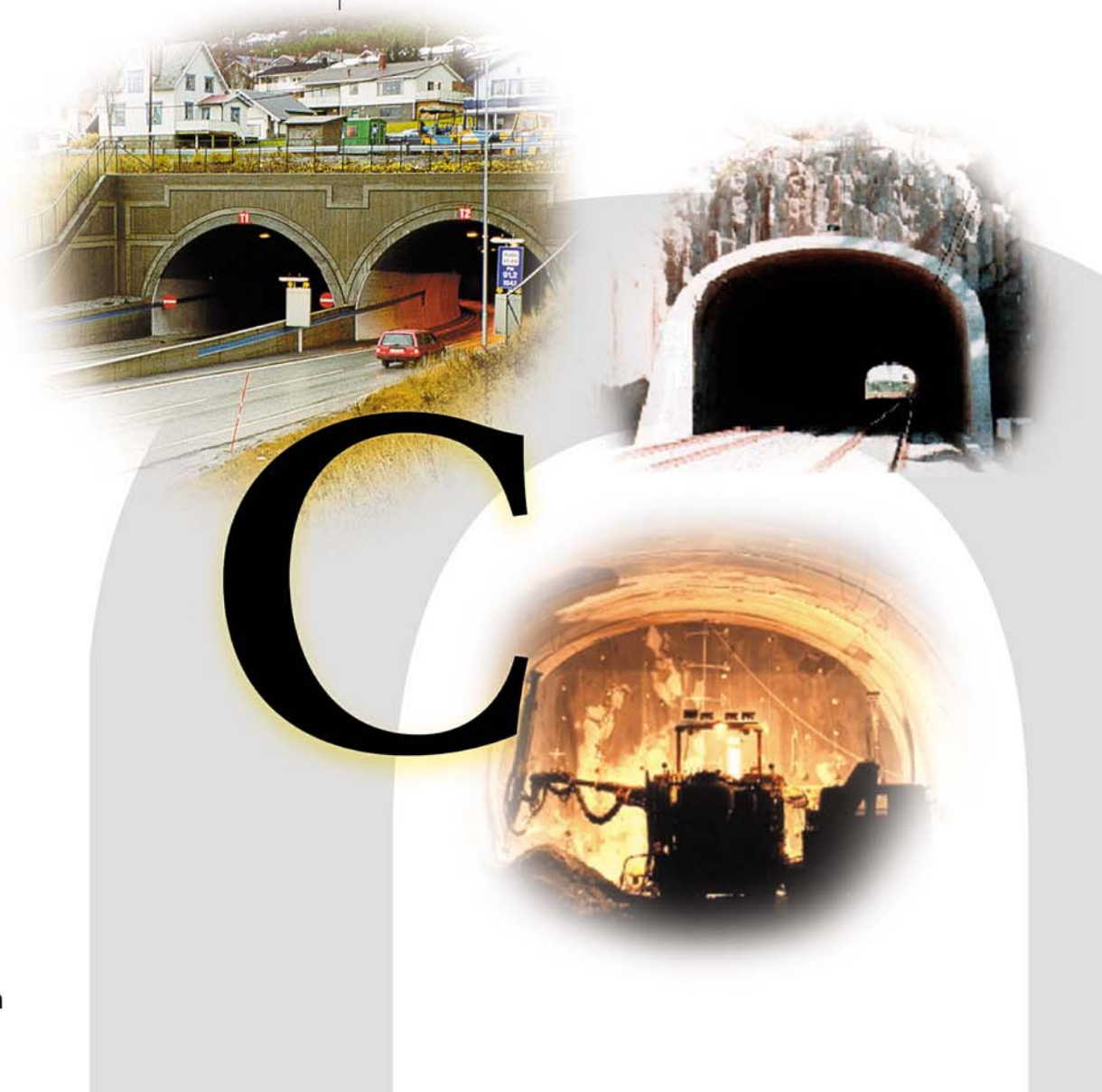


MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE TUNNELER

Rapport nr: **16**

Sluttrapport for injeksjonsarbeidene ved T-baneringen



Intern rapport nr. 2289



Statens vegvesen

T-baneringen

K. Boge, GeoVita AS, T. Åndal, O. Aasen, NVK AS, R. Kjølberg, Norconsult AS

1 Sammendrag

Gjennom prosjektet miljø- og samfunnstjenlige tunneler har det vært sterk fokus på injeksjonsarbeidene som har vært utført på fjelltunnelen ved T-baneringen. En omfattende mengde data er samlet inn og sammenstilt for å dra mest mulig erfaring og kunnskap ut av injeksjonsarbeidene som er utført på dette anlegget. Man har lagt vekt på å dokumentere de utførte arbeider og de erfaringer som etter vår mening kan trekkes av disse.

Viktige hovedmål for både FoU-prosjektet og tunnelprosjektet har vært å få til en injeksjonsmetodikk som ga en tilstrekkelig tett tunnel på enkel måte og korteste mulig tid under de varierende geologiske forhold. I tillegg har man sett spesielt på noen utvalgte temaer:

- Sporadisk kontra systematisk injeksjon
- Optimale V/C-forhold, tilsetningsstoffer og injeksjonstrykk
- Utprøving av Industrisement kontra mikrosement
- Tilstrekkelig tetthet gjennom 1 injeksjonsrunde
- Tidsoptimalisering av hele injeksjonssyklusen

Gjennom de data som er samlet inn og sammenstilt, har vi fått en del erkjennelser og erfaringer som støtter de påstander som er fremført. Udiskutable "beviser" er vanskelig å etablere på dette fagområdet. FoU-prosjektet er tenkt videreført på utbyggingen av fjelltunnelene ved Jong –Asker, blant annet for å få et enda bredere dokumentasjonsgrunnlag.

Sporadisk/systematisk En ble tidlig klar over at sporadisk injeksjon ikke var en god nok metode for å få tett nok tunnel. Grunnlaget for sammenligning mellom sporadisk injeksjon (etter vurdering basert på sonderboring), og systematisk injeksjon etter hver andre / tredje salve er derfor begrenset. Målingene som er gjort viser at tidsforbruket ved sporadisk injisering er større enn ved systematisk. I områder der kravene til tetthet er moderate er risikoen for å ikke oppfylle kravet stort pga at lekkasjene flytter seg til områder som ikke ble injisert.

V/C-forhold Det er behov for å benytte sementtyper som gir tilstrekkelig tetthet på kortest mulig tid. For å redusere herdetiden, må det unngås v/c-tall over 1,0. Nye tilsetningsstoffer og bedre injeksjonsutstyr generelt har gjort det mindre problematisk å bruke lave v/c-forhold. Laboratorieforsøk utført på de blandereseptene og materialene som var brukt på dette prosjektet viste at høye v/c-forhold (>1.0) var ugunstig for herdeforløpet, ved at herdetiden økte vesentlig.

- Trykk** På mange borehull hvor masseinngangen i utgangspunktet var lav, viste det seg effektivt å gi massene et trykk "kick" (her 60-80 bar). Svært ofte åpnet det hullene og en kunne fortsette injeksjonen ved "normale" trykk (20-40 bar). Kombinasjonsbruken av mikrosilika (her Grout Aid) og superplastiserende tilsetning (her Rescon HP) til sementene har her bidratt til å gjøre slik trykkfilosofi mulig uten å blokkere masseinngangen.
- Industri-/mikrosement** Utrøvingen og sammenligningen mellom Industri- og mikrosement er utført på flere sammenlignbare strekninger, og alle viser at forskjellen på tetteresultatet er ubetydelig. Det er derfor nærliggende å trekke den konklusjonen at samme tetthet kunne vært oppnådd for hele denne tunnelen kun ved bruk av industrisement.
- Dersom denne konklusjonen er riktig, ville bruk av bare Industrisement ført til et enklere injeksjonsopplegg med betydelige besparelser, både med hensyn på tid og kostnader.
- Oslofeltets sedimentære bergarter er i utgangspunktet relativt tette med tynne, ofte leirfylte sprekker. Erfaringsmessig har disse bergartene vært vanskelig å tette. Med unntak av andre skiferbergarter, har de fleste andre norske bergarter et mer åpent sprekkesystem som gjør de lettere å injisere.
- Konklusjonen fra T-baneringen bør derfor være gyldig også for andre typer bergarter enn leirskifer og knollekalk.
- Tidsoptimalisering** Den overordnede målsetting for tidsoptimal injeksjon er pr. definisjon å oppnå størst mulig inndrift med tett nok tunnel.
- En injeksjonsrunde** I utgangspunktet medfører dette at en må tilstrebe å oppnå tilstrekkelig tetthet med én injeksjonsrunde. Utstyret må være moderne og veltilpasset og med tilstrekkelig kapasitet, likeledes med god mannskapsorganisering og effektivt transportsystem. Kontrakten må gi rom for en innkjøringsperiode med tilpassing av tidsoptimal injeksjonsprosedyre.
- Det må tilstrebes et fleksibelt opplegg som kan tilpasses varierende injeksjonsforhold og lekkasjekrav. Lengde av injeksjonsskjerm og drivlengde mellom hver injeksjonsomgang må tilpasses skiftordningen og eventuelle tidsrestriksjoner. Minst mulig dødtid må tilstrebes.
- Pakkere** Bruk av engangspakkere synes mest tidsgunstig. Det må tilstrebes størst mulig inndrift pr. salve.
- Optimal skjermgeometri** Ved T-baneringen synes en injeksjonsprosedyre bestående av 32 stk. 21 m lange injeksjonshull, én injeksjonsrunde og 2 salver mellom hver injeksjonsomgang å ha vært mest tidsoptimal.

Tåsen og T-baneringen Det ble lagt ned en annen og større tetteinnsats i T-baneringen enn i Tåsen-tunnelene, noe som ga et klart bedre tetteresultat og som har medført at en har unngått setningsskader og etablering av permanente infiltrasjonsbrønner. Denne erfaringen er spesielt viktig sett på bakgrunn av at bergmasseforholdene på de to prosjektene må anses som identiske.

Den anvendte injeksjonsmetodikken er meget ”robust”, idet den er meget systematisk og produksjonsvennlig for entreprenøren, og har gitt god nok tetthet under de varierende bergmasseforhold på T-baneringen.

2 Bakgrunn for prosjektet

Prosjektet Miljø og Samfunnstjenlige tunneler som ble startet opp i 1999, hadde tre delprosjekter; forundersøkelser, samspill med omgivelsene og tetteteknikk. Delprosjektet tetteteknikk var igjen inndelt i fire deltemaer; injeksjonssementer, injeksjonsstrategi, naturlige tettemetoder og vanninfiltrasjon.

Fase 1 Prosjektet injeksjonsstrategi startet med å kartlegge ”state of the art” for injeksjonsteknikk, gjennom en kartlegging av injeksjonsmetoder, metodikker og erfaringer fra 6 nylig gjennomførte anlegg, kalt fase 1. Resultatene fra det arbeidet er rapportert i intern rapport nr 2201 fra Statens vegvesen vegteknisk avdeling ”C2/5: Injeksjonsstrategi ved forinjeksjon av tunneler. Erfaringer fra utvalgte tunnel prosjekter”, november 2001 (ref 3).

Fase 2 Etter en kartlegging av status for injeksjonsarbeider, var hensikten å ta med seg erfaringene fra de nye anleggene for å søke å få de dokumentert og eventuelt videreutviklet dem, også kalt fase 2.

Tåsen-tunnelen T-baneringen fremsto som et naturlig anlegg for videreføring av prosjektet injeksjonsstrategi, både pga gjennomføringstidspunkt, tetteomfang, byggherre og at Tåsen-tunnelen som går like ved var et av prosjektene i fase 1.

T-baneringen er en ny banestrekning som, når den er ferdig i 2005 – 2006, vil knytte sammen dagens Sognsvannsbane med eksisterende Grorudbane. T-baneringen går fra Ullevål stadion til Nydalen, Storo, Sinsen og derfra ned til Carl Berners plass. Herfra følger den så dagens linjer til sentrum og videre til Majorstua og Ullevål stadion.



Fig 1. Kart som viser fremtidig T-banering

Første etappe går fra Ullevål stadion til Storo. I denne etappen inngår en ca. 1240 meter lang fjelltunnel med et tverrsnitt på ca 65 m² mellom Bergslia og Nydalen. Tunnelen er ferdig drevet i januar 2002.

Forskningsprosjektet ”Miljø og samfunnstjenlige tunneler” har under hele driftsperioden brukt dette tunnelanlegget aktivt og samtidig bidratt med ressurser i forbindelse med injeksjonsopplegget.

Problemsone

Tunnelen går mellom p.nr 420 og 1660, og det er den nummereringen man holder seg til i denne rapporten. I tunnelen er det en sone mellom p.nr 700 og 750 hvor tetteinnsatsen var betydelig høyere enn for resten av tunnelen. Denne sonen er det laget en egen rapport på, ref 9. Mengdene som er gått med i denne sonen er ikke tatt med denne rapport hvis det ikke er nevnt spesielt.

3 Prosjektbeskrivelse

3.1 Tunneltrase

Terreng over tunnelen ligger mellom kote + 102 og + 116. Hele området ligger derfor under marin grense. Tunnelen har sålenivå mellom kote +91 i vest (Bergslia), kote +75 ved lavbrekk og kote + 78

i øst (Nydalen). Overdekningen varierer dermed mellom 5 og 35 m. Tunneltverrsnittet er på ca 65 m². Pumpesumpen ligger i lavbrekket ved p.nr 1520.

3.2 Geologi

Berggrunn

Berggrunnen i området består av kambrosilurske sedimentære bergarter, hovedsakelig leirskifer og knollekalk, men også noe kalkstein. De sedimentære bergartene er gjennomskåret av eruptiver, vesentlig syenittporfyr, syenitt og diabas.

De sedimentære bergartene har tette folder med en foldeakse som ligger i ØNØ-lig retning og lagdelingen faller ca 30° mot NNV. Det er tre fremtredende sprekkeretninger. Den ene følger sedimentærbergartenes lagdeling, den andre følger eruptivgangenes retning og fall (NØ og steil) og den tredje sprekkeretningen står normalt på eruptivgangene. Geologien for T-baneringen er nærmere beskrevet i NGI-rapport, ref. 10.

Bergoverdekningen langs traseen varierer fra ca. 5 til ca 25 meter, se figur 2 og 3.

Løsmasser

Løsmassemektheten rett over tunnelen varierer fra 0 til 16 meter, men med betydelig større mektigheter til side for tunnelen. Løsmassene består av et fast, øvre topplag av sand, grus og tørrskorpeleire med varierende tykkelse på fra 2 til 7 meter. Under topplaget er det registrert middels fast leire med tynne sand og siltlag. Enkelte steder hvor løsmassemektheten er stor, er det også registrert bløt, sensitiv leire. Under leira ligger det morene over fjell i varierende tykkelse. For mer detaljert beskrivelse av løsmasseforholdene vises det til ref. 7.

3.3 Hydrogeologi

Ut fra poretrykksmålere installert i området (vedlegg 7 og 8) kan en si at grunnvannsnivået i hovedtrekk følger topografien og at grunnvannstrømningen er spesielt knyttet til enkelte dyprenner. Det var utplassert 7 poretrykksmålere i forbindelse med byggingen av Tåsen-tunnelen og ytterligere 27 ble plassert ut for T-baneringen, plassering vist i vedlegg 7. En har derfor målinger helt tilbake til 1996 for Tåsen-tunnelen og fra september 1999 for T-baneringen, vist i vedlegg 8. Nivået på poretrykksmålerne blir påvirket av nedbørsmengdene i området. Mange av målerne viste derfor en markert topp som følge av den nedbørsrike høsten/ førjulsvinteren 2000 da tunneldrivingen tok til. Poretrykksmålingene og lekkasjene er nærmere beskrevet i NGI rapport, ref. 7.

3.4 Omgivelser

Bebyggelsen over tunnelen består i sin helhet av småhusbebyggelse og boligblokker. En stor del av denne bebyggelsen er enten fundamentert direkte på løsmasser eller delvis på løsmasser og delvis

på fjell. Bygningenes fundamenteringsforhold og deres setningspotensial har på dette prosjektet vært dimensjonerende for krav til innlekkasje i tunnelen og dermed injeksjonsopplegget.

3.5 Krav til innlekkasje

Under prosjektering av anlegget ble det derfor satt opp differensierte krav til maksimal innlekkasje i tunnelen. Kravene varierte fra 7 liter/min. pr 100 meter til 14 liter/min. pr. 100 meter tunnel. Lengdesnitt av tunnel med krav til tetthet er vist i fig. 2 og tabell 1

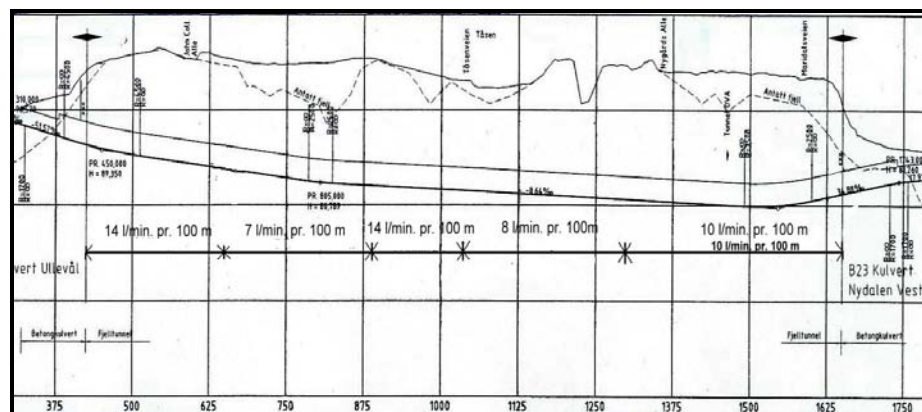


Fig.2 Lengdesnitt av tunnel med krav til innlekkasje

Strekning p.nr.	Krav l/min pr 100m	Sporadisk / systematisk injeksjon
440 – 650	14	Sporadisk
650 – 900	7	Systematisk
900 – 1100	14	Sporadisk
1100 – 1300	8	Systematisk
1300 – 1660	10	Systematisk

Tabell 1: Krav til maksimal innlekkasje for delstrekninger og planlagt brukt injeksjonsstrategi.

3.6 Injeksjonsutstyr

Injeksjonsutstyret brukt på T-baneringen er montert i en spesialbygd container. Det er lagt opp til effektiv blanding av sement med påfylling fra storsekker i siloer på utsiden av containeren. Dette for arbeidsmiljøets skyld. Blanderen er på 400 liter og er montert på veiceller. Det er montert en 300 liters vanntank på taket av containeren for å få en mest mulig effektiv vannpåfylling. Det er to aktivatorer / omrørere, hver med et volum på 400 l.

Det var tre pumper av typen Pumpac , hver med en leveringskapasitet på 120 l/min og en trykkapasitet på 100 bar. Til å registrere mengder, trykk og tid var det en Logac registreringsenhet som hadde en kapasitet på 8 injeksjonslinjer.

Utstyret var lagt opp for å kunne betjenes av 2 personer, en mann til overvåking av blanding og en mann til håndtering av materialer.

3.7 Beskrivelse i kontrakt

Injeksjonsopplegg	<p>Kontrakten omfatter både injeksjon etter forutgående sonderboring og systematisk injeksjon. Injeksjon etter sonderboring er beskrevet i områdene med innlekkasjekrav på 14 liter/min. pr. 100 meter tunnel (se fig. 2 og tabell 1). Injeksjon skulle utføres dersom samlet lekkasje fra 8 sonderhull oversteg 3 liter pr. minutt.</p> <p>I de øvrige områdene var det beskrevet systematisk injeksjon med 1,0 m hullavstand, dvs. ca 30 hull jevnt fordelt i vifteform rundt tverrsnittet. Hullengden var satt til 18 meter og avstanden mellom skjermene skulle normalt være 10 meter (2 salvelengder). Etter hver skjerm skulle det settes kontrollhull. Omfang og plassering av kontrollhull var avhengig av vannlekkasjer og innganger i den 1. injeksjonsrunden.</p>
Materialer	<p>Injeksjonen var basert på sementer og en liten mengde kjemiske midler som et supplement til sementinjeksjon dersom det ikke ble oppnådd tilfredsstillende tetthet med sementer. De beskrevne sementtypene var Industrisement (400 000 kg), mikroement (900 000 kg) samt mindre mengder med spesialsementer. I tillegg var det beskrevet at man skulle bruke plastiserende stoffer, det ble brukt 2% HP Rescon 900. Hovedvekten var på mikroement da en hadde lange strekninger med relativt strenge krav. Etter at kontrakt var sluttet, ble det inngått en tilleggsavtale med entreprenøren om bruk av mikrosilika (GroutAid, GA) som tilsetningsstoff til sementene.</p> <p>Det var avsatt 1.100 timer til injeksjon innenfor normal skiftordning (kl. 0600 – 2200).</p>
Oppgjør	<p>Injeksjonsarbeidene ble gjort opp ut fra medgåtte mengder, dvs antall meter boret sonder-/ injeksjons-/ kontrollhull, antall kg sement, antall pakkere samt antall timer brukt på injeksjonsarbeidene fra start sonder/injeksjonsboring til det er klart for andre arbeider på stuff.</p>
Driftsbegrensninger	<p>Det var begrensninger på når en kunne utføre støyende virksomhet som boring og sprengning. Det kunne derfor bare bores og sprenges mellom kl 06.00 og 22.00 på hverdager og på lørdag mellom kl 07.00 og 17.00.</p>
Utført injeksjon En stuff	<p>Utdrag av kontrakten som omhandler injeksjon er tatt med i vedlegg 4.</p> <p>Tunnelen er drevet med en stuff fra Bergslia mot Nydalen. Helt fra starten på injeksjonsarbeidene var både byggherre og entreprenør villige til å utvikle injeksjonskonseptet som var beskrevet i kontrakt. Dette ble i stor grad utført i samråd med arbeidsgruppen i Tetteteknikk</p>

som er ett av delprosjektene i forskningsprosjektet ”Miljø og samfunnstjenlige tunneler”.

Lekkasjekravene i starten var moderate, 14 l/min. pr. 100 meter tunnel. Dette ga oss anledning til å eksperimentere innenfor kontraktens rammer fra første dag. Dette ble i første rekke benyttet til å bli kjent med fjellforholdene med tanke på å oppnå best mulig tetthet innenfor kontraktens rammer, både med tanke på kostnader og tid. Følgende problemstillinger har vært behandlet i forbindelse med dette prosjektet:

- Systematisk eller sporadisk injeksjon
- Skjermlengde kontra inndrift
- V/C-forhold, injeksjonstrykk og tilsetningsstoffer
- Industrisement vs mikrosegment
- Tilstrekkelig tetthet gjennom en injeksjonsrunde
- Tidsoptimalisering/Optimalisering av injeksjonsopplegget

I tabellen under er det gitt de prosjekterte og utførte mengdene på de forskjellige prosessene som inngår i injeksjon. Som en ser av tabellen var det et stort overforbruk på Industri- og mikrosegment samt på tidsforbruk, noe som hovedsakelig skyldes sonen en passerte.

Prosess	Estimert	Utført	Endring	Problem sone	Differanse i %
Sonder/injeksjon/kontroll boring, m	69 100	74 295	+ 5 195	19 081	+8
Pakkere, stk	3 300	3 703	+ 403	845	+12
Type A, Industrisement, kg	400 000	857 164	+ 457 164	81 609	+114
Type B, Mikrosegment, kg	900 000	1 270 278	+ 370 278	426 255	+41
Type C, hurtig avbindende sement, kg	75 000	17 723	- 57 277	1 603	-76
Type D, Mauring el.l, kg	20 000	1 775	- 18 225	400	-91
Type E, Polyuretan el.l, liter	5 000	744	- 4 256	220	-85
Type F, Geldannende, l	5 000	0	- 5 000	0	-100
Hefttid, timer	1 100	>2200	+ 1 100	925	+100
Mikrosilika, kg	0	273 252	+ 273 252	88 206	
Måleterskler	12	6	0		-50

Tabell 2: Medgåtte mengder sammenlignet mot prosjekterte.

4 Datainnsamling

Mye av prosjektets tid og innsats har gått med til å samle inn og sammenstille data. Dette har skjedd i et nært samarbeid med anlegget. Det har vært en formidabel utvikling i dataregistreringskapasiteten. Dette har gjort at man har fått mye mer data og ikke minst mye mer pålitelig data, men man er fortsatt avhengig av manuell registrering og vurdering på en del områder. Registreringene som er utført er rapportert på en del forskjellige skjemaer, disse er:

- Geologisk kartlegging
- Poretrykksregistreringer
- Lekkasjemålinger
- Registreringer og vurderinger fra hver injeksjonsrunde
- Veidekkes ukerapporter
- Logac registreringer fra injeksjonsrundene
- Rockma registreringene fra sonder-/ injeksjon-/kontrollboringene.
- Diverse målebrev og vedlegg til målebrev
- Salvelogg

4.1 Geologisk kartlegging

Hele tunnelstrekningen er kartlagt av byggherrens geologer, Ann E. Bøyeie og Olav Hval, eksempel er vist i vedlegg 6. Det er registrert endringer i mineralogi, geologiske strukturer, parametrene som inngår i Q-metoden og retning av sprekker.

4.2 Poretrykksregistreringer

Det var montert poretrykksmålere i området i forbindelse med byggingen av Tåsen-tunnelene. Man har derfor registreringer av poretrykket i området helt tilbake til 1996. I tillegg er det plassert ut 7 målere for T-baneringen, slik at det er totalt 34 målere. Målerne ble avlest med jevne mellomrom slik at en hadde god kontroll på poretrykksutviklingen i området. Avlesningen er vist i vedlegg 8 og plassering av målerne er vist i vedlegg 7.

4.3 Lekkasjeregistreringer

Lekkasjeregistreringene er utført ved måleterskler, i alt 6 stk og under drivingen også ved stoffen. Som tidligere nevnt, er det strekningsvise innlekkasjekrav. Måletersklene er plassert i samsvar med disse kravene. Målinger er utført ved jevne mellomrom etter hvert som tunnelen er drevet fremover. I juleferien 2001 var det kun få meter som gjensto av tunneldrivingen. Det ble da utført tre målinger. Det er disse målingene som blir brukt som oppnådd tetteresultat, men innlekkasjemålingene har variert noe ut fra nedbør og årstid. De andre lekkasjemålingene er vist i vedlegg 12.

4.4 Registreringer og vurderinger fra hver injeksjonsrunde

Her er det gjort registreringer som start og slutt sonder/injeksjonsboring, start og slutt injeksjon, innlekkasje fra sonder/injeksjonshull, trykket som er brukt og hvordan injeksjonen artet seg, hvilke hull det var kontakt mellom, hvor en hadde utganger og eventuelle problemer med utstyr og utførelse. Vedlegg 9 viser skjemaet for en av injeksjonsrundene.

4.5 Veidekkes ukerapporter

Fra ukerapportene er det spesielt informasjon vedrørende salvene mellom injeksjonsrundene, så som antall, lengde, tidspunkter og driften generelt. Dessverre er ikke alle ukerapportene ført like nøyaktig og detaljert som det hadde vært ønskelig for vårt formål, spesielt mht tidsstudien. Det er allikevel hentet mye informasjon fra disse rapportene, et eksempel er vist i vedlegg 13.

4.6 LOGAC

Logging av aktiviteten fra injeksjonen som en får ved hjelp av Logac-programmet er en formidabel forbedring i forhold til hvordan det har vært tidligere. Ved hjelp av denne registreringen får en mengder sement pr tidsenhet for hvert hull og for hvert v/c-forhold, tidspunkt for start og stopp injeksjon for hvert hull. En kan også få trykk-historien til hvert enkelt borehull. Den muligheten ble dessverre ikke utnyttet på dette prosjektet. Vedlegg 14 viser Logac registreringene som blir gjort for hver injeksjon.

4.7 ROCKMA

I kontrakten for T-baneringen var det tatt med at en under boringen av sonder og injeksjonshull skulle benytte seg av et MWD (Measuring While Drilling) system. Dette systemet registrerer data som boresynk, matetrykk, rotasjonstrykk, hammertrykk, rotasjonshastighet, vanntrykk, vannmengde og tid. Disse dataene blir ved hjelp av et program kalt Rockma prosessert slik at de gir et geologisk bilde av bergmassen det er boret gjennom. Det gis et bilde av oppsprekning, bergets vekslende hardhet og vannforholdene i bergmassen. Disse dataene er brukt til å dokumentere / supplere den geologiske kartleggingen som er utført. Resultatene fra Rockma registreringene er vist i figur 5.

4.8 Målebrev

Målebrevene gir mye av den samme informasjonen som en får fra LOGAC, men det var målebrevene som ga de offisielle mengdene. Det er målebrev for hver enkelt prosess. For injeksjon var det målebrev for antall meter boret sonder/ injeksjon/ kontrollhull, antall pakkere, mengder for de forskjellige typene injeksjonsmiddel (A-F), og "hefttid" eller tid fra start sonder/injeksjonsboring til avsluttet injeksjon. Eksempel på målebrev er vist i vedlegg 11.

4.9 Salvelegg

For alle sprengninger har rystelsene blitt registrert automatisk. En har derfor veldig nøyaktige tidspunktregistreringer på salver og eventuelle omskytinger. Salveleggen er vist i vedlegg 15.

5 Erfaringer

God kontroll på grunnforholdene er essensielt for å vurdere hvor vellykket injeksjonsresultat har blitt. For å beskrive bergmassen er det lagt vekt på å få inn gode data på geologisk kartlegging, sprekke tetthet, vannforhold i bergmassen før og etter injeksjon samt overdekningsforholdene. Det viktigste parametrene er vist i tabell 3. Grunnforholdene varierte selvfølgelig en del langs tunnelen. Forholdene langs tunnelen er registrert både subjektivt/manuelt og objektivt/maskinelt. Det begge metodene viser og som en kan se fra figurene 4 -6, er at det bare er sonen ved p.nr 700-750 som skiller seg markert ut.

5.1 Systematisk eller sporadisk injeksjon

I området hvor en startet med injeksjon, var det beskrevet sporadisk injeksjon etter forutgående sonderboring med måling av innlekkasje fra sonderhullene. Stort sett ga sonderhullene (8 stk) så mye innlekkasje at det ble satt injeksjonsskjerm. Sonderhullene inngikk da i injeksjonsskjermen. I enkelte tilfeller var imidlertid sonderhullene tørre og tunnelen ble drevet videre uten injeksjon. I ettertid viste det seg at en fikk lekkasje i de områdene hvor det ikke ble injisert. Opplegget var i tillegg tidkrevende og forutsatte at byggherre var til stede ved endt sonderboring. Erfaringene og konklusjonen ble den samme som på Baneheia, at når en har forholdsvis strenge tetthetskrav er sporadisk injeksjon basert på sonderboring ikke tilstrekkelig. Det ble derfor tidlig startet med systematisk injeksjon. En fikk derfor ikke studert tidseffektivitetsforskjellen på de to injeksjonsstrategiene så mye som en hadde ønsket. Sporadisk injeksjon ble kun utført mellom p.nr 422 og 616. På strekningen var det 17 skjermmer. På kun 4 skjermmer ble det ikke utført full injeksjon. Gjennomsnittlig total injeksjonstid pr. skjerm på strekningen p.nr 422-616 lå på 15,9 timer. På strekningen p.nr 840-1054 hvor en hadde et systematisk injeksjonsopplegg med 31 injeksjonshull med 24 m lengde, var det gjennomsnittlige tidsforbruket pr. skjerm 13,2 timer.

Forholdene på de to strekningene var ellers ganske like, en kortfattet sammenligning er gjort i tabell 3.

P.nr	422-616	840-1054
Injeksjonsstrategi	Sporadisk	Systematisk
Q-verdier	0,08-5,4	0,1-5,6
Overdekning, m	20,8	24,7
Innlekkasje før, l/min/100m	55	71
Innlekkasje etter, l/min/100m	2,9	4,6
Forbruk kg sement pr m	630	916
Snitt injeksjonstid pr skjerm, t	15,9	13,2

Tabell 3: En del parametere fra to soner med forskjellig injeksjonsstrategi.

5.2 V/C – forhold

I utgangspunktet skulle det benyttes blanderesepter med v/c- forhold fra 1,3 til 0,7. I disse reseptene inngikk også mikrosilika (Grout Aid) i varierende mengde fra 15% av tørrvekt sement ved v/c-forhold 1,3 til 7% ved v/c-forhold 0,7. Ved v/c-forhold lavere en 0,7 ble det ikke brukt mikrosilika.

I forbindelse med forskningsprosjektet ”Miljø og samfunnstjenlige tunneler” ble det bl.a. tatt prøver av ferdig blandet suspensjon ved forskjellige v/c- forhold. Forsøkene er rapportert i en egen rapport, ref 11. Det viste seg da at fasthetsutviklingen på suspensjonene var helt avhengig av v/c-forholdet. For Industrisement varierte tid for å oppnå en fasthet på 200 kPa fra 12 timer for v/c-forhold 1,0 til 30 timer for v/c-forhold 1,3. For mikrosegment var tallene hhv. 5 – 9 timer for v/c-forhold 0,7 og 50 – 110 timer for v/c- forhold 1,3. Konklusjonen av disse forsøkene var at blandinger med v/c- forhold over 1,0 gir uakseptable, lange herdetider og bør derfor ikke benyttes. Videre injeksjon på anlegget ble utført med suspensjoner med v/c –forhold fra 1,0 og ned til 0,5. For å stanse utgang på stoff, er det i enkelte tilfelle benyttet v/c – forhold helt ned i 0,4. Dette har stort sett vært vellykket og i stor grad erstattet bruken av spesialsementer. En annen fordel med denne metoden er at skjermhull fortsatt har vært injiserbare etter at utgangen på stoff er stanset.

5.3 Injeksjonstrykk

Bruk av tykke blandinger, med v/c-tall mindre enn 1 kan ha medført at inntrengning i enkelte hull muligens har blitt redusert. Dette er forsøkt kompensert med høyere injeksjonstrykk. Dessverre har dataregistreringene av anvendt trykkutvikling ikke vært gjennomført i tilstrekkelig omfang. Registreringsintervallene har vært for store og en har ikke benyttet seg av muligheten til å få registrert trykkutviklingen til hvert enkelt injeksjonshull. Men det har vært mange tilfeller der det ikke har vært mulig å få inn injeksjonsmasse i starten på injeksjon av et hull ved ”normale” trykk (40 – 50 bar). Det er da benyttet trykk i størrelsesorden 70 – 80 bar for å få initiert innstrømning, hvoretter injeksjon i de fleste tilfelle har kunnet

Inntrengning

fortsette ved lavere trykk. Også hull hvor injeksjonen har stanset opp etter en stund med små innganger, har injeksjonstrykket blitt øket til det samme nivået. Injeksjonen har på denne måten vært utført tilnærmet etter GIN – metoden. GIN står for Grout Intensity Number og er produktet av trykket i bar og injeksjonsinngang i liter pr. boremeter. Metoden er ikke brukt systematisk og har vel kun vært lagt som en føring for arbeidene.

Den gode inntrengningen av injeksjonsmasse en har hatt i leirskiferen/knollekalken er til en viss grad en ny erfaring. Tidligere erfaringer fra slike lavpermeabilitetsbergarter, som f.eks. avløpstunnelene til VAV og Fjellinjen i Oslo, har ofte vært at anvendelse av høyt injeksjonstrykk har blokkert injiseringen ganske raskt, enten i utstyret mellom pumpe og borehull, eller i fjellet nært borehullet (tolkning pga meget liten inngang). Slike erfaringer med bruk av høyt trykk har en hatt både med v/c-tall under 1 og over 2.

Sannsynlig forklaring på disse nye erfaringer kan være en kombinasjon av at mikrosilika og superplastiserende tilsetninger har gitt sementen bedre stabilitets- og inntrengningsevne, og at moderne pumpe- og blandeutstyr har gitt gunstigere pumpebetingelser.

Med overdekning fra 5 til 35 meter har injeksjonstrykkene på dette anlegget vært relativt høye, se figur 3. Figuren viser anvendt sluttrykk mot løsmasse og bergoverdekningen.

Ved bruk av så høye trykk vil det alltid være en fare for utgang av injeksjonsmasse i dagen. Dette skjedde da også i forbindelse med injeksjon av en svært oppsprukket og vannførende gang med syenittporfyr. Utgangene i dagen har vært små og begrenset til inntrengning av injeksjonsmasse i drenslag rundt et hus samt enkelte utganger i hager og langs en veg. Kummer og ledninger i området har blitt inspisert uten at det er funnet injeksjonsmasse her.

5.4 Industrisement vs mikrosegment

I utgangspunktet hadde man en filosofi som gikk ut på at mikrosegment skulle brukes der en hadde strenge krav til tetthet, mens Industrisement skulle benyttes ved moderate krav til tetthet.

Materialkostnadene for en mikrosegment er normalt 4 – 5 ganger høyere enn for Industrisement. Det er derfor av stor interesse å få sammenlignet de to injeksjonssementene. Dette er forsøkt ved å bruke de to sementtypene på sammenlignbare strekninger mht geologi, innlekkasje før injeksjon, krav til tetthet, injeksjonsprosedyre, innlekkasje og tidsforbruk.

Mikrosegment ble benyttet fra injeksjonen startet ved p.nr 440 til p.nr 860. Denne delen av tunnelen omfatter både en delstrekning med moderate innlekkasjekrav (14 l/min. pr. 100 m mellom pr. 425 - 650) og strenge krav til innlekkasje (7 l/min. pr. 100 m mellom pr. 650 - 900). Deretter fulgte en strekning, mellom p.nr 900 - 1060, med

moderate krav hvor det ble benyttet Industrisement. På grunn av god fjellkvalitet, startet injeksjon med Industrisement allerede ved pr. 860 hvor det fortsatt var strenge krav til innlekkasje. Mellom p.nr 1060 og 1280 ble det igjen benyttet mikrosegment, mens det fra p.nr 1280 og ut til påhugg Nydalen ved p.nr 1660 stort sett er benyttet Industrisement.

P.nr Nr.	440-700	750-860	860-1060	1060-1280	1280-1660
Sement type	Mikro	Mikro	Industri	Mikro	Industri
Krav, l/min pr 100m	14	7	14	8	10
Q-verdier	0,08-16,8	0,01-5	0,1-5,6	0,04-3,6	0,1-5,3
Overdeknings Forhold, m	17-24	24-27	21-27	17-29	25-29
Innlekkasje før injeksjon, l/min pr 100m	43	42	75	101	Ikke reg.
Innlekkasje etter injeksjon, l/min/100m	2,9	8,0	3,1	3,5	3,4
Forbruk, kg/m	893	909	935	2445	2002
Forbruk tid, timer/m	3,3	3,9	2,9	3,7	2,5

Tabell 4: Data fra soner hvor det er brukt forskjellig injeksjonssement.

Mikrosegmenten har generelt vært lettere å injisere enn Industrisementen, dvs. at mikrosegment stort sett har gått inn ved lavere trykk og i større grad hatt en "normal" trykkoppbygging enn Industrisementen.

I tillegg har det vist seg på dette prosjektet at forbruket av mikrosegment har ligget vesentlig høyere enn forbruket av Industrisement regnet pr. løpemeter tunnel. Dette har også ført til at injeksjonstiden pr. skjerm ved bruk av mikrosegment har blitt høyere enn for Industrisement.

Ut fra den geologiske kartleggingen og andre registreringer på stuff, er det ingen signifikant forskjell i bergmassekvaliteten, overdekningsforhold, innlekkasje før injeksjon eller andre utførelsesmessige forhold hvor det er benyttet mikrosegment i forhold til hvor det er benyttet Industrisement (se figur 3-7 og tabell 3).

Som det framgår av innlekkasjemålingene i figur 7 og vedlegg 12, er det ingen markert forskjell på oppnådd tetthet for de forskjellige sementtypene.

Det er derfor nærliggende å trekke den konklusjonen at samme tetthet kunne vært oppnådd for hele denne tunnelen kun ved bruk av industrisement.

Dersom denne konklusjonen er riktig, ville bruk av bare Industrisement ført til et enklere injeksjonsopplegg med betydelige besparelser, både med hensyn på tid og kostnader.

Oslofeltets sedimentære bergarter er i utgangspunktet relativt tette med tynne, ofte leirfylte sprekker. Erfaringsmessig har disse bergartene vært vanskelig å tette. Med unntak av andre skiferbergarter har de fleste andre norske bergarter et mer åpent sprekkesystem som gjør de lettere å injisere.

Konklusjonen fra T-baneringen bør derfor være gyldig også for andre typer bergarter enn leirskifer og knollekalk.

5.5 Optimalisering av injeksjonsopplegg

5.5.1 Tilstrekkelig tetthet gjennom en injeksjonsrunde

Etter hvert erfarte man at systematisk injeksjon med 21 meter lang skjerm, 31 hull i skjermen og 2 salvers overlapp mellom skjermene ga innlekkasjer i tunnelen under de fastsatte kravene. Dette viste seg også ved at kontrollhull etter 1. omgangs injeksjon stort sett var tørre og ikke ga større innganger av injeksjonsmasse. Det ble derfor besluttet å kutte helt ut kontrollhull etter 1. omgangs injeksjon. Ved 1. omgangs injeksjon ble det samtidig åpnet for større innganger pr. hull. Visuell kontroll og lekkasjemålinger bak stuff viser at tilstrekkelig tetthet ble oppnådd gjennom en runde.

Av totalt 115 injeksjonsrunder var det 85 injeksjoner hvor en runde var tilstrekkelig. Det var ellers 5 ganger nødvendig med 2 runder, 1 gang med 3 runder, 1 gang med 4 runder, 1 gang med 6 runder og 1 gang med 7 runder. Dvs 30 runder fordelt på 9 stuffer som ble injisert mer enn en runde, men 24 av disse rundene foregikk i problemsonen mellom p.nr 722 og 749.

Målt innlekkasje er til dels godt under kravet satt i alle områder bortsett fra i problemsoneområdet (650-750), se figur 1. Utenom problemsonen er innlekkasjen mindre enn 5 l/min/100m, men den endrer seg. I problemsoneområdet (p.nr 650-750) avtar innlekkasjene,

se figur 2, mens det neste område hvor innlekkasjen er avgrenset, p.nr 650-900, kan en fra figur 8 se at den først avtok før den begynte å stige.

5.6 Tidsoptimalt injeksjonsopplegg

Innledning

Studiet av tidsoptimal injeksjon ved T-baneringen gjelder den rutinemessige, systematiske injeksjon som er utført i tunnelen. Tilpasset injeksjon i svakhetssoner og oppsprukne, vannførende intrusivganger er holdt utenfor, dvs sonen mellom p.nr 700 og 750.

Ved systematisk forinjeksjon må tettingen av berget rundt tunnelen ses på som en del av den endelige tunnelkonstruksjonen. Utførelsen av injeksjonsarbeidet må derfor bli en del av den rytmiske tunneldrift. På et nytt tunnelprosjekt med systematisk injeksjon er det derfor viktig med en innledende prøveperiode hvor man lærer fjellforholdene å kjenne og kan komme frem til et driftopplegg som i størst mulig grad er tilpasset fjell- og lekkasjeforhold samt den aktuelle skiftordning. For en tidsoptimal, systematisk injeksjon har utgangspunktet vært at man skal oppnå tilstrekkelig tetthet med kun én injeksjonsrunde. Antall hull i skjermen, skjerm lengde og lengde på overlappsoner må tilpasses disse forhold.

Ved tunneldrift med systematisk, tidsoptimal forinjeksjon er det en rekke faktorer og tidsavhengige arbeidsoperasjoner som griper inn i hverandre. For å oppnå et best mulig resultat, er det viktig at man analyserer hver av disse samt sammenhengen mellom dem. Noen av de viktigste enkeltfaktorene synes å være:

- Skiftordninger og tidsrestriksjoner
- Fjell- og lekkasjeforhold langs tunnelen
- Salvesprengning med optimalisering av brytning, sikringsarbeider
- Injeksjonsutstyr og logistikk
- Oppsatte lekkasjekrav, type injeksjonsmiddel, injeksjonsprosedyre og skjerm dimensjonering

Den overordnede målsetting må være å oppnå størst mulig inndrift med tett nok tunnel pr. tidsperiode.

5.6.1 Skiftordningen

Ved T-baneringen har det vært en vanlig skiftordning med to 10-timers skift med samlet arbeidstid pr. døgn fra kl. 06.00 til kl. 02.00 og 11 skift pr. uke. På grunn av prosjektets beliggenhet i et tettbygget, urbant område, har det som tidligere nevnt vært forbud mot støyende arbeid som boring, sprengning og steintransport etter klokken 22.00 om kvelden. Injeksjonsarbeider har vært tillatt også etter kl. 22.00 og har i praksis kunne foregå natten igjennom. Likeledes har man mellom

kl. 22.00 og 02.00 kunnet utføre sprøytebetongarbeider, rensk og bakstufarbeider.

Med tanke på optimal tidsutnyttelse, er det i en slik situasjon viktig at tiden mellom kl. 06.00 og kl. 22.00 utnyttes best mulig til de støyende arbeider (salveboring, sprengning, steintransport, bolteboring og boring av injeksjonshull). I perioden mellom kl. 22.00 og 02.00 vil det lett kunne oppstå et visst tidstap. Ved en optimal tilrettelagt drift gjelder det å utnytte denne tiden best mulig til arbeider som er tillatt slik at et eventuelt tidstap reduseres til et minimum. Utfordringen blir å tilpasse driften til de varierende forhold langs tunneltraseen innenfor den gitte tidsramme.

5.6.2 Fjell- og lekkasjeforhold langs tunnelen

For et nytt tunnelprosjekt hvor systematisk forinjeksjon er aktuelt, er det nødvendig med gjennomgang av de geologiske forhold langs tunneltraseen. Det må utarbeides en oversikt over hvor det er større lekkasjesoner som krever tyngre, tilpasset injeksjon og hvilke partier med forholdsvis ensartede fjellforhold hvor systematisk, rutinemessig forinjeksjon kan gjennomføres. Ut fra en slik oversikt planlegges injeksjonsarbeidene.

Berggrunnen langs T-banetunnelen består av kambrosiluriske sedimentbergarter, hovedsakelig leirskifer, knollekalk og noe kalkstein. Disse bergarter er stedvis gjennomskåret av ganger av syenitt, syenittporfyr og diabaser. Fjelloverdekningen langs traseen varierer mellom 5 - 25 m.

På et parti, ca. 330 - 360 m fra påhugget ved Ullevål stadion, krysser vannførende, oppknuste diabasganger og syenittporfyrsoner tunneltraseen. Her ble tunnelen drevet gjennom med tidkrevende og intensiv tilpasset injeksjon med stor masseinngang. Også på siden av disse sonene har berget vært permeabelt. De øvrige deler av tunnelen, på begge sider av disse sonene, ble drevet med systematisk forinjeksjon.

I vurderingene av tidsoptimal injeksjon er diabas- og syenittporfyrsonen holdt utenfor. Kun data fra den rutinemessige injeksjon på begge sider danner grunnlag for vurderingene av tidsoptimaliseringen.

5.6.3 Salvesprengning, brytning, skjermdimensjonering og sikringsarbeider

I T-banering tunnelen ble det fra starten utført en sporadisk injeksjon etter forutgående sondérboring. Etter sondérboring og eventuell

injeksjon ble det drevet 2-3 salver. Inndriften pr. salve var i utgangspunktet anslått til 5 m. Etter kort tid viste det seg at inndriften var langt høyere, ca. 10 - 12 m for 2 salver og opp til 17 m for 3 salver. Høy inndrift er gunstig tidsmessig, men den økede inndrift medførte i dette tilfelle at den prosjekterte overlappplengde på skjermhullene ble for kort. Hullenes lengde var satt til 18 eller 21 m med henholdsvis 2 eller 3 salver mellom hver skjerm. Når de 3 m lange injeksjonsstavene var satt til maksimal dybde, ble overlappplengden kun 2 - 3 m. Som følge av dette ble skjermplengden økt og det ble videre hovedsakelig benyttet skjermhull med 21 eller 24 m lengde med henholdsvis 2 eller 3 salvers drift mellom skjermene, se figur 10.

Samtidig ble også injeksjonsprosedyren endret ved at sonderhullene ble sløyfet mens hullantallet i skjermen ble økt med 8 slik at det fortsatt var 31 hull i skjermen. Det ble drevet videre med systematisk forinjeksjon og én injeksjonsrunde. Med tanke på tidsoptimal injeksjon, vil slike endringer medføre en ny driftsrytme som det kan bli vanskelig å tilpasse de tidsrammer som er satt. Derfor kan det, som det ble gjort i dette tilfelle, være nødvendig å veksle mellom noe ulik skjermplengde og salveantall for å få best mulig tidsutnyttelse.

Når det gjelder sikring i tunnelen, er det kun arbeidssikringen som har betydning tidsmessig idet all permanent sikring vanligvis utføres etter at tunnelen er drevet ferdig. Arbeidssikringen ved T-baneringen besto på de systematisk injiserte tunnelpartier av sammenhengende 5-7 cm tykk sprøytebetong i heng og vederlag. Av tidsmessige hensyn ble denne hovedsakelig tilstrebet utført om natten etter klokken 22.00. Boltningen varierer noe fra ca. 2 - 6 bolter pr lm tunnel. Da boring av boltehull og også i stor grad montasje av boltene ble utført mellom kl. 06.00 og 22.00, har variasjoner i bolteomfanget medført en del variasjoner i den totale drivetid pr. tunnelmeter.

5.6.4 Injeksjonsutstyr

En absolutt forutsetning for en tidsmessig optimal injeksjon er naturligvis moderne og effektivt injeksjonsutstyr med tilstrekkelig pumpe- og trykkapasitet og med mulighet for å injisere med flere slanger samtidig. Likeledes tilstrekkelig blandekapasitet. Injeksjonsutstyret er like viktig som bore- og sprøyteriggen. For å redusere all tilrigging til et minimum, må organisering av mannskap være god og all transport frem til injeksjonsriggen fungere effektivt.

På T-baneringen ble det benyttet 3 stk. injeksjonspumper, videre 1 stk. mikser på 400 l og 2 stk. omrørere med samme størrelse, 1stk. storsekksilo og tilsetningspumper. Det ble injisert med 2 linjer. Utstyret fungerte godt, men det viste seg at blandekapasiteten til tider ikke holdt tritt med pumpekapasiteten. Dette må ikke skje dersom tidstap skal unngås.

Videre ble det benyttet kun engangspakkere. Dette gir en tidsgevinst da det brukes bare en pakke i hullet, men neppe en fullt ut kontrollert injeksjon. Imidlertid vil dette i de fleste tilfeller med rutinemessig, systematisk injeksjon være tilstrekkelig.

5.6.5 Variasjon i bergets tetthet, oppsatte tetthetskriterier, type injeksjonsmiddel og injeksjonsprosedyre.

Under prosjektering av T-banering tunnelen ble det ut fra hensynet til bebyggelsen i dagen over tunnelen satt opp lekkasjekriterier som varierte fra 7 - 14 l/ min. pr. 100 m tunnel. Se pkt. 3.5.

Variasjon i fjellets tetthet og oppsatte lekkasjekrav har ved T-baneringen medført bruk av både mikro- og Industrisement. Tilsetning av Grout-Aid har, bortsett fra de første ca. 200 m, vært benyttet. Mengden av innpumpet materiale har variert med fjellets tetthet og har dermed ført til variasjon i injeksjonstiden. F. eks. på partiet fra ca. p.nr 1050 til 1400, med lekkasjekrav 8 l/min. pr. 100 m tunnel, er det på første halvdel av strekningen benyttet mikrosegment, mens det er benyttet industrisement på siste halvdel. På strekningen med mikrosegment er masseinngangen høyere enn på strekningen med Industrisement. Pumpetiden ble da også gjennomgående høyere. Dette førte til at totaltiden for injeksjon med mikrosegment ble høyere enn for Industrisement.

Nødvendig herdetid etter avsluttet injeksjon har også naturligvis vesentlig betydning for totalforbruket av tid. Her spiller også v/c -tallet en vesentlig rolle. Det ble konkludert med at masse med v/c -tall over 1,0 gir uakseptabelt lange herdetider og bør ikke benyttes. Mikrosegment uten tilsetning av Grout Aid har betydelig lenger herdetid enn Industrisement.

For å kunne møte variasjonen i lekkasjekrav og fjellets tetthet, må driftsopplegget være fleksibelt med mulighet for å variere skjermengder og antall salver mellom hver injeksjonsomgang. Ved T-baneringen har det ved den systematiske forinjeksjonen innen de forskjellige lekkasjekravsoner vært benyttet skjermengder fra 18 - 24 m og 2 eller 3 salver mellom injeksjonsskjermene.

5.6.6 Vurdering av tidsforbruket ved driving av T-banering tunnelen

For å vinne erfaringer vedrørende tidsoptimal injeksjon, er det foretatt en detaljert gjennomgang av tidsforbruket ved driving av tunnelen fra Ullevål stadion til Nydalen. Som beskrevet ovenfor, griper både selve tunneldriften og injeksjonen inn i hverandre slik at det er effektiviteten i den totale driftssyklus som er avgjørende for at målet om størst mulig inndrift med tett tunnel skal oppnås.

I diagrammet på figur 9a vises variasjonen i både injeksjonstid, drivetid og totaltid pr. meter tunnel. I diagrammet på figur 8a vises sementtype brukt ved injeksjonen og injiserte mengder langs tunnelen.

I følge kontrakten regnes injeksjonstiden fra boring av sondérhull eller injeksjonshull starter til injeksjonen avsluttes. Drivetiden omfatter da all tidsforbruk utenom dette tidsrom og innbefatter salveboring, sprengning, steintransport, rensk og arbeidssikring i tunnelen. Permanent sikring av tunnelen utføres etter at tunneldriften er avsluttet og inngår derfor ikke i tidsregnskapet.

Fra en startet med injeksjon ved Ullevål stadion (p.nr 425) og frem til p.nr 650, var lekkasjekravet satt til 14 l/min. pr. 100 m tunnel. På denne strekningen ble det etter den opprinnelige beskrivelse boret 8 stk. 21 m lange sondérhull og injeksjon foretatt dersom lekkasjen fra disse overskred en viss grense. Enkelte seksjoner ble pga små lekkasjer i sondérhullene ikke injisert. Ved injeksjon ble det benyttet mikrosegment i 23 stk 18 m lange skjermhull, men mengdene var relativt små. Selv med de lave injeksjonsmengder ble likevel injeksjonstiden, sammenlignet med senere injeksjon, ganske høy. Drivetiden var, bortsett fra enkelte salver, omtrent som gjennomsnittlig for hele driftstiden, ca. 2,5 time pr. tunnelmeter. De totale drivetider (inkl. injeksjon) ble imidlertid ganske høye på denne strekningen til tross for moderate lekkasjekrav. Dette kan skyldes at man her var i en innkjøringsfase. Det var tydelig at en injeksjonsprosedyre med sondérboring og lekkasjeavhengig injeksjon ikke ga noen tidsgevinst. Dette bekreftes også ved at tiden pr. injisert tonn injeksjonsmasse var svært høy.

Fra ca. p.nr 600-700 økte tidsforbruket etter hvert meget da tunnelen her ble drevet gjennom diabas- og syenittporfyrsonen som medførte svært tidkrevende injeksjon. Ved ca. p.nr 750 var selve sonen gjennomdrevet .

Fra syenittporfyrsonen og frem til ca. p.nr 820 ble det i en overgangssone delvis sondérboret før injeksjon. Injeksjonsskjermene på denne strekningen hadde 33-42 hull. Videre frem til p.nr 900 ble det igjen en ordinær skjerminjeksjon hvor skjermen hadde 31 stk. 21 m lange hull. Lekkasjekravet var 7 l/min. pr. 100 m tunnel på hele denne strekningen. Det ble injisert med mikrosegment og drevet 2 salver mellom hver injeksjonsomgang. Inngangen av injeksjonsmasse var jevn, relativt liten og med markert synkende injeksjonstider. Mot slutten av seksjonen er det også injisert noe med Industrisement, også med lavt tidsforbruk. Til tross for dette, viser tidsdiagrammet imidlertid at drivetidene på dette partiet var høye og ujevne. Dette medførte at de totale drivetider på denne strekningen stort sett var høyere enn man skulle vente. En mulig forklaring på dette kan være at injeksjonsprosedyren medførte en driftsrytme som var dårlig tilpasset skiftordning og tidsrestriksjoner.

Fra p.nr 900 til p.nr 1060 var det et mer moderat lekkasjekrav på 14 l/min. pr. 100 m tunnel. Til tross for dette økte stedvis masseinngangen betydelig selv om det ble injisert med Industrisement. Imidlertid var injiseringstiden lav. Tunneldrivetiden var også her svært varierende og til dels høy, men falt mot slutten av seksjonen. Det ble her drevet med 3 salver mellom hver injeksjonsomgang som besto av 32 stk. skjermhull med 24 m lengde. På denne strekningen har man ikke oppnådd en tidseffektiv drive- og injeksjonssyklus med tanke på timeforbruk, men større fleksibilitet i bruken av tilgjengelig tid har medført økt inndrift målt per uke. Også her bekreftes dette av relativt høye tider pr innpumpet tonn injeksjonsmasse.

Videre, fra p.nr 1060 - p.nr 1400, var det et skjerpet lekkasjekrav på 8 l/min. pr. 100 m tunnel. Her ble det på første del av strekningen injisert med mikrosegment med overgang til Industrisement på siste del. På hele strekningen er det ganske høye masseinn ganger, men med markert reduksjon mot slutten hvor det ble injisert med Industrisement. Injeksjonstiden er markert høyere enn på forrige seksjon som hadde mer moderate lekkasjekrav, dog ganske jevn og tydelig fallende mot slutten av seksjonen. Det som imidlertid her fremgår av diagrammet, var ganske lave og jevne tunneldrivetider, gjennomsnittlig fallende fra ca. 2,5 til 1,75 timer pr. meter tunnel. Totaltiden pr. meter tunnel på ca. 3 - 4 timer er jevnere på denne strekningen enn på de tidligere seksjonene og dessuten gradvis avtagende på samme måte som både injeksjons- og drivetidene. Pumpetiden pr. tonn injeksjonsmasse er markert lavest på denne strekningen.

Drive- og injeksjonsprosedyren har her hovedsakelig vært forinjisering med 32 stk. 21 m lange injeksjonshull, én injeksjonsrunde og driving av 2 salver mellom injeksjonsomgangene. Med tanke på tidsoptimal drift, synes driftsopplegget på denne seksjonen å ha vært meget godt tilpasset tidsrestriksjoner og fjellforhold.

På den siste seksjonen, fra p.nr 1400 til utslaget mot Nydalen ved p.nr 1650, er lekkasjekravet 10 l/min. pr. 100 meter tunnel. Her er det injisert med Industrisement. Tidsregistreringene fra denne del av tunnelen er her imidlertid mangelfulle og enkelte uforholdsmessige høye og uregelmessige drivetider mot slutten av tunnelen medfører at lite informasjon vedrørende tidsoptimal drift kan trekkes ut her.

5.7 Sammenligning Tåsen – T-baneringen

Som beskrevet i bakgrunn for FoU-prosjektet, er fjelltunnelen på T-baneringen drevet gjennom samme fjellmassivet som Tåsen-tunnelene på ring 1. På bakgrunn av resultatene fra Tåsen-tunnelene, der en ikke oppnådde ønsket tetthet og måtte installere infiltrasjonsanlegg, ble

kravene til både tetthet og injeksjonsmetodikk skjerpet på T-baneringen. Nøkkelinformasjon om de to prosjektene er presentert i etterfølgende tabell.

	Tåsen-tunnelen	T-baneringen inkl. problem sone
Tunnellengde	933m Ø – 937m V	1235 m
Utforming	To løp med flere ramper, tverrsnitt ca 65-80 m ²	Et løp 65 m ²
Drevet	1997-1998	1999-2002
Innlekkasje totalt	13 l/min/100m (pr løp)	4,3 l/min/100m
Lekkasjekrav	Ved systematisk injeksjon 10 l/min/100m ellers 15-20 l/min/100m	Lekkasjekrav fra 7-14 l/min/100m
Gjennomsnittstall for sementforbruk	870 kg/time*	1100 kg/time
Sementforbruk pr hull	478 kg/hull	654 kg/hull
Sementforbruk pr m borehull	24 kg/m hull	32,6 kg/m hull
Sementforbruk pr m injisert tunnel	802 kg/m inj. tunnel	1960 kg/m inj. tunnel
Sementforbruk pr m ² tunnel	*26 kg/m ² inj. tunnel – *Tilsvarende verdi angitt i NGI-rapport 526521-6 til 33 kg/m ² tunnel	30 kg/m ² inj.tunnel
Tid brukt på injeksjon pr m injisert tunnel	0,92 time/m	1,78 time/m
	Rapid Norcem	Industrisement og mikrosegment Rescon 900
Boremeter pr meter tunnel		60 bm/m

Tabell 5: Fakta og kjernedata fra Tåsen-tunnelen og T-baneringen

P.nr	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 2650-2880, V	55 l/min pr 170 m 65 l/min pr 230 m	60 l/min pr 100 m over to løp
2820-3250, Ø 2880-3200, V	76 l/min pr 750 m	10 l/min pr 100 m *

Tabell 6: Innlekkasjer til Tåsen-tunnelen

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

Nøkkeldata for Tåsen-tunnelen er gitt i [tabell 5](#). Det forefinnes også en NGI-rapport angående injeksjonsarbeidene i Tåsen-tunnelen, sammendraget er tatt med her:

NGI sammendrag

"Det ble utført systematisk forinjeksjon i Tåsen-tunnelen over totalt 800 m fordelt over to løp. Totalt forbruk av injeksjonsmasse var på ca 33 kg pr m² 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 $k_i=2,55 \cdot 10^{-6}$ cm/sek."

Tabell 6 angir innlekkasjemålingene ved ferdigstillelse av Tåsen-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 ingen/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 stoff med 10m lange hull, store utganger.
- Større borekronediameter (64 mm) for å redusere boreproblemer, resultatløst.
- Mikroement ble prøvd, uten klare konklusjoner.
- Etterinjeksjon med polyurethan reduserte lekkasjene noe.

Sammenlignende konklusjoner Det fremgår av tabellene over at en har oppnådd en mye høyere tetthet på T-baneringen enn på Tåsentunnelene. Bergmasseforholdene har vært identiske for alle praktiske forhold, og grunnvannsnivå og poretrykk er lite påvirket av den nye tunnelen. Dette gode resultatet kan derfor bare skyldes injeksjonsmetodikken som er anvendt på T-baneringen. Det er totalt sett anvendt dobbelt så mye sement på T-baneringen som på Tåsen: 1960 kg pr m tunnel mot 802 på Tåsen. Noe høyere kapasitet på T-baneringen (1100 mot 870 kg injisert pr. time) har ikke bidratt til å redusere totaltiden på injiseringssyklusen nevneverdig; Tåsen 0,92 time pr. m. mot 1,78 på T-baneringen.

Den nye injeksjonsmetodikken er imidlertid meget ”robust”, idet den er meget systematisk og produksjonsvennlig, og har gitt god nok tetthet under de varierende bergmasseforhold på T-baneringen.

6 Oppsummering / konklusjon

Oppnådd tetthet

Siste injeksjonsrunde ble utført like før jul 2001. Da gjenstod det bare noen få meter av tunneldrivingen. Alle forhold for å få utført lekkasjemålinger i juleferien var lagt til rette. Det ble i løpet av juleferien utført 3 lekkasjemålinger i tunnelen, på hver av de 5 målestersklene samt på pumpe plassert i lavbrekket i tunnelen. Tabellen under viser målte innlekkasjer på hver enkelt delstrekning i forhold til krav i kontrakt.

Delstrekning	Lengde	Krav i kontrakt Liter/min. pr. 100 m	Målte lekkasjer Liter/min- pr- 100 m
425 – 650	225 m	14,0	2,9
650 – 900	250 m	7,0	8,0
900 – 1060	160 m	14,0	3,1
1060 – 1300	240 m	8,0	3,5
1300 – 1660	350 m	10,0	3,4
425 - 1660	1235 m		4,3

Tabell 7: Innlekkasje krav og innlekkasje målinger

Målte verdier ligger godt under kravene i kontrakten, bortsett fra i området mellom p.nr 650 – 900. Målte poretrykk i samme område er imidlertid stabile og ligger ca. 1,0 meter under de verdier som ble målt før tunnelen ble drevet. Antatt poretrykksfall ved innlekkasje på 7,0 l/min. pr. 100 m var på forhånd anslått til 2 – 3 meter i det samme området. Det har heller ikke vært registrert setninger på overliggende bebyggelse her.

Sporadisk/systematisk	Det var på forhånd planlagt å studere sporadisk injeksjon kontra systematisk injeksjon, men ganske raskt erfarte man at ved moderate til strenge krav er ikke informasjonen man får fra 8 sonderhull tilstrekkelig til å vurdere om man skal injiseres eller ei. I tillegg observerte man at lekkasjene flyttet seg til områdene som ikke var injisert og dessuten fikk en dårligere flyt i produksjonen.
V/C-forhold	Nye tilsetningsstoffer og bedre injeksjonsutstyr generelt har gjort det mindre problematisk å bruke lave v/c-tall og høyere injeksjonstrykk. Laboratorieforsøk utført på de blandereseptene og materialene som var brukt på dette prosjektet viste at høye v/c-forhold (>1.0) var ugunstig for herdeforløpet, ved at herdetiden økte.
Trykk	På mange borehull hvor masseinngangen i utgangspunktet var lav, viste det seg effektivt å gi massene et trykk- ”kick” (her 60-80 bar). Svært ofte åpnet det hullene og en kunne fortsette injeksjonen ved ”normale” trykk (20-40 bar).
Mikro vs Industri	Mikro- og Industrisement er sammenlignet på flere sammenlignbare strekninger og en ser veldig liten forskjell på tetteresultatet. Dessuten er tidsforbruket høyere ved bruk av mikrosegment pga noe større masseinngang. Når prisen på mikro i tillegg er 4-5 ganger så høy burde forskjellen på oppnådd tetteresultat helst vært høyere.
Tåsen vs T-baneringen	Det ble lagt ned en annen og større tetteinnsats i T-baneringen enn i Tåsen- tunnelene, noe som ga et klart bedre tetteresultat og som har medført at en har unngått setningsskader og etablering av permanente infiltrasjonsbrønner.
Generelt	Den anvendte injeksjonsmetodikken er imidlertid meget ”robust”, idet den er meget systematisk og produksjonsvennlig for entreprenøren, og har gitt god nok tetthet under de varierende bergmasseforhold på T-baneringen.
Skjerm lengde/inndrift	Økt skjerm lengde og økt antall salver mellom hver injeksjonsrunde kan øke inndriften uten å ødelegge tetteresultatet, men med restriksjoner på driften blir bildet noe mer komplisert.
Tidsoptimalisering	Basert på generelle erfaringer og erfaringene fra T-banering-tunnelen kan følgende erfaringer vedrørende tidsoptimal, systematisk forinjeksjon trekkes:

- Utgangspunktet må være at én injeksjonsrunde gir tilstrekkelig tetthet.
- Moderne , veltilpasset injeksjonsutstyr med tilstrekkelig blande-, pumpe- og trykkapasitet.
- God organisering av mannskaper og et effektivt transportsystem som gir korte riggetider.
- Kontrakten må gi rom for en innkjøringsperiode for å tilpasse drifts- og injeksjonsopplegget til de rådende fjell- og lekkasjeforhold samt skiftordning og tidsrestriksjoner.
- For rutinemessig, systematisk injeksjon må det tilstrebes et fleksibelt driftsopplegg som må kunne tilpasses varierende injeksjonsforhold og lekkasjekrav.
- Injeksjonsskjermens lengde og tilhørende drivlengde mellom hver injeksjonsomgang må tilpasses skiftordning og tidsrestriksjoner. Minst mulig dødtid må tilstrebes.
- Benytte den sementtype som på kortest mulig tid gir tilstrekkelig tetthet.
- Unngå v/c-tall over 1,0 da dette gir uakseptable lange herdetider.
- Bruk av engangspakkere.
- Best mulig inndrift pr. salve.
- Ved systematisk injeksjon ved T-baneringen synes en injeksjonsprosedyre med en injeksjonsskjerm bestående av 32 stk 21 m lange injeksjonshull og 2 salver mellom injeksjonsomgangene og kun én injeksjonsrunde å ha vært mest tidsoptimal ut fra skiftordningen .
- Erfaringene fra T-baneringen viser at en tidsoptimal drift på én tunnelstrekning ikke nødvendigvis blir like bra på en annen strekning med et annet lekkasjekrav og andre fjellforhold.

Ut fra kartlegging av lekkasjer i tunnelen kan en fastslå at injeksjonen på dette prosjektet ikke har redusert vann/frostsikrings omfanget.

Nøkkeldata

Tabell 8 viser en del nøkkeldata i forbindelse med injeksjon av T-banering tunnelen.

	Tunnel u/sone	Tunnel m/sone
Lengde	1185	1235
Kg / m tunnel	1508	1960
Kg / boremeter	28,1	32,6
Boremeter pr m tunnel	53,6	60,2
Timer pr meter tunnel	1,07	1,78

Tabell 8: Gjennomsnittsdata knyttet til injeksjonsarbeidene på T-baneringen.

7 Referanseliste

- [1] *Aasen, O. et al.*, 2000: NFR-prosjekt – Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Delprosjekt C: Tetteteknikk – rapport fra forprosjekt. Intern-rapport nr. 2131. Statens vegvesen, Vegteknisk avdeling.
- [2] *Davik, K.I.*, 2001: NFR-prosjekt – Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Prosjektbeskrivelse 2000-2003. Intern-rapport nr. 2201. Statens vegvesen, Vegteknisk avdeling.
- [3] *Andersson, H., Åndal, T., Aasen, O.*, 2001: NFR-prosjekt – Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. C2/5: Injeksjonsstrategi ved forinjeksjon av tunneler. Delrapport: Erfaringer fra utvalgte tunnelprosjekter. Intern-rapport nr. 2233. Statens vegvesen, Vegteknisk avdeling.
- [4] *Boge, K. og Haugen, T.*: R150 TÅSENTUNNELEN. Vurdering av setningsrisiko for hus over traseen. Rapport fra GeoVita as, 16.06.97.
- [5] *Bøyeie, Anne E.*: Kartlagt geologi. A3-tegninger i svart/hvitt i plan og profil.
- [6] *Kveldsvik, Vidar, Hagen, Annete W., Jensen, Tor G. og Karlsrud, Kjell.*: Tetting av tunneler i tettbygde strøk. Sammenstilling av erfaringsdata. Rapport 526521-1 fra NGI, 21.12.98.
- [7] *Kveldsvik, V. og Hagen, A.W.*: Tetting av tunneler i tettbygde strøk. Tåsen-tunnelen. Rapport 526521-6 fra NGI, , datert 14.12.98.
- [8] *Underland, Siv T.*: Injeksjon i tunnel. Diplomoppgave fra NTNU, med Randi Hermann som veileder (da NTNU), 21.12.98.
- [9] *Åndal, T., Aasen, O. og Boge, K.*: ”Erfaringer fra injeksjonsteknisk vanskelig sone ved T-baneringen”, Intern rapport nr. 2234. Statens Vegvesen, Vegteknisk avdeling.
- [10] *Kveldsvik, V.*..... Geologisk rapport fra T-baneringen
- [11] *Heimli, P., Beitnes, A.*: Laboratorietesting av mikrosemeter ved T-baneringen. Intern rapport nr. 2235 . Statens Vegvesen, Vegteknisk avdeling.
- [12] *Heimli, P., Beitnes, A.*: Laboratorietesting av injeksjonssemeter ved T-baneringen. Intern rapport nr. 2250. Statens Vegvesen, Vegteknisk avdeling.

Diverse brosjyrer og nærinformasjon.

7.1 Figurliste

Figur 1:	Kart som viser fremtidig T-banering
Figur 2:	Lengdesnitt av tunnel med krav til innlekkasje
Figur 3:	Løsmasse og bergoverdekning langs tunneltraseen
Figur 4:	Q-verdier langs tunneltraseen
Figur 5:	RQD verdier fra Rockma registreringene
Figur 6:	RQD verdier fra geologiske kartleggingen
Figur 7:	Lekkasjer før og etter injeksjon
Figur 8a-b:	Mengder injeksjonsmasse
Figur 9a-c:	Tidsstudie kurver
Figur 10:	Antall salver mellom hver injeksjonsrunde og lengde på injeksjonsskjermene

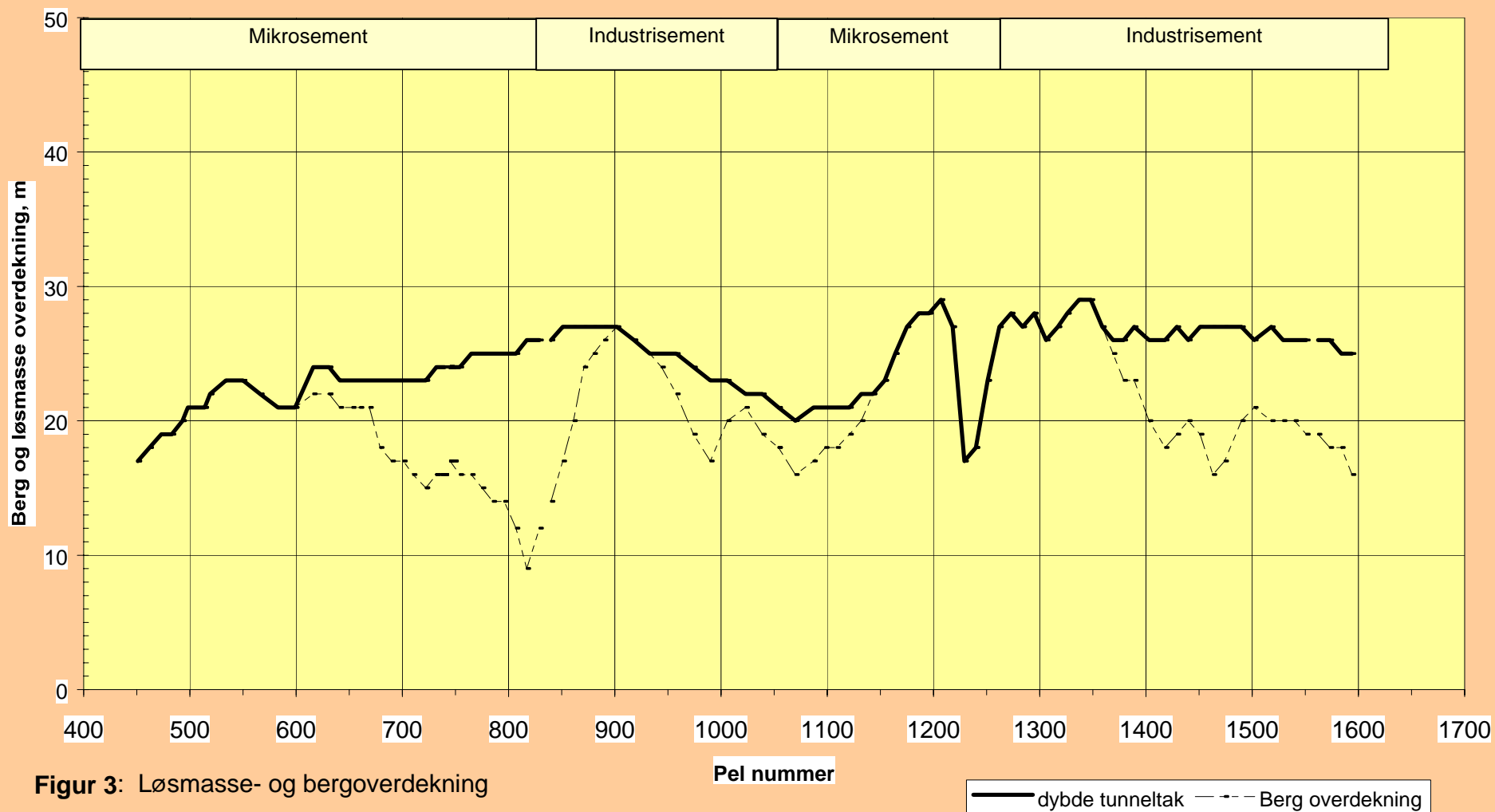
7.2 Tabeller

Tabell 1:	Krav til maksimal innlekkasje for delstrekninger og planlagt brukt injeksjonsstrategi
Tabell 2:	Medgåtte mengder sammenlignet mot prosjekterte.
Tabell 3:	En del parametere fra to soner med forskjellig injeksjonsstrategi.
Tabell 4:	Data fra soner hvor det er brukt forskjellig injeksjonssement.
Tabell 5:	Fakta og kjernedata fra Tåsen-tunnelen
Tabell 6:	Innlekkasjer til Tåsen-tunnelen
Tabell 7:	Innlekkasje krav og innlekkasje målinger
Tabell 8:	Gjennomsnittsdata knyttet til injeksjonsarbeidene fra T-baneringen

7.3 Vedlegg

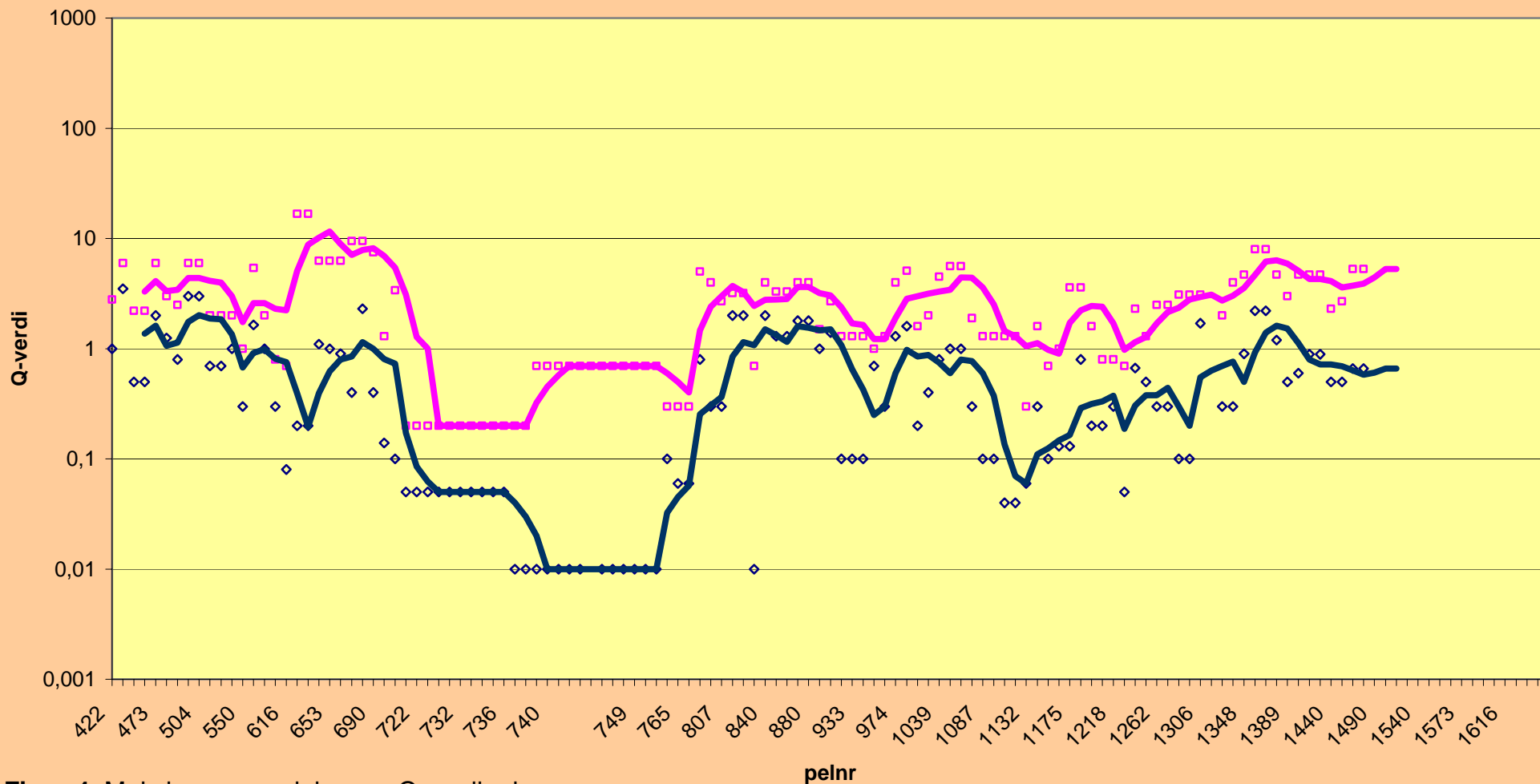
Vedlegg 1:	Lengdesnitt og plantegning for tunnelen
Vedlegg 2:	Skjermgeometri systematisk injeksjon
Vedlegg 3:	Injeksjonsprosedyre systematisk injeksjon
Vedlegg 4:	Kontraktsbeskrivelse injeksjonsarbeider (8 sider)
Vedlegg 5:	Oppsummering utførte injeksjonsarbeider (2 diagrammer)
Vedlegg 6:	Geologisk kartlegging i tunnelen (24 sider)
Vedlegg 7:	Kart med plassering av poretrykksmålere (2 stk)
Vedlegg 8:	Avlesningsresultater poretrykksmålere (6 sider)
Vedlegg 9:	Injeksjonsrapporter (119 sider)
Vedlegg 10:	Oversikt injeksjon (1 side)
Vedlegg 11:	Målebrev arbeider foran stuff (10 sider)
Vedlegg 12:	Resultater lekkasjemålinger (7 sider)
Vedlegg 13:	Veidekke ukerapporter (Ikke vedlagt)
Vedlegg 14:	Logac rapporter (Ikke vedlagt)
Vedlegg 15:	Salvelogg (4 sider)

Sement type -løsmasse- og bergoverdekning



Figur 3: Løsmasse- og bergoverdekning

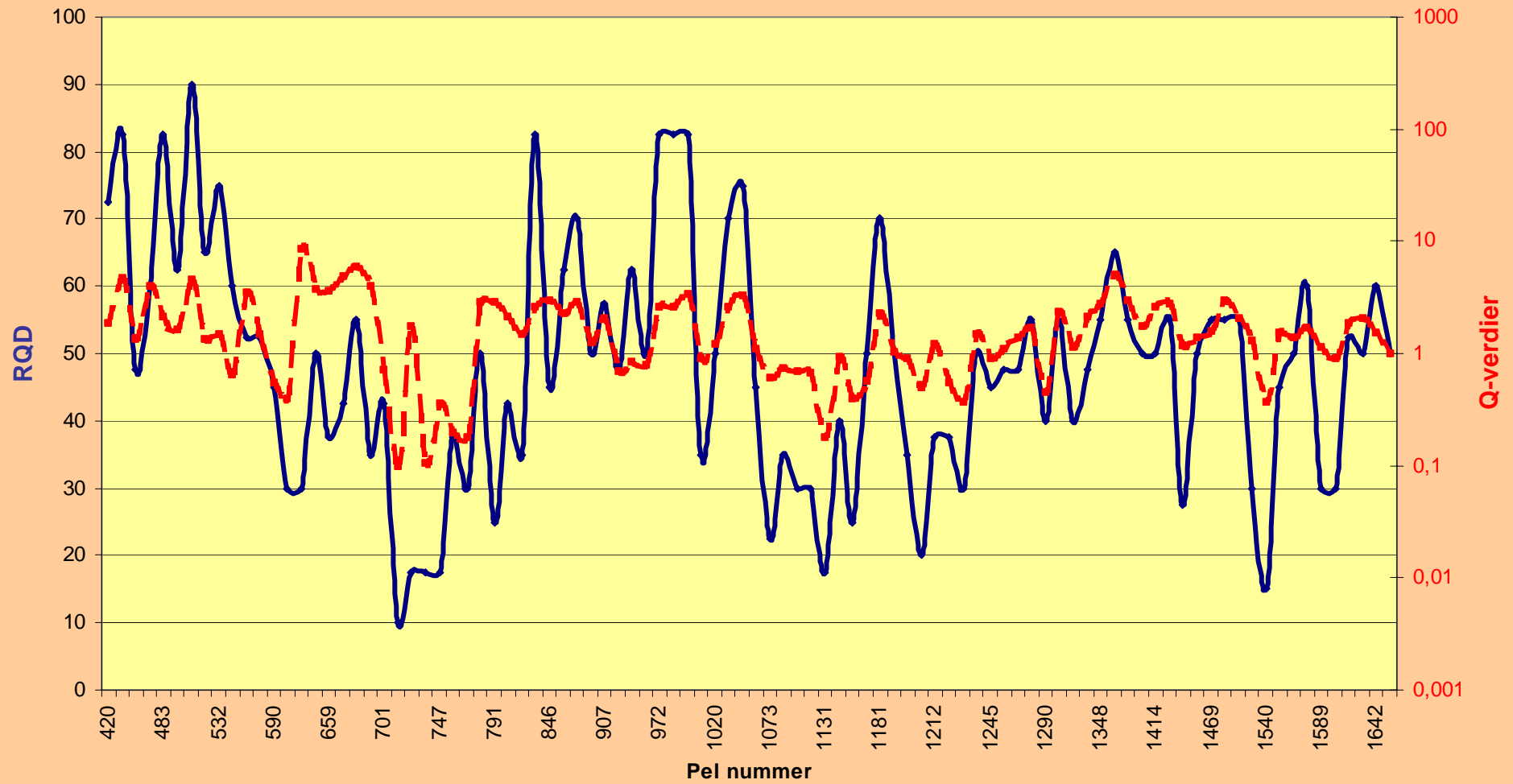
Q-verdier max-min



Figur 4: Maksimum og minimums Q-verdier langs tunneltraseen

◆ lav □ høy — 4 per. Bev. Gjsnitt. (lav) — 4 per. Bev. Gjsnitt. (høy)

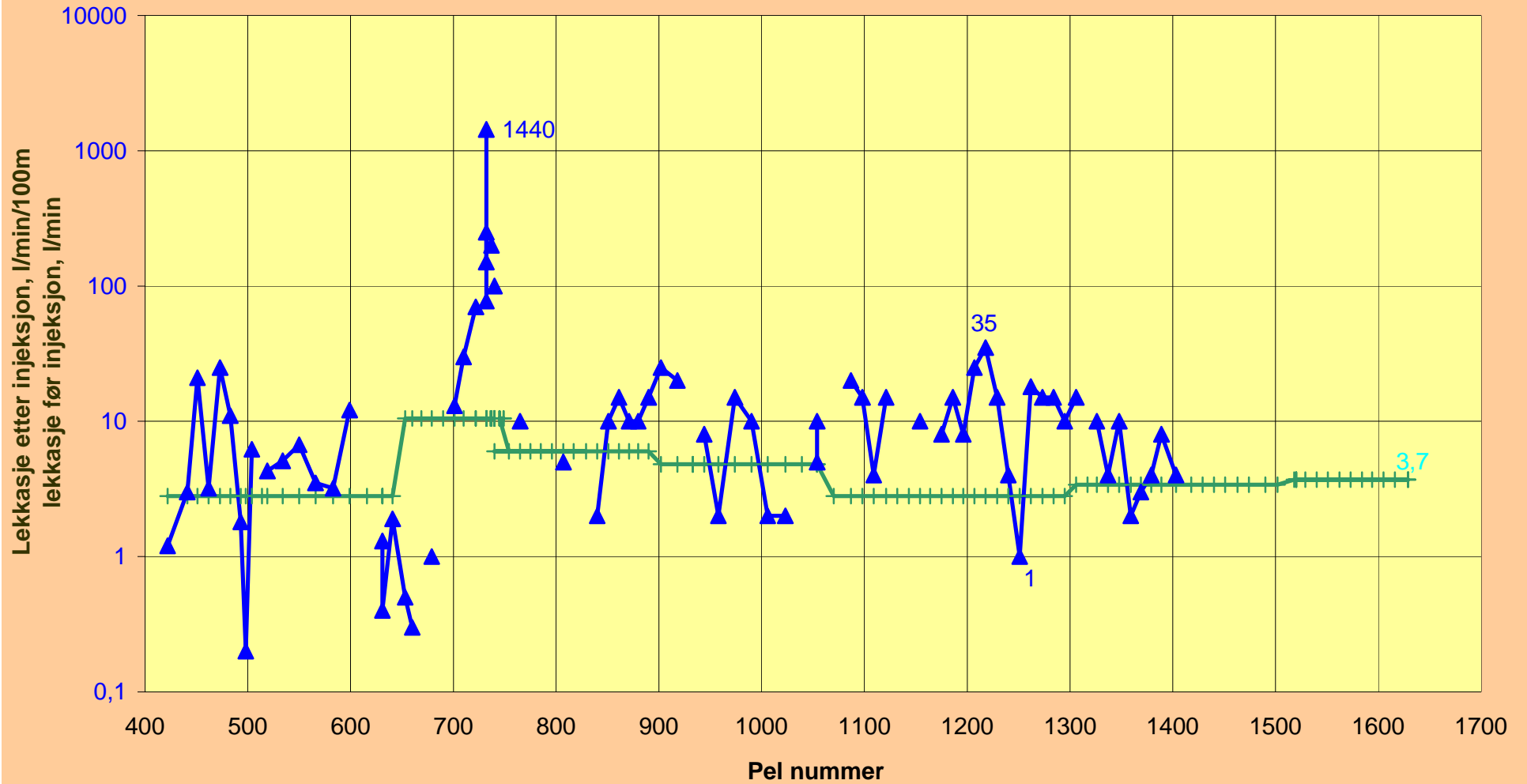
Snitt Q og RQD verdier



Figur 6: Utjevnet Q- og RQD-verdier



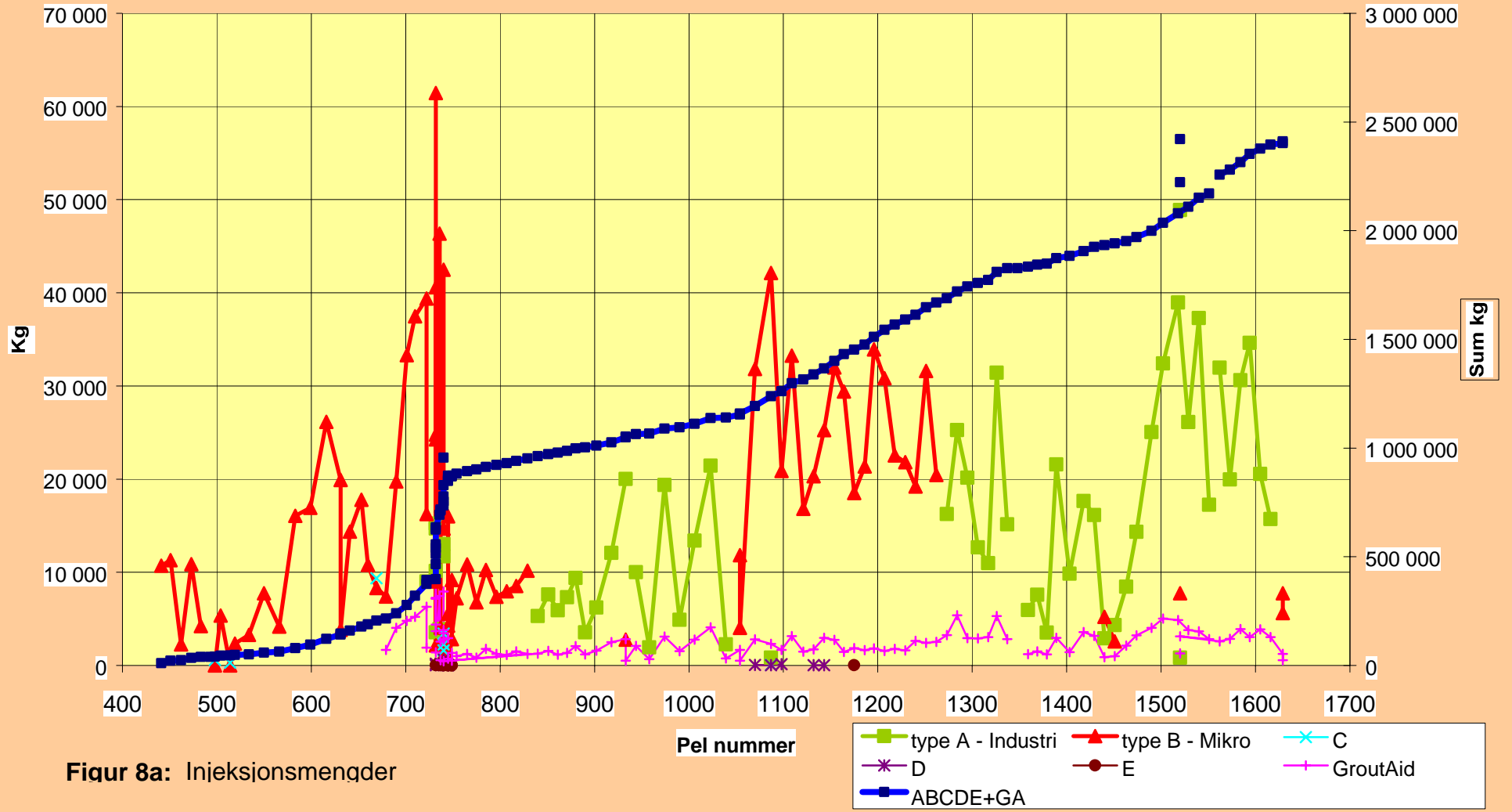
Innlekkasje før og etter



Figur 7: Innlekkasje før og etter injeksjon

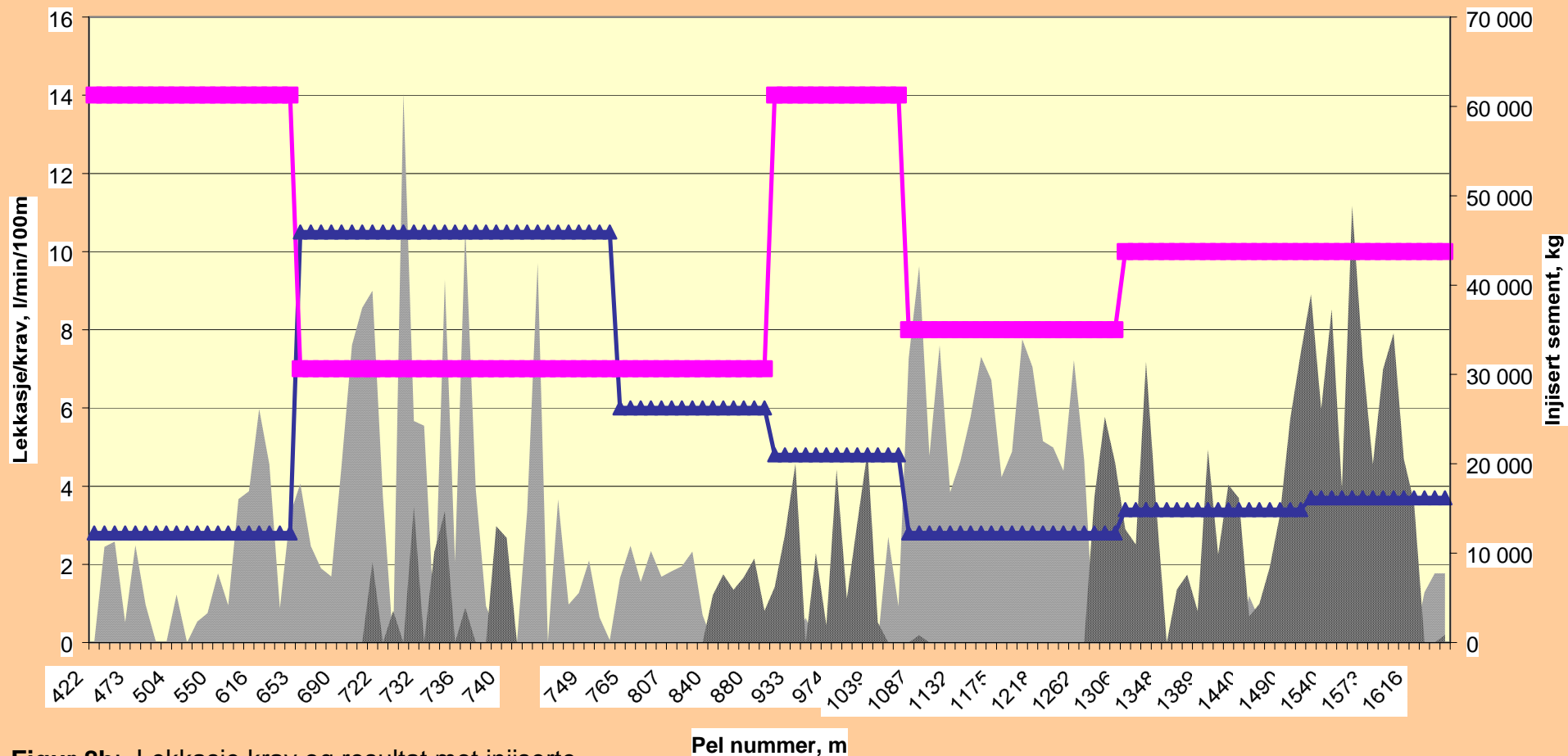
—+— Målt lekkasje —▲— lekkasje før injeksjon, l/min

Mengder injeksjon



Figur 8a: Injeksjonsmengder

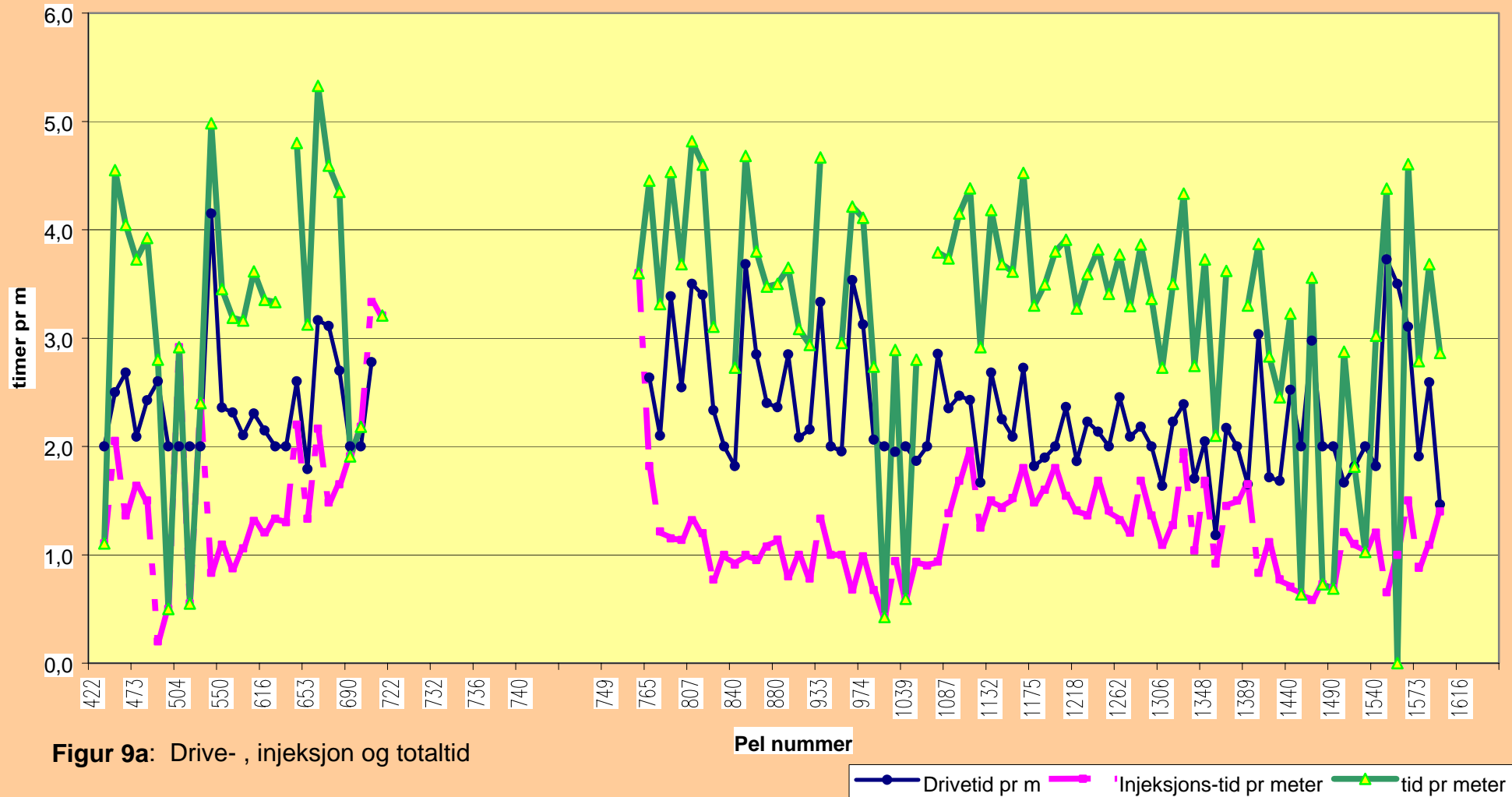
T-baneringen Lekkasje mot injisert mengde



Figur 8b: Lekkasje krav og resultat mot injiserte mengder



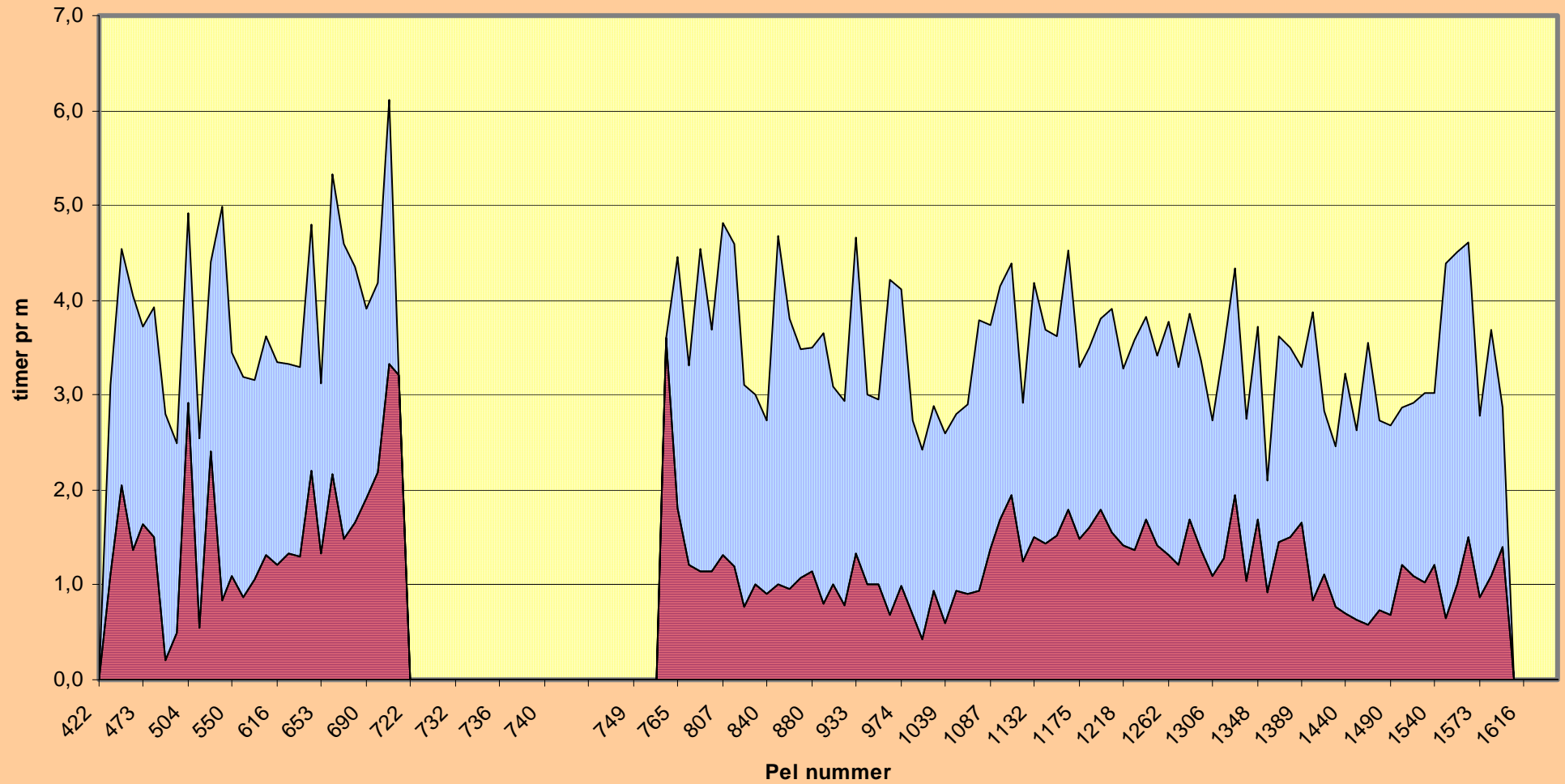
Drivetid pr meter



Figur 9a: Drive-, injeksjon og totaltid

● Drivetid pr m ■ Injeksjons-tid pr meter ▲ tid pr meter

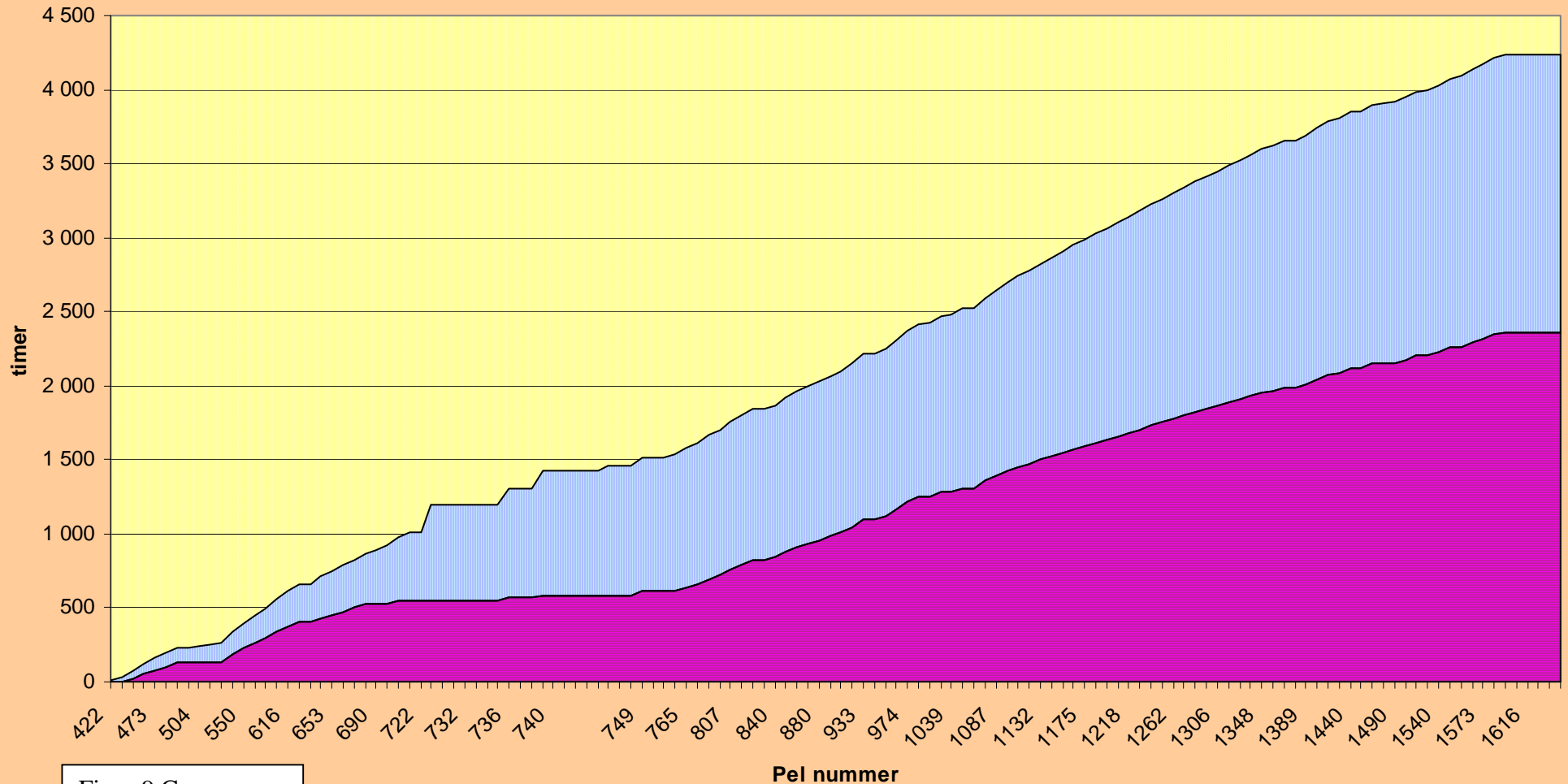
Drive- og injekstid pr meter



Figur 9b: Injeksjon og drivetid

■ Injeksjons-tid pr meter ■ Drivetid pr m

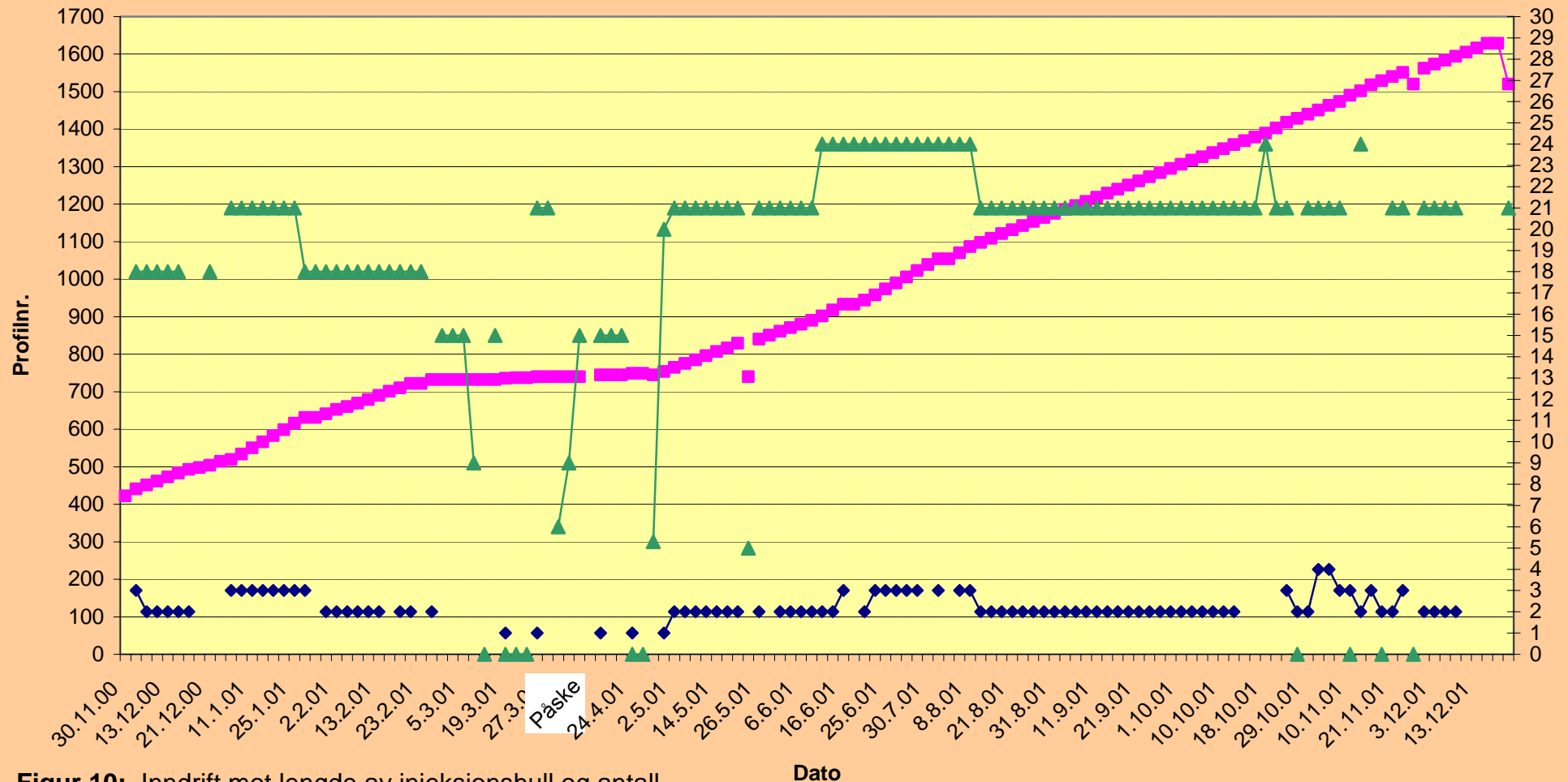
Total tid injeksjon og drivetid



Figur 9 C

■ Sumdrivetid ■ Sum injttid

Inndrift vs antall salver mellom skjerner og lengde på skjerm

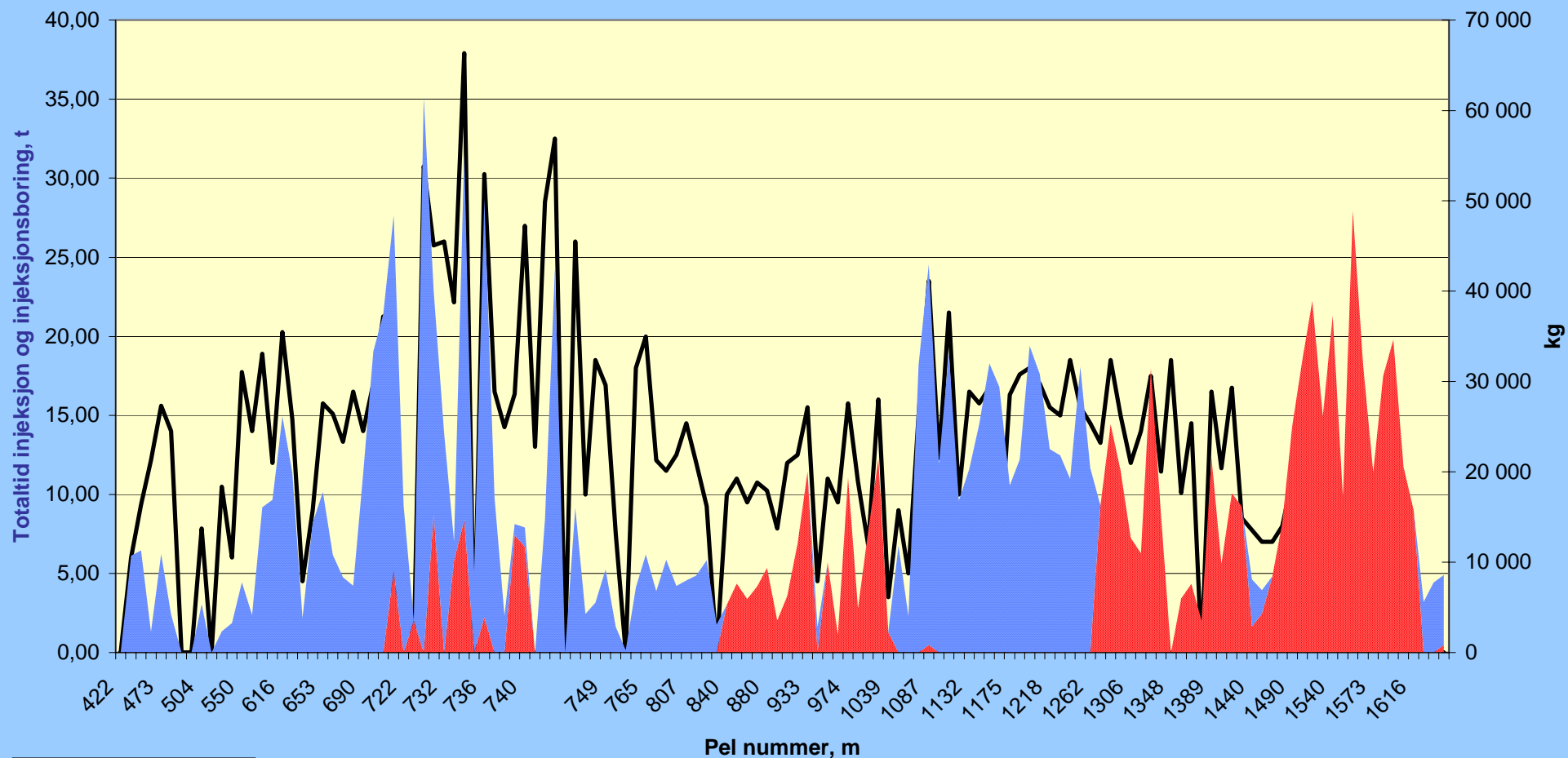


Figur 10: Inndrift mot lengde av injeksjonshull og antall salver mellom hver injeksjonsskjerm

—■— Profil —◆— ant.salver —▲— lengde

T-baneringen

Totaltid injeksjon mot injisert mengde og type sement



Vedlegg 10

■ Knut tot.tid
 ■ type A - Industri
 ■ type B - Mikro