

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Yhdyskuntatekniikka

Opinnäytetyö

Janne Isomäki

Esi-injektointikoe Nygårdstunnelissa – Silica Sol käytännön injektointityössä

Työn valvoja Reijo Rasmus
Työn teettäjä/ohjaaja Lemcon Infra Oy, Veli Taatila
Tampere 2007

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Janne Isomäki Esi-injektointikoe Nygårdstunnelissa – Silica Sol käytännön injektointityössä

Tutkintotyö 54 sivua + 5 liitettä

Työn valvoja Reijo Rasmus

Työn teettäjä/ohjaaja Lemcon Infra Oy, Veli Taatila

Kesäkuu 2007

Hakusanat Injektointi, esi-injektointi, kalliotilat, Silica Sol, kolloidisilika

TIIVISTELMÄ

Työ käsittelee kalliotilojen esi-injektointia. Työssä tutkittiin esi-injektointia Silica Sol -injektointiaineella ja verrattiin sitä sementti-injektointiin työmenetelmien, ajankäytön ja tuloksen näkökulmista.

Silica Sol on kvartsikivestä hienorakeiseksi jauhettua ainesta, joka nestemäisessä muodossaan reagoi yhdessä suolan kanssa, jolloin rakeet alkavat sitoutua keskenään. Sekä sementti-injektointia että Silica Sol -injektointia seurattiin Ruotsissa, Nygård-tunnelissa, jossa tehtiin havaintoja työmenetelmistä, häiriöistä, ajankäytöstä ja hävikeistä. Kirjallisuudesta on etsitty tietoa injektoinnin tarpeellisuudesta, tärkeydestä sekä injektointiaineista ja -kalustosta.

Opinnäytetyöstä selviää, ettei kokeen tapainen injektointimenetelmä ole sellaisenaan sopiva Lemcon Oy:lle. Injektointimenetelmää tehostamalla sekä kalustoa kehittämällä esi-injektointi Silica Solilla voisi olla käytännöllinen työmenetelmä.

TAMPERE POLYTECHNIC

Department of Construction Technology

Janne Isomäki

Pre-groutingtest in Nygård tunnel – Silica Sol in practical use

Final Thesis

54 pages, 5 appendices

Supervising Teacher

Mr Reijo Rasmus

Commissioner

Lemcon Infra Ltd.

Supervisor

Mr Veli Taatila

June 2007

Key words

Grouting, Pre-grouting, Rock cavern, Silica Sol, Colloidal silica

ABSTRACT

This final thesis deals with grouting of rock caverns. In this final thesis is examined pre-grouting by Silica Sol and compared that with grouting by cement viewpoint of method of work, time management and results.

Silica Sol is made from quartz rock, it is very fine-grained material. It is made to liquid and it reacts to the salt when grains start to bind with each other. Both cement grouting and grouting by Silica Sol were examined in Sweden, Nygård-tunnel, where is made observations of method of work, disturbances, time management and wastages. Information about need and importance of grouting, grout and facilities were studied from literature.

This final thesis reveals that method of work which is used in grouting test, isn't practical working method to Lemcon Ltd. By improving the working method of grouting and developing facilities, pre-grouting by Silica Sol could be practical method of work.

ALKUSANAT

Haluaisin kiittää seuraavia henkilöitä: työn ohjaajaa Veli Taatila, joka tarjosi aihetta minulle sekä antoi opinnäytetyön tekemiselle erinomaiset lähtökohdat, opinnäytetyön valvojaa Reijo Rasmusta, koko Lemcon Oy:n Torbacken-Hede-projektin henkilökuntaa sekä työhön vaikuttaneita henkilöitä Helsingin pääkonttorista. Lisäksi haluan kiittää avopuolisoa, sukulaisia, läheisiä ja ystäviä niin henkisestä kuin myös taloudellisesta tuesta koko opiskelujeni ajan.

Tampereella, kesäkuussa 2007

Janne Isomäki

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Taustaa.....	6
1.2	Tavoitteet.....	7
1.3	Menetelmät.....	7
2	TIIVISTYSTARVE JA INJEKTOINTI.....	7
2.1	Erilaiset vaatimukset.....	7
2.2	Injektointi.....	9
2.2.1	Injektointi, esi- ja jälki-injektointi.....	9
2.2.2	Esi-injektoinnin työmenetelmä.....	13
2.2.3	Injektoinnissa huomioitavaa.....	17
2.2.4	Injektointiaineet.....	18
2.2.5	Injektointikalusto.....	20
3	PROJEKTI TORBACKEN-HEDE.....	23
4	SEMENTTI-INJEKTOINTI PROJEKTISSA TORBACKEN-HEDE.....	25
4.1	Resurssit.....	25
4.2	Injektointiaineet.....	27
4.2.1	Käytettävät esi-injektointiaineet Nygård-tunnelissa.....	27
4.2.2	Injektering 30.....	27
4.2.3	Ultrafin 16.....	28
4.2.4	SetControl II.....	28
4.3	Työmenetelmä.....	29
4.4	Häiriöt.....	33
4.5	Kapasiteetit, menekit ja hävikit.....	34
5	SILICA SOL.....	37
6	INJEKTOINTIKOE SILICA SOLILLA NYGÅRD-TUNNELISSA.....	39
6.1	Resurssit.....	39
6.2	Injektointiaine.....	39
6.3	Työmenetelmä.....	39
6.4	Häiriöt.....	43
6.5	Kapasiteetit, menekit ja hävikit.....	43
7	TULOSTEN JA TYÖMENETELMIEN VERTAILU.....	45
8	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	51

LÄHTEET

LIITEET

- 1 Injektointi raportti (Logac)
- 2 Injektointi raportti (Logac)
- 3 Esi-injektointikokeen 1. viuhka, kestot
- 4 Esi-injektointikokeen 2. viuhka, kestot
- 5 Esi-injektointikokeen 3. viuhka, kestot

1 JOHDANTO

1.1 Taustaa

Tunnelin rakentamisessa toistuvat samat työvaiheet uudestaan ja uudestaan.

Työvaiheiden kiertokulkua voisi kuvailla seuraavasti: esi-injektointi, poraus, panostus, räjäytys, tuuletus, lastaus, kuljetus, rusnaus, poraus, panostus, räjäytys jne. Lisäksi on suoritettava mm. lujitus- ja jälki-injektointitöitä, mutta näitä vaiheita tehdään silloin, kun niistä on vähiten haittaa tunnelin ajolle tai mikäli se on työturvallisuuden takia välttämätöntä.

Esimerkiksi poraamisen ja panostamisen viemä aika on hyvin tiedossa, joten niiden hinnoittelu on tarkkaa. Esi-injektoinnin viemä aika on riippuvainen kallion ominaisuuksista ja työmenetelmästä. Tästä johtuen esi-injektoinnin hinnoittelu on vaikeaa ja sen sovittaminen työkiertoon niin, etteivät työkoneet olisi käyttämättöminä, on hankalaa.

Esi-injektointiin vaadittavia aikoja ja menekkejä voidaan arvioida suunnitteluvaiheessa tehtyjen esitutkimusten perusteella. Arvioiminen on kuitenkin hyvin epätarkkaa, todelliset menekit ja injektointiin vaadittava aika voivat poiketa suunnitelluista hyvinkin paljon. Kallio on usein epähomogeenista. Mineraalit, kalliolajit, suuntauneisuus, rakoilu, lustaisuus, rakotäytteet ja veden ilmeneminen kalliossa vaihtelevat, pahimmillaan jopa katkosta toiseen. Vasta tunnelin perästä tehdyistä vesimenekikokeista saadaan tarkempi arvio injektointimassan menekistä ja työvaiheeseen vaadittavasta ajasta.

Ruotsissa kalliorakennusprojekteissa urakkamuotona on usein yksikköhintaurakka. Tästä syystä injektointitöistä saattaa koitua urakoitsijalle tappiota, mikäli yksikkömäärien muutos on huomattava. Mikäli edellä mainittua riskiä ei olisi olemassa, saattaisivat injektoinnin yksikköhinnat olla pienempiä. Tällainen vähemmän riskejä sisältävä työvaihe olisi sekä tilaajan että urakoitsijan kannalta parempi.

1.2 Tavoitteet

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Silica Sol -nimisen injektointiaineen käyttöä ja verrataan sitä sementti-injektointiin työmenetelmien, ajankäytön ja tuloksen näkökulmista.

Ruotsissa suoritettujen esi-injektointikokeiden perusteella tässä opinnäytetyössä haetaan vastauksia mm. seuraaviin kysymyksiin:

- Miten Silica Sol eroaa nykyisestä sementti-injektoinnista?
- Mitä vaatimuksia Silica Sol asettaa kalustolle?
- Miten Silica Sol vaikuttaa resurssien käyttöön ja työn kestoön?
- Miten injektointiin käytettävä aika riippuu kallion ominaisuuksista?
- Vähentääkö Silica Sol vuotoja?
- Onko menetelmä sopiva, tehokas ja käytännöllinen tapa injektoida Lemcon Oy:n kalustolla ja resursseilla?

1.3 Menetelmät

Työmenetelminä on käytetty sekä kirjallisuus- että kenttätutkimusta. Alan kirjallisuudesta on haettu tietoa esi-injektoinnin tarpeellisuudesta, tärkeydestä, työvaiheesta, injektointiaineista sekä -kalustosta. Projekti, jossa esi-injektointikoe suoritetaan, on myös esitelty lyhyesti. Kenttätutkimuksissa olen paikan päällä Nygård-tunnelissa seurannut sekä sementti-injektoinnin että esi-injektointikokeen työmenetelmiä, niissä esiintyviä häiriöitä, niiden tuloksia sekä tehnyt niistä aikaseurantaa. Näiden lisäksi olen injektointiraporttien perusteella laajentanut aikaseurantaa sekä laskenut hävikkiprosentteja kummallekin työmenetelmälle.

Silica Solilla suoritettu esi-injektointimenetelmä on hankkeen tilaajan (Banverket) suunnittelema ja vain yksi mahdollinen toteutustapa kyseiselle injektointiaineelle.

2 TIIVISTYSTARVE JA INJEKTOINTI

2.1 Erilaiset vaatimukset

Kalliotiloille asetetaan sekä sisäisiä että ulkoisia tiiviysvaatimuksia. Sisäiset tiiviysvaatimukset määräytyvät tilan käyttötarkoituksen mukaan, jolloin ne rajoittavat

tilaan vuotavan veden määrää. Pohjavedestä ja kalliorakennuskohteen ympäristön vaatimuksista johtuvaa kalliotilan tiiviysvaatimusta kutsutaan kallion ulkoiseksi tiiviysvaatimukseksi. Tiiviysvaatimusten täyttämiseksi on erilaisia toimenpiteitä käytettävissä. Mikäli ympäristö sallii pohjaveden pinnan alenemisen, voidaan kuivanapitovaatimus täyttää rakenteellisilla ratkaisuilla esim. salaojituksella. Mikäli pohjaveden pinnan alenemista ei sallita, voidaan kuivanapitovaatimus täyttää sekä pohjaveden pinnan taso säilyttää injektoimalla kalliotilaa ympäröivä alue.

Pohjaveden alenemista aiheuttaville vuodoille ei voida antaa raja-arvoa, koska eri rakennuspaikoilla vallitsevat erilaiset geohydrologiset olosuhteet. Joissain kohteissa on todettu pohjaveden pinnan laskua, kun tunneliin vuotavan veden määrä on ollut n. 5–10 l/min/100 m. Esimerkiksi Oslon alueella on todettu, että tunneliin vuotavan veden määrän ollessa 1–2 l/min/100 m on pohjavedenpinta laskenut. Onkin hyvin vaikeaa antaa tarkkoja arvoja sallituille vuodoille niin, ettei pohjavedenpinta laske, koska olosuhteet ovat erilaiset eri paikoissa. Ympäristön vaatimukset ovat kiristyneet viime vuosina erityisesti kaupunkialueilla /2/.

Hankkeen tilaajalla on vaatimuksia kallion tiiveydelle. Tiiviysvaatimukset määritetään yleensä yksikkönä (l/min/100 m tai m^3/a) eli paljonko vettä saa vuotaa tilaan sen valmistuttua. Tiukimmat tiiviysvaatimukset on asetettu tie- ja rautatietunneleille sekä joillekin erikoistiloille, kuten telekeskuksille. Näiden tilojen ja tunneleiden vuotomäärinä voidaan sallia esimerkiksi 0,5–5 l/min/100 m. Toisaalta esimerkiksi jätevesitunneleille voidaan sallia suuriakin, jopa 80 l/min/100 m vuotoja.

Myös ympäristön näkökulmasta asetetaan tiiviysvaatimuksia kalliotiloille. Suurimman ympäristöstä aiheutuvan tiiviysvaatimuksen asettaa pohjavesi /7/. Mikäli pohjavedenpinnan tason alenemista ei ehkäistä, sen alenema saattaa aiheuttaa /3/

- maan pinnan ja rakenteiden painumista
- rakennusten puisten perustuspaalujen lahoamista
- kaivojen ja kasvillisuuden kuivumista.

Kalliotilaan vuotava vesi voi kallion stabiliteettia huuhtomalla rakotäytteitä.

Myös urakoitsijalla on omia tavoitteita, joilla se helpottaa omaa työtä sekä vähentää kustannuksia. Tällaisia ovat

- työtä haittaavien vuotojen estäminen sekä pumpattavan veden minimoiminen
- laitteistojen vahinkojen ja kulumisten minimoiminen kosteassa tunnelissa
- epäterveellisten tuotteiden haittavaikutusten minimoiminen.

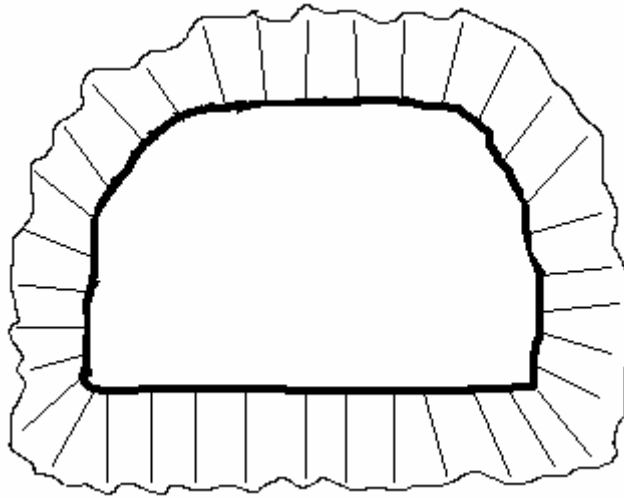
2.2 Injektointi

2.2.1 Injektointi, esi- ja jälki-injektointi

Kallion tiiviysvaatimuksia voidaan täyttää mm. injektoimalla kalliota.

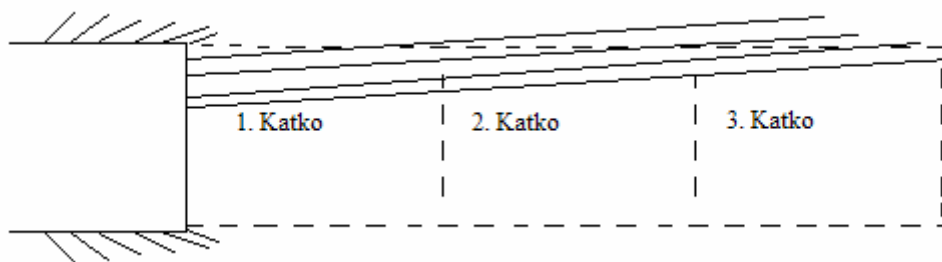
Kallioinjektioinnilla tarkoitetaan menetelmää, jossa täyteainetta, yleisimmin sementtilaastia, pumpataan paineen avulla kalliorakoihin ja kallion muihin avoimiin osiin. Sitä voidaan suorittaa joko esi- tai jälki-injektointina.

Esi-injektioinnilla tarkoitetaan ennen louhintaa suoritettavaa injektointia tunnelin perästä eteenpäin /5/. Esi-injektointi suoritetaan perään poratuista, tulevan tunneliprofiilin ulkopuolelle suunnatuista injektointirei'istä pohjavedenpaineen ylittävällä paineella (kuva 2). Esi-injektioinnilla tavoitellaan tiivistä tunneliprofiilin ulkopuolelle tulevaa suojakerrosta, joka estää veden pääsyn tunneliin (kuva 1). Suojakerroksen tulee ylittää niin paljon tunneliprofiilin ulkopuolelle, ettei mahdollisesti tuleva kalliopultitus riko tiivistettyä aluetta. Esi-injektointia voidaan käyttää systemaattisesti läpi koko tunneliprojektin tai vain tarvittaessa esim. heikkousvyöhykkeillä.



Kuva 1 Tunneliprofiilin ulkopuolella oleva suojakerros

Esi-injektointi on yleisin injektointimenetelmä tunnelityömailla /5/. Poratut injektointireiät ovat yleensä 15–30 m pituisia, jolloin ne ovat 3–5-kertaisia katkon pituuteen verrattuna (kuva 2). Esi-injektointi keskeyttää louhinnan, ja tärkeätä olisi saada tämän keskeytyksen pituus mahdollisimman lyhyeksi. Tämä on ongelma lähinnä työmailla, joilla samalla kalustolla louhitaan vain 1–3 perää. Mikäli tiedettäisiin, kauanko esi-injektointi vie aikaa, saataisiin työvaiheiden kiertoa suunniteltua paremmin eikä ylimääräisiä keskeytyksiä louhintaan välttämättä aiheutuisi. Esi-injektointiin kuluva aika riippuukin usein kallion ominaisuuksista.

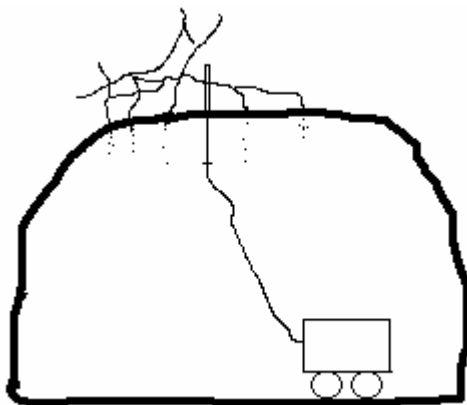


Kuva 2 Injektointireiät ovat yleensä 3–5-kertaisia katkon pituuteen verrattuna

Pienissä (n. 30 m^2) perissä esi-injektointi porauksineen vie yleensä n. 1 ½-2 työvuoroa. Isommissa perissä esi-injektointi porauksineen vie kaksi tai useampia työvuoroja. Esi-injektoinnin jälkeen alkaa tunnelin louhinta poraus-räjäytys-menetelmällä. Se voidaan aloittaa vasta injektointiaineelle määrätyn odotusajan jälkeen, jotta poravedet eivät huuho ainetta.

Jälki-injektoinnilla tarkoitetaan louhinnan jälkeistä injektointia. Jälki-injektointi ei häiritse louhintaa läheskään niin paljon kuin esi-injektointi. Muita esi- ja jälki-injektoinnin etuja ja haittoja on esitetty taulukossa 1. Jälki-injektoinnin tarkoituksena on siis esi-injektoinnin tapaan tiivistää kalliota. Siinä poratut reiät ovat n. 0,5-2 m:n luokkaa ja monesti tunnelin pultitus suoritetaan samalla kertaa /5/. Jälki-injektointi voi olla jopa 3–10 kertaa kalliimpaa kuin esi-injektointi, ja sitä usein pidetäänkin vuotoja korjaavana toimenpiteenä /2/.

Huonosti tehdyn tai tekemättä jätetyn esi-injektoinnin paikkaaminen jälki-injektoinnilla on aikaavievää, hankalaa ja kallista. Toisaalta jälki-injektointia voidaan tarvita vaikka esi-injektointi olisi onnistunut hyvinkin, sillä louhinnan aikana aukeaa uusia vuototeitä vedelle, jonka pääsy tunnelitilaan tulee estää. Aina ei ole edes tarve esi-injektoida tunnelin ulkopuolista kalliota. Esi-injektointi tekee louhinnasta kalliimpaa ja voi olla taloudellisempaa vain jälki-injektoida, mikäli tiiviysvaatimus on pieni eli tilaan vuotavan veden määrä voi olla suurikin. On kuitenkin hyvä muistaa, että jälki-injektointi on oleellisesti vaikeampaa kuin esi-injektointi. Jälki-injektoinnissa rakoja ja reittejä, joista massa ja paine voivat vuotaa tunneliin, on monin kerroin enemmän kuin esi-injektoinnissa (kuva 3). Jälki-injektoinnissa vesivuotojen kohdat, kallion rakoilut ja niiden suunnat ovat nähtävissä, joten sen suunnittelu on helpompaa. Vedellä on tosin taipumus löytää uusi reitti tunneliin edellisen reitin tukkeutuessa, joten jälki-injektointityössä on oltava kärsivällinen.



Kuva 3 Vedellä voi olla useita reittejä vuotaa tunneliin

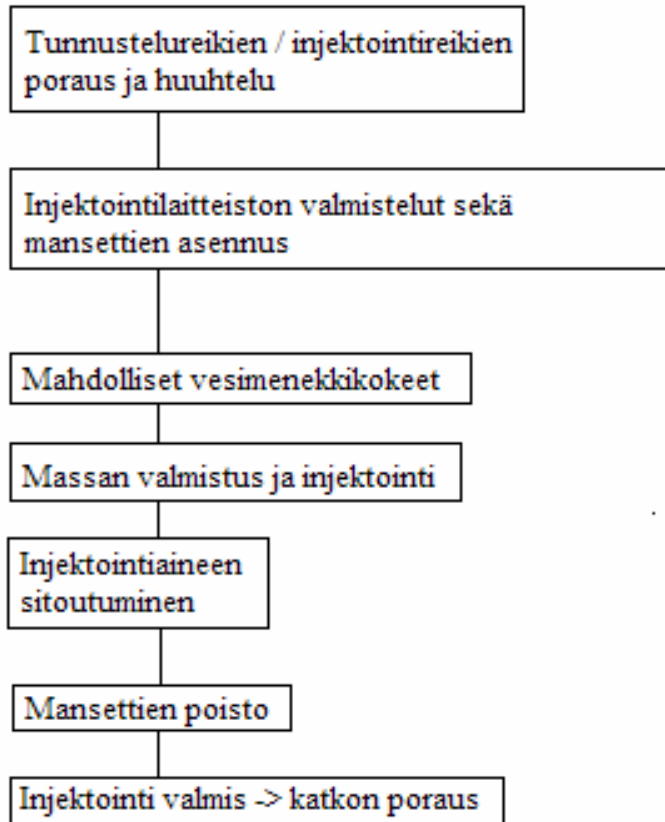
Maanalaisten tilojen rakentamisyhdistyksen raportissa Hard Rock Tunnel Grouting Practice in Finland, Sweden and Norway on kerätty kokemuksia ja näkemyksiä injektoinnista Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa. Jukka Repo on diplomityössään ”Injektoinnin tehostaminen tunneleissa” taulukoinut raportin pohjalta esi-injektoinnin ja jälki-injektoinnin teknisiä etuja ja haittoja.

Taulukko 1 Esi- ja jälki-injektoinnin tekniset edut ja haitat /5/

Esi-injektointi	Jälki-injektointi
<p>Edut:</p> <ul style="list-style-type: none">- Suoja suuria vesivuotoja vastaan louhinnan aikana- Pohjavedenpinnan laskua saadaan pienennettyä tai ehkäistyä kokonaan- Voidaan käyttää suuria injektointipaineita- Työturvallisuus kasvaa- Lujittaa kalliota tunnelin ympärillä- Kontrolloitu injektointiaineen kulkeutuminen- Helpompi tunnelin perän panostus	<p>Edut:</p> <ul style="list-style-type: none">- Ei häiritse louhintaa- Helpompi suunnitella, kun kallion pinta on näkyvissä- Injektointi voidaan rajoittaa vain alueisiin, joissa on vuotokohtia
<p>Haitat:</p> <ul style="list-style-type: none">- Louhinnan häirintä/keskeyttäminen- Räjähdyksestä aiheutunut tärinä ja kallion deformaatiot voivat aiheuttaa rakojen ja ruhjeiden avautumisen. Näin voi käydä laajamittaisissa tunneleissa määrättyissä jännitystiloissa.	<p>Haitat:</p> <ul style="list-style-type: none">- Tunnelin pohjan injektointi on ongelmallista- Injektointiaineen purkautuminen tunneliin- Vesi löytää toisen reitin tunneliin- Vaikea paikantaa vuotokohtia tunnelin pohjasta, joten on puhdistettava pohja- Pienet injektointipaineet

2.2.2 Esi-injektoinnin työmenetelmä

Esi-injektoinnin työvaiheita ja järjestystä on esitelty kuvassa 4.



Kuva 4 Esi-injektoinnin työvaiheet ja järjestys

Injektointityö aloitetaan yleensä **tunnusteluporauksella**. Porauksessa tehtävien tunnustelureikien määrä riippuu tiiveysluokasta ja poikkileikkauksen koosta. Tunnustelureikien pituutena voidaan käyttää injektointireikien pituutta, ja ne voidaan porata injektointikaavion mukaan niin, että niitä tarvittaessa voidaan käyttää myös injektointireikinä. Tavallisesti tunnustelureiässä tehdään joko tunneliin virtaavan vesimäärän mittaus tai vesimenekikoe. /3/ Vesimenekikokeessa tutkitaan Lugeonin kaavalla injektointitarvetta, jonka rajana on yleensä pidetty arvoja 0,3–1 Lug. Lug lasketaan kaavalla

$$Lug = \frac{Q}{LtP} \quad (1)$$

jossa Q = vesimäärä (l)

L = mittausalueen pituus porareissä (m)

t = mittausaika (min)

P = ylipaine (MPa).

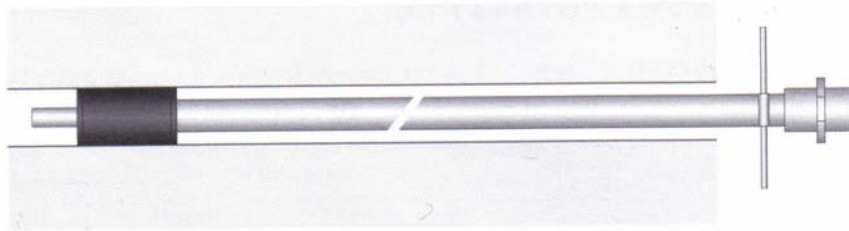
Mikäli poratusta reiästä vuotaa haittaava määrä vettä (esim. > 1 l/min/10 m), se tulisi heti sulkea mansetilla.

Tehtäessä systemaattista esi-injektointia tai kun tunnustelurei'istä tehtyjen kokeiden perusteella todetaan injektointitarve, ryhdytään poraamaan injektointireikiä.

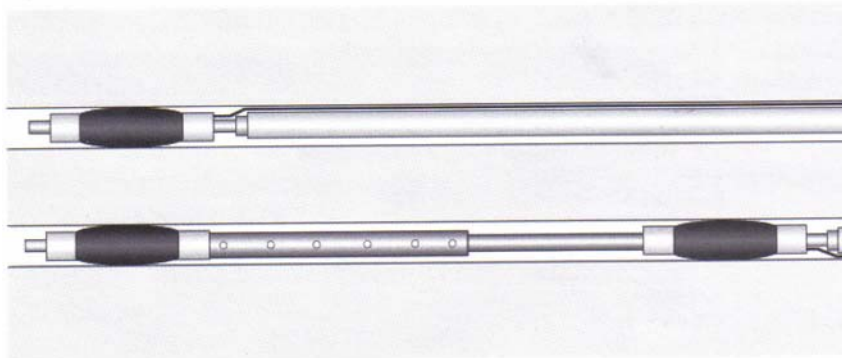
Porausreikien pituudet vaihtelevat 15–30 m välillä /3/. Reiät ovat siis yleensä 3–5 kertaa pidempiä kuin normaali katko, joka on tavallisesti 5–6 m. Reikien porauksen aikaiset havainnot merkitään porauslomakkeeseen /3/. Lomakkeeseen merkittäviä tietoja ovat mm. reiän numero ja pituus sekä porarin havaitsemat heikkousvyöhykkeet ja raot. Reiät tehdään yleensä porausjumbolla, reiän halkaisijan ollessa 50–65 mm /2/. Porauksen kesto riippuu pääosin reikien määrästä ja niiden pituuksista. Esimerkiksi 40 reikää sisältävässä viuhkassa itse poraamisen viemä aika on n. 8 h, yhden reiän pituuden ollessa 24 m. Työvaiheen kokonaiskesto on kuitenkin suurempi, koska aikaa vievät myös jatkotankojen asennus ja irrotus, porauspuomien siirtely, kruunujen vaihto sekä työnaikaiset huollot.

Reiät on porauksen jälkeen **huuhdeltava**. Normaalisti reiät huuhdellaan vedellä, mutta myös ilmahuuhtelu soveltuu tähän. Tosin ilmahuuhtelu sallitaan vain vaatimattomimmissa tiiveysluokissa. Huuhtelu tehdään porauksen yhteydessä esim seuraavalla tavalla. Reiän saavutettua suunnitellun pituuden vedetään porakalustoa taaksepäin ja annetaan reiän täytyä huuhteluvedellä. Reiän täytyttyä vedellä työnnetään porakalusto reikään, jolloin syntyy reikää huuhteleva virtaus. Tämä toistetaan n. 10 kertaa käyttäen vettä ja paineilmaa /3/. Ilmahuuhtelulla poratut reiät on huuhdeltava korkeapainevedellä tai vedellä ja paineilmalla porauksen jälkeen /3/. Huuhtelulla varmistetaan se, ettei injektointiviin reikiin ole jäänyt porasojaa tai kiven murusia /5/. Kun reiät ovat hyvin puhdistettuja, mansettien asennus hoituu helpommin ja injektointi onnistuu paremmin /5/.

Kaikkiin injektoitaviin reikiin asennetaan **mansetit** (kuvat 5 ja 6). Mansettien asennussyvyys on normaalisti 1,0–1,5 m. Joskus rako on niin suuntautunut, että injektointimassa vuotaa mansetista ohi avoimeen tilaan. Tällöin mansettia siirtelemällä etsitään tiivis kohta. Mansetit tulee kiristää riittävän tiukalle, jotta injektointipaine ei lennä sitä ulos reiästä. Mansettien kiristys onkin tarkistettava ennen injektointiletkun kiinnitystä. /3/



Kuva 5 Mekaaninen mansetti /3/



Kuva 6 Hydraulisia mansetteja /3/

Mansettien asennuksen jälkeen aloitetaan **injektointiaineen valmistus**. Tyypillinen sekoitusjärjestys on seuraava: /3/

- vesi lisätään sekoittajaan
- sementti lisätään sekoittajaan ja sekoitetaan 1 minuutti
- lisäaineet lisätään
- sekoitetaan 2–4 minuuttia
- siirretään maassa välähämmentimeen.

Joillakin materiaalinvalmistajista on edellisistä poikkeavia sekoitusohjeita, esim. lisäaineet annostellaan ennen sementtiä. /3/

Edellisellä kuvauksella tarkoitetaan sementtipohjaisten injektointiaineiden valmistusta. Kemialliset injektointiaineet reagoivat tavallisesti vasta, kun ne kohtaavat pohjavettä kallion raoissa tai kun ne yhdistetään reagoivaan komponenttiin /5/.

Injektoinnissa valmistettu massa pumpataan paineella mansettien läpi injektointireikiin. Suunnittelija määrittelee projektikohtaisesti, mistä ja miten injektoinnin tulee tapahtua. Joissain aloitetaan rei'istä, joissa on suurimmat vesimenekit, joissain aloitetaan katosta ja joissain puolestaan pohjasta. Tarvittaessa voimakkaasti vettä vuotavat reiät injektoidaan ensin /3/. Kalustosta riippuen myös useampaa kuin yhtä reikää voidaan injektoida samanaikaisesti. Edellytyksenä usein on, että reikäkohtaisesti voidaan mitata paine ja virtaus.

Lopetuskriteerin määrittää suunnittelija. Yleisin lopetuskriteeri perustuu suunnitellun injektointipaineen ja/tai massamenekin (l/porometri (pm) tai sementille kg/pm) saavuttamiseen /3/. Tyypillisiä vaihteluvälejä massamenekille on 5–40 l/pm. Nygård-tunnelissa seuraamissani esi-injektioinneissa viuhkojen kokonaismassamenekit olivat $x, x-xx, x \text{ m}^3$ luokkaa. Lopetuspainet olivat puolestaan $x, x-x, x \text{ MPa}$.

Injektointiaineen tulee antaa rauhassa **sitoutua**, jotta se olisi riittävän kestävä poraus-räjäytys menetelmän aloittamiselle. Injektointiaineen sitoutumisajat ovat huomattavasti pidempiä tunneliolosuhteissa kuin laboratorio-olosuhteissa. Tämä johtuu kallion ja siinä olevan pohjaveden lämpötilasta. Pohjaveden lämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan ja riippuen siitä, kuinka syvällä tunneli on. /5/ Yleensä poraus voidaan aloittaa 5–8 h kuluttua injektoinnin lopettamisesta.

Koko injektointiviuhka tulisi **injektoida yhtäjaksoisesti**. Injektointityötä ei saisi keskeyttää kesken reiän injektoinnin. Jos kuitenkin pakottavista syistä tähän joudutaan, on reikä huuhdottava tyhjäksi ja sen injektointia on jatkettava mahdollisimman pian. /3/

Yleensä **mansetit** voidaan **poistaa** 4–7 h kuluttua injektoinnin päättymisestä. Ennen mansetin irrottamista on sen venttiili avattava ja tarkistettava, että injektointimassa on ehtinyt riittävästi sitoutua, eikä se valu mansetin reiästä ulos. /3/

Jos työselitys edellyttää injektointireiän täyttämistä, se tehdään heti mansettien poiston jälkeen. Reikä huuhdotaan puhtaaksi ja täytetään joko jäykällä vesisementtiseoksella (v/s) 0,4 tai laastilla. Täyttöletku viedään reiän pohjalle ja sitä vedetään ulos sitä mukaa kun reikä täyttyy. /3/

2.2.3 Injektoinnissa huomioitavaa

Aikaa sekoituksen jälkeen on seurattava, jotta injektointimassan sitoutuminen ei ehdi alkaa ennen injektointia /3/. Uudenaikaiset injektointi- ja mikrosementit pitää käyttää nopeasti sekoituksen jälkeen. Massan teko, sekoitus ja lisäaineiden lisäämisen ajoitukset ovat tärkeässä roolissa /5/. Jos injektointimassa on alkanut jo sitoutua, on injektointilaitteisto tyhjennettävä ja huuhdeltava sekä injektoitavat porareitit huuhdeltava ennen injektoinnin jatkamista. Sekoitetulle massalle sallittava injektointiaika riippuu lämpötilasta, sementtityypistä ja vesi-sementtisuhteesta. Tyypillisiä aikoja ovat ½ h–1 h. /3/

Myös **injektointipainetta** tulee seurata. Nopea injektointipaineen nousu voi merkitä sitoutumisen alkamista. Hetkellinen paineen lasku voi olla puolestaan merkki injektointipaineen aiheuttamasta kallion vaurioitumisesta. Jos paineen laskuja alkaa esiintyä useammin, on painetta laskettava ja otettava yhteyttä suunnittelijaan. /3/ Injektointipaineen hyväksyttävästä suuruudesta onkin asiantuntijoiden kesken hieman ristiriitaa. Osa asiantuntijoista suosittelee matalampia paineita, koska suuret paineet saattavat rikkoa kalliota lisää ja vaarantaa työturvallisuutta. Osa puolestaan suosii korkeita paineita, koska tällä tavoin injektointiainetta saadaan tunkeutumaan paremmin rakoihin, jonka jälkeen tuloksena on kuivempi tunneli. Suomessa korkeimmat paineet joita on käytetty, ovat n. 3–4 MPa, mutta tyypillisesti paine on luokkaa 0,5–2 MPa. Norjassa on käytetty jopa 8–9 MPa:n paineita. /2/

Mansettien venttiilit on pidettävä auki, jotta mahdollinen reikien välinen yhteys huomataan. Poikkeustapaus ovat voimakkaat vesivuodot rei'istä, mikä voi vaatia mansettien pitämistä suljettuina. Näitäkin reikiä tulee avata jos epäilee niistä olevan yhteyksiä toisiin reikiin. Jos reikien välinen yhteys on olemassa, suljetaan injektointiainetta vuotavien reikien mansetit. Toisiinsa yhteydessä olevien reikien

injektointia jatketaan kierrättämällä injektointilettoa reikien välillä 20 min välein tai injektioimalle ne samanaikaisesti. Tällöin reseptin vaihdon/lopetuskriteerin massamäärät kerrotaan toisiinsa yhteydessä olevien reikien lukumäärällä. /3/

Jos **injektointimassaa vuotaa** tunneliin, voidaan vuotoa yrittää tukkia käyttämällä puukiiloja ja riepua yms. Jos vuotoa ei saada tukittua, on eräs keino käyttää kiihdytintä. Helpommissa tapauksissa riittää kiihdyttimen syöttö sekoittajaan mutta vaikeammissa tapauksissa on käytettävä erikoismansettia, jossa kiihdytin syötetään massan joukkoon erillisellä pumpulla. Kiihdytintä sekoittimeen tai välihämmentimeen lisättäessä on noudatettava aineen valmistajan ohjeita mm. sallituista injektointiajoista sekoituksen jälkeen. Syötettäessä kiihdytintä mansettiin on injektointimassan virtausnopeuden oltava riittävä, niin ettei kiihdytin aiheuta mansetin tukkeutumista. Kiihdyttimen syöttö on lopetettava riittävän ajoissa, jotta mansetissa oleva kiihdytetty injektointimassa voidaan pumpata reikään. Tämän jälkeen voidaan pitää tauko, jotta kiihdytin ehtii reagoita ja sulkea vuodot. /3/

2.2.4 Injektointiaineet

Injektointiaineet voidaan ryhmitellä monella tavalla. Eräs tapa ryhmitellä injektointiaineet on jakaa ne sementtipohjaisiin- ja kemiallisiin injektointiaineisiin.

Injektointiaineen valinnassa huomioidaan sekä kallion rakojen avauma että injektoinnin tekniset näkökulmat (mm. injektointipaine). Riittävän hienojakoisella sementin (esim. mikrosementit) ja veden seoksella voidaan tiivistää avaumaltaan $> 0,05$ mm:n kalliorakoja. Kemialliset injektointiaineet tunkeutuvat paremmin pienempiin rakoavaumiin, aina n. $0,01$ mm:iin asti. Suuria avaumia ja kallion tyhjätiloja voidaan täyttää myös esimerkiksi polyuretaanivaahdolla. Injektoinnissa käytettävien aineiden valinnassa pitää huomioida myös niiden myrkyttömyys. Aineiden pitää olla myrkyttömiä, eivätkä ne joutuessaan kallioperään tai pohjaveteen saa muodostaa myrkyllisiä yhdisteitä reagoitessaan ympäristön kanssa. Usein hankkeen tilaaja määrittelee tai hyväksyy käytettävät aineet tai vaihtoehtoisesti julkaisee listan kielletyistä aineista.

Sementtipohjaiset laastit ovat ylivoimaisesti käytetyimpiä injektointiaineita /6/. Syitä yleisyyteen ovat halvat hinnat, suhteellisen helppo käyttö, vaarattomuus ympäristölle

sekä pitkä kokemus niiden käytöstä. Sementtipohjaisista laasteista on olemassa paljon tietoa ja niiden pitkäaikaisvaikutukset ovat tiedossa /5/. Laastien ominaisuuksia, esimerkiksi sitoutumisaikaa ja tunkeutuvuutta, parannellaan usein erilaisilla lisäaineilla. Lisäaineista mainittakoon esim. bentoniitti ja kalsiumkloridi.

Injektointiin käytettävät sementit voidaan jakaa luokkiin niiden raekokojakauman perusteella (d_{95} -arvo, raekoko määritetty 95 % läpäisyn perusteella) (taulukko 2).

Taulukko 2 Sementtien jako luokkiin Kalliotilojen injektointi 2006:n mukaan

	$d_{95} \mu m$	mm
Yleisementit	< 128	0,128
Nopeasti kovettuvat sementit	< 64	0,064
Injektointisementit	< 30	0,03
Mikrosementit	< 20	0,02
Ultrahienotsementit	< 16	0,016

Suurimman raekoon valinta riippuu kalliorakojen avaumasta. Nyrkkisääntönä on, että d_{95} -arvon tulee olla enintään 1/3 rakoavaumasta /3/. Kustannusten pienentämiseksi on joissakin tapauksissa tarkoituksenmukaista korvata osa sementistä täyteaineilla. Yleensä sementtilaastilla, johon on lisätty jotakin täyteainetta, voidaan tukkia vain suurehkot raot. Täyteaineina voidaan käyttää esimerkiksi hiekkaa, kivipölyä, sahanpurua, lentotuhkaa ja masuunikuonaa. /6/ Sementtiä kuluu 10–100 kg/pm, usein käytetty määrä onkin 10 kg/pm. Nygård-tunnelissa seuraamissani esi-injektioinneissa viuhkojen kokonaismassamenekit olivat x,x–xx,x tonnin luokkaa. Tiukentuneet tiiviysvaatimukset ovat osaltaan vaikuttaneet siihen, että nykyisin yhä useammin käytetään hienompia sementtejä, kuten mikro- ja ultrahienojasementtejä /2/.

Kemiallisten injektointiaineiden tunkeutuvuus on erittäin hyvä, parhaimmillaan lähes veden luokkaa. Kemialliset injektointiaineet saattavatkin tulla kyseeseen silloin, kun tiiviysvaatimukset ovat erittäin suuret, pääsääntöisesti niitä käytetään jälki-injektoinnissa. Kemiallisilla aineilla voidaan sitoutumisaika saada hyvin lyhyeksi, jolloin ne sopivat myös mm. vaikeisiin jälki-injektointeihin tai tilanteisiin, jossa pohjaveden virtausnopeus

on suuri. Virheellisesti käytettynä kemiallisten injektointiaineiden haittavaikutukset ympäristölle voivat olla kohtalokkaat, joten kemiallisia injektointiaineita tulisi käyttää vain erityiskohteissa. /3/ Pohjoismaissa on muutamia kemiallisia injektointiaineita kielletty ympäristö- ja teknillisistä syistä. Jos päätetään käyttää kemiallisia injektointiaineita, tulee niiden mahdolliset ympäristövaikutukset selvittää. Kemiallisten injektointiaineiden käyttö on tosin kovassa kasvussa kaikista menneistä takaiskuista huolimatta.

Sementtipohjaisten ja kemiallisten injektointiaineiden hintoja on verrattava niiden tiheyden ja tilavuuden suhteen. Hinnaltaan kemialliset injektointiaineet ovat noin kolme kertaa kalliimpia kuin sementtipohjaiset injektointiaineet. Koska kemiallisten injektointiaineiden toiminnallisuus on niin hyvä, jälkityöt (jälki-injektointi ja salaojitus) vähenevät selkeästi ja injektointia pystytään nopeuttamaan. /5/ Joitain kemiallisia injektointiaineita voidaan käyttää yhdessä myös sementtipohjaisten injektointiaineiden kanssa. Esimerkkeinä kemiallisista aineista mainittakoon silikaatit, akrylaatit sekä polyuretaanit.

2.2.5 Injektointikalusto

Injektointikalusto voidaan koota yhteen, helposti liikuteltavaksi kokonaisuudeksi (kuvat 11 ja 12). Toinen, perinteisempi tapa on, että injektointilaitteet ovat yksittäisiä, erillään toisista olevia laitteita. Sementtipohjaisten ja kemiallisten injektointiaineiden kalustot saattavat olla samanlaisia, mutta esimerkiksi uretaani-injektoinnissa käytettävä kalusto poikkeaa sementti-injektoinnissa käytettävästä kalustosta paljonkin. Injektointikalustoa on esitetty kuvassa 8.

Vedenannostelijaa tarvitaan veden lisäämiseen sekoittimeen.

Injektoinnissa käytetään ns. kolloidittyyppisiä **sekoittimia**. Niiden tarkoituksena on sekoittaa injektointimassan ainesosat keskenään. Sekoitusnopeuden tulee olla vähintään 1500 rpm /3/. Eräät erittäin hienot sementit voivat tosin vaatia vielä suurempia (esim. 1750 rpm) sekoitusnopeuksia /3/. Sekoittimien standardikoot ovat 50, 100, 200 ja 400 l /6/.

Sekoittimesta injektointiaine siirretään **välihämmentimeen**, joka pitää massan tasalaatuisena. Välihämmentimen kokona pidetään yleensä yhtä hämmennintä käytettäessä kaksi kertaa sekoittimen tilavuus (100–800 l) ja kierrosnopeutena noin 60 rpm. Jos käytetään useampaa välihämennintä, koko voi olla pienempi. Jokaista pumppua kohden tulisi olla oma välihämennin. /3/

Kuvassa 7 on esitetty sementtisiilo, jonka alapuolella on sekoitin sekä vasemmalla puolella välihämennin.



Kuva 7 Sementtisiilo (alapuolella sekoitin) sekä välihämennin

Yleisesti on käytössä **pumppu**, joka tuottaa vähintään 10 MPa:n paineen. Painetta ja virtausnopeutta tulee olla säädettävissä. Virtausnopeudet ovat suurimmillaan muutamia kymmeniä litroja minuutissa. /3/ Maksimi raekoko pumpuille on yleensä 3–8 mm. /8/

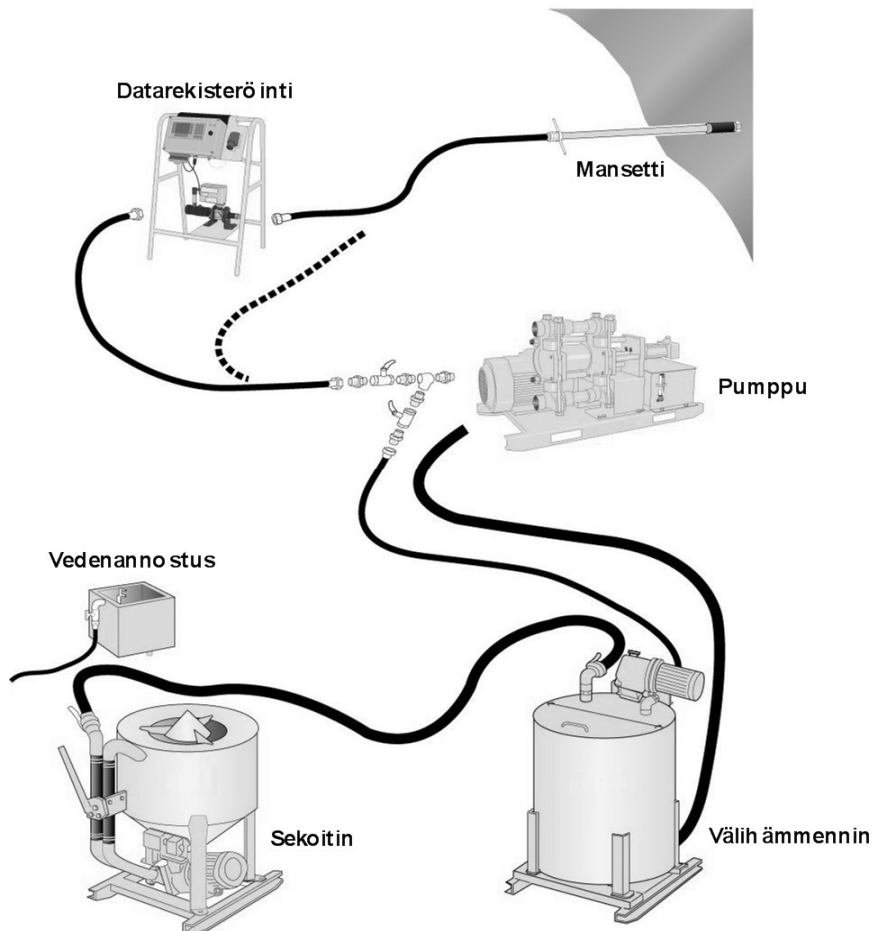
Datarekisteröintilaitteet, joita käytetään vaativimmissa tiiveysluokissa, tallentavat mm. seuraavia tietoja:

- tiedot rei'istä (numero, pituus)

- tiedot massasta (kokonaismäärä, massareseptin tunnus)
- injektointipaineet.

Injektointiaine siirretään **letkuja** pitkin välihämmennimestä **mansetteihin**. Letkujen ja liittimien tulee olla kunnossa ja niiden on kestävä injektointipaine.

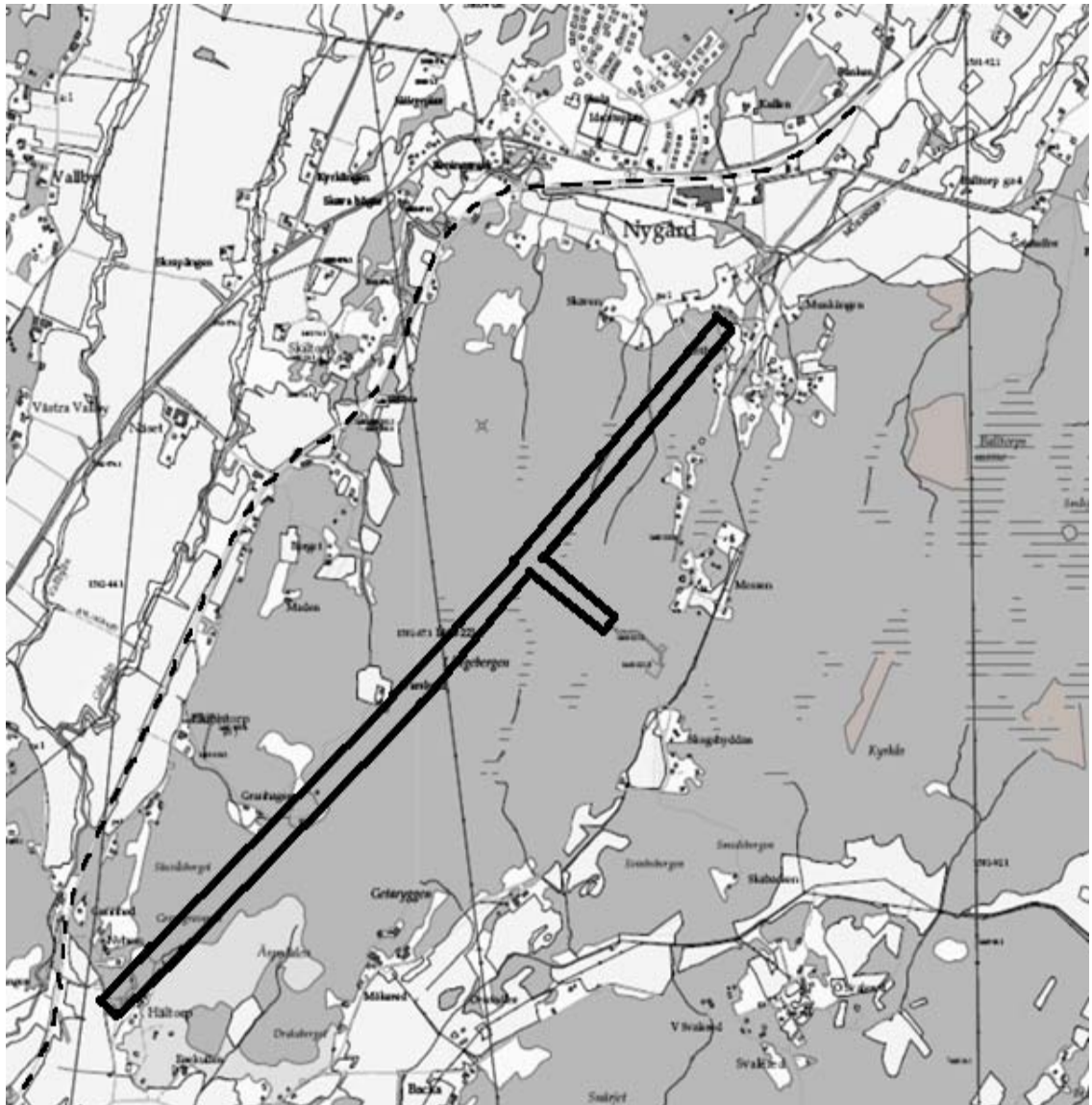
Mansetteja on erilaisia riippuen niiden toimintavasta. Mekaaniset mansetit kierretään käsin paikoilleen. Kierrettäessä mansettia, toisessa päässä oleva kuminen osa paisuu ja kiinnittyy reiässä kalliota vasten paikoilleen. Mekaanisia mansetteja pystytään käyttämään useita kertoja, ja tämän takia ne ovat yleisemmin käytössä kuin paineella asennettavat mansetit. Paineella asennettavat mansetit puristetaan reikään kiinni hydraulisesti. Injektoitaessa reikää pystytään viereisiä mansetteja avaamalla seuraamaan reiästä tulevan veden väriä. Kun veden väri muuttuu, tiedetään että injektointireikien välillä on yhteys. /5/ Kuvassa 5 on esitetty mekaaninen ja kuvassa 6 hydraulinen mansetti.



Kuva 8 Injektointikalusto /3/

3 PROJEKTI TORBACKEN-HEDE

Göteborgin ja Trollhättanin välille on rakenteilla kaksiraideparinen rautatie, jonka yksi osaprojekteista Torbacken-Hede on. Projektille rakennettava Nygård-rautatietunneli parantaa nykyisen radan linjausta (kuva 9).



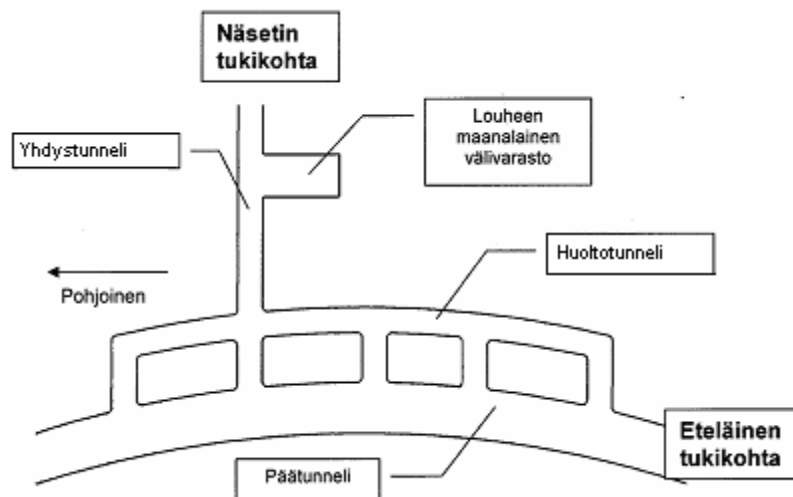
Kuva 9 Nykyisen rautatien linjaus sekä tulevan tunnelin sijainti

Rautatietunnelin pituus tulee olemaan 3 030 m. Kun projektiin kuuluu vieressä kulkeva huoltotunneli (1 970 m) ja ajo- ja yhdystunneli (520 m), tulee tunneliverkoston yhteispituudeksi 5 520 m (kuva 10). Torbacken-Hede-rataosuus on 7,5 km pitkä, eli projektiin kuuluu myös maanpäällistä rautatietä noin 4,5 km. Työt aloitettiin syyskuussa 2005 ja ne valmistuvat kesällä 2009. Tunnelin osalta työt käynnistyivät lokakuussa 2005.

Louhintatyöt valmistuvat kesäkuussa 2007 ja lujitus- ja sisustustyöt maaliskuussa 2008. Junaliikenne kulkee tunnelista joulukuun lopussa vuonna 2008. Kun urakka-aika loppuu 30.6.2009, kuluu loppuaika purku-, siivous- ja maisematöihin.

Tunnelista louhitaan kaiken kaikkiaan $490\,000\text{ m}^3$ kalliota, jonka pääasiallinen kivilaji on gneissi. Osa louhitusta kiviaineksesta käytetään murskauksen jälkeen projektissa väylien rakentamiseen. Päätunnelin poikkileikkaus on 125 m^2 , korkeus on n. 10,5 m ja leveys n. 13,6 m. Vieressä kulkeva huoltotunneli (37 m^2) on puolestaan n. 6 m korkea ja n. 5 m leveä.

Nygård-tunnelia tiivistetään systemaattisesti esi-injektoimalla. Yhden perän injektoimiseen kuluu aikaa noin vuorokausi, mukaan lukien porauksen, injektoinnin sekä injektointiaineen sitoutumismisajan. Esi-injektointireiät päätunnelissa ovat 24 m pituisia ja niitä on normaaliperässä kerrallaan 40 kappaletta. Pinta-alaltaan pienemmässä huoltotunnelissa reikiä on 22 kappaletta, pituuden ollessa pääsääntöisesti 24 m. Esi-injektoinnin jälkeen louhitaan kolme kappaletta noin kuuden metrin katkoja, jonka jälkeen vuorossa on jälleen esi-injektointi.



Kuva 10 Periaatekuva Torbacken-Hede projektin tunneliverkostosta (muokattu /1/)

4 SEMENTTI-INJEKTOINTI PROJEKTISSA TORBACKEN-HEDE

4.1 Resurssit

Nygård-tunnelissa käytetään injektoinnissa Scania-merkkisen kuorma-auton alustalle koottua laitteistoa (kuvat 11 ja 12). Tähän laitteistoon kuuluu sementtisiilot (2 kpl), sekoittimet (2), välihämmennimet (4), pumput (4) sekä datarekisteröintilaitteisto. Lisäksi ovat säiliötilat vedelle sekä lisääineille. Kyseinen kokoonpano onkin lähes uusi, Torbacken–Hede on sen ensimmäinen työkohde. Alustalle on kiinnitetty myös Hiab-merkkinen nosturi, jota käytetään nostokorin hallitsemiseen. Seuraavaksi on lueteltu tarkempia tietoja laitteistosta:

- sekoitin, Cemix 203 HWB, 200 l
- välihämmennin, Cemag 402H, 400 l
- pumppu, Pumpac 150 B, maksimipaine 55 bar
- rekisteröintilaitteisto, Logac 6L
- nosturi, Hiab 200C.

Laitteistolla on mahdollisuus injektoida kahdeksaa reikää samanaikaisesti.



Kuva 11 Nygård-tunnelissa käytettävä injektointiajoneuvo



Kuva 12 Nygård-tunnelissa käytettävä injektointiajoneuvo

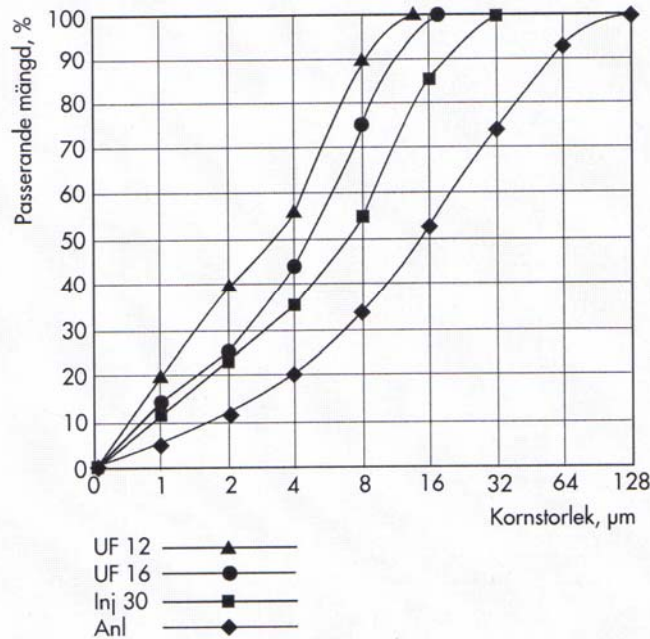
4.2 Injektointiaineet

4.2.1 Käytettävät esi-injektointiaineet Nygård-tunnelissa

Lemcon Oy käyttää Nygård-tunnelissa sementtinä pääsääntöisesti Cementan tuotetta nimeltä Injektering 30. Myös raekooltaan pienempää Ultrafin 16:tta on kokeiltu sekä käytetty esi-injektoinnissa, mutta sitä käytetään tosin enemmän jälki-injektoinnissa. Lisäaineena käytetään myös Cementan tuotetta nimeltä SetControl II. Seuraavissa kappaleissa esitellään käytössä olevat injektointiaineet.

4.2.2 Injektering 30

Injektering 30 (jatkossa Inj 30) on injektointisementtiä, jolla on erinomaiset tunkeutumisominaisuudet. Se soveltuukin hyvin vaativiin injektointeihin. Inj 30 on sulfaatin kestävää sekä matalaemäksistä injektointisementtiä. Tuotteella voidaan injektoida erinomaisilla virtaus- ja tunkeutumisominaisuuksilla, jopa pienillä vesi-sementtisuhteilla. Tuotetta valmistetaan Ruotsissa, Cementan Degerhamnin tehtaalla josta se toimitetaan suoraan työmaille. Inj 30:tä voidaan toimittaa pienissä 20 kg:n säkeissä, mutta mm. Torbacken-Hede-projektille sitä toimitetaan käytännöllisemmissä 1 000 kg:n suursäkeissä. Inj 30 on arempaa kuin normaali sementti, koska siitä on vähennetty kromaattia. Tämän vuoksi tuote menettää ajan myötä sitoutumiskykyä, eikä sitä tulisi säilöä 6 kk:ta pidempään. Tuotetta pitää luonnollisesti säilyttää kosteudelta eristyksissä. Inj 30 sitoutumisajan ohjearvona pidetään 100 min sekä ominaispinta-alana $1\,300\text{ m}^2 / \text{kg}$. Valmistaja lupaa, että materiaalin raekoosta 95 % on pienempää kuin $30\ \mu\text{m}$. Raekäyrä on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13 Raekäyrät Injektering 30 ja Ultrafin 16

4.2.3 Ultrafin 16

Ultrafin 16 on materiaaliltaan samaa kuin Injekterin 30, mutta se on hienorakeisempaa. Materiaalin raekoosta 95 % on pienempää kuin 16 µm. Raekäyrä on esitetty kuvassa 13. Ultrafin 16 sitoutumisaika on 70 min (ohjearvo) sekä ominaispinta-ala 1 600 m² / kg .

4.2.4 SetControl II

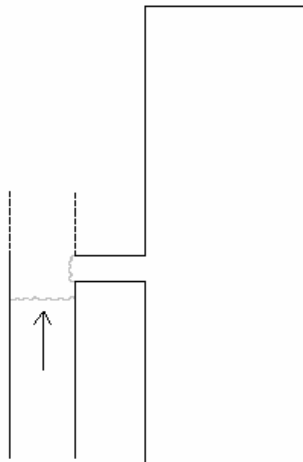
SetControl II on nestemäinen lisäaine, joka säätelee sitoutumisaikaa. Ensin se toimii notkistimena, mutta viimeistään noin 2 h kuluttua se alkaa toimia kiihdyttimenä. Väriykseltään SetControl II on kellertävän ruskeaa, ja se toimii hyvin yhdessä Injektering 30:n, Ultrafin 16:n sekä Ultrafin 12:n kanssa. Se toimii hyvin matalissa lämpötiloissa (>5 °C), jolloin se on myös tehokkaimmillaan. Lisäainetta ei tule käyttää yhdessä muiden lisäaineiden tai sementtien kanssa ilman perusteellisia tutkimuksia. Lisäaineen normaali annostus on 2,2 % sementin painosta jasuositeltu annostus 1,5–4,0 %. Aineen yliannostuksen tuloksena ei aina ole suhteellinen tehon lisäys. Mikäli yliannostus on suuri, saattavat aineen ominaisuudet muuttua epäedullisiksi. SetControl II voidaan lisätä injektointimassaan, kun kaikki muut ainekset ovat sekoittuneet keskenään,

tai vaihtoehtoisesti se voidaan lisätä jo sekoituksen alkuvaiheessa. Sitä toimitetaan 10 l kannuista aina 1 000 l säiliöihin.

4.3 Työmenetelmä

Olin seuraamassa Nygård-tunnelissa sementillä tehtyjä esi-injektioita viikkoina 6/2007 ja 7/2007. Tarkkailin kolmen eri viuhkan ja samalla kahden erikokoisen perän esi-injektointia. Kyseessä oli sekä päätunnelin (JVS/JVN) että huoltotunnelin (SS) esi-injektointi. Tunnelin koosta riippuen esi-injektointireikiä oli joko 24 tai 40 kappaletta.

Työ alkoi injektointilaitteiston siirtämisellä tunnelin perään, johon oli aiemmin porattu injektointireiät. Reikien pituus oli pääsääntöisesti 24 m, mutta huoltotunnelissa osa rei'istä oli 9 m pituisia. Lyhyemmät reiät osuivat risteysalueelle, josta tuli kulku rautatietunneliin (kuva 14).



Kuva 14 Injektointikohta

Kun tarvittavat liitännät (mm. sähkö, vesi, uppopumppu) oli suoritettu ja käynnistetty, aloitettiin mansettien asennus. Käytetyt mansetit (kuva 15) olivat mekaanisesti kiristettäviä, ja ne ovat käytettävissä myös muissa viuhkoissa puhdistamisen jälkeen.



Kuva 15 Esi-injektioinnissa käytettävät mansetit

Käytettävien mansettien pituus riippuu yleensä kallion laadusta sekä käytettävissä olevista manseteista. Nyt kun kallion laatu oli hyvää, käytettiin lyhyitä, n. 160 cm pitkiä mansetteja. Pidempiä mansetteja käytetään mm. heikossa kalliassa sekä tunnelin pohjaa tiivistävissä rei'issä. Mansetit on hyvä poistaa rei'istä kun injektioinnin lopettamisesta on kulunut aikaa n. x h. Tällöin mansetit lähtevät hyvin irti reiästä ja injektointiaine on sitoutunut riittävästi. Edellä esitetty aikaväli on vain ohjearvo, sillä esim. kyseisen projektin eräessä perässä mansetit olivat rei'issä noin xx h ja irtosivat hyvin vielä senkin jälkeen. Rakennusmiesten kokemusten perusteella, mansetit jäävätkin harvoin kiinni injektoituihin reikiin.

Samalla kun toinen rakennusmiehistä asensi nostokorin avulla mansetteja, toinen valmisteli laitteistoa injektointia varten. Hän lisäsi esimerkiksi sementtiä siiloihin ja teki tarvittavat liittännät.

Kuten jo aiemmin todettiin, kyseessä oli ns. kuivia periä eli tiiviitä ja vähän vettä vuotavia. Tämän johdosta, jokaiseen perään ei tehty **vesimenekkipokeita**, mikä oli sovittu hankkeen tilaajan kanssa. Mikäli vesimenekkipokeita suoritettiin, tehtiin ne normaaliin tapaan. Eli yksinkertaistettuna mansettien läpi painettiin 1,5 tai 2,0 MPa paineella vettä reikään. Paineita pidettiin yllä n. 2 min ajan, jonka jälkeen pumpatun veden määrä kirjattiin ylös vesimenekkipöytäkirjaan. Viuhkoissa suoritettut vesimenekit

olivat hyvin pieniä, suurin osa rei'istä oli 0-reikiä eli vesimenekikokeen tulos oli reiän tilavuus + ~ 0 l.

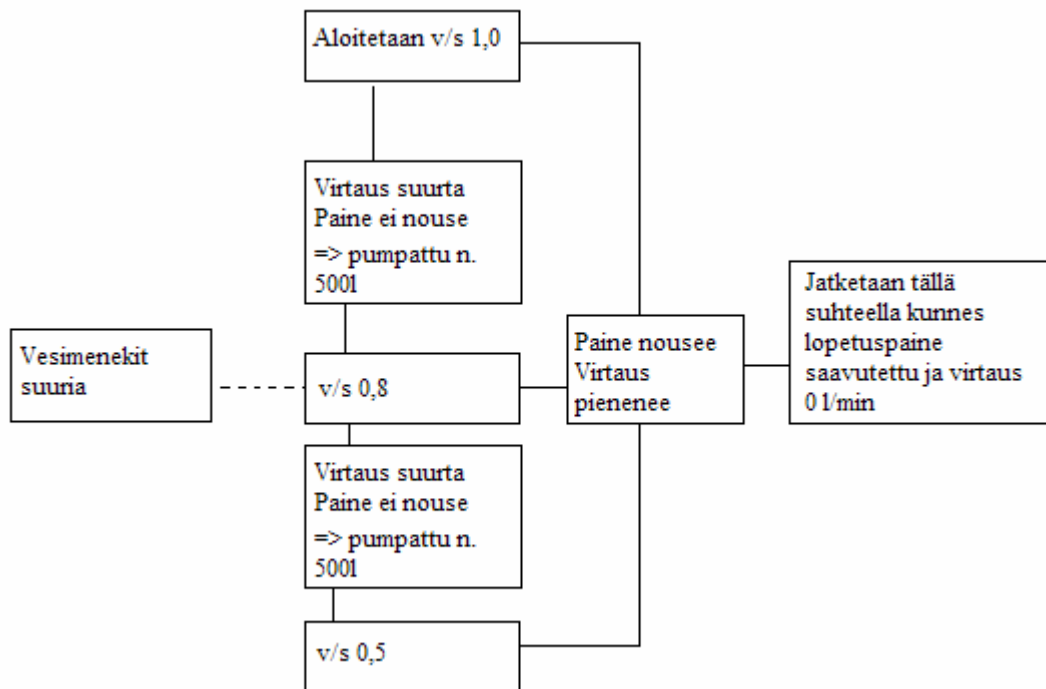
Kun vesimenekikokeet oli suoritettu, aloitettiin itse **injektointi**. Se aloitettiin jokaisessa viuhkassa reiästä, joka sijaitsi ylhäällä keskellä. Injektointia jatkettiin ylhäältä alaspäin, tunnelin vasempaa reunaa pitkin. Kun koko vasenreuna oli injektoitu, injektointia jatkettiin jälleen ylhäältä alaspäin, nyt perän oikealla olevaa reunaa pitkin. Kahta pumppua käytettäessä injektointia molempia puolia yhtäaikaaisesti. Muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta reikiin ei mennyt injektointiainetta enempää kuin sen tilavuuden (n. 70 l) verran. Tämä käy julki liitteistä 1 ja 2, jotka ovat tulosteita injektoinnista JVS 426+250-426+274. Tulosteet on tallennettu datarekisteröintilaitteella.

Kun ns. yläkätiset reiät saatiin injektointia, siirryttiin injektointiin ns. **alakätisiä** reikiä. Nämä reiät injektointiin hieman eri tavalla. Aluksi injektointiletkun päähän asennettu letku työnnettiin reiän pohjalle. Nyt injektointiainetta pumpattiin reikään, ja samalla kun reikä alkoi täyttyä, vedettiin letkua pois pohjasta. Kun reikä oli lähes täynnä, pysäytettiin injektointiaineen pumppaaminen hetkeksi, asennettiin mansetti reikään, kiristettiin ja injektointi jatkettiin loppuun paineen avulla. Tällä tavoin varmistetaan, ettei reikien pohjalle jää vedellä täytettyä tilaa niiden ollessa pienimenekkisiä tai ns. 0-reikiä.

Seuraamissani viuhkoissa oli paljon ns. **0-reikiä**. Nämä reiät täytetään vesi-sementtisuhteella (v/s) 0,8 ja painetaan aina paineella lisäksi. Yläkätiset 0-reiät painetaan 0,8-massalla ainoastaan mansetin läpi. Jos reiässä ei ole menekkiä vähintään puolta teoreettisesta, täytetään reikä letkulla alakätisten reikien tapaan. Paineen avulla varmistetaan, että jokainen reikä tulee injektoiduksi. Tunnelin tilaajan näkemys on, että kaikki sementti, mitä kallioon saadaan, tiivistää tunnelia. Käytetyt lopetuspainet olivat luokkaa x,x-x,x MPa.

Mikäli kallionlaatu olisi huonompaa ja täten myös vesimenekit suurempia, injektointi poikkeaisi hieman edellä esitetystä. Injektointi aloitettaisiin reiästä, jossa olisi suurin vesimenekki. Seuraavana olisi seuraavaksi suurimman vesimenekkituloksen omaava jne. Vesi-sementtisuhteena käytettäisiin aluksi 1,0. Mikäli virtaus olisi suurta eikä paine olisi noussut, kun massaa olisi pumpattu n. 500 l, vaihdettaisiin vesi-sementtisuhteeksi 0,8.

Myös tässä tapauksessa, mikäli virtaus on suurta eikä paine olisi noussut, vaihdettaisiin vesi-sementtisuhteeksi 0,5, kun massaa olisi pumpattu myös n. 500 l. Mutta mikäli virtaus pienenee ja paine nousee jollakin vesi-sementtisuhteella, pumpausta jatketaan, kunnes lopetuspainetta saavutetaan ja virtaus reikään on 0 l/min (kuva 16). Tilaajan luvalla sekä injektioijien ammattitaitoon luottaen soveltaminen on sallittua. Jos esimerkiksi vesimenekit ovat olleet suuria, voidaan suoraan aloittaa vesi-sementtisuhteesta 0,8.



Kuva 16 Injektoinnin kulku

Injektoinnissa **työskenteli** kaksi rakennusmiestä. Toinen vaihtoi letkua mansetista toiseen nostokorin avulla sekä toinen valmisteli massat, seurasi ja sääti injektointia (painetta ja menekkiä) sekä täytti injektointipöytäkirjat. Kuvasta 17 selviää injektointilaitteita hallitsevan rakennusmiehen työpistettä.



Kuva 17 Massan valmistus ja injektointipaineen sekä – menekin ohjauslaitteet

Kun reiät oli injektoitu, suoritettiin **loppuhuolto** eli tyhjennettiin ja puhdistettiin letkut, välihämmentimet sekä sekoittimet ja pestiin mm. nostokori.

Esi-injektoinnissa jokaisessa viuhkassa tehdään työmaalla **laatututkimuksia** injektointimassalle. Laatututkimuksia ovat viskositeetti-, tiheys-, tunkeuma- sekä ns. pudotuskoe, joita voidaan yleensä tehdä myös injektoinnin yhteydessä.

4.4 Häiriöt

Taulukossa 3 on esitelty esimerkinomaisesti sementti-injektointiin liittyviä häiriöitä, joita ilmeni kolmessa viuhkassa, joiden injektointia seurasin Nygård-tunnelissa viikoilla 6/2007 ja 7/2007.

Taulukko 3 Yleisimmät häiriöt seuraamissani viuhkoissa Nygård-tunnelissa

Keskeytys / Vika	Toimenpide	Kesto	Kpl/viuhka
Sementti vähissä	Sementin haku/lisääminen siiloihin	x – x min	xx – xx
Sementtitukos siilon alapäässä	Tukoksen purkaminen työvälineillä	x – x min	xx – xx
Automaatioventtiilivika -> ei vettä	Korjaus	n. x min	xx
Injektointihana vuotaa	Vaihto uuteen	x – x min	xx
Vesiliitin irtosi	Kiinnitys, kiristys	n. x min	xx
Mansetti siirtyi reiässä	Kiristys	xx s	xx – xx
Mansetti poistui reiästä	Kiristys uudelleen / pidempi mansetti	n. x min	xx – xx
Sähköhäiriö		n. x min	xx

Kaikki viat eivät kuitenkaan keskeyttäneet itse injektointia. Sähköhäiriön sattuessa ja kahdella letkulla injektoitaessa molempien reikien injektointi keskeytyi. Mansetin siirtyessä tai poistuessa keskeytys koski ainoastaan sitä reikää, jossa mansetti oli liikkunut. Samoin injektointihanan vuotaessa ainoastaan sen reiän injektointi keskeytyi, josta hana vuoti. Massan valmistus keskeytyi vesiliittimen irtoamisen, automaatioventtiili vian ja sementtitukoksen aikana. Sementin lisääminen siiloon ei välttämättä keskeyttänyt edes massan valmistusta, mutta mikäli sementtisäkkejä joutui hakemaan kauempaakin, injektointi keskeytyi. Taulukon 3 kaksi ensimmäistä keskeytystä ovat täysin riippuvaisia sementin menekistä. Mikäli injektointiainetta kuluu paljon, keskeytyksen toistuvuus nousee annetuista arvoista.

4.5 Kapasiteetit, menekit ja hävikit

Taulukkoon 4 on listattu viiden eri injektointiviuhkan tietoja. Taulukosta selviää injektoitu paaluväli, reikien lukumäärä, poratut metrit, kallioon pumpatun injektointiaineen litramäärä, pumpatun sementin kilomäärä, itse pumppauksen kesto sekä koko työvaiheen kesto. Tiedot ovat alueelta, jossa lähes kaikkien viuhkojen vesimenekit ovat pieniä. Esimerkiksi viuhkassa 2 x:n reikään meni n. xx l vettä muiden reikien tulosten ollessa xx l. Viuhkassa 5 xx reiän tulokset vaihtelivat xx–xx l:n välissä muiden tulosten ollessa xx l. Viuhkassa 4 n. xx reiän tulokset olivat xx l loppujen arvojen vaihdella xx–xx l välissä.

Taulukon 4 tiedot ovat peräisin injektointipöytäkirjoista sekä datarekisteröintilaitteiden tulosteista. Viuhkassa 5 reikiä on enemmän kuin muissa viuhkoissa, koska siinä tapahtui injektoinnin levitys huoltotunneliin päin. Kokonaiskesto voi olla ja usein onkin yhteenlaskettua pumppauksen kestoja lyhyempi, koska käytetään kahta pumppua

samanaikaisesti. Käyttäen kahta pumppua, pumppauksen viemä aika puolittuu.

Pumppauksen kesto on riippuvainen tietenkin myös massan menekistä.

Taulukko 4 Injektointiviuhkojen tietoja alueelta jossa vesimenekit ovat pieniä

	Paaluväli	Reikiä	Metrit	Massa (l)	Sementti (kg)	Pumppauksen kesto (huom. mahd. 2 pumppua)	Kokonaiskesto
1	436+215 – 239	40	960	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
2	232 – 256	40	960	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
3	250 – 274	40	960	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
4	267 – 291	40	960	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
5	285 - 309	49	1 176	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
ka.				xx	xx	xx h xx min	xx h xx min

Taulukkoon 5 on listattu eri viuhkojen tietoja alueelta, jossa vesimenekit ovat suurempia kuin taulukon 4 viuhkojen.

Taulukko 5 Injektointiviuhkojen tietoja alueelta jossa vesimenekit ovat suuria

	Paaluväli	Reikiä	Metrit	Massa (l)	Sementti (kg)	Pumppauksen kesto (huom. 2 pumppua)	Kokonaiskesto
1	435+335 – 311	44	1 056	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
2	318 – 294	44	1 056	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
3	300 – 276	42	1 008	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
4	284 – 260	40	960	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
5	265 – 241	40	960	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
6	248 – 224	39	936	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
7	231 – 206	40	960	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
8	213 – 189	40	960	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
9	197 – 173	40	960	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
10	178 – 154	40	960	xx	xx	-	xx h xx min
11	161 - 137	44	1 056	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
12	142 – 118	44	1 056	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
13	124 – 100	40	960	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
14	107 - 083	40	960	xx	xx	xx h xx min	xx h xx min
ka.				xx	xx	xx h xxmin	xx h xxmin

Pääsääntöisesti injektoinnin kesto on riippuvainen kallion ominaisuuksista (mm.

rakoilusta) sekä tähän liittyen myös injektointiaineen menekistä, mutta poikkeuksiakin

on. Esimerkiksi taulukossa 5, viuhkojen 8 ja 11 injektointien kestot ovat lähellä toisiaan,

vaikka viuhkaan 8 (lyhyempi kesto) on injektoitu lähes xxx l enemmän. Kokonaiskesto

riippuu mm. häiriöistä sekä injektoinnissa olevien pumppuletkuparien lukumäärästä.

Kokonaiskeston riippuvuus injektoinnissa käytettävien pumppuletkuparien lukumäärästä

ilmenee hyvin taulukosta 4, jossa viuhkassa 2 on käytetty ainoastaan yhtä

pumppuletkuparia. Normaalisti pumppuletkupareja on käytössä kaksi kappaletta.

Injektointien kokonaiskestot vaihtelivat edellä esitetyissä viuhkoissa vajaasta xx h:sta aina reiluun xx h:iin.

Taulukoissa 6 ja 7 on laskettu kapasiteetteja (min/reikä ja min/pm) sementti-injektoinnille. Kapasiteetit on laskettu kokonaiskestolla.

Taulukko 6 Esi-injektoinnin kapasiteetit taulukon 4 arvoilla

	Paaluväli	Min/reikä	Min/pm
1	436+215 – 239	xx	xx
2	232 – 256	xx	xx
3	250 – 274	xx	xx
4	267 – 291	xx	xx
5	285 - 309	xx	xx
ka.		xx	xx

Taulukko 7 Esi-injektoinnin kapasiteetit taulukon 5 arvoilla

	Paaluväli	Min/reikä	Min/pm
1	435+335 – 311	xx	xx
2	318 – 294	xx	xx
3	300 – 276	xx	xx
4	284 – 260	xx	xx
5	265 – 241	xx	xx
6	248 – 224	xx	xx
7	231 – 206	xx	xx
8	213 – 189	xx	xx
9	197 – 173	xx	xx
10	178 – 154	xx	xx
11	161 - 137	xx	xx
12	142 – 118	xx	xx
13	124 – 100	xx	xx
14	107 - 083	xx	xx
ka.		xx	xx

Taulukoista 4 ja 5 ilmenee myös injektointiaineiden menekkejä, jotka vaihtelevat sementin osalta xxx tonnista xxx tonniin.

Tärkeässä osassa tulevassa työmenetelmien vertailussa on myös injektointiaineiden hävikit. Hävikkiprosentiksi sementti-injektoinnille on saatu huhtikuun alun tietojen perusteella xxx %. Taulukossa 8 on esitetty, miten hävikkiprosentti on laskettu.

Taulukko 8 Sementti-injektioinnin hävikkiprosentin laskeminen

Tilattu 1 000 kg suursäkkejä	xxx kg
- varastossa	xxx kg
Käytetty	xxx kg
- laskutettu	xxx kg
=> hävikki	xxx kg
- jälki-injektointiin	xxx kg
=> hävikki	xxx kg = xxx %

Jälki-injektointiin on tilattu 20 kg sementtisäkkejä, mutta suuria 1 000 kg:n suursäkkejä on myös käytetty tähän tarkoitukseen. Itse injektointityössä hävikkiä syntyy vain pieniä määriä, suuret hävikit syntyvätkin suursäkkejä siirrettäessä. Trukin piikkeihin, seiiniin tai muihin koneisiin osuva suursäkki saattaa mennä hajalle eikä sementtiä voi sen jälkeen käyttää.

5 SILICA SOL

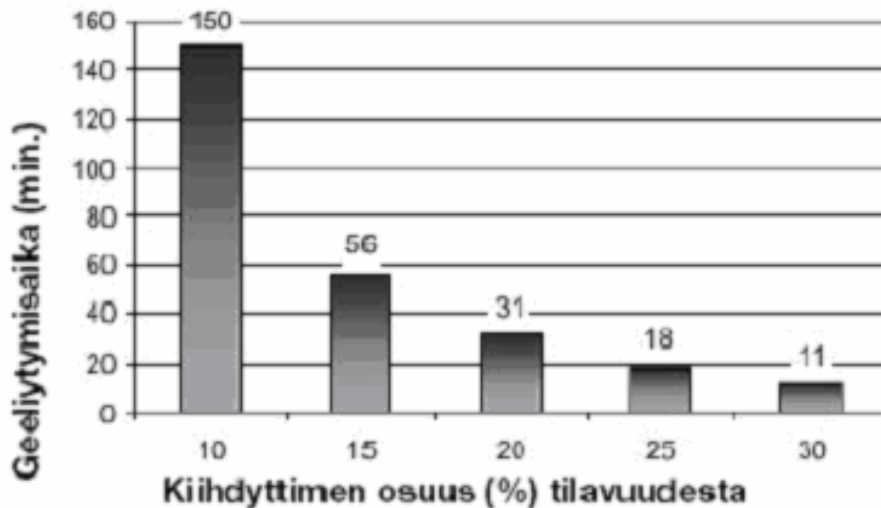
Silica Sol on ruotsinkielinen nimitys kolloidisilikalle. Nygård-tunnelissa suoritettavassa esi-injektointikokeessa käytetään kolloidisilikana Meyco MP 320 -merkkistä, väriltään maitomaisen valkoista tuotetta. Tuote on kvartsikivestä hienoksi jauhettua ainesta ja se on valmistettu nestemäiseen muotoon. Raekoot ovat nanometritason (10^{-9} m) suuruisia (Silica Sol 0,001 μm vrt. yleisementti 128 μm). Havainnollistaen raekoot ovat yhtä hienojakoisia kuin tupakansavu. Tuote on kehitetty erityisesti kallion pienten rakojen ja halkeamien injektointiin sekä hiekka- ja silttipitoisten maa-ainesten vesitiiviuden parantamiseen. Tuotetta voi siis soveltaa

- esi-injektointeihin tunneliprojekteissa
- nykyisten tunneleiden vesitiiviuden parantamiseen
- kaivoskohteissa tiivistämis- ja stabilointitarpeisiin
- kallioluiskien stabilointeihin
- maapohjan lujittamiseen.

Tuotteella on hyvin alhainen viskositeetti ja sen geeliytymisaikaa säädellään kiihdyttimen sopivalla annostuksella. Kiihdyttimenä toimii suola, veteen liuotettu natriumkloridi (NaCl). Tuotteella on laaja käyttölämpötila-alue, +5 - +40 °C, eikä se sisällä liuottimia tai myrkyllisiä yhdisteitä. Tuotteen käytössä voidaan soveltaa yleisesti käytettäviä sekoitus- ja pumppauskalustoja, joiden puhdistus suoritetaan vedellä.

Meyco MP 320 sekä haluttu määrä kiihdytintä (normaalisti 10–20 tilavuus-%) yhdistetään nestemäisinä keskenään ja sekoitetaan huolellisesti ennen pumppausta. Sekoitettu massa pumpataan sementti-injektointiin yleisesti käytetyllä 1-komponenttipumppukalustolla sekä kohteeseen soveltuvia letku- ja putkikalustoja sekä mansetteja käyttäen.

Geelitymisaikaa säädellään kiihdyttimen annostuksella. Tällä tavoin voidaan rajoittaa aineen leviämistä ”liian pitkälle”. Geelitymisaika voidaan sovittaa 10 min ja 2,5 h välille. Kuvasta 18 selviää miten paljon (tilavuus-%) kiihdytintä tarvitaan tavoiteltuun geelitymisaikaan, johon vaikuttaa kiihdyttimen ohella myös lämpötila.



Kuva 18 Kiihdyttimen annostuksen vaikutus geelitymisaikaan (+8°C).

Meyco MP 320 on saatavissa sekä 210 l:n (273 kg) tynnyreissä että 1 000 l:n (1 300kg) konteissa. Kiihdytintä saa pienemmissä 25 l:n (26,75kg) astioissa, 210 l:n (224,7 kg) tynnyreissä sekä 1000 l:n (1070 kg) säiliöissä.

Tuotetta on kokeilu erilaisissa kohteissa ympäri maailmaa, mm. Irlannissa ja Ruotsissa. Irlannissa tuotetta käytettiin vahvistamaan hienoja hiekka- ja silttimaita kaivoskuilun ympäriltä. Göta-tunnelissa, Göteborgissa, tuotetta käytettiin esi-injektointiin erittäin vaativien vaatimusten johdosta.

Koska tuote on ollut markkinoilla vain muutaman vuoden, ei ole takuita sen pitkäaikaiskestävyydestä. Ruotissa tunnelin suunnitteluikä/käyttöikä on 100 vuotta,

jolloin myös injektointiaineelta vaaditaan pitkäaikaiskestävyyttä. Tuote reagoi myös kohdatessaan sementin. Reagointi sementin kanssa on nopeaa sekä haitallista. Mikäli reagointi tapahtuu injektointilaitteistossa, se aiheuttaa tukoksia. Reagoimisen johdosta on tehtävä huolelliset pesut sekoittimiin ja pumppuihin, kun materiaalin käyttö lopetetaan tai injektointiaine vaihtuu sementistä kolloidisilikaan tai päinvastoin.

6 INJEKTOINTIKOE SILICA SOLILLA NYGÅRD-TUNNELISSA

6.1 Resurssit

Nygård-tunnelissa suoritettussa esi-injektointikokeessa käytettiin kalustona samaa injektointilaitteistoa kuin kyseisen projektin sementti-injektoinnissa (kts. luku 4.1).

Esi-injektointikokeessa työryhmänä toimi kolme rakennusmiestä. Koska kyseessä on koe ja on arveltu, että menetelmässä on hieman enemmän työtä kuin sementti-injektoinnissa, on työntekijöiden lukumäärää nostettu. Yksi rakennusmiehistä toimi injektointilaitteiden kanssa, eli hallitsi injektointia sekä täytti injektointipöytäkirjat. Toinen rakennusmiehistä toimi nostokorissa siirtämässä letkuja manseteista toisiin mansetteihin ja tarvittaessa auttoi mm. massan valmistuksessa. Kolmas rakennusmies valmisteli massoja sekä pesi välähämmennimet ja letkun jokaisen yksittäisen reiän injektoinnin jälkeen.

6.2 Injektointiaine

Esi-injektointikokeessa käytettiin injektointiaineena Meyco MP 320 -merkkistä kolloidisilikaan sekä tähän soveltuvaa kiihdytintä. Meyco MP 320 on esitelty tarkemmin luvussa 5. Injektointisementtinä kokeessa käytettiin Injektering 30 sekä siihen soveltuvaa lisäainetta SetControll II, jotka on esitelty luvussa 4.2.

6.3 Työmenetelmä

Esi-injektointikoe tapahtui Nygård-tunnelissa, paaluvälillä 436+723–436+633, joten injektoidun alueen kokonaispituudeksi tuli n. 90 m. Opinnäytetyöhön on otettu otannaksi kolme ensimmäistä viuhkaa. Kokeessa injektointiin viisi viuhkaa rautatietunnelissa alkaen

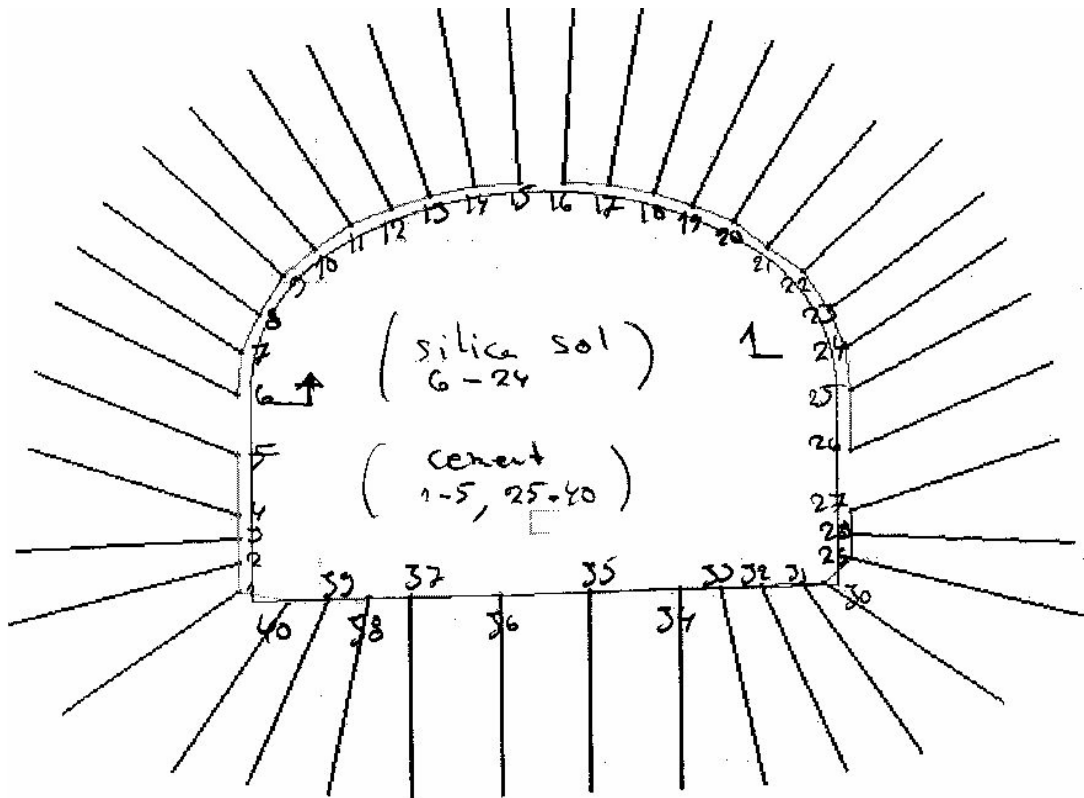
paaluväliltä 436+723-436+699. Esi-injektointireikiä yhdessä viuhkassa oli 40 kappaletta, ja ne olivat 24 m pituisia. Reiät olivat suunnattu täysin samanlaisesti tunneliprofiilin ulkopuolelle kuin sementti-injektoinnissa olleet reiät.

Esi-injektointireikien valmistuttua siirrettiin injektointilaitteisto tunnelin perään. Kun tarvittavat liitännät oli suoritettu, aloitettiin mansettien asennus. Mansetit olivat periaatteeltaan samanlaisia kuin sementti-injektoinnissa käytetyt mansetit. Mansettien asennuksen jälkeen tehtiin vesimenekikokeet jokaiseen reikään. Myös vesimenekikokeet suoritettiin samalla tavalla kuin sementti-injektoinnissa suoritettut vesimenekikokeet.

Kun vesimenekikokeet oli saatu suoritettua, aloitettiin injektointi. Kokeessa oli päätetty että ns. alakätiset reiät (kuva 19, reiät 1–5, 25–40) injektoidaan sementillä ja loput kolloidisilikalla. Sementillä injektoitavia reikiä oli pääsääntöisesti viuhkassa 19–21 kpl, loput (19–21 kpl) injektointiin siis kolloidisilikalla. Alakätisten reikien injektointi tapahtui samalla tavalla kuin täysin sementillä injektoidun viuhkan vastaavat reiät (luku 4.3).

Injektointi kolloidisilikalla tapahtui seuraavalla tavalla. Injektointimassa valmistettiin puhdistettuun välähämmentimeen, jonne aluksi lisättiin sähköpumpulla Meyco MP 320 1 000 l:n säiliöstä. Säiliö, josta kolloidisilika pumpattiin, oli sijoitettu injektointilaitteiston viereen tunnelin pohjalle. Kiihdytintä pumpattiin sähköpumpulla muoviasioihin merkittyyn kohtaan asti, joista se kaadettiin käsin välähämmentimeen ja sekoitus aloitettiin. Jokaisesta valmistetusta annoksesta suoritettiin kuppikoe, eli muoviseen kertakäyttökuppiin otettiin välähämmentimestä sekoitettua injektointiainetta. Kuppiin merkittiin ajankohta jolloin aineet olivat sekoitettu keskenään. Seuraamalla aineen sitoutumista saatiin selville geelytymisaika, joka merkittiin injektointipöytäkirjaan. Geelytymisaikana pidetään ajankohtaa, jolloin injektointiaine pysyy kupissa sitä käännettäessä ympäri. Saadut geelytymisajat olivat xx ja xx min välissä ensimmäisessä viuhkassa. Jälkimmäisissä viuhkoissa, joissa tavoiteltiin geelytymisajaksi xx min, ajat vakiintuivat xx ja xx min välille. Valmistettujen massojen määrät vaihtelivat ensimmäisessä viuhkassa xxx l:sta aina xxx l:aan. Myöhemmissä viuhkoissa valmistettut massamäärät vakiintuivat joko xxx l:aan tai xxx l:aan. Kiihdyttimenä toimineen suolan osuus vaihteli xxx %– xxx % välillä.

Injektointi aloitettiin ensimmäisessä viuhkassa reiästä numero 7 ja jatkettiin yhtä pumppuletkuparia käyttäen vuorotellen vasenta ja oikeaa reunaa pitkin kohti tunnelin huippua. Kahdella pumppuletkuparilla injektointiaessa, toinen pumpuista injektioi vasenta ja toinen oikeaa reunaa alhaalta ylöspäin.

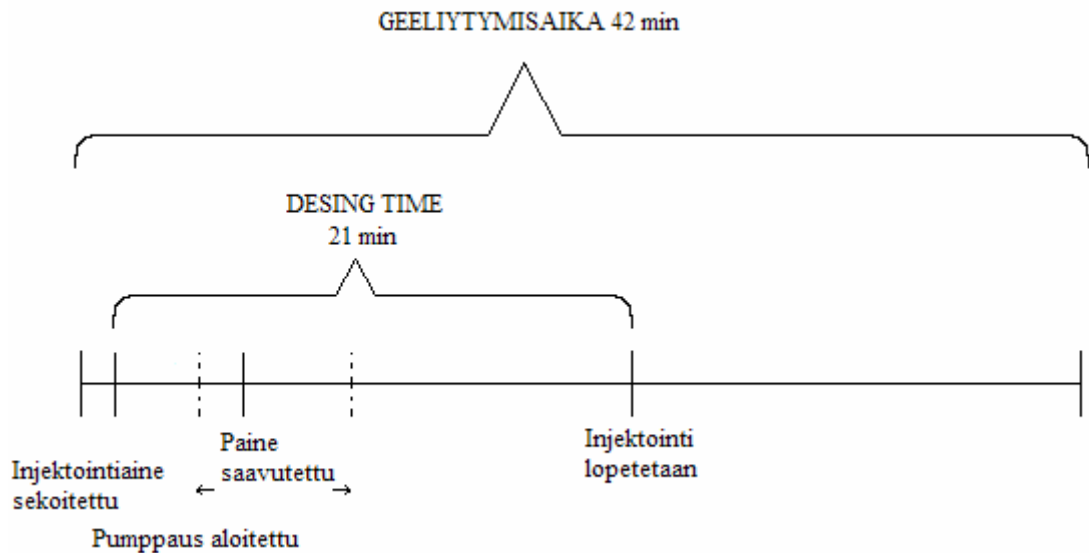


Kuva 19 Paaluvälillä 436+708 - 436+684 eri rei'issä käytetyt injektointiaineet

Rakennusmiehen todettua, että pesussa letkuihin jäänyt vesi oli poistunut injektointiaineen edestä, aloitettiin reiän injektointi. Injektoinnissa tavoiteltiin xxx MPa:n painetasoa. Tavoiteltu painetaso saavutettiin usein xxx minuutin kuluessa injektoinnin alkaessa. Kun tavoiteltu painetaso oli saavutettu, merkittiin tämä ajankohta pöytäkirjaan. Pöytäkirjaan merkittiin myös sekoituksen sekä ”design timen” ajankohdat, sekoitussuhde, geeliytymisaika, reikään pumpatun injektointiaineen määrä sekä injektointipaine.

Injektointikokeen työohjeissa oli määritetty ”design time”, joka vastasi kestoa pumppauksen aloittamisesta siihen, kun injektointi lopetettiin ko. reiässä (kuva 20). ”Design time” oli työohjeen mukaan 21 min geeliytymisajan ollessa 42 min. Kun suunniteltu pumppausaika oli saavutettu, pumpattiin ylimääräiset aineet letkun kautta

tunnelin pohjalle. Pumppauksen jälkeen tehtiin huolelliset pesut sekä välihämmmentimelle että letkuille. Pesu tuli suorittaa huolellisesti, jotta ainetta ei jäisi laitteisiin, kovettuisi ja tällä tavoin estäisi tai häiritsisi injektointia.



Kuva 20 Injektoinnin vaiheiden jakautuminen geelitymisajan ollessa 42 min.

Injektoinnin lopetuskriteereinä toimi kaksi kohtaa. Mikäli pumpattu ainemäärä saavutti 400 l, injektointi ko. reiässä tuli lopettaa. Toisena lopetuskriteerinä toimi ”design time” tavoiteltu kesto.

Injektoinnin tuli käynnistyä mahdollisimman pian aineiden sekoituksen jälkeen. Mikäli sekoituksen alusta oli kulunut 5 min, eikä injektointi ollut vielä alkanut, piti ohjeiden mukaan valmistettu injektointimassa poistaa laitteistosta sekä pestä laitteisto tämän jälkeen.

Kun kaikki reiät olivat injektoidu sekä aine oli riittävästi sitoutunut (edellä mainittu geelitymisajan maksimiarvo xx min), voitiin aloittaa seuraava työvaihe jossa tehtiin xx kappaletta kontrollireikiä. Kontrollirei’istä, joiden pituus oli työohjeen mukaisesti xx m, sijaitsi xx kappaletta tunnelin katossa ja loput xx kappaletta tunnelin pohjassa. Kontrollireikiin tehtiin vesimenekikokeet, joiden tulosten perusteella päätettiin injektoidaanko reiät uudelleen. Mikäli yksikin kokeessa saavutettu vesimenekki ylitti xx–xx l rajan, injektointiin kaikki reiät uudelleen. Kahdessa esi-injektoinnissa suoritettussa

viuhkassa jouduttiin suorittamaan kontrollireikien injektointia. Kontrollireikien injektoinnin jälkeen perä oli valmis katkon porausta varten.

6.4 Häiriöt

Seurasin kokeessa ensimmäisen viuhkan injektointia, jolloin ei ilmennyt varsinaisia häiriöitä. Häiriöinä voimme kuitenkin pitää välihämmmentimien ja letkujen pesua, koska ne keskeyttivät toisella pumpulla injektoinnin. Lisäksi massan valmistus keskeytti injektoinnin, koska sen aikana ei voitu injektoida kuin vain toisella pumpulla. Taulukosta 9 selviää kolloidisilika-injektointiin liittyviä häiriöitä, kestoja ja niiden yleisyyttä.

Taulukko 9 Yleisimmät häiriöt esi-injektointikokeessa

Keskeytyks / Vika	Toimenpide	Kesto	Kpl/viuhka
Injektointi loppui reiässä	Pesu	xx – xx min	n. xx
Massa loppu	Massan valmistus	xx – xx min	n. xx

Myöskään jälkimmäisissä injektoinneissa ei rakennusmiesten mukaan tapahtunut muita kuin edellä mainittuja häiriöitä.

6.5 Kapasiteetit, menekit ja hävikit

Taulukkoon 10 on listattu esi-injektointikokeessa suoritettujen viuhkojen tietoja. Taulukosta selviää injektoitu paaluväli, työmenetelmä, reikien lukumäärä, reikien injektoinnin kesto sekä koko työvaiheen kesto.

Taulukko 10 Esi-injektointikokeessa suoritettujen injektointiviuhkojen tietoja

Paaluväli	Menetelmä	Reikiä	Injektoinnin kesto	Kokonaiskesto
436+723 – 699	Silica Sol	xx	xx h xx min	xx h xx min
	Sementti	xx	xx h xx min	xx h xx min
	Yht.	xx	xx h xx min	xx h xx min
Kontrollireiät	Silica Sol	xx	xx h xx min	xx h xx min
	Sementti	xx	xx min	xx min
	Yht.	xx	xx h xx min	xx h xx min
436+708 – 684	Silica Sol	xx	xx h xx min	xx h xx min
	Sementti	xx	xx h xx min	xx h xx min
	Yht.	xx	xx h xx min	xx h xx min
Kontrollireiät	Silica Sol	xx	xx h xx min	xx h xx min
	Sementti	xx	xx min	xx min
	Yht.	xx	xx h xx min	xx h xx min
436+693 - 669	Silica Sol	xx	xx h xx min	xx h xx min
	Sementti	xx	xx h xx min	xx h xx min
	Yht.	xx	xx h xx min	xx h xx min
Kontrollireiät	Sementti	xx	xx h xx min	xx h xx min
	Yht.	xx	xx h xx min	xx h xx min

Paaluvälin 436+723 – 436+699 kolloidisilikan kokonaiskesto ei ole vertailukelpoinen muiden kolloidisilikakestojen, kanssa koska kyseessä oli ensimmäinen koeviuhka, jolloin haettiin vielä sopivia suhteita ja työtapoja sekä injektointia aluksi ainoastaan yhdellä pumppuletkuparilla.

Taulukossa 11 on laskettu esi-injektoinnin kestojen keskiarvot ilman kontrollireikien injektointia, jotta kestoja voitaisiin verrata sementti-injektoinnin kestoihin. Laskuissa ei ole huomioitu ensimmäisen viuhkan kesto.

Taulukko 11 Esi-injektoinnin kestojen keskiarvot ilman kontrollireikien aikoja

Työmenetelmä	Injektoinnin kesto	Kokonaiskesto
Silica Sol + sementti (40 reikää) ka.	xx h xx min	xx h xx min

Taulukossa 12 on laskettu kapasiteettiarvoja (min/reikä ja min/pm) esi-injektointikokeessa suoritetuille injektioinneille. Kapasiteettiarvot on laskettu kokonaiskestolla. Kapasiteettiarvojen laskussa ei ole huomioitu ensimmäisen viuhkan injektointia.

Taulukko 12 Esi-injektointikokeen kapasiteettiarvoja

Paaluväli	min/reikä	min/pm
436+708 – 684	xxx	xxx
436+693 – 669	xxx	xxx
ka.	xxx	xxx

Taulukossa 13 on esitetty eri viuhkojen hävikkiprosentit, jotka on laskettu injektointipöytäkirjojen tietojen perusteella.

Taulukko 13 Kolloidisilikan hukkaprosentit

Paaluväli	Valmistettu massamäärä (l)	Käytetty massamäärä (l)	Hukkaprosentti
436+723 – 699	xxx	xxx	xxx %
Kontrollireiät	xxx	xxx	xxx %
436+708 – 684	xxx	xxx	xxx %
Kontrollireiät	xxx	xxx	xxx %
436+693 - 669	xxx	xxx	xxx %
Kontrollireiät	- (sementillä)	- (sementillä)	-
Yhteensä	xxx	xxx	xxx %

Korkeat hävikkiprosentit johtuvat aineen lyhyestä sitoutumisajasta, jonka johdosta yhteen reikään valmistettua massaa ei voida hyödyntää toisessa reiässä.

7 TULOSTEN JA TYÖMENETELMIEN VERTAILU

Tässä luvussa verrataan vaiheittain sementti-injektoinnin sekä esi-injektointikokeen menetelmiä.

Sekä sementti-injektioinnissa että esi-injektointikokeessa injektointireikiä oli 40 kappaletta, reikien pituuden ollessa 24 m. Lisäksi reiät olivat suunnattu täysin samalla lailla molemmissa menetelmissä. **Porauksen** näkökulmasta ei ole merkitystä tehdäänkö esi-injektointi sementti- vai kolloidisilika injektointina.

Molemmissa menetelmissä käytettiin työvälineenä samaa injektointikalustoa. Joten myös **kaluston** osalta työmenetelmien välille ei tule eroa. Käytettäessä kolloidisilika injektointia, kalustolle ei ole mitään erikoisvaatimuksia verrattuna sementti-injektioinnissa käytettävään kalustoon. Siis kaikenlainen kalusto, jota pystytään käyttämään sementti-injektointiin, soveltuu myös kolloidisilika injektointiin edellä mainitulla tavalla (luku 6.3). Tosin hävikkiprosentti laskisi huomattavasti, jos injektointikalustoa voisi kehittää nykyisestään (luku 9).

Ennen kuin voitiin aloittaa vesimenekikokeet sekä esi-injektointi, täytyi tehdä **valmistelevia töitä**. Reikien lukumäärä (mansettien toimitus), injektointikalusto (asennukset) sekä vesimenekikokeiden suoritustapa (kts. alla) olivat molemmissa menetelmissä samanlaiset, joten eroa ei näissä syntynyt. Ainoa asia, joissa valmistelevien töiden määrä erosi toisistaan, oli injektointiaineiden toimitus injektoitavaan perään. Koska esi-injektointikokeessa käytettiin sekä sementtiä että kolloidisilikaa injektointiaineena, täytyi molempien aineiden saanti varmistaa. Tämän vuoksi piti molempia aineita varata tunnelin perän läheisyyteen, mikä tuotti hieman lisätyötä.

Vesimenekikokeet suoritettiin molemmissa työmenetelmissä täysin identtisesti. Koska reikiä määrä sekä pituus olivat molemmissa tapauksissa yhtäläiset, myös vesimenekikokeiden osalta ei eroa synny työmenetelmien välille.

Sementti-injektointia käytettäessä **rakennusmiesten lukumäärä** oli kaksi, kun taas esi-injektointikokeessa käytettiin kolmea rakennusmiestä. Lisäksi esi-injektointikokeessa rakennusmiesten työmäärä oli suurempi joita aiheuttavat ”ylimääräiset” pesut jokaisen reiän injektioinnin jälkeen sekä massan valmistus manuaalisesti. Rakennusmiesten lukumäärää ja työmäärää verrattaessa, etu on perinteisellä injektioinnilla.

Kuten jo aiemmin on tullut esille, **työmenetelmissä** on huomattavia eroja. Perinteisessä työmenetelmässä käytetään ainoastaan yhtä kun taas esi-injektointikokeessa käytettiin kahta injektointiainetta. Kun käytetään kahta eri injektointiainetta, aiheuttaa se laitteiston **lisäpesua**, kun siirrytään esim. sementistä kolloidisilikaan. Laitteet ja tarvikkeet tulee pestä huolellisesti, jotta aineet eivät sitoutuisi niihin ja aiheuttaisi tällä tavoin ongelmia. Lisäksi lisäpesua tuottaa kolloidisilikan lyhyt sitoutumisaika, yhteen reikään valmistettua massaa ei voida käyttää toisessa reiässä, koska aine alkaa sitoutua lyhyen (~ xx–xx min) ajan kuluttua sen sekoituttua kiihdyttimen kanssa. Aiemmin on todettu, että viuhkoissa on usein injektoitu xx reikää kolloidisilikalla. Yhden pesun kestäessä n. xx min saadaan ylimääräisten pesujen kokonaiskestoksi yhdessä viuhkassa n. xx h xx min. Verratessa tätä ylimääräisten pesujen kokonaiskestoa perinteiseen sementti-injektointiin, jossa pesuja ei tarvitse suorittaa jokaisen yksittäisen reiän injektoinnin jälkeen, ero on huomattava.

Massan valmistus onnistuu perinteisessä sementti-injektoinnissa automaattisesti, kunhan rakennusmies vain määrittää vesi-sementtisuhteen sekä ohjaa massan mm. sekoittimesta välähämmentimeen. Massaa voidaan valmistaa tarpeen tullen ja se voidaan sekoittaa jo välähämmentimessä olevan massan kanssa. Kolloidisilikaa käytettäessä välähämmentin täytyy ensin tyhjentää ja pestä edellisestä massasta ennen, kuin uutta annosta voidaan alkaa valmistamaan sinne. Liitteestä 3, joka on koottu kokeessa suoritetusta ensimmäisestä esi-injektointiviuhkasta, sekä myöhemmin työntekijöiden raporttien perusteella, voidaan todeta massan valmistuksen keston olevan n. xx min. Aiemmin on todettu, että viuhkoissa on usein injektoitu 20 reikää kolloidisilikalla. Tästä laskemalla massojen valmistusten kokonaiskestoksi viuhkassa saadaan n. xx h. Ero on huomattava verratessa tätä massojen valmistusten kokonaiskestoa perinteiseen sementti-injektointiin, jossa massa voidaan valmistaa automaattisesti sekä lisätä jo välähämmentimessä olevaan annokseen.

Vertailtaessa saatuja **kapasiteetteja** (taulukko 14), huomataan pari asiaa. Esi-injektointikokeessa ei päästä sementti-injektointia pienempiin kestoihin (/reikä, /pm). Tosin esi-injektointikokeen kapasiteettien hajonta on pieni (taulukko 12). Tosin otantakin on hyvin pieni, kaksi viuhkaa. Injektointien kapasiteetit on laskettu taulukoissa 6, 7 ja 12.

Taulukko 14 Kapasiteettien vertailu

	min/reikä	min/pm
Sementti-injektointi, vesimenekit pieniä	xx	xx
Sementti-injektointi, vesimenekit suuria	xx	xx
Esi-injektointikoe	xx	xx

Vertaillaan seuraavaksi kahta perää, joissa vesimenekit ovat lähellä toisiaan. Valitaan vertailuun sementillä injektoiduksi peräksi paaluväli 436+285 – 436+309, jossa vesimenekit olivat taulukon 15 mukaiset.

Taulukko 15 Paaluvälin 436+285 – 436+309 vesimenekit

Vesimenekki (l)	Reikien lukumäärä (kpl)
0	xx
1–4	xx
Yht.	xx

Valitaan esi-injektointikokeessa suoritetuista viuhkoista vertailuun paaluväli 436+693 – 436+669 (koeviuhka nro 3), jossa vesimenekit olivat taulukon 16 mukaiset.

Taulukko 16 Paaluvälin 436+693 – 436+669 vesimenekit

Vesimenekit (l)	Reikien lukumäärä (kpl)
0	xx
1–4	xx
8–15	xx
20–40	xx
Yht.	xx

Esi-injektointikokeen vesimenekit ovat hieman suuremmat kuin sementti-injektoidun viuhkan vesimenekit. Valitut viuhkat ovat keskenään kuitenkin vertailukelpoisimmat. Sementti-injektoinnilla viuhkan injektointi kesti n. xx h xx min. Esi-injektointikokeessa injektointi pelkästään kolloidisilikan osalta kesti n. xx h. Lisäksi ns. alakätiset reiät

injektoitiin sementillä, jolloin kokonaiskesto kasvoi. Sementin osuus oli n. xx h xx min. Yhteiskestoksi tuli näin ollen huikeat xx h xx min, joka on lähes xx-kertainen verrattuna sementillä injektoidun viuhkan keston.

Jos kuvitellaan, että koko viuhka **injektoitaisiin** pelkästään **kolloidisilikalla** kahta pumppuletkuparia käyttäen, tulisi injektoinnin kokonaiskestoksi n. xx h xx min – xx h xx min. Edellä mainittuihin kestoihin päästään, kun tutkitaan liitteistä 3 ja 4 kierron kestoja. Kierron kestolla tarkoitetaan tässä tapauksessa kestoja esim. reiän 9 injektoinnin alkamisesta reiän 10 injektoinnin alkamiseen. Kierron kestot vaihtelevat liitteiden mukaan xx–xx min:n välillä. Kun poistetaan muutama ääripää molemmasta päästä, saadaan vertailukelpoisemmat lähtötiedot. Injektoinnin kokonaiskestoksi saadaan n. xx h xx min, kun käytetään kierron kestonä xx min.

Käyttäen kierron kestonä xx min, saadaan kokonaiskestoksi n. xx h xx min. Injektoinnin keston ei vaikuta meneekö ainetta reikään vain vähän, esim. sen tilavuuden verran, vai esim. 200 l. Mikäli ainetta menee reikään yli 400 l, injektointi lopetetaan siihen ko. reiässä. Tällaisia reikiä ei esi-injektointikokeessa ilmennyt. Mikäli tällaisia reikiä (> 400 l) olisi, saattaisi injektoinnin kesto laskea annetusta minimiarvosta. Verrattaessa edellä laskettua kokonaiskestonä (xx h xx min) esimerkki-viuhkassa mainittuun kokonaiskestonä (xx h xx min), ero on huomattava. Pitää kuitenkin muistaa, että tämä xx h xx min on vain vertailuarvo viuhkalle, jossa vesimenekit ovat pieniä.

Verrataan vielä kolloidisilikan kokonaiskeston minimiarvoa (xx h xx min) sementti-injektoituun perään, jossa injektointiaineen menekki on suurta. Edellä esitelty ns. kuivan perän massamäärä oli n. xxx l. Otetaan vertailuun nyt paaluvälillä 435+142 – 435+118 injektoitu viuhka, jonka kokonaiskesto on n. xx h xx min (massamenekki xxx l) Tiedot ilmenevät taulukosta 5. Eroa on nyt n. x h kolloidisilikan hyväksi.

Kappaleessa 4.5 laskettiin sementti-injektoinnin **hävikkiprosentti**, joka oli xx %. Esi-injektointikokeessa injektointipöytäkirjojen perusteella hävikkiprosentti oli jopa n. xx %. Hävikkiprosentteja vertailtaessa ero onkin hurja, jopa n. xx prosenttiyksikköä. Lisäksi pitää huomioida se, että kolloidisilikan kilohinta on suurempi kuin sementin. Hävikkiprosentteja vertailtaessa etu on selvästi sementti-injektoinnin puolella.

Vertailtaessa injektointiaineiden hintoja huomataan, että injektointi perinteisellä menetelmällä on huomattavasti halvempi (taulukot 17 ja 18). Vertailussa olevat viuhkat ovat samat joiden kestoja vertailtiin aiemmin (sementti 436+285 – 436+309, esi-injektointikoe 436+693 – 436+669).

Taulukko 17 Injektointiaineiden hintojen vertailu

		Kesto				Yht.
Sementti-injektointi	Sementti	xx h xx min	xxx l	xxx kg	xxx SEK/kg	xxx SEK
Esi-injektointikoe	Sementti	xx h xx min	xxx l	xxx kg	xxx SEK/kg	xxx SEK
	Meyco MP 320		xxx l	xxx kg	xxx SEK/kg	
	Kiihdytin (16%)		xxx l	xxx kg	xxx SEK/kg	

Taulukko 18 Injektointiaineiden hintojen vertailu

	Yht.	Yht.	Yht.	SEK/kg	SEK/reikä
Sementti-injektointi	xxx SEK	xxx l	xxx kg	xxx	xxx
Esi-injektointikoe	xxx SEK	xxx l	xxx kg	xxx	xxx

Varsinaisen esi-injektoinnin päätyttyä seuraavaa työvaihetta pääsee suorittamaan nopeammin käyttäen esi-injektointikokeen tapaista työmenetelmää. Kun sementti-injektoinnissa täytyy odottaa x h ennen seuraavan työvaiheen (katkon poraus) aloittamista, pääsee kolloidisilikaa käytettäessä seuraavan työvaiheen (kontrollireiät) aloittamaan jo alle xxx kuluessa injektoinnin päättymisestä. Menetelmissä on kuitenkin eroa. Sementti-injektoinnissa pääsee katkon porausta suorittamaan, kun sementti on sitoutunut riittävästi. Kolloidisilikaa käytettäessä injektoinnin jälkeinen työvaihe on kontrollireikien poraus. Kontrollireikien poraus vie isossa perässä aikaa n. x–x h, jonka jälkeen pitää suorittaa vielä vesimenekikokeet porattuihin reikiin. Vesimenekikokeiden viemä aika, sisältäen kaluston valmistelut, mansettien asennukset sekä itse vesimenekikokeet, on noin x–x h. Mikäli vesimenekikokeiden tulokset vaativat vielä esi-injektoinnin jatkamista (x–x h), voi kolloidisilikan pienempi **sitoutumisaika** menettää merkityksensä. Jos esi-injektoinnin jatkamista ei tarvitse suorittaa, katkon porausta päästään toteuttamaan kontrollireikien ja vesimenekikokeiden valmistuttua, jotka vievät aikaa siis x–x h. Katkon porausta päästään siis suorittamaan, käytettäessä kolloidisilikaa, minimissään x–x h kuluttua varsinaisen injektoinnin päätyttyä, joka on x–x h lyhyempi aika kuin käytettäessä sementtiä injektointiaineena. Maksimissaan ilman suurempia ongelmia kontrolliporaus, vesimenekikokeet sekä esi-injektoinnin jatkaminen vie aikaa n. x h, jolloin kolloidisilikan huomattavasti pienempi sitoutumisaika on menettänyt

merkityksensä. Esi-injektointikokeessa sementti-injektointi tapahtui usein edellisenä päivänä kuin itse kolloidisilikalla injektointi. Tällä tavoin ei tarvinnut odottaa sementin sitoutumista, joka oli jo tapahtunut usein yö aikana. Koska työmenetelmässä käytetään sekä sementti- että kolloidisilika injektointia, aloitetaan injektointi sementillä johtuen sen pidemmästä sitoutumisajasta.

Vertailussa olevien injektointimenetelmien **lopetustöissä** ei ole oikeastaan eroa. Molemmista menetelmistä tarvitsee tehdä mm. laitteistojen pesut sekä injektointikoneiston kasaaminen, joten eroa lopetustöiden osalta ei juuri synny.

Kävin viikolla 20/2007 tutkimassa esi-injektointikokeen tippuvuotoja. Alue, jossa esi-injektointikoe suoritettiin, vaikutti kuivalta eikä tippuvuotoja näkynyt. Pitää toki muistaa että vesimenekit alueella olivat pieniä. Vertailua sementillä injektointiin huoltotunneliin ei voinut suorittaa, koska huoltotunneli oli siltä paaluväliltä vielä viikolla 20/2007 louhimatta. Vertailtaessa kolloidisilikalla injektointia aluetta sementillä injektointiin alueeseen, joka sijaitsee ennen esi-injektointia aluetta, ei selvää rajaa injektoinnin vaihtumisesta näy. Kolloidisilikalla injektointi alue näyttää tosin pidemmällä hieman kuivemmalta.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kappaleessa 7 on vertailu kattavasti sementti-injektointia sekä esi-injektointikokeessa suoritettua injektointimenetelmää. Sen perusteella testattu menetelmä ei ole sopiva, tehokas ja käytännöllinen tapa injektoida Lemcon Oy:n nykykalustolla.

Taulukossa 19 on esitetty sementti- ja kolloidisilikainjektointien etuja ja haittoja.

Taulukko 19 Sementti- ja kolloidisilikaninjektointien edut ja haitat.

Sementti-injektointi	Kolloidisilikaninjektointi
Edut:	Edut:
materiaalin hinta	lyhyt sitoutumisaika
tunnettu menetelmä	hyvä tunkeutuvuus
Haitat:	Haitat:
huono tunkeutuvuus	materiaalin hinta
pitkä sitoutumisaika	menetelmä tuntematon
	suuri hävikki
	laitteiston pesut

Suurimmat syyt miksi esi-injektointikokeessa käytetty menetelmä ei ole sopiva, ovat materiaalin korkea hinta sekä suuret hävikkiprosentit. Esi-injektointikokeessa käytetyn menetelmän kilohinta on lähes x-kertainen verrattuna sementti-injektoinnin kilohintaan. Hävikkiprosenttien ero on n. xx-prosenttiyksikköä (sementti n. xx % vrt. kolloidisilika n. xx %)

Esi-injektointikokeessa käytetty menetelmä voisi olla käytännöllinen sitä hieman parannellen ja tehostaen. Massan valmistuksessa voisi käyttää tehokkaampia sähköpumppuja, jolloin valmistuksen kesto lyhenisi. Kun kuvitellaan, että yhden annoksen valmistaminen lyhenisi x minuutilla, olisi ajan säästö kokonaiskestossa (20 reikää) n. xx min.

Myös käytettävissä olevien välihämmentimien lukumäärää voisi hyödyntää. Jos otettaisiin käyttöön kolme välihämmentintä kahden sijasta, tulisi ajan säästöä. Kun kaksi välihämmentintä olisi käytössä, voitaisiin kolmanteen hämmentimeen pumpata jo valmiiksi kolloidisilikaa sekä lisätä suola siihen silloin, kun se olisi ajankohtaista. Nyt edellisessä reiässä käytössä ollut välihämmentin voitaisiin pestä injektoinnin aikana.

Vesimenekikokeiden suorittaminen ennen injektointia voitaisiin poistaa, koska esi-injektointia suoritetaan joka tapauksessa. Uskoakseni mahdolliset suuret heikkousvyöhykkeet löytyisivät porauksen yhteydessä.

Jotta kolloidisilikan lyhyestä sitoutumisajasta olisi hyötyä, voitaisiin myös kontrollireikien sekä niihin suoritettavien vesimenekikokeiden suorittaminen poistaa. Jos kontrollireikiä ei porata ja vesimenekikokeita ei suoriteta säästettäisiin ajassa

n. x-x h. Myös geeliytymisaikaa voitaisiin lyhentää nykyisestään lisäämällä suolan osuutta massan valmistuksessa.

Suurin ja paras uudistus olisi injektointikaluston parantaminen. Markkinoille pitäisi kehittää pumppu, joka osaisi pumpata kahta eri ainetta reikään yhtäaikaaisesti suunnitelluilla suhteilla. Aineiden annostuksen tulisi olla tarkkaa ja yhtäaikaista, jolloin voitaisiin olla varmoja suunnitellun sekoitussuhteen säilymisestä. Tällä tavoin hävikkiprosentti laskisi jyrkästi, koska aineet sekoittuisivat ja reagoisivat keskenään vasta reiässä. Injektointihenkilöstön koulutus olisi uskoakseni vähäistä uuden sekoitustavan ja injektointiaineen johdosta.

Mikäli edellä mainitun tapainen pumppu joskus kehitetään, voisi olla hyödyllistä tutkia kolloidisilikainjektointia uudelleen. Tällöin voisi hakea vastauksia mm. seuraaviin kysymyksiin:

- Sekoittuvatko aineet tasaisesti reiässä?
- Pysyvätkö sitoutumisajat suunnitellussa kestossa?
- Miten aine toimii alueella, jossa vesimenekit ovat suuria?

LÄHTEET

Painetut lähteet

- 1 Korhonen Olli, Tunneliprojektin tuotannon ja talouden ohjaus. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Materiaalitekniikan osasto. Espoo 2006. 55 s.
- 2 MTR ry, Hard Rock Tunnel Grouting Practice in Finland, Sweden, and Norway – Literature Study. 2003. 68 s.
- 3 MTR ry, Kalliotilojen injektointi 2006 (By 53). Helsinki 2006. 61 s.
- 4 Pölla J. Ritola J, Suuret kalliotilat, kalliotilojen kuivanapito ja tiivistys. VTT. Espoo 1989. 58 s.
- 5 Repo Jukka, Injektoinnin tehostaminen tunneleissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo 2007. 70 s.
- 6 RIL, Tunneli- ja kalliorakennus II. Helsinki 1989. 437 s.
- 7 Taatila Veli, Injektoinnin kehittäminen osa kalliotilojen vedenpitävyyden parantamista. Insinööriyö. Tampereen Ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikka. Tampere 2001. 86 s.

Painamattomat lähteet

Keskinen Martti, kehityspäällikkö. Keskustelut. Lemcon Oy.
Willberg Jon ,tuotantopäällikkö Torbacken-Hede. Keskustelut/sähköpostit. Lemcon Oy.

Sähköiset lähteet

Cementa AB. [www-sivu]. [viitattu 9.2.2007] Saatavissa: www.cementa.se
Banverket. [www-sivu]. [viitattu 15.1.2007] Saatavissa: www.banverket.se

Silica Sol injektointi 436+723 - 436+699

Reikä nro	Pumppu nro	Annostus			Injektointi			Pesu kesto	Kierron kesto
		alkoi	loppui	kesto	alkoi	loppui	kesto		
7	1	-	-	-	xx.xx	xx.xx	xx	xx	-
24	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	-
6	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
8	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
9	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
11	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
						xx.xx			
12	1	-	-	-	xx.xx	xx.xx	xx	xx	-
13	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
14	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
15	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
16	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	-	-	-	xx
22	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	-
21	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
20	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
19	3	-	xx.xx	-	xx.xx	-	-	-	xx

Kontrollireikien injektointi

Reikä nro	Pumppu nro	Annostus			Injektointi			Pesu kesto	Kierron kesto
		alkoi	loppui	kesto	alkoi	loppui	kesto		
41	1	-	-	-	xx.xx	xx.xx	xx	xx	-
42	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
43	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	-	-
46	3	-	-	-	xx.xx	xx.xx	xx	xx	-
45	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
44	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx.xx	xx.xx	xx	-	xx

Silica Sol injektointi 436+708 - 436+684

Reikä nro	Pumppu nro	Injektointi			Pesu + Annostus	Kierron kesto
		alkoi	loppui	kesto	kesto	
6	1	xx.xx	xx.xx	xx	-	-
7	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
8	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
9	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
10	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
11	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
12	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
16	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
15	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
13	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
24	3	xx.xx	xx.xx	xx	-	-
23	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
22	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
21	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
20	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
19	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
18	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
17	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
14	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx

Kontrollireikien injektointi

Reikä nro	Pumppu nro	Injektointi			Pesu + Annostus	Kierron kesto
		alkoi	loppui	kesto	kesto	
41	1	xx.xx	xx.xx	xx	-	-
42	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
43	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
46	3	xx.xx	xx.xx	xx	-	-
45	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
44	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx

Silica Sol injektointi 436+693 – 436+669

Reikä nro	Pumppu nro	Injektointi			Pesu + Annostus kesto	Kierron kesto
		alkoi	loppui	kesto		
23	1	xx.xx	xx.xx	xx	-	-
22	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
21	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
20	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
19	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
18	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
17	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
16	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
15	1	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
4	3	xx.xx	xx.xx	xx	-	-
5	3	xx.xx	xx.xx	xx	-	-
6	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
7	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
8	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
9	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
10	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
11	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
12	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
13	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx
14	3	xx.xx	xx.xx	xx	xx	xx