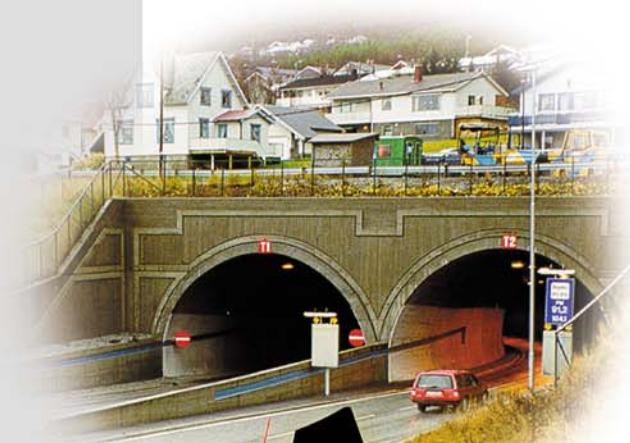


MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE TUNNELER

Rapport nr: **33**

T-bane Ullevål stadion - Nydalen:
forundersøkelser og injeksjon



A



Intern rapport nr. 2331



Statens vegvesen

Miljø- og samfunnstjenelige tunneler

T-bane Ullevål Stadion – Nydalen: forundersøkelser og injeksjon

20001042-5

19 august 2003

Oppdragsgiver: **Prosjektet Miljø- og samfunnstjenelige tunneler**

Kontaktperson: Alf Kveen, Statens vegvesen,
Vegteknisk kontor

Kontraktreferanse: Brev datert 2 mars 2001

For Norges Geotekniske Institutt

Prosjektleder: Vidar Kveldsvik

Rapport utarbeidet av: Fredrik Løset
Vidar Kveldsvik

Kontrollert av: Vidar Kveldsvik

Arbeid også utført av: Fredrik Løset
Anette Wold Magnussen

Sammendrag

Mellom Ullevål stadion og Nydalen er det sprengt ut en vel 1200 m lang tunnel for T-baneringen. Denne tunnelen ligger like ved siden av vegtunnelen Tåsentunnelen. Fra T-baneringens tunnel forligger det en mengde data angående injeksjon og geologiske forhold, og denne rapporten gir en nærmere analyse av disse dataene.

På grunn av fare for setninger ble det satt relativt strenge tetthetskrav som varierte mellom 7 og 14 l/per min per 100 m tunnel. Dette medførte at nesten hele tunnelen ble injisert.

Bergartene i tunnelen tilhører den kambrosiluriske lagrekken og er leirskifer og knollekalk som er gjennomvannet av en del eruptivganger. Stabilitetsforholdene skiller seg ikke vesentlig fra andre tunneler i tilsvarende bergarter, og stabilitetssikringen er i form av bolter og sprøytebetong.

En stor forkastningssone var spesielt problematisk med hensyn til injeksjon. Ved forinjeksjonen var inngangen av sement her på det meste ca 26 000 kg/tunnelmeter.

Det er en viss sammenheng mellom injeksjonsmengder og registrerte lekkasjer i borehull og geologiske parametere som bergartstype, oppsprekkningsgrad, Q-verdi. Dataene viser imidlertid generelt stor spredning. I forhold til bruk ved fremtidige anlegg, synes de kun egnet til meget grove prognoser, og da helst som supplement til rene injeksjonsdata fra T-baneringen og andre anlegg i de kambro-siluriske bergartene i Osloregionen.

Data registrert under tunneldrivingen viser noe varierende sammenheng med andre tilgjengelig data:

- Bergmassekvaliteten i tunnelen er nokså lik den man erfarte i Tåsentunnelen som ligger nært.
- Basert på en tidligere publiserte korrelasjon mellom Q-verdier og trykkløshastighet målt ved refraksjonsseismikk, gir seismikken generelt vesentlig høyere Q-verdier enn det som ble kartlagt under tunneldrivingen. Under de geologiske forhold som eksisterer i tunnelen er derfor denne korrelasjonen uegnet til å estimere Q-verdier. Ved kun å se på trykkløshastigheter, fås at de laveste hastighetene målt i dyprenner, stort sett gjenfinnes som dårligere bergmasse i tunnelen, men bredden på sonene fra tunnelkartleggingen kan avvike en del fra seismikken.
- NGUs analyse av digitale høydedata påviste den største forkastningssonen som viste seg å ha stor betydning både for injeksjonen og stabiliteten.



- Resultater av MWD (Measuring While Drilling) viser god korrelasjon mellom logget hardhet og bergartene som er kartlagt på stoff. For oppsprekking og vannforhold er det dårligere sammenheng mellom MWD-data og det som er registrert på stoff. Spesielt synes vannforhold ikke å være fanget opp særlig godt med MWD. Det skal her bemerkes at loggeintervallet var 8 cm mens 2 cm var foreslått av Rockma som leverte programvaren som prosesserte/tolket boreloggene. At variasjonen i oppsprekking og bergmassekvalitet generelt ikke er særlig stor i tunnelen kan også ha gjort det vanskeligere å fange opp de variasjonene som faktisk finnes.

Setningsnivellement på bygninger langs tunnelen har gitt som resultat at tunnelen ikke har forårsaket setninger. Poretrykksfallet er maksimalt 1 m. Basert på forundersøkelsene, var det som forventet at et så lavt poretrykksfall ikke skulle gi setninger.

Innhold

1	INNLEDNING	5
2	GEOLOGISK BESKRIVELSE	5
	2.1 Løsmasser	5
	2.2 Bergarter	6
	2.3 Strukturgeologi	8
3	FORUNDERSØKELSER	9
4	STABILITET	12
	4.1 Beskrivelse	12
	4.2 Vurdering i forhold til forundersøkelsene	13
5	PORETRYKK OG SETNINGER	15
6	VANNLEKKASJER	17
7	INJEKSJON	23
	7.1 Injeksjonsmengder	23
	7.2 Injeksjon i forhold til tetthetskrav	29
	7.3 Injeksjon i forhold til lekkasjer	30
	7.4 Injeksjon i forhold til reduksjon i hydraulisk konduktivitet	31
	7.5 Injeksjon i forhold til bergarter	33
	7.6 Injeksjon og opprekkingsgrad	33
	7.7 Injeksjonsmengder og Q-verdi	35
	7.8 Oppsummering av injeksjon	38
8	MWD-LOGGING	39
	8.1 Innledning	39
	8.2 Loggede vannforhold	40
	8.2.1 Vannlekkasje i borehull ved første sondering	40
	8.2.2 Bruddfrekvens	40
	8.3 Oppsprekking	41
	8.3.1 Bruddfrekvens	41
	8.3.2 Q-verdier	41
	8.3.3 Bergart	42
	8.4 Hardhet	42
	8.4.1 Bergart	42
	8.5 Eksempler fra MWD-loggingen og tunnelkartleggingen	43
	8.5.1 Eksempel 1 – P640-725	43
	8.5.2 Eksempel 2 - P710-820	45
	8.5.3 Eksempel 3 – P1050-1145	47
	8.5.4 Eksempel 4 - P1130-1225	49
	8.6 Konklusjoner	51
	Kontroll- og referanseside	



1 INNLEDNING

T-baneringen skal bli en forbindelse fra Sognsvannsbanen ved Ullevål Stadion og til Grorudbanen ved Carl Berners Plass, slik at det blir en ringbane gjennom Oslo sentrum. Den første tunnelen mellom Ullevål Stadion og Nydalen, som er 1264 m lang, er nå ferdig utsprengt. Langs linjen utgjør tunnelen strekningen fra profilnummer 400 i vest og til 1664 i øst.

I forbindelse med dette prosjektet ble det foretatt forundersøkelser i form av refraksjonsseismikk, ulike typer boringer og laboratorieforsøk. Disse forundersøkelsene var rettet mot løsmassetykkelser og løsmassenes setningsegenskaper. I forhold til kvalitet av bergrunnen er resultatene av refraksjonsseismikken relevant. Data fra den nærliggende veitunnelen Tåsentunnelen var også til stor nytte. I forbindelse med prosjektet Miljø- og samfunnstjenlige tunneler har Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) foretatt en analyse av digitale høydedata fra Oslo-området for bruk i en strukturgeologisk analyse.

NGI har studert data fra tunnelen mellom Ullevål Stadion og Nydalen i form av resultater fra injeksjon, vannlekkasjemålinger samt en detaljert logg fra tunnelkartleggingen. Siden det over tunnelen er bebyggelse fundamentert på løsmasser, er det viktig at tunnelen er tett nok til å unngå setningsskader, og det ble derfor satt relativt strenge tetthetskrav. For lesere som er interessert spesielt i utførelse av og resultater av selve injeksjonen, henvises det til Rapport nr. 16 i rapportserien fra Miljø- og samfunnstjenlige tunneler: ”Sluttrapport for injeksjonsarbeidene ved T-baneringen”.

Under tunneldrivingen ble programmet GPM-2 fra Rockma benyttet for tolkning av logg fra boring (Measuring While Drilling logg, MWD).

I denne rapporten er resultater data fra tunnelkartleggingen og injeksjonen analysert, og disse ”tunneldataene” er også vurdert opp mot andre tilgjengelige data. Data fra poretrykkmålinger og setningsnivellement er også vurdert.

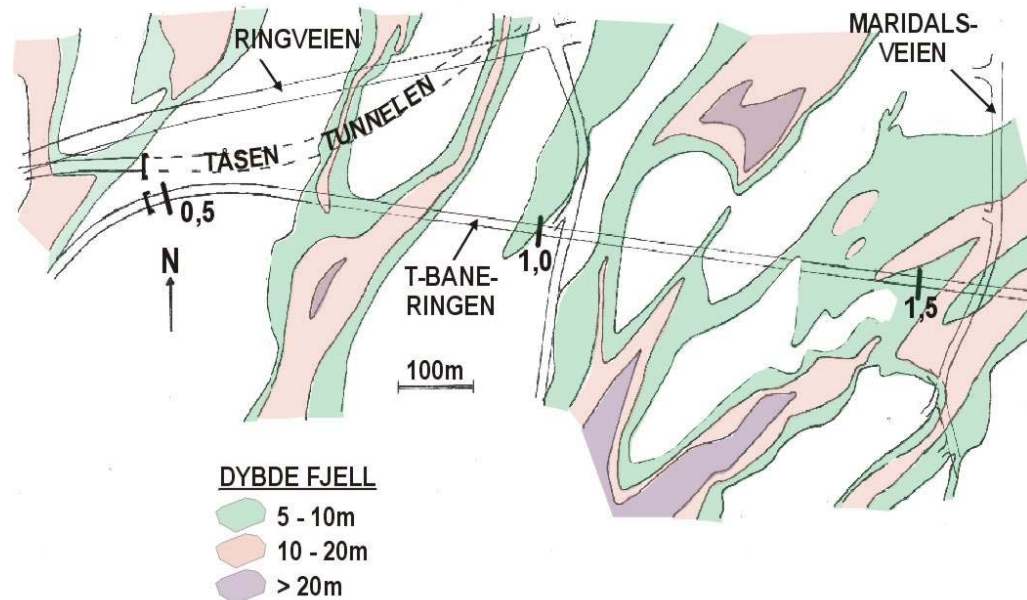
2 GEOLOGISK BESKRIVELSE

2.1 Løsmasser

Terrenget i det aktuelle området er småkupert og ligger oftest mellom kote 100 og 120. Tunnelen ligger mellom kote 78 og 91, og dette betyr at den totale overdekningen oftest er 20-40m. Løsmassetykkelsen over tunnelen varierer fra null til bortimot 20 m, og massene forekommer særlig i forbindelse med dyprennen mellom profil 700 og 850 og fra profil 1300 til østre påhugg ved profil 1664. Innenfor tunnelens antatte influenssone er opptil 30 m løsmasser registrert. Siden området ligger under den marine grense, består massene for en

stor del av leire, men stedvis er det betydelig med morenemateriale i bunnen av dypprenene.

Et løsmassekart som ble utarbeidet av NGI i forbindelse med prosjektering av tunnelen er vist i Figur 1.



Figur 1 T-baneringen – løsmassekart (NGI 1999)

2.2 Bergarter

Tunnelen går i kamborsiluriske sedimentbergarter som er gjennomvannet av permiske eruptivganger. Bergartene hører til etasje 4 i den kambrosiluriske lagrekken og er en veksling mellom leirskifer og knollekalk. Leirskiferen er til dels svart og kan inneholde en god del sulfidmineraler som svovelkis. Lagene er foldet og har vanligvis en strøkretning omtrent NØ-SV, og fallet er oftest mot NV, men fall mot SØ forekommer også. Eruptivgangene er av typene diabas og syenittprofyrt og er ofte uregelmessige med tykkelse fra en desimeter opp til flere meter. Gangene har oftest en retning omtrent N-S eller de er parallelle med lagdelingen i sedimentbergartene. Enkelte steder forekommer gangene som uregelmessige linser.

Tabell 1 Bergartsfordelingen langs tunnelen fra vest mot øst

Profilnr.	Bergart	Løsmasse-tykkelse over tunnelen
400-483	Knollekalk	<5m
483	Diabas, ca. 1m tykk	<5m
483-510	Knollekalk	<5m
510-520	Veksling mellom skifer og knollekalk	<5m
520-605	Skifer	<5m
605-620	Skifer/knollekalk med 1m diabas i spiss vinkel til tunnelen	<5m
620-655	Skifer	<5m
655-680	Knollekalk	<5m
680-705	Knollekalk	5-10m
705-740	Skifer med diabaslinse (forkastning)	5-20m
740-755	Syenittgang (forkastning)	5-10m
755-780	Skifer (forkastning)	5-10m
780-790	Knollekalk	5-10m
790-820	Skifer	10-20m
820-870	Veksling mellom skifer og knollekalk	10-20m
870-950	Skifer	<5m
950-985	Knollekalk	<5m
985-1005	Veksling mellom skifer og knollekalk, uregelmessig syenitt	5-10m
1005-1090	Skifer	<5m
1090	Diabas, ca 1m	5-10m
1090-1165	Skifer	0-10m
1165-1180	Skifer med tynn diabas i spiss vinkel til tunnelen	<5m
1180-1185	Skifer	<5m
1185	0,5m diabas på tvers av tunnel	<5m
1185-1285	Skifer, diabaslinse ved 1230	0-10m
1285-1300	Skifer med 2-3m diabas noe på skrå til tunnelen	<5m
1300-1330	Knollekalk	5-10m
1330-1440	Skifer	5-10m
1440-1485	Knollekalk	10-20m
1485-1525	Skifer + litt uregelmessig diabas	5-10m
1525-1570	Skifer	10-20m
1570-1630	Vekslende skifer og kalk med uregelmessig syentittporfyr	5-10m
1630-1664	Knollekalk med litt uregelmessig syentittporfyr	10-20m

Bergartsfordelingen som er vist i Tabell 1, betyr at en tunnelstrekning på ca 300 m utgjøres av knollekalk, dvs. ca 24 %, skifer utgjør ca 700 m eller ca

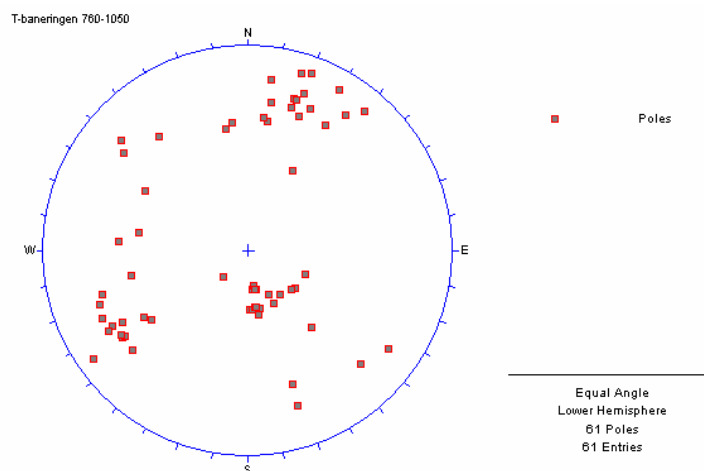
55 %, en blanding av skifer og knollekalk utgjør ca 155 m eller 13 %, og forkastningssoner utgjør ca 100 m eller ca 8 % av tunnelstrekningen. I den store forkastningssonen mellom profil 700 og 800 er bergartsfordelingen rotete, men det er mest leirskifer og en ca 15 m tykk eruptivgang av syenittporfyr.

2.3 Strukturgeologi

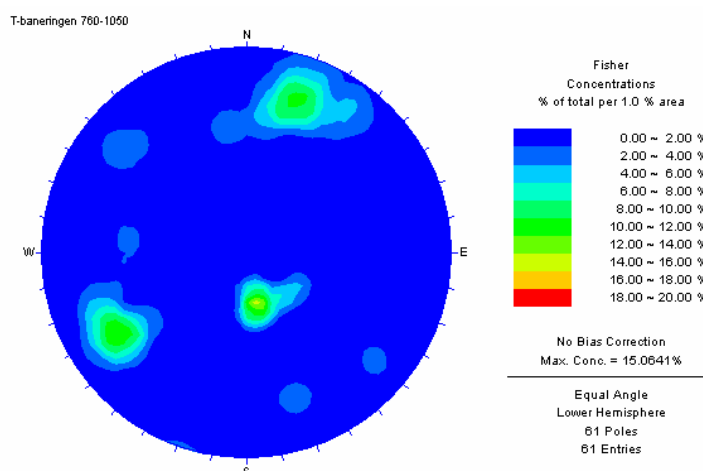
Tunnelen har en retning tilnærmet Ø-V, og dette betyr at den danner en vinkel på ca 45° til lagdelingen som oftest har en strøkretning omtrent NØ-SV. Fallet på lagdelingen varierer på grunn av foldingen og er oftest mot nordvest, men den kan også være mot sørøst. Fallvinkelen er ofte 20-30°.

Det er ofte 3-4 sprekkesett til stede. Lagdelingsprekkene er fremtredende, spesielt i skiferen. Det er også en del sprekker med strøkretning nær den samme som lagdeling, men med steilere fall. Sprekker nær vinkelrett på lagdelingen, dvs. NV-SØ, og med forholdsvis steilt fall er vanlige, og i tillegg er det steile sprekker med strøkretning omtrent VNV-ØSØ slik at de danner en spiss vinkel med tunnelen, se Figur 2a, 2b og 2c. Innenfor alle de tre sprekkesettene kan det være en betydelig variasjon i strøk og fall, men generelt er det ikke vesentlige forskjeller i sprekke mønsteret fra ene tunnelseksjonen til den andre.

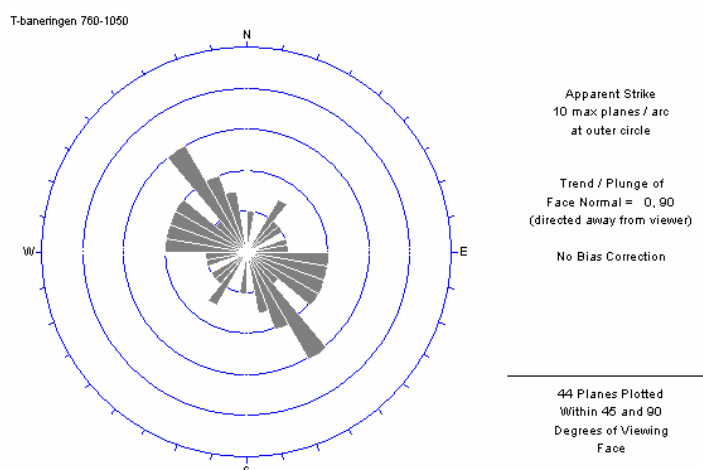
Sprekkene har ofte en fylling av kalkspat, men leire forekommer på mange sprekker, særlig i forbindelse med forkastningssoner. Generelt er skiferen mer oppsprukket enn knollekalken. Tunnelkartleggingen viser at bruddfrekvensen, dvs. antall sprekker per m³, er gjennomsnittlig 19 i skiferen, mens den er 15 i knollekalken. I forkastningssonen mellom profil 700 og 800 ligger bruddfrekvensen oftest mellom 30 og 40.



Figur 2a Stereodiagram (poldiagram), undre halvkule, som viser sprekkeorienteringen i midtre del av tunnelen



Figur 2b Konturering av stereodiagrammet vist i Figur 2a



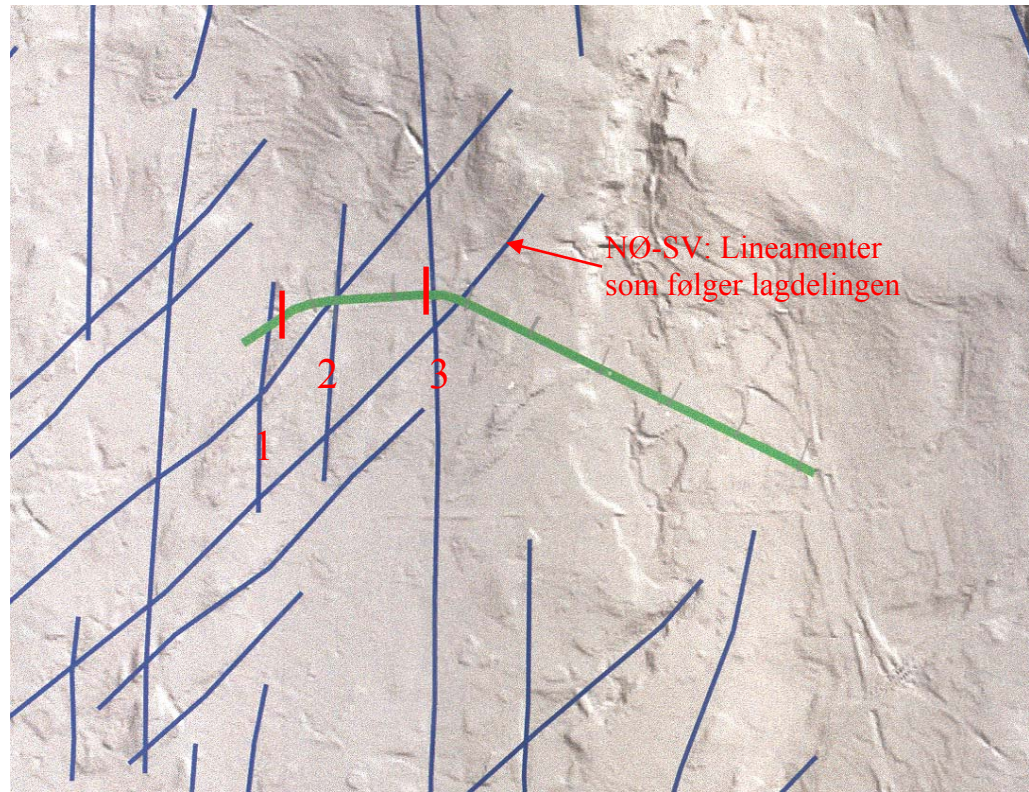
Figur 2c Sprekkerose for midtre del av tunnelen

Av Figur 2b ses tre markerte sprekkesett: Nær sentrum av nettet er det lagdelingssprekker med slakt fall mot NV, oppe til høyre er det sprekker med strøkretning VNV-ØSØ med steilt fall i sørlig retning, og nede til venstre er det sprekker med strøkretning NV-SØ og steilt nordøstlig fall.

3 FORUNDERSØKELSER

NGU har etter tunnelbyggingen foretatt en analyse av digitale høydedata fra Oslo-området, og resultatet av dette arbeidet er vurdert sammen med forundersøkelser for tunnelen. For T-baneringen mellom Ullevål Stadion og Nydalen viser denne analysen tre regionale lineamenter som antas å representere sprekkesoner/forkastninger, eventuelle eruptivganger, se Figur 3. Disse har en retning omtrent N-S. En av sonene går fra Akershus og nordover i retning Sognsvann og synes å passere like vest for tunnelens vestre påhugg (1).

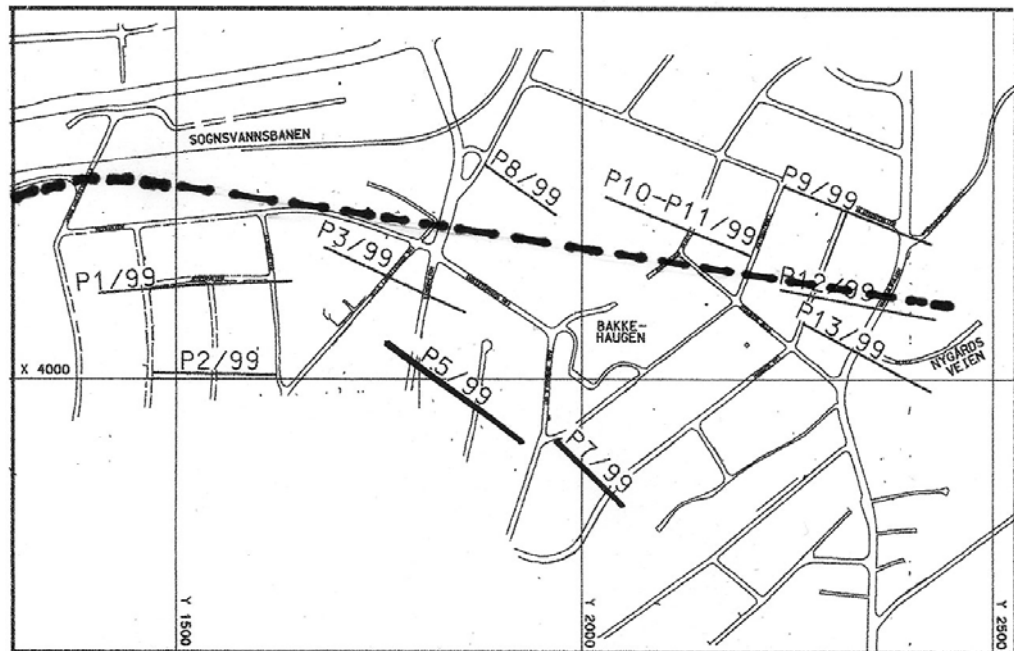
En sone går fra Bjørvika og nordover mot Tåsen og krysser tunnelen på strekningen 700-800 (2). En tredje sone går fra Gamlebyen og nordover mot Nydalen og passerer tunnelen omkring det østre påhugget (3).



Figur 3 Lineamenter (blått) tolket ut fra en digitale høydedata. Hele T-bane traseen er vist i grønt, og tunnelen mellom Ullevål Stadion og Nydalen ligger mellom de røde stekene. Tall viser lineamenter som er kommentert i teksten. (Utsnitt av kart laget av NGU, 2003¹)

¹ Det er laget en egen rapport i Miljø- og Samfunnstjenlige tunneler: "Rapport nr. 24. Bruk av digitale høydedata i strukturgeologisk analyse: Eksempel fra Oslo kommune".

Det er foretatt refraksjonsseismiske målinger i nærheten av tunnelen. Profilene ligger både nord og sør for tunneltraseen, 11 profiler med samlet lengde ca 1750 m, se Figur 4.



Figur 4 Oversikt refraksjonsseismiske profiler. Tunnelen er vist med stiplet strek.

I forbindelse med Tåsentunnelen ble det utført fem kjerneboringer. Vanntapsmålinger i borhullene viste lugeonverdier mellom 0 og 21. Gjennomsnittlig vanntap i de ulike bergartene var:

Leirskifer	3,0 Lugeon
Knollekalk	3,4 Lugeon
Eruptiver	8,2 Lugeon

Følgende gjennomsnittlige RQD-verdier ble målt i kjernene:

Leirskifer	74
Knollekalk	82
Syentittporfyr	38

I Tåsentunnelen ble foretatt kartlegging etter Q-metoden, noe som ga følgende resultat:

Q = >1	55%
Q = 0,1 -1	37%
Q < 0,1	8%

Gjennomsnittlige Q-verdier i de forskjellige bergartene i Tåsentunnelen var:

Knollekalk	1,7
Leirskifer	1,6
Skifer/kalk	1,5
Forkastningssoner	0,2

Av boringer og laboratorieundersøkelser rettet mot løsmasseykkelser og løsmassenes setningsegenskaper ble følgende utført (tidligere undersøkelser som også var relevant for T-baneringen er gitt i parentes):

67 totalsonderinger (35 stk)

3 dreietrykkssonderinger (3 stk)

15 trykksonderinger, CPTU (0 stk)

24 poretrykksmålere, også for overvåking under bygging (1 stk)

4 prøveserier med 54 mm prøvetaker (5 stk)

3 prøveserier med 95 mm prøvetaker (0 stk)

(12 stk fjellkontrollboringer)

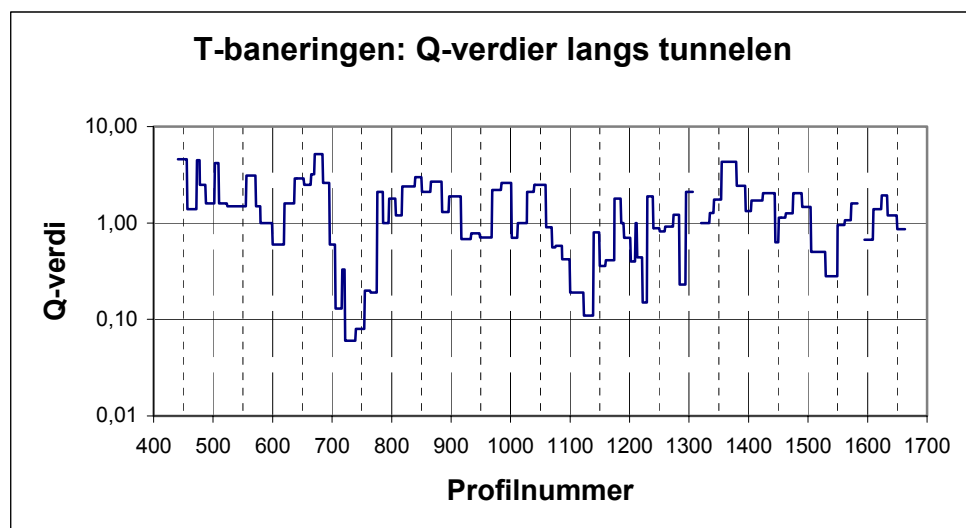
(13 enkle sonderinger)

(1 vingeboring)

4 STABILITET

4.1 Beskrivelse

Stabilitetsforholdene i tunnelen er beskrevet ved hjelp av Q-systemet, og det ble generelt foretatt en kartlegging for hver salve. Dette viser at storparten av bergmassen ligger i klassene ”dårlig berg”, $Q = 1-4$ og ”meget dårlig berg”, $Q = 0,1-1,0$. Figur 5 viser fordelingen av Q-verdier langs tunnelen. Det er her en del soner som skiller seg ut. Mellom profil 700 og 800 er de generelt lave Q-verdier, til dels under 0,1. Dette skyldes en markert svakhetssone med sterkt oppsprukket berg, leirslepper og eruptivganger. Det er også en markert dyppenne i berggrunnen her som er fylt med løsmasser.



Figur 5 Fordeling av Q-verdier langs tunnelen, profil 441 - 1664

Mellom profil 1100 og 1150 er det også lave Q-verdier. Det er her oppsprukket leirinfiltrert berg.

Ved profil 1230 er det en liten diabas pluss leirslepper som bevirker lav Q-verdi. Det er også en mindre dyprenne her.

En sone ved profil 1290 skyldes eruptivganger og noe leire.

Mellom profil 1500 og 1550 er det lave Q-verdier på grunn av leirslepper og noen mindre eruptivganger.

Fordelingen av Q-verdier med hensyn til lengde langs tunnelen er følgende:

$1 < Q \leq 5,2$: 60 %

$0,1 \leq Q \leq 1$ 37 %

$0,06 \leq Q < 0,1$ 3 %

Tabell 2 Gjennomsnittlige RQD og Q-verdier i forskjellige bergarter i tunnelen

Bergartstype	Gjennomsnitt RQD	Gjennomsnitt Q-verdi
Knollekalk	56	1,7
Skifer	46	1,2
Vekslende lag skifer/kalk	56	1,5
Forkastningssoner	23	0,1

Av Tabell 2 ser en at det ikke så stor forskjell mellom de ulike bergartene, og det er først og fremst forkastningssoner som er avgjørende for stabiliteten. Knollekalken har imidlertid litt høyere verdier enn skiferen .

Tunnelen er generelt sikret med bolter og fiberarmert sprøytebetong, og mye av denne sikringen ble utført på stuff. Selv om det var partier med meget dårlig bergmassekvalitet, var det ikke spesielle problemer med sikringen.

4.2 Vurdering i forhold til forundersøkelsene

Hva kunne en så vente seg av stabilitetsforhold ut fra det en visste på forhånd? Dataene fra Tåsentunnelen er selvsagt her viktige, og siden den ligger ved siden av T-baneringens tunnel, burde det ikke være så stor forskjell mellom de to tunnelene.

Tabell 3 Prosentvis fordeling av Q-verdier i T-baneringen og Tåsentunnelen

Q	T-baneringen	Tåsentunnelen
>1	60%	55%
0,1-1	37%	37%
<0,1	3%	8%

Tabell 4 Gjennomsnittlige Q-verdier i forskjellige bergarter i T-baneringen og Tåsentunnelen

Bergartstype	T-baneringen Gjennomsnitt Q	Tåsentunnelen Gjennomsnitt Q
Knollekalk	1,7	1,7
Skifer	1,2	1,6
Vekslende lag skifer/kalk	1,5	1,5
Forkastningssoner	0,1	0,2

Av Tabell 3 og 4 ser vi at det er godt samsvar mellom Q-verdiene i de to tunnelene, og dataene fra Tåsentunnelen sier derfor mye om hva en kunne vente seg i T-baneringen.

I forbindelse med sprengningen av en tunnel er det imidlertid sjelden at en har en ferdig tunnel rett ved siden av, og det kan derfor være nyttig å se bort fra Tåsentunnelen og i stedet vurdere hva en kunne vente seg ut fra forundersøkelsene.

Geologisk kartlegging er en viktig del av forundersøkelser. For T-baneringen sin del er det begrenset hva en kan få ut av feltkartlegging, siden det er få fjellblotninger. Den regionale studien som NGU gjorde, påviste den markerte forkastningssonen, markert med 2 i Figur 3, som viste seg å ha stor betydning både for stabilitet og injeksjon i tunnelen. Slike studier er derfor nyttige, selv om de ikke nøyaktig kan forutsi hvor store problemer de forskjellige sonene kan medføre. For å få mer detaljerte data er det nødvendig med grunnundersøkelser, for eksempel kjerneboring.

En viktig del av forundersøkelsene var de seismiske målingene. De seismiske hastighetene vil kunne fortelle en god del om bergmassekvaliteten. En formel som er bruk for å estimere Q-verdier ut fra seismikk er som følger (Barton, N., 1995. The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. Keynote lecture, 8th ISRM congress, Tokyo):

$$Q_c \approx 10^{(V_p-3,5)} \quad (\text{Ligning 1})$$

hvor V_p = seismisk hastighet i km/s, og $Q_c = Q \times \sigma_c/100$, hvor σ_c = bergartens enaksiale trykkstyrke.

Tabell 5 sammenstiller Q-verdier beregnet etter Ligning 1, og Q-verdier kartlagt i tunnelen. For Q-verdiene fra seismikken er Q satt lik Q_c , dvs. at det ikke er korrigert for bergartenes enaksiale trykkstyrke, som sannsynligvis generelt kan være noe lavere enn 100 MPa.

Tabell 5 *Prosentvis fordeling av seismiske hastigheter fra 1750 m profiler og prosentvis fordeling av Q-verdier*

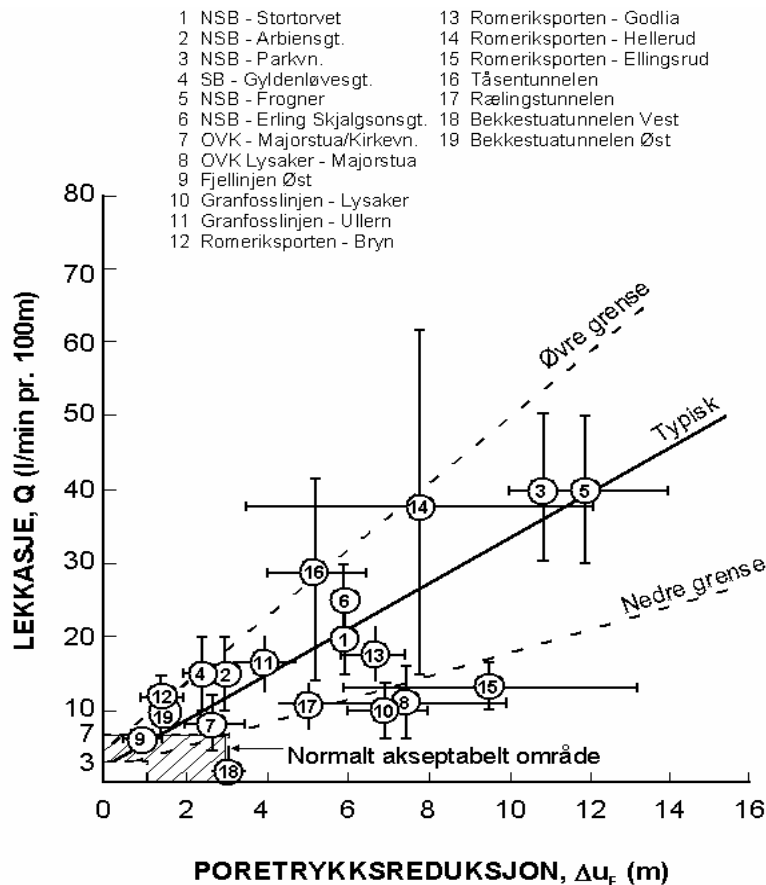
Seismisk hastighet, V_p (km/s)	$Q = Q_c \approx 10^{(V_p-3,5)}$	Q-fordeling fra seismikk (%)	Q-fordeling fra tunnelkartlegging (%)
$V_p < 2,5$	$Q < 0,1$	6	3
$2,5 \leq V_p \leq 3,5$	$0,1 \leq Q \leq 1$	7	37
$3,5 < V_p \leq 4,2$	$1 < Q \leq 5$	10	60
$4,2 < V_p \leq 4,5$	$5 < Q \leq 10$	12	0
$4,5 < V_p \leq 5,1$	$10 < Q \leq 40$	32	0
$5,1 < V_p \leq 5,5$	$40 < Q \leq 100$	13	0
$5,5 < V_p$	$100 < Q$	20	0

Tabell 5 viser at det er dårlig samsvar mellom estimert Q-fordeling fra seismikk basert på Ligning 1 og kartlagte Q-verdier i tunnelen. Av Figur 4 fremgår det at seismikkprofilene ikke er jevnt fordelt langs tunnelen, i motsetning til tunnelkartleggingen, og dermed er det ikke det samme området som inngår i datagrunnlaget. Det er likevel klart at Ligning 1 er uegnet til å estimere Q-verdier for denne tunnelen under de rådende geologiske forhold, da den generelt gir langt bedre bergmassekvalitet enn det som viste seg å være tilfelle. Seismikken ble da heller ikke benyttet i en slik sammenheng under forundersøkelsene. Det er også verd å notere seg at om Q_{seismikk} (kolonne 2 i Tabell 5) hadde blitt korrigert for at enaksial trykkstyrke generelt trolig er noe lavere enn 100 MPa, ville Q_{seismikk} blitt enda noe høyere. Forlates detaljene i fordeling av seismiske hastigheter, og betraktningen gjøres noe grovere i form av om markerte svakhetssoner påvist ved seismikk, fås ikke noe helt klart bilde: De laveste seismiske hastighetene i dypprenene kan stort sett gjenfinnes som dårligere bergmasse i tunnelen, men bredden på hva som er registrert i tunnelen kan avvike en del fra seismikken.

5 PORETRYKK OG SETNINGER

Som vist i Kapittel 3 ble det utført omfattende forundersøkelser rettet mot poretrykk og setninger. Analyser av disse dataene resulterte i et sett med tetthetskrav for ulike tunnelstrekninger. Tabell 6 i Kapittel 6 viser disse tetthetskravene og oppnådd resultat. Det fremgår av Tabell 6 at lekkasjene ble mindre enn tetthetskravene for alle strekningene unntatt P650 – 900, hvor

kravet var 7 l/min per 100 m og resultatet ble 8 l/min per 100 m. Poretrykksfallet er her målt til 1 m. Ellers ligger lekkasjene rundt 3 l/min per 100 m mot krav i kontrakt i intervallet 8 – 14 l/min per 100 m, og det er ikke registrert poretrykksfall. Setningsmålingene som ble utført har ikke registrert at bygninger har fått setninger som følge av lekkasje til tunnelen. Figur 5a viser forholdet mellom lekkasje og poretrykksenkning som ble benyttet under forundersøkelsene.



Figur 5a Sammenheng mellom lekkasje og poretrykksfall rett over tunnelen i dyprenner

Under forundersøkelsene ble ”nedre grense” i Figur 5a benyttet, og det var antatt at bruken av ”nedre grense” ga en sikkerhetsmargin for tetthetskravene for ulike delstrekninger. ”Nedre grense” gir poretrykksfall mindre enn 1 m ved lekkasje rundt 3 l/min per 100 m. Setningsberegningene som ble utført som funksjon av poretrykksfall og løsmassetykkelse, ga som resultat for alle dyprennene at poretrykksfallet måtte opp i 2 – 3 m før setninger av betydning ville oppstå. Slik sett kan man fastslå at det gikk som forventet med lekkasjer i størrelseorden 3 l/min per 100 m: de ga ikke setninger.

For P650 – 900 er poretrykksfallet 1 m, og som for de andre områdene skal det da ikke oppstå setninger, noe det heller ikke gjorde. Poretrykksfallet ved

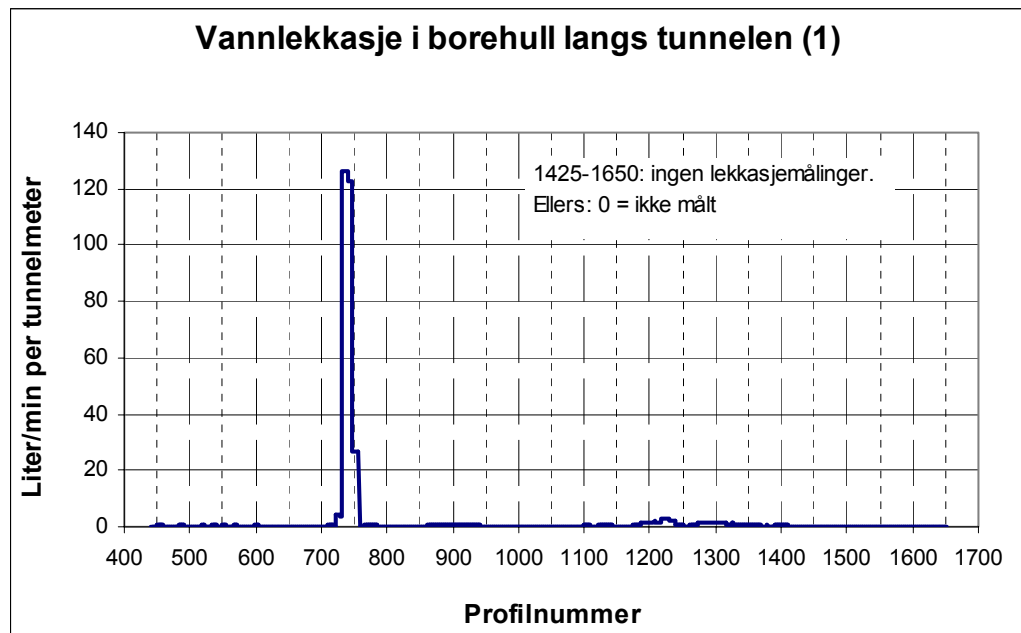
lekkasje 8 l/min per 100 m var imidlertid antatt å skulle gi et større poretrykksfall, ca 3 m, siden ”nedre grense” var lagt til grunn,. Av linjen ”typisk” i Figur 5a ses det at 8 l/min per 100 m gir ca 1 m poretrykksfall. Ut fra at ca 3 l/min per 100 m ikke ga poretrykksfall i det hele tatt, noe som også stemmer med linjen ”typisk, kan det fastslås at bruken av ”nedre grense” under forundersøkelsene faktisk ga en sikkerhetsmarginen slik det var tilsiktet/antatt. I praksis viste det seg at linjen ”typisk” fra Figur 5a stemmer godt for tunnelen.

6 VANNLEKKASJER

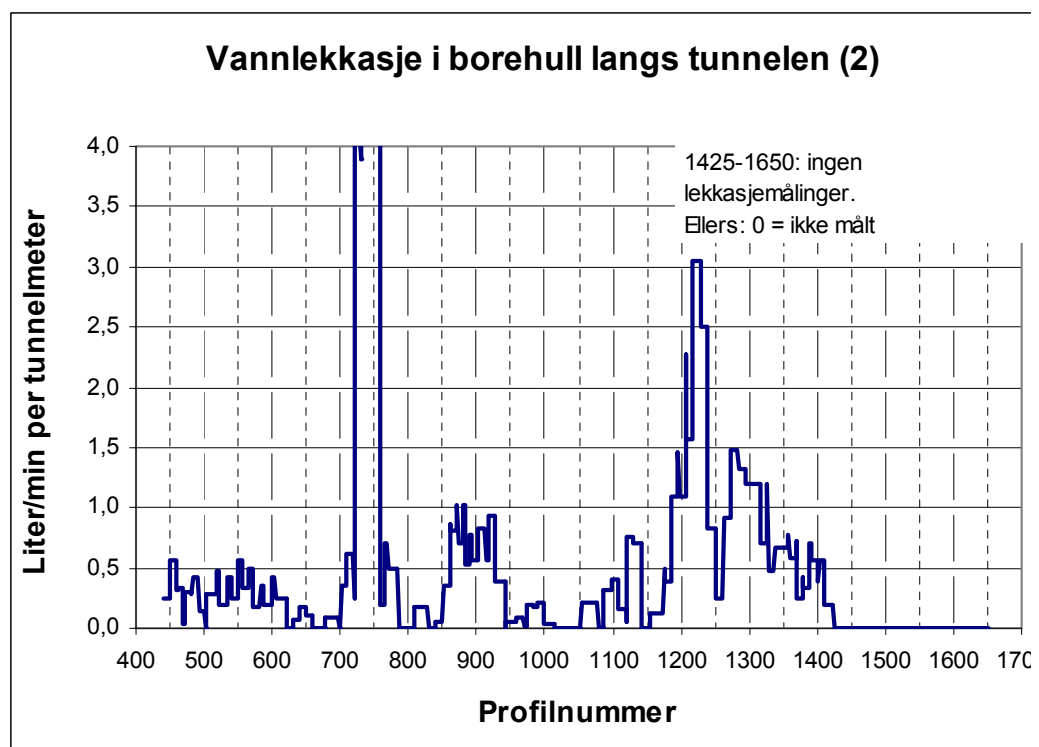
Siden det ble foretatt forinjeksjon i tunnelen, vil ikke observasjoner inne i tunnelen gi noe riktig bilde av bergmassenes naturlige permeabilitet. Måleresultater fra borehull foran stuff sier imidlertid en del. Det er generelt målt eller estimert vannlekkasjer i alle borehull for injeksjon under tunneldrivingen. I injeksjonsrapportene som forelå som grunnlag for denne rapporten, er det for alle borehull enten notert vannlekkasjer i liter per minutt (målt i bøtte) i borehullet eller notert som R = rennende vann. 1 R er estimert til å tilsvare 0,5 l/min (Knut Boge, personlig melding). I denne rapporten er disse registreringene benyttet på følgende måte:

- Kun registreringer fra første omgangs injeksjonshull er benyttet, generelt 31 hull for alle injeksjonsskjermer. Hullengden er vanligvis 21 m og overlappen mellom skjermen ca 10 m. I praksis betyr det at lekkasjene er registrert i hull som er boret gjennom ca 10 m hvor det er injiserte hull fra før og ca 11 m hvor det ikke er injiserte hull fra før.
- Lekkasjen fra alle (oftest 31) hull ble summert opp og dividert med lengden av injeksjonsskjermen.
- Lekkasjen per meter ble summert opp. Dvs. at i overlappen mellom to skjermene består den totale lekkasjen per meter av summen av lekkasjen per meter fra begge skjermene.

Figur 6a viser at det er spesielt ett sted i tunnelen med stor lekkasje: mellom profil 720 og 760 hvor det var opptil 126 l/min per tunnelmeter. Denne lekkasjen opptrer i forbindelse med en forkastning og syenittgang.



Figur 6a Vannlekkasjer fra borehull foran stoff, oversikt



Figur 6b Vannlekkasjer fra borehull foran stoff, detaljer

Figur 6b viser et mer detaljert bilde av vannlekkasjene. Vi ser her at utenom seksjonen med svært høy innlekkasje, er lekkasjene frem til profil 1190 for en stor del under 0,5 l/min per tunnelmeter. Mellom profil 1190 og 1330 er de noe

høyere, ofte 1-3 l/min per tunnelmeter. Dette kan komme av at det på denne strekningen er flere eruptivganger.

Figur 6c viser hydraulisk konduktivitet, K , langs tunnelen basert på lekkasjer i borehull foran stoff etter Ligning 2, og oppnådd tetthet i injisert sone etter Ligning 3:

$$q = 2 \times \pi \times K \times h \times l / \ln((2 \times h - r_e)/r_e) \quad (\text{Ligning 2})$$

$$q = 2 \times \pi \times K_i \times h \times l / \ln((r_e + t)/r_e) \quad (\text{Ligning 3})$$

hvor q = lekkasjen, K = hydraulisk konduktivitet, K_i = hydraulisk konduktivitet i injisert sone, h = dybde under grunnvannspeilet, l = lengden, r_e = ekvivalent radius og t = tykkelse av injisert sone.

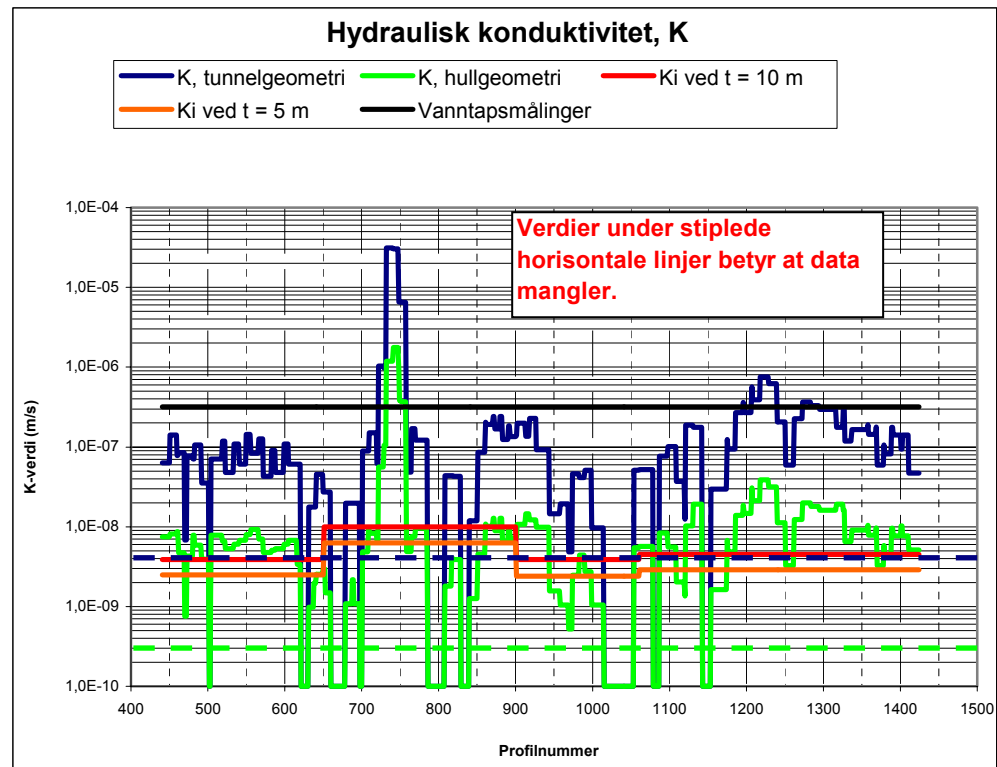
K_i er basert på lekkasjetall gitt i Tabell 6.

Tabell 6 *Lekkasje (liter per minutt per 100 m) i tunnelen etter ferdig injeksjon*

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

Av Tabell 6 fremgår det at lengdene som K_i er beregnet ut fra, ligger mellom 160 m og 350 m. K er beregnet ut fra hullengder på oftest 21 m. Det betyr at variasjoner i lekkasjene etter injeksjon er jevnet ut over en mye lengre strekning enn lekkasjene før injeksjon, og K og K_i er strengt tatt ikke direkte sammenlignbare meter for meter gjennom tunnelen. Dersom lekkasjen etter injeksjon varierer lite innenfor målestrekningene, vil en direkte sammenligning mellom K og K_i meter for meter gjennom tunnelen være relevant, men det finnes ikke data som gir grunnlag for å fordele lekkasjer mer enn det som er gjort i Tabell 6.

Figur 6c viser K beregnet ut fra tunnelens geometri ($r_e = 4,8$ m) forutsatt at den lekkasjen man har til sammen i borehullene tilsvarer den lekkasjen man ville fått i tunnelen om ikke injeksjon var blitt utført. Videre vises K beregnet ut fra borehullenes geometri ($r_e = 0,032$ m), hvor den samlede lekkasje er fordelt på alle borehull, også de som var tørre. K -verdier basert på vanntapsmålinger i kjerneborehull for Tåsentunnelen ut fra at én Lugeon-enhet tilsvarer en gjennomsnittskonduktivitet lik $1E-7$ m/s, er også vist.



Figur 6c *K*-verdier basert på lekkasjer i sonderhull og K_i -verdier basert på lekkasjer i tunnelen

Tabell 7a oppsummerer *K*-verdier basert på henholdsvis tunnelgeometri og hullgeometri.

Tabell 7a *K*-verdier (m/s) basert vannlekkasjer i første omgangs sonderhull

	Middel	Median	Min.	10. persentil	90. persentil	Maks.
Tunnelgeometri	7,9E-07	9,2E-08	4,9E-09	2,7E-8	3,6E-7	3,1E-05
Hullgeometri	4,0E-08	6,8E-09	5,2E-10	1,6E-09	2,0E-08	1,8E-06

Av Figur 6c og Tabell 7a ser man at det er store forskjeller i *K*-verdier avhengig av metoden for utregning, dvs. om man forutsetter at vannlekkasjene i sonderhullene tilsvarer den lekkasjen man ville fått i tunnelen om den ikke var blitt injisert, eller om man bruker gjennomsnittelig lekkasje i sonderhullene direkte, da sistnevnte metode gir vesentlig lavere *K*-verdier. For begge metodene fremgår det at ekstremverdiene i form av maksimal-verdiene gir store utslag, da middelverdiene er høyere enn 90. persentil. Maksimalverdiene er på sin side nesten 100 ganger større enn 90. persentil. 90. persentil er 13

ganger høyere enn 10. persentil for begge metodene, dvs. at variasjon for 80 % av dataene ligger innenfor en faktor lik 13.

Tabell 7b oppsummerer forholdet mellom K-verdier og K_i -verdier ved $t = 5$ m basert på K-verdier fra henholdsvis tunnelgeometri og hullgeometri.

Tabell 7b Forholdet mellom K- og K_i -verdier (K/K_{i5})

	Middel	Median	Min.	10. persentil	90. persentil	Maks.
Tunnelgeometri	146	28	2	7	126	4971
Hullgeometri	8	2	0,2	0,5	7	281

Av Tabell 7b ser man at det er store forskjeller i forholdet K/K_{i5} avhengig av metoden for utregning, dvs. om man forutsetter at vannlekkasjene i sonderhullene tilsvarer den lekkasjen man ville fått i tunnelen om den ikke var blitt injisert, eller om man bruker gjennomsnittelig lekkasje i sonderhullene direkte, da sistnevnte metode gir vesentlig lavere K/K_{i5} -verdier. For begge metodene fremgår det at ekstremverdiene i form av maksimal-verdiene gir store utslag, da middelverdiene er høyere enn 90. persentil. Maksimalverdiene er på sin side 40 ganger større enn 90. persentil. Man ser også at for "hullgeometri-modellen" er forholdet mindre enn 1 for 10. persentil, faktisk er $K/K_{i5} \leq 1,0$ helt opp til 23. persentil. Dvs. at denne modellen gir for 23 % av dataene at det har blitt mindre tett eller like tett etter injeksjon som før injeksjon. Siden dette åpenbart er galt, konkluderes det med at "hullgeometri-modellen" ikke gir korrekte resultater, dvs. at den tenderer mot å gi for lave K-verdier. Det betyr videre at måling av innlekkasje i borehull foran stuff ikke gir riktige K-verdier basert på en "rett-frem-metode" hvor samlet lekkasje fra alle hull brukes til å beregne gjennomsnittet per hullmeter som deretter brukes til å beregne K ut fra Ligning 2. "Tunnelgeometri-modellen" kan heller ikke antas å gi korrekte K-verdier, men riktigere enn "hullgeometri-modellen" i dette tilfellet.

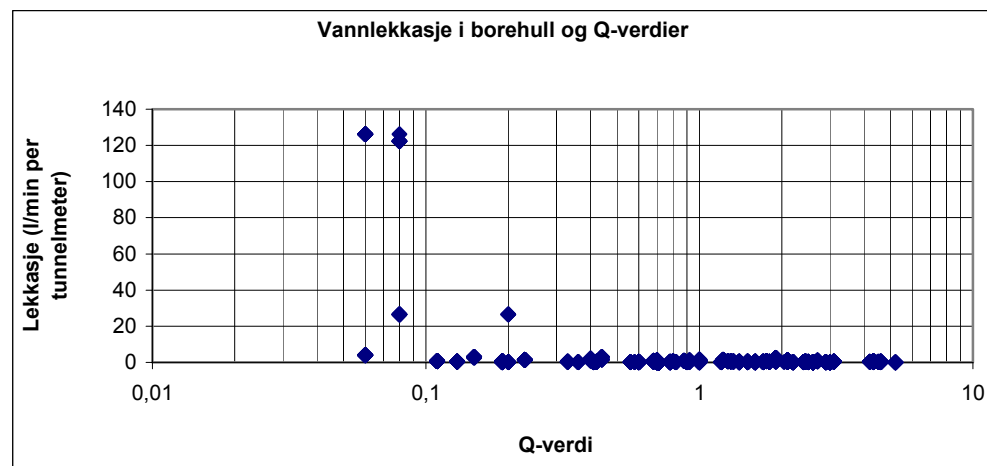
Som grunnlag for Tabell 7c er lekkasjer i borehull summert opp for tilsvarende seksjoner som det er målt lekkasjer etter ferdig injeksjon (Tabell 6) for de strekningene det finnes data. Dvs. at det er søkt å jevne ut borehullsdata på samme måte som lekkasjedata fra tunnelen etter injeksjon.

Tabell 7c Forholdet mellom K -verdier og K_i -verdier for $t = 5$ m (K/K_{i5}) der lekkasjer fra borehull er summert opp på lengre strekninger før beregning av K -verdier

Delstrekning	Lengde	Antall tunnelmeter med lekkasjedata fra borehull	$K_{\text{tunnel}} / K_{i5}$	K_{hull} / K_{i5}
425 – 650	225 m	198 m	29	2,2
650 – 900	250 m	190 m	476	27
900 – 1060	160 m	119 m	31	2,3
1060 – 1300	240 m	218 m	79	4,5
1300 - 1660	350 m	123 m	54	3,2

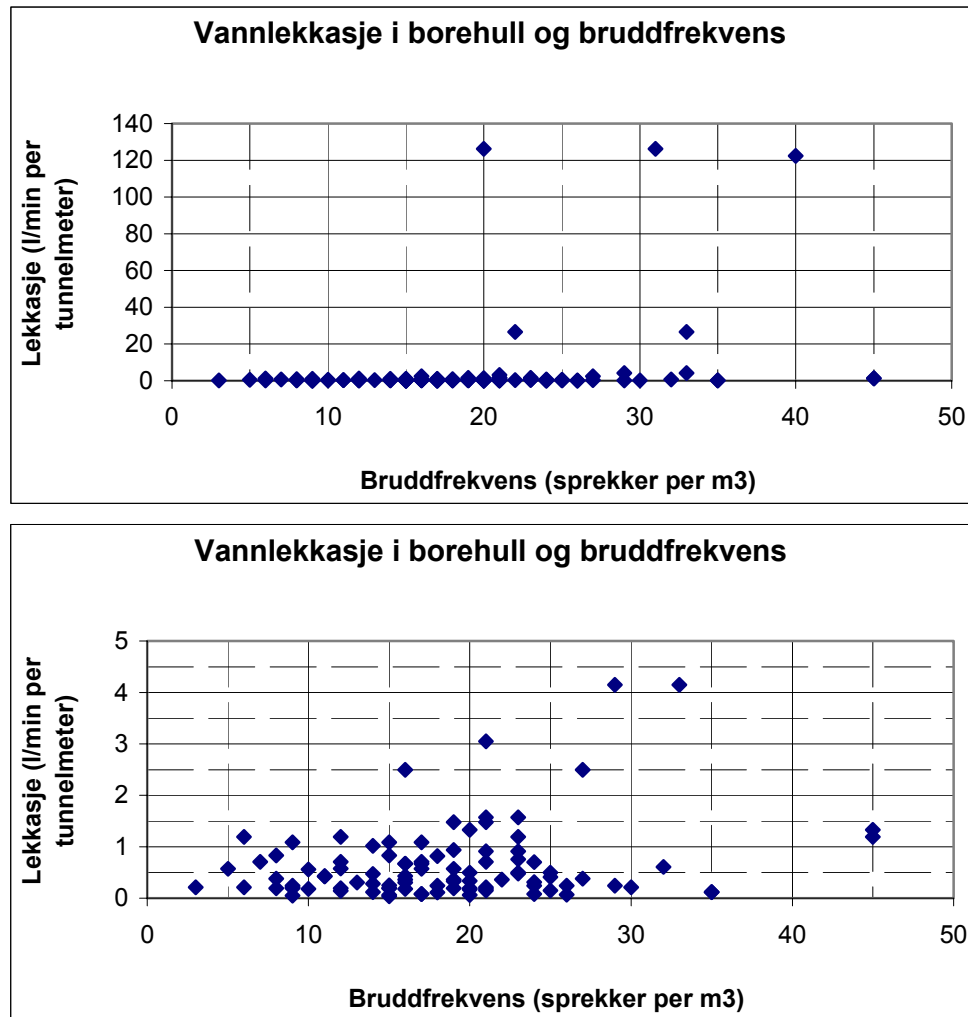
Tabell 7c viser naturlig nok vesentlig mindre variasjon i forholdet K / K_i enn Tabell 7b siden lekkasjedata fra borehull i Tabell 7c er blitt fordelt over 119 m til 218 m lange seksjoner i stedet for (oftest) 21 m lange seksjoner. Også i Tabell 7c er det liten kontrast mellom K basert på hullgeometri og K_i slik at konklusjonen om "hullgeometri-modellen" står fast, dvs. at den gir for lave K -verdier.

Figur 6d viser forholdet mellom lekkasjer i borehull og Q -verdier, og Figur 6e viser forholdet mellom lekkasjer i borehull og bruddfrekvens.



Figur 6d Lekkasje i borehull og Q -verdi

Det fremgår av Figur 6d at Q -verdien i liten grad påvirker lekkasjen i borehullene bortsett fra at de høyeste lekkasjene har blitt påtruffet ved Q -verdi lavere enn 0,1.



Figur 6e Lekkasje i borehull bruddfrekvens. Den nederste figuren viser kun data for lekkasje mindre enn 5 l/min per tunnelmeter

Det fremgår av Figur 6e at det ikke er noen tydelig sammenheng mellom lekkasjer i borehullene og bruddfrekvensen. Dog ser man at lekkasjer høyere enn 5 liter/minutt per tunnelmeter er knyttet til bruddfrekvenser større eller lik 20. Men også ved de høyere bruddfrekvenser finner man lekkasjeverdier på noen få liter per minutt per tunnelmeter.

7 INJEKSJON

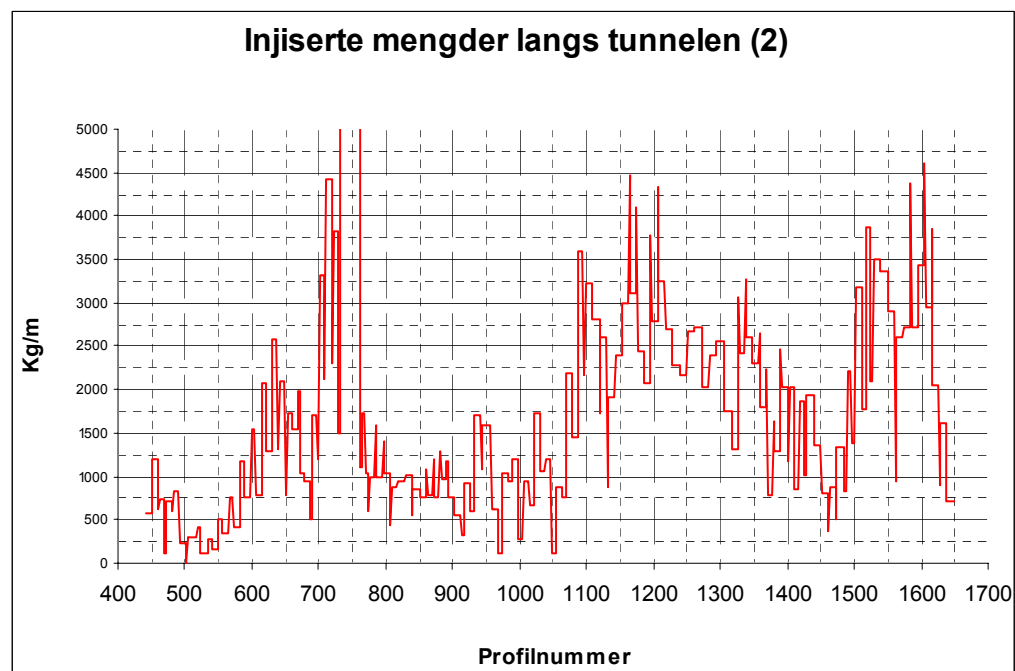
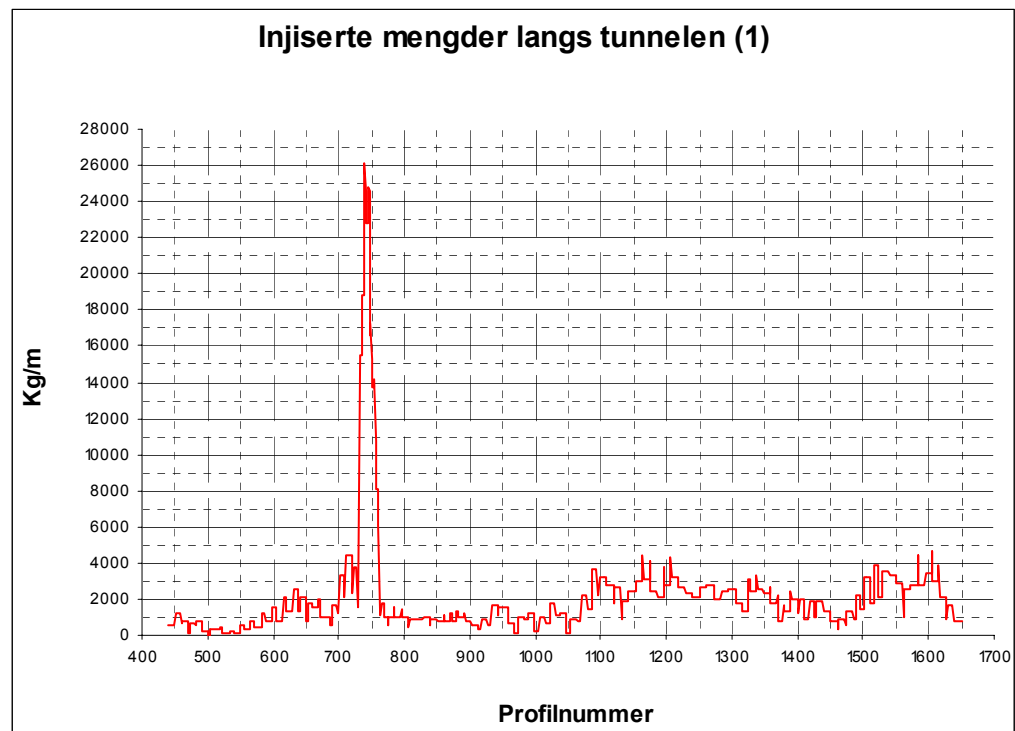
7.1 Injeksjonsmengder

Injeksjonsdata fra tunnelen er oppsummert på følgende måte: Antall kilogram tørrstoff (sement og Grout Aid/mikrosilika) og boremeter for injeksjon er oppsummert for hver enkelt skjerm og fordelt per meter innenfor skjermen. Deretter er totale mengder per meter oppsummert ved å summere mengden per meter fra overlappende injeksjonsskjermer.

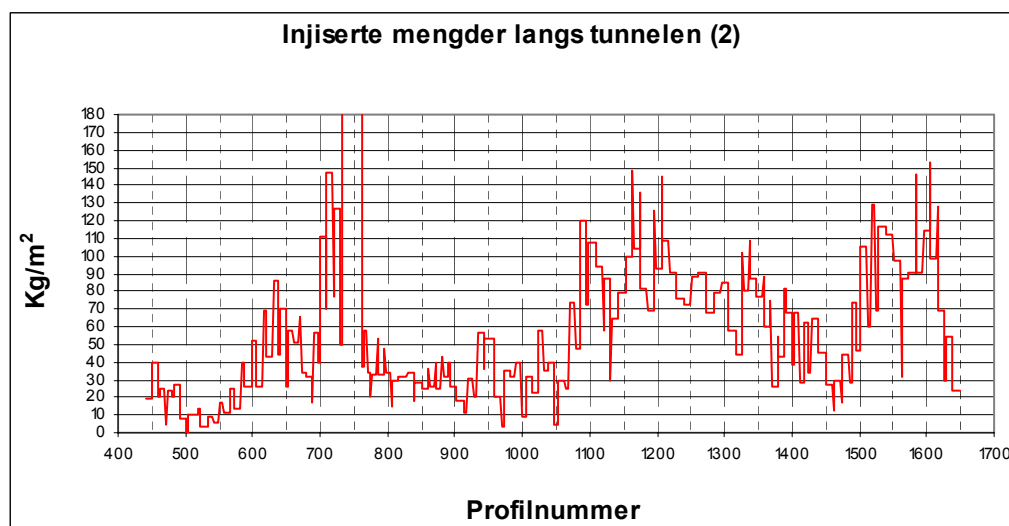
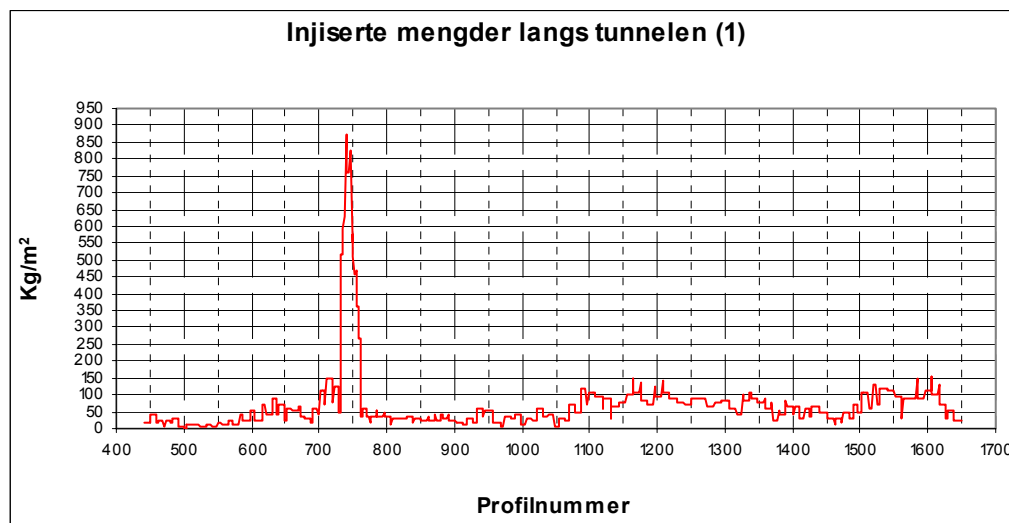


Pumpetrykket ved injeksjon varierte mellom 30 og 80 bar, med 40 – 50 bar som typisk. For stor del er det benyttet mikrosegment tilsatt mikrosilika (Grout Aid) og plastiserende stoff. V/C-forholdet lå mellom 0,5 (0,4 i enkelte tilfeller for å stoppe utganger på stoff) og 1,0. Mikrosilika/segment-forholdet lå i hovedsak mellom 0,12 og 0,20.

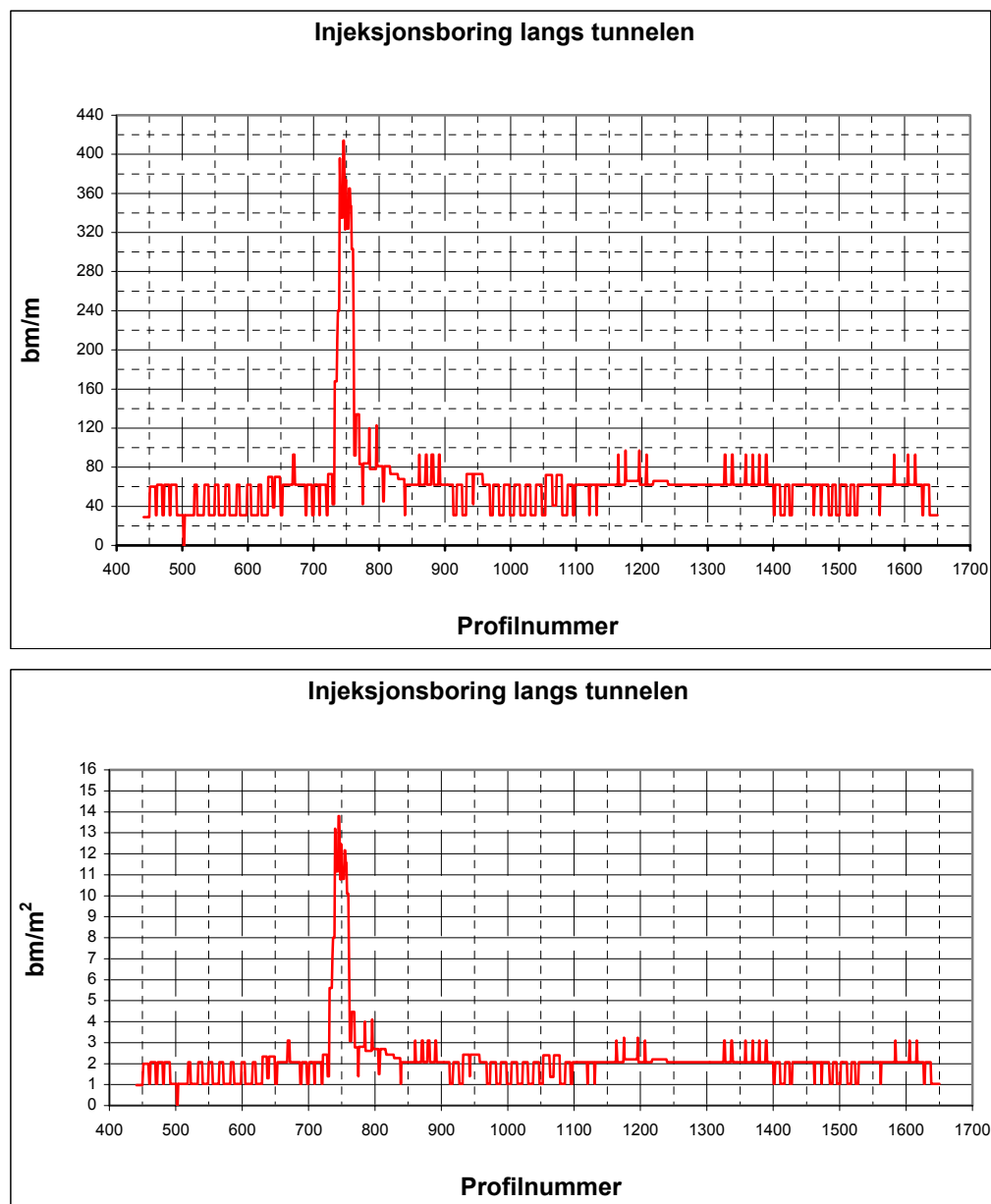
Figur 7 - 10 viser masseforbruket og injeksjonsboring langs tunnelen



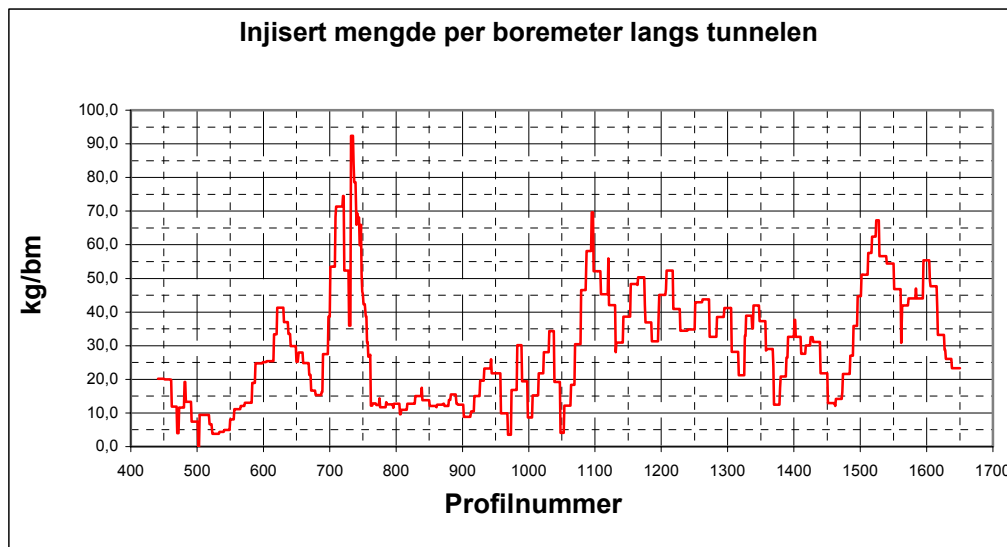
Figur 7 *Injiserte mengder per meter langs tunnelen*



Figur 8 Injiserte mengder per kvadratmeter langs tunnelen



Figur 9 Injeksjonsboring per meter og per kvadratmeter langs tunnelen



Figur 10 Injisert mengde per meter injeksjonshull langs tunnelen

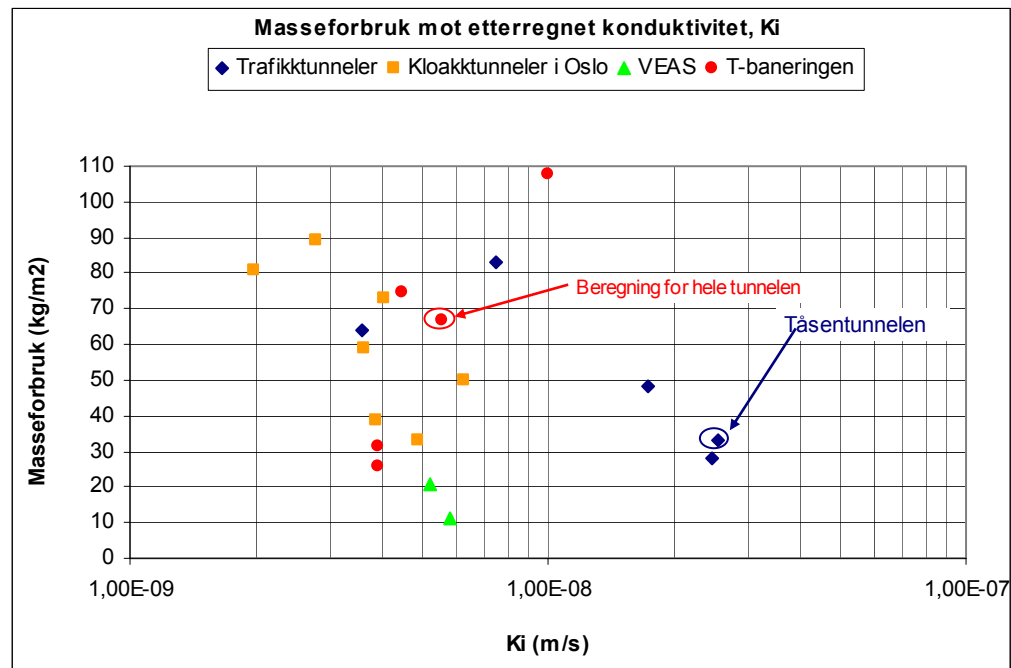
Av Figur 7 – 10 ses at det ekstremt høye masseforbruket ved P 732 – 761 mer skyldes at det er boret flere injeksjonshull i dette området enn at det er pumpet inn mer sement i hvert hull, selv om også masseforbruket per boremeter er høyere her enn i tunnelen for øvrig (Figur 10). Dette indikerer sterkt at det å bore mange hull i dårlig bergmasse er viktig for å få et godt resultat.

Tabell 8 oppsummer nøkkeldata fra Figur 7 – 10. Strekningen med vesentlig høyere masseforbruk enn resten av tunnelen er synliggjort.

Tabell 8 Injeksjonsdata - oppsummering

	P441-1650 (hele den injiserte strekningen)	P441-732, P761-1650	P732-761
Kg/m	2 021	1 648	16 677
Standardavvik (%)	133	61	33
Kg/m ²	67	55	556
Standardavvik (%)	133	61	33
Boremeter/m	64	58	304
Standardavvik (%)	67	28	24
Boremeter/m ²	2,1	1,9	10,1
Standardavvik (%)	67	28	24
Kg/boremeter	29,0	28,3	57,7
Standardavvik (%)	57	56	38

I Figur 11 er data fra T-baneringen vist sammen med data fra eldre tunneler i kambrosiluriske bergarter i Oslo-området.



Figur 11 Masseforbruk (sement+kjemisk) plottet mot etterregnet konduktivitet i injisert sone for tunneler i kambrosiluriske bergarter i Oslo-området. Merk at tykkelse av injisert sone, t , er satt til 5 m for kloakktunneler i Oslo og VEAS, mens det er brukt $t=10$ m for trafikktunneler

Det ses av Figur 10 at det midlere masseforbruket regnet i kg/m^2 i T-baneringen ligger høyt sammenlignet med de andre anleggene, men det er også fire anlegg som ligger enda høyere. K_i for T-baneringen ligger i det nedre området for trafikktunneler, mens kloakktunnelene stort sett ligger på samme nivå, eller noe lavere. Det skal her bemerkes at K_i for kloakktunnelene ville blitt ca 1,4 ganger høyere om tykkelsen av den injiserte sonen var blitt satt til 10 m i stedet for 5 m for disse tunnelene. En sammenligning mellom T-baneringens gjennomsnitt og "nabotunnelen", Tåsentunnelen, viser at masseforbruket er dobbelt så høyt i T-baneringen og K_i er omtrent $1/5$ av hva den er for Tåsentunnelen. Det kan altså konkluderes med at en vesentlig større injeksjonsinnsats i T-baneringen har gitt et vesentlig bedre resultat sammenlignet med Tåsentunnelen.

7.2 Injeksjon i forhold til tetthetskrav

På grunn av varierende fare for setningsskader er det langs tunnelen noe forskjellige krav til tetthet og det burde kunne ha betydning for injeksjonsinnsatsen.

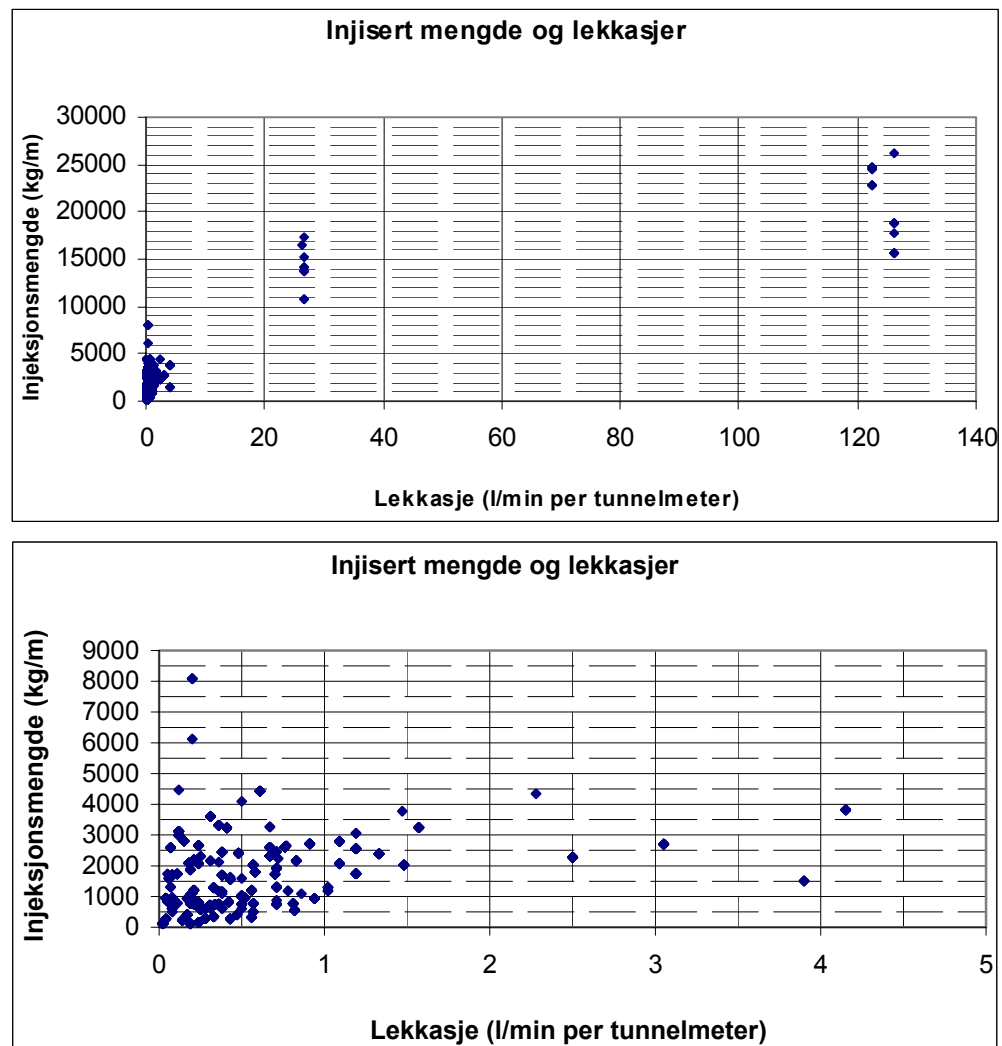
Tabell 9 Tetthetskrav og oppnådd resultat i liter per minutt per 100 m og injeksjonsmengde på forskjellige deler av tunnelen

Strekning	Tetthetskrav i kontrakt	Målte lekkasjer/oppnådd resultat	Gjennomsnittlig injeksjonsmengde (kg/m)
P440-650	14	2,9	780
P650-900	7	8,0	3235
P900-1060	14	3,1	947
P1060-1300	8	3,5	2497
P1300-1650	10	3,4	2066

Av Tabell 9 ser man at injeksjonsinnsatsen varierer med tetthetskravet, dvs. mest injeksjon der kravene er strengest. Men, ser man på oppnådd resultat virker denne trenden noe tilfeldig. Oppnådd resultat varierer omtrent ikke bortsett fra P650 – 900. Her er injeksjonsinnsatsen størst, og tunnelen lekker mest. De vanskelige geologiske forholdene på deler av denne strekningen er den fremste årsaken til den store injeksjonsinnsatsen, selv om det relativt strenge tetthetskravet må antas å ha medvirket til at man ikke ga seg med injeksjonen på et tidligere stadium.

7.3 Injeksjon i forhold til lekkasjer

Figur 12 viser total injeksjon i forhold til målte vannlekkasjer i borehull i første omgangs injeksjonshull.

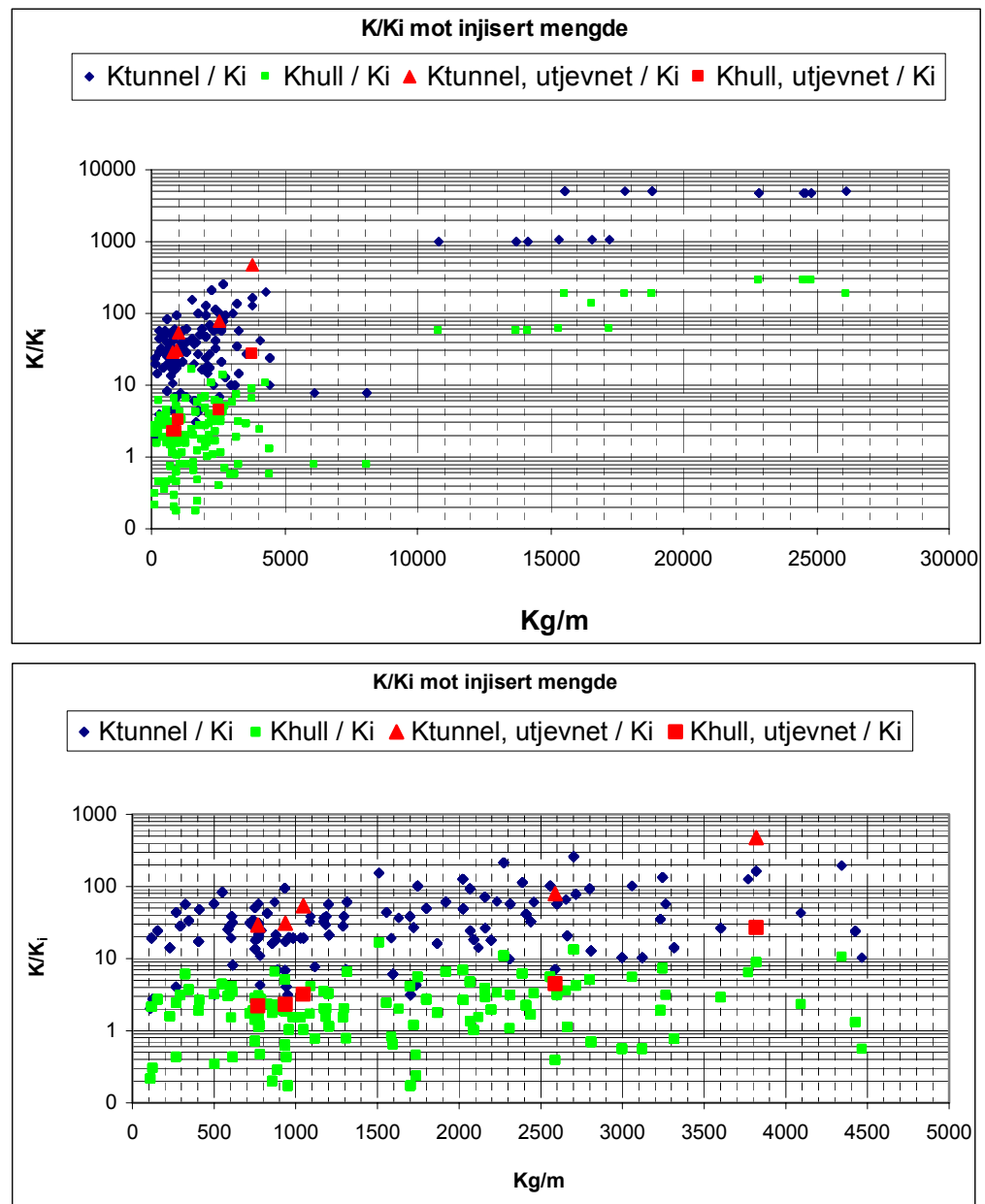


Figur 12 Injisert mengde og lekkasjer i borehull. Det nederste diagrammet viser kun data for mindre enn 9 000 kg/m og mindre enn 5 l/min per tunnelmeter

Det ses av Figur 12 at svært høye lekkasjer har gitt svært høye injeksjonsmengder. Men, ser man på hovedbolken av data (nederste diagram), er det vanskelig å oppdage noen markert trend.

7.4 Injeksjon i forhold til reduksjon i hydraulisk konduktivitet

Figur 13 viser forholdet mellom K og K_i (beregnet etter Ligning 2 og 3), ”konduktivitetskontrasten”, plottet mot injisert mengde. Se Kapittel 6 for definisjoner.



Figur 13 K/K_i plottet mot injisert mengde. Den nederste figuren viser kun data der injisert mengde er mindre enn 5 000 kg/meter

De røde punktene viser utjevnete verdier (dvs. at K er beregnet for de samme strekningene som K_i) og antas mest relevant siden lekkasjen etter injeksjon (se også Kapittel 6) kan variere en del innenfor målestrekningene og dermed også K_i . For de utjevnete verdiene ser man en tydelig trend:

”konduktivitetskontrasten” øker med injisert mengde. Eller sagt på en annen måte: der det har vært nødvendig å redusere konduktiviteten mest for å møte tetthetskravene, har det også kostet mer i form av injeksjon.

7.5 Injeksjon i forhold til bergarter

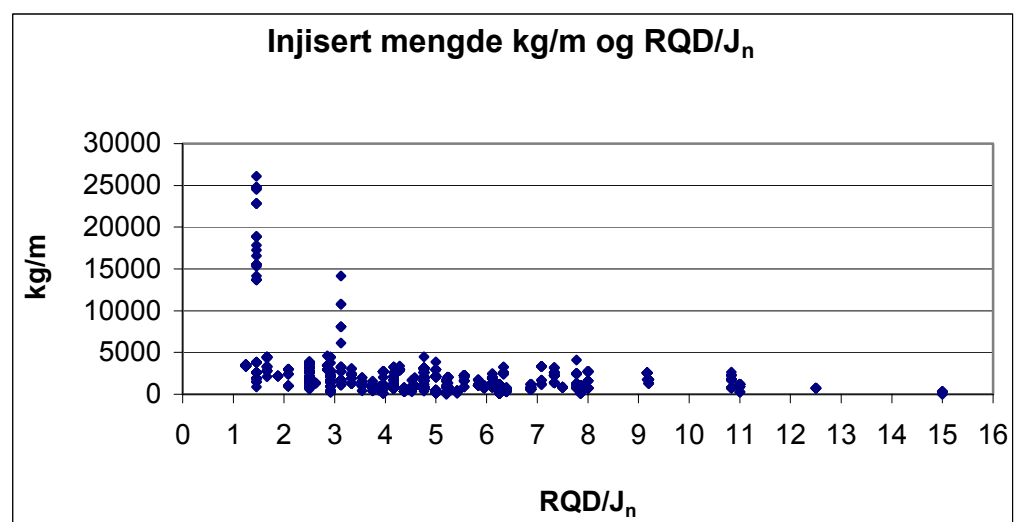
Tabell 10 Injeksjonsmengder i forskjellige bergarter. Tall i parentes angir data fra kloakktunneler i Oslo

Bergartstype	Midlere injeksjonsmengder (kg/m)	Midlere injeksjonsmengder (kg/m ²)
Knollekalk	1 090	36 (34)
Vekslende lag skifer/kalk	1 545	52
Skifer	1 790	60 (41)
Seksjoner berørt av eruptivganger	3 504	117
Forkastningssone, P705-780	8 680	290
Syenittgang i forkastningssone, P732-761	16 667	556
Hele tunnelen	2 021	67
Utenom forkastning	1 575	53

Av Tabell 10 ses at det er noe høyere inngang i skifer enn i knollekalk. Eruptivganger er viktige og forkastningssonen har størst betydning.

7.6 Injeksjon og opprekkingsgrad

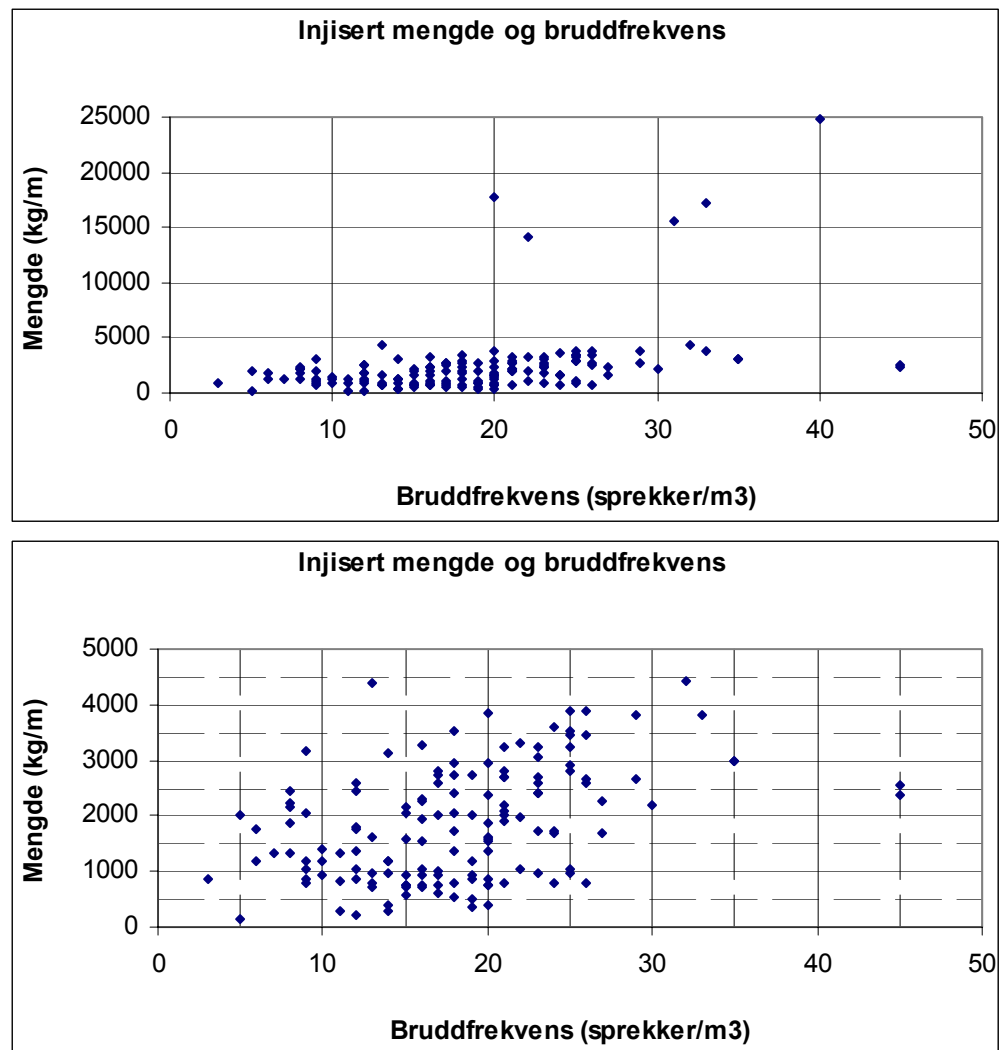
Forholdet RQD/J_n er et uttrykk for oppsprekkingsgrad i det en lav verdi vil bety stor oppsprekkingsgrad.



Figur 14 Forholdet mellom oppsprekkingsgrad gitt ved RQD/J_n og injeksjonsmengde

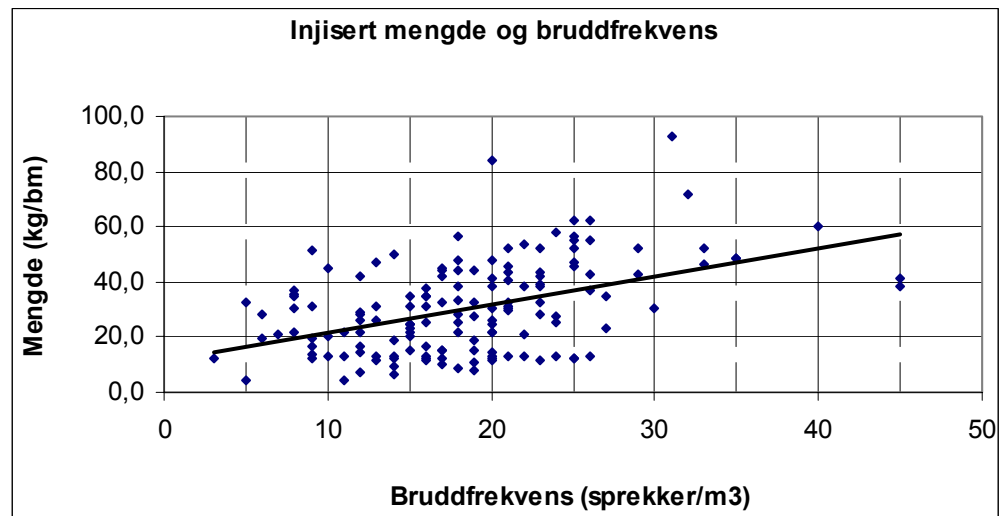
Figur 14 viser at det ikke er noen tydelig sammenheng mellom injeksjonsmengder og RQD/ J_n . Det ses imidlertid at de største injeksjonsmengdene opptrer når RQD/ J_n er rundt 3 og lavere, men også her er det flere punkter som viser relativt moderate injeksjonsmengder.

Figur 15 – 16 viser injiserte mengder mot bruddfrekvens.



Figur 15 Sammenheng mellom bruddfrekvens (sprekker per m^3) og injeksjonsmengde gitt som kg/tunnelmeter. Det nederste diagrammet viser hovedbolken av data, dvs. injisert mengde mindre enn 5 000 kg/m

Av Figur 15 ses det at dataene er meget spredt, og at det er en svak generell tendens til at injeksjonsmengden øker med økende bruddfrekvens. Det ses også at de største injeksjonsmengdene forekommer ved bruddfrekvenser større enn 20 sprekker per m^3 .

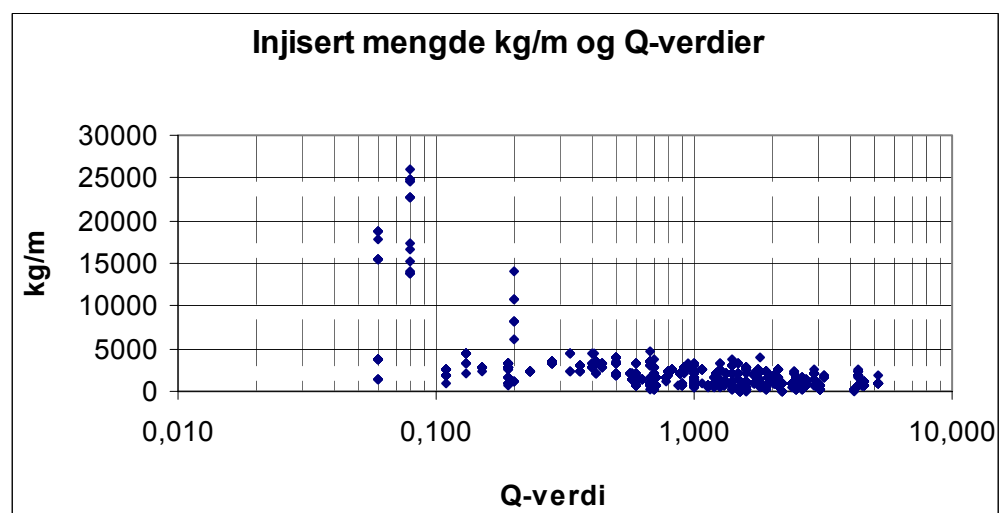


Figur 16 Sammenheng mellom bruddfrekvens (sprekker per m^3) og injeksjonsmengde gitt som kg per boremeter.

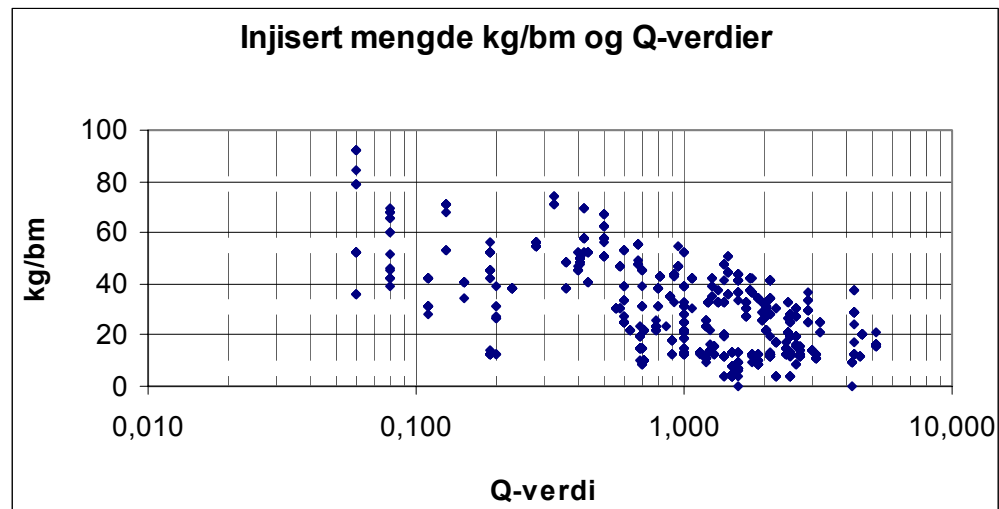
Av Figur 16 ses det at dataene er meget spredt, men at det er en svak generell tendens til at injeksjonsmengden per boremeter øker med økende bruddfrekvens.

7.7 Injeksjonsmengder og Q-verdi

Figur 17 viser injeksjonsmengder og Q-verdi.



Figur 17a Q-verdier og injeksjonsmengder i kg per tunnelmeter



Figur 17b Q-verdier og injeksjonsmengder i kg per boremeter

Det ses av Figur 17a at det er ved lave Q-verdiene at injeksjonsmengdene er størst. Når Q-verdiene kommer under ca 0,2, synes injeksjonsmengdene å øke radikalt, mens det for Q-verdier i området 0,2-10 ikke er noen tydelig sammenheng mellom Q-verdier og injeksjonsmengde. De største injeksjonsmengdene i T-baneringen kom i forbindelse med den store forkastningssonen hvor den gjennomsnittlige Q-verdien var på 0,1. Her må det imidlertid bemerkes at de Q-verdiene vi her snakker om, stammer fra tunnelkartlegging etter at det var foretatt forinjeksjon, og J_w er i derfor over alt satt til 1,0 fordi tunnelen var tilnærmet tett. De virkelige Q-verdiene, dvs. verdiene før injeksjon, kan derfor ha vært noe lavere på grunn av lavere J_w -verdi.

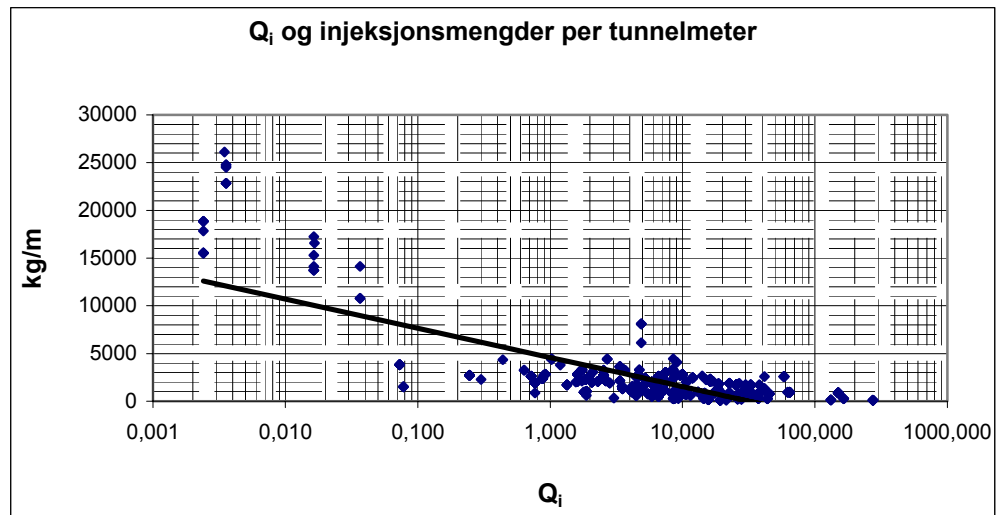
Figur 17b viser en noe tydeligere trend ved at injeksjonsmengdene øker ved avtagende Q-verdi, men her er altså injeksjonsmengden gitt i kg per boremeter injeksjonshull.

I forbindelse med analysene av injeksjonsresultatene fra Frøya-tunnelen ble det prøvd med en tillempet Q-verdi, såkalt Q_i , som viste seg å gi en noe bedre korrelasjon med injeksjonsmengdene enn den ordinære Q-verdien, og denne metoden er brukt også på T-baneringen. I Q_i for T-baneringen er siste ledd i Q-formelen J_w/SRF byttet ut med innlekkasjer per tunnelmeter (samlet lekkasje i borehullene fordelt på tunnallengden som dekkes av borehullene) eller samlet lekkasje i borehullene fordelt på samlet lengde av borehullene, slik at Q_i -formelen blir:

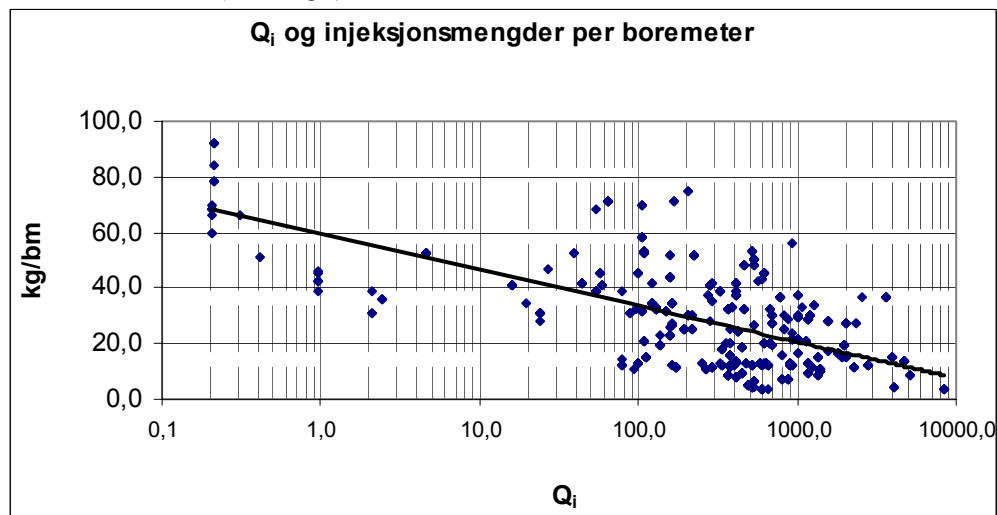
$$Q_i = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{1}{\text{lekkasje}(l/\text{min}) / \text{tunnallengde eller hullengde}(m)}$$

Figur 18 viser Q_i (tunnallengde) mot injeksjonsmengde per tunnelmeter og

Q_i (hullengde) mot injeksjonsmengde per boremeter.



Figur 18a Q_i (tunnellengde) og injeksjonsmengder i kg per tunnelmeter



Figur 18b Q_i (hullengde) og injeksjonsmengder i kg per boremeter

Det ses av Figur 18a at de høyeste injeksjonsmengdene forekommer ved $Q_i < 0,1$. Ved $Q_i > 0,1$ er det ingen tydelig sammenheng mellom Q_i og injeksjonsmengde. Sammenlignes det med Figur 17a synes ikke Q_i å gi bedre sammenheng med injeksjonsmengde i kg/tunnelmeter enn den ordinære Q -verdien.

Figur 18b viser en tydeligere trend ved at injeksjonsmengden i kg/boremeter øker ved avtagende Q_i . Men også her er dataspredningen stor, særlig ved $Q_i > 100$. Sammenlignes det med Figur 17b ses at Q_i synes å gi noe bedre sammenheng med injeksjonsmengde i kg/boremeter enn den ordinære Q -verdien ved $Q_i < 100$.



7.8 Oppsummering av injeksjon

Dagens status er vel at det ikke er etablert noen omforente gode metoder for å prognosere injeksjonsmengder basert på forundersøkelser. Det vanligste er vel å bruke erfaringsdata fra anlegg i tilsvarende bergarter/geologiske regioner. I denne rapporten er injeksjon vurdert mot følgende:

1. Tetthetskrav.
2. Reduksjon i hydraulisk konduktivitet
3. Lekkasjer i borehull
4. Oppsprekkingsgrad.
5. Q-verdi og en tillempet Q-verdi (Q_i).
6. Bergarter.

Det ville derfor være av interesse om noen av forholdene nevnt ovenfor kunne brukes under forundersøkelser, før eller under tunneldrivingene, for å prognosere injeksjonsbehov. Noen konklusjoner er trukket nedenfor:

1. Tetthetkravet alene synes uegnet for å prognosere injeksjonsbehov. Det må ses i sammenheng med hvor utett bergmassen er før injeksjon, se Punkt 2 nedenfor.
2. Å prognosere injeksjonsbehov ut fra hva som kreves av reduksjon i hydraulisk konduktivitet krever at tetthetskravene er definert, og at man har data om den hydrauliske konduktiviteten i bergmassen, og dermed kan nødvendig reduksjon i hydraulisk konduktivitet beregnes. Basert på resultatene i Kapittel 6.4 synes dette å være en metode som kan brukes til grovt å estimere injeksjonsbehovet. Men, som diskutert i Kapittel 5 er metoden for å beregne hydraulisk konduktivitet i bergmassen før injeksjon ikke noen rett frem sak.
3. Lekkasjer i borehullene synes å fange opp de grove trekkene, altså store lekkasjer gir store injeksjonsmengder. Men, hovedbolken av data for tunnelen, lekkasjer < 5 l/min per tunnelmeter, viser ingen markert trend. Denne metoden synes derfor også meget grovmasket.
4. Oppsprekkingsgraden synes ikke alene å være egnet til å prognosere injeksjonsbehov, da dataspredningen er meget stor. Ses det kun på injisert mengde per boremeter injeksjonshull i forhold til bruddfrekvensen, er det mindre spredning i dataene, og et bedre prognosegrunnlag isolert sett. Men, spørsmålet om hvor mange hull man må bore er da ikke besvart, og det bør man jo ha en oppfatning om for å kunne prognosere totale mengder.
5. Q-verdi og tillempet Q-verdi (Q_i) synes begge kun å fange opp at injeksjonsmengden blir (kan bli) stor ved de laveste Q- og Q_i -verdier, men ved de vanligste verdiene finner man ingen markert trend.
6. Det er forskjell i injeksjonsomfanget i bergartene, og mengden fra ulike bergarter bør kunne brukes til grovt å prognosere injeksjonsmengder. Tidligere erfaringer fra Oslofeltet tilsier at eruptivgangene har stor betydning for både vannlekkasjer og injeksjonsomfang. Antall ganger er utslagsgivende siden de største lekkasjene ofte opptrer i grensen



mellom eruptivgangen og sideberget. Også i tunnelen mellom Ullevål Stadion og Nydalen har eruptivgangene vist seg å ha stor betydning.

Oppsummert blir konklusjonen at for tunneler i kambro-siluriske bergarter i Osloregionen er det fortsatt tidligere erfaringer som synes å være den mest robuste prognosemetoden, og at mer detaljerte geologiske data blir et supplement til dette. Derfor synes det fornuftig å ta utgangspunkt i de rene injeksjonsdata vist i Kapittel 6.1 samt erfaringer fra andre anlegg i kambro-siluriske bergarter i Oslo-regionen når injeksjonsprognoser for nye anlegg skal lages.

8 MWD-LOGGING

8.1 Innledning

Ved T-baneringen, tunnelen mellom Ullevål Stadion og Nydalen, er programmet GPM-2 fra Rockma benyttet for tolkning av loggede bergegenskaper ved boring. Ut fra dette får man en karakterisering av hardhet, oppsprekking og vannforhold.

Ved T-baneringen er det benyttet en loggefrequens på 8 cm. Det ble forsøkt med loggefrequens 2 cm, men dette ble oppgitt pga. for lav lagringskapasitet for dataene i Bever Control. Alle parametrene logges kontinuerlig, men for hvert loggeintervall (her 8 cm) regnes et gjennomsnitt av verdiene for alle parametrene som registreres, som lagres og utgjør loggen. Med tettere loggeintervall kunne man oppnådd større nøyaktighet og mer detaljerte tolkninger.

For hvert intervall tilsvarende tunnelkartleggingsskjemaene, er det laget fargeplott for logget hardhet, oppsprekking og vannforhold. Plottene viser snitt i heng og venstre og høyre vegg. Programmet interpolerer mellom borestrengene og lager fargekartet. Skalaen på plottene presenterer forskjellene i bergegenskaper i relative intervaller, og gir ingen absolutte verdier. Når det gjelder hardhetsplottene er fargene kalibrert mot bergartene kalkstein (blått), skifer (grønt) og diabas (gult).

I denne rapporten er data fra tunnelkartleggingen og lekkasjeregistreringer i injeksjonshull sammenlignet med tolkningen av boreloggen (hardhet, oppsprekking og vannforhold). Disse tunneldataene er:

- Bruddfrekvens, dvs antall sprekker per m^3 registrert på stoff
- Q-verdier
- Vannlekkasje i borehull ved første sonderboring
- Bergart

Det er gitt fire eksempler fra MWD-logging. Disse eksemplene er vist fortløpende i Kapittel 8.5.

8.2 Loggede vannforhold

8.2.1 Vannlekkasje i borehull ved første sondering

Det henvises til Figur 6a og 6b i Kapittel 5.

Vanligvis ligger lekkasjen på under 1 l/min per tunnelmeter, og ved P1190 – 1330 oftest 1-3 l/min per tunnelmeter. I én sone er lekkasjen 120-130 l/min per tunnelmeter over ca 30 m (P730 – 760).

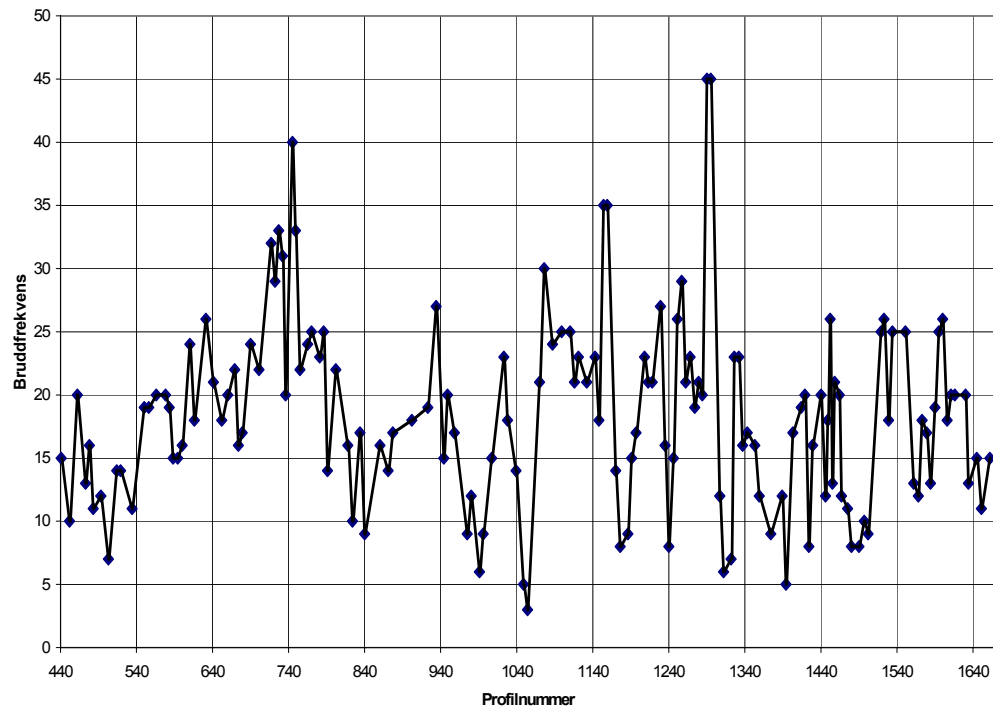
Sonen ved P730 – 760 kan indikeres ut fra de loggede vannforholdene, se Eksempel 2. Det finnes imidlertid andre områder i de loggede vannforholdene som er mer markert enn den P730 – 760, som ikke er registrert ved sonderboring. Ofte er det altså ikke spesielle utslag i målt vannlekkasje der en kunne forvente det ut fra loggen, og andre steder der loggen viser at det er tørt, er det registrert en del lekkasje. I ett tilfelle er det markert raske drypp fra en 10 – 30 cm sleppe med leire i et område der loggen viser at det kan forventes lekkasje, mens sonderboringen ikke viser spesielle utslag.

- Eksempel 1, 640-725: Ikke mye lekkasje målt der det er logget lite vann.
- Eksempel 2, 710-820: Vannførende sone kan påvises i loggen, men ikke spesielt tydelig.

8.2.2 Bruddfrekvens

Bruddfrekvensene kartlagt på stoff ligger mellom 3 og 45 sprekker per m³. Det er ingen klar sammenheng mellom høy/lav bruddfrekvens og de loggede vannforholdene, slike det heller ikke er registrert noen tydelig sammenheng mellom registrerte lekkasjer i injeksjonshull og bruddfrekvens, se Figur 6e i Kapittel 5. I enkelte tilfeller er bruddfrekvensen høy der det er mye utslag på vann eller lav der det er lite utslag på vann, mens i andre tilfeller er det stikk motsatt. I noen tilfeller er variasjonen i registrert bruddfrekvens høy, mens det ikke er noe utslag på loggede vannforhold.

- Eksempel 1, 640-725: Ikke spesielt lav bruddfrekvens 670-680 der det er lite utslag på vann i loggen.
- Eksempel 2, 710-820: Høyere bruddfrekvens i svært vannførende sone 740-755.
- Eksempel 4, 1130-1225: Lavere bruddfrekvens 1160-1190 der det er lite utslag på vann i logg.



Figur 19 Bruddfrekvens langs tunnelen (sprekker per m^3)

8.3 Oppsprekking

8.3.1 Bruddfrekvens

Heller ikke mellom kartlagt bruddfrekvens og logget oppsprekking er det en klar og entydig sammenheng. I tilfeller med tydelige variasjoner i bruddfrekvens er det logget solid berg ved lave bruddfrekvenser, og oppsprukket berg ved høye kartlagte bruddfrekvenser. Dette er imidlertid ikke tilfelle hele veien, og sammenhengen er derfor ikke entydig.

- Eksempel 2, 710-820: Høyere bruddfrekvens der det er logget meget høy oppsprekingsgrad (vannførende sone 740-760).
- Eksempel 3, 1050-1145: Tett oppsprekking logget, men ingen spesielle utslag i bruddfrekvens.

8.3.2 Q-verdier

Det er ingen klar sammenheng mellom den loggede oppsprekkingen og Q-verdiene eller RQD-verdiene. I noen tilfeller er det kartlagt høyere Q-verdier der det er indikert lite oppsprekking, og lav Q-verdi og RQD der det er indikert tettere oppsprekking. I mange tilfeller er det imidlertid ikke en entydig sammenheng, og for eksempel i tilfeller med lave eller høye RQD-verdier der en kunne forvente et utslag, vises ikke dette i loggen. Trolig er variasjon i Q-

verdi og RQD-verdi for liten til å gi større utslag, i hvert fall med det benyttede loggeintervallet.

I områder med jevnt over lavere Q-verdier/RQD-verdier enn ellers er det logget generelt tettere oppsprekking (mer rødt/brunt).

- Eksempel 1, 640-725: Avtagende Q-verdi, men lite utslag i oppsprekking.
- Eksempel 2, 710-820: Lav Q-verdi i vannførende oppsprukket sone.
- Eksempel 3, 1050-1145: Avtagende Q med økende oppsprekking.

8.3.3 Bergart

Det er først og fremst syenitt som har skilt seg ut med tettere oppsprekking.

8.4 Hardhet

8.4.1 Bergart

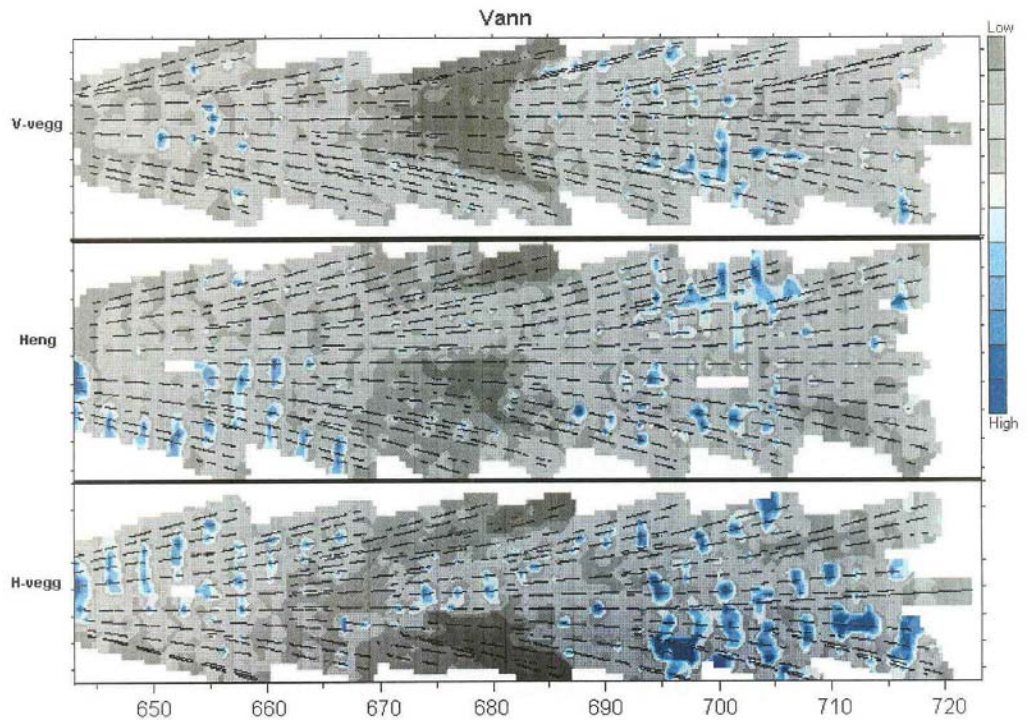
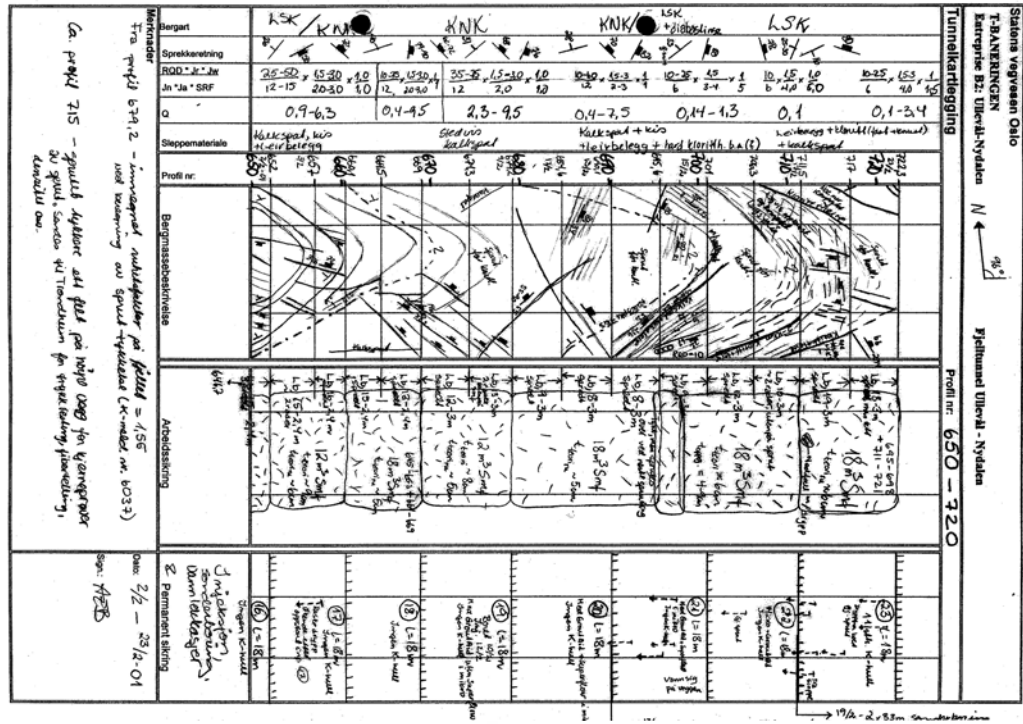
Det er opplyst at fargene i plottene for hardhet er kalibrert mot bergartene kalkstein (blått), skifer (grønt) og diabas (gult). Jevnt over er det god overensstemmelse mellom hardheten som er logget og det som er kartlagt i tunnelen. Fargene er ikke alltid ensbetydende med ”riktig” bergart, men variasjoner i hardhet viser tydelig strukturene, og som oftest stemmer fargene bra. For eksempel er det lett å skille ut hardere diabasganger/syenitt fra knollekalk/leirskifer.

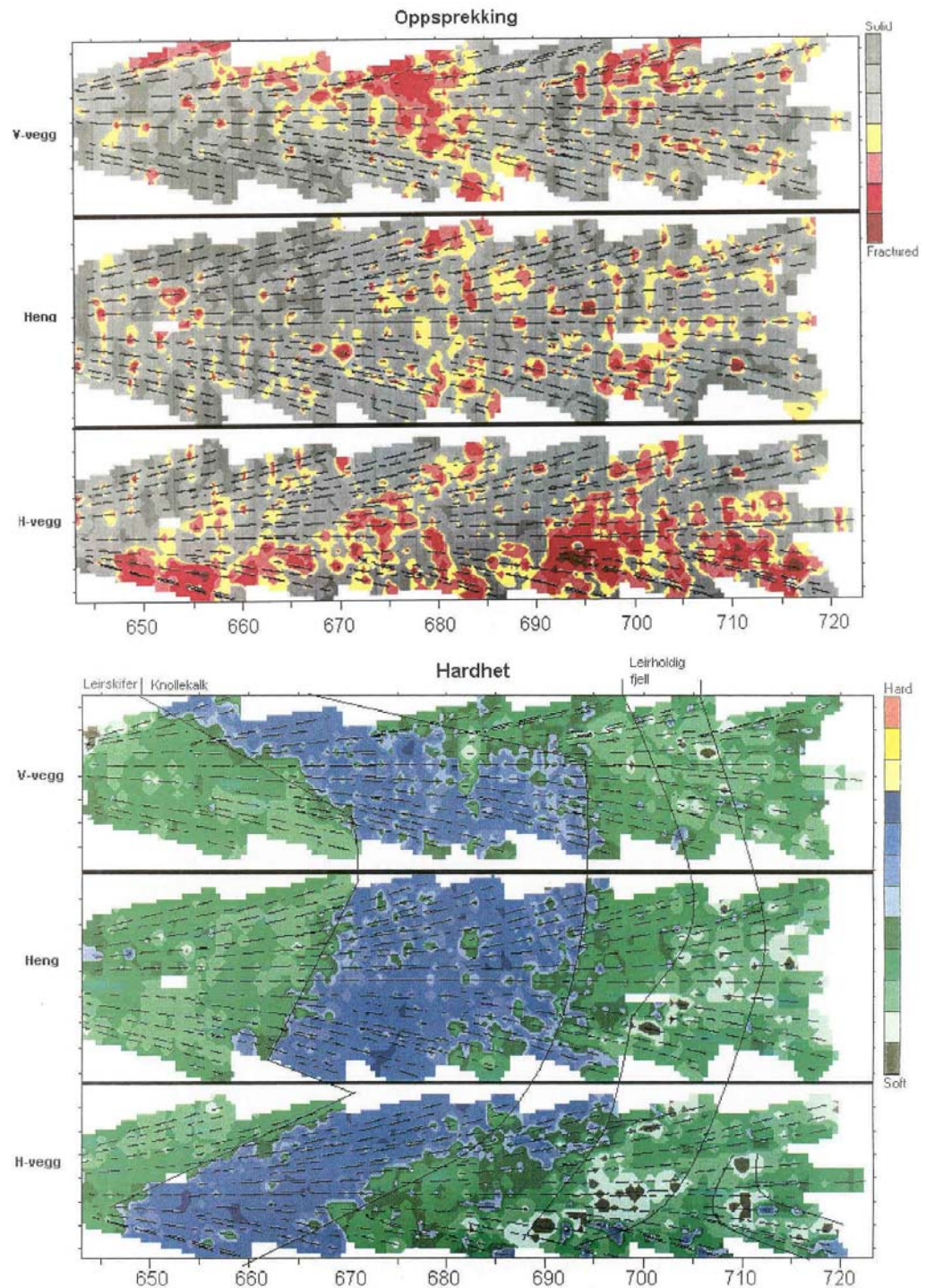
- Eksempel 1, 640-725: Knollekalk skiller seg ut i blått, leirskifer i grønt og leirholdig berg er logget med lavere hardhet.
- Eksempel 2, 710-820: Knollekalk skiller seg ut i blått til høyre, oppknust syenittporfyr skiller seg noe ut i blått, leirfylt knusningssone er logget med lavere hardhet, trolig noe diabas i gult/blått.
- Eksempel 3, 1050-1145: Diabasgang skiller seg ut i blått, noe diabas i gult, småflisig og sleppete fjell er logget med lavere hardhet.
- Eksempel 4, 1130-1225: Diabasganger skiller seg ut i blått/gult fra leirskifer i grønt.



8.5 Eksempler fra MWD-loggingen og tunnelkartleggingen

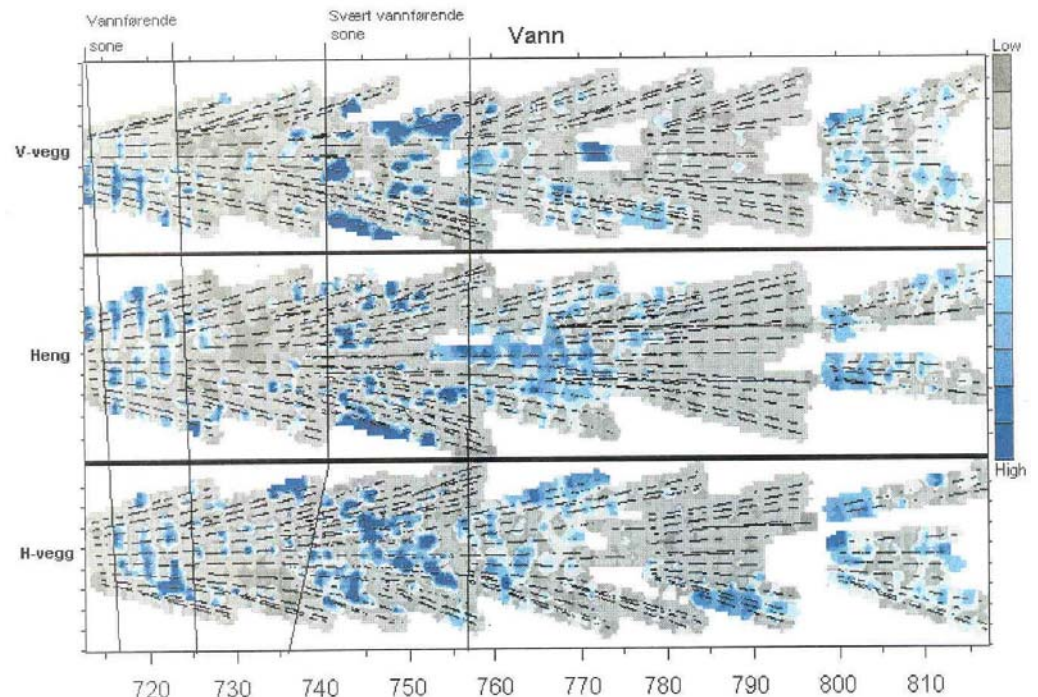
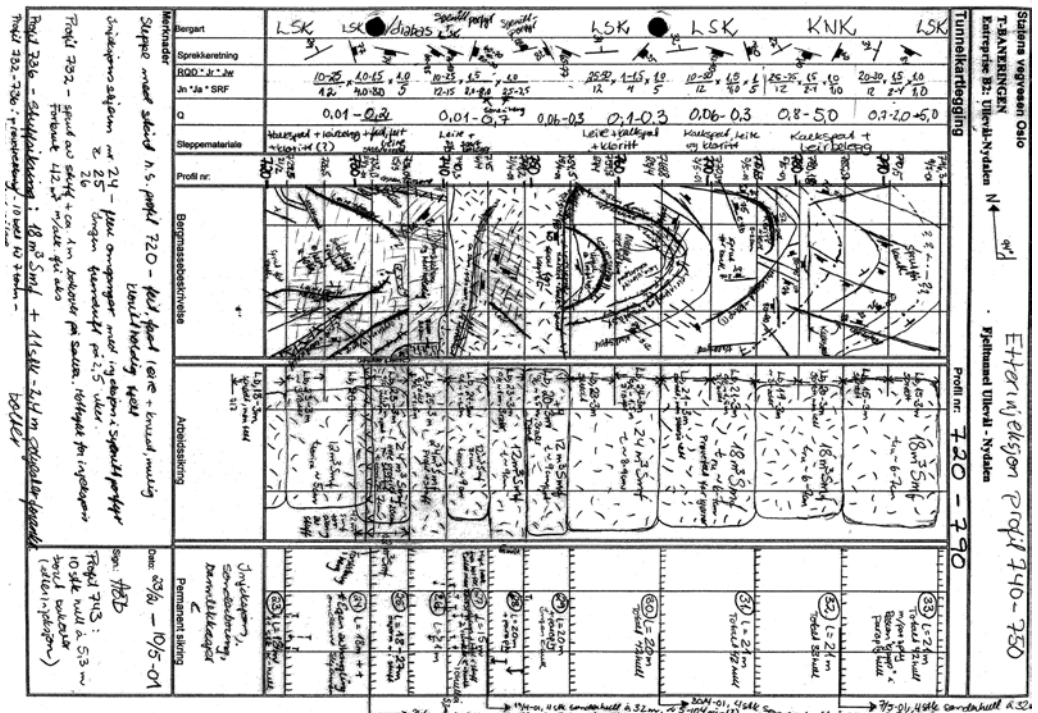
8.5.1 Eksempel 1 – P640-725

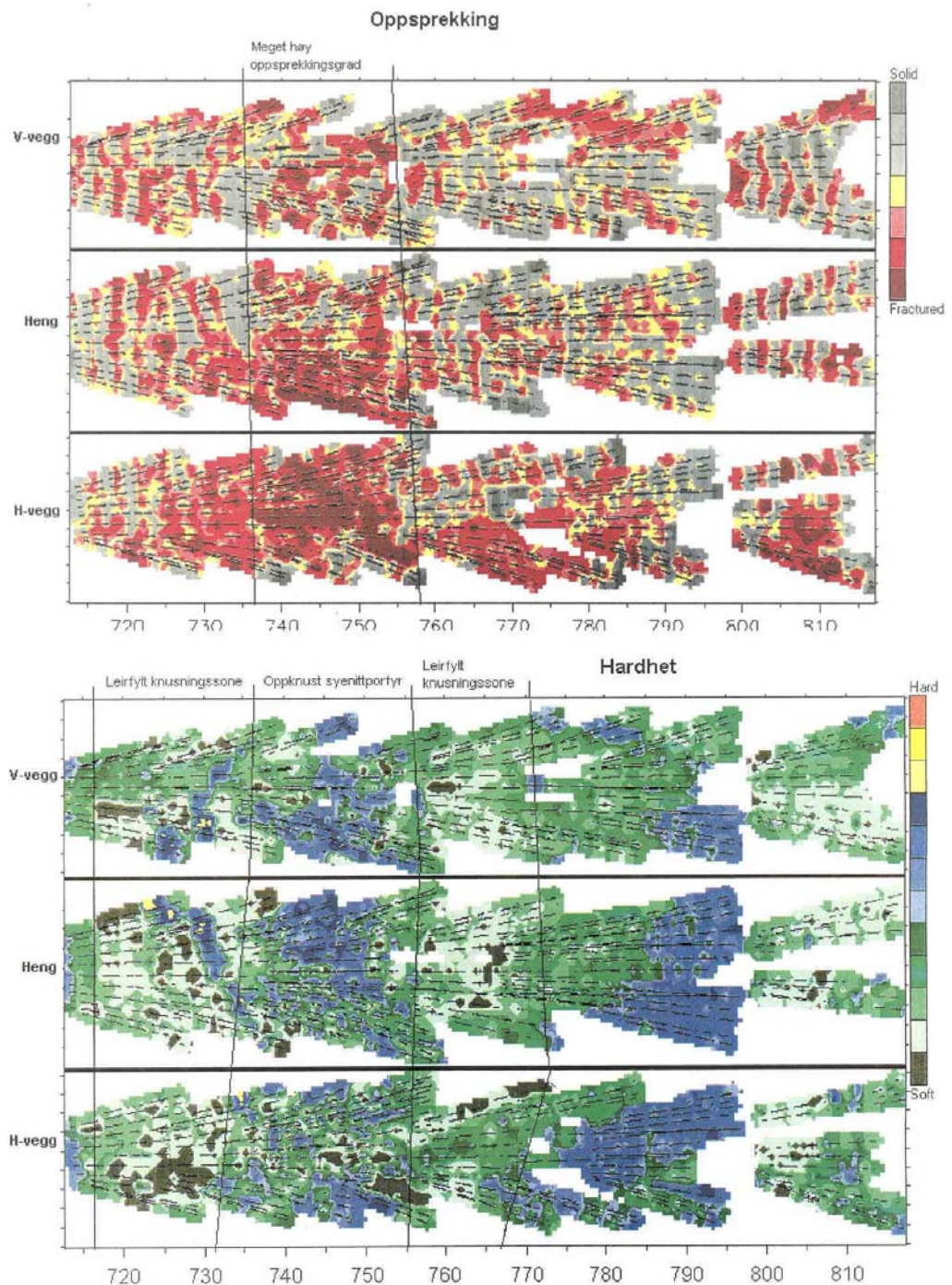






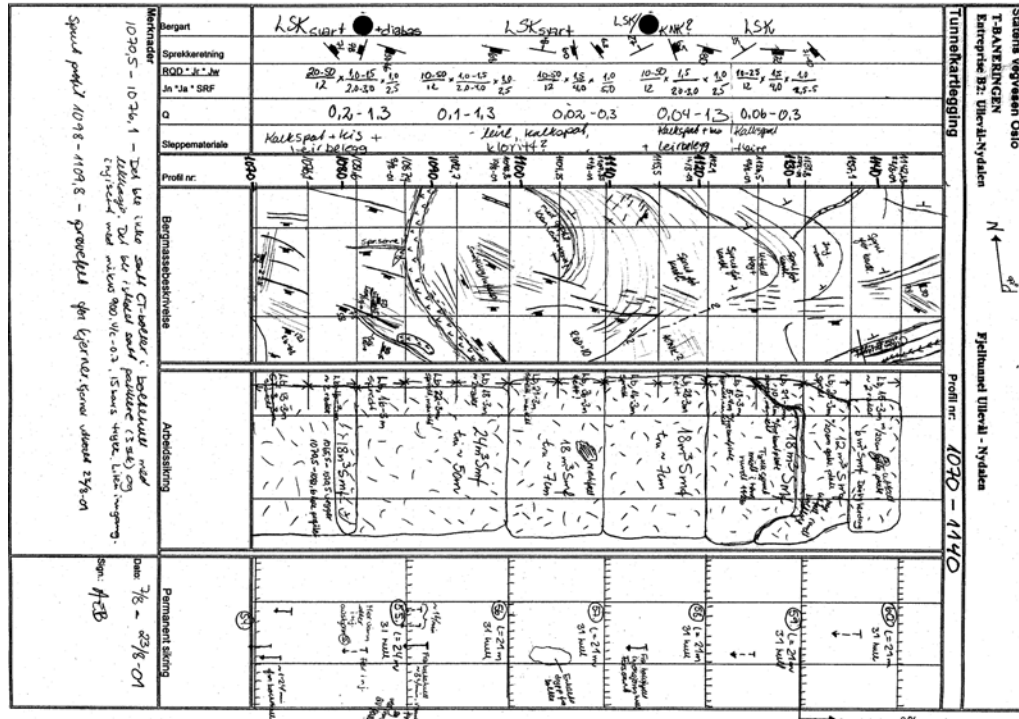
8.5.2 Eksempel 2 - P710-820



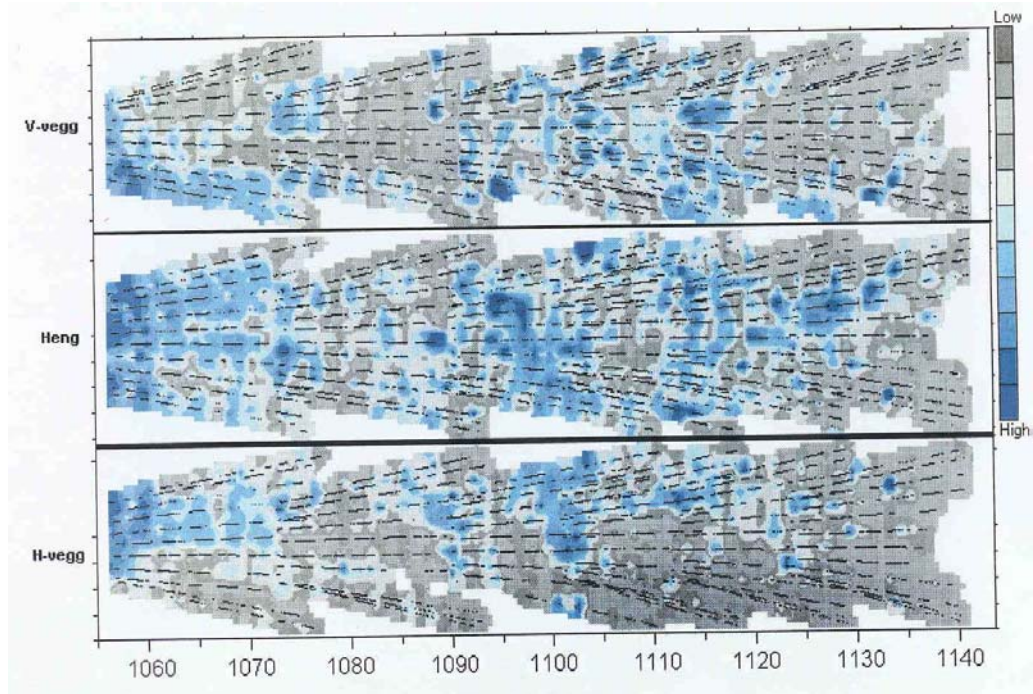


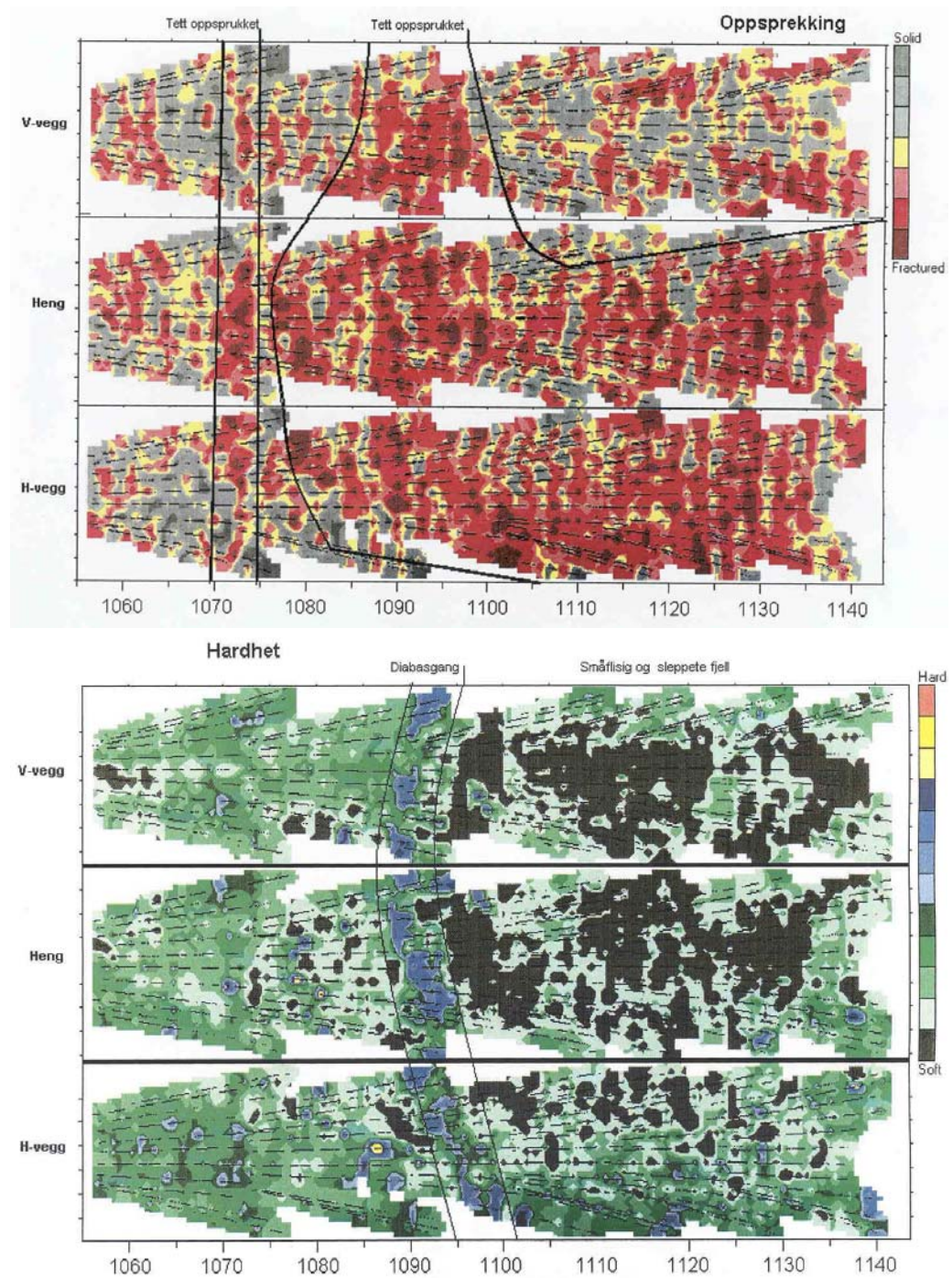


8.5.3 Eksempel 3 – P1050-1145



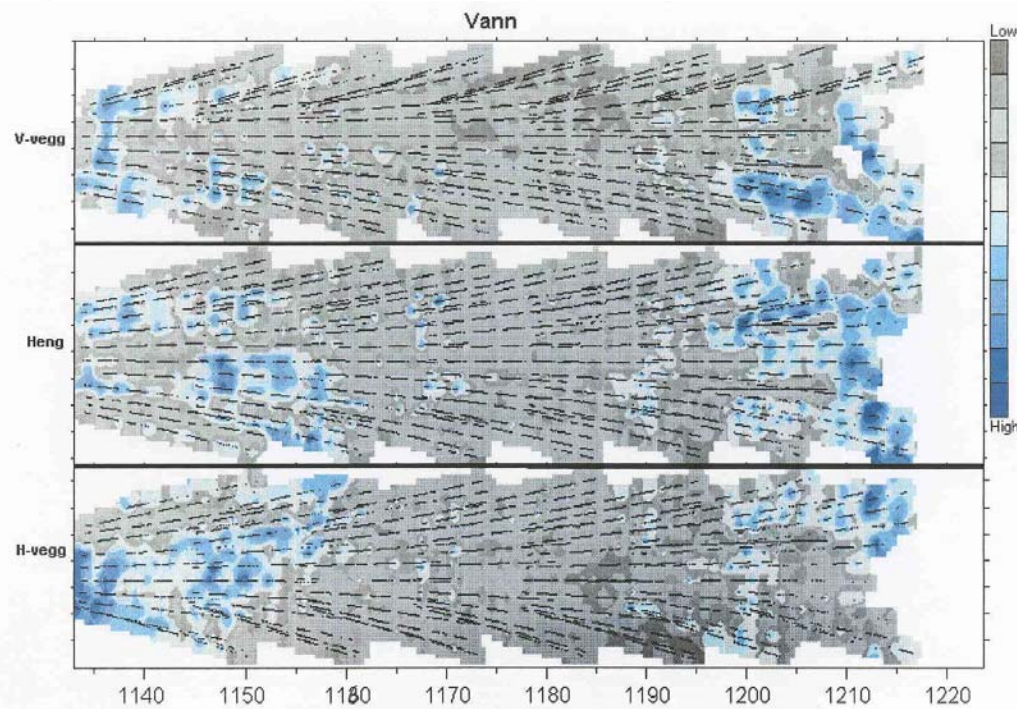
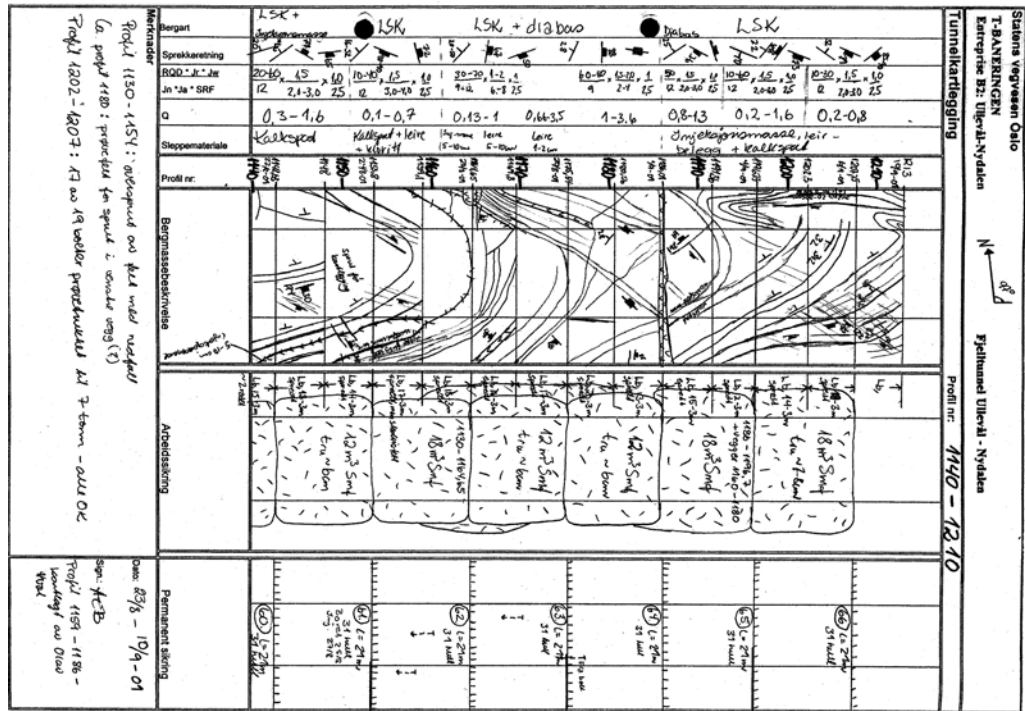
Vann

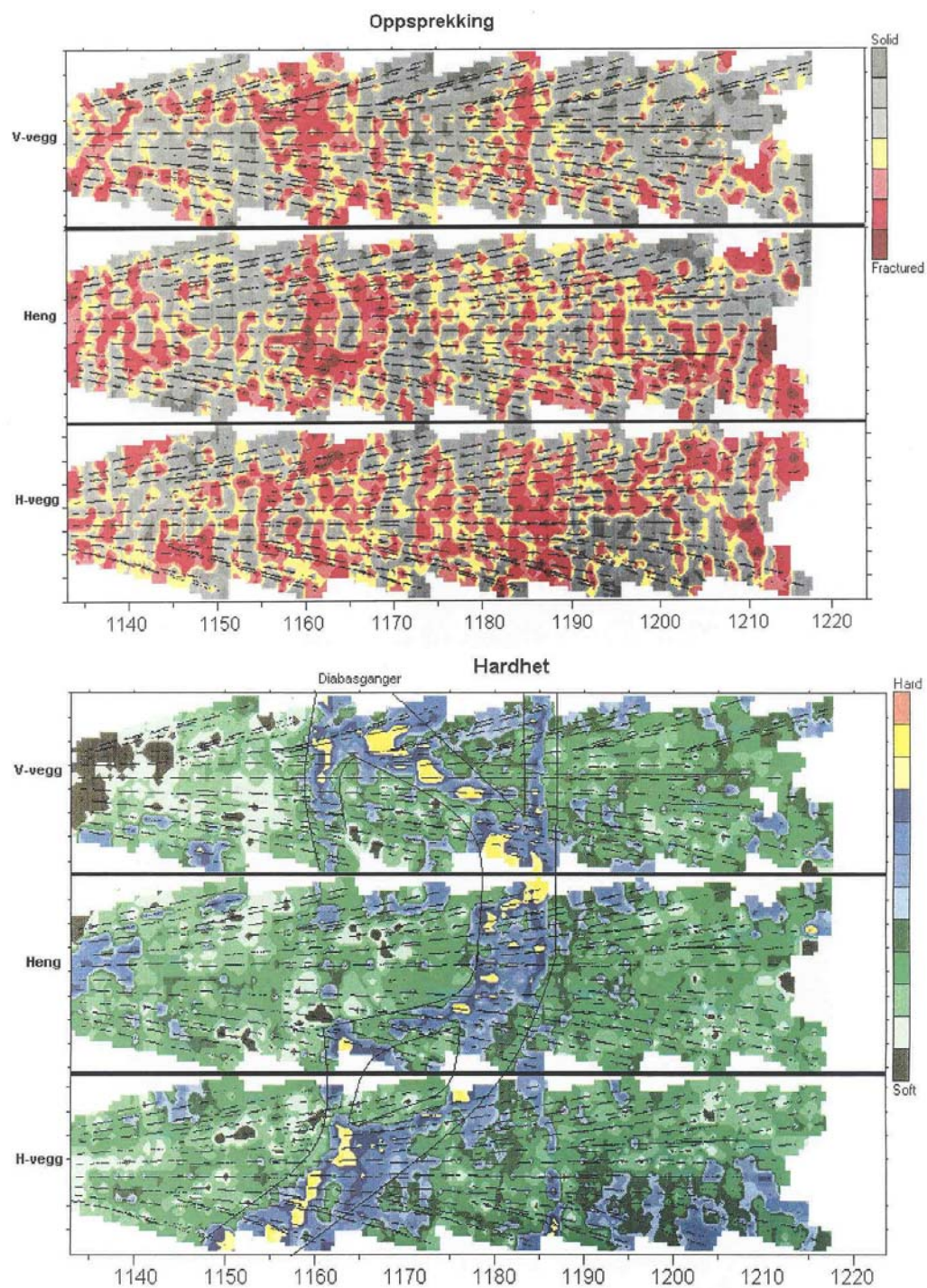






8.5.4 Eksempel 4 - P1130-1225





8.6 Konklusjoner

Variasjonen i bergmassekvalitet er ikke særlig stor i tunnelen. Trolig ville det vært lettere å tolke dataene dersom variasjonene hadde vært større. I ettertid finner man igjen for eksempel den ene markerte sonen ved P740, men det er ikke sikkert det ville vært like lett å tolke dette like sikkert i forkant, da utslagene i loggene ikke er veldig markerte.

For både vannforhold og oppsprekking er det ikke en tydelig/entydig sammenheng mellom de loggede dataene og det som er registrert på stuff. Det er dårligst korrelasjon for vannforhold. For logget oppsprekking ser det ut til å være mye ”støy” i dataene fra for eksempel stangbytte.

Det er god korrelasjon mellom logget hardhet og bergartene som er kartlagt på stuff.

Trolig ville tolkningen av dataene vært bedre/mer tydelig med et tettere loggeintervall enn 8 cm, for eksempel 2 cm, som foreslått av Rockma på anlegget.

Kontroll- og referanseside/ Review and reference page



Oppdragsgiver/Client Prosjektet Miljø- og samfunnstjenelige tunneler	Dokument nr/Document No. 20001042-5
Kontraksreferanse/ Contract reference Brev datert 2 mars 2001	Dato/Date 19 august 2003
Dokumenttittel/Document title T-bane Ullevål Stadion – Nydalen: forundersøkelser og injeksjon	Distribusjon/Distribution <input checked="" type="checkbox"/> Fri/Unlimited Begrenset/Limited <input type="checkbox"/> Ingen/None
Prosjektleder/Project Manager Vidar Kveldsvik Utarbeidet av/Prepared by Fredrik Løset, Vidar Kveldsvik	
Emneord/Keywords injection, leakage, Q-method	
Land, fylke/Country, County Oslo Kommune/Municipality Oslo Sted/Location Tåsen Kartblad/Map 1914 IV Oslo UTM-koordinater/UTM-coordinates 32VNM 970 490	Havområde/Offshore area Feltnavn/Field name Sted/Location Felt, blokknr./Field, Block No.

Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001							
Kon- trollert av/ Reviewed by	Kontrolltype/ Type of review	Dokument/Document		Revisjon 1/Revision 1		Revisjon 2/Revision 2	
		Kontrollert/Reviewed		Kontrollert/Reviewed		Kontrollert/Reviewed	
		Dato/Date	Sign.	Dato/Date	Sign.	Dato/Date	Sign.
VK	Helhetsvurdering/ General Evaluation *	2003.08.19					
	Språk/Style						
	Teknisk/Technical - Skjønn/Intelligence						
	- Total/Extensive						
	- Tverrfaglig/ Interdisciplinary						
	Utforming/Layout						
FL	Slutt/Final	2003.08.19					
	Kopiering/Copy quality						

* Gjennomlesning av hele rapporten og skjønnsmessig vurdering av innhold og presentasjonsform/
On the basis of an overall evaluation of the report, its technical content and form of presentation

Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release	Dato/Date 19 august 2003	Sign.
--	------------------------------------	--------------