åpen / lukket skjermgeometri
- Geometri – barriereinjeksjon
- Injisering av stuff

**Injeksjonsmiddel:** Nøkkelegenskaper til det sementbaserte injeksjonsmiddelet som ble valgt for å injisere den aktuelle bergmassen, samt hvordan disse egenskapene kunne styres og kontrolleres. Eventuelt ikke sementbaserte injeksjonsmidler som ble brukt.

Del komponenter som passer inn her er:

- Mikrosement / industrisement / tilsetningsstoffer
- Blandingsforhold og prosedyrer
- Styrbar og (optimal) herdetid
- Bruk av (såkalte) kjemiske midler til fintetting (eks. Meyco / Bacel grout etc.)
- Bruk av andre spesialmaterialer/hjelpestoffer (eks. Muring / Cemsil / Thermax / TACSS etc.)

**Injeksjonsutstyr:** Entreprenørens utstyrspakke, hvilke kriterier lå til grunn for valg av injeksjonsutstyret.

**Planlagt injeksjonsutførelse:** Utførelsen av selve injeksjonsarbeidet som f.eks:

- Hullmønster
- Maksimalt injeksjonstrykk
- Samtidig boring og injisering

**Endringer av injeksjonsutførelsen:** Eventuell forandringer i injeksjonsmetodikken underveis i prosjektet. Eksempler på slike er endringer i organisasjon, skjermens utformning, injeksjonsmiddel, utstyr, utførelse etc.

**Tetteresultat:** Målinger/vurdering/prognose av resultatet av forinjeksjonsarbeidet.

Etter utsendelse av listen over spørsmål som utgjorde et underlag for diskusjonene ved nevnte intervjuer, ble det planlagt besøk hos nøkkelpersonene i de aktuelle prosjektene, ofte samtidig med et studiebesøk i den ferdige tunnelen.

Gjennomførelse av intervjuer ble kombinert med eventuell innsamling av rapporter over analyser av injeksjonsresultater. Hvis ikke slike fantes, ble kopier av eksisterende underlag tatt for å gjøre egne vurderinger av injeksjonsarbeidene.

Deretter ble erfaringene fra de ulike personene som er blitt intervjuet sammenstilt. En vurdering av de ev. forskjeller som disse kan ha opplevd ble foretatt og sammenstilt og sendt tilbake til de intervjuede personene for komplettering.

Utvalgte Tunnelprosjekter	Nøkkelpersoner hos		
	Byggherre (B)	Entreprenør (E)	Konsulent (K)
1. Tåsentunnelen	Bøyele	Holmberg*	Boge*

2. Svartdalstunnelen	Thoresen	Broch*	Boge*
3. Lundbytunnelen	Eckerlid	Gustavsson *	Palmqvist
4. Storhaugtunnelen	Pedersen* / Nerland*	Steine*	Stedjan
5. Bragemestunnelen	Kirkeby / Tyssekvam	Furunes	-
6. Baneheiatunnelene	Tveide / Moksnes	Thorvik / Lien / Madsen	Stedjan

Tabell 2: Sammenstilling over utvalgte tunneler og nøkkelpersoner  
 \*er ikke blitt intervjuet

### 3.3

#### Gjennomføring av intervjuer og sammenstillinger.

Under intervjuene ble innledningsvis data som størrelse på tunnelen, type tunnel, geologiske og hydrogeologiske forhold etc. gjennomgått. Videre ble innlekkasjekravene (gitt i l/min pr 100 m tunnel), bestandighet og eventuelle økonomiske forhold behandlet.

En likelydende spørsmålsliste ble brukt for både den rutinemessige og den tilpassede forinjiseringen i samtlige prosjekter. Dette for å gjøre en sammenligning og bearbeiding av erfaringene enklere. Spørsmålene sammenfattes nedenfor:

Organisering	Hvordan ble injeksjonsarbeidet planlagt mht organisasjon, programansvarlig, kontroll, oppfølging og dokumentasjon, samt erfaringstilbakemelding?
Forundersøkelser	Hvordan ble eventuelle resultater av kartlegging av bergmassen i tunnelen respektive i sonderhull, vanntapsmålinger i sonderhull, samt hydrogeologiske grunnundersøkelser brukt i planleggingen av forinjiseringen i den aktuelle tetnings situasjonen?
Injeksjonsskjerm	Hvordan ble injeksjonsskjermen som skulle tilfredsstille det oppsatte tetthetskravet for den aktuelle bergmassen utformet mht hullengde, vinkel, avstand og eventuelle injeksjonshull i stuff? Redegjør også for boreutstyret, eventuell innmåling av hull, rengjøring for kaks, etc.
Injeksjonsmiddel	Angi verdier for noen nøkkelegenskaper (som komstørrelse, viskositet, vannsementtall, separasjonsstabilitet og herdetid) for det sementbaserte injeksjonsmiddelet som ble valgt for å injisere den aktuelle fjellmassen, samt hvordan disse egenskapene kunne styres og kontrolleres. Ble eventuelt ikke sementbaserte injeksjonsmidler brukt?
Injeksjonsutstyr	Hvordan planla og bygde dere opp injeksjonsutstyret (antall pumper og blandere, flerhullsutstyr, registreringsutrustning, samt pakkere og disses plassering) for å klare tetningsoppgaven?

- Planlagt utførelse** Hvordan utførte dere selve injeksjonsarbeidet mht hullbehandling før injeksjonsstart, statisk eller eventuelt dynamisk trykk, maksimalt trykk ifht grunnvann- og bergtrykk, samt rekkefølgen for injeksjonshullene?
- Endringer i utførelsen** Ble dere nødt til å forandre injeksjonsarbeidet underveis, for eksempel når det gjelder organisasjon, injeksjonsskjerm, middel, utstyr, og utførelse?
- Tetteresultatet** Gjør en vurdering / prognose av resultatet av forinjeksjonsarbeidet når det gjelder inntrengningsdybde, forbruk injeksjonsmiddel, tetningseffekt, behov for ominjisering eller ev. etterinjisering.
- Svarene på spørsmålene vedrørende den rutinemessige forinjiseringen ble anvendt for å kartlegge hvordan injeksjonsarbeidet ved normale forhold i tunnelen ble løst. Det ble lagt vekt på optimalisering av tid og kvalitet.
- For eventuelle mer vannførende soner ble de samme spørsmålene stillet, men bare det som gjaldt for tilpasset injeksjonen er tatt med i etterfølgende beskrivelser. Hensikten var å kartlegge hvordan man valgte å løse injeksjonsarbeidet med strenge tetthetskrav ved vanskelige forhold, som for eksempel ved liten overdekning, dårlig fjellkvalitet og ugunstig tunnelgeometri.
- Den aktuelle tetningssituasjonen ble først beskrevet med forhold som størrelse på sonen, type sone, geologiske og hydrogeologiske forhold etc. og sortert i noen av følgende deltemaer. Meget permeabel bergmasse og meget høyt krav til tetthet for deler av tunnel.
- Lav permeabel bergmasse og meget høyt krav til tetthet for deler av tunnel.
  - Sone med varierende permeabilitet og eventuelt med krav til kritisk stabilitet.
  - Liten fjelloverdekning, eventuelt med overliggende setningsømfintlig materiale.
  - To parallelle tunneløp eller passering over / under / nær andre fjellanlegg



## 4

### TÅSENTUNNELEN, OSLO

Tunnellengde	933m Ø – 937m V
Utforming	To løp med flere ramper, tverrsnitt ca 65-80 m <sup>2</sup>
Drevet	1997-1998
Innlekkasje totalt	25,7 l/min/100m
Lekkasjekrav	Ved systematisk injeksjon 10 l/min/100m ellers 15-20 l/min/100m
Gjennomsnittstall for sementforbruk	478 kg/hull – 24 kg/m hull – 802 kg/m inj.tunnel – *26 kg/m <sup>2</sup> inj.tunnel – 870 kg/time*  *Tilsvarende verdi angitt i NGI-rapport 526521-6 til 33 kg/m <sup>2</sup> tunnel

Tabell 3: Fakta og kjørnedata fra Tåsentunnelen

#### 4.1

#### Kortfattet prosjektbeskrivelse

Tåsentunnelen i Oslo fører trafikken på Rv 150, Store Ringvei (Ring 3), under Tåsenområdet. Tunnelen, som strekker seg fra Bergkrysset ved Ullevål Stadion under Tåsenkrysset og til Maridalskrysset, går for det meste under bebygde områder.

Fjelloverdekningen varierer mellom 5-20 m, hovedsaklig ca 15 m, men under leirfylte dyprenner mellom 5-10 m. Bergartene langs traseen er hovedsaklig kambrosiluriske sedimentære bergarter som leirskifer, knollekalk og kalkstein. Disse gjennomskjæres med jevne mellomrom av permiske eruptive gangbergarter (syenittporfyr/rombeporfyr, syenitt og diabas).

Den hydrogeologiske situasjon for Tåsen-tunnelen er preget av høypermeable eruptivganger som ofte følger løsmassefylte dyprenner. Området ligger i et skrånende terreng med en kontinuerlig grunnvannstrømning. Grunnvannstrykket er ikke spesielt høyt i tunnelnivået, maksimalt 20 m. Det er montert en del poretrykksmålere i tunnelens influensområde.

Prisingen av injeksjonen var kr/kg injeksjonsmiddel inkl. utstyr og mannskap, dvs ferdig plassert. Det var egne prosesser for boring og pakkere. Fordi det var mulig å arbeide på to stuffer, var det ikke angitt noe heftid.

For FoU-prosjektet er Tåsentunnelen relativt høyt prioritert, dels pga nærheten til T-baneringen (prosjekt aktuelt for fase 2), samt pga de problemene man hadde med å tette eruptivgangene som

gjennomskar de sedimentære bergartene enkelte steder langs tunneltraseen.

Tetthetskravene kontra lekkasjeforhold blir her først og fremst rapportert ut fra NGI-rapport 526521-6. Mht injeksjonen av tunnelene blir informasjonen utdypet gjennom intervjuer av nøkkelpersoner som var med på anleggsgjennomføringen.

## 4.2

### Tetthetskrav og lekkasjeforhold

Kravene til maksimal innlekkasje ble på byggherrens initiativ satt etter at beskrivelsen var ferdig. GeoVita AS utarbeidet en rapport hvor maksimal innlekkasje angis til 10 l/min pr 100 m i områdene med systematisk injeksjon. Disse var satt på tunnelstrekninger med dyprenner og intrusivganger. Tetthetskravet ble satt til 15-20 l/min pr 100 m utenfor områdene med systematisk injeksjon.

Innlekkasjene til tunnelen er målt til 240 l/min over en lengde på 925 m (dvs. ca 25,7 l/min pr 100 m) over to løp. Lekkasje fordeler seg ifølge NGI-rapport 526521-6 som vist i tabell 4.

Pel nummer	Innlekkasje for delstrekninger	Innlekkasje pr 100m
2325-2650	44 l/min pr 325 m	13 l/min pr 100 m sum to løp
2650-2820, Ø	55 l/min pr 170 m	60 l/min pr 100 m over to løp
2650-2880, V	65 l/min pr 230 m	
2820-3250, Ø	76 l/min pr 750 m	10 l/min pr 100 m *
2880-3200, V		

Tabell 4 Innlekkasjer til Tåsentunnelen

\* Resterende lekkasje som fordeles over resten av tunnelen, angitt i NGI-rapport 526521-6 til 9,3 l/min pr 100 m.

## 4.3

### Rutinemessig injeksjon

Herunder gis et sammendrag av den utdypede informasjonen om de rutinemessige injeksjonsarbeidene for Tåsentunnelen innhentet gjennom intervjuer med Ann-Elisabeth Bøyeie (SVV-O).

#### Organisering

Injeksjonsarbeidene ble utført av det ordinære stuffmannskapet på 3 mann, men arbeidet ble ledet av en erfaren spesialformann (Bernt Holmberg, SRG). Beslutninger om justering av prosedyre (v/c-tall og lignende.) ble gjort i samråd mellom entreprenør og byggherre.

Som byggherre var SVV-Oslo ansvarlig for prosedyren som var lagt i kontrakten basert på et forslag utarbeidet av Geo Vita AS. Endringer i opplegget ble avgjort på spesielle injeksjonsmøter eller på ordinære byggemøter.

- Foruten normal kontroll under arbeidet, ble injeksjonsutførelsen modifisert ut fra målte utlekkasjer fra sonder/kontrollhull. Injeksjonen ble dokumentert med en håndskrevet protokoll som anga volum, masse, trykk og vannsementtall pr hull. Hensikten med protokollen var både at entreprenøren skulle få betalt for utført tetting (pr kg masse) og at byggherren skulle få dokumentert innsatsene for framtiden. Foruten dette, fulgte en diplomstudent fra NTNU i 1998 (Siv Therese Underland) injeksjonsarbeidene. Diplomoppgaven beskriver den utførte injeksjonsinnsatsen og presenterer en rekke diagram hvor for eksempel masseforbruket er stilt opp mot andre parametere.
- Som eksempel på erfaringstilbakeføring kan nevnes at lekkasjekriteriene for hvorvidt det skulle injiseres eller ikke (dvs utlekkasje i sonderhull), ble endret i den senere delen av tunnelen.
- Forundersøkelser** Geologisk kartlegging i tunnelen ble utført kontinuerlig av Ann Elisabeth Bøyeie, men den hadde nok ikke noen direkte innvirkning på injeksjonsskjermens utforming eller på valg av injeksjonsmasse.
- Kartlegging av fjellet i sonderhull ble ikke utført, men det var kjerneboret i prosjekteringsfasen. Forundersøkelsene varslet eruptivganger hvor systematisk injeksjon ble bestemt og senere utført. Vanlige grunnundersøkelser ble utført. En ekstra rapport med resultater fra kjerneboringene og vanntapmålinger i kjerneborehullene ble utført. Videre blir poretrykket målt i hullene som er boret.
- Kriterier for injeksjon** Vanntapmålinger i sonderhull var med i beskrivelsen, men ble ikke utført, fordi man ikke kunne se noen direkte sammenheng mellom vanntap og for eksempel masseforbruk. Injeksjonen ble isteden planlagt ut fra målinger av utlekkasjer i sonderhull, se Tabell 5 nedenfor.
- Injeksjonsskjerm** I utgangspunktet var hullengden for sonder/kontroll- og injeksjonshull satt til 21 m. Disse ble etter hvert forlenget til 24 m i forsøk på å oppnå færre injeksjonsrunder, mer overlapp og lengre salvelengder (16 → 18 fot). Ved systematisk injisering ble vanligvis 25 hull à 24 m boret. Fast opplegg var at annet hvert hull ble boret når det ikke kom vann fra borhullene, "tørre" forhold. Der hvor det var konstatert vann ble alle hullene boret. I de 10-30 m brede sonene med syenitt som skulle passeres, ble det erfart liten masse inngang og vansker med å bore og lade. Det ble her utført en indre og en ytre skjerm. Den ytre skjerm var 24 m lang og den indre skjermen 12 m lang pr salve. Kontrollhullene skulle være like lange som skjermen, men de ble ofte bare 8-11 m lange pga borevansker. Alle hullene hadde 5 m avstand fra enden av hullene til tunnelveggen og avstanden mellom dem var 1,3 m i stoff med en skjerm med 25 hull.
- Utformingen av injeksjonsskjermen på de ulike tunnelseksjonene, som vises i Tabell 5, er i hovedsak basert på informasjon i NGI-rapport 526521-6 og ref.5.
- Boreutstyr** Boreutstyret var en standard Atlas rigg utstyrt med Beaver-skjermregistrering. Boreavvikmåling var beskrevet i kontrakten,

men ble bare gjort en gang og da med meget enkelt utstyr. En lommelykt ble montert i enden av et 6 m langt plastrør som ble ført inn i borehullet og på bakgrunn av hvor mye av lommelyktlyset en så, konkludert med at det var "litt" boreavvik. Hvor mye, kunne ikke måles. Generelt var hullene rette de første 4 m, men bøyde ofte av deretter.

Hullene ble rengjort for kaks med trykkluft og vann direkte fra boreriggen. Dette var nødvendig ettersom det blir en del finstoff og leire i denne typen bergart. Det var en egen slange til dette på stuff. I tillegg ble hullene "spyllt" under boring ved at borestengene ble trukket frem og tilbake med borevannstrykk på. Dette ble utført i alle typer bergarter.

Det ble satt injeksjonshull i stuffen dersom man hadde slepper som skar ut av stuff. Dette ble gjort for å hindre at en fikk injeksjonsmasse ut av stuffen.

#### Injeksjonsmiddel

Injeksjonen ble utført med industrisement (Rapid fra Norcem). Vanligvis begynte man med et v/c-tall på 2, v/c-tallet var som lavest 0,5. Litt mikrosegment ble også brukt (Rheochem 650), men i svært liten grad, både av økonomiske grunner og fordi mannskapet syntes den var vanskelig å bruke. Ganske sent i prosjektet ble det prøvd Grout Aid i en skjerm, i leirskifer/knollekalk, men man kunne ikke konstatere om det ble bedre inntrengning.

Nøkkelegenskaper for sementen som kornstørrelse, viskositet, v/c-tall eller separasjonsstabilitet ble ikke kontrollert med målinger, men tilsetning av Rescon HP ble brukt (2-3 %) for å bedre separasjonen. Heller ikke herdetiden ble målt, men i den generelle beskrivelsen var den satt til "15 min etter injeksjon og før boring av salvehull". I praksis ble denne 1 time, men ofte lengre ettersom det fantes to stuffer.

#### Injeksjonsutstyr

Kravet i beskrivelsen var at pumpen skulle ha en pumpekapasitet på minst 100 l/min og ha en trykkapasitet på minst 60 bar. Injeksjonsriggen hadde 2 pumper som pumpet via i en manifold. Videre hadde den 1 mikser og 2 aktiverer, slik at det kunne pumpes 2 forskjellige blandinger med forskjellig v/c-forhold. Det var 9 uttak fra manifolden, men det ble ikke brukt flere enn 3 slanger under injeksjonen. Trykk og inngang kunne leses av for hver slange. Det fantes ikke automatisk registreringsutrustning på riggen så injeksjonen ble dokumentert på tradisjonelt vis med håndskrevet skjema.

Tabell 5 Injeksjonsprosedyre (skjermutforming og utlekkasjekriterier) for Tåsentunnelen

Pel. 2424-2525, Ø Pel. 2424-2525, V	Systematisk sonderboring for hver 3. salve, med 5 hull à 21 m.	≥ 5 l/min fra disse 5 hull medførte injeksjon.
Pel. 2525-2956, Ø Pel. 2525-2912, V	Systematisk injeksjon for hver 3. salve og ny injeksjonsprosedyre fra pel 2850Ø og pel 2864V med 21 hull à 24 m (med trykket 20-25 bar ved normal inngang og opp til 35 bar ved liten inngang), deretter kontroll av resultatet ifølge kolonnen til høyre.	< 8 l/min fra 1. skjerm totalt medførte min. 5 kontrollhull à 8 m for hver salve; ≥ 3 l/min fra disse 5 hull medførte ny injeksjon med 24 m hull. ≥ 8 l/min fra 1. skjerm totalt medførte min. 5 kontrollhull à 24 m for skjermen; ≥ 8 l/min fra disse 5 hull medførte ny injeksjon med flere 24 m hull og < 8 l/min medførte fylling av hullene med mørtel og 3 salver uten videre injeksjon.
Pel. 2750-2815, Ø Pel. 2800-2860, V	I dette område med sterkt oppsprukne eruptivganger var det problemer med boring, festing av pakkere, mye vann og liten masseinngang. Ny injeksjonsprosedyre ble innført med en ytre skjerm med 21 hull à 24 m pluss flere hull i stoffen og en skjerm innenfor med 21 hull à 12 m pr salve, ny 24 m skjerm etter 3 salver. Grunnet problemene skulle en 64 mm borekrone samt bruk av mikroement prøves.	5-6 kontrollhull à 10 m inn i stoffen etter hver 12 m skjerm, hvis tørre nok tas én salve.
Pel. 2915-2920, Ø Pel. 2940-2945, V	Skjerm lengden ble her redusert til 18 m, på grunn av at man ellers ville truffet en nærliggende vann- og kloakktunnel, ny skjerm etter 2 salver.	
Pel. 2956-3050, Ø Pel. 2912-3061, V	Systematisk sonderboring for hver 3. salve, med 6 hull à 24 m.	≥ 6 l/min fra disse 6 hull medførte injeksjon.
Pel. 3050-3170, Ø Pel. 3061-3162, V	Systematisk sonderboring for hver 3. salve, med 6 hull à 24 m.	≥ 10 l/min fra disse 6 hull medførte injeksjon. ≥ 25 l/min fra 1. skjerm totalt medførte kontrollhull; ≥ 10 l/min fra disse medførte ny injeksjon, og < 25 l/min fra 1. skjerm totalt medførte 3 salver uten videre kontroll av injeksjonen.

Basert på informasjon i NGI-rapport 526521-6 og ref. 5.

Pakkerne var mekaniske og ble oppspent for hånd. De ble plassert relativt grunt i fjellet, 1-2 m. I syenittporfyren var det problemer med å

- få plassert pakkerne og det ble brukt hamp i hullet ved stuff for å forsøke få festet pakkeren.
- Injeksjonsutførelse** Generelt startet injeksjonen i sålehullene med 1-2 slanger. Den tredje pakkeren/slangen ble mer tilfeldig plassert, hvis det ikke var utganger i hull. Hvis en fikk utganger i andre hull, ble pakker og slange montert og injeksjon startet opp i disse hullene umiddelbart for å oppnå mottrykk. Prosedyren var den samme uansett bergartstype.
- Maksimalt injeksjonstrykk ble i beskrivelsen angitt til å være minst 20 bar stående trykk, men det ble aktuelt med trykk opp til 50 bar. Vanligvis ble det brukt trykk på 25-35 bar, avhengig av fjelloverdekningen (generelt ca 25 m), på enkelte skjermner ble det brukt trykk på opptil 40-45 bar.
- Endringer i utførelse** Byggherren og entreprenøren rådførte seg med ulike konsulenter og materialleverandører. For eksempel ved etterinjisering med polyuretanet TACSS var injeksjonsteknikk AS innleid av PEAB/SRG. Endringene i injeksjonstrykket var hovedsakelig grunnen til endringer i injeksjonsutførelsen. I enkelte tilfeller var en nede i trykk på bare 15-18 bar – iblant pga stor inngang, iblant pga utlekkasje i stuff. Det ble ikke forandret noe på utstyret på injeksjonsriggen, men en annen pumpe ble brukt for etterinjiseringen med TACSS.
- Noen generell endring av injeksjonsskjermen ble ikke gjort, men den ble tilpasset ulike forhold og vanskeligheter, for eksempel i syenittporfyren.
- Polyuretanet Resfoam 1K-M fantes på anlegget, men ble ikke brukt til tetting av bergmassen. Den ble kun brukt hvor det var problemer med innfestingen/tettingen rundt pakkere. Dette ble utført ved at filler ble dyppet i Resfoam og dyttet rundt pakkene.
- Tette resultat** Inntrengningsdybden av injeksjonsmiddelet er ikke blitt kontrollert med for eksempel kjemeboring. Teoretisk sett skulle den være minst 5 m som stikningen var satt til. Lekkasettingen i Tåsentunnelen er konstatert ikke å være tilstrekkelig og kravet til innlekkasje er ikke oppfylt i syenittporfyren. I Tåsenkrysset er det for å holde grunnvannsnivået oppe derfor installert 4 infiltrasjonsbrønner, boret fra tunnelen og opp. Til infiltrasjonen blir det brukt drikkevann, ikke det innlekkede vannet.
- I blant var det behov for flere runder forinjisering, opp til 3 runder fra samme stuffen. Etterinjisering ble utført med TACSS i en syenittporfyrzone. Etterinjeksjonen medførte mindre innlekkasje, men samtidig flyttet vannlekkasjene på seg. Vanntett støp ble ikke vurdert fordi det sprengte profilet ikke var stort nok.
- Forbruket av injeksjonsmiddel kan sammenfattes med følgende gjennomsnittstall for hele tunnelen; 478 kg/hull, 24 kg/m hull, 802 kg/m injisert tunnel, 26 kg/m<sup>2</sup> injisert tunnel og 870 kg/time. Grunnlaget for disse tall er basert fremst på data fra diplomoppgaven til Underland [5]. Det samme gjelder for tabellen nedenfor, hvor forbruket av injeksjonsmasse er oppdelt i de samme sonene som forandringene i injeksjonsprosedyren presentert i tabell 6.

Tabell 6: Masseforbruk for injeksjonen i Tåsentunnelen

Pel nummer	Injeksjonsstrategi	Antall skjerm/runder	Masse pr m hull [kg]	Masse pr skjerm [kg]
Pel. 2424-2525, Ø	Systematisk sonderboring for hver 3. salve, med 5 hull à 21 m	5 / 5	11	2993
Pel. 2424-2525, V		7 / 11	12	3946
Pel. 2525-2956, Ø	Systematisk injeksjon for hver 3. salve og ny injeksjonsprosedyre	37 / 67	25	12774
Pel. 2525-2912, V		32 / 63	26	12964
Pel. 2750-2815, Ø	Ny injeksjonsprosedyre i syenitt, mikrosement prøves	11 / 22	28	14077
Pel. 2800-2860, V		11 / 21	32	15485
Pel. 2956-3050, Ø	Systematisk sonderboring for hver 3. salve, med 6 hull à 24 m	3 / 5	40	22487
Pel. 2912-3061, V		3 / 6	25	14397
Pel. 3050-3170, Ø	Systematisk sonderboring for hver 3. salve, med 6 hull à 24 m	5 / 6	34	14719
Pel. 3061-3162, V		4 / 6	35	17526

#### 4.4

#### Tilpasset injeksjon

Spesielle tilpasninger av injeksjonsopplegget ble gjennomgått som egne temaer i intervjuene. De aktuelle tetningssituasjonene sorteres for Tåsentunnelen inn i følgende deltemaer:

Sone med varierende permeabilitet og med krav til kritisk stabilitet  
Det var mye lekkasjer og vanskelig å injisere i den oppsprukne syenitten, mellom pel ca 2750-2815 i østgående løp og pel. 2800-2860 i vestgående løp.

Liten fjelloverdekning, kombinert med overliggende, løsmassefylt dyprenne  
I dyprennene ved 2750-2850Ø og 2800-2860V var det et område med veldig oppsprukken knollekalk med mulig svelleleire i sprekkene (leire fra et sted rundt 2700Ø ble testet og funnet inaktiv). I samme område var fjelloverdekningen bare 5-10 meter fjell og overliggende løsmasser var setningsømfintlige.

Parallele tunneløp eller passering nær andre fjellanlegg  
Tåsentunnelen passerte en vann/kloakktunnel. Her ble en ekstra, og kortere skjerm anvendt i østre løpet mellom 2915-2920 og i vestre løp mellom 2940-2945.

I det etterfølgende gis et sammendrag av den utdypede informasjonen vedrørende de mer tilpassede injeksjonsarbeidene for Tåsentunnelen. Informasjonen er innhentet gjennom intervjuer med Ann-Elisabeth Bøyeie (SVV-O). Samme spørsmål som for den rutinemessige injeksjonen er blitt besvart, men bare de deler som er aktuelle for den tilpassede injeksjonen tas med her.

For strategi og forundersøkelser ble svarene naturlig nok de samme som for den rutinemessige delen av injeksjonen, men injeksjonsskjermens utformning ble endret ved passeringen av de aktuelle sonene. Det var vanskelig å bore i syenittsonene, men det

ble ikke brukt spesialutstyr. Hullene ble foreksempel ikke boret opp igjen etter injisering og boring med retrac-krone ble ikke prøvd. Tunnelriggen ble brukt til boring av injeksjons og kontrollhull. Hullene ble tidvis kortere enn planlagt pga boreproblemer. Muligens ble rengjøring av hullene for dårlig utført i sonene fordi bergmassen var meget oppknust. Pga problemene man hadde skulle en 64 mm borekrone samt bruk av mikrosegment prøves.

Syenitt gangene opptrådte i 10-30 m tykke soner hvor det generelt var mindre inngang av injeksjonsmasse enn forventet, og det var vanskelig både å bore og lade. I dette, som ble betraktet som "håpløst" fjell, skulle det injiseres gjennom en ytre 24 m skjerm, men pga borevanskene ble den ofte bare 15 m og en indre 12 m skjerm. Kontrollhullene skulle være like lange som skjermen, men ofte ble hullene bare 8-11 m lange pga borevansker. Injeksjonshull i stuff ble boret av og til, spesielt hvis en hadde slepper som kom ut på stuff. I dette området var det 3 eller nesten 4 skjerner som overlappet hverandre.

- Injeksjonsmiddel** Det samme injeksjonsmiddelet som for rutinemessig injisering ble brukt, dvs. industrisement (Rapid fra Norcem), med et vannsementtall på 2 til å begynne med og ned til 0,5. Det ble også prøvd litt mikrosegment (Rheochem 650), men i svært liten grad fordi injeksjonsmannskapet syntes den var vanskelig å bruke. På slutten av prosjektet ble det prøvd tilsetning av Grout Aid i en skjerm i leirskiferen/knollekalken, men en kunne ikke dokumentere bedre inntrengning. Generelt ble ikke oppsatte kriterier på masseinngang etterfulgt, verken i sonene eller ellers.
- Injeksjonsutstyr** Injeksjonsutstyret som ble brukt under tilpasset injeksjon var det samme som for den rutinemessige injiseringen. Det var ofte vanskelig å få festet pakkene, da ble det ble brukt hamp ytterst i hullet, dette gjaldt først og fremst i syenittporfyren. Likeså ble polyuretanet Resfoam 1K-M brukt til tetting rundt pakkene. Resfoam ble ikke pumpet inn i berget, men kluter ble dyppet i stoffet og dyttet rundt pakkene.
- Injeksjonsutførelse** Maksimalt injeksjonstrykk var i snitt 25-35 bar, avhengig av fjelloverdekningen og hullenes evne til å tåle trykk. Også i sonene ble det brukt 25 bar, men ved problemer med utgang av masse i stuff ble det brukt ned til 5 bar. Injeksjonsrekkefølgen for hull var generelt 1-2 slanger i sålen og hvis det var utganger i bestemte hull ble en tredje slange plassert der hvis ikke ble den plassert mer tilfeldig. Prosedyren var den samme uansett bergartstype (dvs. både i leirskifer, knollekalk, syenitt og syenittporfyr).
- Utførelsen av injeksjonen var altså i stort sett den samme som for rutinemessig injisering, men med et større omfang. Det som kom i tillegg var etterinjisering med polyuretanet TACSS i syenittporfyren. Etterinjiseringen som ble utført med en spesiell pumpe for kjemiske injeksjonsmiddel resulterte totalt sett i mindre innlekkasje, men lekkasjene fant nye veier og spredde seg mer.



#### 4.5 Oppsummering og konklusjoner

Nøkkeldata for Tåsentunnelen er gitt i tabell 3. Det forefinnes også en NGI-rapport angående injeksjonsarbeidene i Tåsen tunnelen, sammendraget er tatt med her:

##### NGI sammendrag

"Det ble utført systematisk forinjeksjon i Tåsentunnelen over totalt 800 m fordelt over to løp. Totalt forbruk av injeksjonsmasse var på ca 33 kg pr m<sup>2</sup> tunneloverflate.

Langs hele traseen er det registrert en viss poretrykksreduksjon i dyprennene. Det har stedvis blitt registrert betydelig senkning av poretrykksnivået ( i overkant av 7m) over tunnelen. For å opprettholde poretrykksnivåene, ble det startet vanninfiltrasjon fra brønner i tunnelen. Disse hadde positiv effekt på poretrykksutviklingen. Det satses på permanent vanninfiltrasjon.

I "Berg 1" dyprenne er det registrert setninger på 27 mm, i "Berg 2" opptil 4 mm, i "Berg 3" dyprenne opptil 36 mm (november 1998).

Totalt er det målt en lekkasje inn i tunnelen på 25,7 l/min per 100 m tunnel fordelt over to løp, som gir en etterregnet midlere permeabilitet på  $k_f=2,55 \cdot 10^{-6}$  cm/sek."

Tabell 3 angir innlekkasjemålingene ved ferdigstillelse av tunnelene. Tetthetskravene er nådd i områdene der sonderboring og "lette" tetthetskriterier har utløst injeksjon.

I det midtre området for begge tunneler, over en ca. 400m lengde, har ikke den systematiske injisering gitt forventet resultat. Det er også her poretrykket har sunket mest, og gitt uakseptabel setningsutvikling.

En erfarte i de sterkt oppsprukne syenittgangene store problemer, både med hullboring, mye masseutgang til tunnel, liten masseinnngang i fjell, og til sist problematisk utførelse av stabilitetssikringen.

Det ble gjort mange endringer på det systematiske injeksjonsprogrammet underveis. Stikkord for endringer er som følger:

- Utlekkasje fra sonder/injeksjonshull ble brukt som kriterium istedenfor vanntapsmålinger.
- Redusert skjerm lengde, fra 24 til 10-18 m i vanskelige områder (syenittganger og sprekkesoner).
- Injeksjonstrykket var satt til 20-25 bar, ble økt til maksimalt 35 bar ved ingerv/liten inngang. Unntaksvis ble 45 bar anvendt.
- Stoppkriterium for injisering var antagelig disse trykkverdier, noen ganger vurdert på mengdekriterium.
- Lang ytre (24 m) og kort indre (12 m) skjerm i samme områder.

- Injeksjon av stuff med 10m lange hull, store utganger.
- Større borkronediameter (64 mm) for å redusere boreproblemer, resultatløst.
- Mikrosegment ble prøvd, uten klare konklusjoner.
- Etterinjeksjon med polyurethan reduserte lekkasjene noe.

**Innlekkasjekriteriene ble tydeligvis ikke endret underveis i prosjektet, selv ikke etter at lekkasjeomfanget økte dramatisk bak stuff og poretrykkene sank.**

**Dette kan ha vært et bevisst valg eller kan skyldes manglende fokus på oppfølging av injeksjonsutførelsen på stuff og konsekvensene dette medfører.**

Det er i ettertid vanskelig å vurdere hvilke tiltak som evt. måtte vært utført dersom innlekkasjekriteriene hadde blitt endret. På T-baneringen blir slike tiltak nå prøvd ut under nær identiske bergmasse- og hydrogeologiske betingelser.

## SVARDALSTUNNELEN, OSLO

Tunnellengde	1700m N – 1450m S
Utforming	To løp med tilsluttende ramper, tverrsnitt ca 65m <sup>2</sup>
Drevet	1998-2000
Innlekkasje totalt	150 l/min. dvs 4,3 l/min/100m
Lekkasjekrav	5 l/min/100m
Gjennomsnittstall for sementforbruk	1358 kg/hull – 80 kg/m hull – 1719 kg/m inj.tunnel – 50 kg/m <sup>2</sup> inj.tunnel – 978 kg/time

Tabell 7: Fakta og injeksjonsdata fra Svardalstunnelen

### 5.1

#### Kortfattet prosjektbeskrivelse

Svardalstunnelen i Oslo fører trafikken på E6, fra Ekeberg-tunnelen til Ryen. Tunnelen går for det meste under bebygde områder med bebyggelse som stort sett er fundamentert til fjell.

Fjelloverdekningen var marginal for deler av tunnelen, ned til 2,5 m, og bergmassekvaliteten i tillegg dårlig. Lengst vest startet det med sterkt oppsprukket kalkholdig leirskifer og deretter alunskifer av ekstra dårlig kvalitet, meget oppsprukket og med svært glatte overflater – "sukkerbitfjell". I disse områder var inndriften meget lav, pga behov for store sikringstiltak. Etter at sonen med alunskifer var passert, kom man inn i gneis av forholdsvis god kvalitet. Paradoksalt nok var det her injeksjon ble aktuelt pga av mye vann og usikkerhet omkring fundamenteringen av boligblokker som lå over tunneltraseen.

Hydrogeologiske situasjon på Svardalstunnelen var preget av at deler av tunnelen lå nært overflaten i bunnen av en bratt skråning. Grunnvannstrømningen viste seg å være knyttet til forkastningssoner (Ekeberg-forkastningen).

Oppgjøret for injeksjonen var basert på pris på forbruk av injeksjonsmiddel (kr/kg) som inkluderte utstyr og mannskap, dvs ferdig plassert, det var egen pris for boring pr meter og pakkere pr stykk. I beskrivelsen angis at prosessen også inkluderer "heft", trolig fordi det var mulig å arbeide på to stuffer.

I FoU-prosjektet C2/C5 er Svardalstunnelen prioritert pga de problemene man hadde med injeksjon og at Ekeberg-forkastningen ville krysse tunneltraseen. Tetthetskrav kontra lekkasjeforhold blir her rapportert ut fra informasjon gitt ved intervjuer av nøkkelpersoner som var med på anlegget. Spesielt når det gjelder injeksjonen blir informasjonen utdypet gjennom disse intervjuene.

Siden det totalt for de to løpene bare ble injisert over ca 260 m av tunnelen, blir presentasjonen lagt opp som for tilpasset injeksjon.

## 5.2 Tetthetskrav og lekkasjeforhold

Maksimal innlekkasje (selvpålagt krav) var satt til 5 l/min pr 100 m i områder med fare for setningsskader på overliggende bebyggelse. Bebyggelsen var stort sett bekreftet fundamentert på fjell, men for enkelte bygg var fundamenteringen ikke dokumentert.

Ved den endelige innlekkasjemålingen for hele tunnelsystemet var resultatet ca 150 l/min totalt, fordelt på totalt 3450 m tunnel (inkluderer rampene mot Lodalen på henholdsvis 160 og 140 m) gir det en innlekkasje på 4,3 l/min pr 100 m.

## 5.3 Tilpasset injeksjon

Innledningsvis gis en beskrivelse av forhold som størrelse på sonen, type sone, geologiske og hydrogeologiske forhold etc. De aktuelle tetningssituasjonene deles for Svartdalstunnelen inn i følgende deltemaer:

Sone med varierende permeabilitet og eventuelt med krav til kritisk stabilitet Det ble injisert i overgangen fra alunskiferen til det breksjerte grunnfjellet (gneis) pga usikker fundamentering av overliggende bygninger og mye vann. I området mellom pel. 400-550 i østgående løp og pel. 640-750 i vestgående løp, var liten fjelloverdekning dimensjonerende for anvendt trykk.

Liten fjelloverdekning, kombinert med fare for grunnvannsenkning og setningsskader Disse forholdene hadde man i området med alunskifer av ekstra dårlig kvalitet, pel 645-745 i vestgående løp og pel 400-555 i østgående løp. Fjelloverdekningen var her bare 2,5-3 m og for overliggende setningsømfintlige boligblokker var fundamenteringen usikker. Her ble forsiktig sprengning, forbolting, bolting og sprøytebetong forsterket med armerte sprøytebetongbuer.

To parallelle tunneløp eller passering nær andre fjellanlegg I de to løpene (ca 10 m fra hverandre) fulgte stoffene hverandre selv om det fra begynnelsen av var tenkt, av sikkerhetshensyn, å gå med 50 m forskyvning (dette for at boring og sprengning ikke skulle skje i umiddelbar nærhet av hverandre).

Nedenfor gis et sammendrag av den utdypede informasjonen vedrørende de tilpassede injeksjonsarbeidene for Svartdalstunnelen. Disse er innhentet ved intervju av Stig Thoresen (tidl. SVV-O, nå JBV Banepartner).

### Strategi

Injeksjonsarbeidene ble utført av det ordinære laget, dvs stoffmannskapet på 2-3 mann, med innledende opplæring fra Stave maskin som var leverandør av injeksjonsriggen. Som regel injiserte man på nattetid.

GeoVita AS foresto det faglige i geologidelen inklusiv injeksjonen, men som byggherre var SVV-Oslo ansvarlig for prosedyren som var

lagt fast i kontrakten. GeoVitas forslag var en generell beskrivelse, som ikke hadde tetthetsklasser eller var spesifisert for ulike bergmasser. Statens Vegvesens ingeniørgeolog på anlegget bestemte endringer i injeksjonsopplegget slik det er vanlig når man følger "design as you go-prinsippet".

Foruten normal kontroll under arbeidet, ble injeksjonen basert på resultater av utlekkasje fra sonder/kontrollhull, og etter injeksjonen ble salveboringen brukt som kontroll av injeksjonsresultatet. Det ble ikke utført noen materialkontroller på sementen.

Injeksjonen ble dokumentert med en håndskreven protokoll (med volum masse, trykk og vannsementtall pr hull). Hensikten var både at entreprenøren skulle få betalt for utført tetting (pr kg masse) og at byggherren skulle få dokumentert innsatsene for fremtiden (tettingen av tunnelen er ikke rapportert i for eksempel intern rapport eller diplomoppgave).

Erfaringstilbakeføringen i prosjektet var kontinuerlig i og med at det såkalte "Design as You go"-prinsippet ble brukt når injeksjonen skulle planlegges.

#### Forundersøkelser

Kontinuerlig kartlegging av berget i tunnelen utgjorde grunnlaget for "Design as You Go-prinsippet" som ble brukt. Faktorer som liten overdekning og borevansker etc hadde direkte innvirkning på injeksjonsskjermens utforming. Som eksempel kan nevnes at korte injeksjonshull førte til at det ble vanskelig å få tettet.

Kartlegging av fjellet i sonderhull var med i anbudsbeskrivelsen, men ble aldri utført. Det samme gjaldt vanntapsmålinger i sonderhull. Injeksjonen ble isteden planlagt ut fra målinger av utlekkasjer i sonderhull.

#### Injeksjonsskjerm

Målsetningen for hullengden var 21 m, men de ble ofte kortere, spesielt i de områdene hvor det var bore- og ladevansker. Hullene skulle ha 5 m stikning fra enden av hullene og til tunnelveggen, men stikningen var ofte mindre pga liten fjelloverdekning (i hvert fall i ene siden av stikken).

Avstanden mellom hullene var 1,5-2 m i heng og vegger, men muligens ble sålen litt forsømt pga at "Design as You go"-prinsippet ble brukt, og at man ikke ser like tydelig vann i sålen som i heng og vegger.

Boreutstyret var vanlige tunnelbore-rigger som det fantes tre av på anlegget. Selv om det var vanskelig å bore i sonene, ble spesialutstyr ikke brukt. I enkelte tilfeller ble hullene kortere enn planlagt. Hullene ble rengjort for boreslam med trykkluft og vann.

Boreavviksmåling var beskrevet i kontrakten, og kostnaden for 200 stk målinger skulle til og med innkalkuleres i boreprisen. Avviksmåling ble vurdert ikke å være nødvendig og ble ikke utført i det hele tatt.

	<p>Det ble satt injeksjonshull i stuff iblant, noen ganger pga borevansker og liten fjelldekning. Hullene hadde da ofte stor stikning for mest mulig å inngå i den øvrige skjermen.</p>
Injeksjonsmiddel	<p>Injeksjonen ble utført med industrisement (Rapid Rp 38 fra Norcem). Et vannsementtall på 1,5 ble brukt til å begynne med av injeksjonsrundene og avsluttet rundene med et V/C-tall på ned til 0,7-0,8. Iblant var massen kanskje til og med tynnere i begynnelsen for smøring av hullene. Mikrosegment (Rheochem 900) var med i beskrivelsen, men ble ikke brukt. Noen ganger ble Rescon Mauring brukt til plugging. Injeksjonen skulle avsluttes med minimum 20-30 bar stående trykk.</p> <p>Nøkkelegenskaper for sementen som kornstørrelse, viskositet, vannsementtall eller separasjonsstabilitet ble ikke kontrollert med målinger. Herdetiden ble målt, i den generelle beskrivelsen var den satt til "15 min etter injeksjon og før boring av salvehull", men i praksis ble herdetiden ½-1 skift ettersom en hadde 2 stuffer å jobbe på.</p>
Injeksjonsutstyr	<p>I beskrivelsen var det krevd at pumpen skulle ha en trykkapasitet på minst 75 bar. Injeksjonsriggen hadde 1 mikser (kolloidkvern) og pumpen hadde 4-5 utganger. Opp til 4 utganger ble benyttet under injeksjonen, spesielt når det var gjennomgang mellom hull. Man kunne få registrering av trykk og mengde på papirremse, men injeksjonen ble dokumentert på tradisjonelt vis med håndskrevet skjema. Pakkerne var mekaniske og ble oppspent for hånd. De ble plassert relativt grunt, minst 1 m inn i borehullet, avhengig av fjellforholdene.</p>
Planlagt utførelse	<p>Hullene ble rengjort med spyling med trykkluft og vann under og etter boring. Generelt startet injeksjonen i de nederst hullene først. Hvis en fikk utgang i andre hull, ble pakker og slange montert der og injeksjon startet opp for å oppnå mottrykk.</p> <p>Maksimalt injeksjonstrykk i forhold til grunnvann og bergtrykk ble i beskrivelsen angitt å være minst 20-30 bar stående trykk. I snitt ble det brukt 20 bar ved brukbar fjelloverdekning, men på enkelte steder med liten fjelloverdekning ble det brukt trykk på bare 8-10 bar.</p>
Endringer i utførelse	<p>Det ble brukt den samme organisasjonen for hele tunnelen. Endringer i injeksjonsutførelsen skyldes først og fremst endringer i injeksjonsskjermens utforming. Endringen var at hullene ble boret kortere og med mindre vinkel pga geometriske forhold (dvs liten fjelloverdekning). På ene siden av tunnelen var det rett og slett ikke noe fjell å bore hullene i på vanlig måte. Skjermen i andre injeksjonsrunde ble tilpasset de observerte lekkasjene i første runde. Utformningen av injeksjonsriggen ble ikke forandret.</p>
Tette resultat	<p>Inntrengningsdypet for injeksjonen skulle teoretisk sett være minst 5 m som stikningen var satt til. Den er ikke blitt kontrollert, for eksempel med kjerneboring, men bruk av 4 m bolter ga ikke noen store problemer med lekkasje.</p>

Tetningseffekten i Svartdalstunnelen er konstatert tilstrekkelig, det selvpålagte kravet til innlekkasje er nesten oppfylt. Kravet ble satt fordi det var vanskelig å fastsette grunnvannstanden og gradienten i det sterkt hellende terrenget. Infiltrasjonsbrønner var medtatt i kontrakten, men det ble ikke nødvendig å bore noen. Brønnene i området var stort sett tomme likevel. Isteden sjekket man setninger etc og på en 30 m lang grunnmur målte man en differensialsetning på 25 cm.

Det ble iblant utført flere runder med forinjisering. Opp til 3 runder fra samme stoffen. Etterinjisering var ikke aktuelt. Forbruket av injeksjonsmiddel kan sammenfattes med følgende gjennomsnittlige tall for hele tunnelen; 1358 kg/hull - 77 kg/m hull - 1719 kg/m injisert tunnel - 50 kg/m<sup>2</sup> injisert tunnel og 978 kg/time. Grunnlaget for disse tall er basert direkte på injeksjonsskjemaene. Det samme gjelder for tabellen nedenfor hvor motsvarende tall er satt opp for de to løpene. Injeksjon ble utført omtrent mellom pel 400-555 i østgående løp og pel 645-755 i vestgående løp.

Pel nummer	Antall skjærmer	Antall runder	Masse pr skjerm	Masse pr hull	Masse pr m hull	Masse pr m tunnel	Masse pr time
ca 400-555, Ø	13	20	14898	945	57	1249	822
ca 645-745, V	8	10	30586	2074	108	2447	1427

Tabell 8: Masseforbruk [kg] for injeksjonen i Svartdalstunnelen

#### 5.4

#### Oppsummering og konklusjoner:

Nøkkeldata for Svartdalstunnelen er gitt i Tabell 7: Fakta og injeksjonsdata fra Svartdalstunnelen

Tetthetskravet som var satt til 5 l/min/100m ble oppnådd for den 1700 pluss 1450 m lange tunnelen, inklusive den 2x130 m lange kryssingen av Ekebergforkastningen. Bergoverdekningen i denne sonen var veldig liten, ned til 2,5-3 m. Det ble utført systematisk forinjisering gjennom denne sonen.

Det systematiske injeksjonsopplegget ble tilpasset mye underveis blant annet pga partivis meget liten fjelloverdekning og meget dårlig bergmassekvalitet. Viktigste endringer var følgende:

- Lekkasjemålinger fra sonderhull initierer injeksjon.
- Salvehull ble kontrollhull for tetthet etter injeksjon.
- Måling/ vurdering av utlekkasjemengde fra hull i såle er problematisk og kan ha ført til undervurdering av injeksjonsbehov.
- Boreproblemer medførte kortere skjærmer.
- Ikke behov for den beskrevne mikrosegment.

**Totallekkasjen ble fordelt på hele tunnallengden, 3450m og man klarte kravet som var satt. Det ble ikke målt lekkasjemengde separat på en kritiske strekning, hvor man fikk setninger på overliggende bygg. En kan derfor konkludere med at det gjennomførte injeksjonsopplegg var tilstrekkelig for å nå kravet, men at kravet ikke var tilstrekkelig spesifisert.**



## LUNDBYTUNNELEN, GÖTEBORG

Tunnellengde	2060m N – 2060m S – 238m ventilasjons tunnel
Utforming	To løp med 13 tverrforbindelser, tverrsnitt 86-92m <sup>2</sup>
Drevet	1994-1998
Innlekkasje totalt	38 l/min totalt, dvs 0,9 l/min/100m
Lekkasjekrav	600-2660: 0,5-2,5 l/min/100m ( se fordeling i figur 1)
Gjennomsnittstall for sementforbruk	79 kg/hull – 5,9 kg/m hull – 476 kg/m inj.tunnel – 12 kg/m <sup>2</sup> inj.tunnel

Tabell 9: Fakta og injeksjonsdata om Lundbytunnelene.

### 6.1

#### Kortfattet prosjektbeskrivelse

Byggherre var Vägverket Region Väst. Lundbytunnelen i Göteborg fører trafikken langs Norra Älvstranden på Hisingen utenom Bräckeområdet. Tunnelen, som strekker seg fra Sannegårdsmotet under bl a Kyrkbytorget og Lundby Gamla Kyrka og til Bräckemotet ved Hisingsleden, går for en stor del under setningsømfintlig bebyggelse.

Fjelloverdekningen var fra 5 til 35 m, vanligvis over 15 m. I dypprenner med leire var overdekningen mellom 5-10 m. Bergartene langs traseen er hovedsaklig skifret granitt av varierende kvalitet, med ganger av amfibolitt og pegmatitt.

Den hydrogeologiske situasjon for Lundby-tunnelen var karakterisert av et begrenset grunnvannsmagasin med lite tilsig og avrenning. Grunnvannstrykket var maksimalt 35 m.

Prisingen av injeksjonen var kr/kg injeksjonsmiddel inkl. utstyr og mannskap, dvs ferdig plassert. Det var egen pris for boring pr meter og pakkere pr stykk. Det var ingen heft tid angitt fordi det var mulig å arbeide på flere stuffer. Det var angitt for lite mengder TACSS i grunnlaget og dessuten satte Skanska lave priser. Det var videre satt en etableringskostnad ved anvendelse av TACSS (på 10.000 kr), men dette ble tatt bort fordi det ble ansett som unødvendig (enkel etablering).

I FoU-prosjektet C2/C5 er Lundbytunnelen prioritert pga de ekstremt lave lekkasjekravene (ned til 0,5 l/min pr 100 m). Likeså er det interessant å redegjøre for hvordan fjell med liten overdekning under en dypprenne fylt med leire og et meget begrenset vannmagasin ble tettet (Lammelyckan). Tetthetskrav kontra lekkasjeforhold blir her rapportert vesentlig basert på en diplomoppgave fra 1995.

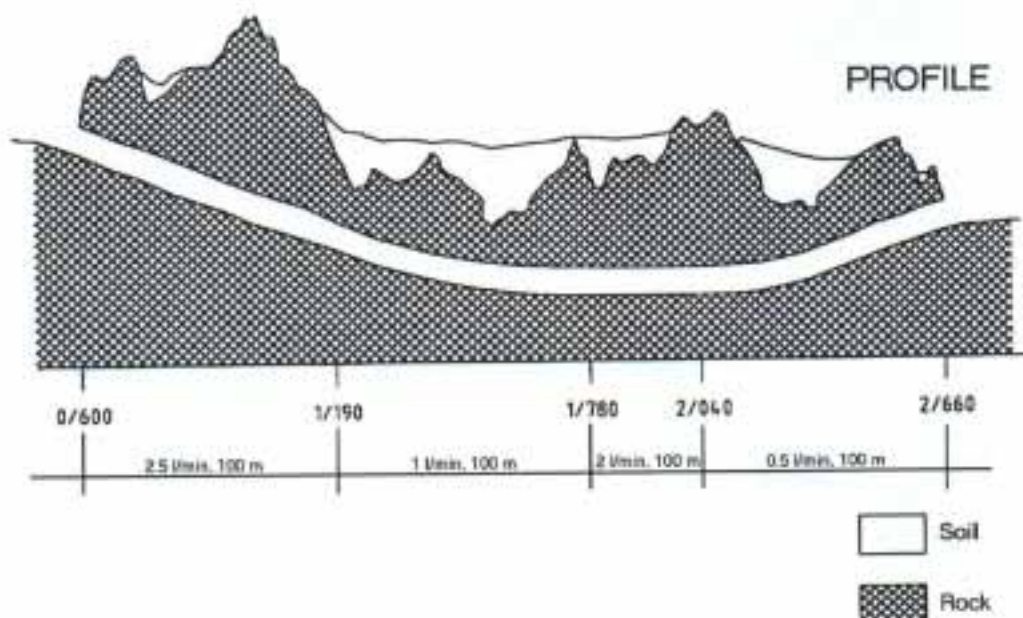
Informasjonen angående injeksjonsarbeidene i tunnelen blir utdypet ved intervjuer av nøkkelpersoner som var med på anlegget.

## 6.2

### Tetthetskrav og lekkasjeforhold

Tetthetskravene var basert på meget omfattende hydrogeologiske undersøkelser (se fordeling av maksimal innlekkasje pr tunneløp i figur 1). Kravene var 0.5 l/min pr 100 m i et område med meget setningsømfintlig bebyggelse (620 m), 1.0 l/min pr 100 m i et område med stor fare for setningsskader (590 m), 2.0 l/min pr 100 m i et område med mindre fare for setningsskader (260 m) og 2.5 l/min pr 100 m med liten fare for setningsskader (590 m).

I Vattendomen for prosjektet var kravet lettere; 2.5 l/min pr 100 m for en strekning på 1460 m respektive 5 l/min pr 100 m for en strekning på 600 m, eller 135 l/min totalt for tunnelsystemet.



Figur 1: Fordeling av tetthetskravene langs Lundbytunnelen

Maksimal lekkasje er nå (2000) ifølge Vägverket 38 l/min for hele tunnelsystemet, hvilket fordelt over totalt 4358 m tunnel (inkluderer hovedtunnelene og ventilasjonstunnelen) gir en gjennomsnittlig innlekkasje på 0.9 l/min pr 100 m.

## 6.3

### Rutinemessig injeksjon

Nedenfor gis et sammendrag av den utfyllende informasjonen som foreligger vedrørende de mer rutinemessige injeksjonsarbeidene for Lundbytunnelen. Disse er innhentet ved intervju foretatt med P-O Eckerlid (VV) og Kai Palmqvist (BERGAB). Deler av sammendraget er komplettert med opplysninger fra Leif Gustavsson (SKANSKA).

### Strategi

Injeksjonsarbeidene ble utført av et eget lag på 2-3 mann spesialisert på injeksjon under ledelse av en formann fra Skanska (Bernt

Holmberg). Det har vist seg at det gjerne blir utviklet egne lag med erfarent mannskap. Likeså hos oppdragsgiveren, hvor kontrollingeniør Tord Bengtsson var den som hovedsaklig arbeidet med injeksjonsspørsmålene.

BERGAB, som var konsulent på vann- og tettedelen, hadde utarbeidet opplegget for injeksjonsarbeidene i anbudssunderlaget. Vegverket var som byggherre ansvarlig for opplegget i kontrakten og detaljbestemte prosedyrer ut fra forslaget.

BERGABs forslag var en detaljert beskrivelse, med tre ulike tetthetsklasser. Disse var spesifisert for ulike strekninger langs traséen (se Tabell 10). Uansett tetthetsklasse, ble injeksjonen utført i to runder for hver skjerm. Arbeidsgangen for injeksjonen ble da boring av annet hvert hull i skjermen, vanntapsmåling og injeksjon i to etapper. Supplerende injisering ble i tillegg utført dersom vann ble påtruffet ved sonder- eller salveboring.

Injeksjonsarbeidene, som omfattet samtidig injisering av hull med gjennomgang, injisering basert på vanntapsmålinger, plugging av hull, avviksmåling av hull (viktig å sjekke toleransen for lengre hull), kontrolleres generelt i Sverige før byggherren godkjenner det utførte arbeidet. I dette prosjektet kontrollerte byggherren selv også om salvehullene var tørre før de tillot sprengning. Det ble ikke utført materialkontroll på sementen og det var ikke med noen tydelig kravprofil på massen, noe som er blitt vanlig nå.

Injeksjonen ble dokumentert med en håndskrevet protokoll (med volum masse, trykk og vannsementtall pr hull). Hensikten var delvis grunnlag for oppgjør, delvis dokumentasjon for fremtiden.

Foruten denne oppfølgingen, fulgte et par studenter fra Chalmers Lindholmen (Martin Lédel og Jens Thorild, 1995) en stor del av arbeidene. Dette for en diplomoppgave som ble ferdig i mai 1995. Oppgaven beskriver de utførte injeksjonsarbeidene og presenterer en rekke diagram over for eksempel masseforbruket mot andre parametere.

Tetningsfilosofien ble basert på omfattende hydrogeologiske undersøkelser. Derfor var det meget begrenset mulighet for endringer av utførelsen – "erfaringstilbakeføring" – underveis. For eksempel ble ekstra runder ofte benevnt komplettering. Ettersom den andre runden skulle gjennomføres uansett, var det lite diskusjoner med entreprenøren om injeksjonsopplegget. Opplegget ga entreprenøren et planleggingsgrunnlag for tunneldriften, men når 1. runde var injisert uten påvist vanntap, hadde en heller tatt en salve enn en ny injeksjonsrunde.

#### Forundersøkelser

Kartleggingen av fjellet i tunnelen ble utført systematisk, men den hadde ikke noen direkte innvirkning på injeksjonsskjermens utforming eller på valg av injeksjonsmasse. Kartleggingen ga allikevel input til skjermens lengde. I en sone hvor en hadde større lekkasjer ble det valgt å bruke TACSS.

Kartlegging av fjellet i sonderhull ble ikke utført, men under prosjekteringsfasen ble såkalte bananhull boret. Forundersøkelsene varslet om soner.

Vanntapsmålinger ble utført i samtlige hull og dette styrte rekkefølgen for injeksjonen. Injeksjonen startet i hull med størst vanntap. Å planlegge injeksjonen ut fra målinger av utlekkasjer i sonderhull, anses å være upresist – hvilket trykknivå opererer en med og hvilke hull i skjermen er det gjennomgang til?

Hydrogeologiske grunnundersøkelser inngikk i de meget omfattende forundersøkelsene som ble utført. Resultatene fra disse har holdt bra og en har planlagt injeksjon og infiltrasjon ut fra disse. På grunn av omfattende hydrotestene var det enkelt å bestemme tetthetsklasse. Videre ble grunnvannsoppfølgingen i dette prosjektet modell for andre prosjekter.

Når det gjelder måling av innlekkasje til tunnelen, er det viktig at måletersklene er skikkelig utført (opp mot 0,5 m). Til tross for at det er vanskelig med tolkningen av slike vannmålinger under tunneldrift, er det et viktig verktøy for å bedømme resultatet av injeksjonsinnsatsene.

#### Injeksjonsskjerm

Hullengden varierte avhengig av tetthetsklasse, ca 13-17 m (ned til 10 m i dårligere bergkvalitet). Generelt gjaldt det at jo strengere kravene var, dessto kortere hull og mer overlapp.

Hullene hadde 4 m stikning fra enden av hullene og til tunnelveggen og i tetthetsklasse 1 skulle avstanden mellom dem være 2,0 m utenfor teoretisk tunnelkontur, og følgelig 1,0 m i 2. runde (se videre Tabell 10). Det ble satt injeksjonshull i stuff hvis en hadde slepper som kom ut på stuff. Det var med som opsjon i programmet, og ble kalt supplerende injeksjon.

Tabell 10 Beskrivelse av tetthetsklasser for ulike deler av  
Lundbytunnelen

<p>Tetthetsklasse 1: Pel. 2/040-2/660, meget setningsømfintlig bebyggelse, lav bergkvalitet, høy vannføring og liten fjelldekning (<math>\geq 5</math> m), tetthetskrav 0,5 l/min pr 100 m. Pel. 1/190-1/780, stor risiko for setningskader, flere knusningssoner med varierende vannføring, tetthetskrav 1,0 l/min pr 100 m. Systematisk injeksjon hver 2. salve (lengde 4 m), med avstand mellom hullendene på 1,0 m, 62 hull, hullengde mellom 10-13 m.</p>	
<p>Tetthetsklasse 2: Pel. 1/780-2/040, relativt liten risiko for setningskader, større soner og sprekker som fører vann, minimering av innvirkning på omgivelsene og innlekkasjer, tetthetskrav 2,0 l/min pr 100 m. Systematisk injeksjon hver 2. salve (lengde 4 m), med avstand mellom hullendene på 1,0 m i sålen og 2,0 m i hengen, 44 hull, hullengde 13 m.</p>	
<p>Tetthetsklasse 3: Pel. 0/600-1/190, liten risiko for skadelig grunnvannssenkning, smale soner og noen sprekker som fører vann, minimering av innvirkning og innlekkasjer, tetthetskrav 2,5 l/min pr 100 m. Systematisk injeksjon hver 2. salve (lengde 5 m), med avstand mellom hullendene på 2,0 m, 30 hull, hullengde 17 m.</p>	

Basert på informasjon i artikkelen "Tätning och erfarenheter från Lundbytunneln", ref. [17].

Boreutstyret på anlegget var tre borerigger fra Atlas Copco, to Robot Boomer H 185 med Atlas eget system for innstilling og posisjonering samt en Rocket Boomer 353 utstyrt med Bever Control. Robot Boomer H 185 hadde en stangdiameter på 32 mm og en 51 mm Guide Retracs borekrone. Rocket Boomer 353 hadde en stangdiameter på 38 mm og en 64 mm Guide Retracs borekrone.

- Boreavviksmåling var beskrevet i kontrakten, og ble utført på over 20% av skjermene. Målingen ble utført med utstyret Inclinomater 95 (spesielt utviklet av Transtronic). Hver måling tok ca 1-1,5 time. Generelt var hullene i bra fjell rette (toleransekravet var 80 cm i hullenden), men i svakhetssoner kunne betydelige avvik noteres (for eksempel 4 m for et 13 m hull). Før vanntapsmåling ble hullene rengjort for kaks med trykkluft og vann med en egen slange.
- Injeksjonsmiddel** Injeksjonen ble utført med injeksjonssement (fra Cimenta) og med et v/c-tall på 3 til å begynne med, lavest v/c-tall var 0,5. Det ble tilsatt av 3% bentonitt og 0,5% Intraplast (som motvirker krymping og øker flytbarheten).
- Kontrakten hadde ikke noen eksakte krav til massen (som det nå er i for eksempel Botniabanen hvor en innledende egenskapsprøving skal finansieres av sementprodusenten). Følgelig ble nøkkelegenskaper for sementen som kornstørrelse, viskositet eller v/c-tall ikke kontrollert med målinger. Separasjonsstabiliteten ble heller ikke målt, men den var høy også for v/c-tall 1,0.
- Herdetiden ble heller ikke målt. I den generelle beskrivelsen i kontrakten var herdetiden satt til 2 timer før neste injeksjonsrunde og 5 timer før salveboring, men kunne også være koblet til når og hvor det ble injisert sist. I praksis ble den mer kontrollert basert på observasjoner av tilbakeslag av masse.
- Injeksjonsutstyr** De to injeksjonsriggene hadde to pumper av typen Craelius ZBE 200 med 4 utganger hver, en EPV 150 Craelius-mikser (modifisert av Stabilator) montert på en vekt og en aktivator.
- Det fantes flerhullsutstyr på riggen. Dette var et krav i kontrakten. Det er da viktig at det også er krav til kapasitet for blandere etc. Riggen hadde altså 8 utganger med mulighet for avlesning av trykk og inngang (volum) for hver slange. Registreringsutrustningen på riggen var av typen Loggart Craelius, men injeksjonen ble først og fremst dokumentert på tradisjonelt vis med håndskrevet skjema.
- To ulike pakkerdiametre ble brukt, 48 og 60 mm. Pakkerne var av engangstype eller hydrauliske (Stabilators konstruksjon) og ble plassert relativt grunt i borhullet, ca 1-1,5 m inn.
- Planlagt utførelse** Hullene ble rengjort med spyling med trykkluft og vann rett etter boringen. Generelt startet injeksjonen i hull hvor det var størst vanntap. Hvis en fikk gjennomgang til andre hull, ble pakker og slange montert og injeksjon startet opp i disse hullene samtidig for å oppnå mottrykk. Prosedyren var den samme uansett bergartstype.
- Først ble en tynn blanding (v/c = 3) med forholdsvis lavt trykk brukt. Hvis sluttrykk ikke ble oppnådd etter 30 minutter (eller hvis motstand ikke ble oppnådd etter 20 minutter), ble v/c-tallet endret til 2. Samme kriterium ble da brukt for denne massen før v/c-tallet ble satt til 1 og når mye masse var brukt, ble v/c-tallet redusert til 0,5. Til slutt ble hullene pluggert og de hull som ikke var blitt injisert (pga at vanntapet var målt til 0) ble fylt med masse med et v/c-tall på 0,3.

Maksimalt injeksjonstrykk i forhold til grunnvanns- og bergtrykk ble i beskrivelsen angitt til å være minst 25 bar stående trykk. Trykket ble umiddelbart regulert avhengig av forholdene og fjelloverdekningen. På et sted ble det registrert sementutgang i en hage.

**Endringer av utførelse** Det ble brukt den samme organisasjonen for hele tunnelen, men både byggherren og entreprenøren rådførte seg med ulike konsulenter og materialleverandører (for eksempel ved injisering med polyuretanut TACSS). Videre ble ledelsen for entreprenøren byttet underveis (fra Stockholmskontoret til Göteborgskontoret). Det ble ikke forandret noe på utstyret på injeksjonsriggen, men en annen pumpe ble brukt for injiseringen med TACSS. Pumpen var med i beskrivelsen, men en etableringskostnad på kr 10.000 pr injisering ble tatt bort pga enkel etablering.

Det ble ikke endret noe på injeksjonsutførelsen. Stort sett holdt man seg til de planlagte tetthetsklassene. I enkelte tilfeller ble skjermen eller trykket justert etter forholdene. Noen generell endring av injeksjonsskjermen ble heller ikke gjort, men den ble tilpasset ulike forhold og vanskeligheter. Det ble prøvd å injisere gjennom en CT-bolt, men dette forsøket medførte ikke noen permanent endring. Under etterinjeksjon sent i prosjektet ble det brukt 650 liter Rhocagil i såkalt dryppjakt.

**Tetteresultat** Inntrengningsdybden av injeksjonsmassen er ikke blitt kontrollert, for eksempel med kjerneboring. Teoretisk sett skulle den være rundt 4 m tilsvarende stikningen, men en jevn tettesone rundt tunnelen var ikke forventet. En del bolter punkterte injeksjonsskjermen, spesielt i området rundt Lammelyckan.

Tetningseffekten i Lundbytunnelen er konstatert tilstrekkelig, det oppsatte kravet til innlekkasje er oppfylt for tunnelsystemet. I området rundt Lammelyckan kontrolleres grunnvannsnivået med permanent infiltrasjon fra en brønn, det infiltreres 5 l/min over en strekning på 150-200 m. Denne var planlagt opprettet før byggestart.

Opplegget var basert på to runder injisering pr skjerm, men flere injeksjonsrunder var iblant nødvendig. Lammelyckan f.eks ble 2 runder fra samme stuff pluss kontrollhull injiserte og planlagt etterinjisering ble utført med TACSS.

Forbruket av injeksjonsmiddel kan for hele tunnelen sammenfattes med følgende gjennomsnittlige tall; 79 kg/hull, 5,9 kg/m hull, 476 kg/m injisert tunnel og 12 kg/m<sup>2</sup> injisert tunnel. Disse tall er basert dels på byggherrens sammenstilling over brukte mengder i tunnelen og dels en prosentvis oppdeling beskrevet i [15] "Summering av Lundbytunneln" (Eriksson & Söderberg, 1997). Det samme gjelder for tabellen nedenfor hvor det gjennomsnittlige forbruk av injeksjonsmasse er oppdelt tilsvarende tetthetsklassene som er presentert i Tabell 10.

**Tabell 11 Masseforbruk forinjeksjonen i Lundbytunnelen**

Tetthetsklasser Tetthetskrav: l/min/100m	Antall skjermmer	Hull pr skjerm	Masse pr skjerm [kg]	Masse pr hull [kg]	Masse pr m tunnel [kg]	Masse pr m <sup>2</sup> tunnel [kg]
Klasse 1: 0,5-1,0 l/min pr 100 m	149	62	4692	76	669	7,8
Klasse 2: 2,0 l/min pr 100 m	167	44	3372	77	481	5,6
Klasse 3 Krav: 2,5 l/min pr 100 m	269	30	2527	84	360	4,2

Basert på mengdesammenstilling og informasjon i artikkelen *Summering av Lundbytunneln, ref. 15.*

Av de til sammen 585 skjermene ble 540 injisert i to runder ifølge prosedyren. 45 skjermmer ble injisert i én runde fordi vanntapet ble målt til null for 1. runde. Foruten mengdene for forinjeksjon i Tabell 11, ble 88 supplerende forinjiserings utført med totalt 50 tonn sement – snittforbruket var da 9,7 kg/m hull. Videre ble etterinjeksjon utført med injeksjonssement (342 tonn) og polyuretanut TACSS (50988 liter). Omtrent 30% av all etterinjeksjon ble utført i området rundt Lammelyckan.

Diplomoppgaven fra Chalmers Lindholmen (Lédel & Thorild, 1995) presenterer en detaljert studie over injeksjonen utført i hver ende av tunnelen; fra Sannegårdsmotet i øst (ca 95 m) og fra Bräckemotet i vest (ca 160 m). For Sannegården gjaldt tetthetsklasse 1 og for Bräcke tetthetsklasse 3. Studentene har blant annet tatt for seg forbruket i 1. runde mot 2. runde, antallet uninjserte hull samt forskjeller i forbruk i vestgående løp (N) respektive østgående løp (S). Masseforbruket for de to løpene i disse delene av tunnelen er presentert i Tabell 12.

**Tabell 12 Masseforbruk forinjeksjon i de to løpene i Sannegårdsmotet og Bräckemotet**

	Antall skjermmer	Antall runder*	Masse i 1. runde [kg]	Masse i 2. runde [kg]	Masse pr m tunnel [kg]*
Sannegårdsmotet, tetthetsklasse 1:					
Pel. 2/626,2-2/562,4, østgående løp	11	22	1899	965	332
Pel. 2/646,3-2/561,2, vestgående løp	11	22	1300	618	222
Bräckemotet, tetthetsklasse 3:					
Pel. 0/624,5-0/770, østgående løp	17	31	574	396	80
Pel. 0/624-0/773,8, vestgående løp	17	28	1057	331	135

Basert på informasjon i oppgaven *Injekteringsarbeidet i Lundbytunneln, ref. 15.*

\* I noen skjermmer ble runde 1 og 2 injisert samtidig, medregnet i masse pr m injisert tunnel.



Omtrent to tredjedeler av de forbrukte massene ble injisert i 1. runde, både for Sannegården og Bräcke. Videre er det registrert at massen pr meter injisert tunnel i disse tidlige delene av tunnelene ikke når opp til gjennomsnittet for hele tunnelen på 476 kg/m injisert tunnel.

I Sannegårdsmotet ble 34% av hullene i 1. runde injisert og 21% av hullene i 2. runde og forbruket var 160 kg/inj. hull i 1. runde og 127 kg/inj. hull i 2. runde. For Bräckemotet var tilsvarende tall 47% og 22%, samt 114 kg/inj. hull og 107 kg/inj. hull. Disse tall kan da sammenlignes med gjennomsnittet for hele tunnelen som oppgis til 79 kg/hull ovenfor.

Forskjeller i forbruk i vestgående løp (N) og østgående løp (S) ble studert i oppgaven. I Bräcke var forbruket størst i det vestgående løpet som ble drevet et stykke foran det østgående, men i Sannegården var forholdet omvendt. Det var derfor ikke mulig å dra noen sikre konklusjoner om at injiseringen av det tunneløp som drives først også tetter deler av fjellet for løpet som kommer bak.

## 6.4

### Tilpasset injeksjon

Innledningsvis gis en beskrivelse av forhold som størrelse på sonen, type sone, geologiske og hydrogeologiske forhold etc. De aktuelle tetningssituasjonene deles for Lundbytunnelen inn i følgende deltemaer:

Sone med varierende permeabilitet og evt. med krav til kritisk stabilitet Det var mye lekkasjer og vanskelig å injisere i det leirforvitrede, generelt dårlige fjellet i området rundt Lammelyckan, omtrent mellom pel 2300-2400.

Liten fjelloverdekning, ev. med fare for senkning av grunnvannsnivå i løsmasser. Ved dyprennen mellom pel 2300-2400, Lammelyckan, var det et område med en fjelloverdekning på bare 5-10 fjell med boliger på setningsømfintlige løsmasser. I det meget begrensede grunnvannmagasinet (280 m<sup>3</sup>) ble det utført en prøvepumping for å se hvor fort poretrykket kom tilbake (etter at magasinet var tømt regnet det ikke på flere måneder).

To parallelle tunneløp eller passering nær andre fjellanlegg Lundbytunnelen passerte en transporttunnel, hvor en måtte sprengte hull mellom tunnelene og støpe en bru. Dessuten hadde en to parallelle tunneløp. Injiseringen ble ikke tilpasset situasjonen med to løp. Inntrykket var at det ble en del mindre masseforbruk mot den andre tunnelen i tunneløp 2. Uansett bør løpene ligge et stykke fra hverandre pga sprengning og påføring av sprøytebetong i det andre løpet.

I det etterfølgende gis et sammendrag av den utdypede informasjonen for de tilpassede injeksjonsarbeidene for Lundbytunnelen innhentet ved intervju med P. O. Eckerlid (VV), Kai Palmqvist (BERGAB) og Leif Gustavsson (SKANSKA). De samme spørsmål som for den rutinemessige injeksjonen er blitt besvart, men bare de deler som er aktuelle for den tilpassede injeksjonen tas med her.

Organisering	Både strategi og forundersøkelser var naturlig nok stort sett de samme som for den rutinemessige injeksjonen, men de hydrogeologiske undersøkelsene var mer omfattende i området rundt Lammelyckan. Som nevnt ble det utført en prøvepumping for å se på tilbakestillingen av poretrykket i det meget begrensede grunnvannsmagasinet (280 m <sup>3</sup> ) i løsmasser over fjell. For å ha muligheten til å støpe en vanntett utforing, satte entreprenøren frem et ønske om å øke tunnel målene med 1,5 m i dette området. Dette forslaget ble ikke antatt.
Injeksjonsskjerm	Injeksjonsskjermens utforming ble endret ved passeringen av de aktuelle sonene – jo strengere krav, desto kortere hull og mer overlapp. I Lammelyckan var hullene bare 9-10 m og bare én salve ble tatt mellom injeksjonsskjermene. Injeksjonshull i stoff ble også mer brukt i Lammelyckan enn ellers.
Utførelse	Generelt ble to runder med forinjisering pluss injisering av kontrollhull (tillegg) gjennomført. På en strekning ble også systematisk etterinjeksjon av taket utført med sement. Fordi det var viktig ikke å tette igjen grunnvannsmagasinet ved forinjeringen ble utbredelsen av sementen styrt med polyuretanutet TACSS (totalt 1747 liter).
Injeksjonsmiddel	Det samme sementbaserte injeksjonsmiddelet som ved rutinemessig injisering ble brukt, dvs. injeksjonssement (fra CEMENTA). Det ble brukt et vannsementtall på 3 til å begynne med og avsluttet med et vc-tall ned mot 0,5. Sementen ble tilsatt 2-3% bentonitt (noe som har vist seg negativt når det gjelder filtreringsstabiliteten og som en har gått bort fra nå) og opp til 1% Intraplast (som motvirker krymping og øker flytbarheten). Generelt ble det ikke satt opp kriterier for masseinnngang, verken i sonene eller ellers.
Injeksjonsutstyr	I sonene ble det brukt det samme injeksjonsutstyr som for den rutinemessige injiseringen, men etterinjiseringen med polyuretanutet TACSS ble utført med en spesialpumpe. Det maksimale injeksjonstrykket skulle være 25 bar stående trykk, men i Lammelyckanområdet kunne det bare brukes svært lave trykk. Det ble for eksempel presset opp en sprekk under vanntapmåling med bare 5 bar overtrykk.  Prosedyren for rekkefølgen av injeksjonshull var den samme uansett bergartstype, dvs en begynte å injisere hvor det var størst vanntap og hull med gjennomgang ble injisert samtidig. Utførelsen av injeksjonen var stort sett den samme som for rutinemessig injisering, men i større omfang. Det som kom i tillegg var polyuretanutet TACSS, både for for- og etterinjeksjon. Sent i prosjektet ble det prøvd 650 l Rhocagil under etterinjeksjonen.
Tetteresultat	På tross av flere runder forinjisering, kontrollhull fra samme stoff og etterinjisering utført med TACSS, har en del bolter punktert injeksjonsskjermen, spesielt i Lammelyckanområdet. Tetthetskravet i området rundt Lammelyckan er ikke oppfylt. Kravet til innlekkasje var der 0,5 l/min pr 100 m, mens innfiltrasjonen er 5 l/min over en strekning på 150-200 m. Dette kontrolleres med en permanent infiltrasjonsbrønn, noe som var planlagt i utgangspunktet.

## 6.5

### Oppsummering og konklusjoner.

Lundbytunnelen er systematisk forinjisert i hele lengden, totalt ca 4.400m. Tetthetskravene var differensiert og meget strenge; fra 2,5 til 0,5 l/min/100m tunneløp. Tunnelen(e) er drevet gjennom lavpermeable, skifrige granitter, amfibolitter og pegmatitter. Overdekning varierte mellom 5-28 m. Den systematiske injiseringen har gitt tilfredstillende tetthet på alle delstrekninger unntatt en strekning på ca 150-200m. På denne ble det målt innlekkasje til tunnelen på 1,3 l/min/100m tunneløp (måleterskler i betong), mens kravet var her 0,5 l/min/100m tunneløp. Målt gjennomsnittlig innlekkasje for hele tunnelsystemet 3 år etter åpning er oppgitt til 0,9 l/min/100m.

Injeksjonsprogrammet var detaljert fastlagt før oppstart, med forskjellig utforming for hver av de tre tetthetsklassene. Dette ga et godt planleggingsgrunnlag for entreprenøren, men det kan stilles spørsmål ved om dette totalt sett var tidsoptimalt.

Hovedelementene i injeksjonsprogrammet og erfaringene kan stikkordsmessig beskrives følgende:

- Minst to komplette injeksjonsrunder.
- Vanntapsmålinger i alle hull der resultat bestemmer injeksjonsrekkefølgen.
- Supplerende runde(r) dersom ikke tørre hull uten vanntap oppnås etter 2.runde.
- Korte skjærmer, 10-17m, 30-62 hull, avhengig av tetthetsklasse.
- To salver mellom hver injisert stuff, 8 til 10m avhengig av tetthetsklasse.
- Dette gir høy oppboringsgrad bm/m tunnel)
- Injeksjonssement fra Cementa, tilsatt bentonitt og Intraplast.
- Høye v/c-tall 3,0-1,0 (0,5 unntaksvis, etter stor mengdeinngang i hullet).
- Lave injeksjonsstrykk, 25 Bar + overdekning.
- Liten masseinngang, (kg/bm).

En sone med dårlig bergmassekvalitet og høy permeabilitet ble en stor utfordring. Det ble utført to komplette injeksjonsrunder, pluss kontrollrunde og systematisk etterinjeksjon. Resultatet ble som nevnt over 1,3 l/min/100m tunneløp og permanent vanninfiltrasjon. Dette kan være et eksempel på hvor kombinasjonen av bergforhold og tetthetskrav gjør at forinjisering ikke er det riktige valg som permanent teknisk løsning, men hvor det burde suppleres med vanninfiltrasjon, eventuelt erstattes med betongutforing.

## STORHAUGTUNNELEN, STAVANGER

Tunnellengde	1260m
Utforming	Et løp, tverrsnitt 85m <sup>2</sup>
Drevet	1998-2001
Innløkkasje totalt	1,6 l/min/100m
Løkkasjekrav	Pel 1250-1550: 3 l/min/100m Pel 750-900: 10 l/min/100m)
Gjennomsnittstall for sementforbruk	112 kg/hull – 8 kg/m hull – 1014 kg/m inj.tunnel – 26 kg/m <sup>2</sup> inj.tunnel -273 kg/time

Tabell 13: Fakta og injeksjonsdata om Storhaugtunnelen

### 7.1

#### Kortfattet prosjektbeskrivelse

Byggherre var Statens vegvesen Rogaland (SVV-R). Storhaugtunnelen i Stavanger fører trafikken på fylkesveg 427 under Storhaug bydel. Tunnelen, som strekker seg fra Strømsbrua til Haugesundsgata, går lengst øst under bebyggelse i et område med en setningsømfintlig myr.

Bergartene langs traseen til Storhaugtunnelen er forskjellige varianter av fyllitt som hører til de såkalte Ryfylkeskifrene. Fyllitt er en finkrystallisk glimmerskifer med varierende skifrihet. Enkelte lag er fastere enn andre som lett spaltes opp i tynne sjikt. Det er tre områder langs tunnelen med større sprekkeintensitet og de viktigste svakhetssonene er utviklet tilnærmet parallelt med fyllittens skifrihet. Fjelloverdekningen var marginal langs deler av tunnelen, ned til 3-4 m, hvor injeksjon ble aktuelt.

Den hydrogeologiske situasjon for Storhaug tunnelen var karakterisert med en veldig tett bergart (fyllitt) hvor grunnvannstrømningen fulgte kanaler. Grunnvannsmagasiner i området besto av to torvmyrområder som hadde lite tilsig og avrenning. Grunnvannstrykket i området lå i størrelsesorden 10-15 m.

I FoU-prosjektet C2/C5 er Storhaugtunnelen prioritert pga de strenge tetthetskravene og problemene med å tette den skifrige fyllitten under torvmyrområdet langs tunneltraseen. Det redøgjøres for den systematiske injeksjonen foretatt mellom pel. 1400-1550. Tetthetskrav, lekkasjeforhold og injeksjonsinnsatsen blir først og fremst beskrevet basert på intern rapport nr 2126 *Erfaringer fra injeksjonsarbeider i Storhaugtunnelen*. Informasjon er også hentet fra en artikkel fra Fjellsprengningskonferansen 1999, ref. 20 og en hovedoppgave fra NTNU ref. 21. For injeksjonen av tunnelen har

informasjonen blitt noe utdypet gjennom intervjuet av Magne Stedjan (Tunnelsupport AS), som var konsulent på anlegget.

Siden det totalt for tunnelen bare ble injisert langs ca 165 m av tunnelen, blir redegjørelsen lagt opp som for tilpasset injeksjon. Samme spørsmål som for såkalt rutinemessig injeksjon er blitt besvart.

## 7.2

### Tetthetskrav og lekkasjeforhold

Maksimal innlekkasje var satt til 3 l/min pr 100 m i området mellom pel 1250 og 1550. Det var litt uklart hvordan den eldre bebyggelsen var fundamentert, men den antas delvis å være fundamentert på treflåter og delvis på trepeler. Det strenge tetthetskravet medførte at det i torvmyrområdet, pel 1400-1550 hvor det var klar fare for setningsskader på overliggende bebyggelse, ble besluttet å utføre systematisk injeksjon istedenfor injeksjon bestemt ut fra resultater fra sonderboring.

For det andre området, som ble vurdert setningsfarlig pga stor løsmassemekthet (pel. 750-900), ble maksimal innlekkasje satt til 10 l/min pr 100 m. Årsaken til det mindre strenge kravet var dels at moreneavsetningene i Storhaugområdet er lite setningsfølsomme, dels at området er mindre bebygd og har atskillig større mating av grunnvann. Det samme tetthetskravet ble også satt for andre deler av tunnelen, men da var det akseptert å se en større lengde av tunnelen samlet.

Innlekkasjemåling i tunnelen sommeren 1999 under torvmyrområdet mellom pel 1400 og 1550 viste ca 1,6 l/min pr 100 m, dvs. godt under kravet. Målingen ble utført over en helg ved støpte terskler.

## 7.3

### Tilpasset injeksjon

Herunder gis et sammendrag av informasjonen vedrørende de tilpassede injeksjonsarbeidene i Storhaugtunnelen. Informasjonen er først og fremst hentet fra referansene [20]-[22] og delvis ved intervju med Magne Stedjan (Tunnelsupport AS). Deler av sammendraget er komplettert med informasjon fra Tarald Nomeland (Tunnelsupport AS).

Innledningsvis gis en beskrivelse av forhold som størrelse på sonene, type sone, geologiske og hydrogeologiske forhold etc. De aktuelle tetnings-situasjonene deles for Storhaugtunnelen inn i følgende deltemaer:

Sone med varierende permeabilitet og evt. med krav til kritisk stabilitet I den lite injiserbare fylltitten under torvmyrområdet mellom pel 1400 og 1550 ble det foretatt systematisk injisering istedenfor injeksjon bestemt ut fra resultater fra sonderboring. Beslutningen var basert på faren for setningsskader på eldre bygningsmasse som generelt var i dårlig forfatning og fundamentert på treflåter og trepeler. I området var også injeksjonstrykket dimensjonerende pga liten fjelloverdekning.

Liten fjelloverdekning og med fare for grunnvannsekning i løsmasser  
Under torvmyrområdet mellom pel 1400 og 1550 var fjelloverdekning ned til 3-4 m, med overliggende setningsømfintlig bebyggelse av eldre dato.

#### Organisering

Injeksjonsarbeidene ble utført av det ordinære stoffmannskapet på 2-3 mann, med innledende opplæring av Tunnelsupport AS.

Tunnelsupport AS hadde også laget et forslag til arbeidsprosedyrer, men som byggherre var SVV-R ansvarlig for programmet som også var lagt fast i kontrakten. Forslaget var en generell beskrivelse og hadde ikke tetthetsklasser og var heller ikke spesifisert for ulike bergarter. Foruten arbeidsprosedyrer, har Tunnelsupport foretatt justeringer av opplegget når forholdene avvek fra det vanlige. Injeksjonen skulle ifølge kontrakten løpende bli bestilt av byggherren, men SVV-R fikk frihet å være med og vurdere situasjonen og prøve seg fram.

Foruten normal kontroll under arbeidet, var det ikke lagt opp til noen materialkontroll på sementen. Under torvmyrområdet mellom pel 1400 og 1550 ble det altså foretatt systematisk injisering, men i tillegg ble det utført både ut- og innlekkasje målinger i 6-10 hull i skjermen. Resultatene viste tildels liten korrelasjon. For eksempel ga flere hull store vanntap, men ingen utlekkasje. På grunn av dette og en ganske stor kostnad for å få utført målingene, gikk en bort fra å måle vanntap i samtlige sonderhull.

Etter hver injeksjonsomgang ble det boret 6-10 kontrollhull og injeksjonsresultatet ble sjekket ved måling av utlekkasjer fra hullene. Vanntapkriteriet var at hullene måtte være praktisk talt tørre ( $-0$  l/min) før injeksjonen ble avsluttet.

Injeksjonen ble dokumentert med en håndskrevet protokoll (med mengder og trykk for hvert hull). Hensikten med protokollen var å danne grunnlag for entreprenørens oppgjør og at byggherren skulle få dokumentert innsatsene for framtiden.

Injeksjonen ble forandret underveis etter geologien og etter at en fikk erfaringer med forholdene. For eksempel ble antallet hull i injeksjonsskjermen variert mellom 30 og 72, før en landet på det optimale antallet 62 hull.

#### Forundersøkelser

Kartlegging av fjellet i tunnelen ble utført systematisk av ingeniørgeologer fra Statens Vegvesen. De skulle også følge med i injeksjonsarbeidene. Kartleggingen utgjorde et grunnlag for injeksjonen da faktorer som f.eks liten overdekning hadde direkte innvirkning på injeksjonsskjermens utforming. Eksempelvis kan nevnes at injeksjonshullene var nødt til å ha mindre stikning i hengen.

Verken kartlegging av fjellet i sonderhull eller borkaksanalyse ble utført, men det ble utført tynnslip på fyllitten. Under prosjekteringsfasen ble vanlige grunnundersøkelser utført.

Vanntapsmålinger ble altså utført både i sonderhull (som var en del av skjermen) og i kontrollhull. Vanntapsmålingene ble utført med 6

bars overtrykk. Ved trinnvis måling i starten, hvor trykket først ble satt til 4 bar, så økt til 6 bar og til slutt til 10 bar, økte inngått vannmengde markant ved 7-8 bar. Dette ble tolket til et resultat av hydraulisk splitting eller utvasking av leirholdige slexer. Derfor ble trykket satt til 6 bar. Ifølge arbeidsprosedyrene var kriteriet at en Lugeon-verdi på over 0,1 l/min skulle rapporteres til byggherren og bli vurdert av ingeniørgeolog.

#### Injeksjonsskjerm

Det er viktig å sette hullene tettere, høy oppboringsgrad, jo tettere fjellet er. På grunne av det lite injiserbare fjellet i Storhaug, hvor sprekke ofte var leirfylte og de større lekkasjene kom fra kanaler som var vanskelige å treffe med injeksjonshullene, ble et tett borehullmønster brukt hele veien. Det var veldig viktig å treffe lekkasjestedene. Etter en del prøving ble det optimale antallet hull i injeksjonsskjermen satt til 62 for et tverrsnittet på ca 85 m<sup>2</sup>. Dette tverrsnittet ble utvidet for å muliggjøre vanntett utstøpning. Det ble boret injeksjonshull i stoff hele veien. Av de 62 hullene ble 12 hull satt i stoffen og resten i kransen. Hullengden ble generelt satt til 14 m, men annet hvert hull i sålen (13 stk) ble boret 8 m for å spare boring.

Hullene i kransen skulle pga liten fjelloverdekning ha 2 m fra enden av hullene og til tunnelveggen i hengen, 4 m i sålen og 6 m i veggene. I overgangen mellom vegg og såle, ble det plassert ekstra hull. Dette fordi stikningen gjorde at avstanden mellom hullene i hullenden ble for stor her.

Boringen av injeksjonshull ble utført med den samme riggen som for salveboringen, en '94 fulldata AMV 3-boms borelegg. Det ble brukt 51 mm diameter på hullene, som ble rengjort for kaks med trykkluft og vann. Boreavviksmåling ble vurdert ikke å være nødvendig og ble ikke utført selv om det var med i kontrakten.

Siden hullengden for sonder/kontroll- og injeksjonshull var 14 m generelt og salvelengden var satt til maksimalt 3 m pga rystelsesproblematikk, ble overlappet med 2 salver 8 m. Det ble vurdert at med det strenge kravet til tetthet var det nødvendig med dobbel skjerm.

#### Injeksjonsmiddel

Injeksjonen ble gjennomgående utført med mikrosegmenten Ultrafin 12 (fra Cimenta) med tilsetning av tilsetningsstoffet Grout Aid (mikrosilika) og det plastiserende middelet Scancem SP-40. Vannsementtallet ble variert mellom 1,1 og 0,4. Grout Aid ble brukt hele tiden. Den største kornstørrelsen i silikan tilsvarende minste i mikrosegmenten U12 og massen henger derfor veldig fint sammen. Det hurtigherdende sementbaserte stoffet Thermax ble brukt for plugging av hull etter injisering og for å redusere herdetiden på sementen.

Nøkkelegenskaper for sementen som kornstørrelse, viskositet, vannsementtall eller separasjonsstabilitet ble ikke kontrollert med målinger. Heller ikke herdetiden ble målt, men når herdingen ble sjekket ved kontrollboring, ble det konstatert at det ikke var ferdig herdet ca 20 timer etter avsluttet injeksjon. I slutfasen av injeksjonen kunne Thermax brukes for å få ned herdetiden, men

- også engangspakkere ble brukt som plugging av hull fordi disse var billigere enn å bruke Thermax.
- Injeksjonsutstyr** Injeksjonsutstyret var plassert på en plattform med hjul og bestod av stempelpumpe, kolloidblander og omrører. Injeksjonsriggen hadde dobbelt opp av pumper og blandere, men bare en pumpelinje ble brukt fordi det ikke trengtes mer masse. Først ble vann, SP40 og GroutAid blandet ca et halvt minutt, og deretter ble sementen tilsatt og blandningen ble mikset i ca 5 minutter.
- Det fantes ikke automatisk registreringsenhet på riggen, og injeksjonen ble dokumentert på tradisjonelt vis med håndskrevet skjema.
- Det ble brukt 48 mm pakkere med engangs gummidel og en stav som kunne brukes igjen. Pakkerne ble i startfasen plassert ca 1 m inn i borehullet, men dette ble senere endret til ca 2-3 m. Pakkerne ble satt inn etter hvert under injeksjonen eller når en fikk gjennomgang mellom hull. Generelt settes pakkene langt nok inn for å slippe utganger i stuff. Men i tilfeller hvor en fikk masse tilbake på stuff, ble Thermax eller tykkere sementblandning brukt.
- Planlagt utførelse** Hullene ble rengjort med trykkluft og spyling med vann direkte etter boringen. Generelt startet injeksjonen i de laveste hullene og gikk oppover, men hvis en fikk utganger i andre hull, ble pakker og slange montert der og injeksjon startet opp for å oppnå mottrykk. Prosedyren var den samme uansett bergartstype.
- Mikrosegment U12 ble brukt hele veien. I gjennomsnitt 6 tonn pr skjerm og maksimalt nesten 14 tonn. Vannsementtallet ble endret under injeksjonens gang fra v/c lik 0,9 og ned til 0,7. Det ble satt krav til at det ikke skulle injiseres mer enn 300 kg i et hull og at byggherren skulle varsles i slike tilfeller (sluttrykket var da satt til 30 bar). Injeksjonen skulle ifølge beskrivelsen avsluttes med et injeksjonstrykk på 30 bar. Den doble injeksjonsskjermen gjorde det mulig med et maksimalt injeksjonstrykk i forhold til grunnvann- og bergtrykk på nær 50 bar i hengen, og opp til 70 bar ble brukt i sålehullene.
- Endringer i utførelse** Både byggherre og entreprenør hadde den samme organisasjonen for hele tunnelen. Byggherren rådførte seg underveis hovedsakelig med Tunnelsupport.
- Det ble ikke gjort endringer på injeksjonsriggen. Injeksjonsutførelsen ble først og fremst endret når det gjelder injeksjonstrykket som ofte var høyere enn 30 bar som fra begynnelsen var angitt som maksimalt trykk. Injeksjonsskjermen ble endret mht antall hull som i starten varierte både opp og ned for samme tverrsnitt. Ganske snart ble 62 hull funnet å være optimalt.
- Grunnet liten fjelloverdekning i området, ble hullene i hengen boret med mindre vinkel, og dermed mindre stikning (bare 2 m).



#### Tette resultat

Heller ikke type injeksjonsmiddel ble endret, mikrosement U12 ble brukt gjennomgående. Bruk av Thermax for plugging av hull var med i prosedyren fra begynnelsen.

Stikningen var satt til 2-6 m, men inntrengningen for injeksjonen er ikke blitt kontrollert med kjerneboring eller andre metoder. Det var problemer med at injeksjonsskjermen ble punktert av bolter og en tok derfor bort en del bolter og erstattet disse med tykkere sprøytebetong.

Som eksempel på inntrengningsdybden for injeksjonsmassen kan nevnes at et sted med omtrent 10-12 m overdekning fikk en opp masse i en kjeller.

Tetteeffekten er konstatert tilstrekkelig og det oppsatte kravet til innlekkasje på maksimalt 3 l/min mellom pel. 1250 og 1550 er oppfylt. En har måleterskler og i 1999 ble det målt en innlekkasje på 1.6 l/min pr 100 m i snitt mellom pel 1400 og 1550.

Vanntapsmålinger for å bestemme omfang av injeksjon ble tatt bort etter hvert. Grunnen var at det ga lite informasjon og dessuten kostet mye både i tid og penger.

Injeksjonsarbeidene har kostet, ca 49 000,- pr m tunnel, mye overlapping mellom skjermene er noe av årsaken til den relativt høye prisen. Resultatet er blitt vellykket, spesielt med tanke på muligheten for store setningsskader på gammel bebyggelse i torvmyrområdet. Tverrsnittet ble utvidet og planlagt for full utstøping. Dette kunne en muligens unngått, men det er en billig "forsikring", dersom en var sikrere på et vellykket injeksjonsresultat.

Forbruket av injeksjonsmiddel for den injiserte 150 m-strekningen kan sammenfattes med følgende gjennomsnittstall; 112 kg/hull, 8 kg/m hull, 1014 kg/m injisert tunnel eller 26 kg/m<sup>2</sup> injisert tunnel, og 273 kg/time. Grunnlaget for disse tall er basert på byggherrens sammenstilling over forbrukte mengder i tunnelen, presentert i hovedoppgaven til Prestegaard Staavi og Sæverås, ref. [45] samt egen bearbeiding av dataene.

Til forskjell fra resultatene i ref. [45] inkluderer verdiene som er angitt her massen for fylling av hullene. Dette for å kunne sammenligne med resultatene fra de øvrige tunneler presentert i denne rapporten. Likeså er det her ikke tatt hensyn til svinn etc. Dette resulterer i at forbruket som presenteres her blir en del større enn hva som er angitt i referanse [45].

I hovedoppgaven til Prestegaard Staavi og Sæverås, ref. [45], ble også injeksjonskapasiteten studert. Variasjonen var som forventet stor fra ca 14 til ca 32 timer og fra ca 1500 til ca 14000 kg pr skjerm. I en kortfattet oversikt med gjennomsnittstall angir ref. [45] tiden for å injisere totalt 6096 kg i en 58-hullsskjerm til 23 timer (dvs 265 kg/time). Denne verdien sammenfaller bra med gjennomsnittsverdiene for hele den injiserte delen av Storhaugtunnelen.

## 7.4

### Oppsummering og konklusjoner.

Ved Storhaugtunnelen er det med strenge tetthetskrav, 3 l/min/100m, utført omfattende systematisk injisering på en 165 m strekning av tunnelen. Det strenge tetthetskravet var satt pga overliggende setningsfarlige grunnforhold og risiko for skader ved grunnvannsenkning.

Tunnelen er i dette området drevet gjennom lavpermeabel fyllitt med liten fjelloverdekning, ned til 3-4m til terrengoverflaten.

Den systematiske forinjeksjonen har gitt tilfredsstillende resultat, 1,6 l/min/100m, målt over utstøpte terskler. Hovedelementene i injeksjonsprogrammet og erfaringene beskrives av følgende:

- Permeabilitet vurdert fra utlekkasjemålinger, vanntapsmålinger bortfalt.
- Høy oppboringsgrad, optimalt 62 hull på ca 85 m<sup>2</sup> tunnel, inkl. 12 hull i stuff.
- Med 14 m lang skjerm og med 8m overlapp fikk en dobbel skjerm langs hele den injiserte strekningen.
- Mikroement Ultrafin 12 med silikatilsetning (Grout aid).
- Lavt v/c-tall: varierende fra 1,1 til 0,4, vanligvis 0,9 til 0,7.
- Høyt injeksjonstrykk: Varierende 30-50 bar, max. 70 bar i sålen.

## 8

### BRAGERNESTUNNELEN, DRAMMEN

Tunnellengde	2310m totalt
Utforming	Et løp, ventilasjons og rømningstunneler, tverrsnitt 72-83m <sup>2</sup>
Drevet	1999-2001
Innlekkasje totalt	10,1 l/min/100m
Lekkasjekrav	Pe1 400-800: 30 l/min/100m Pe1 1700-1900: 30 l/min/100m Pe1 800-1700 og vent.tunnel: 10 l/min/100m
Gjennomsnittstall for sementforbruk	2257 kg/hull – 68 kg/m hull – 1125 kg/m inj.tunnel – 38 kg/m <sup>2</sup> inj.tunnel -2774 kg/time

Tabell 14: Fakta og injeksjonsdata for Bragernestunnelen.

#### 8.1

#### Kortfattet prosjektbeskrivelse

Byggherre var Statens vegvesen Buskerud (SVV-B). Bragernestunnelen i Drammen fører trafikken på Rv 134 utenom sentrum av Drammen. Tunnelen, som strekker seg fra Brakerøya i øst til Hamborgstrøm i vest, går delvis under friluftsområder på Bragernesåsen og delvis under bebygde strøk.

Bragernesåsen består av de vulkanske bergartene rombeporfyr, basalt og kvartsporfyr. Fjelloverdekningen over tunnelen er mellom 10-150 m og hovedsaklig over 100 m. Sett fra øst fordeler bergartene seg langs tunneltraséen slik; rombeporfyr først og siden basalt, deretter et avsnitt med kvartsporfyr (under tunnelen Spiralen) og til slutt igjen rombeporfyr.

Den hydrogeologiske situasjon for Bragernes-tunnelen var kjennetegnet av en til dels høypermeabel bergmasse. Men det var i forbindelse med forkastninger en hadde de største lekkasjene og tetteproblemene. Overdekningen langs tunnelen ligger i snitt på ca 100 m, men grunnvannsnivået er de fleste stedene betydelig lavere enn det. Både pga at tunnel ikke er så langt fra åssiden og at det er gamle tunneler i åsen. Det ble utarbeidet en hydrogeologisk rapport, ref. [22], i prosjekteringsfasen.

Injeksjonsarbeidene ble gjort opp etter en pris pr kg inj.middel inkl. utstyr og mannskap, dvs ferdig plassert, dessuten var det en egen pris for boring pr meter og for pr pakker. Det skulle dessuten være 1 time heft inkludert i prisen, angitt i beskrivelsen som herdetid/ventetid etter avsluttet injeksjon.

Bragernestunnelen er tatt med i FoU-prosjektet C2/C5 pga geologien og tetthetskravene. Det redegjøres for de metoder som er blitt brukt

for den rutinemessige injeksjonen og til dels de problemer en hadde med å tette en forkastningssone som gjennomskjærer bergartene langs tunneltraséen.

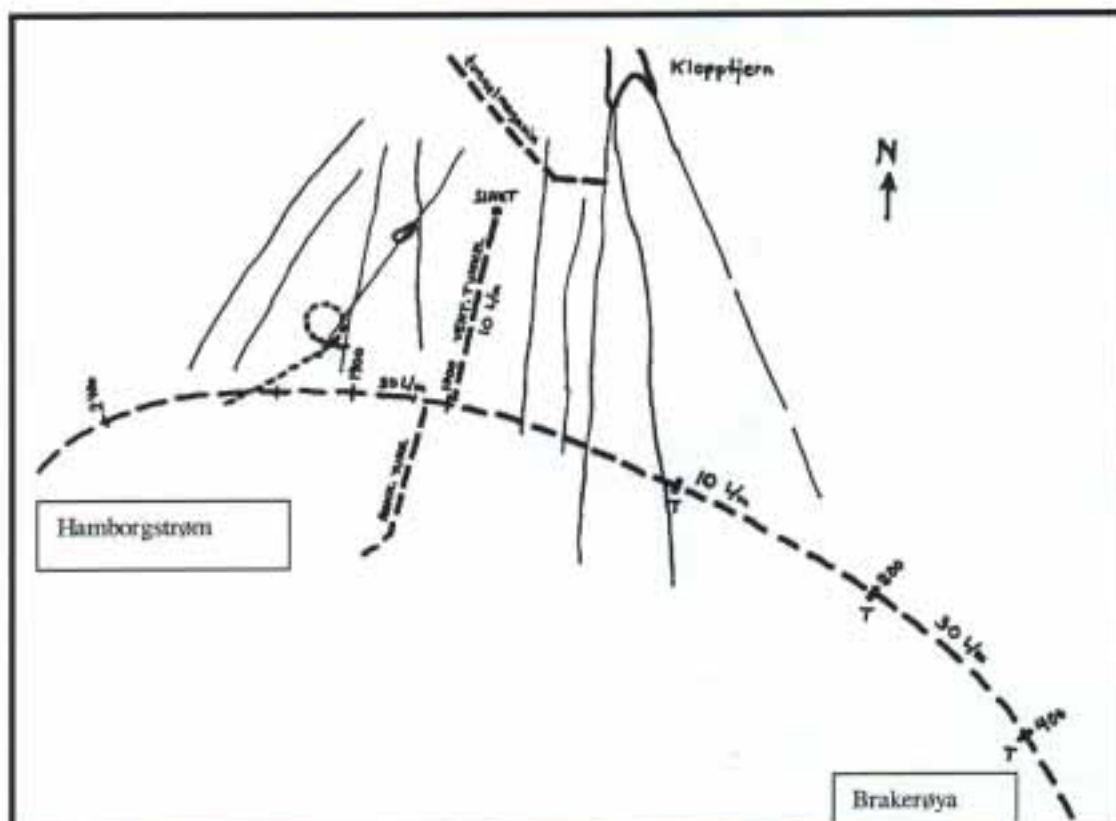
Tetthetskrav kontra lekkasjeforhold blir her beskrevet ut fra "Rapport nr. 97/98" fra Jordforsk [19] og fra informasjon innhentet fra anlegget. Injeksjonen blir rapportert ut fra informasjon innhentet dels fra byggeplassen, dels fra en planlagt intern rapport av Terje Kirkeby. Injeksjonen blir i tillegg utdypet ved intervju av nøkkelpersoner som var med på anlegget.

## 8.2

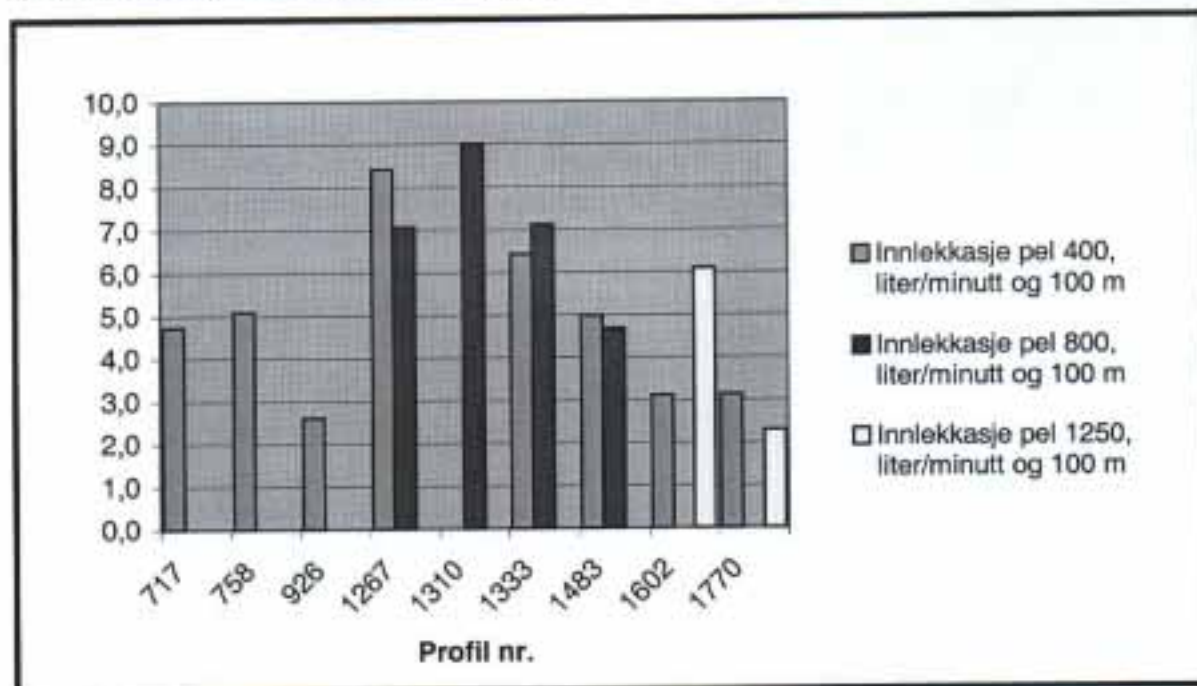
### Lekkasjeforhold og tetthetskrav

Tetthetskravene ble under prosjekteringen satt ut fra en konsekvensvurdering fra Jordforsk. Maksimal innlekkasje ble anbefalt satt til 120 l/min over en strekning på 1200 m. Fordelt over tunnelen ble det således fastsatt krav på maksimalt 10 l/min pr 100 m i området mellom pel 800-1700 samt ventilasjonstunnelen, og 30 l/min pr 100 m i områdene mellom pel 400-800 samt 1700-1900 (se Figur 2).

Innlekkasjer til tunnelen er målt en rekke ganger under drivingen og lekkasjene fordeler seg for de tre måleterklene ved pel 400, 800 og 1250 som vist i Figur 3.



Figur 2 Seksjonering av tetthetskravene for Bragemestunnelen (Terje Kirkeby)



Figur 3 Resultat av innlekkasjemålinger under driving av Bragernestunnelen

Etter gjennomslag ble innlekkasjen til tunnelen målt til 320 l/min totalt for 2300 m av hovedtunnelen, 560 m i ventilasjonstunnelen og 320 m i rømningstunnelen (dvs. ca 10,1 l/min pr 100 m). Lekkasje fordeler seg med 120 l/min mellom profil 240-1730 (topp) inklusive rømningstunnelen, og 200 l/min mellom profil 1730-2540 inklusive ventilasjonstunnelen. Hvis en beregner lekkasjene bare ut fra strekningen i hovedtunnelen gir det litt over 8 l/min pr 100 m mellom profil 240-1730 (kravet var der henholdsvis 10 og 30 l/min pr 100 m) og ca 25 l/min pr 100 mellom profil 1730-2540 (kravet var 30 l/min pr 100 m).

### 8.3

#### Rutinemessig injeksjon

I det etterfølgende gis et sammendrag av den utdypede informasjonen for de rutinemessige injeksjonsarbeidene for Bragernestunnelen innhentet ved intervjuer med Terje Kirkeby, Ingvar Tyssekvam (SVV-B) og Jo Furunes (Selmer ASA).

#### Strategi

Injeksjonsarbeidene ble utført av tunneldriverne, dvs et lag på 2-3 mann, med 1 som blander og pumper og 1-2 hjelpere som bytter slange og fyller på siloen. Det blir gjerne faste oppgaver på folkene etter hvert.

Som byggherre var SVV-B ansvarlig for prosedyrene som var fastlagt i kontrakten, en prosedyre som hovedsakelig var utarbeidet av Kirkeby i samråd med blant andre Vegdirektoratet. Det ble også foretatt studiebesøk til Baneheia- og Storhaugtunnelene. Injeksjonsopplegget ble løpende bestilt av byggherren, men

basen/formannen fra Selmer var med og vurderte situasjonen og eventuelle forandringer i opplegget.

Foruten normal kontroll under arbeidet, har byggherren regnet sekker sement og sjekket bruken av de ulike blandereseptene. En hadde ikke noen spesielle materialkontroller på sementen. Kontrollhull ble brukt når injeksjonen ikke hadde det forventede forløp ut fra, mengder, trykkoppbygning og geologiske forhold, for eksempel når en passerte soner med strenge krav til tetthet.

Entreprenøren skrev rapport på materialforbruket, forenklet til antall kg og ikke fordelt for ulike vc-tall. Hensikten var både at entreprenøren skulle få betalt for utført tetting (pr kg masse) og at byggherren skulle få dokumentert innsatsen for fremtiden. Injeksjonsarbeidene blir trolig rapportert i intern rapport for Statens vegvesen.

Injeksjonen ble delvis registrert automatisk ved hjelp av datariggen, men fremfor alt med en håndskrevet protokoll hvor mengder og trykk for hvert hull ble notert. Det ble vurdert som vanskelig å ha datariggen som basis for rapportering av materialforbruk. Den er ikke spesielt brukervennlig og heller ikke spesielt robust. Ved bytte av slange eller lignende kan informasjon gå tapt.

Erfaringstilbakeføringen i prosjektet var kontinuerlig i og med at injeksjonen ble forandret underveis, utfra geologien og erfaringer med utførelsen. Mottoet var å begynne strengt og eventuelt slakke av på opplegget etter hvert. I begynnelsen ble 21 hull à 22 m brukt for hver skjerm med 2-3 salver mellom hver skjerm, etter hvert ble det brukt bare 7 hull à 27 m og 4 salver à 5 m imellom hver skjerm.

Kartleggingen av geologien i tunnelen ble utført systematisk av Terje Kirkeby. Kartleggingen påvirket injeksjonsskjermens utforming noen ganger, men hadde ikke noen innvirkning på valg av injeksjonsmasse eller prosedyre. Det ble brukt flere hull når det var dårlig, sleppete fjell, samt når overdekning var liten og dermed lavere trykk. I utgangspunktet ble bare industrisement brukt, men litt mikrosegment ble også prøvd.

Kartlegging av fjellet i sonderhull ble ikke utført, men boreloggen påviste slepper/vann i fjellet. Kjerneboring ble ikke utført fra tunnelen, men kjerneborehull hadde blitt boret fra overflaten i prosjekteringsfasen. Ved forundersøkelsene ble svakhetssonenes beliggenhet kartlagt slik at de partiene hvor systematisk injeksjon ville være nødvendig ble bestemt. Vanlige grunnundersøkelser ble utført, vanntapsmålinger ble utført i kjerneborehullene.

Vanntapsmålinger i sonderhull skulle vært utført i toppen av ventilasjonssjakten, men det ble ikke gjort pga praktiske problemer med pakkere. Generelt ble injeksjonen planlagt ut fra målinger av utlekkasjer fra sonderhull. I kontrakten var det angitt at injeksjon skulle utføres dersom det var 5 l/min eller mer samlet fra 1-6 sonderhull.

## Injeksjonsskjerm

Til å begynne med var hullengden for sonder/kontroll- og injeksjonshull 22 m, men den ble etter hvert forlenget til 27 m for å få mer overlapp og for å få flere salver mellom hver injeksjonsrunde. Hullengden var i enkelte tilfeller nede i bare 6-7 m pga geometriske forhold. I begynnelsen omfattet vanligvis en full skjerm 21 hull og avstanden mellom hullansettene var 1,5-2 m i heng og vegger, og noe tettere i såle og vederlagene.

Når det var mye vann, ble det brukt kontrollhull. En injiserte til det var to hull på hver side av tunnelen som var konstatert tørre og når disse var injisert, kunne en gå videre med nye salver.

Hullavstanden varierte etter forholdene og etter hvert, når bare 7 hull ble brukt, økte avstanden fra ca 1,3 til ca 3,5 m i stuff og ca 2,7 m til ca 6,6 m i hullbunn. Hullene hadde 5 m avstand fra enden av hullene til tunnelveggen i heng og vegger. I sålen var stikningen nærmere 7,5 m på grunn av en 2 m dyp grøft og større salvestyrke i bunn enn i hengen.

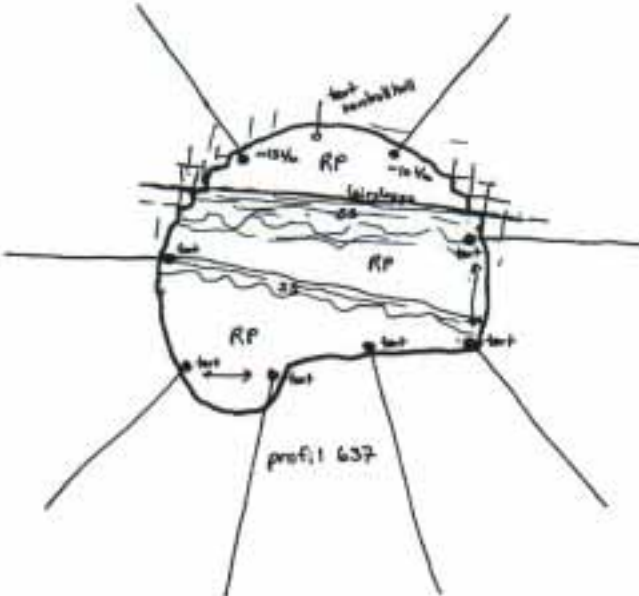
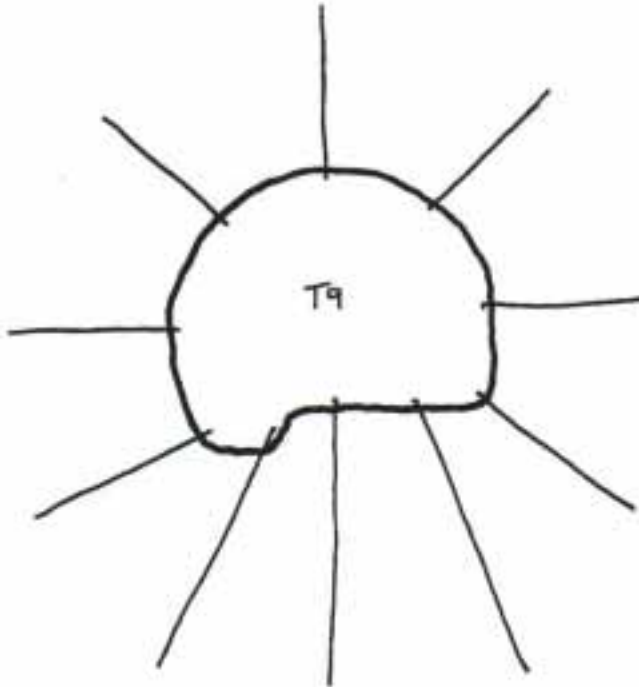
Tunnelen, som ble drevet fra øst mot vest, gikk først gjennom rombeporfyr i ca 1400 m, deretter gjennom basalt i ca 400 m, kvartsporfyrr i ca 300 m og til slutt i rombeporfyr med liten overdekning et par hundre meter. En typisk injeksjonsskjerm i den første rombeporfyren eller basalten er vist på Figur 4 på neste side. Informasjonen om utformningen av disse typiske injeksjonsskjermene, er innhentet på anlegget, ref 26.

Boreutstyret var en standard 3-boms Atlas Copco tunnelrigg utstyrt med Bever Control, noe som er viktig for nøyaktighet av borehullene. Det ble boret 51 mm hull og pakkerne var 48 mm i diameter. Boreavviksmåling ble vurdert ikke å være nødvendig siden det vanligvis var så få hull. Avviksmåling ville derfor hatt liten verdi og kostet mye. Dersom det hadde vært flere hull, hadde det vært mer aktuelt med boreavviksmåling.

Boreavvik er ganske avhengig av operatørene. Noe boreavvik må påregnes og tolereres på slike skjermene. Vanligvis legger operatøren inn korreksjon av avviket i neste skjerm. I dette tilfelle hadde hullene en tendens til å dra seg litt nedover. Dette ble korrigert.

Hullene ble rengjort for kaks med trykkluft og vann, noe som var nødvendig i denne typen bergmasse. Enten ble hullene "spylt" under boring ved at borestengene ble trukket frem og tilbake med borevannstrykk (8-10 bar) på eller så ble det brukt en egen slange til dette på stuff.

Det ble tidvis satt injeksjonshull i stuff, basert på boreoperatørens oppfatning av forholdene, på sløppemønsteret i stuffen samt erfaringer fra forrige skjermen.

	<p><b>Rombeporfyr</b> (frem til ca pel. 1420 og etter ca pel. 2200):</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• uregelmessig oppsprekking</li><li>• lite leire</li></ul> <p>Typisk injeksjonsskjerm:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• utlekkasje fra sonderhull 0-30 l/min (opp til 100 l/min)</li><li>• mer variabel / høyere inngang enn i basalten, 25-200 kg/m hull</li></ul> <p>Eksempel skjerm pel. 637:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 8 hull à 27 m</li><li>• 32710 kg sement</li></ul>
	<p><b>Basalt</b> (mellom ca pel. 1420-1890):</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 2-3 veldefinerte sprekkesett</li><li>• lite / ingen leire</li><li>• oftere hvitt sprekke materiale</li></ul> <p>Typisk injeksjonsskjerm:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• utlekkasje fra sonderhull opp til 7 l/min, mest tørt</li><li>• 7-20 tonn pr skjerm, eller 25-90 kg/m hull (med to unntak på 40 respektive 55 tonn)</li><li>• fullt sluttrykk på 90-100 bar</li><li>• 10 hull à 27 m for hver 4. salve</li></ul>

Figur 4: Typisk injeksjonsskjerm i rombeporfyr respektive basalt (Terje Kirkeby)

Injeksjonsmiddel

Injeksjonen ble utført med industrisement (Rapid fra Norcem) og med et vannsementtall på 1 til å begynne med, lavest v/c-tall var 0,5. Siden det var mye vann i bergmassen, kunne hullene "smøres" med så lavt vc-tall som 1. Litt mikrosegment (Spinor A12) ble brukt i ventilasjonssjakten. Som figurene 2 viser, kunne en i enden av tunnelen tillate enda større innganger enn før. Dette fordi betydelig mer industrisement enn mikrosegment hadde blitt brukt.



Sammenlignet med prognosene ble de totale kostnadene faktisk mindre.

Nøkkelegenskaper for sementen som kornstørrelse, viskositet, vannsementtall eller separasjonsstabilitet ble ikke kontrollert med målinger, men tilsetning av Rescon HP ble brukt (2-3 %) for å bedre separasjonsstabiliteten. Herdetiden ble heller ikke målt, men i følge den generelle beskrivelsen skulle det inkluderes 1 time heft i prisen til herde-/ventetid etter avsluttet injeksjon. I ventilasjonssjakten, hvor det var vertikal injisering og grovere hull, ble det satt 2 døgns ventetid etter injeksjon.

Hvor det var stor inngang uten trykkoppbygging, ble herdetiden satt lenger etter avtale med byggherren som da betalte heft. I praksis var det ikke noen problemer med å få nok tid til herding ettersom det var et bra samarbeid i tunnelen. Entreprenøren var som oftest ferdig med injeksjonen om kvelden og fortsatte da med arbeid som ikke innvirket på injeksjonen, for eksempel boring av salve- og boltehull.

#### Injeksjonsutstyr

Kravet i beskrivelsen var at pumpen skulle ha en trykkapasitet på minst 90 bar og en fullt ut justerbar kapasitet på minst 100 l/min ved ca 80% av maksimum tillatt trykk. På riggen var det 2 pumper (av typen Atlas injeksjonspumpe ZEB-222, Unigrout 2 Pumpac 110B22) som gikk fra 0-100 l/min og fra 4-100 bar, en silo, blandekar og vekt (vann først, SP og sist sement). Injeksjonsriggen hadde videre 1 CEMIX 402 EWB mikser (tvangsblender med pumpe i bunn) og 2 CEMAG 401 E aktivatorer slik at det kunne pumpes 2 forskjellige blandinger (forskjell i v/c-forhold). Riggen hadde 4 uttak totalt (2 pr pumpe), men det ble ikke brukt flere enn 2 slanger under injeksjonen. Trykk og inngang kunne leses av for hver slange. Det fantes en automatisk registreringsenhet (LOGAC med 4 målenheter for trykk og inngang) på riggen og injeksjonen ble dokumentert både automatisk og på tradisjonelt vis med håndskrevet skjema. Automatisk dataregistrering var ikke krav fra byggherren. Blandedelen i LOGAC-systemet var bra, men det var vanskelig å få utskrift fra dataregistreringen. Når en er i tunnelen, bør det være mulig å se på forbruk av masse og utviklingen av v/c-tallet underveis. Som dokumentasjon er totalforbruket tilstrekkelig så lenge oppfølgingen har fungert tilstrekkelig bra.

Det ble brukt engangspakker fra Codan. De blir blåst opp av injeksjonstrykket og har membran i toppen som åpner seg ved et visst trykk. En ulempe med dem er at gummimembranen ble utslitt etter lang tids injisering i et hull, dessuten var det vanskelig å bruke Muring (ble brukt iblant når det var innlekkasje i stoffen) gjennom disse pakkerne fordi de tettet seg.

Pakkerne var mekaniske med 2 m lange staver som kunne tas ut og de ble oppspent for hånd. De ble plassert ca 1,5 m in i fjellet og ble satt inn etter hvert under injeksjonen eller når en fikk gjennomgang mellom hull.

#### Planlagt utførelse

Hullene ble rengjort med spyling direkte under boringen. Generelt startet injeksjonen med 1-2 slanger i midten i sålen og deretter opp til begge sider. Ved gjennomgang til andre hull, ble pakker og slange

montert og injeksjon ble eventuelt startet opp i disse hullene samtidig for å oppnå mottrykk. Hvis det er et visst volum i fjellet som skal fylles opp og det er et visst vannsig som kan tynne ut blandingen, ble det vurdert som gunstig å kjøre på fort. Pakkere ble satt i hull hvor det var mye utlekkasje av vann, men ellers satte en pakker etter hvert som injeksjonen gikk fremover. Prosedyren var den samme uansett bergartstype.

Under injeksjonen ble først en blanding med v/c-tall 1 brukt og hvis sluttrykk ikke ble oppnådd, ble vc-tallet gradvis endret til 0,5. I begynnelsen av tunnelen ble det satt krav om at byggherren skulle varsles om inngangen i et hull oversteg 1000 kg (sluttrykket var da satt til 20-30 bar). Senere ble dette endret til at varsling skulle skje ved inngang større enn 5000 kg i et hull (da var sluttrykket 40-70 bar). Samtidig ble det sagt at når 3000 kg masse var forbrukt skulle v/c-tallet endres til 0,5.

Maksimalt injeksjonstrykk i forhold til grunnvann- og bergtrykk ble i kontrakten angitt til maksimalt 80-90 bar (målt ved pumpen) og i store deler av tunnelen ble dette eller maksimalt trykket på pumpen brukt. Trykket ble variert avhengig av fjelloverdekningen og andre forhold. Når det var 10-20 m overdekning, ble det brukt ca 30 bar og på slutten av tunnelen, når fjellet var permeabelt, ble det brukt 20 bar.

I praksis ble trykket valgt i forhold til risikoen for sementutgang, teoretisk opp til 2 ganger overdekningen og maks 80 bar. Codan testet for øvrig en ny pakker på prosjektet ved å sette manometer på stangen. Trykktapet frem til pakkeren ble målt til 10-11 bar og injeksjonstrykket ble så kalibrert etter dette.

**Endringer i utførelse** Det ble brukt den samme organisasjonen for hele tunnelen, men både byggherren og entreprenøren rådførte seg med forskjellige konsulenter og materialleverandører. Det ble ikke forandret noe på utstyret på injeksjonsriggen.

Variasjon av injeksjonstrykket var i hovedsak den hyppigste årsak til endringer i injeksjonsutførelsen. Trykket ble tilpasset terrengoverdekningen. Normalt ble trykket satt høyt, men en var også nede i trykk på bare 20 bar. Injeksjonsskjermen ble også endret både når det gjelder hullengden, fra 21 m til 27 m generelt, og antallet hull. Dette varierte mellom 21 og bare 7-8 for samme tverrsnitt.

Videre ble utførelsen tilpasset ulike forhold og vanskeligheter, for eksempel ble en større hulldimensjon brukt i ventilasjonssjakten. Stikningen ble endret i rømningstunnelen på grunn av liten inngang av masse og injeksjonstrykket ble satt lavt når en passerte Spiralen på 20 m avstand.

**Tette resultat** Stikningen var satt til 5-7 m, men inntrengningen av masse er ikke blitt kontrollert på noen spesiell måte, for eksempel med kjerneboring. Injeksjonsskjermen ble punktert av en del 4 m lange bolter og i den siste delen av tunnelen, hvor det forekom store krystallfylte hulrom, punkterte også 3 m bolter tetningsskjermen. Der fikk en også sementutgang 2-3 salver bakover fra bolter som hadde punktert

slipper over tunnelen. I havarinisjøene ble det boret for 4 m bolter. Her lekket det ganske konsekvent, muligens fordi en da var ved overgangen mellom to skjermmer.

Tetningseffekten i Bragernestunnelen er konstatert tilstrekkelig, det oppsatte kravet til innlekkasje er oppfylt generelt for tunnelsystemet og vann- og frostsikringen tar seg av punktlekkasjer. Skjermen ble punktert av 2-3 bolter på et sted under ettersikringen. Etterinjisering kan bli aktuelt på et par bolter, foruten ved kontaktstøpen i betongtunnelen. Videre viser grunnvannsbrønnene omtrent de samme nivåer som før, unntatt en brønn hvor vannivået sank 5 m fra et allerede lavt nivå på 40-50 m under terrenget.

Det ble kjørt nesten kontinuerlig injisering selv om det ikke var krav om dette, noe som fungerte bra anleggs og driftsmessig. Det var på forprosjekteringsstadiet fokusert mest på tjernene oppe på åsen, men en valgte etter hvert å tette tunnelen systematisk. Rundt pel 2000 ble det prøvd ikke å injisere, men der ble det en del lekkasje. En fikk også en del pumpeproblemer pga lekkasjevannet. Selv om tunnelen og naturen tålte det, er det bedre med en enkel systematisk injeksjonsskjerm enn stedvis injeksjon basert på utlekkasje fra sonderhull. Fordi det var mer plunder når injeksjonen ikke var systematisk. Generelt var opplegget basert på en runde massiv injisering pr skjerm, men ofte var det behov for flere runder forinjisering.

## 8.4

### Tilpasset injeksjon i utvalgte soner

Innledningsvis gis en beskrivelse av forhold som størrelse på sonen, type sone, geologiske og hydrogeologiske forhold etc. De aktuelle tetningssituasjonene deles for Bragernestunnelen inn i følgende deltemaer:

Sone med høy permeabilitet og med krav til kritisk stabilitet Det var to områder som passet til disse kriteriene. Området rundt pel 1280 og delvis de siste 300 m av tunnelen hvor det var mye lekkasjer og vanskelig å injisere fjellet.

For sonen ved ca pel 1280 ble det mellom skjermene isteden for 4 salver (like lange salver 5 m) nødvendig med flere injeksjonsrunder fra samme sted og skjermavstand 1-2 salver .

I siste delen av tunnelen var det mer omvandlet og åpent fjell med en del leire i sprekke, samt at overdekningen var mindre. Det var ikke satt noe krav til innlekkasjer i området og husene over tunnelen var fundamentert på fjell. Her var det stort forbruk og massen kan ha gått i kanaler. Hull antallet ble økt, men det ble ikke nødvendig med ekstra runder.

I det etterfølgende gis et sammendrag av den utdypede informasjonen om de tilpassede injeksjonsarbeidene for Bragernestunnelen, innhentet ved intervjuer med Terje Kirkeby, Ingvar Tyssekvam (SvB) og Jo Furunes (Selmer ASA). Samme

spørsmål som for den rutinemessige injeksjonen er blitt stilt, men bare de deler som er aktuelle for den tilpassede injeksjonen tas med her.

Strategi og forundersøkelser var naturlig nok stort sett de samme som for den rutinemessige injeksjonen, men injeksjonsskjermens utformning ble forandret ved passeringen av de aktuelle sonene. Ved ca pel 1280 ble det nødvendig med flere injeksjonsrunder fra samme sted og hullene i den første runden ble boret ytterst. I den siste delen av tunnelen, hvor bergmassen var meget permeabel, økte en antall hull.

Sperreskjermer (som ved ca pel 1280) bør bli brukt dersom sementen for lange veier eller hvis en har leirholdige soner med utgang i stoff og vanskeligheter med å få åpnet sprekkene.

Den samme riggen som for den rutinemessige injeksjonen ble brukt og hullene ble rengjort for kaks på samme måte. Uansett antall hull eller runde, r ble en jevn fordeling av borehullsendene etterstrevd. Iblant ble det satt et ekstra hull på entreprenørens eget initiativ fordi overensstemmelsen mellom registreringene på dataskjermen og hullene på stofflaten ikke var god nok.

Injeksjonsmiddelet var industrisement Rapid fra Norcem. Et v/c-tall på 1,0 ble brukt i starten av injeksjonsrunden og vanligvis ble injeksjonen avsluttet med et v/c-tall på 0,5. Hvor det var mye vann i fjellet ble det prøvd å injisere de første hullene med v/c 1,0, men om det gikk lett inn ble v/c-tallet redusert tidligere enn normalt.

I sonene ble sementens herdetid økt på grunn av mye vann i berget. I sonen ved ca pel 1280 ble ventetiden satt til 1 time, senere også utskiftet (dvs ofte 3-4 timer til). Men i de permeable siste 300 m av tunnelen ventet en ikke så lenge, fordi kravene på strekningen var mindre strenge.

Det ble ikke brukt noe annet injeksjonsutstyr enn for den rutinemessige injeksjonen. En kunne konstatere at den påkrevde kapasiteten ble oppfylt, dvs 100 l/min ved ca 80% av maksimum tillatt trykk.

Det viste seg vanskelig å injisere Mauring gjennom engangspakkeren Codan. Den gamle pakkertypen ble derfor brukt når Mauring ble brukt ved innlekkasje på stoffen. Engangspakkeren Codan blir blåst opp av injeksjonstrykket og har en membran i toppen som åpner seg ved et visst trykk, denne tetter seg gjerne ved bruk av Mauring. For å få effekt av Mauringen når en hadde problemer med utgang i stoff (og iblant lenger bakover), reduserte en ofte v/c-tall ned mot 0,5 og pumpet Mauring rett før matpausen, dette for å la hullet "hvile" slik at det kunne sette seg.

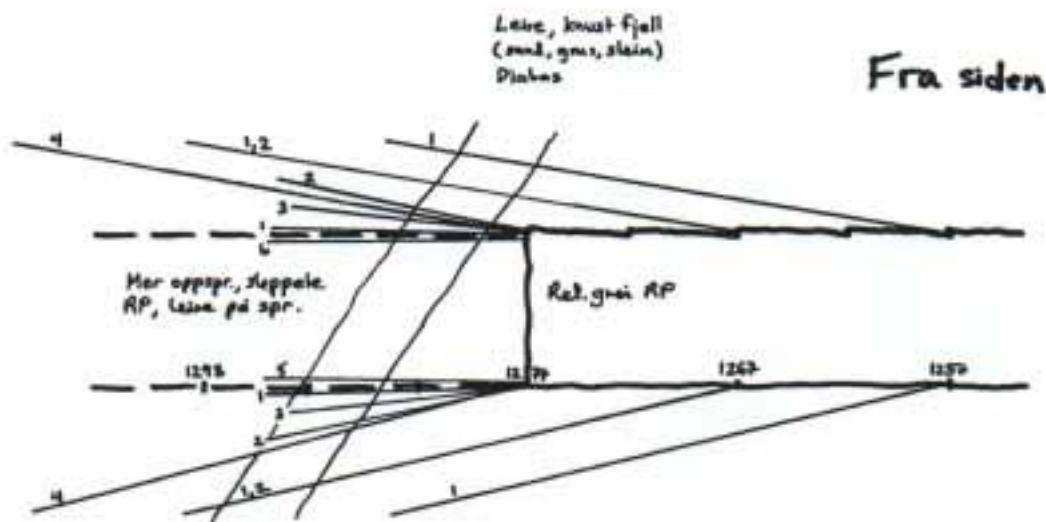
Mauring ble brukt sporadisk i forbindelse med utganger av sement, selv om det ofte ødelegger for videre injeksjon i hullet. Det kan være fornuftig å bruke Mauring på slutten av injeksjon med store innganger for å bremse forbruket, men det går også å bruke v/c-tall ned mot 0,5-0,6. For å ikke få for lang tid før blandingen pumpes inn i berget, bør

Mauringen helles forsiktig direkte i aktivatoren isteden for å blandes på vanlig måte.

Det ble fra entreprenørens side satt spørsmålsteget ved nytten av det å hvile hull, fordi det ble en del ekstra arbeid og hvis hullet hvilte for lenge kunne det bli ødelagt. Vanligvis bygger trykket seg gradvis opp mot sluttrykk, med Mauring blir kurven noe brattere. Men når et hull har hvilt seg, kan det gå veldig fort opp til sluttrykket og en vet ikke da om det bare er hullet som har tettet seg. Det avgjørende for vurderingene vil være sementmengden som har gått inn etter pausen.

Maksimalt injeksjonstrykk var vanligvis 80-90 bar, avhengig av fjelloverdekningen og hullenes mulighet til å tåle trykk. I sonen ved ca 1280 ble det brukt trykk på opp mot 90 bar, men i den andre sonen ved slutten av tunnelen og hvor fjelloverdekningen ble mindre, ble det bare brukt 20 bar. Injeksjonsrekkefølgen var generelt 1-2 slanger i sålen og en tredje slange mer tilfeldig plassert hvis det ikke var utgang mellom hull. Prosedyren var den samme uansett bergartstype.

Utførelsen av injeksjonen i de aktuelle sonene var stort sett lik den rutinemessig injeksjonen, men i større omfang. Det som var forskjellig var flere runder i 1280-sonen og lavere injeksjonstrykk i siste delen av tunnelen. I Tabell 15 spesifiseres injeksjonen av rombeporfyrsonen ved pel ca 1280, Bjerringdalsforkastningen. Beskrivelsen inkluderer en 1-rundesskjerm før og en etter det aktuelle området. Figur nedenfor viser lengdesnitt for tunnelen.



Figur 5: Bjerringdalsforkastningen i rombeporfyr i Bragernestunnelen (Terje Kirkeby).

**Tabell 15** Spesifikasjon av injeksjonen ved Bjerringdalsforkastningen i Bragemestunnelen

Skjerm	Runde no.	Antall hull	Borhulls- lengde [m]	Utlekkasje vann [l/min]	Masse pr runde [kg]	Masse pr m hull [kg/m]
Pel 1257	1	9	27-39	150	61200	224
Pel 1267	1	9	21-39	750	60000	198
	2	10	27	210	29800	110
Pel 1277	1	14	12	11	5600	33
	2	14	12	8	9600	57
	3	21	11	1	13200	57
	4	25	24	1	23900	40
Pel 1283	1	22	27	25	25200	42
	2	22	15	6	4800	15
	3	13	12	4	2400	15
Pel 1288	1	8	9	lite	-	-
Pel 1293	1	18	27	3	48000	99

Angående forbruket, var det på det meste rundt 60 tonn pr runde ved et injeksjonstrykk på 90 bar i begynnelsen av sonen ved pel ca 1280. Til sammenligning var forbruket 80 tonn ved trykk på ca 40 bar i en skjerm i 300 m-sonen. Berget i den siste del av tunnelen var veldig åpent og det var vanskelig å oppnå sluttrykk. For eksempel kunne en fylle et hull med Mauring lørdag kveld, la det hvile og gå på samme hullet igjen mandag morgen.

Det kan konkluderes med at injiseringen av sonen ved pel 1280 var tilfredsstillende. Spesialmidler kunne vært brukt dersom en hadde hatt mer erfaring med det. Likeså på de siste 300 m av tunnelen med markant mer permeabel bergmasse og meget stort forbruk, skulle en gjerne prøvd spesialmiddel for å få erfaring med det.

## 8.5

### Oppsummering og konklusjoner.

Bragemestunnelen er systematisk forinjisert i praktisk talt hele lengden. Tetthetskravet har vært differensiert over delstrekninger med hhv 10 og 30 l/min/100m. Tunnelen er drevet gjennom tildels høypermeable, flattliggende, vulkanske bergarter, bestående hovedsakelig av basalter og rombeporfyrer. Overdekning har variert fra 10 til 150 meter, men i snitt ligget rundt 100m.

Den systematiske forinjeksjonen har gitt tilfredsstillende tetthet, målt til 8l/min/100m i de kritiske og østre områder og 25 l/min/100m i de vestre, områder hvor 30l/min/100m var kravet. Hovedelementene i injeksjonsprogrammet og erfaringene kan beskrives som følger:

- Meget standardisert injeksjonsopplegg som gav høy kapasitet og tidseffektiv gjennomføring.
- Normalt bare en injeksjonsrunde som har vært en viktig målsetning.
- Få tall hull, 7-10 stk 27m lange.
- Kun utlekkasjemåling av vann fra borhull i injeksjonsskjerm.
- Industrisement med HP tilsetning.
- Lave V/C-tall, varierende mellom 1,0 og 0,5.
- Store masseinnganger pr.hull.
- Høye injeksjonstrykk, 80-90 bar sluttrykk.

To meget permeable soner ble krysset, en med stor fjelloverdekning og en med liten overdekning. Disse ble forinjisert med flere runder, inkl. en første "ytre" og deretter en "indre" skjerm. Høyt inj. trykk, 90 bar, ble anvendt ved stor fjelloverdekning (det sentrale området), 20 bar ved liten overdekning (vest). Både mauring og herdepauiser ble anvendt for å få mottrykk, begge med usikkert resultat.

## 9

### BANEHEIATUNNELNE, KRISTIANSAND

Tunnellengde	3000m totalt
Utforming	to løp og flere tilsluttende ramper, tverrsnitt 44-87m <sup>2</sup>
Drevet	1999-2001
Innlekkasje totalt	Ca 1,7 l/min/100m
Lekkasjekrav	60 l/min totalt 6-12 l/min/100m under Stampene
Gjennomsnittstall for sement forbruk	256 kg/hull – 9 kg/m hull – 514 kg/m inj.tunnel – 14 kg/m <sup>2</sup> inj.tunnel –755 kg/time

Tabell 16: Fakta og injeksjonsdata for Baneheiatunnelen

#### 9.1

#### Kortfattet prosjektbeskrivelse

Byggherre var Statens vegvesen Vest Agder (SVV-VA). Baneheiatunnelene i Kristiansand fører trafikken på E18 utenom deler av Kvadraturen i sentrum av Kristiansand. Tunnelen strekker seg under Baneheiaområdet fra Gartnerløkka til nye Oddernes bru. Tunnelen går delvis under bebygde strøk, men fremfor alt passerer tunnelen under det meget populære rekreasjonsområdet Baneheia med de tre tjernene 1., 2. og 3. Stampene.

Fjelloverdekningen varierer mellom ca 10-40 m, under Stampene er minste overdekning ca 19 m. Bergartene langs traseen er hovedsaklig gneiser med ulik mineralisk sammensetning og med varierende kvalitet, samt pegmatittganger.

Den hydrogeologiske situasjon for Baneheia-tunnelen kan kort oppsummeres i at man hadde "betydelige" vannmagasiner like over tunneltraseen. Magasiner som hadde lite tilsig og dermed veldig sårbare. Bergmassen hadde generelt lav permeabilitet og grunnvannsstrømningen foregikk utpreget langs kanaler.

Prisingen av injeksjonen var her ikke kr/kg inj.middel inkl. utstyr og mannskap, som er det vanlige. Det ble gitt en egen pris for boring pr meter, som vanlig. Det spesielle i prisingen av injeksjonen var en fast del som gjaldt maskinleie i kr/mnd for injeksjonsutrustningen i hele byggeperioden (både under drift og beredskap) og en variabel del ved injeksjon som gjaldt nødvendig mannskap i kr/time under injeksjon. Videre var det en enhetspris for forbrukt mengde i kr/kg, som skulle dekke masse, pakkere, staver, etc.

Det var ikke beskrevet herdetid etter avsluttet injeksjon ettersom det var mange stuffer å arbeide på.



I FoU-prosjektet C2/C5 er Baneheiatunnelene prioritert pga de strenge tetthetskravene som var fastsatt før byggingen startet. Nærheten til et sårbart rekreasjonsområde, det relativt tette fjellet som kan være vanskelig å injisere samt den spesielle geometrien med de mange tilsluttende rampene etc. gjorde at prosjektet ble prioritert. Det redegjøres dels for de metoder som er blitt brukt for den rutinemessige injeksjonen, dels de problemer en hadde med å tette en svakhetsone som krysset tunneltraséen.

Tetthetskrav kontra lekkasjeforhold blir her beskrevet rapportert hovedsaklig ut fra en diplomoppgave fra 2000. Injeksjonen av tunnelen blir beskrevet basert på informasjon hentet fra diverse diplomoppgaver, men utdypet gjennom intervjuer av nøkkelpersoner som var med på anlegget.

## 9.2

### Lekkasjeforhold og tetthetskrav

Tetthetskravene ble fastsatt under prosjekteringsfasen. En rapport med beregning av vannbalanse (NVK, 1999) anbefalte en øvre tålegrense på 90 l/min utlekkasje fra 3. Stampe. Basert på dette og målsettingen om ikke å påvirke grunnvannspeilet i Kvadraturen og vegetasjonen i Baneheia, ble de krav til tetthet som presenteres i Tabell 17 satt opp (Tveide, 1999).

Tabell 17: Tetthetskrav for Baneheiatunnelene

Hele tunnelsystemet (3000 m tunnel)	60 l/min totalt	2 l/min pr 100 m
Området nær Stampene (500 m tunnel)	30 l/min totalt	6 l/min pr 100 m (gjennomsnitt over 500 m-strekningen) eller 12 l/min pr 100 m (over <u>en</u> 100 m strekning)
Resterende del av tunnelsystemet (2500 m)	30 l/min totalt	6 l/min pr 100 m

Måling av innlekkasjer i tunnelen er utført etter hvert som tunnelen ble drevet. En har vært nødt til å måle total innlekkasje fremfor innlekkasje på deler av tunnelen. Dette fordi det var så mange deltunneler og fronter som ble drevet samtidig. Innlekkasjene i tunnelen ble i februar 2000 målt til 1,7 l/min pr 100 m tunnel eller litt over 50 liter for hele tunnelsystemet.

## 9.3

### Rutinemessig injeksjon

Det gis her et sammendrag av informasjonen om de rutinemessige injeksjonsarbeidene i Baneheiatunnelene, innhentet gjennom intervjuer av Egil Tveide, Stine Moksnes (SVV-VA), Magne Stedjan, Tarald Nomeland (Tunnel Support AS), Arvid Thorvik, Rune Lien og Jonny Madsen (SVV-H).

### Strategi

Injeksjonsarbeidene ble utført av stuffmannskapet. Timepris for 3 mann utgjorde en del av de variable utgiftene ved injeksjon. Laget

besto av 1 som blander og pumper og 1-2 hjelpere som bytter slanger og fyller på siloen. Tunnel Support kurset personalet på anlegget og alle andre som var involvert i injeksjon på anlegget. Her ble det blant annet fremholdt hvor viktig injeksjonen var for prosjektet.

Som byggherre var SVV-VA ansvarlig for injeksjonsprogrammet, et program basert på et forslag laget av Tunnel Support og som var lagt fast i kontrakten. Foruten arbeidsprosedyrer, har Tunnel Support hatt i oppdrag å justere opplegget når forholdene avvok fra det vanlige. Dette kunne være endret geometri eller endringer i geologien. Injeksjonen skulle ifølge kontrakten bestilles av byggherren, men som entreprenør fikk SVV-Hordaland frihet til å vurdere situasjonen og prøve seg fram. Det ble lagt vekt på at endringene de gjorde ble dokumentert og spesielt i begynnelsen var det viktig bare å endre en variabel i opplegget av gangen.

Foruten normal kontroll under arbeidet, utførte byggherren noen materialkontroller av sementens egenskaper. Kontrollhull ble boret etter hver injeksjonsomgang. I begynnelsen på samme stuff som injiseringen, men etter hvert én salve etter injeksjonsskjermen. Hensikten med å vente var å gi massen lengre tid å herde på. Som regel var massen herdet etter 6-12 timer.

Injeksjonen ble ikke dokumentert ved hjelp av datarigg, men med en håndskrevet protokoll (mengder og trykk for hvert hull). Det var laget enkle og lettfattelige kontrollskjemaer i plast og til å skrive med ble det brukt vannfast tusj (papirarbeid på stuff kan være en våt afære). Rapporten dannet grunnlag for oppgjør med entreprenøren og likeledes dokumentasjon for framtiden.

Verdifull erfaring ble vunnet ved at injeksjonen ble forandret underveis, ut fra geologien og erfaringene som ble gjort. En periode hadde en faste møter mandag ettermiddag (da et nytt skift gikk på) som også byggherren deltok i. Her gikk en gjennom eventuelle endringer i injeksjonsopplegget. Møtene førte til at det var uvanlig lite motsetninger mellom skiftene.

#### Forundersøkelser

Kartleggingen av fjellet i tunnelen ble utført systematisk av byggherrens ingeniørgeolog (Stine Moksnes), men den hadde ikke noen direkte innvirkning på injeksjonsskjermens utforming eller på valg av injeksjonsmasse.

Verken kartlegging av fjellet i sonderhull eller borkaksanalyse ble utført. I prosjekteringsfasen ble det, foruten de vanlige grunnundersøkelsene, tatt borekjerner langs deler av tunnelen. Forundersøkelsene undersøkte svakhetssonenes beliggenhet, men ga et feilaktig bilde av bergets tetthet. Geologirapporten anga et fåtall skjerner i mer oppsprukket fjell, mens det i realiteten krevdes systematisk injeksjon langs hele tunnelen.

Vanntapsmålinger ble utført i kjerneborehullene med 10 bars overtrykk (13 bar totalt). Resultatene påvirket ikke valg av injeksjonsmiddel. Det ble diskutert om ikke 10 bars overtrykk for vanntapsmåling var for lavt når en siden skulle injisere en masse som

er svært lik vann med 70 bars trykk. Kjerneboring som sondering underveis var med i beskrivelsen, men ble ikke utført.

I begynnelsen ble måling både av innlekkasje og vanntap (senere kuttet ut pga at hadde en del tørre hull med store vanntap) brukt for å bestemme omfang av tetting. Vanntapsmålingen ble utført i ca 5 hull pr skjerm (tok ca 30 min totalt) valgt ut fra utlekkasjer i sonderhull og plassering i skjermen. Systematisk vanntapsmåling for bestemmelse av Lugeonverdier ble gjort i ca 3 måneder (aug – okt -99).

Før systematisk injisering startet, ble injiseringen bestemt ut fra resultat av utlekkasje fra sonderhull og/eller vanntapsmålinger. 5-10 sonderhull skulle bores som del av injeksjonsskjermen og kriteriene for videre boring av full injeksjonsskjerm vises i Tabell 1.

Utlekkasje fra sonderhull	≥ 2 l/min fra enkelthull medførte injeksjon.	≥ 1 l/min i gjennomsnitt for alle hullene medførte injeksjon.
Vanntapsmåling i sonderhull	≥ 0,5 Lugeon for minst et hull medførte injeksjon.	≥ 0,25 Lugeon i snitt for alle hullene medførte injeksjon.

Tabell 18: Kriterier for utlekkasje fra sonderhull respektive vanntapsmåling i Baneheiatunnelen.

Denne fremgangsmåten ble brukt for å bestemme hvorvidt det skulle injiseres eller ikke. Når injeksjon ble sløyfet fordi resultatet av vanntapsmålingen tilsa det (dvs når Lugeonverdien viste at injeksjon ikke var nødvendig), ble vannet presset forbi og en fikk innlekkasjer i det uinjisererte området. Dette var årsaken til at en begynte med systematisk injisering i hele tunnelen.

## Injeksjonsskjerm

Hullengden for sonder/kontroll- og injeksjonshull var generelt 21-24 m (med avvik i spesielle tilfeller pga geometri eller ved flere runder). Med 3 salver à 5 m ble overlappen ca 9 m. Hullene hadde 6-8 m stikning fra enden av hullene til tunnelveggen i hengen og veggene. Avstanden mellom hullene var i stoffen 1,5-2 m i hengen, 1-1,5 m i sålen og ca 0,5 m nede i hjørnene. Hullene ble fordelt jevnt rundt tverrsnittet og det ble lagt vekt på å plassere hullene jevnt i hjørnene. Spesielt i begynnelsen av tunneldrivingen var lekkasjene konsentrert til ene siden av tunnelen, og da ble det prøvd å bore halve skjermene i 1. runde. Dette viste seg ikke å fungere, lekkasjene bare flyttet på seg.

Det er viktig med større oppboringsgrad jo tettere fjellet er (for å komme til det vannet en vil tette mot). Grunnet det tette fjellet i Baneheia har det blitt brukt liten avstand mellom hullene hele veien. Det ble prøvd ulike antall hull, men det optimale antall ble ca 30 hull for et tverrsnitt på 50-80 m<sup>2</sup>. Av de 30 injeksjonshull ble ca 4-7 hull boret i stoffen på grunn av det store tverrsnittet. Injeksjonshull ble satt i stoff også på tunnelstrekninger med mindre tverrsnitt. Kontrollhull ble boret etter hver injeksjonsomgang, etter hvert én salve etter injeksjonsskjermen for å gi massen lengre tid å herde på. For det meste ble det boret 6-8 hull for kontroll av tettingen, men det

ble også brukt 2 og 4 kontrollhull. Uansett ble disse siden en del av en eventuell 2. runde.

Tunnelriggen ble brukt både til salveboring og injeksjonshull. Det ble prøvd 51 og 64 mm diameter på borkronene. Fordi entreprenøren skiftet rigg tidlig i prosjektet fikk en mulighet til å øke diameteren på hullene. Den 1. riggen på anlegget var en såkalt 1. generasjons datarigg med betegnelsen AMV-3GBC-CC, mens den 2. riggen var en 3. generasjons datarigg med betegnelsen AMV-21SGBC-CC. For den sistnevnte riggen er standarden bordiameter 64 mm og 38 mm borstålstreng med T-gjenge, noe som er bra for retningsstabiliteten og nøyaktigheten. Denne ble senere byttet av praktiske årsaker. Boring for injeksjon har her vært 40 m/m tunnel og salveboring ca 120 m/m tunnel.

Riggen var utstyrt med Beaver boreregistrering og MWD (Measuring while drilling) ble brukt for injeksjonsskjermen. Boredata behandles i programvaren Rockma, som blir brukt for å tolke alle data, dette for å få et bilde av bergmasse kvaliteten en borer igjennom basert på borsynk, bormotstand og boretrykk.

Rockma er et interessant verktøy, men vurderes fortsatt å være mest av akademisk interesse. En vet ikke hvor verdifullt det kan bli, men for å få praktisk nytte på stuff må en kunne få opp bildet direkte på riggen. For å lære mer, bør en få sammenlignet resultatene fra flere prosjekter. Dessuten er det viktig at en velger en standard for software for å få best mulig spredning av teknikken.

Boreavviksmåling ble ikke utført fordi det ikke ansås å være nødvendig. Boreutstyret som blir brukt i dag gjør at boreavviket blir lite, men ansetningen av hullene er viktig for ikke å overskride det maksimale avvik på +/- 0,5 m.

Hullene ble rengjort for kaks ved spyling med vann og trykkluft. Bruk av spesialdyse ble diskutert, men ikke brukt. I tillegg ble hullene "spylt" under boring ved at borestengene ble trukket frem og tilbake med borevannstrykk på. Dette ble utført i alle typer bergarter.

#### Injeksjonsmiddel

Injeksjonen ble gjennomgående utført med mikrosegmenten Ultrafin 12 (fra Cementa) med tilsetning av GroutAid (5-15%) og Scancem SP-40 (2%). Det ble brukt en injeksjonsmasse med et vannsementtall på 0,9 til å begynne med. Dette ble redusert til 0,7 etter hvert. En del smøring av hullene og sjekk for å se om hullene tok imot masse ble gjort med et høyere vc-tall, men mannskapet syntes at med høyt vc-tall herdet ikke massen ordentlig. Thermax ble brukt, men hovedsaklig for å plugge hull etter injisering. Faren var at totalkostnaden for injeksjonen ville bli høyere på tross av en lavere pris, fordi det ville ta lengre tid. Tidskostnaden ble beregnet til ca 75% av den totale kostnaden ved injeksjonen.

Nøkkelegenskaper for sementen som kornstørrelse, viskositet eller vannsementtall ble ikke kontrollert med målinger. Separasjonsstabilitet og herdetid for injeksjonsmassen ble målt én gang for å teste hvilken innvirkning temperaturen hadde, men det ble ikke gjentatt.

GroutAid ble hele tiden brukt for å bedre separasjonsstabiliteten. Med silika blir massen seigere, men også mer stabil. Det ble stilt spørsmål ved om U12 egentlig trenger silika, men største kornstørrelsen i silika tilsvarer minste i mikrosegmenten og massen henger derfor veldig fint sammen.

I den generelle beskrivelsen var det ikke satt av tid til herding pga mange stuffer i drift. Herdingen ble sjekket ved kontrollboring (2 hull med vanntapsmåling) som ble utførte ca 1 skift eller ca 8 timer etter avsluttet injeksjon. En fikk da vanntap fordi sementen ikke var ferdigherdet. Fremgangsmåten ble derfor endret til kontrollboring etter en ny salve, men på grunn av overlappen på 8-9 m fra forrige skjerm, var tettingen av berget tilstrekkelig. Denne prosedyren ga massen lengre tid å herde på og medførte 1 skifts besparing (viktigere hvor det ikke er så mange stuffer).

#### Injeksjonsutstyr

Også injeksjonsrigger ble skiftet ut. Den 1. riggen hadde bare en pumpe og en blander, den andre hadde 2 av hver samt vekt for blandingen. Den første riggen ble isteden brukt til injeksjon av Thermax, da det var viktig å kunne gjøre den ordentlig ren etter bruk. Ideelt sett skulle en rigg i et så stort tunnelvernsnitt ha tre separate pumper for sement og en for Thermax (dersom det skulle brukes).

Kravet i beskrivelsen var en trykkapasitet på pumpen på minst 50 bar og en fullt ut justerbar kapasitet på minst 50 l/min. Pumpene av typen Atlas Craelius ZB100 hadde en trykkapasitet på 0-100 bar ved 100-0 l/min inngang og arbeidstrykket lå generelt på ca 50 bar. På rigg 2 fantes, foruten sementsilo og blandekar, en vekt hvor de ulike komponentene ble dosert (dvs. sementen, vannet og GroutAid, 2% SP40 ble tilsatt separat). Først ble vann, SP40 og GroutAid blandet ca et halv minutt, og deretter ble sementen tilsatt og blandingen ble mikset i ca 5 minutter.

Injeksjonsrigg 2 hadde 2 mikser (kolloidkvern av typen CEMIX 202) og 2 aktuatorer (av typen CEMAG 202) slik at det kunne pumpes to forskjellige blandinger (v/c-tall). Fordi det ikke trengtes mer masse, ble det bare brukt en mikser om gangen. Normalt gikk det med 7,5 tonn pr skjerm. Det tok 18-20 timer mellom sonderboring og påfølgende salveboring. Dette er fordelt med 10 timer til boring (ca 30 stk 24 m hull = 800 m) og 10 timer på injisering av disse. Kontrollboring er eksklusiv fordi dette ble utført en salve senere.

Injeksjonsrigger hadde totalt 2 uttak (én pr pumpe). Trykk og inngang kunne leses av for hver slange. Dersom det er manifold ut fra pumpen, vet en ikke hvor massen går inn dersom en ikke har registrering i samtlige utganger. Når det er flere utganger uten at en vet hvilket hull som tar mest masse, blir det dårlig kontroll med masseinngangen, og en risikerer også at massen kan herde i noen slanger mens det går mye i andre. Det var ikke noen automatisk registreringsenhet på riggen og injeksjonen ble dokumentert på tradisjonelt vis med håndskrevet skjema. I tunnelen ble data skrevet med en vannfast tusj på et plastbelagt skjema, dette ble kopiert på kontoret.

Det ble brukt 58-60 mm pakkere med engangs gummiddel og en stav som kunne brukes igjen. Det ble gjort et forsøk på å kappe toppen av gummidelen for å ta den ut å gjøre den ren, men det var da lett å miste staven (en 2 m stav koster 550,-). Egentlig settes pakkene fast for hånd. Det ble imidlertid utviklet fastsetting ved hjelp av to små jekker på et stativ. Disse ble satt over den gjengede delen av staven. Jekkene trykker det ytre røret innover og presser opp pakkens gummiddel. Den første prototypen hadde jekker på 70-80 bar, men da dette ikke var nok, måtte en gå opp til 150 bar. Videre var det en Lydecke hurtigkobling på pakkere. Pakkerne var oftest montert med 2 m (ved behov opp til 5 m) lange avtagbare staver. Pakkerne ble vanligvis plassert ca 1,5 m inn i hullet. De ble satt inn etter hvert under injeksjonen eller når en fikk gjennomgang mellom hull. Pakkerne kunne vært satt lenger inn fordi overlappen her var tilstrekkelig. Hvis fjellet tar mye masse, kan pakkene gjerne settes lenger inn slik at injeksjonsmiddelet kan herde når neste salve tas.

Generelt ble pakkene satt så langt inn at en slapp utganger på stuff.

#### Planlagt utførelse

Hullene ble rengjort ved blåsing med luft og vannspyling rett etter boringen. Generelt startet injeksjonen nederst og gikk oppover, men var det gjennomgang til andre hull, ble disse plagget med pakkere. Disse kunne ikke stå for lenge uten å bli injisert da en risikerte at hullet ble tettet. Det ble ofte satt inn pakkere i alle hullene fordi pakkene uansett stenger seg ved trykk. Prosedyren var den samme uansett bergartstype.

Mikrosegment U12 ble mest brukt. Maksimalt forbruk var 43 tonn i en skjerm og 9 tonn i gjennomsnitt pr skjerm. V/C-tallet ble endret under injeksjonens gang, fra v/c-tall 0,9 og ned til 0,7. I begynnelsen av tunneldrivingen ble det satt krav til at det ikke skulle injiseres mer enn 400 kg i et hull før byggherren skulle varsles (sluttrykket var satt til 50 bar). Thermax var med i prosedyren fra begynnelsen og ble hovedsaklig brukt som sperreskjerm. Middelet var bra å ha ved behov (fungerer stort sett som Cemsil Muring). Det skulle også brukes ved plugging av hullene, men når det er injisert mikrosegment ved 50 bar, fikk en ikke inn Thermax.

Maksimalt injeksjonstrykk i forhold til grunnvann- og bergtrykk ble i prosedyren angitt til maksimalt 50 bar (målt ved pumpen), men anvendt maksimaltrykk var 70-80 bar (eller så mye pumpen klarte). Hvis det er stor masseinnngang tar en gjerne en herdepause, men gir også en dytt på hull som har stått stille en stund, for å få i gang masseflyten igjen. Trykket var selvfølgelig avhengig av fjelloverdekningen og andre forhold.

Det ble etterstrebet jevnt trykk. Det ble brukt en dobbeltvirkende pumpe (Atlas Craelius ZB100), som gir et jevnt trykk fordi pumpen er dobbeltvirkende.

#### Endringer i utførelse

Det ble brukt den samme organisasjonen for hele byggeperioden, byggherren rådførte seg først og fremst med Tunnel Support. Tunnel Support var med mye i begynnelsen. Meningen var at de skulle gjøre seg selv overflødig etterhvert. Også entreprenøren rådførte seg med Tunnel Support i visse soner bisto de entreprenøren direkte. De

fungerte ikke som utførende og resultatansvaret lå hos entreprenøren.

Foruten byttet av injeksjonsrigg (og at rigg 1 deretter ble brukt bare til Thermax), ble det ikke forandret noe på utstyret på injeksjonsriggen.

Injeksjonsutførelsen ble endret når det gjelder injeksjonstrykket som ofte var høyere enn det angitte maksimal trykk på 50 bar. Trykket ble endret ved behov og tilpasset de geometriske forholdene (ved passering av andre anlegg etc). Injeksjonsskjermen ble endret både når det gjelder hullengden, fra 21 m til 24 m generelt, og antall hull. Hullantallet kunne også bli endret av andre grunner enn tverrsnittsforskjeller, men det var stort sett et fast opplegg med en 30-32 hulls skjerm. Ved behov ble hullene satt tettere i et område, som oftest i sålen. Generelt ble det satt ca 7 stk i stoffen. Ofte ble hullene plassert annerledes pga ujevn stoffoverflate. Det krevdes 24 m lange hull for å kunne ta en salve direkte (mer overlapp), hvis ikke måtte en vente ca 6 h mellom avsluttet injeksjon og boring av kontrollhull.

Det ble ikke endret på injeksjonsmiddelet, mikroement U12 ble brukt gjennomgående. Thermax var med i prosedyren fra begynnelsen av. En erfarte at dette hurtigherdende middel kanskje burde brukes i slutten av injeksjonen av et hull.

#### Tette resultat

Stikningen var satt til 6-8 m, men inntrengningen av injeksjonsmassen er ikke blitt kontrollert, for eksempel med kjerneboring. Det har vært en del problemer med 4 og 5 m bolter som har punktert injeksjonsskjermen, mens 3 m bolter ikke har gjort det.

Som eksempel på inntrengningsdybde, kan nevnes at i et tilfelle med ca 30 m overdekning gikk det inn ca 40 tonn i én skjerm. Dette er mye sammenlignet med resten av tunnelen hvor masseforbruket lå på 2-20 tonn pr skjerm. Det var oppsprukket fjell i dette området og ca 200-300 kg masse trengte ut etter ca 8-10 timers pumping. Injeksjonsmassen var veldig fin, tatt tiden og avstanden i betraktning.

Tetningseffekten er konstatert tilstrekkelig og det oppsatte kravet til innlekkasje er oppfylt for Baneheiatunnelene. En har ikke hatt måleterskler fordi tunnelen er drevet på synk. Når en hadde drevet 1150 m, ble det målt 1.7 l/min pr 100 m i gjennomsnitt og da en hadde drevet 2390 m, ble det målt 1.8 l/min pr 100 m i gjennomsnitt. Videre var det planlagt å måle i lavpunktet når tunneldriften ble avsluttet den 8. september, men dette ble ikke utført da den regnfulle høsten 2000 medførte at regnvann kom inn ved påhuggene.

Noen ganger ble det med flere injeksjonsomganger, for eksempel i sonen som krysser begge hovedløpene. Der ble resultatet etter 5 runder i vestgående løp (3 runder i samme sone i østgående løp) ikke vesentlig bedre. Injeksjonen ble stoppet og en salve sprengt. Når så en ny skjerm ble boret og lufttrykk satt på i hullene, gikk det ikke inn luft. Konklusjonen var at det må ha vært leire som blokkerte injiseringen. I slike tilfeller er det viktig å sette injeksjonshullene på rett sted.

Etterinjisering kan bli aktuelt ved et par bolter, men det er godt mulig at de lekkasjene vil tette seg selv etterhvert. Muligens burde en annen boltemørtel ha blitt brukt, en med litt mer ekspansjon. Etterinjisering med U12 er utført på et par steder, men det er generelt kostbart og gir liten effekt. Etterinjisering av 3-4 boltehull, av de ca 10 som lekket, tok omtrent 10 timer.

Det ble kjørt systematisk injisering i nesten hele tunnelen. Dette var ikke planlagt. I begynnelsen av tunneldrivingen ble det ikke injisert og det oppsto straks en del lekkasje. Istedenfor å måle vanntap for å bestemme omfang av injeksjon og deretter å kontrollere resultatet (spodisk injeksjon), ble det erfart at det var mye bedre å komme inn i en rutine med systematisk injisering. Det er enklere å la sonderboringen inngå i injeksjonsskjermen enn å måtte vurdere det før injeksjonen starter.

Det planlagte forbruket av injeksjonsmasse var beregnet til 180 kg/m tunnel (basert på at det ikke skulle injiseres systematisk i hele tunnelen), men det virkelige forbruket ble nesten 3 ganger så stort. Injeksjonsarbeidene har derfor kostet en del mer enn planlagt (ca 9000:-/m tunnel). Totalt sett er en likevel godt fornøyd med injiseringen, særlig med tanke på at en har unngått det kritiske scenarioet en hadde under 2. Stampe. Under 2. Stampe er det drivetverrsnitt på 105 m<sup>2</sup>, planlagt for kjemisk injisering og full utstøping. Det virker også som om sikringsomfanget (både arbeidssikring og permanent sikring) totalt sett blitt mindre pga injeksjonsinnsatsen. Dette grunnet mindre vann og fordi injeksjonen har konsolidert bergmassen. Muligens kunne det utvidede profilet under Stampene vært unngått dersom en hadde en vært tryggere på at en ville ha lykket med injiseringen.

Mhp oppfølgingen av injeksjonsarbeidene, hadde en gjerne satt en del kjerneborehull for å se på resultatet av injeksjonen og utført flere tester for å kontrollere injeksjonsmassens kvalitet.

Tidlig i prosjektet var en ofte nødt å ha to runder (pga dårligere borerigg/injeksjonsrigg, mindre erfarent mannskap, lang herdetid kontra kontroll av injeksjonen). Det er mange eksempler på hvordan injeksjonsarbeidene ble bedre under veis: 1) byttet fra 32 mm stål til 38 mm ga bedre nøyaktighet på hullene, 2) prosedyren med å ta en salve før kontrollhull ble boret sparte tid og hjalp kanskje også på herdingen av injeksjonsmiddelet (pga varme fra sprengingen), 3) pakkerdrageren som sparte både tid og krefter (blir muligens et viktig verktøy, jo fortere en oppnår mottrykk i et hull, pga oftere bytte og dermed plassering av ny pakker).

Forbruket av injeksjonsmiddel kan sammenfattes for hele tunnelen med følgende gjennomsnittstall; 256 kg/hull, 9 kg/m hull, 514 kg/m injisert tunnel eller 14 kg/m<sup>2</sup> injisert tunnel, og 755 kg/time. Grunnlaget for disse tall er basert på byggherrens sammenstilling over forbrukte mengder i tunnelen og på resultater fra diplomoppgaven til Hellerslien, ref. 46. Det samme gjelder tabellen nedenfor hvor det gjennomsnittelige forbruket av masse er fordelt for de fire tunneldelene B1000 og B1100 (dvs hovedløpene, ca 93 m<sup>2</sup> tverrsnitt, orientert vinkelrett på sprekkeretningen), samt B2200 og



B2800 (dvs ansluttende løp, ca 69 m<sup>2</sup> tverrsnitt, orientert parallelt sprekkeretningen).

Til forskjell fra resultatene i ref.46, er de angitte verdiene inklusive massen for fylling av hullene (dette for å kunne sammenligne med øvrige tunneler presentert i denne rapporten). Likeså er det her ikke tatt hensyn til at injeksjon ble utført i tunneldeler med utvidet profil pga svinger, svinn etc. Ettersom beregnet hullfylling utgjør mellom 30-55% av masseforbruket i de studerte tunneldelene, resulterer dette i at forbruket i blir betydelig større enn i 46. En annen faktor er at forbruket her er angitt pr meter injisert tunnel og ikke mht skjerm lengden (overlappen gjør at forbruket divideres med for mange meter).

Tunnel	Hull pr skjerm	Masse pr skjerm (kg)	Masse pr hull (kg)	Masse pr m hull (kg)	Masse pr m tunnel (kg)	Masse pr m <sup>2</sup> tunnel (kg)	Masse pr time (kg)
B1000, hovedløp, ⊥	33	9687	311	9,5	629	16,5	850
B1100, hovedløp, ⊥	27	7687	283	10,5	601	15,8	834
B2200, hovedløp, //	28	5530	193	7,0	395	11,0	800
B2800, hovedløp, //	26	6140	236	9,0	432	13,5	536

Tabell 19: Masseforbruk [kg] for injeksjonen i Baneheiatunnelene

Forklaringen til forskjellen i kapasitet for tunnel B2800 (536 kg/time mot ca 825 kg/time) for de øvrige ligger sannsynligvis i at den tunnelen var den første som ble drevet. Kapasiteten ble for øvrig også studert i hovedoppgaven til Prestegaard, Staavi og Sæverås [40]. Variasjonen angis som større enn forventet (ca 4-21 timer og ca 1000-12000 kg/skjerm) og i en kortfattet oversikt med gjennomsnittstall, angis tiden for å injisere totalt 6305 kg i en 26-hullsskjerm til 11 timer (dvs 573 kg/time). At denne verdi sammenfaller så bra med tunnel B2800, skyldes at dataene ikke var fullstendige (hovedoppgaven var ferdig ca ett år før injeksjonsarbeidene).

#### 9.4

#### Tilpasset injeksjon i utvalgte soner

Innledningsvis gis en beskrivelse av forhold som størrelse på sonen, type sone, geologiske og hydrogeologiske forhold etc. De aktuelle tetningssituasjonene deles for Baneheiatunnelene inn i følgende deltemaer:

Lavpermeabel bergmasse og meget høyt krav til tetthet for del av tunnel  
 Vanntapsmålinger i de 200 m lange kjerneborehullene som ble boret som del av grunnundersøkelsene i prosjekteringsfasen viste lave Lugeonverdier (måleseksjonene i hullene var 3-4 m og høyeste verdien er angitt for vanntapsmålingene). Testene indikerte altså lavpermeabel bergmasse, men permeabiliteten var også fordelt

jevnt langs hullene og ikke konsentrert så mye i soner. På grunn av den lavpermeable bergmassen har en hele veien vært nødt til å ha høy oppboringsgrad (ca 30 hull for et tverrsnitt på ca 50-80 m<sup>2</sup>), og generelt har Ultrafin 12 med tilsetning av SP40 og GroutAid blitt anvendt.

Sone med varierende permeabilitet og krav til kritisk stabilitet Det var mye lekkasjer og vanskelig å injisere særlig sonen ved pel 3619 i tunnel B1000 hvor 6-7 runder med sementinjeksjon ble utført. Det fantes også et par andre soner som lignet denne, men hvor tettingen ble utført med en runde. Faktisk ble ca 95% av all tetting i tunnelen utført med standardutførelse og bare én runde. Generelt satset en altså på å lykkes på første forsøk og satte ved behov flere hull enn vanlig, hadde lengre overlapp, slik at injeksjonen ble utført grundig med en gang.

Liten fjelloverdekning, evt. med fare for senkning av overliggende grunnvannsnivå i løsmasser Det var ca 18 m fjell overdekning i Stampene og et par andre steder var det mindre overdekning, men det var ingen direkte problemer med å passere. Kun tilpasninger av skjermgeometrien og injeksjonsutførelsen ble gjennomført.

To parallelle tunneløp eller passering over / under / nær andre fjellanlegg Tunnelen hadde to parallelle hovedløp og i utgangspunktet ville en at tunneløpene skulle ha lik fremdrift. Det viste seg ikke å være en effektiv målsetting. Det viste seg å være større problemer når løpene var i fase. Dels kom det da inn masse i tunnel nummer 2 fra tunnel nummer 1, dels kom det inn masse fra tunnel no. 2 i en tverrtunnel.

Foruten at en fikk lite gjennomgang mellom løpene når det ble litt avstand mellom tunnelstoffene, gikk det inn mindre masse og det var også mindre lekkasjer i løpet som kom etter. Avstanden mellom tunneløpene varierte mellom 4-22 m. Injiseringen ble ikke tilpasset at det var to løp, men det ble muligens noe mindre masseforbruk i tunneløp 2 (se Hellersliens diplomoppgave). Det virker som om det er en fordel med 50 m differanse mellom stoffene, og at en da kunne stole på den skjermen en hadde injisert fra løp 1 og hadde en barriere i fjellet å pumpe mot i tunneløp 2.

Baneheiatunnelene passerte også nære flere andre fjellanlegg. Når injeksjon ble utført nær et av anleggene, ble trykket begrenset til 20 bar og en hadde kontrollører inne i anlegget for å sjekke. Ved tetting av et hull for avstandkontroll mellom eksisterende tunnel på E18 og tunnelen løsnet pakkeren og 130 biler ble oversprøytet med injeksjonsmiddel.

I det følgende gis et sammendrag av den utdypede informasjonen vedrørende de tilpassede injeksjonsarbeidene i Baneheiatunnelene. Disse ble innhentet ved intervjuer med Egil Tveide, Stine Moksnes (SVV-VA), Magne Stedjan, Tarald Nomeland (Tunnel Support AS), Arvid Thorvik, Rune Lien og Jonny Madsen (SVV-H). Samme spørsmål som for den rutinemessige injeksjonen er blitt besvart, men bare de deler som er aktuelle for den tilpassede injeksjonen tas med her.

- Organisering** Både strategi og forundersøkelser var naturlig nok stort sett de samme som for den rutinemessige injeksjonen. Som tidligere nevnt hadde Tunnel Support i oppdrag av entreprenøren om å være med på stuff og hjelpe med å styre injeksjonen i visse soner. At entreprenøren, SVV-Hordaland, søkte dialog på tross av at de fikk frie hender til selv å styre injeksjonsarbeidene, ble oppfattet som et bra initiativ. Tunnel Support hadde ikke noe formelt ansvar for utførelsen. Dette lå hele tiden på entreprenøren.
- Injeksjonsutstyr** Det ble brukt den samme riggen som for den rutinemessige injiseringen og hullene ble rengjort for kaks på samme måte. Uansett antallet hull eller runder, ble det etterstrevd en jevn fordeling i enden av borehullene.
- Injeksjonsskjerm** Injeksjonsskjermens geometri ble spesielt tilpasset ved rampene og ved passering av noen svakhetssoner ble det brukt flere runder på samme skjerm. Et eksempel på en slik sone er ved pel 3619 i den vestgående tunnelen (hovedløp B1000) og pel 3568 i den østgående tunnelen (hovedløp B1100), hvor det ble nødvendig med flere injeksjonsrunder fra samme sted (se ). Ved pel 3619 ble hullengden kortet inn for hver runde for å få lokalisert lekkasjene som så ut til å flytte på seg. Hullavstanden ble også gjort mindre etter hvert (ned til noen titalls centimeter). Antallet injeksjonshull i stoffen (4-7 hull) ble ikke forandret noe særlig ved kryssende tunneler, mindre tverrsnitt eller vanskeligere soner.
- Injeksjonsmiddel** Injeksjonen ble også i sonene utført med mikrosementen Ultrafin 12 (fra Cementa) med tilsetning av GroutAid og SP-40, v/c-tallet var alltid på 0,9 til å begynne med. Videre ble det brukt Thermax for å få mottrykk og redusere herdetiden på mikrosementen, som ble lengre på grunn av mye vann i fjellet i sonene.
- Det ble gitt flere tolkinger av flerrundeskjermen i svakhetssonen ved pel 3619 i tunnel B1000. En mulig årsak til det store antallet runder var ifølge byggherren at Thermax var blitt brukt allerede i runde nr 2. På tross av at en i de påfølgende rundene fikk mottrykk og stopp, fikk en vann ved kontrollboring. Den hurtigherdende Thermax'en hadde trolig blokkert deler av sonen for videre sementinjeksjon og for å nå alle deler måtte ekstra tett boring til. Andre aktører mente at i denne sonen hvor mer sonering og overlapp ble brukt (kun en salve pr skjerm en strekning), var det snarere leire som var problemet.
- Det ble altså brukt flere runder forinjisering i sonen som krysser hovedløpene, men fordi resultatet etter 5 runder i vestgående løp (3 runder på samme sonen i østgående løp) ikke ble vesentlig bedre, stoppet en injeksjonen, sprengte en salve, boret en ny skjerm og satte lufttrykk i hullene. Nå gikk det ikke inn noen luft heller. Det ble derfor konkludert med at det må ha vært leire som blokkerte injiseringen, men opprettholdt lekkasje-kanalene for vann. Det ble påpekt hvor avgjørende det er å finne de eksakte lekkasjestedene, og en oppnådde samme resultatet i det andre løpet med færre runder.
- Videre ble det sagt at uansett om en hadde brukt U12 eller som nå Thermax, ville den 1. runden tettet de største lekkasjene, hvoretter en

fikk sperret/blokkert for tetting av de mindre. Siden en fikk vannet for nær stoffen og det ville vært fare med å ta en salve til, burde en isteden forsøkt å injisere mer jomfrulig berg. Med en c/c-avstand på bare 40 cm og inngang av sement, fikk en ikke sement over til det neste hullet selv om en kunne se pumpeslagene i det rene vannet som lekket ut av hullet (formidlet av leiren). Det kunne ha vært bedre å boret en skjerm lenger bak og lenger ut, men det ble ikke prøvd. Hvis en hadde tatt en sperreskjerm én skjerm lengde ved pel 3619 i tunnel B1000, hadde det gitt bedre kontroll på den videre injeksjonen i sonen.

Slike sperreskjermer bør settes dersom sementen synes å bre seg lange veier, eller hvis en har leirholdige soner med utgang i stoff og vanskeligheter med å få åpnet sprekken. Vanligvis blir vannet presset vekk og en får bra herding, men i leire er det annerledes fordi sementen går i kanaler.

**Injeksjonsutførelse**

Maksimalt injeksjonstrykk var angitt til 50 bar, men ofte var en oppe i 70-80 bar, avhengig av overdekning og geometri. Også i sonen ved pel 3619 i B1000 ble det brukt rundt 50 bar, men i nærheten av andre tunnelanlegg ble det lavest brukte trykk 25-30 bar. Når bare 25 bar blir brukt, er det omtrent det som skal til for å få inn materiale i hullet, fordi en kan ha et tap på kanskje 10-15 bar frem til pakken. Injeksjonsrekkefølgen var generelt at en startet nede i profilet og gikk oppover hvis det ikke var gjennomgang mellom hull. Prosedyren var den samme uansett bergartstype.

Utførelsen av injeksjonen i svakhetssonene var stort sett den samme som for rutinemessig injisering, bare i større omfang. Det ble brukt flere runder i sonen ved pel 3619 i den vestgående tunnelen (hovedløp B1000) og pel 3568 i den østgående tunnelen (hovedløp B1100). Tabellene nedenfor beskriver injeksjonen av denne sonen basert på byggherrens sammenstilling over forbrukte mengder i tunnelen. Beskrivelsen inkluderer en 1-rundesskjerm før og en etter de aktuelle områdene.

Skjerm i B1000	Runde nummer	Antall hull	Borhullslengde [m]	Masse pr runde [kg]	Tid pr runde [h]	Masse pr m hull [kg/m]	Masse pr time [kg/h]
Pel. 3624	1	46	24	12000	4,5	10,9	2667
Pel. 3619	1*	34	17	9200	14	15,9	657
	2	42	14	3000	8	5,1	588
	3	37	14	5200	4	10,0	1300
	4	4+20	8+11	2600	6	10,3	433
	5	8	15	1400	6	11,7	233
	6	-	-	1200	5,5	-	218
Pel. 3609	1	40	21	6000	9	7,1	667

*Tabell 20: Spesifikasjon av injeksjonen ved svakhetssonen i Baneheiatunnelene, B1000*

\* Injeksjonen ble utført med Thermax under ledelse av Tunnelsupport AS.

Skjerm i B1100	Runde nummer	Antall hull	Borhulls-lengde [m]	Masse pr runde [kg]	Tid pr runde [h]	Masse pr m hull [kg/m]	Masse pr time [kg/h]
Pel. 3590	1	31	21	5900	11	9,1	536
Pel. 3578	1	31	21	9500	9,5	14,6	655
	2	-	-	2400	4	-	600
Pel. 3568	1	31	21	11800	14	18,1	843
	2	10	8	500	-	6,3	-
Pel. 3558	1	31	24	6700	6,5	9,0	1031
	2	24	21	4400	6	8,7	733
	3	-	-	4900	8	-	613
	4	24	15	3700	10	10,3	370
Pel. 3543	1	34	24	11700	11	14,3	1064

Tabell 21: Spesifikasjon av injeksjonen ved svakhetssonen i Baneheiatunnelene, B1100

Når det gjelder forbruket i denne sonen som krysser begge hovedløpene, kan det noteres at det gjennomsnittelige forbruket var 9,5 kg/m hull og 850 kg/time i tunnel B1000 mot 10,5 kg/m hull og 834 kg/time i tunnel B1100. Byggherren konkluderte med at injiseringen av sonen ved pel. 3619 i B1000 muligens kunne blitt gjort uten Thermax, fordi resultatet var stort sett likt etter 3. runde som etter siste runden.

## 9.5

### Oppsummering og konklusjoner:

Baneheiatunnelene ble systematisk forinjisert i 95% av total lengde. Det ble tidlig erfart at sporadisk injisering basert på sonderhull ga for dårlig tetthet. Tetthetskravet var differensiert på delstrekninger med variasjon mellom 2 og 6l/min/100m tunneløp. Tunneldriften har passert gjennom hovedsakelig lavpermeable gneiser og pegmatitter. Overdekning varierer fra 18 til 40 m. Forinjiseringen har gitt tilfredsstillende resultater, med målt total innlekkasje på 1,7 l/min/100m i februar 2000. Ingen måleterskler ble bygd. Hovedelementene i injeksjonsprogrammet og erfaringene kan beskrives ved følgende:

- Standardisert injeksjonsopplegg som gav høy kapasitet og ble tilpasset øvrig driftssyklus.
- Målsetningen har vært å oppnå god nok tetthet på en runde.
- Høy oppboringsgrad, 30 hull/skjerm, lengde 21-24m. Inkludert 4-7 hull i stuff.
- Vanntapsmåling bortfalt underveis.
- Kontrollhull etter en salve.

- Mikroement Ultrafin 12 med Grout Aid og SP-tilsetning.
- Høyt injeksjonstrykk, varierende, men maksimalt 50-80 bar.
- Lavt v/c-tall: Varierende mellom 0,9 til 0,7.

Ved noen få høypermeable soner ble flere runder, inkl. "ytre og indre" skjerm anvendt. Delvis også sperreskjerm (ytre skjerm) med Themax.

Lavere trykk anvendt ved passering under Stampene med liten (18m) overdekning. Ingen problemer. Små problemer med injisering i to parallelle løp. Muligens gunstig med forskjøvne stuffer, og tilsynelatende lavere inngang på løp 2.

## 10 SAMMENSTILLING ERFARINGSUNDERSØKELSE

**Intervjuundersøkelse** Det er samlet inn data og erfaringer fra seks forskjellige tunnelanlegg i Norge og Sverige, anlegg som er bygget i perioden 1994-2001. Informasjon angående erfaringer er innhentet gjennom intervjuer av nøkkelpersonell på anleggene, data er hentet fra dokumentasjonsmateriale på anleggene og rapporter skrevet i forbindelse med studentoppgaver og lignende. Tunnelene som er med i studien er: Tåsen (Oslo), Svartdal (Oslo), Lundby (Gøteborg), Storhaug (Stavanger), Baneheia (Kristiansand) og Bragernes (Drammen). Selv om alle tunnelene er veitunneler er forholdene ellers varierte mhp berggrunn, overdekning, krav til tetthet, bakgrunn for krav og suksess med tetting.

### 10.1 Bergmasse

I undersøkelsen er det med anlegg hvor bergartstypen er metamorf, eruptiv og sedimentær. Bergmassen er generelt middels til god med soner hvor berget er vesentlig dårligere.

Geohydrologiske situasjonen for de forskjellige anleggene varierer fra veldig tette bergarter (fyllitt, Storhaug) til høy permeable (eruptivbergarter, Bragernes). Grunnvannsnivået over tunnelene varierer fra 0 til ca 100 meter og strømningssituasjonene spenner seg fra stillestående grunnvann (Storhaug, Lundby) til tunneler i skrånende terreng (Svartdal, Bragernes, Tåsen) hvor grunnvannsstrømningen er en faktor som spiller inn.

### 10.2 Tettekrav

Tettekravene er for de fleste tilfellene gitt som liter pr min pr 100 meter eller for en strekning. Kravene varierer fra 0,5 til 30 l/min/100m. Bakgrunnen for kravene varierer sterkt, fra selvpålagte uten bakgrunn i forundersøkelser eller behov til krav basert på omfattende grunnundersøkelser, kartlegging av problemområder og strekningsvise behov. For de fleste prosjektene savnes det en kritisk gjennomgang av tettekravene og om tetteinnsatsen gjort samsvarte med kravene satt.

### 10.3 Injeksjonstrategi / tettekonsept

**Systematisk/sporadisk** Et klart funn i undersøkelsen er at på anlegg hvor det stilles moderate krav til tetthet er det ikke tilstrekkelig å basere injeksjonen eller ikke injeksjon på lekkasjemålinger fra et begrenset antall sonderborhull. Det er også fremhevet at en får en mer velsmurt drift ved å kjøre et systematisk injeksjonsopplegg. Dessuten unngår en at lekkasjen flytter seg til uninjserte områder.

**Mannskap** På de fleste anleggene er det stort sett brukt det ordinære stufflaget til injeksjonsarbeidene. På Tåsentunnelen hadde man en spesialformann ved injeksjonsarbeidene og ved Lundbytunnelen

hadde entreprenøren egne mannskaper til injeksjon. Den helt store forskjellen kan en ikke se at det utgjør om mannskapene er spesialisert eller ei, da ser det heller ut til at byggherrens organisering, bemanning og fokus har større betydning for resultatet.

#### Kontrakt/oppgjør

Det er tydelig skille mellom to typer oppgjør for injeksjonsarbeidene. Den ene oppgjørsformen baserer seg på at entreprenøren får gjort opp ut fra utførte mengder (antall bormeter og kg injisert materiale). Den andre oppgjørsformen er basert på at entreprenøren får betalt for å ha utstyret stående i beredskap og i tillegg kommer utførte mengder av fysisk plasserte mengder og timeforbruk. Når målsetting for tunnelinjeksjon er å drive en størst mulig tunnallengde med tilstrekkelig tetthet på kortest mulig tid gir de to oppgjørsfilosofiene seg forskjellig utslag. Den første oppgjørsformen medfører vanligvis at entreprenøren er mest interessert i å gjøre minst mulig injeksjon, den andre oppgjørsformen virker det som om tidspresset er noe mindre.

Det er derfor svært viktig at injeksjonsdelen av tunnelkontrakten er utarbeidet med kravet til tetthet for øye. For at kontrakten skal kunne settes opp på et så sikkert grunnlag som mulig, må alle grunnundersøkelsesresultater legges frem. I Norge har det vært en stor grad av risikodeling når det gjelder usikkerheter i forbindelse med driving av et underjordsanlegg. Dette bør også ligge som basis når det gjelder injeksjonsdelen av en tunnelkontrakt. Byggherren bør normalt ta ansvaret for de geologiske forhold, mens entreprenørens risiko ligger i å utføre anlegget i henhold til oppsatte tetthetskriterier til avtalt tid og kostnader ut fra de geologiske forhold.

For at entreprenør og byggherre skal ha en felles målsetting om å gjøre arbeidene så raskt som mulig og til riktig kvalitet, bør kontrakten inneholde en bonusordning for entreprenøren. Ved systematisk forinjeksjon bør prisnivået for injeksjonsarbeidene balansere med prisnivået for tunneldrivingen. Ved driving av tunneler i tettbygde områder vil det ut fra miljøhensyn som regel legges tidsmessige restriksjoner på de enkelte tunnelaktiviteter. Dette kan medføre tidsmessig ugunstig fremdrift. Derfor må de tekniske spesifikasjoner være tilstrekkelig fleksible slik at driftsopplegget kan tilpasses den aktuelle situasjon.

## 10.4

### Injeksjonsutstyr

#### Pumper/ blander/ aktivator

Det har vært en stor utvikling av utstyret mhp dataregistrering av injiserte mengder, injeksjonstrykk og mer datastyrt blande prosesser. Det er dessuten kommet inn mer bulk håndtering av sementen og tilsetningsstoffer. Det er derfor ikke håndtering av sementen som er den begrensende faktor lenger, det ser ut til at kapasitet på blander og aktivatorer er de faktorene som er begrensningene i forhold til produksjon av injeksjonsmasse.

#### Pakkere

På mange av anleggene har lekkasjer rundt pakkene vært et problem uten at det ser ut til at noen har funnet noen fullgod løsning på det.



På Baneheia utviklet man et system hvor man brukte jekker til å stramme til pakkerne, et system som fungerte bra.

På Bragernes ble det prøvd en ny pakkertype. Den fungerte bra bortsett fra at den hadde en tendens til å tette seg når en brukte mauring.

Manifold Har vært krevd i enkelte kontrakter, men på de norske anleggene har det ikke vært brukt, henger det sammen med erfaringer med "gammeldags" injeksjonsmateriale?

## 10.5 Injeksjonsskjerm

Injeksjonsskjermens utforming varierte mye både mhp lengde av hull, antall hull og stikning. Hulllengdene varierte fra 6 til 30 m, med en klar tendens til at de tunnelene hvor kravene til tetthet var størst var hulllengden minst (10-17 m) der var også antall hull størst (30-70). De aller korteste hullene ble brukt når man hadde problemer med utganger på stoff. Antall hull varierte fra 15-70 stk. Et av anleggene (Lundby) kjørte stort sett to runder på alle skjermene.

Injeksjonshull i stoff To av anleggene injiserte konsekvent gjennom hull satt i stoffen, antallet varierte noe (4-12). Dette kan virke å ha fungert bra og er uansett en billig forsikring for å unngå at lekkasjen kommer på i fronten, noe som sannsynligvis er mer aktuelt desto større tunneltverrsnittet er.

Stikning Stikningen varierte fra 2 til 8 meter, men når det var mindre enn 4 m var det pga liten bergoverdekning, ellers varierte det mellom 4 og 8 m med en hovedtyngde på 5 m. Enkelte anlegg har brukt større stikning i såle fordi der blir fjellet mer oppknuet av salvesprengningen og pga grøfter. Det er også en tendens (ved sporadisk) til at man borer tettere der en ser lekkasjen og dermed kan det bli lagt mindre vekt på såle injeksjonen.

Overlapp Overlappen ligger vanligvis på to til tre salvelengder (6-10 m). Det er registrert lekkasjer som tilbakeføres til at tettingen i overlappen ikke var god nok, det gjelder først og fremst de lengste skjermene.

På de prosjektene hvor fjellet har vært forholdsvis tett er det erfart at man må ha en høy oppboringsgrad for å treffe de vannførende kanalene

## 10.6 Injeksjonsmiddel

Tilsetningsstoffer For sement basert injeksjonsmasse har det vært en betydelig utvikling/endring i bruken av tilsetningsstoffer. Ved tilsetning av plastiserende stoffer og mikrosilika (Grout Aid) har en oppnådd en mye bedre masse mhp seperasjonsstabilitet og viskositet. Noe som har medført at pumpekapasiteten har økt og ikke minst problemene med at injeksjonsmassen tetter slangene har blitt redusert.

Industri-/mikrosement Det er sementbaserte injeksjonsmiddel som hovedsakelig blir brukt. Det er tre av anleggene som har brukt industrisement og tre som har brukt mikrosement, hvor det er en klar sammenheng til hvilke krav

som er stilt til tetthet (høyt krav-mikro). Det har vært prøvd noe mikroement på noen av anleggene med moderate/lave krav til tetthet. Der har man hatt blandede erfaring med mikroementen, flere problemer med slanger som går tett og det har vært følt at herdingen/størkingen har vært dårligere.

**Bentonitt** Bentonitt tilsetning har vært brukt på Lundbytunnelen og erfaringene var heller dårlige og det var først og fremst filtreringsstabiliteten det gikk ut over.

**"Kjemiske"** "Kjemiske" injeksjonsmiddel har vært forholdsvis lite brukt, i Lundby tunnelen har det vært brukt en del i forbindelse med etterinjeksjon. Ellers har "kjemiske" injeksjonsmiddel vært brukt når en har utganger på stoff, tetting rundt pakkere eller til plugging av hull.

## 10.7 Injeksjonutførelse

**V/C-tall** V/C-tallet som blir brukt varierer fra 3 til 0,5 (Norge 2,0-0,5) og det er en klar tendens til at det brukes lavere og lavere v/c-tall. Det er mindre snakk om smøring av berget/sprekkene slik det var tidligere, men det er fortsatt slik at en begynner med et høyt v/c-tall (1-1,5) for etter hvert å gå over til lavere v/c-tall (0,5). Det kan diskuteres om enn ikke oftere burde begynne direkte med lave v/c-tall.

**Antall slanger** Injeksjonen starter alltid etter at man er ferdig med boringen av sonder/injeksjon/kontrollhullene. Det er dessuten sjelden/aldri injisert i mer enn 3 slanger samtidig. Det vanligste er å bruke en slange pr pumpe eller aktivator (blanding) dvs 2 slanger. Flere av kontraktene hadde krav til flerhullsutstyr.

**Pakkerplassering** Pakkerne ble nesten uten unntak plassert fra 1 til 3 m inn i hullet. På de fleste anleggene startet man injeksjonen nede i sålen og gikk oppover etter hvert som man fikk etablert det mottrykket som var stoppkriteriet. Dersom det var gjennomgang til andre hull satte man pakkere der og fortsatte injeksjonen der. Lundby tunnelen skilte seg der ut ved at der foretok man vanntapsmålinger i alle hull og startet injeksjonen i de hullene som hadde størst vanntap.

**Injeksjonstrykk** Injeksjonstrykket varierte selvfølgelig etter overdekning. Men det er også en klar tendens til at en bruker stadig høyere trykk i forhold til overdekningen. Maksimale trykket brukt var 90 bar.

Injeksjonshull som ligger på synk vil ofte være vannfylte og det er ikke vanlig at de blir tømt for vann før de injiseres. Hvor berget i utgangspunktet er tett kan det medføre at vannet kan danne en vannlomme som først blir punktert når tunnelen blir drevet forbi.

## 10.8 Injeksjonskontroll/ Dokumentasjon

**Lekkasjekriterie** Vanntapsmålinger er ofte med i kontrakten, men er blitt tidlig forlatt eller ikke gjennomført i det hele tatt. Unntaket er Lundbytunnelen hvor vanntap ble målt i alle hull. Utelatelse av vanntapsmålinger blir begrunnet med at man ikke ser noen sammenheng mellom vanntapsmålingene og injisert mengde. På de fleste anleggene blir

	utlekkasjen fra injeksjons-/ sonder-/kontrollhull registrert, i hvert fall verbalt (drypp, rinnende, strømmende).
Boravviksmåling	Boravviksmålinger var med i alle kontraktene og det settes krav til maksimalt boravvik. Avviksmåling ble bare utført i Lundbytunnelen, hvor hele 20% av borehullene ble målt. Avviksmålingene i Lundbytunnelen viste at hullene stort sett var rette, men i dårlig berg ble det målt avvik på 4 m for 14 m lange hull.
Materialkontroll	På de fleste anleggene har det vært lite eller ikke noe undersøkelser av injeksjonsmassen på anlegget, det eneste unntaket var Lundbytunnelen hvor det ble gjennomført noe materialkontroll med jevne mellomrom. Det er enkelte ganger mistanke om at dårlig sement har medført mislykkede injeksjonsrunder.
Rockma	Rockma er et nytt dataregistreringsprogram som bearbeider boredata og omprosesserer dem til et bilde av bergmassen. Programmet er ganske nytt og fortsatt beheftet med en del barnesykdommer og begrensninger, men er absolutt et lovende verktøy.
Massekontroll	På de fleste prosjektene har registrering av masse inngang og trykk for hvert injeksjonshull hovedsakelig vært utført manuelt, selv om det på flere av anleggene har vært mulig med automatisk registrering. Det automatiske registreringssystemet har foreløpig ikke vært pålitelig nok til å fungere som dokumentasjon, men det er i ferd med å komme og vil ha stor betydning for tolkning og forståelse av injeksjonsforløpet. Det burde også diskuteres om ikke volumkontrollen burde vært utført på injeksjonsstaven.
Injeksjonstrykk	Injeksjonstrykket er en viktig faktor for å få en vellykket injeksjon. Trykket blir vanligvis målt ved pumpene. På Bragemestunnelen registrert man et trykktap på 10 bar fram til injeksjonsstaven.
Måleterskler	En annen faktor som har stor betydning for kontroll og vurdering av tetteresultatet er korrekte målinger av lekkasjene. Et viktig hjelpemiddel for det er måleterskler, på de aller fleste anleggene har dette vært svært mangelfullt. Noe som ikke samsvarer med at det for flere av anleggene er satt strekningsvise lekkasjekrav.
Poretrykk	Poretrykksmålere er montert på noen prosjekter (Tåsen, Lundby). Det har vært et viktig hjelpemiddel i vurdering av tetteresultatet.
Setningsmålinger	Setningsmålinger som kontroll av injeksjonsarbeidene under injisering har ikke vært brukt i særlig grad, men for å kontrollere resultatet er det vanlig. Både setninger og hevinger har vært registrert.
<b>10.9</b>	<b>Resultat</b>
Lekkasjeresultat	Fra tabell 1 kan en se at det er mulig å begrense innlekkasjen til 0,7-4 l/min/100m med noe tetteinnsats, mens i enkelte soner fort kan en få lekkasjer på over 30 l/min/100m som ville vært enda større uten injisering (har vært registrert lekkasjer på opptil 200 l/min fra enkelte sonderhull).

- Skjermtykkelse/bolter** En indikasjon på injeksjonsresultatet og utbredelsen av injeksjonsskjermen er lekkasjer pga bolter. Det viser seg at bolter med 3-4 m lengde ofte punkterer injeksjonsskjermen. Dette burde vært unngått med et mer samkjørt opplegg for bergsikring og injeksjonsarbeidene.
- Realisme i kravene** Bare et av anleggene har gått tilbake under drivingen og vurdert kravene som var satt (Lundby).
- Parallelle tunneler** Fire av tunnelene (Tåsen, Svartdal, Baneheia og Lundby) har parallelle tunneler (ca tunnelbreddes avstand), en felles erfaring for anleggene er at det er en fordel med litt avstand mellom stoffene (ca 50 m) fremfor å drive dem parallelt. Det kan også se ut til at det er noe redusert masseinnngang i tunnelen som kommer etter, men resultatene er ikke entydige.

## REFERANSER

Følgende materiale ligger til grunn for deler av sammendraget for Tåsentunnelen:

- [1] *R150 TÅSENTUNNELEN. Vurdering av setningsrisiko for hus over traseen.* Rapport fra GeoVita as, Knut Boge og Torgeir Haugen, 16.06.97.
- [2] *Kartlagt geologi. A3-ritningar i svart/hvitt i plan og profil,* Ann Elisabeth Bøyeie.
- [3] *Tetting av tunneler i tettbygde strøk. Sammenstilling av erfaringsdata.* Rapport 526521-1 fra NGI, Vidar Kveldsvik, Anette W. Hagen, Tor G. Jensen og Kjell Karlsrud, 21.12.98.
- [4] *Tetting av tunneler i tettbygde strøk. Sammenstilling av erfaringsdata.* Rapport 526521-6 fra NGI, signert Vidar Kveldsvik og Anette W. Hagen, datert 14.12.98.
- [5] *Injeksjon i tunnel.* Diplomoppgave fra NTNU, Siv Therese Underland med Randi Hermann som veileder (da NTNU), 21.12.98.
- [6] Diverse brosjyrer og nærinformasjon.

Følgende materiale ligger til grunn for deler av sammendraget for Svartdalstunnelen:

- [7] *BESKRIVELSE OG MENGDEFORTEGNELSE.* Statens Vegvesen Oslo, E6 Svartdalstunnelen. Sid E3-3 – E3-9, 25.10.97.
- [8] *Forslag til reguleringsplan.* Oversiktskart i A3 samt vedhengende tekst, Lars Pedersen.
- [9] Samtlige injeksjonsrapporter fra Svartdalstunnelen.
- [10] Svartdalstunnelen – tunneldriving under svært krevende geologiske forhold, samt i nærføring til eksisterende høytraffikerte tunneler. Artikkel fra Fjellsprengningskonferensen 1999, Stig K. Thoresen.
- [11] *Tunnel drift under marginale forhold.* Artikkel fra Byggeindustrien 12-2000, Geir Sorte.
- [12] *17.000 biler inn i Ekebergåsen.* Våre Veger 7-2000, Anders Haakonsen.
- [13] En nærinformasjon.

Følgende materiale ligger til grunn for deler av sammendraget for Lundbytunnelen:

- [14] *Injekteringsarbeidet i Lundbytunneln.* Examensarbeide fra Infrastruktur CTH, Martin Lédel og Jens Thorild med Leif Granhage som examinator (Chalmers Lindholmen), mai 95.
- [15] *Tätning och erfarenheter från Lundbytunneln.* Artikkel fra SveBeFo Bergmekanikdag 1997, signert Åke Eriksson (Vägverket Region Väst) og Kai Palmqvist (BERGAB).
- [16] *Summering av Lundbytunneln.* Artikkel fra Bergsprängningskommittéen Diskussionsmöte BK -97, Stig Eriksson og Carl Johan Söderberg (Anläggning och kraftverk, Skanska Stockholm AB).
- [17] *Sammenstilling over injeksjon, geologisk kartlegging, sikring etc. fra Lundbytunnelen.* Relationsritningar, Jennifer Wänseth (BERGAB).
- [18] *Sammanställning över injekteringsarbeten i Lundbytunneln.* Diverse mängdförteckningar, P-O Eckerlid (VV).
- [19] En informasjonsbrosjyre (allmenn) samt et faktablad (mer detaljert) fra Vägverket.

Følgende materiale ligger til grunn for deler av sammendraget for Storhaugtunnelen:

- [20] *Grunnvannskontroll / injeksjon ved bygging av Storhaugtunnelen.* Fjellsprengningskonferensen 1999, Øyvind Kommedal.
- [21] *Del 2 - Injeksjon ved Storhaug – og Baneheiatunnelen.* Hovedoppgave anleggsteknikk fra NTNU, Tom R Prestegaard Staavi og Ole Johan Sæverås med

- Randi Hermann (Vegdirektoratet) og Bjørn Velken (Institutt for bygg- og anleggsteknikk) som veiledere, 19.12.99.
- [21b] *Erfaringer fra injeksjonsarbeider i Storhaugtunnelen*. Intern rapport nr. 2126 fra Vegdirektoratet, Edvard Iversen og Knut Borge Pedersen, januar 2000.

Følgende materiale ligger til grunn for deler av sammendraget for Bragernestunnelen:

- [22] *Hydrogeologiske konsekvenser av vegtunnel på naturmiljøet i Bragemesåsen. Sårbarhet, vannbalanse og lekkasjekriterier*. Rapport nr. 97/98, november 1998. Jordforsk, Bjørn Kløve, Amund Gaut og Jens Kværner, 23.11.98.
- [23] *HYDROGEOLOGISKE KONSEKVENSER AV TUNNELDRIFT – LEKKASJEKRITEIRER OG KONTROLLPROGRAM. The hydrogeological consequences of tunnelling – leakage criteria and monitoring program*. Fjellsprengningskonferansen 2000, Amund Gaut, Bjørn Kløve og Terje Kirkeby.
- [24] *Utdrag fra: SPESIELLE ANBUDSREGLER OG KONTRAKTSBESTEMMELSER og Hovedprosess 3 TUNNELER*. Statens vegvesen Buskerud, Sentrumsring Drammen, parsell Bragemes: Delparsell Fjelltunnel. Sid D2-D5 og E3.7 – E3.16.
- [25] *Tekniske spesifikasjoner for injeksjonsrigger*.
- [26] *P-12 PROSEDYRE FOR INJEKSJON og P-03 PROSEDYRE FOR SONDERBORING*. Selmer ASA, KONTRAKT 24 00 75 Bragemes fjelltunnel, Larsen og Skogen, 02.06.99 og 14.05.99.
- [27] *Datafiler med automatisk registrering fra injeksjon av pel 1277*. Selmer ASA, EKSEMPEL, kan få flere.
- [28] *Datafiler med sammenstilling av forbruk masse og penger*. Statens vegvesen Buskerud.
- [29] *Kopier av dagbok for innlekkasjemålinger og datafil med sammenstilling av innlekkasjene*. Statens vegvesen Buskerud og NVK/GST.
- [30] *Diverse forklarende skisser for spesielle injeksjonstilfeller og på geologiske forhold*. Statens vegvesen Buskerud, oftest signert Terje Kirkeby.
- [31] *Eksempel på injeksjonsrapporter, borerapporter og bestilling av injeksjon for et stort antall av skjermene (30 stk) i Bragernestunnelen*.
- [32] *Siste salve uten gjennomslag*. Drammens Tidende 7 desember 2000, Åsgeir Størdal.
- [33] *To nærinformasjoner*.

Følgende materiale ligger til grunn for deler av sammendraget for Baneheiatunnelene:

- [34] *Forslag til reguleringsplan. E18 Kristiansand. Parsell Bjørndalsletta – Gartnerløkka. Arkitektur og Visuelt Miljø*. Utforming i A3-format samt vedhengende tekst, O. Eikland og H. Tallaksen.
- [35] *A3-ritninger over tunnelsystemet i Baneheiaprosjektet*. Statens vegvesen Vest-Agder.
- [36] *Byggemøtereferater nr. 1-28 Baneheiatunnelen*, Odd Johansen eller Stine R. Moksnes.
- [37] *Forslag til arbeidsprosedyrer og sjekklister*. Tunnel-Support as, Magne Stedjan, 03.08.99.
- [38] *Arbeidsprosedyrer og sjekklister mm*. Tunnel-Support as, Magne Stedjan, 14.10.99 og 05.02.99.
- [39] *Testing av injeksjonsmasse, Baneheiatunnelen mm*. Statens vegvesen Vest-Agder og Tunnel-Support as, Stine Moksnes, Magne Stedjan, 24.02.00 og 01.03.00.
- [40] *Datafiler med sammenstilling av forbruk masse, tid etc for de ulike tunnelen i Baneheia*. Statens vegvesen Vest-Agder.
- [41] *Eksempler på injeksjonsrapporter, borerapporter og bestilling av injeksjon for et lite antall av skjermene i Baneheiatunnelene*.
- [42] *Måling av innlekkasjer*. Statens vegvesen Vest-Agder og Hordaland, Egil Tveide, Oddvar Nøding og Rune S. Lien, 14.10.99, 18.10.99 og 20.02.00.

- [43] *Tredje Stampe: Tett som en potte.* Våre Vegger 3-2000, Anders Haakonsen.
- [44] *BANEHEIA – DRIVING, SIKRING, TETTING. The Baneheiatunnel – construction, reinforcement, grouting.* Fjellsprengningskonferansen 2000, Egil Tveide.
- [45] *Del 2 - Injeksjon ved Storhaug – og Baneheiatunnelene.* Hovedoppgave anleggsteknikk fra NTNU, Tom R Prestegaard Staavi og Ole Johan Sæverås med Randi Hermann (Vegdirektoratet) og Bjørn Velken (Institutt for bygg- og anleggsteknikk) som veiledere, 19.12.99.
- [46] *Injeksjonsarbeidene i Baneheiatunnelen.* Hovedoppgave fakultet for geofag og petroleumsteknologi fra NTNU, Ragnar Hellerslien med Einar Broch (Institutt for geologi og bergteknikk) som veiledere, datert 11.12.00.
- [47] *Eksempler på injeksjonsrapporter, fra bl a Storhaugtunnelen.*
- [48] *Eksempler på produktinformasjon injeksjonsmidler.*
- [49] *E-18 Kristiansand. Resultater av kjerneboringer Baneheia.* Rapport 960076-4 fra NGI, Kjell Karlsrud og Fredrik Løset, 17.04.98.
- [50] *To nærinformasjoner.*

**Sammenstilling injeksjon**

	Forutsetninger		Organisering					
Sted	Bergoverdekning	Krav l/min/100m	Injeksjonsstrategi	Beredskap	Rutinemessig injeksjon	Tilpasset-injekasjon	Organisering mannskap	Kriterie for injisering
Tåsen	5-20 m	Selv pålagt krav ved systematisk injeksjon 10 l/min/100m ved sporadisk injeksjon 15-20	Sporadisk / Systematisk		Basert på sonderhull og innlekkasje målinger	2750-2815Ø 2800-2880V Syenittgang 2915-2920Ø 2940-2945V krysser vann/lokkertunn.	ord stufflag m/spesial formann	Innlekkasjer fra sonderhull p2424-2525 Ø og V, system sond hver 3aelve, 5hull a 21m. Mer enn 5 l/min samlet ga injeksjon.
Svardal	2,5-3m berg	selvpålagt 5	Sporadisk		Ingen	400-550Ø 640-750 V	ord stufflag m/opplæring av Stave maskin (utstyrsleverandør)	Innlekkasje sonder/kontrollhull
Lundby	5-35 m	p600-1190-2,5 l/min/100m, p1190-1760-1,0 l/min/100m, p1780-2040-2,0 l/min/100m, p2040-2560-0,5 l/min/100m	Systematisk alltid to runder		Hele veien	p2300-2400, Lammelykkan nærering hvor tilpasset???, hullenge 9-10m, en salve mellom hver skjerm	spesiallag	Vanntapemåling i alle hull. Injeksjon uansett, 2 inj runde av og til uteført ved null vanntap i første.
Storhaug	3-15 m	p1250-1550-3,0 l/min/100m, P750-900-10,0 l/min/100m.	Systematisk/ sporadisk		Ikke injisert utenfor området med tilpasset injeksjon	p1400-1550, eneste området som ble injisert	ord stufflag, m/opplæring av Tunnel-support	Vanntapemåling i sonder og kontrollhull. Lugeon verdier over 0,1 skulle rapporteres og inj vurderes
Bragernes	10-150 m, snitt ca 100 m	10 l/min/100m pel 800-1700, 30 l/min/100m pel 400-800 og 1700-1900	Systematisk		Veldig tidlig hele veien	pel 1257-1293 (Bjerringdalsforkestringer)	ord stufflag	Utlekkasje fra sonderhull, >5 l/min samlet innebær injeksjon. I starten skulle BH varsles dersom forbruk i enkelt hull oversteg 1000 kg, ble etter hvert forandret til 5000 kg og automatisk overgang til v/c-0,5 ved inngang på mer enn 3000 kg.
Baneheia	10-40 m	60 l/min totalt, 6-12 l/min/100m under Slampene.	Systematisk		Veldig tidlig hele veien	pel.3609-3624V 5 runder samme sted pel.3543-3590Ø 3 runder samme sted	ord stufflag, m/opplæring av Tunnel-support	Vanntapemåling fra 5 hull pr skjerm i starten, det ble ganske tidlig forlatt og systematisk injeksjon innført.



**Sammenstilling inj**

Utstyr				Injeksjonskjerm			
Sted	Utstyr for sonder-, injeksjon- og kontrollboring	Pakkere og plassering	Registrering av mengder	Utstyr for injeksjon	Injeksjonskjerm	Injeksjonshull i stoff	Boravvikmåling
Tåsen	Tunnelrigg	Plassert 1 m inn i hullet, mekaniske pakkere.	Manuell	Krav pumpe 60bar 100 l/min - hadde 2-3 pumper, 1 mikser, 2 aktuatorer, 9 uttak fra manifold (brakte bare 3)	Startet med 21m økte til 24 for å øke overlapp og ant salver mellom hver runde. Ant hull variera, fullskjerm 25. Tilpasset injeksjon fikk etter hvert en 12m indre skjerm pr salve. 5m stikning.	Dersom en hadde slepper som kom ut i stoffen.	Boravvik utført en gang med enkelt utstyr, lommelykt montert inne i 6m langt plastor. Hvor mye enn så av lyset ble beskrevet.
Svardal	Tunnelrigg	Plassert 1 m inn i hullet, mekaniske pakkere.	Manuell registrering av volum, trykk og v/tall	Fra Stave maskin. Krav til pumpe 75 bar, 1mikser mv 4-utganger (benyttet opptil 4)	Lengde 21m, ble ofte kortere. 5m stikning. Avstand hull 1,5-2m mer i såle. Antall hull	Enkelte ganger ved lekkasje på stoff. Hadde stor stikning for mest mulig å inngå i skjerm.	Boravvikmåling med i kontrakt, ikke utført
Lundby	Tunnelrigg	Engangs og hydrauliske pakkere av type stabilator 48 og 60mm diam. Plassert 1-1,5m inn i hullet.	Manuell registrering av volum, trykk og v/tall. Hadde Loggart	To rigger med to pumper hver. Craelius ZBE200 4 utganger hver, 1 EPV Craelius mikser, en aktuator, hver rigg til utganger trykk og inngang leses av for hver slange	Variera etter tetthetsklasse (3klasser) 10-17m. Generelt desto dårligere berg og strengere krav desto flere og kortere hull og større overlapp, 4m stikning. Antall hull 30, 44 og 62. To salver mellom hver skjerm	Av og til	Boravvik-i alle hull på over 20% av skjermene. Inclinomter fra transonic. Stortsett bra, toleranse 80cm. Registrert 4m avvik på 13m hull, størst avvik i svakhetoner.
Storhaug	Tunnelrigg	48mm diam. 1m inn i hullet, økt til 2-3.	Manuell registrering	To sett med stempel-pumper, kolloidblander og aktuator	Hulllengde 14m. 2 salver a 3m mellom hver skjerm. Antall hull variert mellom 30-70, havnet på 62. Stikning 2m heng, 4m vegg og 5m i sålen.	Hele veien (12 av 62 i stoff)	Boravvikmåling med i kontrakt, ikke utført
Bragernes	Tunnelrigg	48 med mer diameter	Manuell registrering av kg og trykk. Delvis automatisk registrering	Pumper krav 90 bar og 100 l/min. 2 pumper, 1 Cemix blander, 2 aktuatorer, 4 uttak 2 pr pumpe. Trykk og inngang av masse kan leses av for hver utgang.	21 hull a 22 m, 2-3 salver a 5m mellom hver skjerm. Etter hvert 7 a 27 m og 4 salver i mellom. Stikning ca 5m i heng og vegger noe mer i såle.	Av og til basert på erfaringene fra forrige skjerm og slappe mønstre.	Pga få hull ble det ikke ansett som nødvendig.
Baneheia	Tunnelrigg	Codan, mekaniske engangspakkere, 58-60 med mer diam. Prøvd nye pakkere, disse hadde problem med at de gikk tett når mauring ble brukt. Fastet innenfor salve??? Brukte jøker for å feste pakkerna.	Manuell registrering av mengder og trykk for hvert hull.	Pumper krav 60 bar og 50 l/min. Pumper hadde kapasitet på 100 bar og 100 l/min. En gammel og en ny rigg, gamle brukt til Therman. Nye en mikser, 2 aktuatorer, 2 pumper m 2 utganger hver. Automatisk registrering og veing av tilsetninger	21 til 24 m, 3 salver mellom hver skjerm. Avstand mellom hvert hull 1-2 m. Optimalt antall ul ca 30 for et tunnelbørersnitt på 50-60 m2. Yra, indre og speser-skjerm prøvd. Stikning 6-8m.	4-7 hull i stoff.	Ikke utført, men avvik var satt til 0,5 m.

**Sammenstilling inj**

Injeksjonsmiddel					Prosedyre		Resultat		
Sted	Hoved injeksjonsmiddel	Tilsetninger	Andre inj.middel brukt	V/C-tall	Injeksjonsprosedyre	Avslutningstrykk, bar	Resultat	Merknader	Status
Tåsen	Industriement, Rapid Norcem	Rescon HP 2-3%, GA prøvd i en skjerm sent i prosjektet.	Mikro Rheocem 650, Taccos til etterinjeksjon i sone	Startet med 2 reduserte til 0,5 på det laveste	2-3 slanger brukt. Starter nede går oppover.	15-45 bar, vanligvis 25-30 bar.	240 l/min, 25,7 l/min/100m	pel 2325-2650-13 l/min/100m, 2650-28200-32 l/min/100m, 2650-2860V-28 l/min/100m, 2820-32500-10 l/min/100m, 2880-3200V-10 l/min/100m	vanninfiltrasjon installert
Svartdal	Industriement Rapid Rp 38 Norcem		Rescon mauring brukt til plugging av hull	1,5-0,7	Startet nede, ved gjennomgang til andre hull ble pakker montert og injeksjon startet der. Inj 2 runde tilpasset etter lekkasje i 1. runde	20-30	4,3 l/min/100m for hele tunnelen 3450m. Injisert kun i to soner (samme sone men i hver tunnel, totalt injisert 250m)	4m bolter punkterte ikke skjerm, 25 cm differensialsetring på en 30m lang mur. Opp til 3 runder på en skjerm	Tett nok?
Lundby	Injeksjonsement Cements	3% bertonitt (var ugunstig mhp filtreringsstabilitet), 0,5% intraplast (motvirker krymping og øker flytbarhet)	Taccos og Rhocagil, til etterinjeksjon.	3-0,5 (0,3 ved fullfylling)	Injeksjon starter i hull med størst vannsp. Ved gjennomgang ble pakker og slange montert og inj startet. Hvis sluttrykk ikke var oppnådd etter 30 min eller mobstand etter 20 min ble v/c-tallet redusert.	25	0,9 l/min/100m for hele tunnelen 4358m,	En del bolter punkterte inj. Skjerm, tetthetskrav Lammalyckan ikke oppfylt krav 0,5 l/min er 2,5-3,3 l/min/100m	vanninfiltrasjon installert
Storhaug	Ultrafin 12 fra Scancem	GA, scancem SP-40	Thermax for plugging av hull	1,1-0,4 (vanligvis 0,9-0,7)	Startet nede ved gjennomgang til andre hull ble pakker montert og injeksjon startet der. Injeksjon av mer enn 300 kg akulle BH varsløs	30	p1400-1550-1,6 l/min/100m	Dobbel injeksjonsskjerm. En del bolter punkterte skjermen.	Tett nok
Bragernes	Industriement Rapid Norcem	Rescon HP 2-3%.	Mauring	1-0,5	Startet nede med 1-2 slanger, gikk oppover, ved gjennomgang ble pakker satt i de hullene og injeksjon fortsatt der.	Beskrevet 20-30 bar i kontrakt. Etter hvert brukt 40-70 bar som vanlig, men brukte ofte opp i 90 bar.	10 l/min/100m 8,0 l/min/100m pel 240-1730 25 l/min/100m pel 1730-2540	Injeksjonsskjerm punktert av en del 3 og 4 m bolter. Prøvd halv skjerm, ikke vellykket, medførte bare at lekkasje flyttet på seg.	Tett nok
Baneheia	Ultrafin 12, (Scancem) Cements	GA 5-15%, SP40 2%	Thermax, brukt til plugging, men ikke alltid vellykket.	0,9-0,7	Startet nede med 2 slanger, gikk oppover, ved gjennomgang ble pakker satt i de hullene og injeksjon fortsatt der. Ved store innganger lot en hull hvile før en gikk tilbake til dem senere.	Vanligvis 50 bar, men brukt opp til 80 bar.	1,8 l/min/100m, 50 l/min totalt (drøvet 2390 m)	4 og 5 m bolter punkterte en del skjermene, 3 m bolter gjorde ikke det. 95% av skjermene fullført med 1 runde	Tett nok

## **SAMFERDSEL OG AVLØPSTUNNELER**

### 1980-tallet

NSB-tunnelen under Oslo  
Sentrum T-banestasjon, Oslo  
OVA-tunneler, Oslo  
VEAS-tunneler, Bærum, Asker  
Oslo-tunnelen (Fjellinjen), Oslo  
Vestbanekrysset, Oslo  
Bekkestuatunnelen, Bærum  
Granfosslinjen, delstrekninger, Oslo  
Hvalertunnelen, Hvaler  
Ålesundtunnelene, Ålesund  
Flekkerøytunnelen, Kristiansand  
Vålerengatunnelen, Oslo

### 1990-tallet

Ekeberg-tunnelen, Oslo  
Romeriksporten (ved Brynsforkastningen og Strømmen st.)  
Svartdalstunnelen, Oslo  
Tåsentunnelen, Oslo  
Strømsåstunnelen (delstrekninger), Drammen  
Oslofjordtunnelen, delstrekninger i Frogn  
Nye Nationalteateret stasjon, Oslo  
Kambo-Sandbukta, Moss  
Hitra-Frøya, Sør-Trøndelag  
FATIMA, Nordkapp

### 2000- under bygging

Storehaugtunnelen, Stavanger  
Baneheiatunnelen, Kristiansand  
Bragernestunnelen, Drammen

### 2000-oppstart

T-baneringen  
JBV, Jong-Asker  
RV.35, Grua-Jessheim

## **ERFARINGER FRA ANDRE TYPER PROSJEKTER**

Olje/gass-lagre: lite offisiell info  
Vannkraftverk: Kjela-Torpa  
Fjellrom til andre formål: Gjøvikhallen

### ERFARINGER FRA SVERIGE

Hallandsåsen, Halsingborg  
Söndra Lenken, Stockholm  
SKB, Söderhamn  
Lundbytunnelen, Göteborg  
Gøtatunnelen, Göteborg

### OVERSIKT OVER FJELLTUNNELER I OSLO-REGIONEN

Anlegg	Tid drevet	Lengde tunnel Km
Holmenkollbanen	1912-16 1926-27	1,4
OTB-transporttunnel Sentrum stasjon	1968-70	0,3
OTB-Sentrum stasjon- Domkirken- Stortinget	1972-75	0,9
NSB-Sentrum stasjon- Jernbanetorget- Stortinget	1973-75	0,5
NSB-Vest – Abelhaugen – O.K.plass	1973-79	2,0
VEAS kloakktunneler	1976-82	23
OVK kloakktunneler	1975-85	13
OTB-vendesløyfe Sentrum	1982-85	1,1
Oslo-tunnelen, E18 (Fjellinjen)	1987-89	1,5
Rv 160 Granfosslinjen	1990-92	2,0
Rv 160 Bekkestuatunnelen	1993-94	0,7
Vestbanekrysset	1992-94	0,4
Rælingstunnelen	1995-96	1,8
Nye Nathionaltheatret stasjon	1996-97	0,8
Romeriksporten	1995-97	14
Tåsentunnelen	1997-98	0,9
Vålerengatunnelen		
Svartdalstunnelen	1998-2000	3,2
Ekeberg tunnelen		
Ekeberg rensestasjon		
Ekeberg lagerhaller drivstoff		

### **TUNNELER SVERIGE**

Anlegg	Tid drevet	Lekkasje
Saltsjøtunnelen, Stockholm, TBM under byen	1988-..	
Grødingbanen, Stockholm	1989-95	2 l/min/100m
Ormen, TBM, vanntunnel, Stockholm	1990-..	
Skarpsnacksutbygningen, Stockholm	1991-92	2-5 l/min/100m
BV, Hallandsåsen	1992-..	21 l/min/100m
SKB, Oskarshamn	1992-93	
Kungliga Biblioteket, store bergrom i Stockholm	1992-93	2 l/min/100m
VV, Lundbytunnelen, Gøteborg	1994-98	0,5-2 l/min/100m
BV, Strangnåstunnelen	1994-97	0,8-2 l/min/100m
BV, Arlandsbanan	1996-97	5 l/min/100m
BV, Kungsängen-Kallhall, Stockholm	1998-..	
VV, Gøtatunnelen, Gøteborg	2001-..	2 l/min/100m