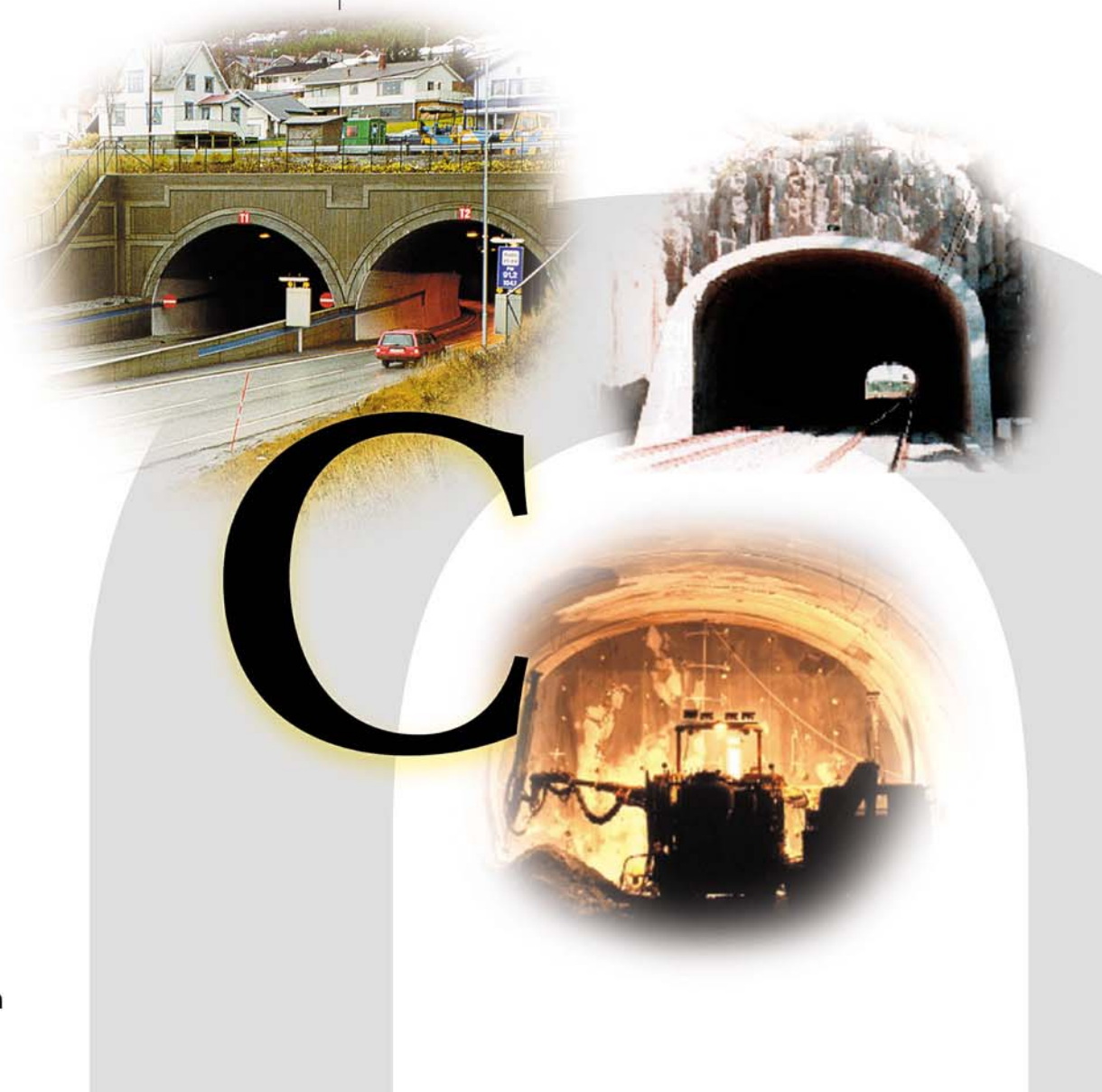


# MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE TUNNELER

Rapport nr: **31**

## Injeksjon - Erfaringer fra Hagantunnelen



Intern rapport nr. 2325



**Statens vegvesen**

## INNHALDSFORTEGNELSE

<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>ii</b>
<b>1 INNLEDNING</b> .....	<b>1-1</b>
1.1 Bakgrunn.....	1-1
1.2 Aktivitet "Injeksjonsstrategi" .....	1-1
<b>2 VALG AV AKTUELLE TUNNELPROSJEKTER</b> .....	<b>2-1</b>
2.1 Kriterier for utvalg.....	2-1
2.2 Tidligere studerte tunneler .....	2-1
2.3 Aktuell tunnel i denne studien.....	2-2
<b>3 METODIKK FOR INNHENTING OG BEARBEIDING AV ERFARINGER</b> .....	<b>3-1</b>
3.1 Planlegging av studien.....	3-1
3.2 Opplegg for intervju og rapportering .....	3-1
<b>4 HAGANTUNNELEN, GJELLERÅSEN</b> .....	<b>4-1</b>
4.1 Kortfattet prosjektbeskrivelse.....	4-1
4.2 Tetthetskrav og lekkasjeforhold .....	4-3
4.3 Rutinemessig injeksjon .....	4-4
<b>5 OPPSUMMERING HAGAN</b> .....	<b>5-1</b>
<b>REFERANSER</b> .....	<b>6-1</b>

## SAMMENDRAG

Prosjektutvalg	<p>Systematisk innsamling av erfaringer med injeksjonsmetodikk, som er brukt på forskjellige prosjekter, er blitt utført siden 2000. I den første studien [1] ble disse seks tunnelprosjekter studert; Tåsen, Svartdalen, Lundby, Storhaug, Bragernes og Baneheia. Samtlige var knyttet til tettbygde strøk, til dels gruntliggende og pålagt strenge tetthetskrav.</p> <p>I den andre studien [2] rapporteres injeksjonserfaringene fra Lunner-tunnelen. I motsetning til tidligere studerte tunneler er den del av et samferdselsprosjekt lokalisert i et tynt befolket område (Rv. 35 mot Gardermoen).</p> <p>For et FoU-prosjekt som skal innhente og bearbeide erfaringer fra injeksjonsarbeider er det ønskelig med et stort antall tunnelprosjekter. Vinteren 2002/2003 ble derfor studien utvidet til å omfatte enda en tunnel som snart vil åpne for trafikk – Hagantunnelen.</p>
Prosjektvurdering	<p>Som for tidligere prosjekter ble den aktuelle tunnelen valgt ut fra en vurdering av følgende momenter:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Godt dokumentert utførelse og resultater</li><li>• Representativ mht dagens injeksjonsstrategi og metodevalg</li><li>• Strenge tetthetskrav</li><li>• Stor tetteinnsats</li></ul> <p>I likhet med de fleste av de tidligere studerte prosjektene ligger Hagantunnelen i tettbygd strøk, ved Gjelleråsen (ny Rv. 4) i utkanten av Oslo. Vedlegg 1 oppsummerer erfaringene fra denne og tidligere studerte tunnelprosjekter.</p>
Nøkkeldata	<p>Gjennomsnittstall for injeksjonsinnsatsen i det enkelte prosjekt er sammenstilt mht bergmasseforhold på neste side. Tabellen angir tetthetskrav / resultater og inkluderer også de sju tidligere studerte prosjektene. Den kan ved behov anvendes til grovsøk i den data-mengde som er innhentet. Erfaringene er beskrevet og oppsummert under det enkelte prosjektkapittel i denne og forrige rapporter [1], [2].</p>
Bergmasseforhold	<p>Erfaringene i de tidligere rapportene [1], [2] dekker viktige deler av bergmassevariasjonene i Norge. Denne rapporten legger til erfaringer fra injisering i hornfjell og syenitt i Hagantunnelen. Syenitten i Hagan er meget oppsprukket og i tillegg er overdekningen langs ca 600 m av tunnelen bare 8-10 m. Hornfjellen var noe mindre permeabel, skjønt i et kritisk parti med liten bergoverdekning var den intenst oppsprukket med leirbelegg på sprekke.</p>
Tetthetskrav	<p>Hagantunnelen var pålagt strenge tetthetskrav (5-10 l/min/100 m) fordi en del av bebyggelsen over er fundamentert på løsmasser.</p>
Valg av tettestrategi	<p>Bestemmende for den hovedsaklige injeksjonsstrategien er forutsetninger som krav til tetthet, fjelloverdekning og bergmasseegenskaper (inkl. oppsprekking, svakhetssoner og spenningstilstand) [3].</p>

Iblant blir systematisk injisering bestemt før drivingen starter, andre ganger bestemmer resultater fra sonderboringer hvorvidt det skal injiseres (såkalt sporadisk injisering). Systematisk forinjeksjon som hovedstrategi for tettingen av tunneler med strenge tetthetskrav er blitt helt vanlig.

Systematisk forinjeksjon er i Hagan-tunnelen utført i områdene med liten fjelloverdekning på Gjelleråsensiden (pel ca 1730-2200). Dette var bestemt før drivingen startet og ble ikke bestemt ut fra resultater fra sonderboringer. Injeksjon ble ikke utført i den sørligste delen av tunnelen (pel 1400-1600), fordi lekkasjemålinger ut av 3-4 sonderhull indikerte tørt fjell. Utlekkasjemålinger lå til grunn for beslutning om injeksjon også i den nordlige delen av tunnelen (pel ca 2200-2900).

#### Injeksjonsteknikk

Intern rapport nr. 2151 fra Vegdirektoratet "Berginjeksjon" [3] lå til grunn for opplegget for injeksjon. De retningslinjer som er sammenstilt i rapporten bygger på over 30 års erfaringer fra prosjektering og praktisk berginjeksjon. Om injeksjonsteknikk generelt fremheves det hvor viktig det er å ha forståelse for 1) injeksjonstrykk, 2) injeksjonsmassens egenskaper, 3) utbredelse og inntrengning av injeksjonsmasse og 4) mengde injeksjonsmasse. Betydningen av tilstrekkelig høyt injeksjonstrykk betones ekstra – det anbefales å bruke så høyt trykk som forholdene på stedet tillater (motsvarer ofte 50-100 bar).

Ved liten fjelloverdekning (som i Hagan-tunnelen) er det spesielt viktig å fortløpende vurdere og ved behov justere 1) massesammensetning, 2) borehullslengde og -mønster, 3) masseinnang og 4) injeksjonstrykk [3]. Restriksjoner kan bli aktuelt på hulllengde, injeksjonstrykk, injeksjonstid og -mengde pr. hull. Økt innsats i form av flere borehull, omfattende observasjonsopplegg (for eksempel av masse i dagen), ytre skjerm og bruk av lavt v/c-forhold kan trenge.

I områdene med nærhet til brønner og kjellere ble masseutbredelsen rundt Hagan-tunnelen begrenset ved bruk av meget lave v/c-tall og forandret injeksjonsskjerm. Iblant ble ikke heller GroutAid benyttet, fordi det er fornuftigere ikke å bruke den når man trenger motstand for å få begrenset utbredelse. Til tross for meget åpent fjell tyder ulike observasjoner på overflaten, i boltehull og hull for kontroll av poretrykket at man klarte å begrense utbredelsen fra tunnelen til 8-10 m.

Masseforbruket i tunnelen viser klare forskjeller mellom områder med tetthetskrav 5 eller 10 l/min/100 m. Høyere forbruk i strekninger med strengere tetthetskrav viser at behovet for tetting virkelig var stort her. Det var ikke særlig samsvar mellom prognosen for forbruk og virkelig forbruk. Erfaringene før Hagan var et forbruk på mellom 200-1000 kg sement pr. meter injisert tunnel [3], men bergmassen i dette prosjekt var intenst oppskrukket med åpne og til dels store sprekker. Det var av konsulenten stipulert et forbruk på 600 tonn, noe som ble presset til 900 tonn av Vegteknisk avdeling. Den mengden masse ble fort brukt opp og til slutt havnet forbruket på ca 2400 tonn.

Riktignok var fjellet åpent og meget lave v/c-tall ble brukt, så et stort forbruk er å forvente. En kan dog konstatere at det er behov for å

bedre muligheten for å redusere forbruket av injeksjonsmasse og dermed injeksjonstiden for å optimalisere lignende arbeider videre.

Det ble brukt et sluttrykk mellom 80-100 bar, også i området med liten fjelloverdekning. Begrensningen i trykket var avhengig av inngang av masse og ikke av overdekningen.

#### Lekkasjeforhold og tetthetskrav

Spesielt i den oppsprukne syenitten med liten fjelloverdekning har jo tetningsinnsatsene vært omfattende, men en har likevel stort sett klart å oppnå ønsket tetthet på én injeksjonsomgang. Lekkasjen ble etter driving målt til i gjennomsnitt ca 4 l/min pr. 100 m mellom profil 1680-2200, hvor tetthetskravet var 5 l/min pr. 100 m. Den gjennomsnittlige innlekkasjen i tunnelen etter driving lå på nesten 19 l/min pr. 100 m i et område med sporadisk injeksjon (pel ca 2200-2900). Grunnvannspeilet ble konstatert uberørt, og etter samråd med konsulent ble en del mer innlekkasje bevisst tolerert der, på tross av at kravet til tetthet lå på 10 l/min pr. 100 m.

BERGMASSE OG GRUNNVANN			KRAV OG RESULTATER		HOVEDSAKLIG INJEKSJONSSTRATEGI		TUNNELFAKTA				GJENNOMSNIITTSTALL FOR BORING OG SEMENTFORBRUK							
Bergart / kvalitet	Bergoverdekning	Grunnvann	Tetthetskrav	Målt lekkasje	Sporadisk / systematisk	Injeksjonsmiddel	Prosjekt / beskrivelse	Pel nr / tunnelengde	Tunnel-tverrsnitt	Merknad *	Bormeter pr m inj.tunnel	Bormeter pr m <sup>2</sup> inj.tunnel	Masse kg pr hull, inkl. fyll	Masse kg pr m hull, inkl. fyll	Masse kg pr m inj.tunnel	Masse kg pr m <sup>2</sup> inj.tunnel	Masse kg pr time inj.tid	Inj.tid time pr m inj.tunnel
	m	m	l/min/100m	l/min/100m					m <sup>2</sup>		bm/m	bm/m <sup>2</sup>	kg/hull	kg/m hull	kg/m	kg/m <sup>2</sup>	kg/time	
Kalk / leirskifer	5-20	5-20	Systematisk 10 Sporadisk 15-20	25,7	Systematisk	Industrisement Rapid	Tåsen, hele tunnelsystemet	1870 m totalt	65-80		31	1,00	535	26	802	26	870	0,92
Sandstein / konglomerat	10-50	40	10-20, likt fordelt	4,2	Systematisk	Industrisement, mikro- sement Ultrafin 12	Lunner, del av tunnelen	Pel 3770-3940	61	12 skjerm (12 runder), 24002 kg pr skjerm	41	1,28	952	40,8	1592	51	1131	1,41
Rombe / kvartsporfyrr / basalt	10-150 snitt ~100	10-150 snitt ~100	10 og 30	10,1	Systematisk	Industrisement Rapid	Bragernes, hele tunnelen	2310 m hovedtunnel	72-83		17	0,57	2050	81	1242	42	2744	0,41
Rombeporfyrr	10-150 snitt ~101	10-150 snitt ~100	-	8	Systematisk	Industrisement Rapid	Bragernes, del av tunnelen	Pel 240-400	72-83	10 hull pr skjerm i snitt, 9758 kg pr skjerm	18 *	0,61	1324	52	788	26	-	-
Rombeporfyrr	10-150 snitt ~102	10-150 snitt ~100	30	8	Systematisk	Industrisement Rapid	Bragernes, del av tunnelen	Pel 400-800	72-83	7 hull pr skjerm i snitt, 16650 kg pr skjerm	10 *	0,34	2233	85	918	31	-	-
Rombeporfyrr	10-150 snitt ~103	10-150 snitt ~100	10	8	Systematisk	Industrisement Rapid	Bragernes, del av tunnelen	Pel 800-1420	72-83	12 hull pr skjerm i snitt, 22810 kg pr skjerm	19 *	0,64	2153	85	1445	48	-	-
Basalt	10-150 snitt ~104	10-150 snitt ~100	10	8	Systematisk	Industrisement Rapid	Bragernes, del av tunnelen	Pel 1420-1820	72-83	11 hull pr skjerm i snitt, 17947 kg pr skjerm	15 *	0,51	1704	62	928	31	-	-
Kvartsporfyrr	10-150 snitt ~105	10-150 snitt ~100	30	25	Systematisk	Industrisement Rapid	Bragernes, del av tunnelen	Pel 1820-1900	72-83	10 hull pr skjerm i snitt, 11450 kg pr skjerm	13 *	0,44	1145	42	290	10	-	-
Kvartsporfyrr	10-150 snitt ~106	10-150 snitt ~100	30	25	Systematisk	Industrisement Rapid	Bragernes, del av tunnelen	Pel 1900-2050	72-83	6 hull pr skjerm i snitt, 7487 kg pr skjerm	6 *	0,20	1365	62	267	9	-	-
Rombeporfyrr / oppsprukket	10-150 snitt ~107	10-150 snitt ~100	-	25	Systematisk	Industrisement Rapid	Bragernes, del av tunnelen	Pel 2050-2500	72-83	13 hull pr skjerm i snitt, 34111 kg pr skjerm	17 *	0,57	2722	111	1911	64	-	-
Rombeporfyrr / forkastning		80-100	10	8	Systematisk	Industrisement Rapid	Bragernes, Bjerringdalsforkastningen	Pel 1257-1293	80	2-4 runder for 3 skjerm mellom pel 1267 og 1283	101 *	1,26	1534	78	7881	99	-	-
Vulkanitt	80-130	110	10	4,0	Systematisk	Industrisement, mikro- sement Ultrafin 12	Lunner, del av tunnelen	Pel 2580-3770	61	77 skjerm (82 runder), 13909 kg pr skjerm	40	1,24	567	23,9	1019	36	1140	0,89
Syenittgang, oppsprukket	5-10	15-20	10	32	Systematisk	Ind. sement Rapid, litt mikro sement	Tåsen, del av østre løp	Pel 2750-28150	80	11 skjerm (22 runder), 14077 kg pr skjerm	84 *	2,72	445	28	2382	77	-	-
Syenittgang, oppsprukket	5-10	15-20	10	28	Systematisk	Ind. sement Rapid, litt mikro sement	Tåsen, del av vestre løp	Pel 2800-2860V	80	11 skjerm (21 runder), 15485 kg pr skjerm	88 *	2,85	491	32	2839	92	-	-
Syenittgang, oppsprukket		10	7	14,9 *	Systematisk	Mikro sement Rheocem 900	T-baneringen	Pel 700-750	64	Målt mellom pel 650-750.	380	5,94	700	31	11900	186	644	18,47
Syenitt	8-10	8	5	4	Systematisk	Industrisement, mikro- sement Ultrafin 12	Hagan, del av tunnelen	Pel 1600-1850	62	13 skjerm (16 runder), 44933 kg pr skjerm			1474	62,7	3958	120	1670	2,37
Syenitt	75-100	100	20	26,6	Systematisk	Industrisement, mikro- sement Ultrafin 12	Lunner, del av tunnelen	Pel 2405-2580	61	13 skjerm (13 runder), 38566 kg pr skjerm	41	1,29	1552	64,7	2728	86	1856	1,47
Syenitt / vulkanitt / sandstein	10-220	100-200	10-20 *	8,4	Systematisk	Industrisement, mikro- sement Ultrafin 12	Lunner, hele østre del	Pel 2395-3960	61	10 og 20 l/min/100 m fordelt omtrent likt over strekningen	40	1,26	722	30	1299	41	1224	1,06
Granitt, skifrig	5-35	5-35	0,5-2,5	0,9	Systematisk	Injektterings- cement	Lundby, hele tunnelsystemet	4358 m totalt	86-92		80	2,00	79	5,9	476	11,9	-	-
Granitt, skifrig		12-35	1,0 og 0,5	0,9 og 0,85	Systematisk	Injektterings- cement	Lundby, tettklasse 1	Pel 1190-1780 og 2040-2660	86-92	149 skjerm med 62 hull, 4692 kg pr skjerm	113 *	2,83	76	6,3	669	16,7	-	-
Granitt, skifrig		30-35	2,0	1,5	Systematisk	Injektterings- cement	Lundby, tettklasse 2	Pel 1780-2040	86-92	167 skjerm med 44 hull, 3372 kg pr skjerm	82 *	2,05	77	5,9	481	12,0	-	-
Granitt, skifrig		15-30	2,5	1,1	Systematisk	Injektterings- cement	Lundby, tettklasse 3	Pel 600-1190	86-92	269 skjerm med 30 hull, 2527 kg pr skjerm	61 *	1,53	84	4,9	360	9,0	-	-
Granitt, knusningsone	5-10	18-28	0,8 (0,5)	1,0	Systematisk	Injektteringscement / Tacsc polyuretan	Lundby, Lammelyckan	Pel 2240-2450	86-92	Hullengde 10 m, for- og etter- inj. m/ komb. PU og sement	166 *	4,16	84	7,7	1158	29	-	-
Gneis	10-40	20-40	2 *	1,7	Systematisk	Mikro sement Ultrafin 12	Baneheia, hele tunnelsystemet	3000 m totalt	87 (44-93)	60 l/min totalt, under Stampene 6-12 l/min/100m	40	1,08	256	11,4	514	14,2	755	0,68
Gneis			2		Systematisk	Mikro sement Ultrafin 12	Baneheia, tunnel B1000	Pel 3384-4054	93	33 hull pr skjerm i snitt	47 *	1,24	311	13,6	629	16,5	850	0,74
Gneis			2		Systematisk	Mikro sement Ultrafin 12	Baneheia, tunnel B1100	Pel 58-3913	93	27 hull pr skjerm snitt	48 *	1,26	283	12,5	601	15,8	834	0,72
Gneis			2		Systematisk	Mikro sement Ultrafin 12	Baneheia, tunnel B2200	Pel 58-400	69	28 hull pr skjerm i snitt	48 *	1,33	193	8,2	395	11,0	800	0,49
Gneis			2		Systematisk	Mikro sement Ultrafin 12	Baneheia, tunnel B2800	Pel 188-428	69	26 hull pr skjerm i snitt	38 *	1,19	236	11,2	432	13,5	536	0,81
Gneis, svakhetsone			2		Systematisk	Mikro sement Ultrafin 12	Baneheia, sone i tunnel B1000	Pel 3609-3624	93	6 runder, varav én med Thermax, ved pel 3619	133 *	3,51	175	10,1	1353	35,6	845	1,60
Gneis, svakhetsone			2		Systematisk	Mikro sement Ultrafin 12	Baneheia, sone i tunnel B1100	Pel 3543-3590	93	2-4 runder for 3 skjerm mellom pel 3578 og 3558	72 *	1,89	285	13,8	992	26,1	716	1,39
Gneis / alunskifer	2,5-3		5	4,3 *	Sporadisk	Industrisement Rapid	Svartdal, hele tunnelsystemet	3450 m totalt, varav 260 m inj.	65		22	0,66	1358	77	1719	50	978	1,76
Gneis / alunskifer	2,5-3		5		Sporadisk	Industrisement Rapid	Svartdal, Ekeberg- forkastningen	Pel 400-5550	65	13 skjerm (20 runder), 14898 kg pr skjerm	22 *	0,66	945	57	1249	19	822	1,52
Gneis / alunskifer	2,5-3		5		Sporadisk	Industrisement Rapid	Svartdal, Ekeberg- forkastningen	Pel 645-745V	65	8 skjerm (10 runder), 30586 kg pr skjerm	22 *	0,66	2074	108	2447	37	1427	1,71
Fyllitt	3-4	10-15	3 *	1,6	Systematisk	Mikro sement Ultrafin 12	Storhaug, del av tunnelen	Pel 1400-1550	85	Mellom pel 750-900 var det 10 l/min/100 m, ikke injisert	130	3,34	112	7,8	1014	26	273	3,71
Hornfels / syenitt	6-60		5-10	12,3 *	Systematisk	Industrisement, mikro- sement Ultrafin 12	Hagan, hele tunnelen	2700 m totalt	62-85		45	1,29	1418	59	2716	78	1893	1,43
Hornfels	6-10	8	5	4	Systematisk	Industrisement, mikro- sement Ultrafin 12	Hagan, del av tunnelen	Pel 1850-2200	62	19 skjerm (19 runder), 62934 kg pr skjerm	43	1,30	1912	78,1	3382	102,5	2551	1,33
Hornfels	30-60		10	19	Sporadisk	Industrisement, mikro- sement Ultrafin 12	Hagan, del av tunnelen	Pel 2200-2900	62-85	19 skjerm (19 runder), 23837 kg pr skjerm	44	1,26	848	35,3	1201	34,3	1424	0,84

# 1 INNLEDNING

## 1.1 Bakgrunn

Mange fremtidige tunnelprosjekter i Norge vil være knyttet til bebygde strøk. Slike tunneler vil ofte være grunntiggende og pålagt meget strenge tetthetskrav. Innenfor FoU-prosjektet "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler" ble systematisk innsamling av erfaringer med injeksjonsmetodikk begynt i 2000 [1], og så fulgt opp i 2003 [2].

For å kunne videreutvikle injeksjonsmetodikken er analyse av erfaringer fra utførte prosjekter av avgjørende betydning. Det må legges stor vekt på å undersøke og dokumentere injeksjonserfaringer ytterligere. Deretter må konklusjoner og oppdagelser gjort på utførte prosjekter føres videre til utprøving på nye prosjekter.

## 1.2 Aktivitet "Injeksjonsstrategi"

Utfordringene i aktiviteten "Injeksjonsstrategi" er å studere metoder for og resultater av injeksjon. Både for rutinemessige utførelser og utførelser tilpasset mer spesielle, men likevel vanlig forekommende situasjoner som:

- Liten overdekning
- Dårlig bergmassekvalitet
- Strenge tetthetskrav
- Ugunstig tunnelgeometri

Hovedmål for aktiviteten "Injeksjonsstrategi" er å:

1. Dokumentere og analysere erfaringer med forinjisering på stoff både ved normale "rutinemessige" forhold og ved spesielle "tilpassede" forhold.
2. Videreutvikle utstyr, materialer og prosedyrer for optimal forinjeksjon både mht tidskostnader og spesielle forhold.

Punkt 1 beskriver arbeidet i Fase 1 for aktiviteten "Injeksjonsstrategi ved forinjisering av tunneler" og er temaet for rapport nr 2 "Injeksjon – Erfaringer fra utvalgte tunnelprosjekter" [1] og rapporten om Lunner-tunnelen [2].

Punkt 2 beskriver arbeidet i Fase 2 for aktiviteten, hvor en vil søke å få utprøvd og videreutviklet viktige (og mulige) problemstillinger og erfaringer som er kommet fram i fase 1. Dette ble under 2001 gjort på prosjektet T-baneringen i Oslo. Fase 2 er rapportert i rapportene nr 3 "Injeksjon av "problemsone" ved byggingen av T-baneringen" [4] og nr 16 "Sluttrapport for injeksjonsarbeidene ved T-baneringen" [5].



## 2 VALG AV AKTUELLE TUNNELPROSJEKTER

### 2.1 Kriterier for utvalg

En systematisk innsamling av erfaringer med injeksjonsmetodikken som er brukt på forskjellige prosjekter ble begynt i 2000 [1], og så fulgt opp i 2003 [2]. Flere tunnelprosjekter av nyere dato, hvor forinjisering har vært en viktig komponent, er blitt studert.

I den første studien ble seks tunnelprosjekter valgt ut for grundigere bearbeiding etter en innledende kartlegging og vurdering. Kriteriene for valget var grovt sett følgende:

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

Disse prosjektene ble vurdert å være de mest representative tunnelprosjektene totalt sett, mht dagens injeksjonsstrategi og metodevalg.

En påfølgende rapport redegjør for injeksjonserfaringene fra Lunnertunnelen [2], som i motsetning til tidligere prosjekter er en del av et samferdselsprosjekt lokalisert i et tynt befolket område (Rv. 35 mot Gardermoen).

### 2.2 Tidligere studerte tunneler

Samtlige av de tidligere studerte tunnelene, unntatt Lunnertunnelen, var knyttet til tettbygde strøk, til dels gruntliggende og pålagt meget strenge tetthetskrav. Prosjektene beskrives i korthet nedenfor:

- Tåsentunnelen i Oslo har liten overdekning og til dels meget permeabel bergmasse. Tetthetskravene var moderate (10-20 l/min/100m) og rapporteringen fra anlegget var god.
- Svartdalstunnelen i Oslo har komplisert tunnelgeometri (to løp og kryss med ramper), liten overdekning og vanskelige geologiske forhold gjennom Ekebergforkastningen.
- Lundbytunnelen i Gøteborg har til dels liten overdekning med setningsømfintlige løsmasser ovenfor. Det var svært høye krav til tetthet (0,5-2,5 l/min/100m) og godt dokumenterte arbeider.
- Storhaugtunnelen i Stavanger hadde meget strenge tetthetskrav langs en strekning, med fyllitt med meget lav permeabilitet og liten overdekning. Mye data var publisert i et par rapporter.
- Bragernestunnelen i Drammen hadde en bergmasse med høy permeabilitet og lå nær andre tunneler. Tetthetskravene var differensierte, selv om overdekningen var jevnt over god.



- Baneheiatunnelene i Kristiansand ble bygget med to løp og hadde kryssninger i flere plan. Kravet til tetthet var høyt og permeabiliteten av bergmassen var gjennomgående lav.
- Lunnertunnelen langs nye Rv. 35 ble bygget til en del under Rinilhaugen naturreservat. Tetthetskravene var relativt strenge (10-20 l/min/100m) og forundersøkelsene var omfattende.

## 2.3

### Aktuell tunnel i denne studien

For et FoU-prosjekt som skal innhente og bearbeide injeksjons-erfaringer fra tunneler er det selvfølgelig ønskelig med et stort antall prosjekter. Vinteren 2002/2003 ble det besluttet å utvide studien til å omfatte også Hagantunnelen, som åpner for trafikk nå i september.

For tunneler som er under utførelse eller nylig ferdigstilte er det enkelt å komplettere oppfølgingen av prosjektet ved behov. Personer med førstehåndskunnskap om utførelsen er i tillegg lettere tilgjengelige.

Hagantunnelen er i likhet med mange prosjekter av nyere dato et samferdselsprosjekt i tettbygd strøk. I likhet med Lundbytunnelen i Gøteborg med til dels liten overdekning og setningsømfintlige løsmasser ovenfor, var det rettet sterk fokus på tetningen før byggingen begynte.

Forundersøkelsene for Hagantunnelen har hatt normal omfang, men oppfølgingen under injeksjonsarbeidene fra byggherren sin side har vært mer omfattende enn vanlig. Dette ble betraktet som nødvendig for å oppnå teknisk / økonomisk optimalisering. Bebyggelsen over tunnelen er fundamentert på setningsømfintlige løsmasser og overdekningen er bare 8-10 m langs en 600 m lang strekning. Tetthetskravene for Hagantunnelen var derfor strenge (5-10 l/min/100 m).

Intern rapport nr. 2151 [3] lå til grunn for opplegget av forinjeksjonen. Betydningen av tilstrekkelig høyt injeksjonstrykk betones spesielt og det blir anbefalt å bruke så høyt trykk som forholdene på stedet tillater (motsvarer ofte 50-100 bar). Ved liten fjelloverdekning som i dette fallet er det spesielt viktig å fortløpende vurdere og ved behov justere 1) massens sammensetning, 2) borehullslengde og -mønster, 3) inn- gang av masse og 4) injeksjonstrykk. Det kan være nødvendig med restriksjoner på hullengde, injeksjonstrykk, injeksjonstid og -mengde pr. hull, og økt innsats i form av flere borehull, grundig observasjons- opplegg (for eksempel av poretrykk og masse i dagen), ytre skjerm og bruk av lavt v/c-forhold.

Tunnelen i denne studien utfyller erfaringsgrunnlaget fra de tidligere studiene [1], [2] med hensyn til bergmasseforhold (se A3-tabellen i 'Sammendrag'). Hagantunnelen er drevet gjennom hornfels (65%) og syenitt (35%), sistnevnte er dessuten meget oppsprukket med åpne sprekker med lite fylling. Injeksjon er utført systematisk i områdene med liten fjelloverdekning, og spesielt i den oppsprukne syenitten har tetningsinnsatsene vært omfattende.

### 3 METODIKK FOR INNHENTING OG BEARBEIDING AV ERFARINGER

#### 3.1 Planlegging av studien

Arbeidet med å undersøke og dokumentere injeksjonserfaringer (dvs Fase 1) fulgte stort sett opplegget som blir beskrevet nedenfor.

Aktuelle prosjekter	ble kartlagt gjennom litteraturstudier, kontakter med personer innen tunnelbransjen etc. Eventuelle rapporter som foreligger allerede, vedrørende for eksempel analyse av injeksjonsresultater eller vurdering av tetthetskrav, ble studert.
Nøkkelpersoner	i de aktuelle prosjektene, men eventuelt også i injeksjonsmiljøet allment, ble kartlagt. Disse kunne eventuelt inngå i en grundigere undersøkelse i form av detaljerte intervjuer mht temaet tetting av tunneler med strenge tetthetskrav og spesielle forhold.
Spørsmålsliste	ble sammenstilt for å ha et strukturert underlag for diskusjonene ved intervjuene med nøkkelpersonene i de aktuelle prosjektene. Denne sjekklisen skal omfatte alt fra organisasjon og beredskap til praktisk utførelse og kontroll, og bør sendes ut i forkant av besøket.
Besøk / befaring	ble gjennomført ved den utvalgte tunnelen for å intervju nøkkelpersonene på prosjektet og samle inn rapporter over analyser av injeksjonsresultater og/eller kopier av eksisterende underlag for å kunne gjøre egne vurderinger av injeksjonsarbeidene.
Dobbelsjekk	av materialet fra de ulike personene som er blitt intervjuet vedrørende de aktuelle prosjektene og vurdering av de ev. forskjeller som disse kan ha opplevd, ble utført ved at en foreløpig sammenstilling av erfaringene sendes til de intervjuede personene for kontroll.  En viktig del i det å få sammenstillingen av erfaringene mest mulig riktig er akkurat muligheten for de intervjuede personene å rette opp feil og misstolkninger, samt å komplettere materialet ved behov. Videre ble det ansett som meget viktig at flere sentrale personer fra alle involverte parter vurderte og kommenterte de innsamlede data.

#### 3.2 Opplegg for intervju og rapportering

For å gjøre bearbeiding og sammenligning av erfaringene enklere brukes samme spørsmålslisten for både rutinemessig og eventuell tilpasset forinjisering. Listen sammenfattes nedenfor:

Organisering	Hvordan ble injeksjonsarbeidet planlagt mht organisasjon, programansvarlig, kontroll, oppfølging og dokumentasjon, samt erfaringstilbakeføring?
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 tetningssituasjonen?

Injeksjonsskjerm	Hvordan ble injeksjonsskjermen som skulle tilfredsstillte det oppsatte tetthetskravet for den aktuelle bergmassen utformet mht hullengde, vinkel, avstand og eventuelle injeksjonshull i stoff? Redegjør også for boreutstyret, eventuell innmåling av hull, rengjøring for kaks, etc.
Injeksjonsmiddel	Angi verdier for noen nøkkelegenskaper (kornstørrelse, viskositet, v/c-tall, separasjonsstabilitet og herdetid) for det sementbaserte injeksjonsmiddelet som ble valgt for å injisere aktuell fjellmasse, 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 pakkertype og -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	<p>Gjør en vurdering / prognose av resultatet av forinjeksjonsarbeidet når det gjelder inntrengningsdybde, forbruk av injeksjonsmiddel, tetningseffekt, behov for ominjisering eller ev. etterinjisering.</p> <p>Under intervjuene blir innledningsvis data som størrelse på tunnelen, type tunnel, geologiske og hydrogeologiske forhold etc. gjennomgått. Videre blir innlekkasjekravene (i l/min pr 100 m tunnel), bestandighet og eventuelle økonomiske forhold behandlet.</p> <p>Svarene vedrørende rutinemessig forinjisering brukes for å kartlegge hvordan injeksjonsarbeidet ved normale forhold i tunnelen ble løst. Det blir lagt vekt på optimalisering av tid og kvalitet.</p> <p>For ev. tilpasset injeksjon er hensikten å kartlegge hvordan man valgte å løse injeksjonsarbeidet ved spesielle forhold. Den aktuelle tetningssituasjonen blir beskrevet (størrelse på sonen, type sone, geologi og hydrogeologi etc.) og sortert i følgende deltemaer:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Meget permeabel bergmasse og meget høyt krav til tetthet for deler av tunnelen</li><li>• Lav permeabel bergmasse og meget høyt krav til tetthet for deler av tunnelen</li><li>• Sone med varierende permeabilitet og eventuelt med krav til kritisk stabilitet</li><li>• Liten fjelloverdekning, eventuelt med overliggende setningsømfintlig materiale</li><li>• To parallelle tunnellop eller passering over / under / nær andre fjellanlegg</li></ul>

## 4

### HAGANTUNNELEN, GJELLERÅSEN

Tunnellengde	2500 m, pluss ca 200 m påkjøringsrampe
Utforming	Ett løp, tverrsnitt ca 62(-85) m <sup>2</sup>
Drevet	2001-2002
Innlekkasje	Pel 1680-2200: ca 4 l/min/100m Pel 2200-2850: ca 19 l/min/100m
Lekkasjekrav	Pel 1600-2200: 5 l/min/100m Pel 1400-1600 og 2200-2900: 10 l/min/100m
Gjennomsnittstall for sementforbruk	1418 kg/hull – 59 kg/m hull – 2716 kg/m injisert tunnel – 78 kg/m <sup>2</sup> injisert tunnel – 1893 kg/time

Tabell 1: Fakta og kjernedata fra Hagantunnelen

#### 4.1

##### Kortfattet prosjektbeskrivelse

Hagantunnelen er en del av første etappe i utbyggingen av ny Rv. 4 mellom Grorud i Oslo og Slattum i Akershus. Den fører trafikken forbi boligområdet Hagan sør i Nittedal. Sørlike påhugg ligger 200-300 m nord for Gjelleråskrysset og nordlige påhugg er på Slattum. Faktisk ble tunnelen påbegynt allerede i 1990, fordi det trengtes stein til å anlegge ny Rv. 4 lenger nord [6]. Når ca 530 m var drevet fra nordlige påhugg ble drivingen stoppet av planleggingsmessige årsaker.

Som spesielle forhold i kontrakten [7] ble det nevnt at tunnelen ville bli drevet i "variable og vanskelige fjellforhold i harde og permeable bergarter ... under et større industri- og boligområde med stedvis liten overdekning."

Fjelloverdekningen er mellom 6-60 m og i snitt ca 25 m. Langs 600 m i sørlike del av tunnelen er overdekningen nede i 8-10 m med overliggende villabebyggelse fundamentert på setningsømfintlige løsmasser. Berggrunnen ved Gjelleråsen tilhører det såkalte Oslofeltet og området for tunnelen ligger innenfor Nittedalskalderaen.

Bergarten i sørlike del (ca 600 m) av tunnelen er syenitt og nord for det er det i hovedsak hornfels (dvs leirskifer omdannet gjennom kontaktmetamorfose under permtiden). Syenitten har stort sett grovblokket benkningsoppsprekking med til dels meget åpen sprekkestruktur (sprekkeåpninger fra 1-5 mm opp til 2-3 cm) [8]. Hornfelsen var noe mindre permeabel, skjønt i et kritisk parti med liten bergover-

dekning var den intenst oppsprukket med leirbelegg på sprekkene. Tunneltraséen krysser et antall markerte sprekker med 20° helning.

Den hydrogeologiske situasjon for Hagantunnelen var kjennetegnet av en til dels meget permeabel bergmasse og liten bergoverdekning. Stedvis under boligområdet var det direkte nærhet til kjellere, avløpsgrøfter og borebrønner, som ikke måtte påvirkes av injeksjonen.

En hydrogeologisk rapport fra Grøner [9] konkluderte med at et antall brønner i området ville bli utsatt for skader på grunn av drenering og injeksjonsarbeider. Det ble foreslått et kontrollprogram både for de brønner som kunne få redusert vannmengde og for de som sto i fare for å få dårligere vannkvalitet. De fleste av de utsatte brønnene ble innløst. Rapporten nevnte at vegetasjonen bare i liten grad ville være avhengig av grunnvannsnivået, fordi det allerede før tunneldriving sannsynligvis er lavt i det berørte området.

Prisingen av injeksjonen var kr pr. kg injeksjonsmiddel og for sonder og- injeksjonsboring kr pr. meter hull og pakkere kr pr. stykk [7]. Når det gjelder kostnader for maskiner og mannskap ble kontrakten forandret underveis.

I stedet for at rigg og mannskap inngikk i enhetsprisen for kg injeksjonsmiddel, betalte byggherren leie av injeksjonsrigg og mannskap for å utføre injeksjonen. Leietiden måltes fra injeksjonen starter til den var avsluttet (dvs ikke tid for boring), og i tillegg opp- og nedrigging. Timekostnadene for leien er angitt til 3361 kr/time [10].

Reparasjoner og herdetid/ventetid etter avsluttet injeksjon ble ikke inkludert i timekostnadene for leien av rigg. Timekostnader for ev. venting etter avsluttet injeksjon ble regulert separat.

Betalningsmodellen som beskrevet ovenfor var gunstig for dette prosjektet fordi veldig mye masse gikk inn, på omtrent like lang tid som i mange andre prosjekter. Forbrukt masse var ca tredobbelt av det som var beskrevet i kontrakten. Delt kontrakt ga derfor et mye riktigere bilde av kostnadene.

I FoU-prosjektet er Hagantunnelen prioritert pga den omfattende tetningsinnsatsen som er blitt utført i området med liten overdekning og meget åpne sprekker, i tillegg med krav på begrenset utbredelse av massen. Oppfølgingen under injeksjonsarbeidene fra byggherren sin side var større enn vanlig, men nødvendig siden forholdene mht trasé, bergart og overdekning ble ansett for vanskelige. Utførelsen av injeksjonen ble basert på retningslinjene i Intern rapport nr. 2151 fra Vegdirektoratet – "Berginjeksjon" [3].

Tetthetskravene er hentet i beskrivelsen [7] og lekkasjeforholdene i tunnelen blir rapportert ut fra resultat av målinger på byggeplassen. Informasjonen angående injeksjonsarbeidene ble utdypet ved intervjuer av nøkkelpersoner som var med på anlegget.

## 4.2 Tetthetskrav og lekkasjeforhold

Erfaringsbaserte krav til tetthet ble satt opp under prosjekteringen i dialog med konsulenten som hadde utarbeidet den hydrologiske rapporten [9]. Begrensning av maksimum innlekkasje for ulike strekninger i tunnelen ble satt opp i beskrivelsen [7], som følger:

### ”Krav til innlekkasje

Profil påhugg – 1400;	Ingen spesielle krav for strekningen. Enkeltlekkasjer injiseres ved målt innlekkasje > 10 l/min samlet fra sonderhull.
Profil 1400 – 1600;	Maks innlekkasje 10 l/min pr. 100 m tunnel. Injeksjon utføres uansett ved målt innlekkasje > 5 l/min samlet fra sonderhull.
Profil 1600 – 2200;	Maks innlekkasje 5 l/min pr. 100 m tunnel. Systematisk forinjeksjon.
Profil 2200 – 2900;	Maks innlekkasje 10 l/min pr. 100 m tunnel. Injeksjon utføres uansett ved målt innlekkasje > 5 l/min samlet fra sonderhull.
Profil 2900 – påhugg;	Ingen spesielle krav for strekningen. Enkeltlekkasjer injiseres ved målt innlekkasje > 10 l/min samlet fra sonderhull.”

Innlekkasjene til Hagantunnelen ble ikke målt ved terskelmåling under selve tunneldrivingen, men etter gjennomslaget sommeren 2002. Tre terskler ble installert langs tunnelen; en støpt som gav stabile verdier, to av løsmasser som gav mer varierende målinger. Terskelmåling av innlekkasjen til tunnelen ble utført under en periode om fire dager i månedskiftet juli – august 2002 [11]. Resultatene er sammenstilt i tabellen nedenfor.

Tabell 2: Innlekkasjer til Hagantunnelen

Pel. 1680-2200	30 juli 2002	2,3-3,5 l/min pr. 100 m
	31 juli 2002	2,5 l/min pr. 100 m
	1 august 2002	5,0 l/min pr. 100 m
	2 august 2002	6,9 l/min pr. 100 m
Pel. 2200-2850	30 juli 2002	17-22 l/min pr. 100 m
	31 juli 2002	22 l/min pr. 100 m
	1 august 2002	14 l/min pr. 100 m
	2 august 2002	18,5 l/min pr. 100 m

Gjennomsnittet lå på ca 4 l/min pr. 100 m mellom profil 1680-2200 (krav 5 l/min pr. 100 m) og nesten 19 l/min pr. 100 m mellom profil 2200-2850 (krav 10 l/min pr. 100 m). Etter samråd med konsulent, ble en del mer innlekkasje bevisst tolerert der hvor kravet til tetthet lå på 10 l/min pr. 100 m, fordi grunnvannsspeilet ble konstatert uberørt.

I det kritiske området mellom profil 1600-2200 hvor tetthetskravet lå på 5 l/min/100 m ble det installert manometre i tre sonderhull. Hullene var 60 m lange, nær horisontale, og med 30° vinkel mot tunnelaksen. Opplegget var formålstjenlig fordi alle på stuff kunne lese av poretrykket på manometrene underveis i drivingen [12] for å sjekke at grunnvannsnivået var stabilt. I ett av hullene hadde en også mulighet for vanninfiltrasjon, hvilket ble benyttet ved boring av injeksjons-skjerm. Innlekkasjen til tunnelen var av og til så stor at tiden som gikk fra et hull var boret til en pakker ble installert var kritisk.

### 4.3 Rutinemessig injeksjon

Herunder gis et sammendrag om injeksjonsarbeidene for Hagan-tunnelen, som ble systematisk utført i områdene med liten fjelloverdekning og tetthetskravet 5 l/min pr. 100 m mellom pel ca 1730-2200 og sporadisk i øvrig. På tross av spesielle forhold (se side 3-2) blir injeksjonsarbeidene definert som rutinemessig i stedet for tilpasset. Årsaken er omfanget; overdekningen er bare 8-10 m, med setningsømfintlige løsmasser ovenfor, langs hele 600 m.

Den utdypede informasjonen er innhentet først og fremst gjennom intervjuer med Bjørn Helge Klüver og Edvard Iversen (Vegteknisk avdeling). Oddbjørn Gule (SvA) og Guro Grøneng (tidligere SvA, nå Geovita AS) har bidratt med tilleggsopplysninger fra byggherren. Informasjon fra entreprenøren er blitt innhentet fra Yngvar Engebråten (AF/SRG).

#### Organisering

Injeksjonsarbeidene ble utført av et stuffmannskap på 2-3 mann. Materialleverandøren Elkem hadde innledningsvis en gjennomgang på anlegget med entreprenøren. Entreprenøren AF/SRG benyttet såkalt Nordsjøordning (2 uker på, 1 uke av) og arbeidstiden var 06-16 for dagskiftet og 16-02 for kveldsskiftet.

Som byggherre var SvA ansvarlig for prosedyren som var fastlagt i kontrakten etter et forslag laget av Grøner AS. Etter granskning av anbudspapirene på Vegteknisk avdeling ble anslåtte injeksjonsmengder økt betraktelig, fra 600 til 900 tonn. Virkelig forbruk ble enda større, rundt 2400 tonn (se figur 2 og fremover).

Oppfølgingen under arbeidene har fra byggherren sin side vært større enn vanlig i det at to mann fra Vegteknisk avdeling, med lang injeksjonserfaring, har vært tilstede på prosjektet. Erfaringsoverføring til andre som fulgte opp injeksjonsarbeidet ble også sikret. Byggherren ga bestilling på injeksjon fortløpende, men entreprenøren var med og vurderte situasjonen og ev. forandringer i opplegget.



Foruten normal egenkontroll under arbeidet, har byggherren vært mye tilstede på stuff og fulgt arbeidet med injeksjon. Det ble ikke utført noen spesielle materialkontroller på sementen, men massens konsistens ble sjekket og inngangen av masse ble fulgt opp.

Injeksjonen ble av AF/SRG dokumentert med automatisk registrering på riggen, hvilket fungerte bra. Dokumentasjonen anga forbruk av tid og masse (i liter) og sluttrykk (i bar) for ulike resepter (dvs. v/c-tall) for hvert hull [13]. Likeså ble mengde masse (i kg) av de ulike injeksjonsmidlene som ble brukt angitt automatisk. Det var altså mulig å følge utviklingen for hvert hull.

Den digitale dokumentasjonen (dvs ikke bearbeidet data) ble ikke krevd overlevert, men noen stikkprøver ble studert. Skjema for boring av sonder-, injeksjons- og kontrollhull, hvor slepper og borvann ble registrert, ble skrevet for hånd og utlekkasje av vann blir ført opp på samme skjema. Entreprenøren fikk betalt for material- og tidsforbruk ut fra fremlagt dokumentasjon (se side 4-2).

Injeksjonsopplegget, for eksempel retningen på injeksjonshull og v/c-tallet, ble endret etter forholdene på plassen, spesielt når tunnelen passerte nære grunnvannsbrønner eller kjellere.

#### Forundersøkelser

Kartleggingen av fjellet i tunnelen ble utført systematisk og geologien hadde dermed direkte innvirkning på valg av injeksjonsmasse eller injeksjonsskjermens utforming. Tunnelen ble kartlagt av Bjørn Helge Klüver og Edvard Iversen fra Vegteknisk avdeling, samt Guro Grøneng fra Statens Vegvesen Akershus.

Kartleggingen påviste de viktigste bergartsgrensene langs tunneltraséen. Det er hornfels fra nordlige påhugg ved Slattum (pel ca 3700) til ca pel 1850, hvor syenitt med liten fjelloverdekning overtar. Likeså er det et område med syenitt ved pel 2750, i den delen av tunnelen hvor bergoverdekningen er god (se figur 3 på side 4-10). Gjennomsnittsforkonsumet av injeksjonsmasse, for de ulike bergartene, presenteres i Tabell 3 (side 4-16).

Kartlegging av fjellet i sonderhull ble ikke utført, men boringen ble MWD-registrert (dvs boreloggen viser slepper / vann i fjellet). Borekaksen ble studert; syenitten er lysere og hornfelsen er brunlig / mørk.

Under prosjekteringsfasen ble tradisjonelle geologiske forundersøkelser utført; feltkartlegging på overflaten samt to kjerneborehull. Det ble utført Lugeonmålinger i kjerneborehullene og disse påviste store lekkasjer. Det ene hullet er plassert i den største sonen, men er boret mye på skrå i forhold til tunnelen. Hullet ga derfor begrenset informasjon.

I tillegg ble det framsatt ønsker om bruk av refraksjonsseismiske målinger, samt borehullslogging med såkalt Televiewer i vanlige hammerborede hull (i stedet for dyrere kjerneborede hull).

I beskrivelsen ble det angitt at kostnaden for måling av vannlekkasje i forbindelse med sonderboring inkluderes i enhetsprisen, men at ev. vanntapsmålinger bestilles ekstra av byggherren.

Utlekkasjemålinger av sonder-, injeksjons-, og kontrollhull ble ikke registrert i området med systematisk injeksjon. Det var ikke mulig fordi en måtte sette i og stenge pakkerne med en gang hullet var boret og så tette etter hvert. Berggrunnen var så åpen at grunnvannstanden ellers fort ville blitt påvirket.

#### Injeksjonsskjerm

Boreutstyret var en standard Atlas tunnelrigg med stanghåndtering og en AMV-rigg uten stanghåndtering. Begge riggene var utstyrt med Bever Control for registrering av skjermen på hver stoff (nord og sør). På tross av at boreavviksmåling var godt beskrevet i kontrakten, ble det ikke bedømt å være nødvendig her. Hulldiameter var 51 mm. Det var hardt å bore i hornfelsen; en var nede i 0,5 m/min, mens man i syenitten boret ca 2-3 m/min.

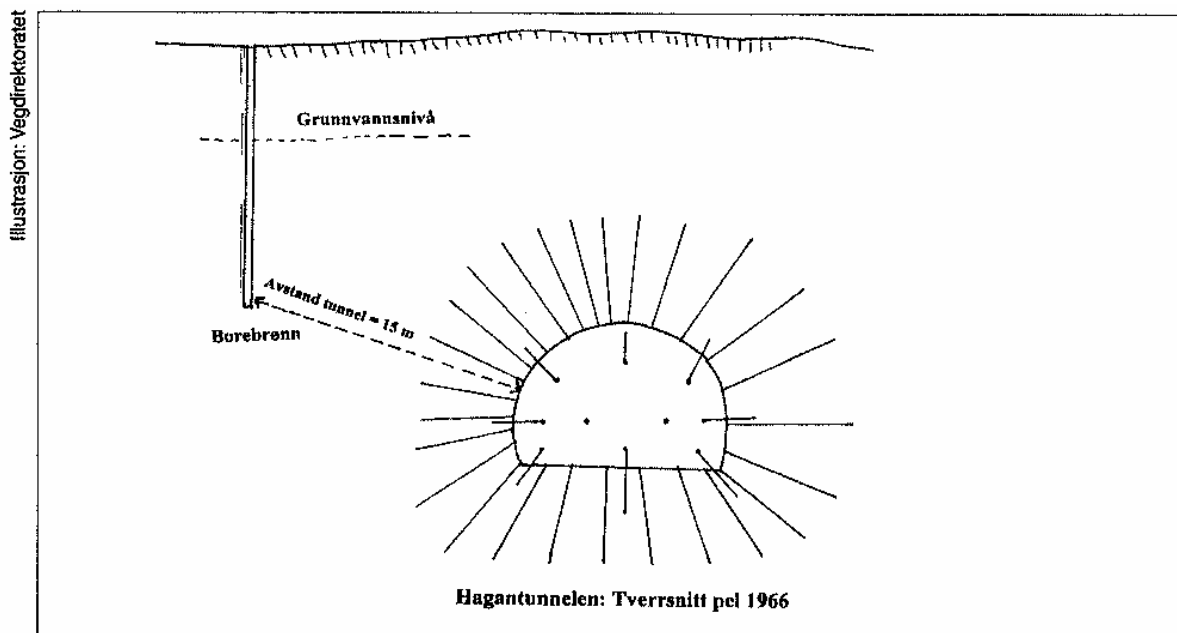
Spyling av borehullene med spesielle dyser og høyt trykk fantes med i beskrivelsen, men ble ansett for å være mindre effektivt enn den vanlige fremgangsmåten. Hullene ble derfor rengjort for kaks ved at stengene ble trukket frem og tilbake med borevannstrykk og trykkluft på. Det er viktig å fortsette å spyle helt til siste stang. Dette ble utført i alle typer bergarter.

Hullengden for sonder/kontroll- og injeksjonshull var vanligvis 24 m (med avvik i spesielle tilfeller pga geometri eller ved flere runder). Bortsett fra der det pga rystelsesrestriksjoner var nødvendig å korte ned salvelengden, ble 3 salver à 5 m sprengt. Overlappen ble altså ca 9 m. Borehullene hadde 5 m stikning fra av hullenden til tunnelveggen i hengen og veggene. Nede i sålen var stikningen 6 m.

Hullantallet i skjermen varierte mellom 20-45, inkludert hull inne i profilet for å unngå lekkasje forfra. Det ble gjennomgående satt 6-10 hull i stoffen. Til å begynne med var entreprenøren skeptisk, men en innså snart hvor viktig dette var ved åpent fjell med slepper. Dermed var hullavstanden i kransen ca 1-1,5 m.

En prøvde ikke å sløyfe hullene i stoffen siden det var store sprekker med utlekkasje av vann i alle retninger, også forfra. I begynnelsen ble det gjort forsøk med at stoffhullene injiserte med Thermax. Resten av skjermen ble injisert med sement som vanlig.

Hullene ble normalt fordelt jevnt rundt tverrsnittet, men ved liten overdekning eller nærhet til en brønn ble det plassert flere hull i det området (se figur på neste side, [14]). Å legge en sperreskjerm mot brønnene ble vurdert som fornuftig. Flere hull gjør at v/c-forholdet kan reduseres ytterligere så at trykkfallet økes og utbredelsen av masse fra tunnelen blir mindre.



Figur 1 Redusert stikning og tettere boremønster ved pel 1966 i Hagantunnelen

#### Injeksjonsmiddel

Til å begynne med ble det benyttet en del mikrosement (Ultrafin 12), men den systematiske injiseringen i den åpne syenitten ble etter hvert utført med lavt v/c av industrisement. Da enn innså at masseforbruket ville bli meget høyt var det viktig å dreie bruken mot billigste masse. I den mindre permeable hornfelsen ble også mikrosement brukt.

Leverandørens blanderesepser ble brukt. Tilsetningsstoffer var 2-3% av tørrstoffvekt med SP40 og GroutAid. Vannsementtallet lå mellom 1,1-0,4; i syenitten vanligvis 0,7-0,4 og i hornfelsen 1,1-0,4. I mikrosementen Ultrafin 12 ble det brukt en høyere andel GroutAid og noe høyere v/c, ca 1,1. Iblant ble dog ikke GroutAid benyttet, fordi det er mer fornuftig ikke å bruke den når man trenger motstand for å få begrenset utbredelse.

I det åpne berget ble det brukt et meget lavt vannsementtall (0,4-0,5) for å oppnå trykkoppbygging og begrense utbredelsen. Men tydelige flytvansker og tendens til tilstopping i pumper, koblinger og staver gjorde at en ble nødt til å øke vannsementtallet til 0,5-0,55.

Det ble ved en del anledninger tilsatt muring (Zugol, dvs bark som også brukes for å ta opp oljesøl) eller man lot hullet hvile seg for så å gå på det igjen etter 1-2 timer. En risikerer med denne praksis at injeksjonshullet blir blokkert, men med et relativt stort antall hull ble det vurdert som av mindre betydning og det ble ansett som riktig fremgangsmåte.

Nøkkelegenskaper for sementen som kornstørrelse, viskositet, vannsementtall eller separasjonsstabilitet ble ikke kontrollert med målinger. Separasjon ble unngått gjennom tilsats av SP40 og silika, resultatet noteres ved at pumper, slanger og koblinger ikke går tett.

Ikke heller herdetiden ble målt for sementen, men masse sattes i kopper som egenkontroll for ikke å få herdning av materialet i utstyret. I beskrivelsen stod det at herdetid før boring av kontrollhull normalt kan settes til 15 minutter, men kontrollhull ble ikke boret før etter en salve. Brukt injeksjonsmasse trengte lengre tid for å herde. Det ble sagt om mauring at salven trolig presser den lenger inn og at den setter seg godt.

#### Injeksjonsutstyr

Kravet i beskrivelsen ble etter vurdering på Vegteknisk avdeling endret til at pumpen skulle klare minst 70-80 l/min ved lik kapasitet i bar for trykket. Sluttrykket lå ofte på ca 100 bar. På injeksjonsriggen, som ble brukt på begge stuffene, fantes det tre pumper og en mikser.

Kapasiteten på ca 50 l/min for denne ene mikseren var ikke alltid tilstrekkelig, når pumpene gikk for fullt og trengte 15-20 l/min hver. Iblant ble også stopp i blandningen grunnet propp i sementsiloen.

Bruk av såkalt manifold blir ansett for å være forkastelig fordi en ikke har kontroll på hva en gjør. En vet ikke i hvilket hull massen går og det er lett at det blir stopp noen steder uten at en merker det. Det ble ikke brukt flere enn 2-3 slanger under injeksjonen. Riggen hadde 3 separate linjer. Blandingen var vektstyrt og injeksjonsforløpet ble godt dokumentert automatisk, hvor trykk og inngang ble registrert for hver slange.

Pakkerne var mekaniske Codan som ble oppspent for hånd, plassert ca 4 m ut fra konturen. Pakkere ble oftest satt inn etter hvert under boringen og stengt direkte fordi det var så mye lekkasje.

Pakkeren fungerte dårlig, spesielt etter at hullet hadde hvilt satt den ikke godt fast. Forklaringen kunne være at det hadde kommet masse mellom pakkeren og berget, og at mikroement med GroutAid smører overflatene.

#### Planlagt utførelse

Hullene ble rengjort gjennom spyling med vann direkte etter boringen. Generelt startet injeksjonen med 2-3 slanger i midten av sålen og deretter gikk en opp på hver side. Hvis det var nærhet til brønner for eksempel (se figur 1, side 4-7) ble rekkefølgen for injeksjon tilpasset til det. Da startet en gjerne i retning brønnen for å kunne la det hullet hvile mens et hull på andre siden ble injisert, og siden gå tilbake for å fortsette.

I beskrivelsen ble det angitt at normalt skal injeksjon avsluttes med så høyt trykk som forholdene på stedet tillater. Det ble brukt et sluttrykk mellom 80-100 bar, vanligvis 90-100 bar. Begrensningen i trykket var avhengig av masseinngang og ikke av overdekningen.

#### Endringer i utførelse

Det ble brukt samme organisasjon (dvs anleggsledelse) for hele tunnelen, men AF/SRG hadde ulike mannskap på nordlige og sørlige side. Det ble endret på antallet hull (fra 25 til 14) og salver mellom injisering (fra 3 til 4). På den strekningen som var vanskeligst og minst kjent ble det boret hull fra tunnelen for kontroll av poretrykket, 3 st 60 m lange ca 30° ut fra tunnelens driveretning.

## Tetteresultat

Inntrengningsdypet for injeksjonen, som teoretisk sett skulle være rundt 5-6 m som stikningen var satt til, ble ikke kontrollert med for eksempel kjerneboring. Det ble beregnet til å være mellom 4-15 m. Noen ganger lekket det når 3 m bolter ble satt og da måtte en etterinjisere med polyuretan i boltehullene.

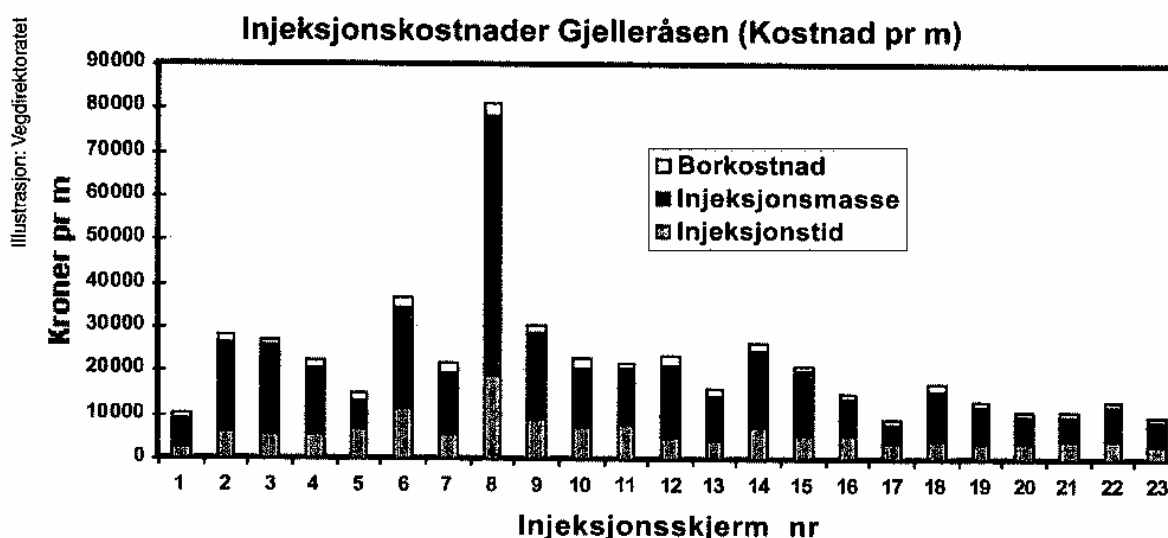
Det ble også etterinjisert med sement på to plasser – dels i en leir-sone i dårlig fjell i området med sporadisk injeksjon, dels pga for lite overlapp ved gjennomslaget.

Tetningseffekten i Hagantunnelen er konstatert tilstrekkelig og det oppsatte kravet til innlekkasje er oppfylt. Prognose for potensiell innlekkasje var ikke satt opp. Innlekkasjen ble målt etter gjennomslag til i gjennomsnitt 4 l/min pr. 100 m hvor kravet var 5 l/min pr. 100 m (se tabell 2, side 4-3). Hvor kravet var 10 l/min pr. 100 m ble det målt til nesten 19 l/min pr. 100 m, men det ble tolerert fordi grunnvannet var uberørt. De største lekkasjene kom fra området der reduksjon av grunnvannsnivået ikke ga skader på vegetasjon eller brønner.

Det var behov for flere runder forinjisering tre ganger, og da to runder fra samme stoffen. Det var bestemt på forhånd at 100% av tunnelen skal vannsikres.

Masseforbruket for hele tunnelen var av konsulenten bedømt til ca 600 tonn, men Vegteknisk økte prognosen til 900 tonn. Den mengden masse ble fort brukt opp og til slutt havnet forbruket på ca 2400 tonn, fordelt på ca 64% industrisement, 23% mikroement, 12% GroutAid og 1% Thermax.

Injeksjonskostnadene (boring, injeksjonstid, masse) på Gjelleråssiden varierte mellom ca 10000 og 40000 kr/m tunnel (se figur 2).

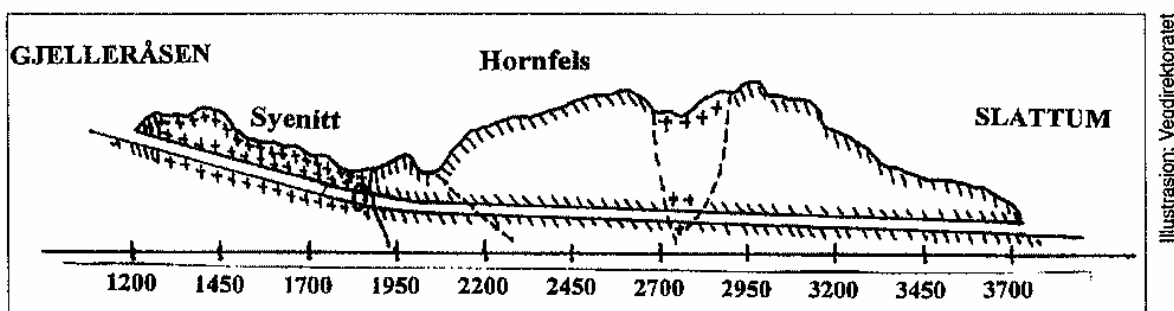


Figur 2 Injeksjonskostnader for sørlige delen av Hagantunnelen

Unntaket på 80000 kr/m tunnel ved skjerm 8 kom av at det der ble tillatt å bruke en del Thermax for å begrense utbredelsen av injeksjonsmasse [14]. Tanken var å injisere en sperreskjerm over profilen. Resultatet var ikke bedre enn for de andre skjermene, men kostet vesentlig mye mer. En var heller ikke sikker på at skjermen havnet der den skulle.

Det er også verdt å notere at injeksjonstiden for skjerm 8 var 57 timer, mens gjennomsnittet på Gjelleråsen lå på 26 timer/skjerm. Bruken av Thermax var en ny oppgave for entreprenøren og det ble angitt å pumpe så lenge det gikk inn masse. Det er også meget viktig å hele tiden porsjonere riktig mengde av tilsatsene og ikke blande for store satser, samt å vaske utstyret ofte så det ikke går tett.

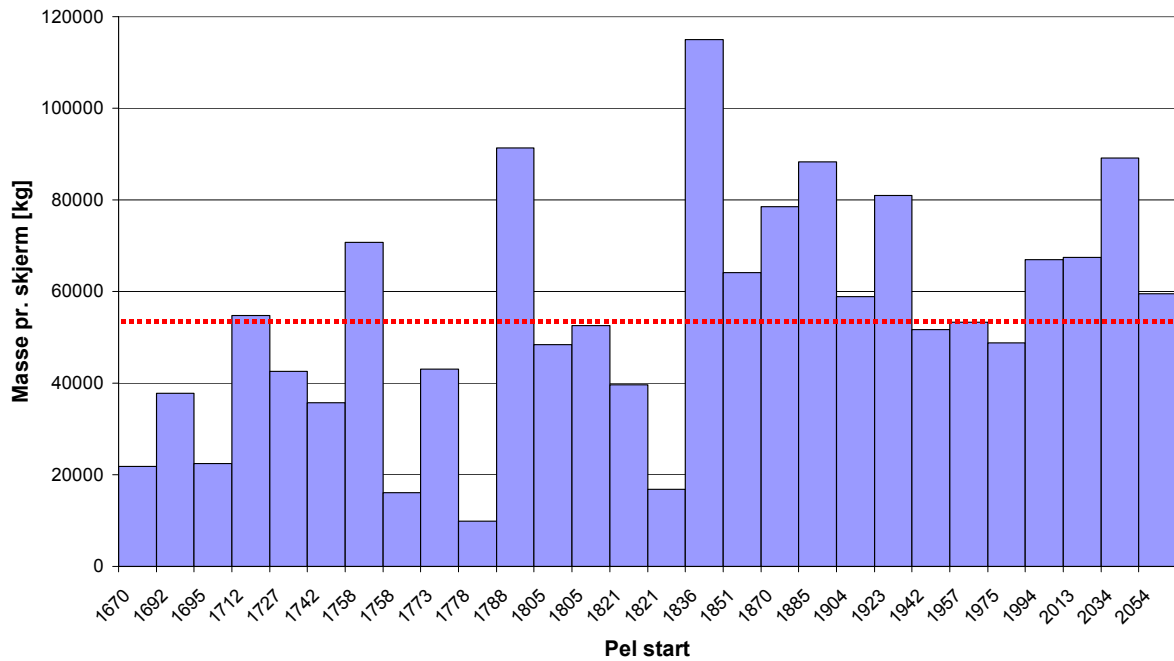
På sidene fremover viser diagrammer gjennomsnittstall for forbruk av masse for de ulike injeksjonsskjermene i tunnelen. Grunnlaget for gjennomsnittstallene er basert på data fra anlegget. I diagrammene er det tydelig at det var større forbruk av masse i den sørlige delen av tunnelen enn i den nordlige delen – gjennomslaget lå på ca pel 2082 (se figur 3).



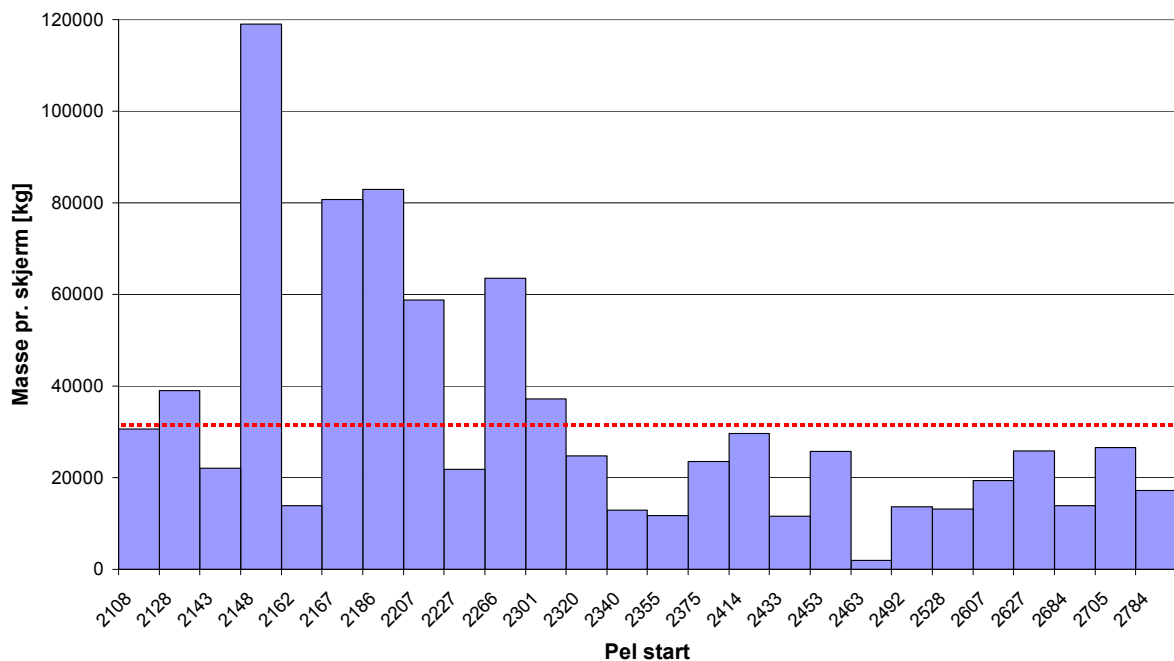
Figur 3 Skjematisk tegning av traseen for Hagantunnelen

Forbruket speiler forholdene rundt tunnelen som fra sør er drevet gjennom meget permeabel syenitt og til dels intenst oppsprukket hornfels, for deretter å komme inn i hornfels med mer lukket struktur. I den oppsprukne syenitten var overdekningen liten, mens det meste av hornfelsen hadde relativt stor overdekning. Systematisk injeksjon ble utført først og fremst i områdene med liten fjelloverdekning, og tetningsinnsatsene var der betydelige.

De to diagrammene nedenfor viser mengdene for hver skjerm i tunnelen, for den systematiske injeksjonen på Gjelleråsensiden og den mer sporadiske injeksjonen på Slattumsiden.



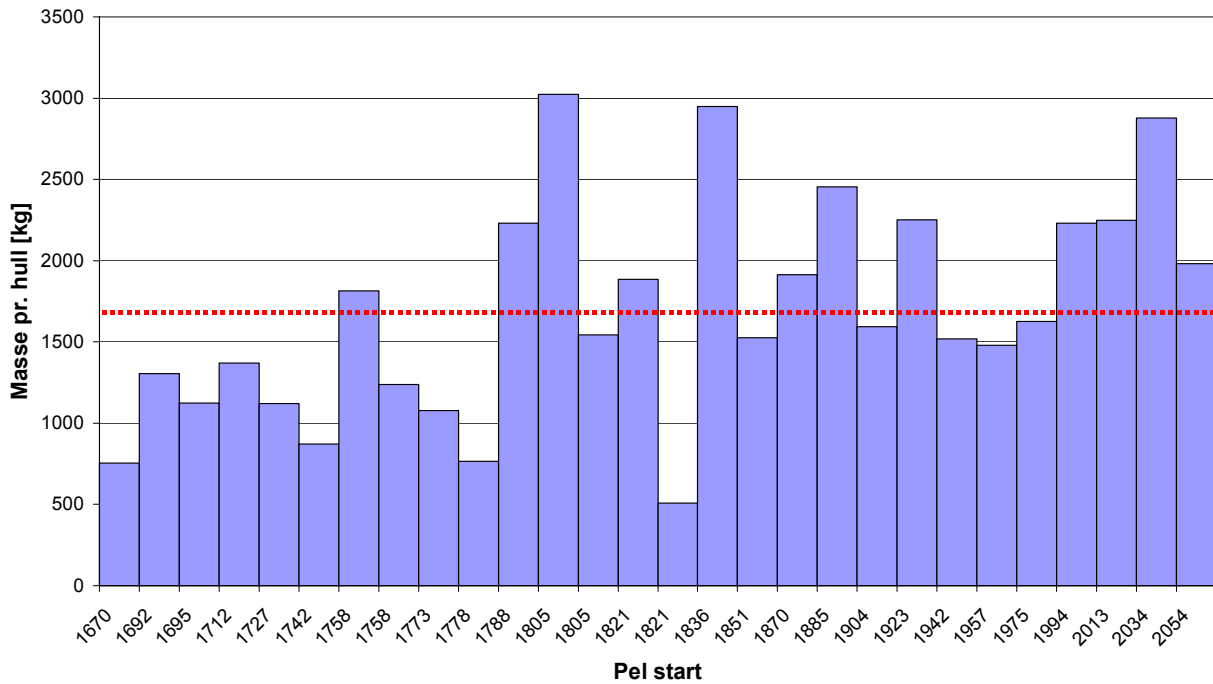
Figur 4 Total mengde og fordeling av injeksjonsmasse per skjerm for Gjelleråsensiden



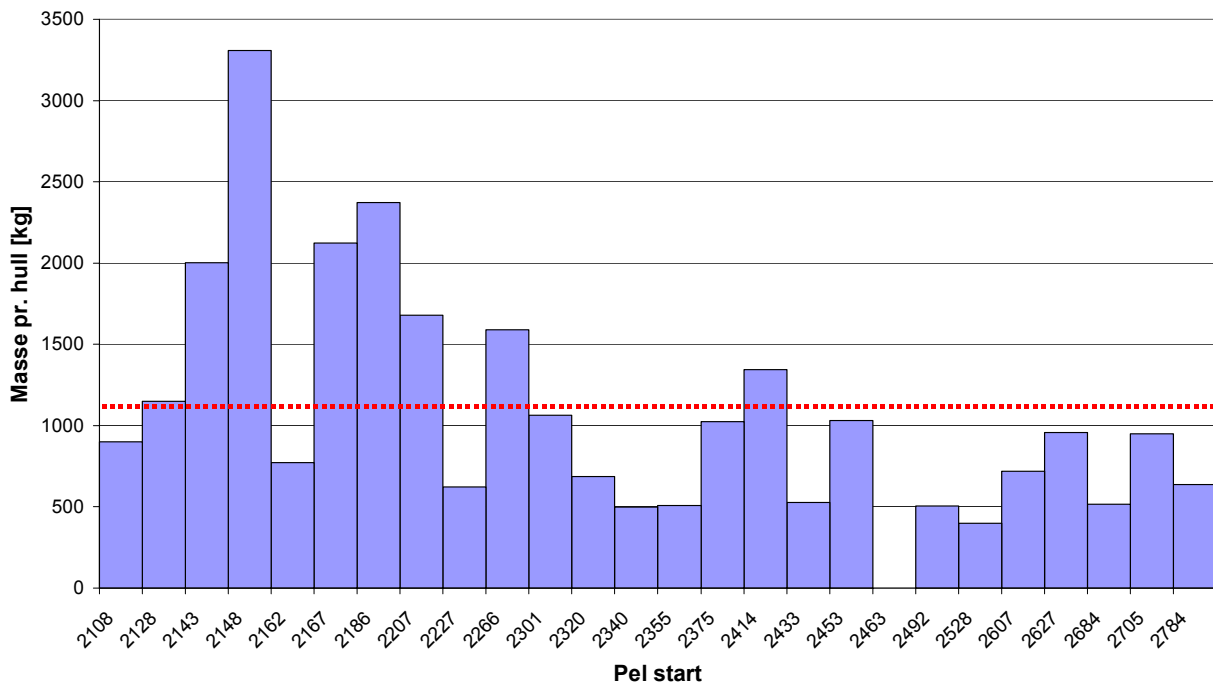
Figur 5 Total mengde og fordeling av injeksjonsmasse per skjerm for Slattumsiden



Forbruket av injeksjonsmiddel per injeksjonshull var for hele tunnelen i gjennomsnitt 1418 kg/hull. På Gjelleråsensiden lå middelverdien per hull på 1689 kg/hull og på Slattumsiden var den 1115 kg/hull.

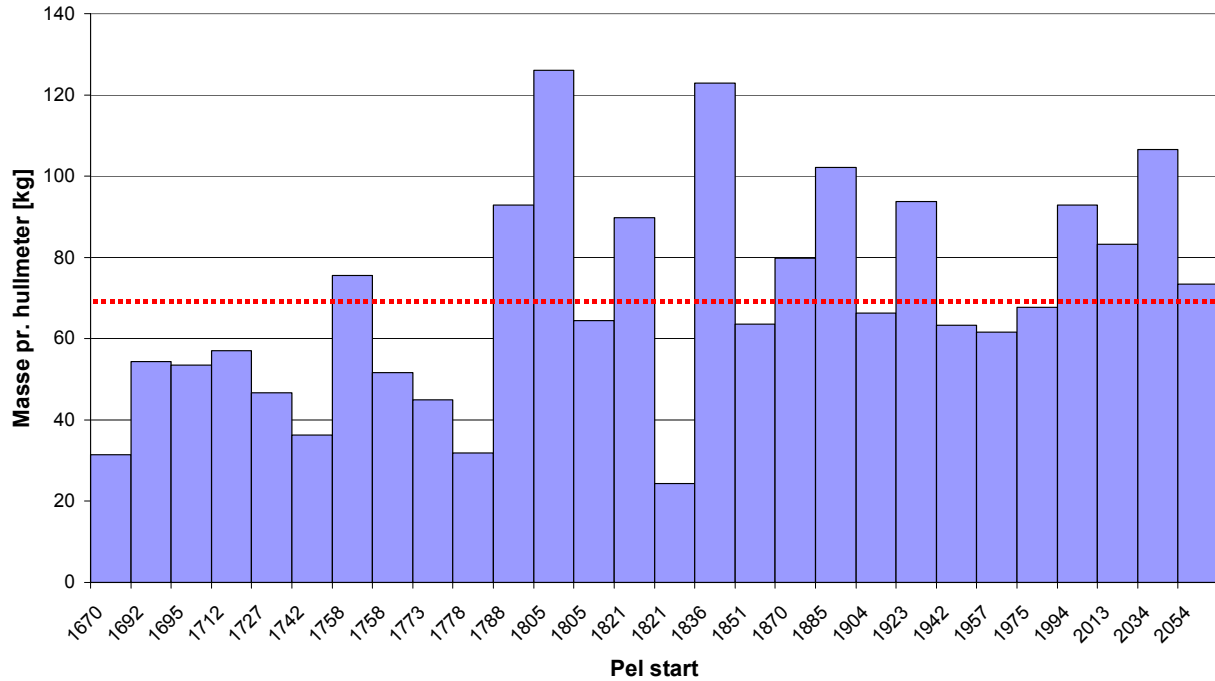


Figur 6 Injeksjonsmasse per injeksjonshull for Gjelleråsensiden

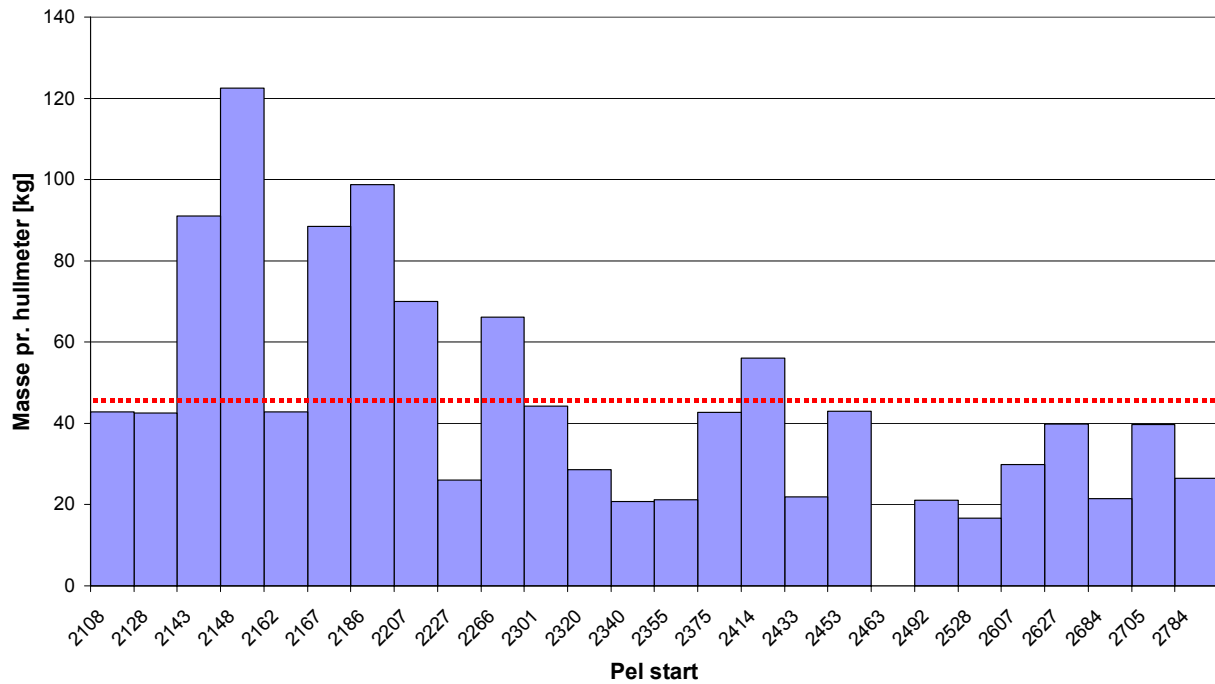


Figur 7 Injeksjonsmasse per injeksjonshull for Slattumsiden

Forbruket av injeksjonsmiddel angitt som masse per meter injeksjonshull var i gjennomsnitt for hele tunnelen 59 kg/m hull. Middelerdien lå på Gjelleråsensiden i sør på 69,9 kg/m hull og på Slattumsiden i nord lå den på 46,6 kg/m hull.

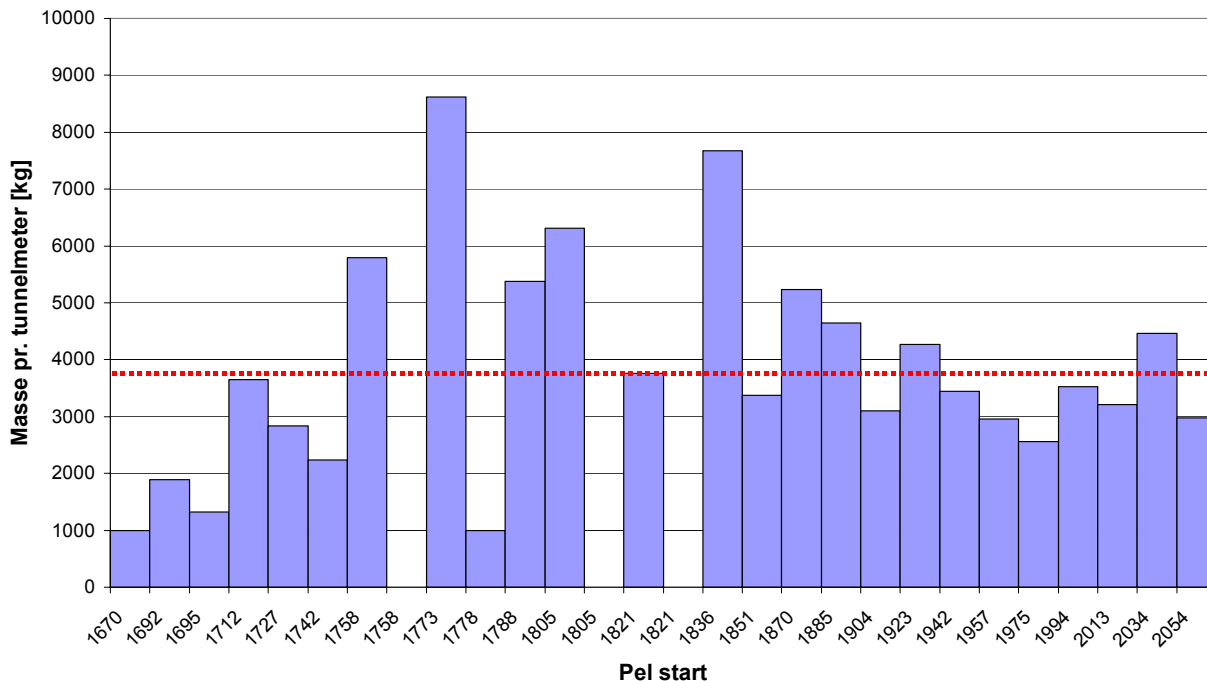


Figur 8 Injeksjonsmasse per meter injeksjonshull for Gjelleråsensiden

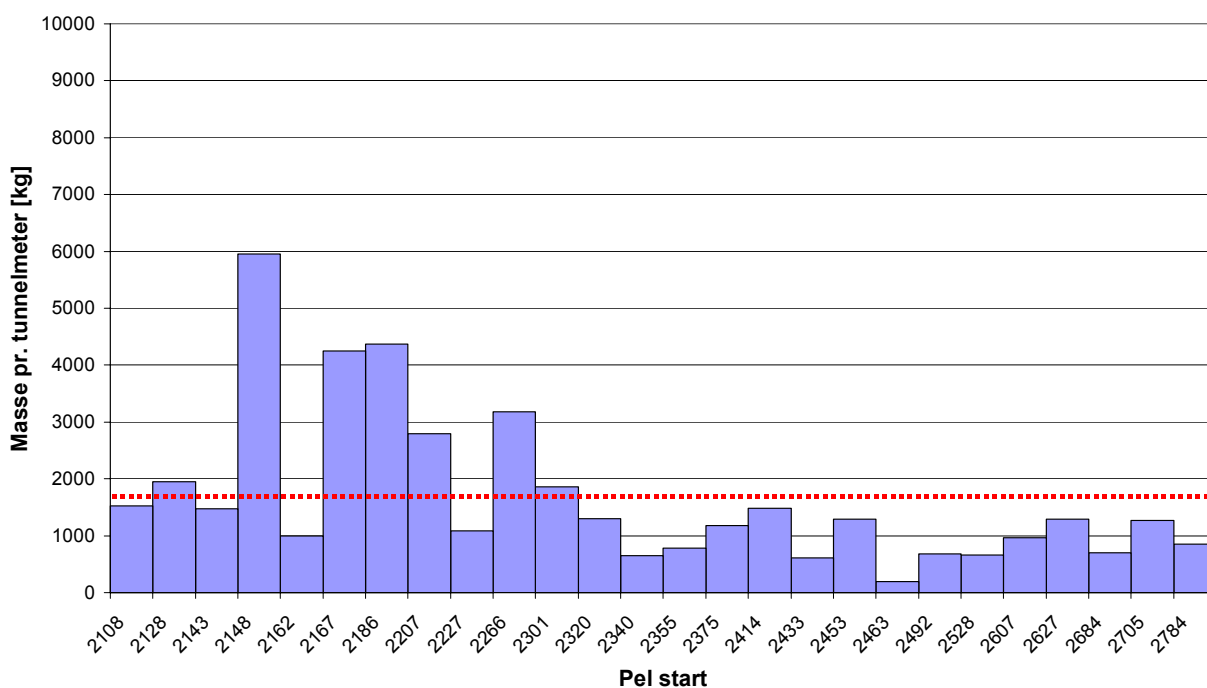


Figur 9 Injeksjonsmasse per meter injeksjonshull for Slattumsiden

Forbruket av injeksjonsmiddel angitt per meter injisert tunnel var i gjennomsnitt for hele tunnelen 2716 kg/m injisert tunnel, eller uttrykt mht tunnelens omriss; 78 kg/m<sup>2</sup> injisert tunnel. Middelerdien lå i sør på 3808 kg/m injisert tunnel (eller 109 kg/m<sup>2</sup> injisert tunnel) og i nord på 1667 kg/m injisert tunnel (eller 48 kg/m<sup>2</sup> injisert tunnel).

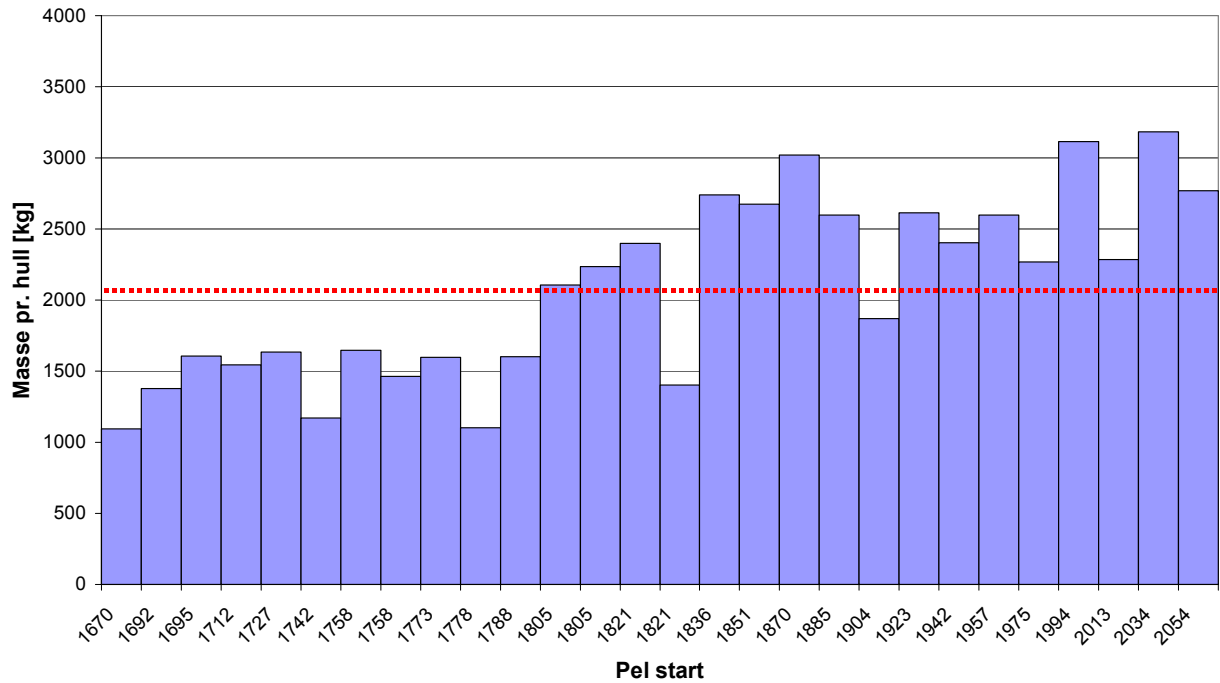


Figur 10 Injeksjonsmasse per meter injisert tunnel for Gjelleråsensiden

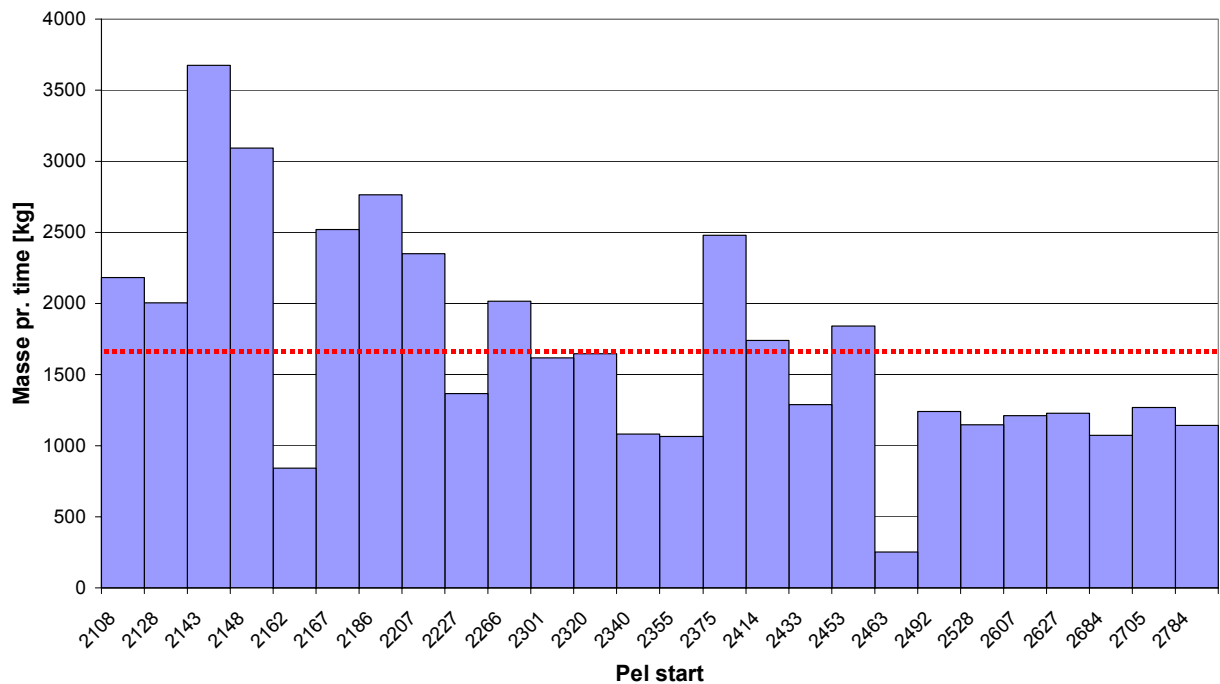


Figur 11 Injeksjonsmasse per meter injisert tunnel for Slattumsiden

Forbruket av injeksjonsmiddel angitt som masse per time sier noe om kapasiteten av injeksjonen. Den var i gjennomsnitt for hele tunnelen 1893 kg/time, eller på Gjelleråsensiden 2075 kg/time og på Slattumsiden 1698 kg/time.



Figur 12 Injeksjonsmasse per time for Gjelleråsensiden



Figur 13 Injeksjonsmasse per time for Slattumsiden

Tabellen nedenfor viser gjennomsnittsforkbruket av injeksjonsmasse for strekninger av tunnelen med ulike bergarter og krav på tetthet. Grunnlaget er basert på data fra anlegget samt fjellkartleggingen.

**Tabell 3: Masseforbruk [kg] for ulike bergmasseforhold i Hagantunnelen**

Pel nummer, bergart, samt tetthetskrav	Antall skjærmer	Antall runder	Masse pr skjerm	Masse pr hull	Masse pr m hull	Masse pr m tunnel	Masse pr time
ca 1400-1600, syenitt, 10 l/min pr. 100 m	0	0	0	0	0	0	0
ca 1600-1850, syenitt, 5 l/min pr. 100 m	13	16	44933	1474	62,7	3958	1670
ca 1850-2200, hornfels, 5 l/min pr. 100 m	19	19	62934	1912	78,1	3382	2551
ca 2200-2900, hornfels, 10 l/min pr. 100 m	19	19	23837	848	35,3	1201	1424

Som tabellen viser ble ikke injeksjon utført i den sørligste delen av tunnelen (pel 1400-1600), hvor tetthetskravet var 10 l/min pr.100 m. I det området ble det utført utlekkasjemålinger fra 3-4 sonderhull, hvilke indikerte tørt fjell. Utlekkasjemålinger lå også til grunn for beslutning om injeksjon mellom pel ca 2200-2900 i den nordlige delen av tunnelen.

Detaljstudium av masseforbruket i tunnelen viser forskjeller mellom områder med tetthetskrav 5 eller 10 l/min pr. 100 m. Høyere forbruk i strekninger med tetthetskrav 5 l/min pr. 100 m viser at behovet for tetting virkelig var stort her.

Det store forbruket per time i hornfelsen mellom pel 1850-2200 viser tydelig at den var intenst oppsprukken, mens det relativt sett lavere forbruket per time mellom pel 2200-2900 indikerer den mer lukkede strukturen på hornfelsen i området for sporadisk injisering. Mengden masse per time, eller kapasiteten, ligger stort sett høyt sammenlignet med tunneler i tidligere studier [1], [2], [4] (se tabell i 'Sammendrag').

## 5 OPPSUMMERING HAGAN

Hagantunnelen er sørfra drevet ca 600 m gjennom meget permeabel syenitt og til dels intenst oppsprukket hornfels, for deretter å komme inn i hornfels med mer lukket struktur og relativt stor overdekning. I de kritiske partiene i sør varierte overdekningen fra 6 til 10 m, og der er bostedsbebyggelse fundamentert på setningsømfintlige masser over tunnelen. Kravet til tetthet var differensiert over ulike strekninger med henholdsvis 5 eller 10 l/min pr. 100 m.

Det ble forinjisert systematisk i områdene med liten fjelloverdekning og tetthetskravet 5 l/min pr. 100 m, og innsatsene for tetting der var omfattende. Hovedelementene i injeksjonsprogrammet og erfaringene kan beskrives som følger:

- Høy grad av tilstedeværelse og dermed tydelig styring fra byggherren sin side.
- Standardisert injeksjonsopplegg med høy kapasitet og tids-effektiv gjennomføring.
- Store masseinnganger og iblant lang injeksjonstid i området med liten overdekning.
- Grunnvannstanden ble observert og kontrollert under boring og injeksjon, i det kritiske området også i hull boret fra tunnelen.
- Normalt bare én injeksjonsrunde, noe som har vært en viktig målsetning.
- Høy oppboringegrad; 25-40 hull/skjerm (ca 62-85 m<sup>2</sup> tverrsnitt), lengde 24 m, alltid inkludert 6-10 hull i stuff.
- Utlekkasjemåling av vann fra borehull i injeksjonsskjerm kun i de deler av tunnelen som ble injisert sporadisk.
- Industrisement (64%) eller mikrosegment Ultrafin 12 (23%) med GroutAid og SP40-tilsetning.
- Varierende v/c-tall, mellom 1,1 til 0,4, så lav som injeksjonsteknisk mulig, for å begrense utbredelsen.
- Høyt injeksjonstrykk, varierende beroende på masseinngang snarere enn overdekning, mellom 80-100 bar.

Den systematiske forinjeksjonen har gitt tilsiktet tetthet, i gjennomsnitt målt til 4 l/min pr. 100 m i områdene hvor 5 l/min pr. 100 m var kravet. Utenfor det området hvor kravet var 10 l/min pr. 100 m og sporadisk injeksjon ble utført, ble det målt 19 l/min pr. 100 m. Dette avvik ble tolerert fordi grunnvannstanden ble konstatert uberørt. For måling av innlekkasjen ble tre måleterskler bygd; en av betong som fungerte bra og to av løsmasser.

## REFERANSER

- [1] *Injeksjon. Erfaringer fra utvalgte tunnelprosjekter.* Rapport nr. 2 fra Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Intern rapport nr. 2233 fra Vegdirektoratet, signert Torkild Åndal, Helen Andersson og Oddbjørn Aasen (NVK), datert november 2001.
- [2] *Injeksjonsstrategi ved forinjeksjon av tunneler. Erfaringer fra tunnelprosjektet Lunner.* Rapport nr. 23 fra Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Intern rapport nr. 2313 fra Vegdirektoratet, signert Helen Andersson og Oddbjørn Aasen (NVK), datert mars 2003.
- [3] *Berginjeksjon.* Rapport fra Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Intern rapport nr. 2151 fra Vegdirektoratet, signert Bjørn Helge Klüver, datert april 2000.
- [4] *Injeksjon av "problemsone" ved byggingen av T-baneringen.* Rapport nr. 3 fra Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Intern rapport nr. 2234 fra Vegdirektoratet, signert Torkild Åndal (NVK), datert november 2001.
- [5] *Sluttrapport for injeksjonsarbeidene ved T-baneringen.* Rapport nr. 16 fra Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Intern rapport nr. 2289 fra Vegdirektoratet, signert Knut Boge (Geovita AS), Torkild Åndal og Oddbjørn Aasen (NVK), og Reidar Kjølberg (Norconsult AS), datert juli 2002.
- [6] *Åpent fjell forsinker Hagantunnelen.* Våre Veger 5-2002, signert Anders Haakonsen.
- [7] *ANBUDSGRUNNLAG. Rv 4 Gjelleråsen – Slattum. Dagsoner og tunnel. Del 2. Tunnel. Utbyggingsavdelingen, Statens vegvesen, Akershus,* datert juli 2002.
- [8] *Erfaringer med berginjeksjon, Hagantunnelen Rv 4. Experiences from rock grouting, Hagantunnel Rv 4.* Fjellsprengningsdagen 2002, Norsk Jord- og Fjellteknisk Forbund, signert Bjørn Helge Klüver og Edvard Iversen.
- [9] *Statens vegvesen Akershus. Rv 4 Hagantunnelen. Hydrogeologisk rapport.* Oktober 2000. Statkraft Grøner, signert Amund Gaut, datert 03.09.00.
- [10] *Datafiler med sammenstilling av forbruk masse.* Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling, signert Edvard Iversen.
- [11] *Sammenstilling av terskelmålinger av innlekkasje til tunnel.* Statens vegvesen Akershus, signert Guro Grøneng.
- [12] *Manometeroversikt – avlesning av trykk i tre hull fra tunnel.* Statens vegvesen Akershus, signert Oddbjørn Gule.
- [13] *Eksempel på injeksjonsrapport fra automatisk registrering på rigg.* AF/SRG.
- [14] *Byggherren kan spare titalls millioner.* GEO Januar 2003, signert Halfdan Carstens.





Sammenstilling av injeksjon for følgende tunnel-prosjekter:	Forutsetninger			Organisering av injeksjon					
	Bergmasse-forhold	Bergover-dekning	Tetthetskrav l/min/100 m	Injeksjons-strategi	Mannskap og opplæring	Spesiell beredskap	Rutinemessig injeksjon	Tilpasset injeksjon	Kriterier for injisering
<b>Tåsen</b>	Kalk/leirskifer gjennomskåret av oppsprukne syenittganger.	5-20 m.	Selvpålagt krav ved systematisk injeksjon: <b>10</b> , og ved sporadisk injeksjon: <b>15-20</b> .	Sporadisk / systematisk.	Ord.stufflag m/spesialformann.	Ingen.	Systematisk injeksjon pel 2525-2956Ø og 2525-2912V basert på utlekkasjemålinger.	Pel 2750-2815Ø og 2800-2860V: tett oppsprukne syenittganger med borevansker.	Utlekkasje sonder/kontrollhull (se tabell 5, rapport nr 2, for videre detaljer).
<b>Svartdal</b>	Gneis inkl. Ekebergforkastningen.	2,5-3 m (i området med tilpasset injeksjon).	Selvpålagt krav: <b>5</b> .	Sporadisk.	Ord. stufflag, m/opplæring av Stave maskin.	Ingen.	Ikke injisert utenfor området med tilpasset injeksjon	Pel 400-555Ø og 645-745V (eneste området som ble injisert)	Utlekkasje sonder/kontrollhull.
<b>Lundby</b>	Skifrig gneis, inkl. knusningsone med liten overdekning.	5-35 m.	Pel 600-1190: <b>2,5</b> . Pel 1190-1780: <b>1,0</b> . Pel 1780-2040: <b>2,0</b> . Pel 2040-2660: <b>0,5</b> .	Systematisk, alltid to runder.	Spesiallag.	Ingen.	Hele veien, tre tetthetsklasser satt opp med detaljerte injeksjonsopplegg.	Pel 2300-2400 (Lammelyckan): hullengde 9-10 m, en salve mellom hver skjerm.	Vanntapsmåling utført i alle hull, to runder injeksjon uansett, 2. runde av og til utelatt ved null vanntap i 1. runde.
<b>Storhaug</b>	Fyllitt (finkrystallisk gimmerskifer).	3-15 m.	Pel 1250-1550: <b>3</b> . Pel 750-900: <b>10</b> .	Systematisk / sporadisk.	Ord. stufflag, m/opplæring av Tunnelsupport.	Ingen.	Ikke injisert utenfor området med tilpasset injeksjon.	Pel 1400-1550 (eneste området som ble injisert).	Vanntapsmåling i sonder- og kontrollhull, ved Lugeon over 0,1 skulle injeksjon vurderes, varsling BH ved inngang >300 kg i ét hull.
<b>Bragernes</b>	Basalt, rombeporfyrt og kvartsporfyrt.	10-150 m, ca 100 m i snitt.	Pel 800-1700: <b>10</b> . Pel 400-800 og 1700-1900: <b>30</b> .	Systematisk.	Ordinære stufflag.	Ingen.	Stort sett hele veien, ble besluttet tidlig, pga pumpeproblemer og innlekkasje tilbake i uinjerte områder.	Pel 1257-1293 (Bjerringdalsforkastningen): skjerm m/ 2-4 runder, 1-2 salver mellom skjerm.	Utlekkasje fra sonderhull over 5 l/min samlet ga injeksjon, varsling BH ved inngang over 1000 kg i ét hull (senere økt til 5000 kg og v/c 0,5 direkt ved inngang >3000 kg).
<b>Baneheia</b>	Gneis med pegmatittganger.	10-40 m.	Under Stampene: <b>6-12</b> og 60 l/min totalt (se tabell 17, rapport nr 2, for videre detaljer).	Systematisk.	Ord. stufflag, m/opplæring av Tunnelsupport.	Ingen.	Stort sett hele veien, ble besluttet tidlig, pga tilbakepressing av vann i uinjerte områder.	Pel 3609-3624V: skjerm m/ 5 runder. Pel 3543-3590Ø: skjerm m/ 3 runder.	Vanntapsmåling i 5 hull pr. skjerm i starten (ca 3 måneder), ble ganske tidlig forlatt og systematisk injeksjon innført.
<b>Lunner (øst)</b>	Syenitt, vulkanitt og sandstein/konglomerat.	10-220 m, ca 130 m i snitt.	Pel 1450-1600, 1800-2100 og 2700-3850: <b>10</b> . Pel 1250-1450, 1600-1800, 2100-2700 og 3850-3960: <b>20</b> .	Systematisk.	Ord. stufflag, m/opplæring av Tunnelsupport.	Ingen.	Stort sett hele veien østfra, ble besluttet tidlig, pga lekkasje i uinjerte områder.	Pel 3770-3742: borevansker, stor inngang, sprøytebetongbuer/spiling.	Utlekkasje sonder/injeksjonshull bestemmer bruk av industri/mikrosegment, varsling BH ved inngang over 600 kg i ét hull (er blitt økt).
<b>Hagan</b>	Hornfels og syenitt.	6-60 m, ca 25 m i snitt.	Pel 1600-2200: <b>5</b> . Pel 1400-1600 og 2200-2900: <b>10</b> .	Systematisk / sporadisk.	Ord. stufflag, m/opplæring av Elkem.	Ingen.	Systematisk injeksjon ved liten overdekning og krav 5 l/min/100 m, resten sporadisk basert på utlekkasjemålinger.	Injeksjonen ble definert som rutinemessig pga det store omfanget av spesielle forhold som liten overdekning.	Utlekkasje fra sonderhull over 10 l/min samlet ga injeksjon ved ingen spesielle tetthetskrav, over 5 l/min samlet ved krav på maksimal innlekkasje 10 l/min/100 m.


 MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE  
**TUNNELER**

Sammenstilling av injeksjon for følgende tunnel-prosjekter:	Injeksjonsskjerm				Utstyr for injeksjon		
	Utstyr for boring	Borhullslengder og -stikning, c/c-avstand og skjermoverlapp	Injeksjons-hull i stoff	Boravviks-måling	Pakkere og plassering	Registrering av mengder	Utstyr for blanding og pumping
<b>Tåsen</b>	Tunnelrigg.	I start 21 m, men økte til 24 m for å øke overlapp og salver mellom injeksjon. 5 m stikning. 25 hull ved systematisk injeksjon. Tre salver mellom hver skjerm. Ytre og indre skjerm ved tilpasset injeksjon.	Dersom der var slepper som kom ut i stuffen.	Boravvik testet en gang med enkelt utstyr, lommelykt montert inne i 6 m langt plastrør.	Mekaniske pakkere, plassert 1 m inn i hullet.	Manuell registrering av mengder og trykk for hvert hull.	1 mikser, 2 aktuatorer, 2-3 pumper m/totalt 9 uttak fra manifold (brukte bare 3). Krav til pumpe 60 bar og 100 l/min.
<b>Svartdal</b>	Tunnelrigg.	Lengde 21 m, ble ofte kortere pga borevansker. 5 m stikning, 15-16 hull pr. skjerm (c/c-avstand 1,5-2 m).	Enkelte ganger ved lekkasje på stoff, med stor stikning for mest mulig å inngå i skjerm.	Boravviksmåling med i kontrakt, ble ikke utført.	Mekaniske pakkere, plassert 1 m inn i hullet.	Manuell registrering av mengder og trykk for hvert hull.	Rigg med 1 mikser, 1 aktuator og 1 pumpe m/4-5 utganger (brukte opptil 4). Krav til pumpe var 75 bar trykk.
<b>Lundby</b>	Tunnelrigg.	Tre tetthetsskinner: hullengde 10-17 m, 4 m stikning og antall hull 30, 44 og 62. To salver mellom hver skjerm. Dårligere fjell/strengere krav gav generelt flere og kortere hull og større overlapp.	Av og til.	Boravvik målt på over 20% av skjermene, med Inclinometer 95 i alle hull (1-1,5 h). Stort sett bra, toleranse 80 cm i enden.	Engangs og hydrauliske pakkere av type Stabilator 48 og 60 mm diameter, plassert 1-1,5 m inn.	Riggen hadde Loggart, men registrering ble gjort manuelt.	To rigger med 1 EPV Craelius mikser på vekt, 1 aktuator og 2 Craelius ZBE200 pumper m/4 utganger (trykk og volum lest av for hver slange).
<b>Storhaug</b>	Tunnelrigg.	Hullengde 14 m. Stikning 2 m i heng, 4 m i vegg og 6 m i såle. Antall hull variert mellom 30-70, havnet optimalt på 62. To salver à 3 m mellom hver skjerm.	Hele veien (12 hull i stoff av totalt 62 hull pr. skjerm).	Boravviksmåling med i kontrakt, ble ikke utført.	Mekaniske pakkere med 48 mm diameter, plassert 1 m inn i hullet først, deretter økt til 2-3 m.	Manuell registrering av mengder og trykk for hvert hull.	To sett med kolloidblandere, aktuator og stempelpump. Bare én pumpelinje ble valgt å bruke pga enklere å følge opp.
<b>Bragernes</b>	Tunnelrigg.	I start 21 hull (c/c ca 1,5-2,5 m) à 22 m, 2-3 salver à 5 m mellom hver skjerm. Senere 7 hull (c/c ca 3,5-6,5 m) à 27 m og 4 salver mellom. Stikning ca 5 m i heng og vegger og 7,5 m i såle.	Av og til, basert på erfaringene fra forrige skjerm og sleppemønster.	Pga få hull ble det ikke ansett som nødvendig.	Codan 48 mm mekaniske engangspakkere, plassert ca 1,5 m inn i hullet, fikk problem med at de gikk tett ved bruk av Mauring.	Riggen hadde automatisk reg. (LOGAC), men registreringen ble gjort manuelt.	1 Cemix mikser, 2 aktuatorer, 2 pumper m/2 utganger (trykk og volum leses av for hver) og vekt for blanding. Krav til pumpe var 90 bar trykk og 100 l/min.
<b>Baneheia</b>	Tunnelrigg.	Lengde 21 til 24 m, 6-8 m stikning. Optimale antall hull ca 30 for et tunnel-tverrsnitt på 50-80 m <sup>2</sup> , c/c-avstand mellom hvert hull 1-2 m. Tre salver mellom hver skjerm. Ytre, indre og sperreskjerm prøvd ut.	Hele veien (4-7 hull i stoff av totalt 30 hull pr. skjerm).	Boreavvik var satt til 0,5 m i kontrakten, men måling ble ikke utført.	Codan 58 mm mekaniske engangspakkere, plassert ca 1,5 inn, hadde hurtigkobling og brukte jekker for å feste pakkerne.	Manuell registrering av mengder og trykk for hvert hull.	Gammel rigg ble brukt til Thermax. Ny rigg med 2 mikser, 2 aktuatorer, 2 pumper m/2 utganger hver og vekt for blanding. Krav till pumpe var 50 bar og 50 l/min.
<b>Lunner (øst)</b>	Tunnelrigg.	Lengde 24 m, 5 m stikning i heng og vegger og 8 m i såle. 24 hull (c/c ca 2 m) i start, senere nede i 14 hull (c/c 2-3 m). Oftest tre salver mellom hver skjerm.	Av og til (3-5 hull), gjerne Thermax om utgang i store sprekker.	Boreavvik var satt til 0,5 m i kontrakten, men måling ble ikke utført.	Codan 63 el. 57 mm mekaniske engangspakkere, plassert ca 2 m inn.	Manuell registrering av mengder og trykk for hvert hull.	1 Cemix mikser, 2 Cemag aktuatorer, 2 Craeliuspumper og vekt for blanding. Krav til pumpe var 100 bar trykk og 60-0 l/min.
<b>Hagan</b>	Tunnelrigg.	Lengde 24 m, 5 m stikning i heng og vegger og 6 m i såle. 20-45 hull, inkludert 6-10 hull inne i profilet. Oftest tre salver mellom hver skjerm.	Hele veien (6-10 hull i stoff av totalt 20-45 hull pr. skjerm).	Boreavvik var beskrevet i kontrakten, men måling ble ikke bedømt nødvendig.	Codan 48 mm mekaniske engangspakkere, plassert ca 4 m inn, fikk problem med at det kom masse mellom pakker og berg.	Riggen hadde automatisk reg. (LOGAC), og registreringen fungerte fint.	1 mikser, 3 aktuatorer, 3 pumper og vekt for blanding. Krav til pumpe var 70-80 l/min ved lik kapasitet for trykket.


 MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE  
**TUNNELER**

Sammenstilling av injeksjon for følgende tunnel-prosjekter:	Injeksjonsmiddel			Prosedyre			Resultat		
	Injeksjonsmiddel	Tilsetningsstoffer	Andre midler	V/C-tall	Rekkefølge av injeksjonshull	Slutttrykk	Lekkasjeforhold	Vurdering av tetthetsresultat	Prosjektstatus
<b>Tåsen</b>	Industrisement Rapid Rp 38 fra Norcem	Rescon HP 2-3%, Grout Aid prøvd i en skjerm sent i prosjektet.	Mikrosement Rheocem 650, Tacss til etterinjeksjon.	2,0-0,5.	Startet nede og gikk oppover, 2-3 slanger ble brukt.	15-45 bar, vanligvis 25-30 bar.	25,7 l/min/100 m og 240 l/min totalt (se tabell 4, rapport nr 2, for videre detaljer).	Opptil 3 runder på en skjerm, men tetting konstatert ikke tilstrekkelig, 4 infiltrasjonsbrønner installert fra tunnelen.	Tett nok, men med ikke planlagt vanninfiltrasjon i problemsone.
<b>Svartdal</b>	Industrisement Rapid Rp 38 fra Norcem	-	Mauring brukt til plugging av hull.	1,5-0,7.	Startet nede, pakker montert ved gjennomgang og injeksjon startet der. Runde 2 tilpasset etter lekkasje i 1. runde.	20-30 bar.	4,3 l/min/100 m for hele tunnelen på 3450 m. Kun injisert over 260 m totalt.	Opptil 3 runder på en skjerm, 4 m-bolter punkterte ikke skjermen, 25 cm differensialsetning på en 30 m lang mur.	Tett nok totalt, ikke målt i injisert område.
<b>Lundby</b>	Injeksjonsement fra Cementa	Bentonitt 3%, Intraplast 0,5%.	Tacss og Rhocagil, til etterinjeksjon.	3,0-0,5 (0,3 ved hullfylling).	Startet i hull med størst vann-tap, pakker ble montert ved gjennomgang og hull injisert, v/c-tall redusert avhengig av slutttrykk eller motstand.	25 bar.	0,9 l/min/100 m for hele tunnelen på 4358 m.	Tetthetskrav (0,5 l/min/100 m) ved Lammelyckan ikke oppfylt, lekker ca 1,0 l/min/100m. En del bolter punkterte skjermen, planlagt infiltrasjonsbrønn installert.	Tett nok, med planlagt vanninfiltrasjon i Lammelyckan.
<b>Storhaug</b>	Ultrafin 12 fra Scancem	Grout Aid 5-15%, SP40 2%.	Thermax for plugging av hull.	1,1-0,4 (vanligvis 0,9-0,7).	Startet nede, pakker ble montert ved gjennomgang og hullet injisert.	30 bar i kontrakt, senere 50 bar i heng og 70 bar i sålen.	1,6 l/min/100 m mellom pel 1400-1550.	Dobbel injeksjonsskjerm (stort overlapp), men en del bolter punkterte skjermen.	Tett nok.
<b>Bragernes</b>	Industrisement Rapid Rp 38 fra Norcem	Rescon HP 2-3%.	Mauring når det var problem med utgang i stoff.	1,0-0,5.	Startet nede med 1-2 slanger, ved gjennomgang ble pakker montert og injeksjonen fortsatte der.	20-30 bar i kontrakt, etter hvert brukt 40-70 bar (også opptil 90 bar).	10 l/min/100 m over hele tunnelen. 8 l/min/100 m mellom pel 240-1730 og 25 l/min/100 m mellom pel 1730-2540.	Injeksjonsskjerm punktert av en del 3 og 4 m-bolter. Prøvde halv skjerm - ikke vellykket, medførte bare at lekkasje flyttet på seg.	Tett nok.
<b>Baneheia</b>	Ultrafin 12 fra Scancem	Grout Aid 5-15%, SP40 2%.	Thermax for plugging av hull (ikke alltid vellykket).	0,9-0,7.	Startet nede med 2 slanger, ved gjennomgang ble pakker montert og injeksjonen fortsatte der. Ved store innganger lot en hullet hvile før en gikk tilbake til dem senere.	50 bar vanligvis, men brukt opp til 80 bar.	1,8 l/min/100m eller 50 l/min totalt (når 2390 m var drevet).	4 og 5 m-bolter punkterte en del skjerner, 3 m-bolter gjorde ikke det. 95% av skjermene fullført med én runde.	Tett nok.
<b>Lunner (øst)</b>	Industrisement fra Norcem el. Ultrafin 12 fra Scancem	Grout Aid 5-25%, SP40 2-3%.	Thermax når det var problem med utgang i stoff.	2,0-0,5.	Startet nede med 1-2 slanger, ved gjennomgang ble pakker montert og injeksjonen fortsatte der.	50 bar vanligvis, men brukt opp til 70 bar.	8,4 l/min/100m (når 1565 m var drevet fra øst, pel 3850-2395).	Muligens injisering av noen bolter. 95% av skjermene fullført med én injeksjonsrunde.	Tett nok.
<b>Hagan</b>	Industrisement fra Norcem el. Ultrafin 12 fra Scancem	Grout Aid 5-25%, SP40 2-3%.	Mauring og Thermax når det var problem med utgang i stoff.	1,1-0,4.	Startet nede med 2 slanger, pakker ble installert direkte etter boring pga stort utlekkasje. Ved nærhet til brønner startet en der, lot hull hvile for så å gå tilbake igjen.	80-100 bar.	12 l/min/100 m over hele tunnelen. 4 l/min/100 m mellom pel 1680-2200 og 19 l/min/100 m mellom pel 2200-2850.	Injeksjonsskjerm punktert av en del 3 m-bolter.	Tett nok.


 MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE  
**TUNNELER**

Sammenstilling av injeksjon for følgende tunnel-prosjekter:	Tunnelfakta			Gjennomsnittstall for boring og sementforbruk							
	Tunnel-lengde	Utforming og tverrsnitt	Drevet mellom	Bormeter pr m inj.tunnel	Bormeter pr m <sup>2</sup> inj.tunnel	Masse kg pr hull, inkl. fyll	Masse kg pr m hull, inkl. fyll	Masse kg pr m inj.tunnel	Masse kg pr m <sup>2</sup> inj.tunnel	Masse kg pr time inj.tid	Inj.tid time pr m inj.tunnel
<b>Tåsen</b>	933 m Ø 937 m V	To løp med flere ramper, 65-80 m <sup>2</sup>	1997-1998	85	2,74	535	26	802	26	870	0,92
<b>Svartdal</b>	1700 m N 1450 m S	To løp med tilsluttende ramper, ca 65 m <sup>2</sup>	1998-2000	22	0,65	1358	80	1719	51	978	1,76
<b>Lundby</b>	2060 m N 2060 m S 238 m vent.-tunnel	To løp med 13 tverrforbindelser, 86-92 m <sup>2</sup>	1994-1998	80	2,00	79	6	476	12	-	-
<b>Storhaug</b>	1260 m	Ett løp, 85 m <sup>2</sup>	1998-2001	130	3,33	112	8	1014	26	273	3,71
<b>Bragernes</b>	2310 m totalt inkl. vent.- og rømnings-tunnel	Ett løp, 72-83 m <sup>2</sup>	1999-2001	17	0,57	2050	81	1242	42	2774	0,45
<b>Baneheia</b>	3000 m totalt	To løp med tilsluttende ramper, 44-87 m <sup>2</sup>	1999-2001	40	1,08	256	9	514	14	755	0,68
<b>Lunner (øst)</b>	1555 m av 3800 m	Ett løp, ca 61 m <sup>2</sup>	2001-2003	40	1,26	722	30	1299	41	1224	1,06
<b>Hagan</b>	2700 m totalt	Ett løp, 62-85 m <sup>2</sup>	2001-2003	45	1,29	1418	59	2716	78	1893	1,43