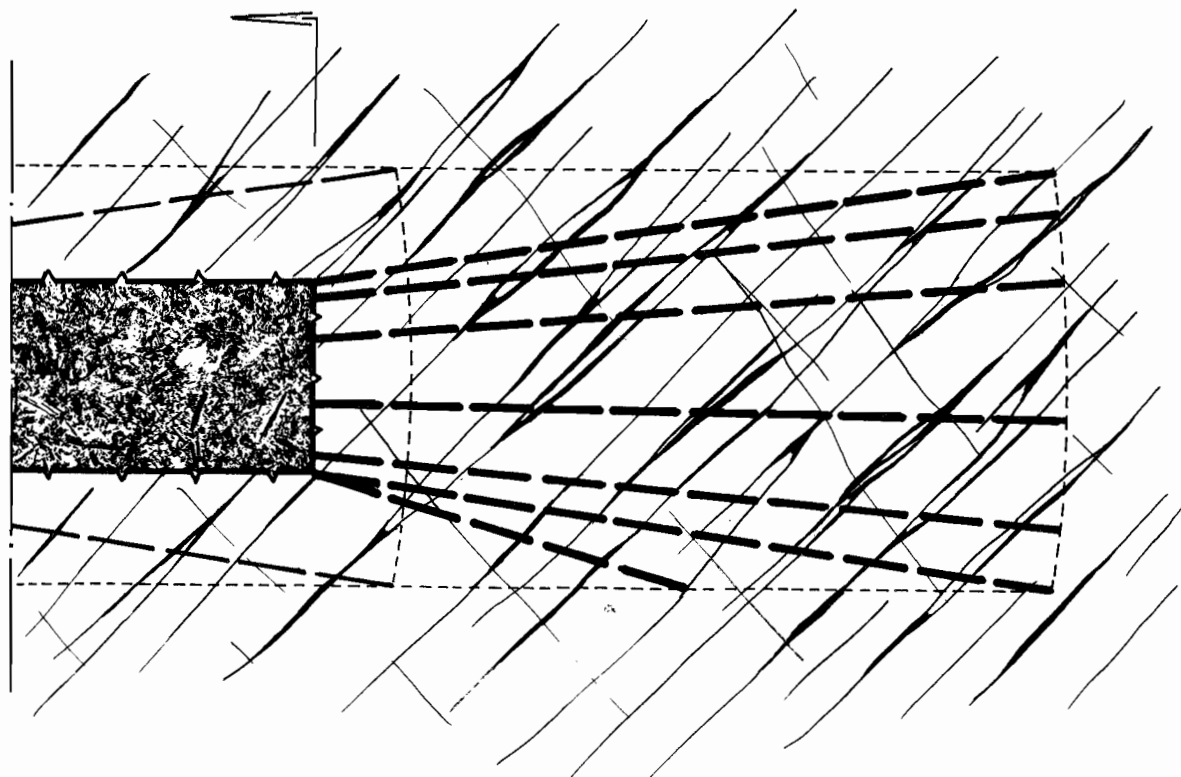
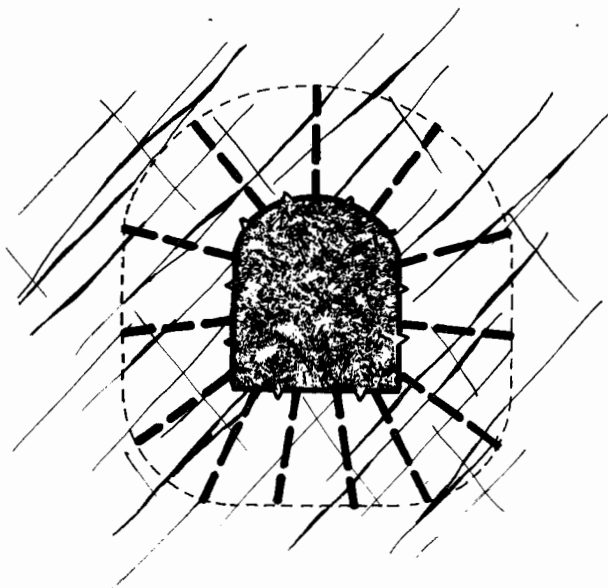


**HELSINGIN KAUPUNGIN KIINTEISTÖVIRASTO
GEOTEKNINEN OSASTO**



Pekka Hytti

ESI-INJEKTOINNIN SUORITUS JA

SEN HUOMIOIMINEN URAKKA-ASIAKIRJOISSA

Geoteknisen osaston tiedote 36

Pekka Hytti

ESI-INJEKTOINNIN SUORITUS JA
SEN HUOMIOIMINEN URAKKA-ASIAKIRJOISSA

Geoteknisen osaston tiedote 36

TIIVISTELMÄ Esi-injektoinnilla tarkoitetaan kallion tiivistämistä, joka suoritetaan pumppuamalla injektointiainetta kallion rakoihin ennen louhintaa joko maan pinnalta tai tunnelin päädyistä porattujen reikien välityksellä. Tunnelissa suoritettava esi-injektointi keskeyttää louhintatyöt perässä injektoinnin ajaksi.

Epämääräisyys injektointimäärien ennakkoarvioissa on vaikeuttanut tunnelihankkeiden urakointia. Työn alkuosassa selvitetään suunnitteluvaiheessa ja louhinnan aikana tehtävää injektointitarpeen määrittämistä ja esi-injektoinnin suorittamiseen ja sen nopeuttamiseen vaikuttavia tekijöitä. Rakennuttajien, suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden kanssa käytyjen keskustelujen sekä viimeaikaisten tunnelihankkeiden urakka-asiakirjojen perusteella on kartoitettu urakoinnin nykyistä käytäntöä. Lopuksi on laadittu ehdotus esi-injektoinnin yleiseksi työselitykseksi, jolla pyritään vähentämään louhintarytmille aiheutuvaa haittaa, sekä ehdotukset esi-injektoinnin aiheuttamien kustannusten huomioimiseksi urakka-asiakirjoissa.

PRE-GROUTING IN TUNNEL FACE AND ITS INFLUENCE ON CONTRACTING

ABSTRACT

Pre-grouting is a sealing method which is executed by pumping expansive and hardening material into rock fissures through drill holes, drilled either from the surface or from the tunnel face. While a tunnel face is being pre-grouted drilling and blasting is suspended.

The contracting of tunnel projects has been difficult as a consequence of unrealistic grouting amount estimates. The study deals with the determination of the need of grouting both during the planning stage and the working stage. A thorough examination is made on grouting work and its efficiency.

On the basis of the discussions held with clients, consultants and contractors and partly on the basis of the executed contracts during the last few years conclusions are drawn concerning the present practice in contracting. A proposal is made for a specific construction description where grouting methods and equipment are defined in order to achieve required efficiency. Proposals on how to take the pre-grouting expenses into consideration in the contracting procedure are also made.

ALKUSANAT

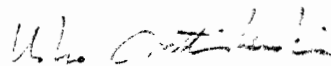
Helsingin kaupunki on huomattava tunnelirakentaja. Tunneleita rakennetaan jatkuvasti kunnallistekniikan eri tarpeiden mukaan. Tunneleita rakennetaan enenevässä määrin vaikeampiin olosuhteisiin ja tunnelien tiivistystyön tarve lisääntyy.

Nykyaikaisen tunnelin louhinta on aikatauluun tiukasti sidottu rytmitetty prosessi, jonka esi-injektointi keskeyttää. Tämän vuoksi tunnelien louhintatöiden menestyksellinen hoitaminen edellyttää esi-injektoinnin määrän ja laadun huolellista arviointia suunnittelun ja varsinaisen rakennustyön eri vaiheissa.

Tämä selvitys esi-injektoinnista ja sen huomioimisesta urakka-asiakirjoissa antaa kuvan tunnelirakentamiseen liittyvästä vaikeasta osasta, joka on kehittynyt viimeisien vuosien aikana voimakkaasti.

Selvitys on tehty yhteistyössä Teknillisen korkeakoulun vuoriteollisuusosaston louhintatekniikan laboratorion kanssa. Selvitys muodostuu DI Pekka Hytin tutkintotehtävästä, jota ovat valvoneet prof. Raimo Matikainen ja DI Jukka Pöllä.

Helsingissä 7.3.1984.



Usko Anttikoski
osastopäällikkö

ESI-INJEKTOINNIN SUORITUS JA SEN HUOMIOIMINEN URAKKA-ASIAKIRJOISSA

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

Sisällysluettelo:

Sivu

1.	JOHDANTO	1
2.	INJEKTOINTITARPEEN MÄÄRÄYTYMISESTÄ	3
2.1	<u>Määrittämiseen vaikuttavat tekijät</u>	3
2.2	<u>Ympäristö tiiveystavoitteen määrittelijänä</u>	4
2.21	Tunnelin vaikutus ympäristöön ja seuraukset.....	4
2.22	Tunnelin vaikutusalueen tutkiminen	5
2.23	Pohjavesialtaiden tutkiminen	6
2.24	Perustamistapaselvitys	7
2.3	<u>Tunnelin käyttötarkoituksen vaikutus</u>	7
2.31	Johto- ja liikennetunnelit	8
2.32	Vesihuoltotunnelit	8
2.33	Vuotovesien merkitys	8
2.4	<u>Tekniset ja stabiliteettisytyt</u>	9
3.	INJEKTOINTITARPEESEEN VAIKUTTAVAT KALLIO- OMINAISUUDET JA NIIDEN TUTKIMINEN	11
3.1	<u>Kalliossa oleva vesi</u>	11
3.11	Kallion vedenjohtavuus	11
3.12	Veden virtaus kallioraoissa	13
3.2	<u>Tutkimusmenetelmät</u>	16
3.21	Rakoilun ja heikkousvyöhykkeiden tutkiminen	17
3.22	Seisminen luotaus	17
3.23	Vesimenekkimittaus ja kallion vedenjohtavuuden määrittäminen	19
3.3	<u>Tutkimusten merkitys</u>	22
3.4	<u>Tunnelin vuotovesimäärän arvioiminen</u>	23
3.41	Virtausverkon ratkaiseminen	24
3.42	Yksinkertaistetut laskentakaaavat	24
4.	TUNNELILINJAN JAKAMINEN TIIVEYSLUOKKIIN JA TOIMENPIDE-ENNUSTEEN TEKEMINEN	26
5.	LOUHHINNAN AIKAINEN INJEKTOINTITARPEEN MÄÄRITYS....	29
5.1	<u>Injektointinnin aloituskriteerit</u>	29
5.11	Ruotsalainen käytäntö	29
5.12	Käytäntö Suomessa	31
5.2	<u>Tunnusteluporaus</u>	32
5.3	<u>Vesimenekkekoe</u>	33

6.	ESI-INJEKTOINNIN SUUNNITTELU JA TYÖN SUORITUS.....	35
6.1	<u>Porauskaaviot</u>	35
6.11	Poraukseen vaikuttavat tekijät	35
6.12	Injektointireikien poraaminen	37
6.2	<u>Varsinainen injektointityö</u>	38
6.21	Reikien käsittely	38
6.22	Injektointipaineen valinta	39
6.23	Massamäärät ja lopetuskriteerit	40
6.3	<u>Injektointityön valvonta</u>	41
6.31	Injektoinnin onnistumisen toteaminen	41
6.32	Pöytäkirjat	43
6.4	<u>Esi-injektoinnin sovittaminen louhintarytmiin</u>	44
6.41	Esi-injektoinnin vaatima aika	44
6.42	Louhinnan jatkaminen injektoidulla alueella	44
6.43	Systemaattinen esi-injektointi	45
6.5.	<u>Yllättävien vesivuotojen injektointi, erikois-</u> <u>tapaukset</u>	46
7.	INJEKTOINTIKALUSTO	48
7.1	<u>Sementtikalusto</u>	48
7.11	Pumput	48
7.12	Sekoittimet	48
7.13	Tulpat ja muut varusteet	49
7.2	<u>Kemiallinen kalusto</u>	49
7.3	<u>Monireikälaitteisto</u>	51
7.4	<u>Kaluston nykytilan kartoitus</u>	51
8.	INJEKTOINTIAINEET	53
8.1	<u>Injektointiaineen valintaan vaikuttavat tekijät</u> ..	54
8.2	<u>Suspensiot</u>	56
8.3	<u>Kemialliset injektointiaineet</u>	59
8.31	Silikaattiperusteiset injektointiaineet	59
8.32	Polymeerimuotoiset injektointiaineet	60
9.	ESI-INJEKTOINNIN KUSTANNUKSET	61
9.1	<u>Vaikutus kokonaiskustannuksiin</u>	61
9.2	<u>Kustannusten jakautuminen</u>	61
9.21	Välittömät kustannukset	61
9.22	Välilliset kustannukset	62
9.23	Esi-injektointivuoron kustannus	63

10.	ESI-INJEKTOINNIN HUOMIOIMINEN URAKKA-ASIAKIR- JOISSA	65
10.1	<u>Nykyinen käytäntö</u>	65
10.11	Urakkasopimusmuoto	65
10.12	Yksikköhinnat ja maksuperusteet	67
10.2	<u>Urakointimenettelyn heikkoudet ja sen muuttaminen.</u>	68
10.21	Todetut epäkohdat	68
10.22	Korjausehdotukset	69
11.	YHTEENVETO	72
	LÄHDELUETTELO	74
	LIITE 1; Tunnelilinjan jakaminen tiiveysluokkiin ja toimenpide-ennuste	
	LIITE 2; Esi-injektoinnin porauskaavio eräässä tunnelipoikkileikkauksessa	
	LIITE 3; Ehdotus esi-injektoinnin yleiseksi työ- selitykseksi	

1.

JOHDANTO

Viimeaikaisten kalliorakennushankkeiden yhteydessä on jouduttu kiinnittämään enenevässä määrin huomiota rakennettavan tilan tiiveyteen. Kalliotilat rakennetaan yleensä pohjaveden pinnan alapuolelle. Kalliossa olevien rakojen takia virtaa louhittavaan tilaan vettä, jonka seurauksena tapahtuu muutoksia alueen pohjavesiolosuhteissa. Asutuilla alueilla aiheutuu tästä haittaa ympäristölle, mikä on pakottanut kiristämään louhitun tilan tiiveysvaatimusta. Toisaalta kalliotilaan virtaava vesi aiheuttaa rakentajalle monenlaisia vaikeuksia.

Kallion tiivistäminen tapahtuu yleisimmin injektoimalla. Kallion injektoinnilla tarkoitetaan täyteaineen pumppuamista kallioperässä oleviin rakoihin. Täyte- eli injektointiaine johdetaan rakoihin kallioon porattavan reiän avulla.

Saatujen kokemusten perusteella kallion tiivistäminen on edullisinta tehdä esi-injektointina. Esi-injektoinnilla tarkoitetaan ennen louhintaa joko maanpinnalta tai tunnelin päädyistä suoritettavaa injektointia.

Esi-injektoinnin etuina voidaan pitää:

- saadaan suojaa suurista yllättäviä vesivuotoja vastaan
- panostus helpottuu
- louhinta rikkoo vähemmän esi-injektoitua aluetta
- injektoitaessa voidaan käyttää korkeampaa painetta
- injektointiaineen menekki on pienempi ja sen vuotamista kalliotilaan pintahalkeamien kautta ei tapahdu

Tunnelissa suoritettavan esi-injektoinnin haittana on, että se keskeyttää työn ajaksi louhinnan injektointavassa perässä. Ruotsissa saatujen kokemusten perusteella on esi-injektoinnilla päästy 85 % tiiveysasteeseen, mutta se ei hyvinkään suoritettuna täysin poista jälki-injektointitarvetta, mikäli tunnelista on tarkoitus tehdä todella tiivis.

Injektointitarpeen määrittäminen etukäteen on osoittautunut vaikeaksi tehtäväksi. Ennakoitujen määrien ylittyminen jopa 300 % ei ole harvinaista. Tästä on aiheutunut vaikeuksia louhintatyön urakoinnissa ja alkuperäisiä urakkasopimuksia on jouduttu muuttamaan hankkeen aikana.

Tämän tutkintotehtävän tavoitteena oli löytää ne menetelmät, joilla esi-injektoinnin aiheuttamat kustannukset voitaisiin huomioida urakka-asiakirjoissa siten, että kustannusten muodostuminen tyydyttäisi molempia osapuolia - rakennuttajia ja urakoitsijoita.

Injektoinnin teoriaa ja menetelmiä käsittelevää kirjallisuutta on paljon, mutta varsinaista tunnelista suoritettavaa esi-injektointia käsittelevää teosta ei ole.

Työn yhteydessä oli tarkoitus selvittää nykyisin käytössä olevat injektointitarpeen määrittämiseen liittyvät menetelmät, esi-injektointityön suorituksen tekniikkaa ja käytettävää kalustoa sekä kustannusten muodostuminen. Selvitystyön pohjalta oli lisäksi tarkoitus laatia ehdotus esi-injektoinnin yleiseksi työselitykseksi.

2. INJEKTOINTITARPEEN MÄÄRÄYTYMISESTÄ

2.1

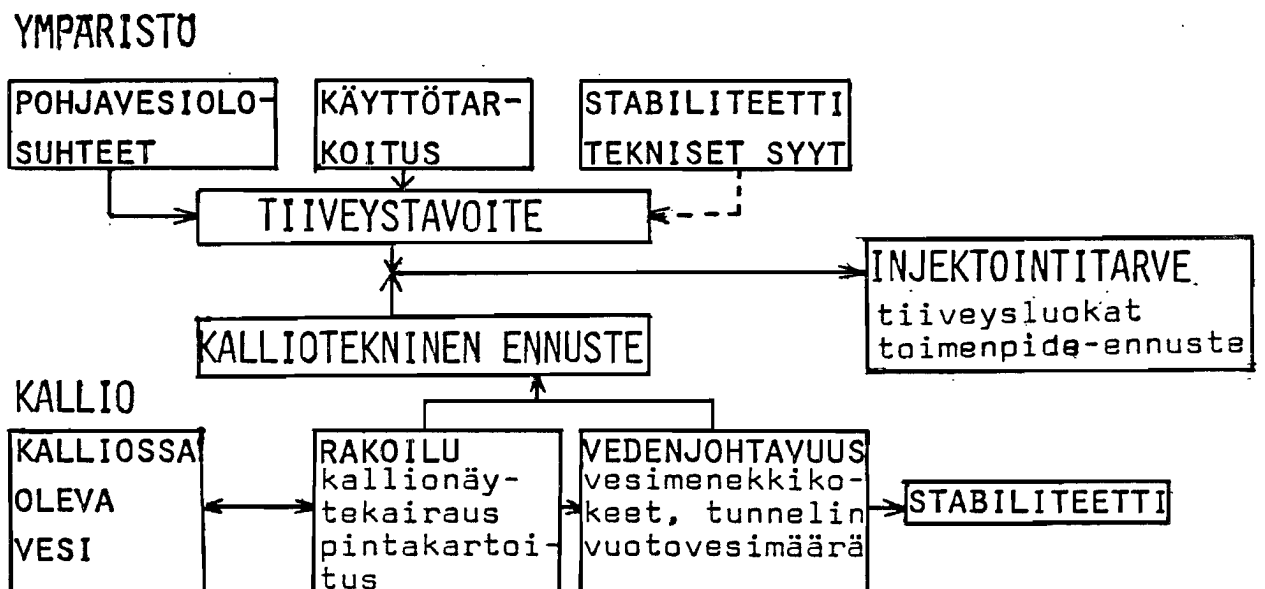
Määrittämiseen vaikuttavat tekijät

Louhintatöiden yhteydessä aiheutuu paikoin suurista vuotovesimääristä vakavia ongelmia, jotka vaikeuttavat tunnelinajon etenemistä ja vähentävät työturvallisuutta. Toisaalta hyvin pienet vuotovesimäärät voivat aiheuttaa vahinkoja tunnelitilaan asetetulle laitteistolle, mutta myös pohjaveden pinnan alenemista, mikä saattaa johtaa maan pinnan vajoamiseen louhitun tilan ympäristössä.

Tunnelin injektointitarpeen määrittää tunnelille asetettava tiiveystavoite, joka voi aiheutua seuraavista syistä /58/:

- louhintatekniset syyt: vesivuodot haittaavat louhintaa ja lujittamista
- stabiliteettisyyt: vesivuodot huuhtovat kalliorakojen täytteitä
- sisäiset syyt: tunnelitilan käyttö vaatii tiivistämistä
- ulkoiset syyt: pohjaveden pinta ympäristössä ei saa laskea tai sille asetetaan tavoite

Toisaalta injektointitarpeen määrittämiseen vaikuttavat kallion ominaisuudet.



Kuva 1. Injektointitarpeen määräytyminen

2.2

Ympäristö tiiveystavoitteen määrittelijänä

Pohjaveden pinnan alapuolelle rakennettu tunneli aiheuttaa muutoksia pohjavesitasapainossa. Usein on kuitenkin vaikea selvittää, johtuvatko muutokset juuri tunnelin rakentamisesta vai aiheutuvatko ne pohjaveden muodostumista vähentävistä tekijöistä.

2.21

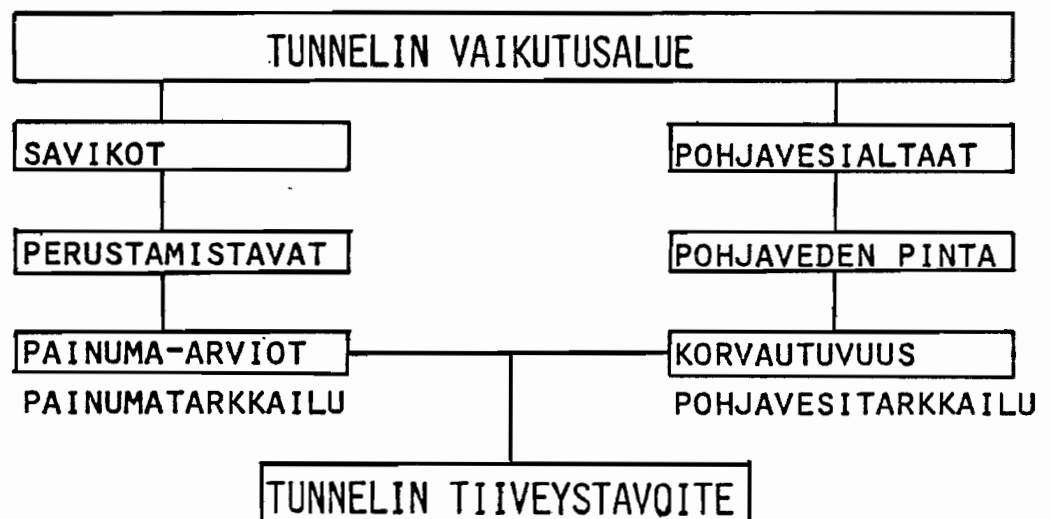
Tunnelin vaikutus ympäristöön ja seuraukset

Pohjaveden pinnan alenemisen seuraukset ovat taloudellisesti merkittäviä rakennetuilla savikkoalueilla. Rakentamattomilla alueilla pohjaveden pinnan alenemisesta ei välttämättä ole negatiivisia taloudellisia seurauksia, joten pohjaveden voidaan sallia laskea tai sille asetetaan rajat, joissa sen tulee liikkua.

Pohjaveden pinnan alenemisen seuraukset ovat /3,15,40/:

- maan pinnan vajoaminen savikkoalueilla
- epätasainen maan pinnan vajoaminen aiheuttaa vahinkoja laatoille perustetuille rakenteille
- puupaalujen lahoaminen
- paaluille aiheutuva negatiivinen vaippahankaus
- muut ympäristöhaitat esim. puustovauriot
- kaivojen kuivuminen tunnelin ympäristössä

J. Hartikainen esittää noudatettavaksi pohjaveden tarkkailujärjestelmää, joka huomioi edellä esitetyt haittavaikutukset /27/.



Kuva 2. Tiiveystavoitteen määräytyminen pohjavesiolosuhteista. /27,49/.

Tukholmassa metrotunnelin louhinnan yhteydessä Karlaplanilla ohitettiin n. 15-20 m leveä rakovyöhyke. Vuotovesimäärä oli 30 l/min mikä vastaa n. 4.5 l/min 100 m. Tämä vähäinen vuotovesimäärä aiheutti kuitenkin 6 m:n pohjaveden pinnan alenemisen /46/.

2.22

Tunnelin vaikutusalueen tutkiminen

Tunnelin vaikutusalue eli alue, jossa tunneli aiheuttaa pohjaveden pinnan alenemista, määräytyy monista toisistaan riippumattomista tekijöistä /50/:

- kalliomassan vedenjohtavuus
- kalliomassan homogeenisuus
- yksittäisten heikkousvyöhykkeiden vedenjohtavuus
- maakerroksen vedenjohtavuus
- tunnelin syvyysasema
- pohjaveden muodostuminen suotautuneena sadevetenä

Vaikutusaluetta voidaan arvioida Gustafssonin et al /25/ esittämän kaavan perusteella:

$$q = \frac{Q \arctan (y/h)}{\pi} \quad (1)$$

Missä

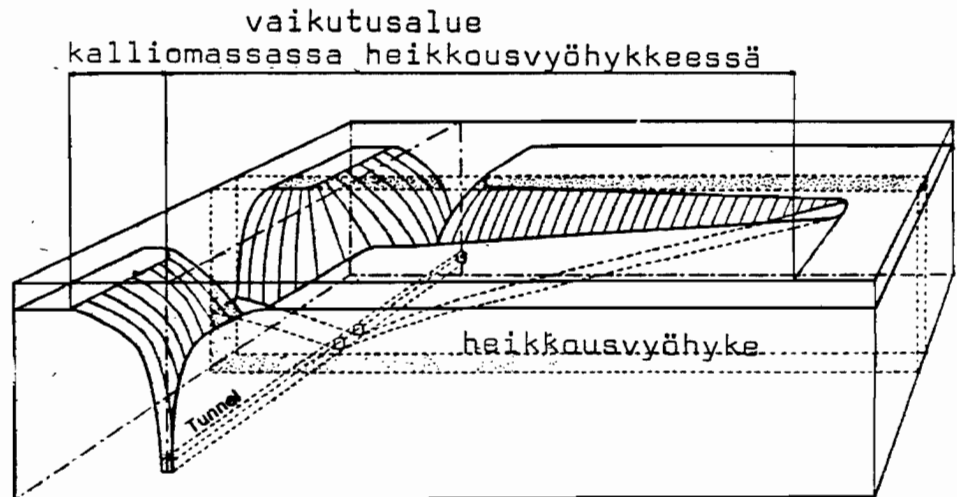
y on sijaintikoordinaatti tunnelin keskilinjalta (m)

Q on kokonaisvirtaus tunneliin (m³/s)

q on se osa kokonaisvirtauksesta, joka tulee keskilinjan ja y:n alueelta (m³/s)

h on tunnelin syvyys (m)

Kaavan (1) mukaan 50 % tunneliin tulevasta kokonaisvuotomäärästä tulee alueelta, jonka leveys on 2h ja 80 % alueelta, jonka leveys on 6h. Kaava antaa suhteellisen karkean kuvan vaikutusalueesta, koska kallion vedenjohtavuutta ei huomioida eikä yksittäisiä vettä kuljettavia heikkousvyöhykkeitä.



Kuva 3. Tunnelin vaikutusalue kalliomassassa ja pitkin heikkousvyöhykettä Carlssonin ja Olssonin (1978) mukaan /50/.

Tunnelin vaikutusalueen tunteminen vaikuttaa usein tunnelin sijainnin valintaan.

2.23

Pohjavesialtaiden tutkiminen

Pohjavesialtaiden kartoitukseen kuuluvat seuraavat selvitykset /44/:

- pohjaveden pinnan korkeuden määrittäminen
- pohjaveden virtauksen päävedenjakajat
- pohjavesivaraston korvautuvuus
- virtaussuunnat ja -nopeudet

Tutkimukset tulee ulottaa vähintään tunnelin vaikutusalueelle. Kartoituksen yhteydessä inventoidaan vaikutusalueella sijaitsevat kaivot.

Pohjavesitasapainoon vaikuttavat tekijät ovat voimakkaasti vuodenajasta riippuvaisia. Vuodenaikavaihtelun ymmärtämiseksi saadaan lisätietoja pitkäaikaisista sademäärätilastoista. Lisäksi keväisin lumen sulamisajankohdan vaihtelut vaikuttavat pohjaveden pinnan muutoksiin eri vuosina eri lailla. Pohjavesiseuranta on aloitettava riittävän ajoissa ennen louhinnan aloittamista. Minimivaatimus on kaksi vuotta.

Pohjavesivaraston korvautuvuuteen ja veden virtausnopeuteen vaikuttaa maakerroksen vedenjohtavuus. Se määritetään laboratorio- ja kenttäkokein. Virtausnopeuteen vaikuttavat lisäksi huokoisuus ja veden pinnan kaltevuus /1/.

Taulukko 1. Maalajien vedenjohtavuuksia /1/.

Maalaji	Vedenjohtavuus, m/s	Maalaji	Vedenjohtavuus, m/s
Moreenit		Sedimentit	
Soramoreeni	10^{-5} - 10^{-7}	Sora	10^{-1} - 10^{-3}
Hiekkamoreeni	10^{-6} - 10^{-8}	Karkea hiekka	10^{-2} - 10^{-4}
Hietamoreeni	10^{-7} - 10^{-9}	Hiekka	10^{-3} - 10^{-5}
Savimoreeni	10^{-8} - 10^{-10}	Karkea hieta	10^{-5} - 10^{-7}
Moreenisavi	10^{-9} - 10^{-11}	Hieno hieta	10^{-5} - 10^{-7}
		Hiesu	10^{-7} - 10^{-9}
		Savi	10^{-9}

Pohjaveden pinnan havaitseminen tehdään havainto-putkillla ja/tai alueella olevista maa- ja kallio-kaivoista. Louhinnan aiheuttaman hättävähäikutuksen selvittämiseksi tulee vaikutusalueella olevat kaivot kortistoida. Tarkempi selvitys toimenpiteistä on viitteissä /35,54/.

2.24

Perustamistapaselvitys

Pohjaveden alenemisen ja painumien välinen riippuvuus on selvitettävissä erilaisilla laskentamethodellillä. Kitkamaa-alueilla (sora, hiekka, hieta moreeni) ei painumia ole tai ne ovat vähäisiä. Painumatarkkailua on tarvittaessa suoritettava koheesiomaa-alueilla ja erityisesti riskinalaisissa rakennuksissa ja rakenteissa. Painumatarkkailu suoritetaan katu-, tori- ja piha-alueilla painumalevyillä ja rakennuksiin kiinnitettävistä pulteista /3,27/.

Perustamistapaselvitys on ulotettava savikkoalueille ja alueille, joissa veden pinta mahdollisesti alenee. Perustamistavan perusteella voidaan arvioida mahdollisten painumien aiheuttamia vaurioita ja määrittää suurimmat sallitut painumat sekä sallittu pohjaveden aleneminen.

2.3. Tunnelin käyttötarkoituksen vaikutus

Tunnelit voidaan jakaa käyttötarkoituksen mukaan. Tässä ne jaetaan erilaisen tiivistystarpeen mukaisesti johto- ja liikennetunneleihin, jotka edustavat ns. kalustettuja tunneleita, ja vesihuoltotunneleita.

Johtotunneleita ovat yhteiskäyttötunnelit ja erikseen rakennetut puhelin- ja sähkökaapeli-, kaasu- ja vesijohtotunnelit. Liikennetunneleita ovat metro-, rautatie- ja maantietunnelit. Vesi- huoltotunneleita ovat raaka- ja jätevesitunnelit.

2.31

Johto- ja liikennetunnelit

Kalustettavissa tunneleissa on tarkoituksenmukaista estää tippuvat vesivuodot, joiden pahin seuraus on veden korroosiovaikutus. Liikennetunneleissa tippuvat vesivuodot aiheuttavat lisäksi jäätymisvaikeuksia tunneleiden suuaukkojen läheisyydessä.

Katosta ja seiniltä tippuva vesi ohjataan ruiskubetonisalojilla tunnelin lattiatasoon, josta edelleen avo- tai salaojaa pitkin pumppaukseen. Salaojituskustannukset riippuvat vuotovesimäärästä.

2.32

Vesihuoltotunnelit

Vesihuoltotunnelit rakennetaan joko paineellisena tai viettotunnelina. Paineellisia tunneleita ovat raakavesitunnelit ja puhdistetun jäteveden tunnelit. Puhdistamattoman jäteveden tunnelit ovat viettotunneleita /59/.

Paineellisissa tunneleissa vesi täyttää koko tunnelin, joten vuotovesistä ei ole sinänsä haittaa. Päinvastoin voidaan joutua injektoimaan, jos paineellisen veden pääsy ympäröivään kallioon on estettävä.

2.33

Vuotovesien merkitys

Lisääntyvät vuotovesimäärät nostavat tunnelin käyttökustannuksia, jotka etupäässä johtuvat pumpauskustannuksista. Kustannuksia voi aiheutua myös tunneliin liitetylle laitokselle esim. pumppaamolle. Injektointitarve voi jossain tapauksessa määräytyä näiden kustannusten perusteella.

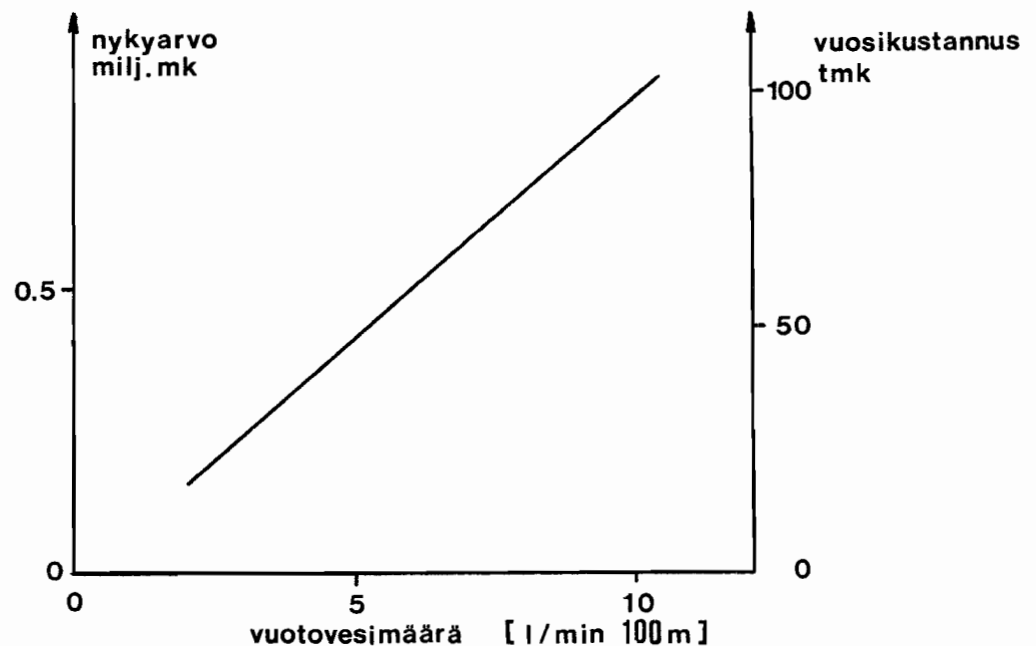
Vuotovesien aiheuttamien kustannusten suuruusluokan selvittämiseksi esitetään seuraava laskelma:

- jätevesitunneli, jonka pituus on 5 km
- pumppauskorkeus on 60 m

Lasketaan vuotovesien aiheuttama kustannus, kun huomioidaan pumppauskustannukset ja jätevesipuhdistamon käyttökustannukset. (Hintataso 1980).

- puhdistamon käyttökustannus	0.25 mk/m ³
- pumppaus (tehotarve 0.55 kWh/m ja energian hinta 0.25 mk/kWh)	$\frac{0.14 \text{ mk/m}^3}{0.39 \text{ mk/m}^3}$

Kuvassa 4. on esitetty kustannusten muodostuminen vuotovesimäärän funktiona sekä kustannusten nykyarvo, kun kuoletusaika on 20 v ja laskentakorko 10 %. (Tunneliesimerkki on kuviteltu, pumppauskorkeudet ovat todellisuudessa selvästi pienemmät, mutta suuruusluokka on oikea, jos tunnelin käyttäjä osallistuu puhdistamon pääomakustannuksiin.)



Kuva 4. Vuosikustannus ja nykyarvo vuotovesimäärän funktiona lasketussa esimerkissä

2.4

Tekniset ja stabiliteettisyyt

Yllättävät ja suuret vesivuodot aiheuttavat injektointitarvetta. Vaikutukset voivat olla:

- katkojen lähtevyys heikkenee
- räjäytysaine ei pysy rei'issä
- työympäristö on märkä
- ruiskubetonin tartuntalujuus heikkenee

Tarkkoja lukuarvoja sallitulle vuotovesimäärälle ei näissä tapauksissa voida esittää. Ruiskubetonin tartuntalujuus ei heikkene, vaikka kalliopinta on kostea edellyttäen, että tuoreen ruiskubetonikerroksen taakse ei pääse muodostumaan vedenpainetta /37/. Käytännössä tämä merkitsee, että ruiskubetoni ei salli tippuvaa vesivuotoa.

Graniiteissa ja gneisseissä yksittäisten rakovyöhykkeiden veden kuljetuskyky on ruotsalaisten kokemusten mukaan 30-80 l/min, rakovyöhyke. Rakoja ja rakoryhmiä, jotka vuotavat 100-200 l/min rakoryhmä, voidaan pitää voimakkaasti vettä vuotavina ja ne vaikeuttavat louhintatyötä /8/.

Suuria vuotovesimääriä esiintyy louhittaessa suuren vesivaraston esim. meren alapuolella. Suomalaisia esimerkkejä ovat vuotovesimäärät Suomenlinnan kaukolämpötunnelissa 830 l/min ja Suomenojan jätevesitunnelissa n. 5000 l/min /40/.

Tunnelin pysyvyyden kannalta tärkeä osatekijä on pohjavedenpaine. Se vaikuttaa kahdella tavalla. Epäjatkuvuuspinnoilla normaalivoima pienenee vedenpaineen aiheuttaman nosteen vaikutuksesta. Tämä vähentää leikkauslujuutta. Toisaalta vetoroissa vesi aiheuttaa paineellaan työntövoiman /63/. Lisäksi voimakkaasti virtaava vesi vähentää pysyvyyttä huuhtomalla rakotäytettä.

Vedenpaine voidaan laskea suoraan veden korkeusaseman perusteella, mutta virtauksen on oltava horisontaalista ja kallion isotrooppista, jotta tulos olisi oikein. Vedenpaineen tarkempi määrittäminen voidaan tehdä mittaamalla pietsometrillä.

3. INJEKTOINTITARPEESEEN VAIKUTTAVAT KALLIO-OMINAISUUDET JA NIIDEN TUTKIMINEN

Kallion vedenjohtokyvyn ja samalla injektointitarpeen kannalta kallion tärkein ominaisuus on rakoilu. Tässä esitetään kallion vedenjohtokykyyn vaikuttavia tekijöitä ja niiden tutkimiseen liittyviä menetelmiä. Lisäksi tarkastellaan kalliotilaan tulevan vuotovesimäärän arvioimista.

3.1 Kalliossa oleva vesi

Suomessa kivilajit ovat pääosin kiteisiä ja iältään prekambrisia. Peruskallion päällä on nuoria, jääkaudelta peräisin olevia maalajeja. Kallion ja maaperän välissä on jäätiköityneillä alueilla erittäin suuri ikäero /39/.

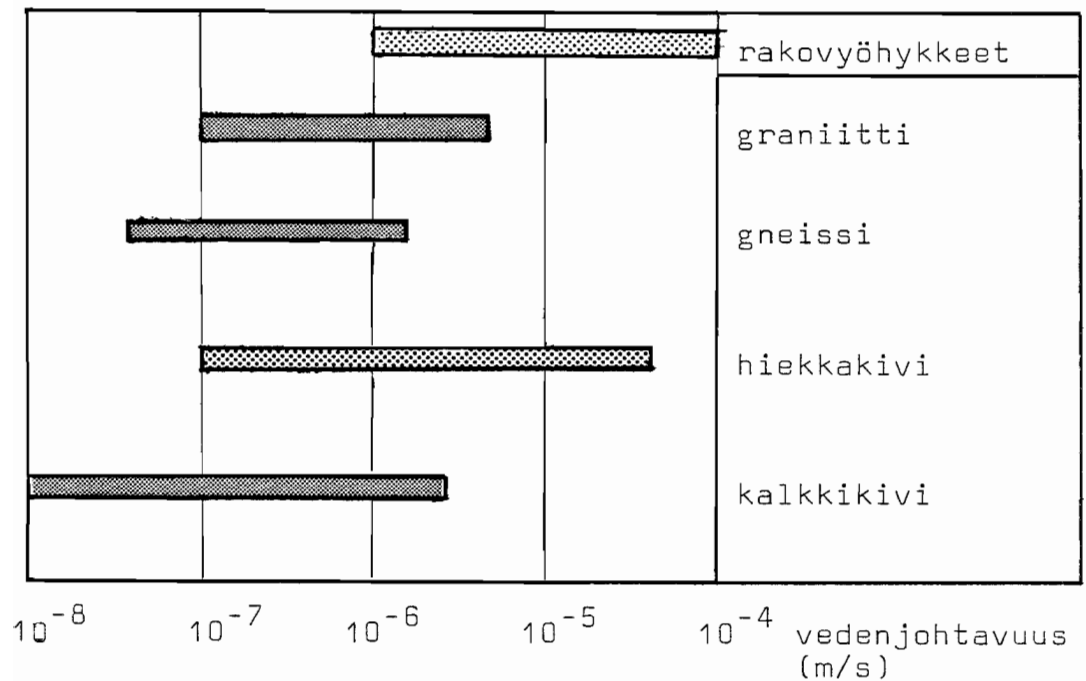
Pohjavesi esiintyy kahdessa, toisistaan hyvin paljon poikkeavassa ympäristössä - maaperässä ja kalliossa. Kalliotilaan tuleva vuotovesimäärä on riippuvainen kalliossa olevasta vedestä ja sen virtauksesta kalliossa.

3.11 Kallion vedenjohtavuus

Kalliomassan hydrologiset ominaisuudet kiteisessä peruskalliossa määräytyvät täysin esiintyvien rakojen perusteella. Eri kivilajien vedenjohtokyky on riippuvainen rakoilusta.

Raot graniittisissa kivilajeissa ovat yleensä avoimia ja eri rakoryhmät leikkaavat niin, että syntyy yhtenäinen rakosysteemi. Gneisseissä raot ovat yleensä kiinni ja suuntautuneet niin, ettei vastaavaa rakosysteemiä synny. Sedimenttiset kivilajit sen sijaan johtavat vettä helpommin kuin kiteiset /20/.

Kallion vedenläpäisykykyä kuvataan kallion vedenläpäisevyyskertoimella eli vedenjohtavuudella. Sen laatu on yleensä m/s. Se, miten paljon vettä kulkee kalliossa olevan kuvitellun pinnan läpi, johdetaan kallion ominaisuuksien lisäksi kallion eri osissa vallitsevasta nesteen paineesta ja veden ominaisuuksista. Veden tärkeimmät ominaisuudet ovat sen viskositeetti ja tiheys, jotka molemmat riippuvat lämpötilasta /61/.

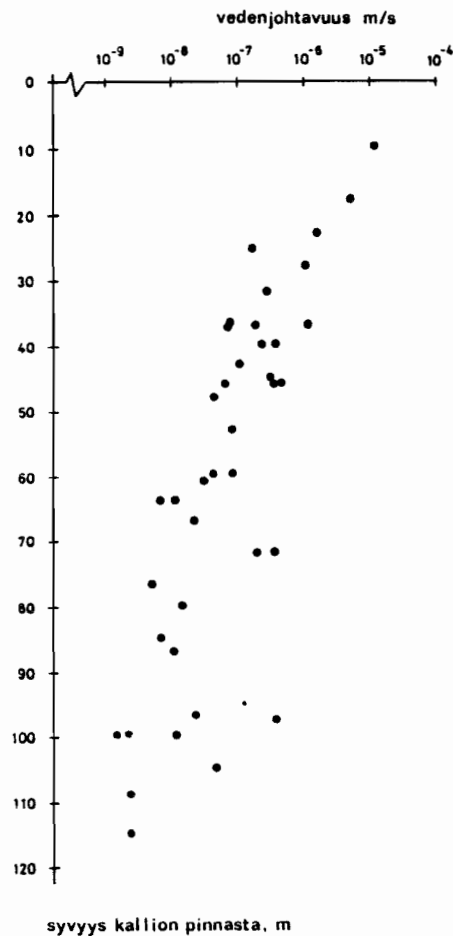


Kuva 5. Eri kivilajien vedenjohtavuus /20/.

Rakovyöhykkeissä vedenjohtavuus on selvästi suurempi kuin muussa kalliomassassa. Rakojen vedenjohtokykyä vähentää rakotäyte, joka voi aiheutua saveksi muuttumisesta ja mineralisaatiosta.

Kalliomassan ylintä osaa dominoivat horisontaaliset raot ja vuodot ovat usein keskittyneet paikallisiin avautumiin rakotasoissa. Syvyyden kasvaessa horisontaalirakojen merkitys vähenee ja vuotoja esiintyy enemmän vertikaalisissa raoissa /19/.

Homogeenisessa kalliomassassa alkaa syvyyden kasvaessa vedenjohtavuus pienentyä. Tämä johtuu kalliopaineesta, joka sulkee syvällä rakoja. Rakovyöhykkeissä ilmiö ei ole selvästi havaittavissa, joten yksittäiset rakovyöhykkeet johtavat vettä syvällekin /18/.



Kuva 6.

Vedenjohtavuus syvyyden funktiona Carlssonin ja Olssonin (1977) mukaan /18/.

3.12

Veden virtaus kallioraoissa

Kalliomassa koostuu yleensä monimutkaisesta rakojärjestelmästä. Jos raot ovat tiheässä eivätkä ole selvästi suuntautuneet, oletetaan usein, että kallio on homogeeninen ja isotrooppinen, jatkuva massa. Sen sijaan, jos rakovälit ovat suuret verrattuna rakenteen mittoihin, on virtausta koskevissa analyyseissä käytettävä olettamusta epäjätkävistä massasta /30/.

Suoritettaessa pohjaveden virtaustarkasteluja laajoille alueille kalliota on sitä käsiteltävä edellä mainittujen tyyppien yhdistelmänä, jolloin huokoisena materiaalina käsiteltävät osat voivat olla esimerkiksi suurten alueellisten halkeamavyöhykkeiden rajaamia /55/.

Laminaarista virtausta huokoisessa väliaineessa hallitsee Darcyn laki:

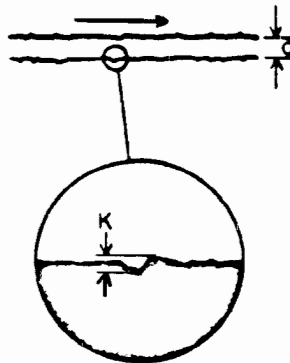
$$v = k I \quad (2)$$

Missä v on virtaamanopeus (m/s)
 k on vedenjohtavuus (m/s)
 I on hydraulinen gradientti (m/m)

Homogeenisessa kalliiossa voidaan käyttää keskimääräistä vedenläpäisykerrointa /30/.

Epäjatkuvassa massassa virtausta voidaan tarkastella erikseen yhdessä raossa, rakojoukossa tai epäjatkuvissa raoissa. Yksittäisen raon tärkeimmät ominaisuudet virtauksen kannalta ovat karheus, geometrinen muoto ja raon täytteisyyys.

Avoimessa ja täytteettömässä raossa karakterisoi rakoa käsite suhteellinen karheus, k/D_h , jossa k on absoluuttinen karheus ja D_h on raon hydraulinen läpimitta ($D_h = 2a$ kuvassa 7.) /30/.



Kuva 7. Raon suhteellisen karheuden määrittely /30/.

Virtauslait yhdessä raossa voidaan esittää /43/:

Laminaarinen tai tasainen virtaus $v = k_f J_f$ (3)

Turbulenttinen virtaus $v = k'_f J_f^\alpha$ (4)

Yhtälöissä v on keskiarvonopeus, k_f on raon vedenjohtavuus, k'_f on turbulenttinen vedenjohtavuus, J_f on hydraulisen gradientin kohtisuora projektio rakotasoon ja α on epälineaarisuusaste. ($\alpha = 1.0$ laminaariselle virtaukselle ja $\alpha = 0.5$ täysin turbulenttiselle virtaukselle).

Lisättäessä virtausnopeutta ja hydraulista gradienttia tapahtuu tietyssä raossa siirtyminen laminaarisesta virtauksesta turbulenttiseen. Kallioraossa tämä tapahtuu pienillä Reynoldsin luvun arvoilla, jopa $Re = 10-100$. Suhteellisen karheuden kasvu alentaa tätä rajaa. Reynoldsin luku määrittää kalliorasossa /45/:

$$Re = v D_h / \nu \quad (5)$$

Missä ν on nesteen kinemaattinen viskositeetti
 D_h on raon hydraulinen läpimitta
 v on virtausnopeuden keskiarvo

Vedenjohtavuus yhdessä raossa voidaan esittää muodossa:

$$\text{Laminaarinen virtaus: } k_f = \frac{\kappa g e^2}{12 \nu C} \quad (6)$$

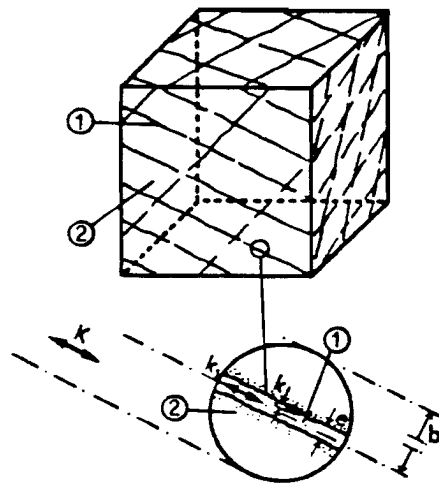
Missä g on maan vetovoiman kiihtyvyys
 κ on raon jatkuvuusaste (raon avoimen pinta-alan ja kokonaispinta-alan suhde)
 e on raon leveyden keskiarvo
 ν on nesteen kinemaattinen viskositeetti
 C on vakio, joka riippuu suhteellisesta karheudesta
 $(C = 1 + 8.8(k/D_h)^{1.5}, \text{ Louis } 1967)$

Yhdensuuntaisille raoille voidaan esittää vastavasti yhtälöt laminaariselle ja turbulenttiselle virtaukselle. Jatkuvalle rakoryhmälle saadaan vedenjohtavuus yksittäisten rakojen vedenjohtavuuksista:

$$K = \frac{e}{b} k_f + k_m \quad (7)$$

Missä K on vedenjohtavuus (laminaarinen tai turbulenttinen)
 b on rakojen etäisyys
 k_m on kalliomatriisin vedenjohtavuus

Käytännössä k_m on hyvin vähäinen verrattuna tekijään $(e/b)k_f$.



Kuva 8. Rakoryhmän vedenjohtavuuden K määrittäminen /45/.

Kalliomassalla on aina hyvin monimutkainen geometria, jossa epäjatkuvuudet, raot sijaitsevat anisotrooppisesti. Matemaattisten ja fysikaalisten mallien käyttö tutkittaessa veden virtausta rakoille kalliassa on oikeutettua vain, jos käytössä on riittävästi in-situ-tietoa edellä kuvatuista parametreista.

3.2 Tutkimusmenetelmät

Kallion rakoilun selvittäminen tapahtuu kartoittamalla kalliopaljastumista tai peitteisillä alueilla kallonäytekairauksilla. Ilman kairauksia saadaan tietoa rakoilusta maakerroksen alta tai syvemmältä kalliosta välillisesti seismisen luotauksen tai ilmakuvauslaskinnan avulla /48/.

Kallion vedenjohtavuuden määrittämiseen käytettävät suoranaiset menetelmät ovat /30/:

- vesimenekkimittaus
- pumppauskoe
- paineen alenemiskoe
- merkkiainekoe

Avolouhosten yhteydessä vedenjohtavuuden määrittämiseksi on lisäksi käytetty muuttuvaa painekoetta ja vakio painekoetta /29/. Tunnelitöiden yhteydessä käytetyin menetelmä on vesimenekkimittaus. Muihin menetelmiin ei tässä puututa vaan viitataan lähteeseen /30/.

3.21

Rakoilun ja heikkousvyöhykkeiden tutkiminen

Hanketutkimusvaiheessa tyydytään yleensä pienimit-takaavaiseen karttamateriaaliin ja sen yleisluon-teiseen analysointiin tunnelin linjausvaihtoehtoja tarkasteltaessa. Yleispiirteisen tutkimuksen alussa tehdään kartta- ja ilmakuvatulkinta, joiden perusteella voidaan jatkotutkimukset keskittää arvioitujen heikkousvyöhykkeiden tutkimiseen /57/.

Rakojen ja rakoryhmien kartoitus tehdään käyttä-mällä hyväksi rakennegeologian menetelmiä, jolloin saadaan selvitettyä suunnat, kaateet ja rakoti-heys. Kartoituksessa tehdään havaintoja paljastu-milta, lähistössä olevista kalliotiloista ja leik-kauksista ja käytetään mahdollisten kallionäyte-kairausten antamaa tietoa. Lisäksi tulee tehdä havaintoja rakojen avonaisuudesta, rakotäytteen laadusta ja veden virtauksesta.

Kerätyt tiedot käsitellään tilastollisesti, jonka edellytyksenä on suuri havaintojoukko, mieluummin useita satoja. Tulokset esitetään yleensä Schmidt-in diagrammilla alapalloprojektiona. Koska kaikki raot eivät käytäydy hydraulikan kannalta samalla tavalla, ehdottaa Louis /45/ havaintojen painot-tamista siten, että rakojen pituus, jatkuvuus ja avonaisuus korostuvat.

Rakennusgeologisessa kallioluokituksessa kallio luokitellaan rakenteellisen kiinteyden ja rakenne-tyypin mukaan /24/. Vedenjohtavuuden kannalta tär-kein on rikkonainen kallio, josta luokassa Ri III ja IV esiintyy usein vesivaikeuksia.

Rakoilutietojen tulostaminen tapahtuu tunnelin pituusprojektiossa rakennusgeologisen kallioluo-kituksen merkintöjä käyttäen. Samassa piirustuk-sessa voidaan esittää päärakoilun kulku ja kaade alapalloprojektiona, jossa on lisäksi esitetty tunnelin linjauksen kulku.

3.22

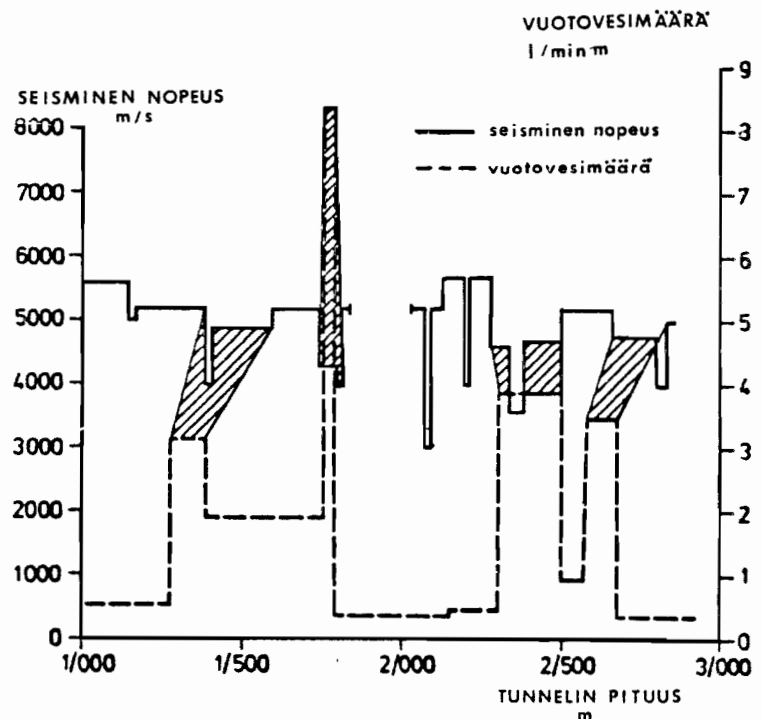
Seisminen luotaus

Suomessa käytetyllä ns. refraktioseismisellä mene-telmällä voidaan ensisijaisesti määrittää irto-maakerroksen paksuus ja kallion rikkonaisten vyö-hykkeiden sijainti ja leveys. Menetelmä perustuu täryaallon etenemiseen eri nopeudella eri aineissa ja taittumiseen rajapinnoilla /68/.

Taulukko 2. Kallion laatu seismisen nopeuden perusteella kokemusperäisesti arvioituna /68/.

Nopeus m/s	Selitys
yli 5000	Harvarakoinen kallio
4500-5000	Vähärakoinen kallio tai harvarakoisessa kalliossa halkeamarakenteinen tai rakorakenteinen vyöhyke
4000-4500	Runsarakoinen kallio tai harva- tai vähärakoisessa kalliossa murros- tai ruhjerakoinen vyöhyke tai löyhärakenteinen kallio
3500-4000	Murros- tai ruhjerakenteinen kallio tai raparakenteinen kallio
alle 3500	Raparakenteinen kallio tai ruhje- tai savirakenteinen kallio

Seismisen nopeuden perusteella voidaan ennustaa heikkousvyöhykkeet eli yleensä ne alueet, joissa suuret vesivuodot ovat todennäköisiä. Carlsson ja Olsson (1977) tutkivat Forsmarkin jäähdytysvesitunnelin yhteydessä seismisen nopeuden ja tunneliin tulevan vuotovesimäärän välistä korrelaatiota /19/.



Kuva 9. Seisminen nopeus ja vuotovesimäärä Forsmarkissa Carlssonin ja Olssonin (1977) mukaan /19/.

Kuvassa 9. varjostetut alueet ilmaisevat mahdollisen korrelaation korkean vuotovesimäärän ja matalan seismisen nopeuden välillä.

3.23

Vesimenekkimittaus ja kallion vedenjohtavuuden määrittäminen

Rakennusalan kalliotutkimusohjeiden mukaisesti suoritetaan tunneleiden tutkimuksissa porakone- tai kallionäytekairauksia lähinnä kalliopinnan sijainnin tarkistamiseksi. Kallionäytekairauksia suoritetaan ensisijaisesti pintatunnelilinjoilla kallion peitteisissä laaksokohdissa sekä rikko- naisten ja/tai muuten vaativien kallio-osien alueilla. Lisäksi edellytetään, että tiivistys- tarve tarkistetaan aina kallionäytekairausrei'istä ja tarvittaessa porakonekairausten yhteydessä /57/.

Kallion vedenjohtavuuden määrittäminen tehdään Suomessa yleisimmin vesimenekkimittauksen avulla. Kokeessa pumpataan vettä kallioon tehtyyn reikään tai tulpilla siitä eristettyyn osaan painetta käyttäen. Vesimenekkimittauksen tulokset ilmoite- taan tavallisesti lugeon-yksikköinä /31/:

$$\text{Lugeon-arvo} = \frac{Q}{l \cdot p \cdot t}$$

Missä Q on vesimenekki (dm³)
l on tutkittavan reikäosan pituus (m)
p on vesipaine (MPa)
t on mittausaika (min)

Lugeon-yksikön laatu on (1/m min PMA).

Vesimenekkimittaus suoritetaan yleisimmin yksi- tai kaksitulppamenetelmällä. Koe on suositelta- vampaa tehdä kallionäytekairausreiässä, koska reiän seinä on tasaisempi kuin porakoneella teh- dyssä reiässä. Reiän halkaisija on yleensä 56-76 mm /31/.

Kokeet suositellaan suoritettavaksi viittä vesi- painetta käyttäen /32/:

1. pieni paine (paine a)
2. keskisuuri paine (paine b)
3. suuri paine (paine c)
4. keskisuuri paine (b)
5. pieni paine (a)

Mittausaika on yleensä viisi minuuttia.

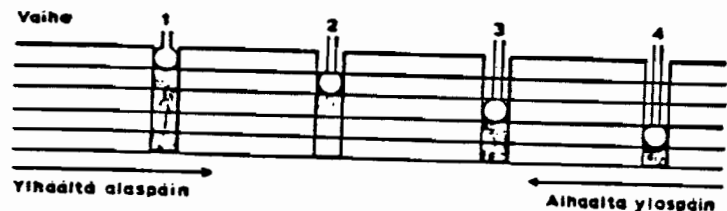
Paineet voidaan valita taulukosta 3. Mikäli painetta alennettaessa saatu vesimenekik kuvaaja poikkeaa painetta nostettaessa saadusta siten, että vesimenekit suurenevät, merkitsee se sitä, että raot huuhtoutuvat auki. Päinvastaisessa tilanteessa raot sulkeutuvat vesipaineen vaikutuksesta /50/.

Taulukko 3. Vesimenekkimittauksessa käytettävät paineet /31/.

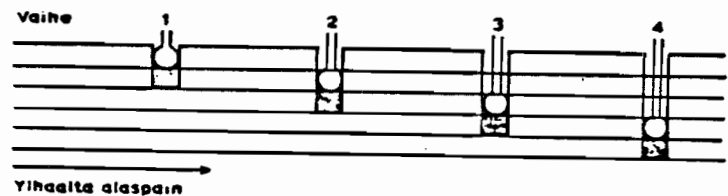
Syvyys (m)	Paine (MPa)		
	pieni a	keski- b suuri	suuri c
0...5	0,1	-	-
5...10	0,1	0,2	-
10...20	0,2	0,3	0,4
20...30	0,2	0,4	0,5
30...40	0,3	0,5	0,8
40...50	0,5	0,8	1,1
50...60	0,6	0,9	1,3
yli 60	0,7	1,1	1,6

Käytetyille paineille lasketaan lugeon-arvo ja koko mittausta edustava lugeon-arvo voidaan määrittää lähteessä /32/ esitetyllä tavalla.

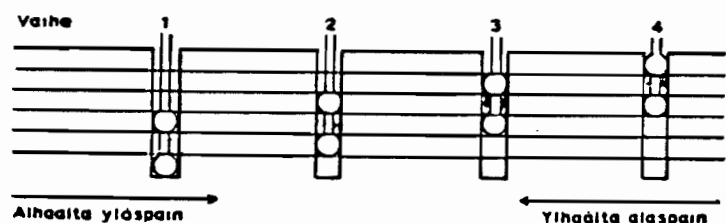
A. Yksitulppamenetelmä. Vesimenekikoke lopulliseen pituuteensa kairatussa reiässä.



B. Yksitulppamenetelmä. Kairaus ja vesimenekikoke vaiheittain.



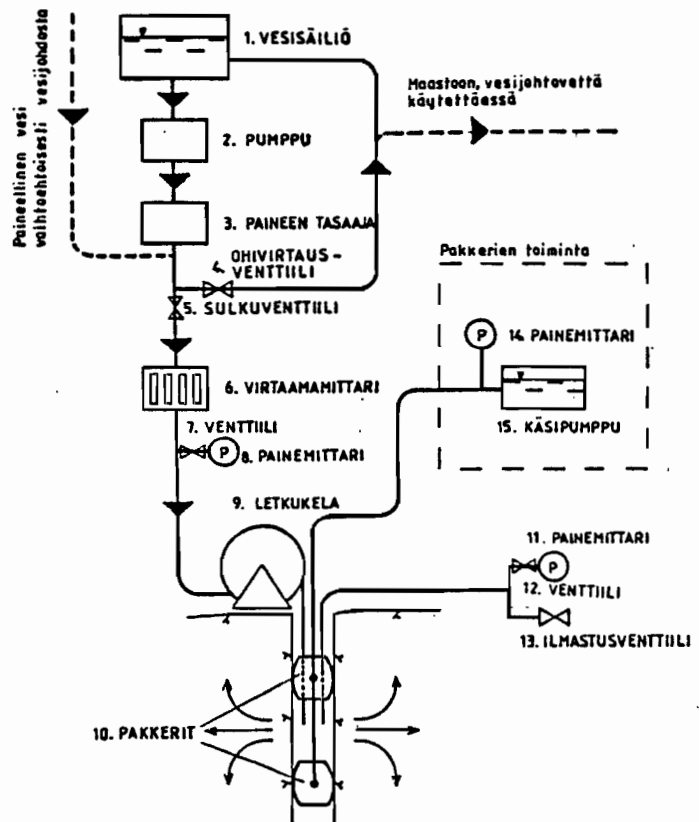
C. Kaksitulppamenetelmä



Kuva 10. Vesimenekkimittauksen menetelmät /30/.

Mikäli pohjavedenpinta on yli 2.0 m:n syvyydellä maan pinnasta, lisätään lugeon-arvoja laskettaessa käytettyyn paineeseen putkessa pohjavedenpinnan yläpuolella olevan vesipatsaan paine.

Kokeissa käytetään tavallisesti joko mekaanisesti tai veden/ilmanpaineella toimivia tulppia.



Kuva 11. Vesimenekkimittauksessa käytettävä laitteisto /71/.

Vesimenekkimittauksen tuloksia tulkittaessa on muistettava, että koe kuvastaa olosuhteita vain reiän lähellä ja rakosysteemissä, joka leikkaa loivasti reiän suunnan. Kallionäytekairausreiät pyritään sijoittamaan siten, että ne leikkaavat heikkousvyöhykkeitä. Käytännössä on usein vaikea pitää reiät avoimina ja ne joudutaan juottamaan sementtिलाastilla ennen reiässä tehtäviä tutkimuksia. Tämä vaikeuttaa vesimenekkimittauksen tulosten tulkintaa ja jopa vääristää niitä.

Koe ei ilmaise vettä huonosti läpäiseviä kohtia, kuten savilustia. Tutkimalla kairansyvännäytettä ja vesimenekkimittauksen tuloksia yhtäaikaaisesti voidaan kuitenkin tehdä päätelmiä rakojen täytteisyydestä.

Tulppien aiheuttaman vuotovirtauksen eliminoinniseksi on niiden vähimmäispituudeksi suositeltu 0.4 m:ä /31/.

Vesimenekkimittauksen tuloksista voidaan laskea kallion vedenläpäisevyyskerroin eli vedenjohtavuus /5/:

$$k = \frac{Q}{L} \frac{C}{H} \quad (9)$$

Missä k on vedenläpäisevyyskerroin (m/s)
 Q on vesimenekki (dm³/min)
 L on mittauskerroksen paksuus (m)
 H on vedenpaine reiän keskipistessä (m)
 C on vakio

Vakio voidaan määrittää Moyen (1967) mukaan:

$$C = \frac{1 + \ln(L/2r)}{2} \quad (10)$$

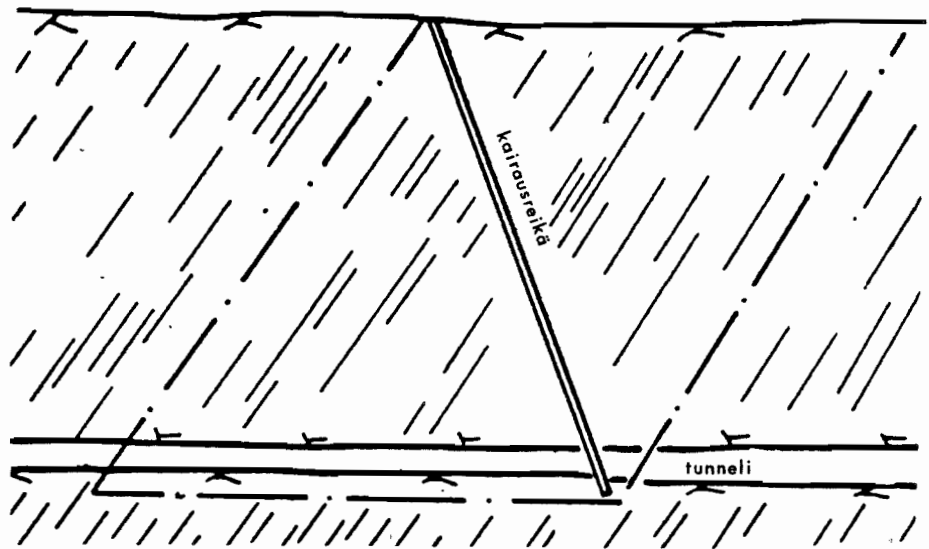
Missä r on mittausreiän säde (m).

Lähteessä /30/ on esitetty muita laskukaavoja C:n laskemiseksi.

3.3 Tutkimusten merkitys

Käytännön ongelmana on kalliopinnan peitteisyys. Suomessa kallioperä on n. 97 %:sti maakerroksen ja veden peittämä /48/. In-situ-tietoa saadaan pintakartoituksen lisäksi vain kalliokairausrei'istä. Välillisten menetelmien avulla saadaan käsitys heikkousvyöhykkeiden esiintymisestä, mitä tietoa on tarvittaessa tarkistettava kairaamalla. Määritettäessä yksittäisen havainnon vaikutusala on sovellettava tilastollista ajattelutapaa.

Kalliokairaus antaa täsmällistä tietoa reiän välittömästä ympäristöstä, mutta ottamalla huomioon kallion rakenne voidaan saatua tietoa ekstrapoloida (kuva 12).



Kuva 12. Kairausreiän antaman tiedon ekstrapolointi /28/.

Pintakartoituksessa voidaan yhdistellä samanlaisia kalliohavaintoja. Paikallisen geologian tuntemus ratkaisee, kuinka suurta interpolointia uskalletaan käyttää hyväksi.

Kun otetaan huomioon, että kallionäytekairaus maksaa n. 250 mk/m (hintataso 1980), ei voida edellyttää, että varsinkaan pitkien tunneleiden tutkimuksissa saataisiin täydellinen kuva rakoilusta, vedenjohtokyvystä ja siten myös injektointitarpeesta. Täysin paikkansa pitävää tietoa kallio-olosuhteista tunnelitasossa saadaan vasta tunnelin louhinnan yhteydessä tai etukäteen tehtävästä pilottitunnelista. Toisaalta tutkimuksia on jatkettava niin pitkälle, että niistä saatavan tiedon aiheuttama kustannussäästö on suurempi kuin lisätutkimukseen uhrattavat varat.

3.4

Tunnelin vuotovesimäärän arvioiminen

Olettamalla kallio homogeeniseksi ja isotrooppiseksi, jatkuvaksi massaksi voidaan veden virtaus kalliossa määrittää likimääräisesti noudattamalla samoja periaatteita kuin nesteen virtaukselle huokoisessa väliaineessa. Kalliohydrauliikan keskeinen ongelma on hydraulisen potentiaalin jakautumisen selvittäminen. Kun jakautuma tunnetaan, voidaan ratkaista kolmiulotteinen virtaustilanne. Hydraulien potentiaali on muotoa /29/:

$$\Phi = Z + P/\gamma_w \quad (11)$$

Missä Z on etäisyys tarkastelutasosta
 P on vedenpaine
 γ_w on veden tiheys

3.41

Virtausverkon ratkaiseminen

Virtauksen kuvaaminen tapahtuu virtausverkolla, jonka muodostavat virtaus- ja ekvipotentiaalivii-vaparvet, jotka homogeenisessa ja isotrooppisessa tilanteessa leikkaavat kohtisuorasti. Virtausverkosta voidaan päätellä suotautuvan veden määrä. Homogeenisen virtaustilanteen ratkaisemiseksi on kehitetty useita ratkaisumenetelmiä /1/.

Anisotrooppista virtaustilannetta voidaan kuvata laskemalla virtausverkko finiitti-elementti-menetelmällä. Homogeeninen virtausalue vastaa yhtä elementtiä. Elementit liittyvät toisiinsa solmupisteiden välityksellä. Tuntemattomat solmuparametrin arvot saadaan virtaus- ja potentiaaliyhtälöistä. Lähtötietoina tarvitaan mm. vertikaalinen ja horisontaalinen vedenjohtavuus, rakoilun tiheys, suuntaus ja rakopintojen ominaisuudet /55,63/.

Menetelmän käyttö on oikeutettua, kun lähtötiedot saadaan määritettyä tarkasti. Vaikka laskentatarkkuus on hyvä, ei menetelmän antama tulos ole tarkempi kuin annetut lähtöarvot. Lähtötietojen tarkempi selvittäminen tulee kysymykseen kalliovarastojen, kuten ydinjättesuojien, suunnittelussa.

3.42

Yksinkertaistetut laskentakaavat

Tunneliin tulevan vesimäärän arvioimisessa voidaan käyttää laskentakaavoja, joiden lähtöoletukset ovat /25/:

- kallion pinta on vaakasuora ja se on vakioveden-paineen alainen
- kallion pinta on välittömässä kosketuksessa pohjaveteen
- kallion vedenjohtavuus on vakio syvyydestä riippumatta
- tunnelin mitat säteen suunnassa ovat vähäiset verrattuna muihin mittoihin

Vuotovesimäärä on Gustafsson et al mukaan /25/:

$$Q = \pi k T L \quad (12)$$

Wibergin (1961) mukaan /19/

$$Q = \frac{2 \pi k T L}{\ln(T/R - \sqrt{(T/R)^2 - 1})} \quad (13)$$

Kaavoissa Q on tunneliin tulevan vuotovedenmäärä (m³)
 k on kallion vedenläpäisykerroin (m/s)
 T on syvyys pohjaveden pinnan alapuolella (m)
 R on tunnelin ekvivalenssisäde (m)
 L on tunnelin kokonaispituus (m)

Forsmarkin tunneleiden yhteydessä arvioitiin (Carlsson, Olsson 1977) tunnelin vuotovesimäärää kaavan (13) avulla. Heikkousvyöhykkeisiin sijoitetuissa kallionäyttekairausrei'issä suoritettut vesimenekkimittaukset antavat kallion vedenjohtavuudesta keskimääräistä suuremman arvon. Tämä pyrittiin eliminoimaan huomioimalla kallion seisminen nopeus laskelmissa.

Todellinen vuotovesimäärä oli noin 50 % laskettua pienempi. Poikkeaman syiksi esitettiin /19/:

- esi-injektointi vähensi neitseellistä vuotovesimäärää
- seisminen nopeus ei välttämättä ilmaise vettä vuotavaa ruhjetta
- lähtöoletukset

Laskelmia kannattaa epätarkkuudesta huolimatta tehdä, sillä ne voivat paljastaa epätavallisen suuret vuodot ennakolta

4. TUNNELILINJAN JAKAMINEN TIIVEYSLUOKKIIN JA TOIMENPIDE-ENNUSTEEN TEKEMINEN

Tunnelin injektointitarve määräytyy (kuva 1.) tiiveystavoitteesta ja toisaalta kallioteknisestä ennusteesta. Erilaisen tiiveystavoitteen perusteella jaetaan tunnelilinja tiiveysluokkiin. Luokka ilmoittaa valmiilla tunnelin osalla sallittavan suurimman vuotovesimäärän muodossa (l/min 100 m tunnelia).

Kallioteknisellä ennusteella jaetaan tunnelilinja vettä kuljettaviin vyöhykkeisiin ja toisaalta alueisiin, joissa ei odoteta vesivaiveuksia. Mikäli tiiveystavoitetta ei ole, määräytyy injektointitarve kallioteknisen ennusteen perusteella. Käytännössä kalliotekninen ennuste tarkoittaa sitä, että esitetään oletetut heikkousvyöhykkeet tunnelin pituusleikkauksessa.

Kun tunnelilinja on jaettu edellä kuvatulla tavalla, voidaan tehdä tiivistystöiden toimenpide-ennuste. Toimenpide-ennuste sisältää:

- määritetään ne alueet, joissa suoritetaan tunnusteluporausta joko säännöllisesti tai kallioolosuhteiden niin vaatiessa
- määritetään alueet, joissa on suoritettava systemaattinen esi-injektointi, ja alueet, joissa on varauduttava esi-injektointiin

Liitteessä 1. on esimerkki tunnelilinjan jakamisesta tiiveysluokkiin ja toimenpide-ennusteen esittämisestä.

Tukholman rakennusvirasto (1977) noudattaa taulukon 4. mukaista tiiveysluokkakajako /11/. Naantali-Turku-kaukolämpötunneli jaettiin tiiveysluokkiin /23/: Vuotovesimäärä alle 3, 5 ja 10 l/min 100 m tunnelia.

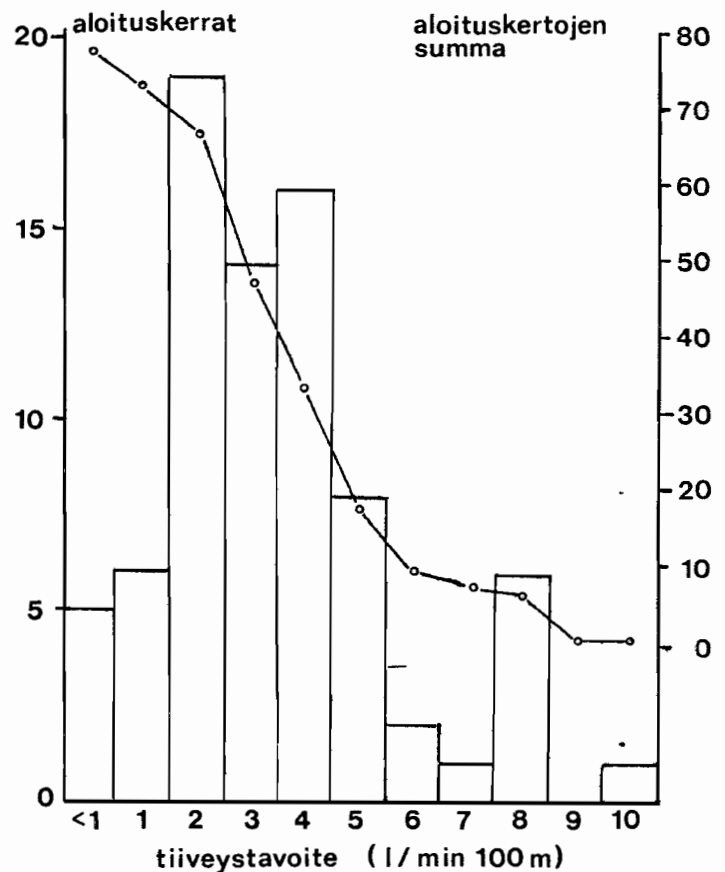
Taulukko 4. Tunnelin tiiveysluokkakajako /11/.

TIIVEYSLUOKKA	I	II	III	IV
TIIVEYSTAVOITE Q (l/min.100 m)	$0 < Q < 2$	$2 < Q < 5$	$5 < Q < 10$	$Q > 10$

Injektointitarpeen määrittämisen yksi tärkeimpiä päätöksiä on tunnelin tiiveystavoitteen määrittäminen. Kun tämä päätös tehdään, lyödään lukkoon suurelta osalta injektointikustannukset, joiden arviointi etukäteen on kylläkin hyvin vaikeaa.

Tiukempi tiiveystavoite merkitsee useampia esi-injektoinnin aloituskertoja, kerralla porattavan määrän kasvua ja lisääntyvää ainemenekkiä sekä injektointiaikaa.

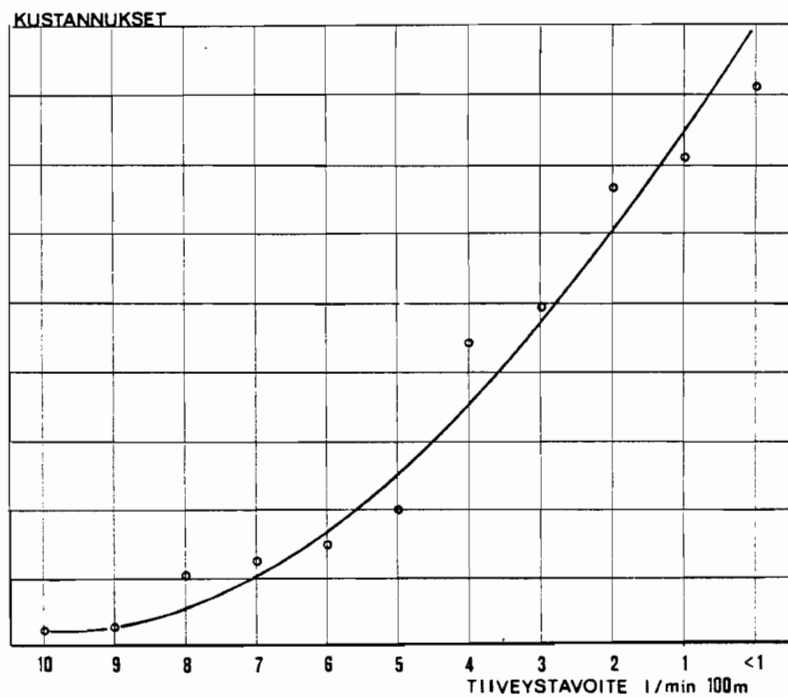
Tiiveystavoitteen merkitystä tutkittiin Vantaan meriviemäritunnelissa tehtyjen vesimenekikokeiden perusteella. Kokeiden tulokset on poimittu tunnelin louhintapäiväkirjasta ja kokeet on suoritettu aikavälillä 14.10.1980-3.4.1981. Kohdassa 5.11 esitettävän injektioinnin aloituskriteerin, kaava (14), perusteella laskettiin vesimenekikokeiden edellyttämät aloituskerrat eri tiiveystavoitteilla.



Kuva 13. Aloituskertojen määrä tiiveystavoitteen funktiona

Viitteessä /69/ on esitetty samassa tunnelissa muodostuneet esi-injektointikustannukset. Niiden perusteella määritettiin yhden aloituskerran hinta. Kuvassa 14. on esitetty näin saadut esi-injektioinnin kustannukset tiiveystavoitteen funktiona.

On huomattava, että vesimenekikokeiden perusteella määritetyt aloituskerrat ja kustannukset koskevat vain tätä esimerkkিতunnelia. Kiristettäessä tiiveystavoitetta 8 (l/min. 100 m):sta 4 (l/min 100 m):ään kasvavat injektointikustannukset nelinkertaiseksi.



Kuva 14. Esi-injektoinnin kustannukset tiiveystavoitteen funktiona.

Kuvassa esitetyssä käyrässä ei ole toisaalta huomioitu niitä kustannuksia, jotka aiheutuvat tiiveystavoitetta kiristettäessä esi-injektointitoimenpiteiden laajuuden kasvusta ja lisääntyvästä jälki-injektointitarpeesta.

5.

LOUHIINNAN AIKAINEN INJEKTOINTITARPEEN MÄÄRITTÄMINEN

Esi-injektointi aloitetaan yleensä tunnustelureiästä tehtyjen havaintojen perustella. Aloituskriteerinä on yleensä ollut subjektiivinen, kokemusperäinen arvio perään tulevasta vesimäärästä. Injektointi on aloitettu, kun louhitussa perässä on havaittu selvää tai huomattavaa virtaavaa vesivuotoa porarei'istä. Raja-arvoina on esitetty 5 l/min yhdestä porausreiästä tai 10 l/min koko katkosta. Määritys on tehty silmämääräisesti.

Viimeaikaisissa tunnelitöissä on vesimenekikokeen antamaa tulosta pidetty injektoinnin aloituskriteerinä ja injektointiaineen valintaperusteena. Vaikeutena ovat olleet menetelmien sekavuus ja standarditulkinnan puuttuminen.

5.1

Injektoinnin aloituskriteerit

Vesimenekikokeen antamaa tulosta voidaan verrata tunnelintiiveystavoitteeseen ja määrittää ne lukuarvot, jotka edellyttävät injektointia. Näin päästään subjektiivisesta tarkastelusta ja töiden aloittaminen voidaan perustella mitattavalla lukuarvolla.

5.11

Ruotsalainen käytäntö

Tukholman rakennusvirasto on kehittänyt oman järjestelmänsä, joka perustuu tehtyihin mallikokeisiin ja käytännön kokemuksiin. Lähtökohtana on vesimenekikokeen antaman tuloksen vertaaminen empiirisesti johdetusta kaavasta laskettuun lukuun.

Esi-injektointi on suoritettava /11/, jos

$$V_{fm} \geq V_g = C \frac{Q}{U p^n} \quad (14)$$

- Missä V_{fm} on vesimenekikokeiden keskiarvo kaikista tunnelipoikkileikkauksessa suoritetuista kokeista (l/min m MPa)
- V_g on laskettu empiirinen raja-arvo (l/min.m MPa)
- Q on sallittu vuotovesimäärä valmiissa tunnelissa (l/min 100 m tunnelia)
- U on tunnelin ympärysmitta (m)
- p on pohjavedenpaine (teoreettinen) tunnelin keskitasossa (MPa)
- n on eksponentti, Tukholmassa $n = 1/2$
- C on vakio, Tukholmassa $C = 1$

Vakio C määräytyy kallion ominaisuuksista ja eksponentti n paikallisista olosuhteista. Vesimenekikoe suoritetaan kaikista injektointia varten poratuista rei'istä. Porauksen laajuus eri tiiveysluokissa selviää taulukosta 4. ja porauskaavio on esitetty kohdassa 6.11.

Koska Tukholman kallioperäsuhteet ja toisaalta olosuhteet ympäristöriskien osalta ovat hyvin samanlaisia Suomessa, ei liene esteitä kaavan (14) kokeiluun myös täällä.

Taulukko 4. Vesimenekikokeen ja esi-injektointin suoritus tiiveystavoitteen mukaan /16/.

Tiiveysluokka ja sallittu vuotovesimäärä Q , (l/min ja 100 m tunnelia)	Vesimenekikoe injektoitavissa rei'issä		Esi-injektoitavat reiät		Injektointiaine	
	Reiät	V_{fm}	Lattia	Seinät ja katto	Sementti	Kemiall.
I $0 < Q < 2$	Kaikissa reuna-rei'issä	$V_{fm} > V_g$	Kaikki	Kaikki reiät	X	X
		$V_{fm} \leq V_g$	Kaikki	Reiät $V_f > V_g$	X	X
II $2 \leq Q < 5$	Kaikissa lattiarei'issä, joka kolmannessa katto- ja lattia-rei'ässä	$V_{fm} > V_g$	Kaikki	Reiät $V_f > V_g$ Reiät $V_f > 2g$	X	(X)
		$V_{fm} \leq V_g$	Kaikki	Reiät $V_f > 2$	X	(X)
III $5 \leq Q < 10$	Joka kolmannessa reuna-rei'ässä	$V_{fm} > V_g$	Kaikki	Reiät $V_f > V_g$ Reiät $V_f > 2g$	X	-
		$V_{fm} \leq V_g$	Kaikki	Reiät $V_f > 2$	X	-
IV $Q \geq 10$	Päätetään raja-arvo V_g :n perusteella	$V_{fm} > V_g$	Päätetään tunnelissa		(X)	-
		$V_{fm} \leq V_g$	Ei esi-injektointia		-	-

X = mahdollinen (X) = todennäköinen

5.12

Käytäntö Suomessa

Vesimenekkekokeisiin perustuvia aloituskriteereitä on esitetty taulukossa 5. Raja-arvot on määritetty kokemusperäisesti tiiveystavoitteen perusteella. Vesimenekkekokeet on suoritettu joko vain tunnustelurei'istä tai myös injektointirei'istä.

Vesimenekkekokeiden raportoinnissa on toivomisen varaa. Käytäntö on ollut, että injektointiraporteissa on vain ilmoitettu, että vesimenekkekokeet on suoritettu.

Tulukko 5. Esi-injektoinnin aloituskriteerit Suomessa

1. Naantali-Turku-kaukolämpötunneli
2. Helsingin metro, kääntöraide Kamppi
3. Meriviemäritunneli, Vantaa
(Tiedot vastaavista työselityksistä)

Kohde	Vesimenekki Q l/min m MPa	Toimenpide	Huomautukset
1.	$Q < 2$ pohjar. $Q \geq 2$ pohjar. $Q < 2$ kattor. $Q \geq 2$ pohjar. $Q \geq 2$ kattor.	ei injektointia injektoidaan tunne- lin pohja kokoperän injektointi	Tunnustelureikä perän pohjaan, lisäk- si kattoon, jos $Q \geq 2$
2.	$Q > 1$ $Q \geq 3$ k.arvo $Q \leq 3$ k.arvo $Q \geq 2$ k.arvo pohjar.	kaikki reiät injek- toidaan, joissa $Q > 1$ täydellinen injek- tointi, lisätään reikiä pohjan täydellinen injektointi, lisä- tään reikiä	Vmkoe injektointi- rei'issä Vmkoe seitsemässä injektointiviuhkan reiässä Vmkoe seitsemässä injektointiviuhkan reiässä
3.	$Q \geq 2$ kattor.	porataan koko injek- tointiviuhka ja in- jektoidaan	Tunnustelureikä katossa

5.2

Tunnusteluporaus

Tunnusteluporauksen tarkoituksena on antaa havaintoja tunnelilinjalla olevasta kalliokatosta, suurten rakojen tai heikkousvyöhykkeiden ja vetäjohtavien vyöhykkeiden esiintymisestä. Injektointitarvetta määritettäessä suoritetaan tunnustelureiässä vesimenekkiprobe.

Suunniteltaessa tunnusteluporausta on otettava huomioon:

- reiän käyttömahdollisuus muuhun tarkoitukseen
- louhintarytmin vaatimukset
- poraustekniikka
- kallio-olosuhteet

Tunnustelureikiä voidaan käyttää louhintakatkon reikinä. Tällöin niiden poikkeama tunnelin suunnasta on oltava niin pieni, ettei tunnelin poikkeileikkaus sanottavasti muutu. Yleensä reikää käytetään yhtenä injektointiviuhkan reikänä. Mikäli injektointia ei suoriteta, on reikä juotettava umpeen ainakin profiilin ulkopuolelle jäävältä osalta.

Tunnustelureikien pituus kannattaa valita niin, että se kattaa usean katkon edellyttämän matkan esim. päiväetenemän verran, jolloin poraus voidaan suorittaa louhintarytmiä sekoittamatta. Systemaattista tunnusteluporausta tehtäessä on tunnusteltua kalliota aina oltava perän edessä vähintään katkon verran.

Porakalusto voi olla samaa kokoa kuin louhintaporauksessa. Rikkonaisessa kalliossa on edullista käyttää suurempaa reiän halkaisijaa, jolla varmistetaan reiän pysyminen auki. Paikoin voidaan joutua tunnustelu suorittamaan kallonäytekairauslaitteistolla, jolloin reikä voidaan myös ulottaa pidemmälle.

Reikien pituus edellyttää yleensä jatkotankokaluston käyttöä. Mikäli tunnustelureiät ovat selvästi yläkätisiä, kannattaa porausvaunun puomi varustaa hydraulisella tankojen pidikkeellä. Reiän aloituspaikan suunnittelussa tulee huomioida jatkotankojen käsittelyn hankaluus siten, että porari voi lisätä tankoja maasta käsin, mikäli käytettävissä ei ole nostolavaa.

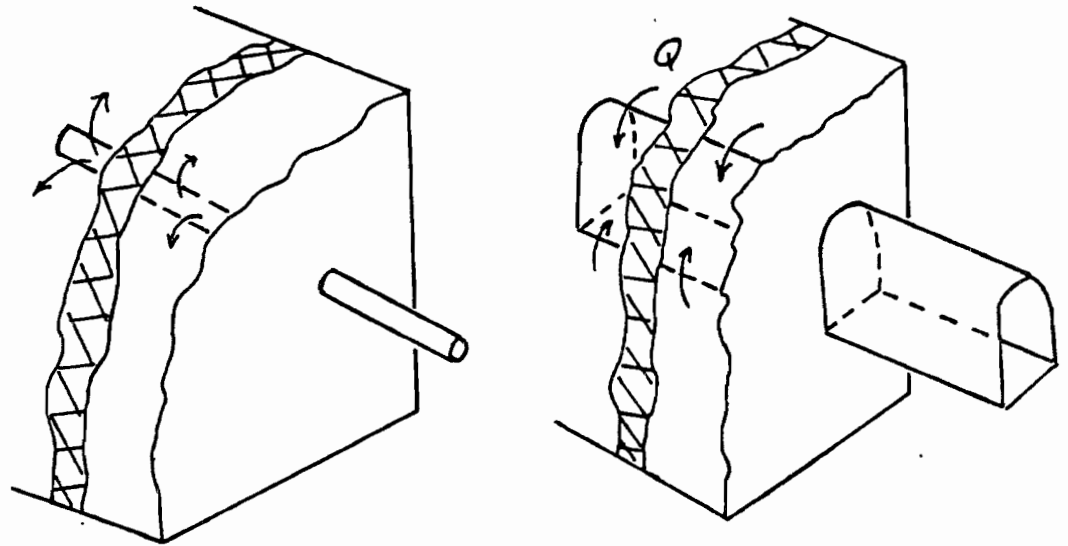
5.3

Vesimenekkikoe

Vesimenekkikokeen käyttöä injektointitarpeen määrittämisessä voidaan perustella seuraavasti:

Kuvassa 15. esitettyyn tunneliin vuotava vesimäärä on Q . Se on aikayksikössä, muodostuvaa pinta-alaa ja vallitsevaa pohjavedenpainetta kohti muotoa ($l/min\ m^2\ MPa$). Samaan kohtaan poratussa reiässä suoritetaan vesimenekkikoe käyttäen pohjavedenpaineeseen nähden kaksinkertaista painetta. Virtaus tapahtuu tällöin reiästä kallioon yhtä suuren paineen alaisena kuin vuotovesivirtaus tunneliin. Kokeen vesimenekki voidaan mitata ja se on muodostuvaa pinta-alaa, aikayksikköä ja painetta kohti muotoa ($l/min\ m^2\ MPa$). Kyseessä on siis mittakaavakertoimen määrittäminen $/10/$.

Edellä esitetty empiirinen kaava (14) vesimenekkikokeen raja-arvolle perustuu samaan ajatuskulkuun.



Kuva 15. Mittakaavatekijä vuotovesimäärän arvioinnissa.

Vesimenekkekoe suoritetaan yleensä porauksen yhteydessä 0.5 MPa:n ylipaineella pohjaveden paineeseen nähden. Koko reikä koeistetaan yhdellä kertaa. Tulppa eli mansetti on asetettava mahdollisimman pitkälle reikään, jotta tunnelin reunan rikkonainen vyöhyke ei häiritse mittauksia. Mittauksessa paineen on pysyttävä viisi minuuttia, jolloin tasapainotila katsotaan saavutetuksi /11,70/.

Vesimenekkekoe suoritetaan tunnelissa yleisesti käsipumpulla. Varsinkin suurilla menekeillä painetta on vaikea pitää vakiona. Kun koe suoritetaan yhtäaikaaisesti porauksen kanssa, ei tehokkaamman pumpun tuonti perään ole aina mahdollista.

Vaiheittainen vesimenekkekoe voidaan suorittaa pidemmissä rei'issä kaksoismansetin avulla. Käytännön vaikeutena on usein reiän pysyminen auki.

Mittaus aloitetaan vuotavista rei'istä. Mahdolliset ohivuodot muihin reikiin, rakoihin tai lustiin on merkittävä muistiin. Suoritetun mittauksen jälkeen on mansetit pidettävä suljettuina, kunnes kaikki reiät on käyty läpi /16/.

Vesimenekkekokeen tulos ilmoitetaan muodossa (l/min m MPa). Suorittamista varten tulee pohjaveden paine ilmoittaa pääpiirustuksissa. Kokeen tulostus ja havainnot kokeen aikana merkitään lomakkeelle /11/.

6.

ESI-INJEKTOINNIN SUUNNITTELU JA TYÖN SUORITUS

Injektoinnin suunnittelu voidaan jakaa injektointitarpeen ja injektointityön suunnitteluun. Tässä käsitellään jälkimmäistä, jonka tulokset ilmoitetaan urakka-asiakirjoissa kalliorakennesuunnitelmissa ja työselityksissä. Suunnittelun lähtökohta on tieto siitä, että tunnelilinjalle on määritetty tietyt alueet, joilla todennäköisesti tarvitaan esi-injektointia.

Varsinaiset työsuunnitelmat selvittävät:

- miten injektointireiät porataan (perusteellinen porauskaavio esitetään suunnitelmassa).
- miten reiät käsitellään
- mitä aineita käytetään ja minkälaisia seossuhteita tulee käyttää
- mitkä ovat injektoinnin maksimipaineet
- injektoinnin lopetuskriteerit
- miten työtä valvotaan

Mikäli on ennakoitavissa erikoistilanteita, suuria yllättäviä vesivuotoja yms., on suunnitelmissa varauduttava myös niihin.

Injektointityön luonteeseen kuuluu, että suunnitelmia joudutaan muuttamaan työn aikana tai jopa laatimaan täysin uudet suunnitelmat. Työselitykset on kuitenkin laadittava ennen louhintatyön aloittamista. Niitä käytetään laskelmien pohjana tarjouspyyntövaiheessa, ja toisaalta niillä luodaan etukäteen pelisäännöt, joilla varmistetaan työn onnistuminen rakennuttajan edellyttämällä tavalla.

6.1

Porauskaaviot

6.11

Poraukseen vaikuttavat tekijät

Esi-injektoinnilla pyritään luomaan kartiomainen vyöhyke, jonka sisälle tunneli injektoinnin jälkeen louhitaan. Injektointiviuhkan poraukseen vaikuttavat useat tekijät:

- tunnelin tiiveystavoite
- louhintarytmin vaatimukset, louhintakatkon pituus
- porauskalusto
- kallion ominaisuudet, mahdollisuus porata pitkiä ja aukipysyviä reikiä

Koska viuhkan poraukseen vaikuttaa merkittävästi urakoitsijan kalusto ja louhintarytmi, jätetään reikien pituus yleensä urakoitsijan päätettäväksi. Esi-injektointiviuhkan tulee kuitenkin peittää 2-5 katkon edellyttämä matka.

Suunnittelussa tulee eritoten kiinnittää huomiota tunnelin pohjan injektointiin. Jälki-injektoinnissa saattaa olla vaikeuksia poraussoijan ja pohjaan jäävän murskeen takia. Jälki-injektointireikien poraus edellyttää joko pohjan puhdistamista tai suojarputkien käyttöä, mitkä lisäävät huomattavasti jälki-injektointikustannuksia.

Ruotsalaisen mallikokeen /25/ mukaan tiivistysvaikutus on 36-45 % kun injektointiverho on vain tunnelin yläpuolella ja 67-75 %, kun injektointiverho on tasaisesti ympäri tunnelin. Pienissä tunneleissa kannattaakin suorittaa täydellinen esi-injektointi koko perän ympäri.

Perussääntöjä esi-injektointiviuhkan poraukselle ovat /11/:

- reikien päätepisteiden välinen etäisyys on oltava pienempi kuin 3 m.
- reikien on ulotuttava 2.5-4.5 m tunnelin teoreettisen profiilin ulkopuolelle tunnelin jännevälistä riippuen
- injektointia kalliota on oltava 2-5 m, mieluummin yhden louhintakatkon pituuden verran tunnelin päädyn edessä

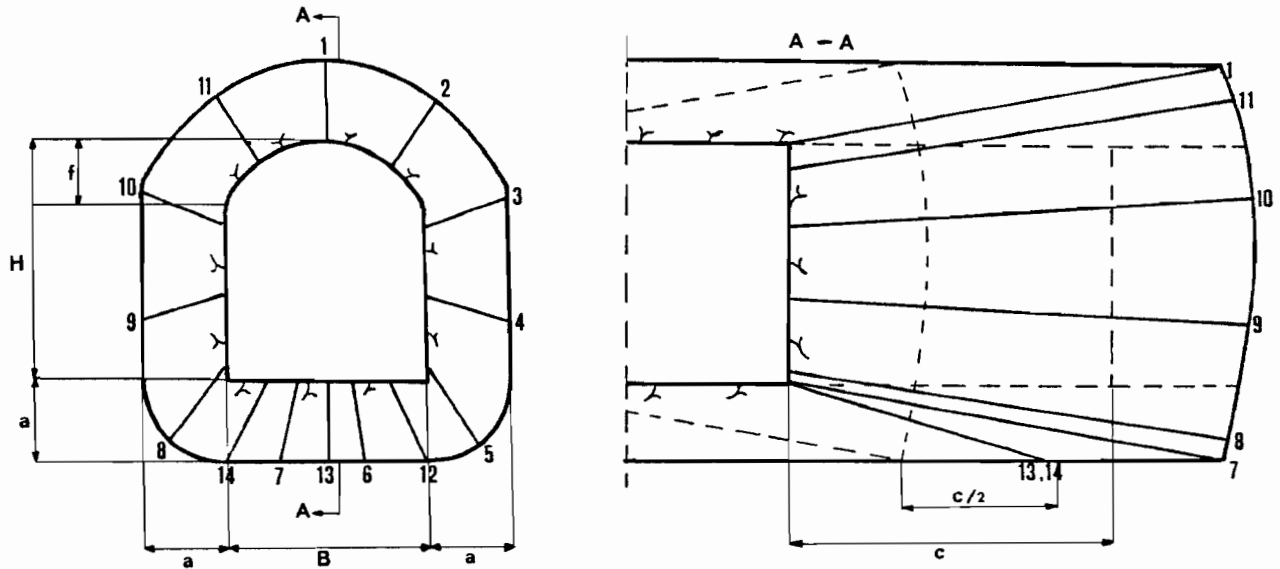
Reikien päätepisteiden etäisyyttä voidaan lyhentää tiiveystavoitteen tai kallion rakoilun perusteella lisäämällä reikiä. Reikäväli lyhimmillään tunnelin pohjaa injektoitaessa on luokkaa 1.0-1.5 m.

Taulukko 6. Injektointiviuhkan leveys muutamilla tunnelin poikkileikkauksilla /11/.

H (m)	B (m)	f (m)	a (m)
8.8	20.3	3.5	4.5
6.75	9.2	1.9	3.5
5.6	8.1	1.6	3.5
2.4	2.2	0.4	2.5
5.0	4.5	0.9	3.0

Selitykset (ks. kuva 16):

H on tunnelin korkeus
 B on tunnelin leveys
 f on kaarevan osan korkeus
 a on injektointireikien päätepisteiden etäisyys teoreettisesta profiilista



Kuva 16. Poraus- ja injektointikaavio /11,26/.

Liitteessä 2. on esitetty erään poikkileikkauksen vaatima injektointiviuhka em. perussääntöjen perusteella.

Kun rakoiluolosuhteet poikkeavat huomattavasti odotetusta, voidaan joutua muuttamaan reikien suuntausta tai lisäämään reikiä injektointiviuhkaan. Periaatteessa injektointireiän tulisi leikata mahdollisimman monta rakoa tai olla kohtisuorassa päärakoa vasten. Esi-injektoinnissa tähän ei ole aina mahdollisuutta, sillä työn nopeuttamiseksi pyritään porauskaavio pitämään vakiona.

Esi-injektointireiät porataan yleensä jatkotankokalustolla. Poraus aikaan vaikuttavat mm. poran halkaisija, jatkotankojen määrä ja luonnollisesti kallion ominaisuudet. Porausteho laskee tankomäärän funktiona. Injektointiviuhkan poramäärää valittaessa on pyrittävä siihen, että poraus aika on korkeintaan yksi vuoro.

6.12

Injektointireikien poraaminen

Injektointireikien porauksessa käytetään yleensä samaa porakalustoa kuin louhintaporaauksessa. Reikien läpimitta vaihtelee välillä 30-64 mm. Suuremmat reiät pysyvät helpommin auki ja helpottavat tulpan asettamista. Usein edellytetään injektointiputkiston takia, että injektointireiän on alkuosaltaan 0.8-1.5 m matkalta oltava läpimitaltaan vähintään 50 mm /65/.

Voimakas rakoilu tai ruhjeet voivat vaikeuttaa porausta, varsinkin pitkiä reikiä tehtäessä. Tällöin voidaan porata ja injektoida vaiheittain. Vaiheinjektoinnissa ovat seuraavat työvaiheet: Ensimmäisen vaiheen poraus, ensimmäisen vaiheen injektointi, toisen vaiheen poraus, toisen vaiheen injektointi jne. Tulppa asetetaan aina reiän suulle ja injektointipainetta lisätään kunkin vaiheen jälkeen /65/. Esi-injektoinnin yhteydessä vaihteaisuutta on syytä kuitenkin kustannussyistä välttää.

Tukholman rakennusviraston ohjeiden mukaan /11/ tiiveysluokissa II ja III porataan katto- ja seinärei'issä vain joka kolmas reikä. Injektoinnin jälkeen on edellytetty porattavaksi tarvittaessa tarkistusreiät näiden reikien viereen. Myöhemmin on todettu /16/, että tarkistusreikien poraus vie ylimääräistä aikaa ja urakoitsijoiden on ollut vaikea ennustaa reikien porauksen määrää. Tämä on korjattu niin, että porataan heti riittävästi reikiä injektointiviuhkaan ja käytetään ylimääräisiä reikiä tarkistusreikinä.

6.2

Varsinainen injektointityö

6.21

Reikien käsittely

Injektointireikien käsittely aloitetaan aina huolellisella reikien huuhtelulla, jonka tarkoituksena on puhdistaa reikä porausjätteistä. Huuhtelun jälkeen on ensimmäinen toimenpide vesimenekkikoekiden suorittaminen vaadituissa rei'issä.

Esi-injektoinnin yhteydessä suoritetaan harvoin rakohuuhtelua, mutta mikäli vesimenekkikoetta ei vaadita tulisi reiät pitää paineen alaisena muutama minuutti ajan. Koeistuksella voidaan tehdä havaintoja rakojen yhteyksistä reikiin ja toisaalta kartoittaa eri reikien injektointimahdollisuuksia.

Vesimenekkikokeen tai painekoeistuksen perusteella voidaan "saman arvoiset" reiät erottaa ryhmiksi. Ryhmän reiät injektoidaan yhtäaikaaisesti käyttäen monireikälaitteistoa. Materiaalivirtausta on seurattava jatkuvasti. Kun paine rei'issä alkaa nousta, on reikien injektointi lopetettava yksitellen.

Esi-injektointireiät injektoidaan yleensä koko reikäpituudeltaan kerralla. Injektointi aloitetaan pienimenekkisistä rei'istä tai reikäryhmistä. Pääsääntöisesti on pyrittävä aloittamaan injektointi lattiarei'istä, jonka jälkeen edetään ylöspäin kattoreikiä kohti /38,47/.

Sementti-injektoinnissa on tärkeää pitää massa jatkuvassa liikkeessä ja se on ohjattava kallioon tasaisena virtana välttämällä ilmakuplien muodostumista. Injektoinnin pidempiaikainen keskeyttäminen johtaa usein koko injektoinnin epäonnistumiseen. Kahden perättäisen injektoinnin välillä samassa reiässä ei saisi kulua tuntia pidempää aikaa /47/.

Yhdistetyssä sementti-kemiallisessa injektoinnissa aloitetaan sementti-injektoinnilla niissä rei'issä, jotka ylittävät aineen valintakriteerin. Lopuksi kaikki reiät käsitellään kemiallisesti. Ennen kemiallista injektointia on sementti-injektoidut reiät huuhdottava huolellisesti sementtilaastista /69/.

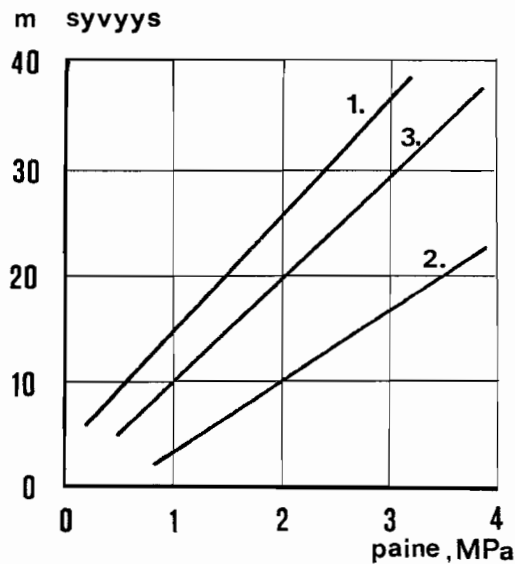
Huolimatta tarkoista ohjeista on injektoinnin onnistuminen suurelta osalta kiinni tekijöiden ammattitaidosta ja kokemuseräisistä tiedoista.

6.22

Injektointipaineen valinta

Korkein sallittu injektointipaine tulee määrittää aina olosuhteiden mukaan ottaen huomioon kalliopeitteen paksuus ja rakoilu /52/. Nyrkkisääntönä on, että käytetään suurinta painetta, joka ei vielä vahingoita kallion rakennetta. Mitä suurempaa painetta voidaan käyttää sitä paremmin aine tunkeutuu kallion rakoihin.

Paineen määrittämiseksi on kehitetty useita sääntöjä. Anglosaksisissa maissa käytetään alhaista painetta, 0.02 MPa/syvyys pinnasta, euroopassa sääntönä on 0.1 MPa/syvyys m /21/. Injektointipaineen tulee ylittää hydrostaattisen paineen 2-3.5 kertaisesti /66/. Pohjoismaissa tehdyissä tunnelitoissa korkeimmat sallitut injektointipaineet ovat olleet 1.5-3.0 MPa.



Kuva 17. Suurin sallittu injektointipaine syvyyden funktiona. 1. Heikkolaatuinen kallio /4/, 2. Hyvälaatuinen kallio /4/, 3. Euroop-palainen sääntö /21/.

Kemiallisessa injektoinnissa voidaan sallia hieman korkeamman paineen käyttö, mikäli injektoidaan jo sementillä injektointia reikää /69/.

6.23

Massamäärät ja lopetuskriteerit

Ennen työn aloittamista on selvitettävä miten injektointi lopetetaan maksimipaineessa ja miten massan seossuhteita muutetaan eri tapauksissa.

Injektoinnin onnistumista tietyllä seossuhteella voidaan tarkkailla seuraamalla injektointipaineen kehittymistä. Jos paine ei nouse aloitusseoksella, on siirryttävä sakeampaan seokseen, kunnes saavutetaan seossuhde, jolla paine nousee tasaisesti. Mikäli paine nousee nopeasti, saattaa kyseessä olla tukkeutuma liian paksun laastin takia. Tällöin reikä on huuhdeltava ja injektointi on aloitettava uudestaan laihemmalla seoksella /66/.

Sementti-injektointi aloitetaan laihalla seoksella, vesi-sementtisuhteella 4:1 (poikkeustapauksissa 8:1) ja lopetetaan seoksella 1:1 (poikkeustapauksissa 0.5:1) /52/.

Ruotsalaiset aloittavat yleensä seoksella 3:1. Siirtyminen sakeampaan seokseen tapahtuu joko tietyn ajan kuluttua tai kun tietty määrä on pumpattu ja paine ei ole noussut. Kun käytetään aikakriteeriä, on suunnittelussa otettava kaluston teho huomioon. Taulukkoon 7. on kerätty eri lähteistä ohjeita seossuhteiden injektointimiseksi.

Taulukko 7. Eri seossuhteiden injektointi

Seossuhde	Kriteeri			
/lähde/	/16/	/36/	/41/	/65/
8:1-5:1				15-20 min x)
4:1			asteit-	15-20 min
3:1	30 min	200 kg	tain	15-20 min
2:1	30-50 min	300 kg		15-20 min
1:1	10 min	400 kg	10 min	15-20 min
0.5:1	xx)	400 kgxx)	xx)	xx)

x) poikkeustapauksissa

xx) seossuhteeseen 0.5:1 siirryttään, mikäli menekki on voimakasta seossuhteessa 1:1

Lopetuskriteerit suurimmassa sallitussa paineessa eri lähteiden mukaan ovat:

- massan menekin tulee pysähtyä paineessa, joka ei alita maksimipainetta 20 % ja paineen on pysytävä tällöin 5 minuutin ajan /16/.
- pumpataan maksimipaineella ja menekki on pienempi kuin 5 l/min/reikä /41/.
- menekin katsotaan olevan lopussa, kun pumpun tämän lyöntiväli on kasvanut n. 15 sekunniksi /38/.

Kemiallisessa injektoinnissa massan koostumus pidetään yleensä samana. Injektointi lopetetaan yksinkertaisesti, kun menekkiä ei enää ole tai käytetään jotain muuta lopettamiseksi.

Kemiallisen aineen menekkiä voidaan säädellä geeliytymisaikaa muuttamalla. Geeliytymisaikoina on käytetty 15-60 min aineesta riippuen.

6.3

Injektointityön valvonta

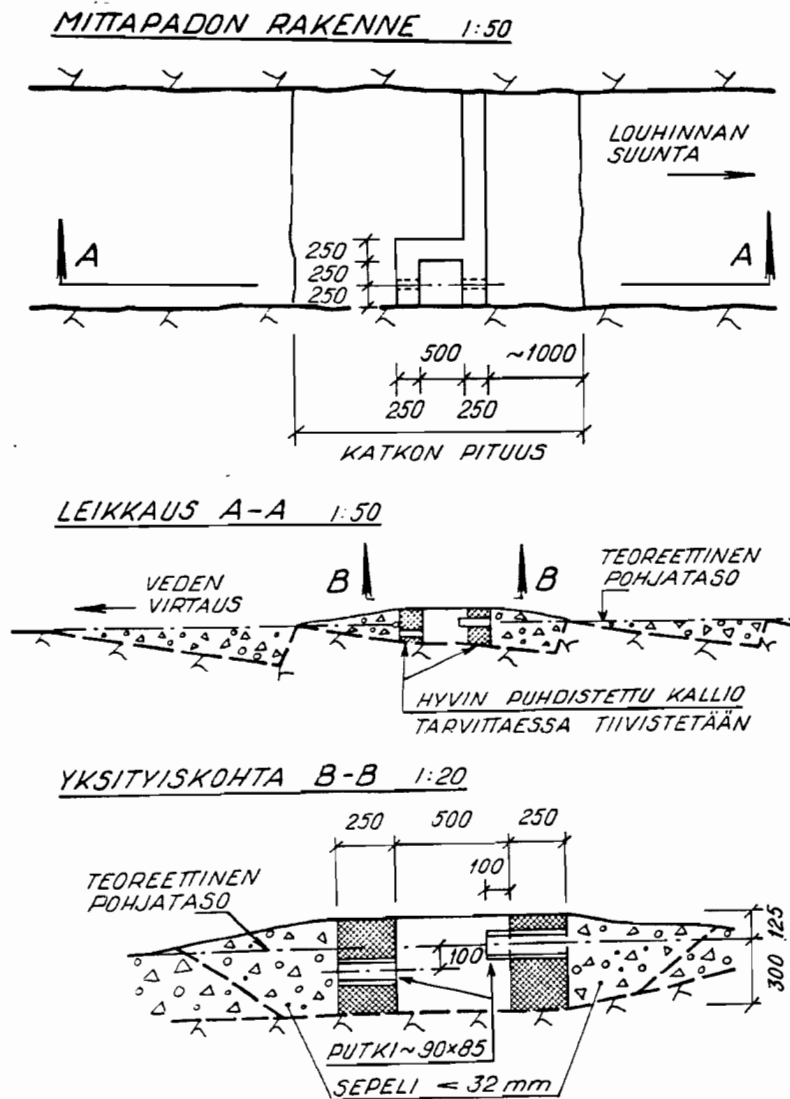
6.31

Injektoinnin onnistumisen toteaminen

Esi-injektoinnin onnistumista on vaikea valvoa. Injektoinnin jälkeen voidaan suorittaa injektointirei'issä tai poratuissa tarkistusrei'issä vesimenekkimittaus. Mittaustulosta verrataan ennalta määrättyyn arvoon. Mikäli vesimenekkimittauksia ei tehdä, voidaan seuraavan katkon porauksen yhteydessä todeta injektoinnin riittävyys. Jos rei'issä esiintyy runsasta vesivuotoa, on injektointia jatkettava.

Välillisesti esi-injektoinnin onnistuminen voidaan todeta mittaamalla tunneliin tulevan vuotoveden määrä, mittaamalla pohjavedenpaine tunnelia ympäröivässä kalliossa tai pohjaveden korkeuden muutoksista tarkkailuputkissa.

Välilliset menetelmät toimivat lähinnä jälki-injektointitarpeen toteamisen apuna. Vuotovesimitaus suoritetaan mittapadoista tai pumppukaivoista. Luotettava mittaus voidaan tehdä yleensä vain kerran viikossa, esim. maanantaina aamulla ennen töiden alkua, jolloin louhinnasta aiheutuvat vedet eivät vääristä mittaustulosta.



Kuva 18. Mittapadon rakenne /11,70/.

Seuraamalla rakovedenpaineen muutoksia tunnelin ympärillä voidaan ohjata injektointityötä. Ruotsalaiset /2/ ovat kehittäneet mittauslaitteen, jolla rakovedenpaine voidaan mitata. Mittareita asetetaan n. 50 m:n välein peränajon edistyessä sekä useampia heikkousvyöhykkeisiin. Mittaustuloksia verrataan ennakolta määritettyihin arvoihin. Injektointia jatketaan, kunnes hyväksyttävä vedenpaine saavutetaan.

6.32

Pöytäkirjat

Injektointityön suoritusta voidaan valvoa vain työn aikana tehtyjen havaintojen perusteella. Kaikki injektointityön onnistumiseen vaikuttavat seikat tulee kirjata pöytäkirjoihin. Koska injektointityön kehittäminen on hyvin pitkälti kiinni kokemusperäisistä tiedoista, ovat kaikki tiedot esim. "ei vesimenekkiä" hyödyllisiä.

Pöytäkirjaa tulee pitää erikseen sekä injektointityöstä että vesimenekikokeista. Injektointipöytäkirjoista ilmenevät: /69/

- injektointiaika, jokaiselle reiälle tai reikäryhmälle erikseen
- reiän numero ja pituus
- injektointipaine ja sen vaihtelut
- injektointiaine sekä eri seoserät
- massamenekit reikäkohtaisesti
- reikien ja menekin kokonaismäärä
- injektointiaineiden hukka
- lisäaineiden käyttö

Kemiallisen injektoinnin pöytäkirjasta tulee lisäksi ilmetä /36/ käytetyt seokset ja geelilytymisaajat. Vesimenekikokeen pöytäkirjasta tulee ilmetä:

- kokeen kesto aika
- reiän pituus
- pumpattu veden määrä
- paine, MPa
- vesimenekki (l/min m MPa)

Yhdestä injektointiviuhkasta tai -kerrasta vaaditaan vielä erillinen piirros, josta ilmenevät reikien sijainti, pituus, ainemenekki rei'ittäin ja vesimenekit rei'issä /70/.

Uusissa injektointilaitteistoissa on elektroninen mittauslaitteisto, joilla saadaan piirturimuodossa massamäärät, paineet ja niiden vaihtelut ajan funktiona. Tukholman rakennusvirasto edellyttää raportoinnin tapahtuvan em. piirturimuodossa /16/.

6.4

Esi-injektoinnin sovittaminen louhintarytmiin

6.41

Esi-injektoinnin vaatima aika

Esi-injektoinnin merkittävin haittapuoli on louhinnan keskeytyminen injektoitavassa perässä. Ongelmaa pahentaa se, ettei injektointiin kuluva aikaa voida ennustaa tarkasti. Toimenpiteet, joilla pyritään rajoittamaan injektointiaikaa, ovat usein ristiriidassa työn tuloksen kanssa.

Tunnustelu- ja injektointiporaukseen kuluva aika on ennakoitavissa, sikäli kun porattava metrimäärä/kerta pysyy samana. Myös vesimenekkiekoe on ruutiinistöä, joka voidaan suorittaa osittain jo muiden reikien porauksen aikana. Mikäli reikiä kokeen perusteella lisätään, on se kannattavinta tehdä välittömästi. Porauslaitteen edestakainen siirtäminen lisää kokonaisaikaa.

Varsinaisessa injektointityössä ei vesimenekin tai muun toimenpiteen perusteella voida ennustaa tarkasti reikään kuluva massamäärää. Massamäärän kasvaessa kasvaa myös injektointiaika. Aikaa voidaan lyhentää käyttämällä entistä tehokkaampia pumppuja ja injektoimalla useita reikiä kerralla. Injektointiaineiden ja seossuhteiden oikealla käytöllä on myös merkitystä injektointiaikaan.

6.42

Louhinnan jatkaminen injektoidulla alueella

Sementti-injektoinnin jälkeen voidaan louhintaporaukseen ryhtyä 5-6 tunnin kuluttua. Vantaan meriviemäritunnelissa saatujen kokemusten perusteella voidaan kemiallisen injektoinnin jälkeen ryhtyä välittömästi louhintaporaukseen injektoinnin loputtua /11,69/.

Ruotsalaiset esittävät, että poraukseen voidaan ryhtyä 2 m:n etäisyydellä injektoidusta reiästä aikaisintaan kahden tunnin kuluttua. Tulppia tulee pitää rei'issä 3-5 tuntia /11,16/.

Esi-injektoidulla alueella on reunareikien panostusta kevennettävä taulukon 8. mukaisesti.

Taulukko 8. Louhinnan rajoitukset esi-injektoidulla alueella /11,70/.

	panostus kg/reikä	räjähdys- aine	panostus kg/m	räj.aine	suurin reikäet.
reunareikä katossa tai seinässä	max 0,2	Dynamex A tai vas- taava	0.24	Gurit A	0,6 m
reunareikä pohjassa	max 0,5	Dynamex A tai vas- taava	max 0,5	Dynamex A tai vas- taava	0,6 m
reunareian viereinen avarr.reikä	max 0,5	Dynamex A tai vas- taava	0,40	Nabit A tai vas- tava	-

Taulukossa Dynamex A vastaa Suomessa käytettävää dynamiittia, Gurit A forsiittiputkipanoksia. Nabit A:n tilalla voidaan käyttää aniittia /72/.

6.43

Systemaattinen esi-injektointi

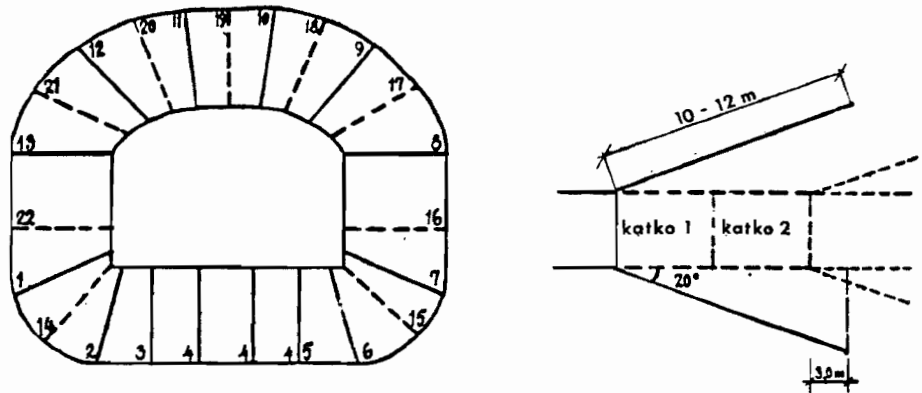
Systemaattiseen esi-injektointiin ryhdytään, kun tunnelin tiiveystavoite on tiukka. Työn onnistuminen edellyttää selviä sääntöjä:

- injektointitarpeen määrittämiseen
- injektointiviuhkan poraamiseen ja sen täydentämiseen tai muuttamiseen
- massamäärien injektoimiseen
- oikeiden aineiden valitsemiseen
- louhintatyön jatkamiseen

Edeltävissä kappaleissa on käsitelty em. sääntöjen laatimiseen liittyviä asioita. Yhteenvetona esitetään tärkeimmät systemaattisessa esi-injektointissa tehtävät toimenpiteet.

- porataan tietty määrä injektointireikiä
- suoritetaan rei'issä vesimenekikokeet (aloitetaan jo porauksen aikana)
- porataan lisäreiät tarvittaessa
- siirretään poruslaite perästä
- tuodaan injektointikalusto paikalle ja aloitetaan injektointi ohjeiden mukaan

Esimerkkinä suoritetusta systemaattisesta esi-injektoinnista on Göteborgissa Göta-joen ali louhitun 3.5 km pitkän tunnelin injektointityöt /37/. Tiiveystavoite oli 2 l/min, 100 m tunnelia ja tunnelin poikkipinta-ala on 24 m². Injektointikaavio-osta porattiin ensin 14 reikää. Vesimenekikokeiden perusteella täydennettiin kaaviota, maksimireikämäärä oli 23 kpl.



Kuva 19. Systemaattinen esi-injektointi, poraus-
kaavio /37/.
Yhtenäinen viiva: porataan aina
Katkoviiva: vesimenekikokeen perusteella
porattavat lisäreiät.

Mikäli tunnelin tiiveystavoite tai olosuhteet eivät edellytä systemaattista esi-injektointia, voidaan muulloin noudattaa tiettyä järjestelmää: tunnusteluporaus-vesimenekikoe-täydennysporaus-vesimenekikoe-lopullisen injektointiviuhkan poraus-injektointi.

6.5

Yllättävien vesivuotojen esi-injektointi, erikoistapaukset

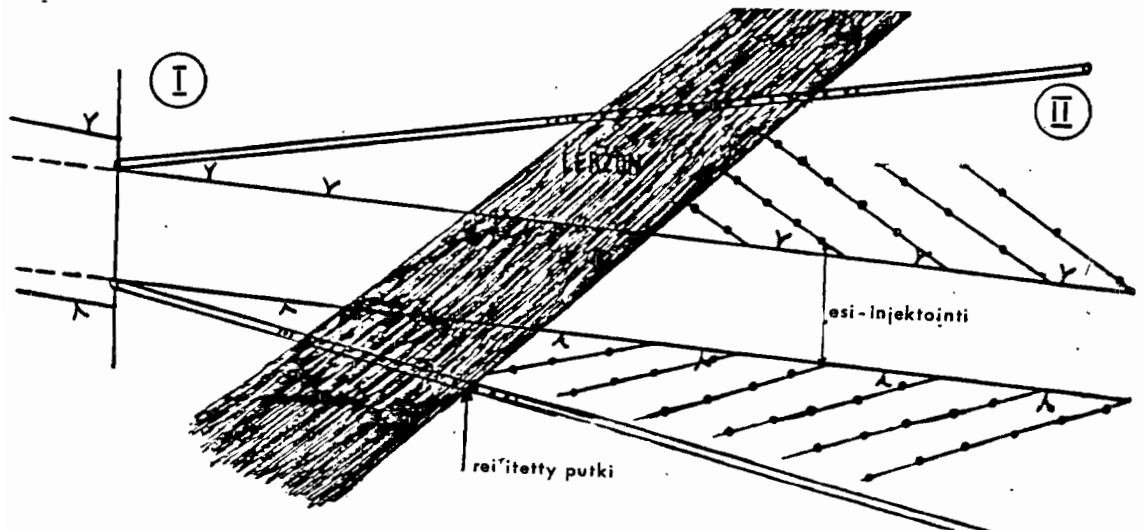
Yllättäviä, suuria vesivuotoja syntyy, kun tunneli louhitaan syvälle ja yläpuolella on vesistö, johon syntyy yhteys avoimen rakoilun takia. Rakovyöhykkeeseen muodostuu täysi vesipaine, joka pyrkii huuhtomaan raot ennen injektointiaineen jähmettymistä.

Tällaista vyöhykettä tulee lähestyä riittävän pitkällä tunnustelurei'illä, jotta vyöhykkeeseen ei mennä louhimalla, koska esi-injektoinnin onnistumismahdollisuudet ovat jälki-injektointia paremmat. Injektoinnilla on tarkoitus saada aikaan nopeasti kovettuva suoja. Tällaisessa ns. shokki-injektoinnissa on käytettävä erittäin tehokkaita laitteita ja nopeasti laajenevia aineita.

Göta-joen alittavan tunnelin louhinnassa osuttiin kesällä 1979 heikkousvyöhykkeeseen, jossa vuotavan veden paineena oli 1.2 MPa. Vyöhykettä lähestyttiin poraamalla tunnustelureiät kallionäyttekai-rauslaitteistolla. Injektointiaineen pursuaminen pintarakojen kautta estettiin vaahdolla, joka paisuu voimakkaasti jouduttuaan veden kanssa kosketuksiin. Vaahdolla pystyttiin tukkimaan suurimmat pintaraot /12/.

Tämän "verhon" taakse pumpattiin varsinainen injektointiaine käyttäen korkeata ja tasaista painetta (5.0-8.0 MPa) tilavuusvirran nopeuden ollessa alhainen (n.0.5 l/min) /12,36/.

Heikkousvyöhykkeissä joudutaan usein etenemään lyhennetyin katkon pituuksin, jolloin injektointikaaviot tulee suunnitella erikseen. Kuvassa 20. on esitetty Göteborgissa käytetty esi-injektoinnin järjestely. Heikkousvyöhykettä lähestyttiin kahdelta suunnalta. Vaiheessa I porattiin pitkät (halkaisija 48 mm) reiät, jotka laajennettiin ODEX-menetelmällä. Reikiin asetettiin rei'itetyt putket. Tämän jälkeen reiät injektointiin kolmessa vaiheessa. Vaiheessa II jatkettiin louhintaa vastakkaisesta suunnasta. Louhintakatkon pituus oli n. 1.6 m. Esi-injektointiviuhkan pituus oli 7.5 m ja se porattiin aina kahden katkon jälkeen /36/.



Kuva 20. Savilustaa ympäröivän voimakkaasti vuotavan kallion injektointi /36/.

7. INJEKTOINTIKALUSTO

7.1

Sementtikalusto

Koventionaalinen injektointikalusto käsittää pumput, sekoittimet, välisekoittimet, injektointitulpat ja mittarit. Kalustoa valittaessa on kiinnitettävä huomiota pumpun syöttötehoon, maksimikäyttöpaineeseen ja ulosottojen määrään.

7.11

Pumput

Injektointipumput ovat sähkö- tai paineilmakäyttöisiä sekä nykyisin myös sähköhydraulisia mäntäpumppuja. Käytössä olevan kaluston ominaisuudet vaihtelevat hyvin suuresti. Kaluston maksimikäyttöpainet vaihtelee välillä 1.5-10.0 MPa. Syöttötehot vaihtelevat 10-100 l/min. Pienimmät tehot edustavat käsikäyttöisiä pumppuja ja suurimmat sähköhydraulisia laitteita.

Teholukuja tarkasteltaessa on muistettava, että maksimipaineilla ei yleensä päästä ilmoitettuihin tehoihin. Tällä ei ole merkitystä, kun laitteen teholluvut ylittävät selvästi vaaditut rajat. Ulosottoja pumpuissa on yleensä yksi, mutta erilaisten T-kappaleiden avulla niitä on lisätty. Käytössä on 1-6 ulosottoa.

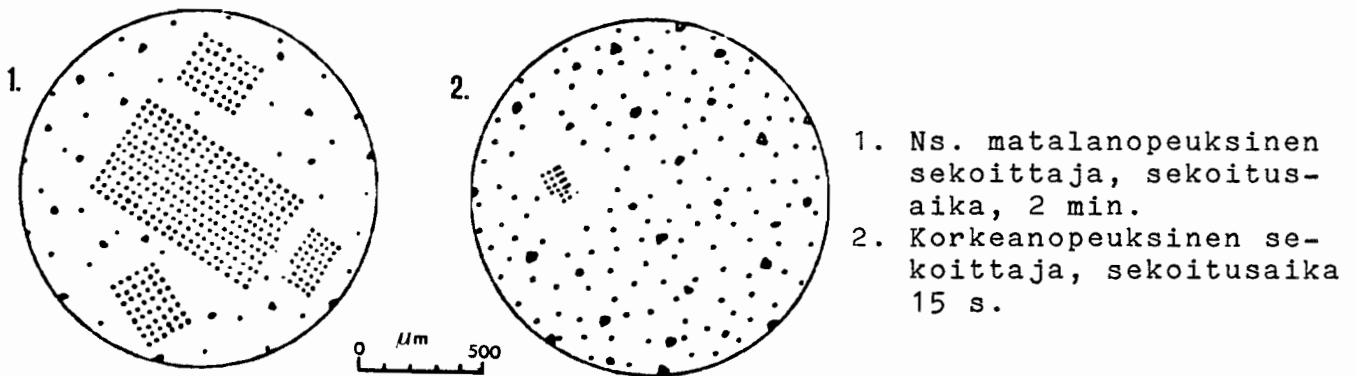
Injektointipumppua ei tule pysäyttää injektoinnin aikana kuin aivan välttämättömissä tilanteissa. Häiriöiden vähentämiseksi voidaan tulpan ja pumpun välille asentaa venttiili, jolla injektointilaasti ohjataan ohitusletkun avulla välisekoittimeen ja edelleen pumppuun. Keskeytyksen aikana pumppu käy tällöin normaaliteholla /51/.

7.12

Sekoittimet

Injektointilaastin sekoittamista varten tarvitaan nopeasti pyörivät erikoissekoittimet. Tavallisesti käytetään nk. kolloidisekoitinta tai Colcrete-tyyppistä sekoitinta, joiden kierrosnopeudet ovat 1500-3000 r/min /53,64/.

Massan sekoitusaika on korkeanopeuksisissa sekoittimissa 2-3 minuuttia. Sekoittimen nopeuden vaikutus massan laatuun on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Sekoittimen nopeuden vaikutus massan laatuun /53/.

Sekoittimen ja pumpun välissä on oltava hämmennin, jonka tarkoituksena on pitää laasti jatkuvassa verkkaisessa liikkeessä. Välisekoittimen kierrosnopeudet vaihtelevat 60-100 r/min /53,65/.

7.13

Tulpat ja muut varusteet

Injektointitulppia on useita eri tyyppisiä. Tiivistyselimen muodostaa kumirenkaista tai -letkusta tehty osa, joka voidaan puristaa joko mekaanisesti tai ilman- tai nestepaineella reiän seinämiä vastaan. Kaksoistulppa on alapäästään suljettu ja siinä on kaksi tiivistinosaa ja niiden välissä rei'itetty osa, josta laasti pääsee purkautumaan /64/.

Injektointiputkistoon kuuluvat letkut, painelukot, hanat ja liittimet. Putkisto on valittava käytettävän pumpun maksimipaineen mukaan. Yleensä edellytetään, että putkisto on sisähalkaisijaltaan vähintään 1" /70/.

Injektointikalustoon kuuluvat lisäksi painemittarit. Tavallisesti yksi on sijoitettu pumpun ja toinen tulpan yhteyteen /64/.

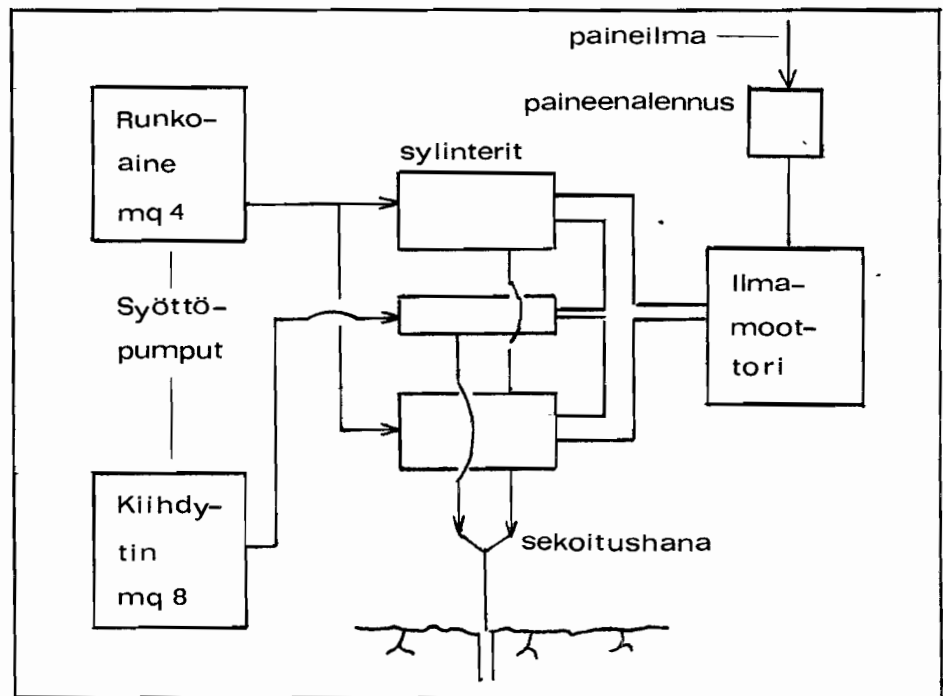
7.2

Kemiallinen kalusto

Kemiallinen injektointi suoritetaan joko yksi- tai kaksiliuosmenetelmällä. Kaksiliuosmenetelmässä perusaine ja kovetin sekoitetaan juuri ennen kalli-oon johtamista suuttimessa tms., jolloin kovettumisreaktio alkaa aineen poistuttua laitteistosta /13/.

Sementti-injektointikalustoa ei yleensä pitäisi käyttää kemialliseen injektointiin. Osa kemiallisista aineista vioittaa mäntien tiivisteitä ja ruostuttaa teräsosia. Kalusto joudutaan yleensä sovittamaan valitun injektointiliuoksen mukaan, sillä eräät liuokset voidaan sekoittaa käsin ja toiset taas vaativat voimakasta sekoittamista. Kalustoon kuuluu usein annostuspumppu, joka pump-paa lioskomponentit halutussa suhteessa astioista sekoittimeen tai suoraan pumpun säiliöön /64/.

Kuvassa 22. on esitetty Lemminkäisen kehittämä kemiallinen injektointikalusto, jonka injektointipumppu on maalausteollisuudelle valmistettu painepumppu. Komponentit sekoitetaan sekoitushanassa /43/.



Kuva 22. Kemiallisen injektointikaluston periaatekuva /43/.

7.3

Monireikälaitteisto

Alan uusinta teknologiaa edustaa monireikäinjektointilaitteisto, johon on liitetty sähköinen mittausyksikkö. Ulosotto ja mittaus ovat erikseen kuudelle reiälle. Mittausyksikkö antaa tulostuksen digitaalisesti ja listattuna. Tiedot saadaan massamääristä ja paineesta sekä niiden vaihtelusta ajan funktiona. Laitteella voidaan suorittaa myös vesimenekikokeet /26/.

Kaluston käyttö edellyttää, että samanaikaisesti aina voidaan eri reikiin pumpata samanlaista massaa. Mikäli tiettyyn reikään massan menekki pysähtyy, pumppaus jatkuu vain jäljellä oleviin reikiin. Näin tapahtuu kunnes kaikki reiät on käsitelty em. seoksella, ja siirrytään astetta sakeampaan seokseen /53/.

Monireikäinjektointia voidaan suorittaa tavanomaisella laitteistolla käyttämällä jakoastiaa. Ilman ohjausjärjestelmää monireikälaitteisto on tunnoton injektoitaessa ja reikää ei voida "ajaa loppuun", koska injektointilaasti kulkeutuu aina sinne, missä virtausvastus on pienin. Yhden monireikälaitteiston tilalla voidaan käyttää useita erillisiä yksiköitä.

Injektoinnin tehokkuutta voidaan parantaa kehittämällä injektointilaitteiston siirrettävyyttä. Kalusto kannattaa kiinnittää lavalle, johon on varattu tilaa myös tarvikkeille. Ruotsissa on käytössä kiinteästi kuorma-auton lavalle rakennettu yksikkö, johon liittyy hydraulinen nostolava, joka helpottaa tulppien asentamista /16/. Kuorma-autojen siirtolavoja on myös käytössä.

7.4

Kaluston nykytilan kartoitus

Kaluston nykytilan kartoittamiseksi lähetettiin 13 injektointia tekeväälle urakoitsijalle kalustoa koskeva kysely. Vastauksia saatiin yhdeksän. Taulukossa 9. on esitetty injektointipumppukalusto. Tiedot ovat 6.2.1981 mukaiset.

Taulukko 9. Injektointipumput kyselyn 6.2.1981 perusteella.

Pumppu	Käyttö- voima	Max.paine MPa	tilavuusvirta l/min
Sementtikalusto			
EKI 1	S	1.5	20
Oulujoki	S	1.5	20
Wager Simplex			
GR 4	P	3.0	30
GR 13	P	2.0	60
ZBE/Graelius	S/H	10.0	33
		3.3	100
Häny CH 8706	P	3.1	65
Peroni 1211	P	2.0	50
Montanbüro P 848 S	P	7.0	100
Häny ZMP V	P	7.0	40
Proceq MMJ 100	P	1.5	20
"Hämis"	Kä	1.5	n.10
ZHS-5070/Atlas			
Copco	S	7.0	50
BML	S	2.0	20
Kemialliset			
Graco Hydro Cof	P	7.0	30

P = paineilma-, sähkö-, Kä = käsikäyttöinen
 S/H = sähköhydraulinen

Viimeisissä urakka-asiakirjoissa on injektointikaluston käyttöpainelle asetettu minimiarvo 1.5 MPa, jota käytettäessä on saavutettava tasainen syöttö. Ruotsalaiset ovat edellyttäneet injektointilaitteistolta tasaisella virtauksella vähintään 3.0 MPa:n painetta /16/.

8. INJEKTOINTIAINEET

Injektointiaineet voidaan jakaa suspensioihin, kemiallisiin seoksiin ja emulsioihin /13,17,30/:

Suspensiot

- kiinteä aine on sekoittuneena nesteessä
- sementin ja veden seos
- savet

Kemialliset seokset

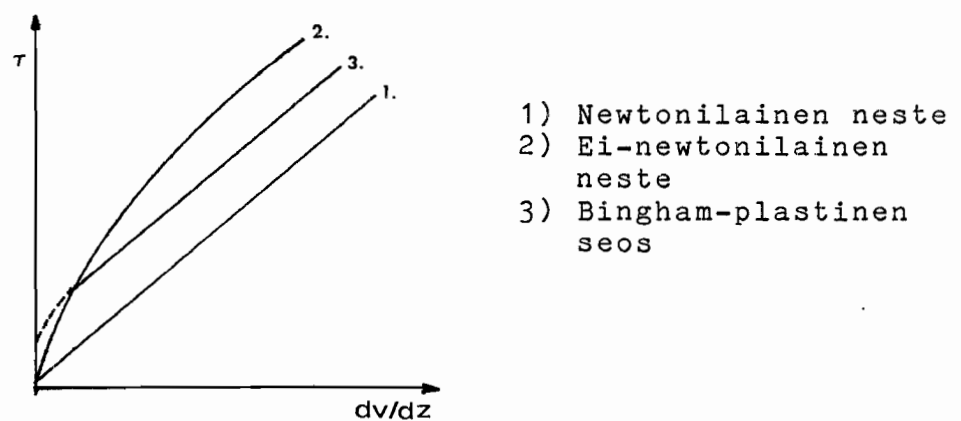
- aine on liuenneena toisessa aineessa
- silikaattiperusteiset aineet
- monomeerimuotoiset aineet
- ligniinipohjaiset aineet

Emulsiot

- neste on sekoittunut nesteeseen
- bitumin ja veden seokset

Tässä esityksessä perehdytään vain Suomessa yleisimmin käytettyihin kallioinjektointiaineisiin sekä aineen valintaan vaikuttaviin seikkoihin.

Injektointiaineet ovat ominaisuuksiltaan ajan funktiona muuttuvia nesteitä. Ne jaetaan newtonilaisiksi ja ei-newtonilaisiksi nesteiksi. Newtonilaisilla nesteillä on dynaaminen viskositeetti vakio. Ei-newtonilaisiin nesteisiin kuuluvat mm. Bingham-plastiset seokset. Niiden leikkauslujuus ja dynaaminen viskositeetti muuttuvat virtausnopeuden funktiona /13,70/.



Kuva 23. Leikkauslujuuden muutos virtausnopeuden funktiona. Dynaaminen viskositeetti muuttuu käyrän tangentin mukaisesti /13/.

8.1

Injektointiaineen valintaan vaikuttavat tekijät

Injektointiaineen valintaan vaikuttavat kallion ominaisuudet, pohjaveden kemialliset ominaisuudet, lämpötila, vuotoveden määrä, tunnelin tiiveystavoite ja injektointiaineiden ominaisuudet sekä luonnollisesti kustannukset. Myös injektoinnin tarkoituksella - tiivistys tai lujitus - on oma merkityksensä /17/.

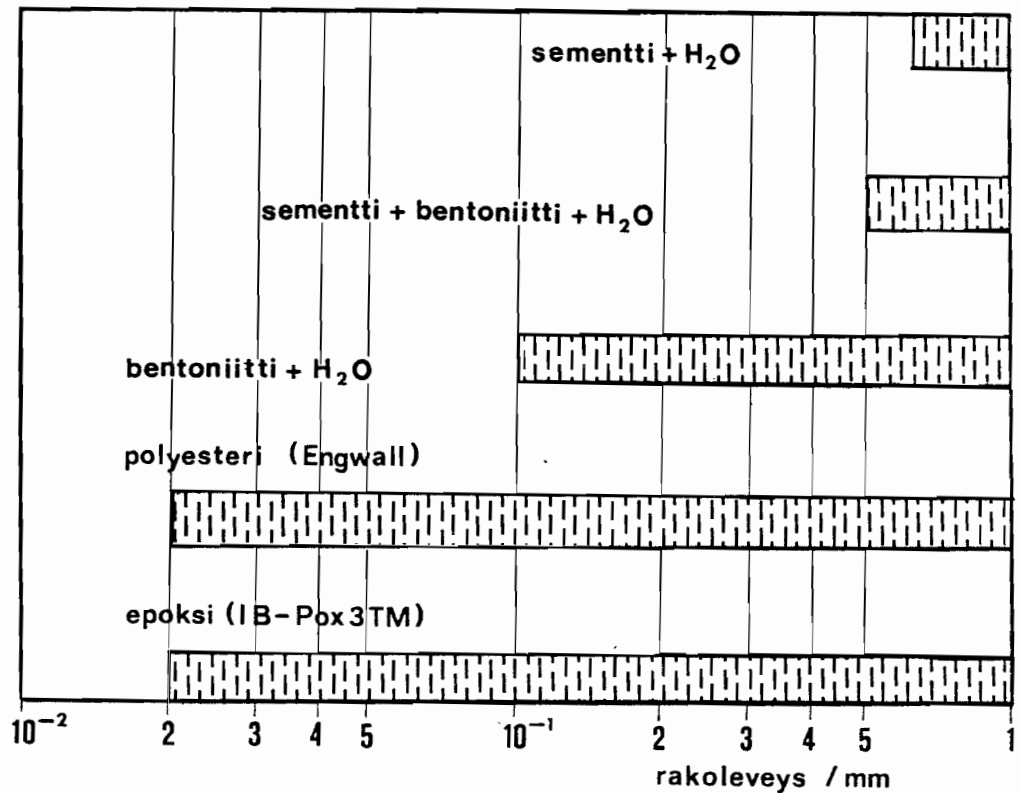
Aineen valinnan kannalta kallion ominaisuuksista tärkeimmät ovat rakopintojen ominaisuudet, rakojen avonaisuus ja rakopintojen karheus.

Tunnelin tiiveystavoitteen kasvaessa joudutaan injektointiin yhä pienempiä rakoja. Kun tunnelin tiiveystavoite on tiukempi kuin 5-6 l/min, 100 m tunnelia, on tarkoituksenmukaista injektoida kemiallisesti. Göteborgissa ollaan kuitenkin ylletty sementti-injektointilla arvoon 4 l/min, 100 m /8/. Injektointiainetta ei voida valita pelkästään tiiveystavoitteen perusteella, vaan lopullinen valinta on tehtävä tunneliolosuhteissa tehtyjen havaintojen perusteella. Vesimenekikokeen tulosta voidaan käyttää aineen valintakriteerinä. Sementti-injektoinnin katsotaan olevan tehokasta, kun vesimenekikokeen tulos on suurempi kuin 1 l/min, m, MPa /11/.

Pohjaveden kemialliset olosuhteet vaikuttavat injektointiaineen kovettumisaikaan ja loppulujuuteen. Ruotsalaiset edellyttävät tehtäväksi pohjaveden fysikaalis-kemiallinen analyysi jokaista tunnelin 100 m kohti tai suurempien vuotojen yhteydessä. Erityisesti on selvitettävä pohjaveden aggressiivisuus raudan ja betonin suhteen /11/. Silikaattien kovettumistapahtumaan vaikuttaa pohjaveden suolapitoisuus ja vastaavasti orgaaniset aineet hartsihin /70/.

Injektointiaineiden tärkeimmät ominaisuudet ovat tunkeutuvuus, kovettuminen, kovettumisaika, lujuus ja pysyvyys sekä myrkyttömyys.

Tiivistysinjektoinnissa pääkriteerinä on tunkeutuvuus. Injektointiaine kulkeutuu siihen suuntaan, jossa virtauksen energiahäviö on pienin. Avoimissa raoissa tunkeutuma on siis suurin. Aineiden tunkeutuvuusominaisuudet on huomioitava siten, että siirryttään oikea-aikaisesti sementti-injektoinnista kemialliseen injektointiin /70/.

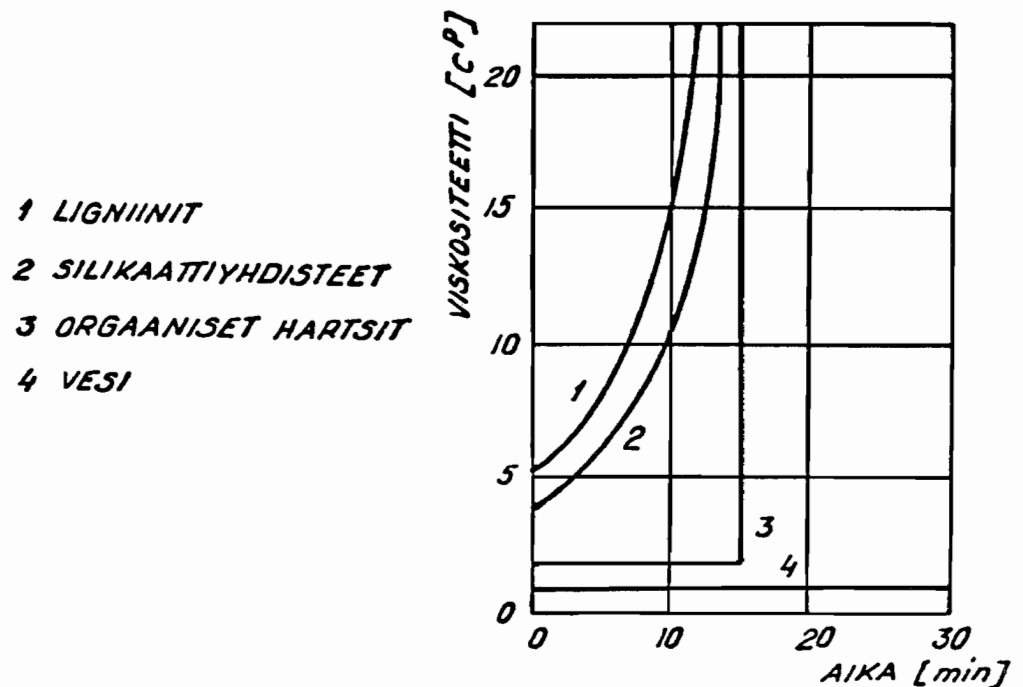


Kuva 24. Injektointiaineiden tunkeutuvuus /9/

Tunkeutuvuuteen vaikuttaa aineiden dynaaminen viskositeetti. Kapeimmissa raoissa alkaa sementtiä sisältävillä injektointiaineilla sementtirakeen koko vaikeuttaa tunkeutumista. Mikäli halutaan injektoida täytteisiä rakoja, on vain muoviperusteisilla aineilla onnistumisen mahdollisuus /9/.

Injektointiaineiden osuus injektointitöiden kustannuksista on n. 5 %, kun injektoidaan pelkästään sementillä. Yhdistetyssä sementti- ja kemiallisessa injektoinnissa ainekustannukset ovat injektointityön kustannuksista 10-25 % /43/.

Verrattaessa injektointiaineiden hintoja on myös huomioitava aineella saatava tehokas tilavuus. Tämä huomioiden on kemiallisten aineiden hinta 2-5 kertainen verrattuna sementin hintaan. Lisäksi on huomattava, että kemiallisessa injektoinnissa aine menekki on pienempi ja injektointiaika on lyhyempi kuin sementti-injektoinnissa. Toisaalta kemiallinen injektointi edellyttää yleensä sementti-injektointia, jolla on täytetty suuremmat raot.



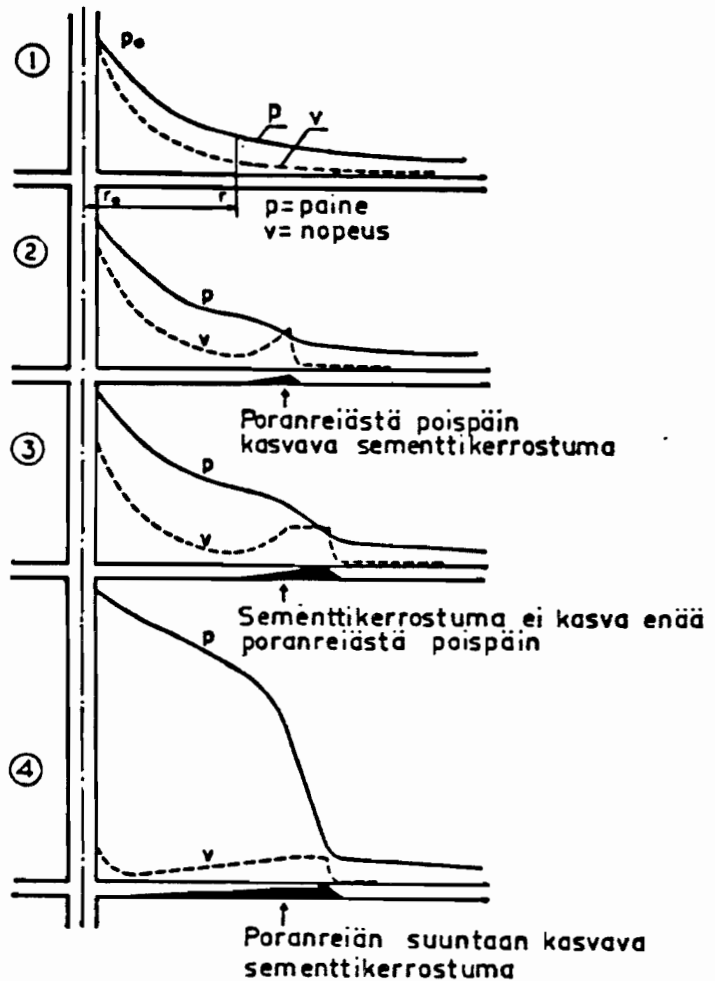
Kuva 25 Injektointiaineiden viskositeetti ajan funktiona /17,70/.

8.2 . Suspensiot

Suspensiot ovat sementtiperustaisia injektointiaineita. Niitä käytetään ylivoimaisesti eniten injektointitoissa. Suspensiot voidaan jakaa epästabiileihin ja stabiileihin eli aktivoituihin seoksiin. Kun epästabiilin seoksen nopeus alittaa tietyn arvon, laskeutuvat sementtihiukkaset ja tapahtuu sedimentoituminen. Aktivoidussa seoksessa kiinteä aines ei erotu, kun seos on jäänyt lepotilaan /30,53/.

Seoksen aktivoiminen edellyttää korkeanopeuksisen sekoittimen käyttöä ja bentoniitin lisäämistä 2-5 % sementin painosta /64/.

Vesi-sementtiseos on virtausominaisuuksiltaan Bingham-plastinen neste. Sen leikkauslujuudella on raja-arvo, joka ei alitu missään olosuhteissa. Sementtiseoksen sitoutuminen alkaa tapahtua heti sekoittumisen jälkeen. Sitoutumisaikaan ja loppulujuuteen vaikuttaa raoissa olevan seoksen vesi-sementtisuhte, seokseen sekoittuneen rakomateriaalin ominaisuudet, kalliossa olevan pohjaveden laatu ja lämpötila /70/.



Kuva 26. Epästabiilin sementtilaastin käyttäytymisen kallioraossa /17,30/.

Sementin heikkoutena on sen suhteellisen suuri raekoko. Portland-sementillä suurin raekoko on 0.1 mm ja ominaispinta-ala $3150 \text{ cm}^2/\text{g}$ ja pikasementillä vastaavat luvut 0.06 mm ja n. $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Ruotsissa valmistetaan erityistä injektointi-sementtiä, joka jauhetaan edellä mainittuja hienommaksi /43/.

Veden ja sementin seoksen viskositeetti on n. 100 cP seossuhteella 4. Viskositeetti vaihtelee ajan ja lämpötilan mukaan /70/.

Lisäaineilla voidaan vaikuttaa seoksen injektointi-ominaisuuksiin. Taulukkoon 10. on kerätty käytettyjä lisä- ja täyteaineita.

Taulukko 10. Yleisimmin käytetyt lisäaineet sekä käyttötarkoitus ja vaikutus.

Lisä- tai täyteaine	Käyttömäärä % sementin painosta	Käyttötarkoitus, vaikutus
Hiekka Ø 0-2 mm	Tarpeen mukaan	Suurten avonaisten rakojen injektoinnissa. Vähentää sementin määrää. Kuluttaa kalustoa /65/.
Sahajauho paperi	Tarpeen mukaan	Suurten avonaisten rakojen, voimakkaiden vesivuotojen injektoinnissa. Paisuvia /65/
Intrusion A Barra Inj Intraplast A	0.5-0.8 /34/ 1-3 / 6/ 0.5-1 /33/	Parantaa tunkeutumiskykyä, pumpattavuutta, vähentää kutistumista. Paisuttavia.
Betoniitti	2-5	Parantaa tunkeutumiskykyä, vähentää erottumista, ehkäisee kutistumista /64/.

Lisäaineiden käyttö vähentää seoksen loppulujuutta. Muita käytettyjä täyteaineita ovat lentotuhka, masuunikuona ja puzzolani /30/. Suurten vuotojen yhteydessä on käytetty vesilasia, jolloin saadaan aikaan nopeampi jähmettyminen. Lisäksi voidaan käyttää sementin ja saven seoksia, joissa on täyteaineena hiekkaa raekooltaan 0-8 mm riippuen laitteistosta /13/.

Ruotsalaisen tutkimuksen /7/ mukaan sementti-injektointi, joka on suoritettu 3-10 vuotta sitten, on säilyttänyt tiivistävät ominaisuutensa. Tutkituista injektointikohteista 95 %:ssa olivat vuoto-vesimäärät alentuneet tai pysyneet vakiona.

Sementin lisäksi voidaan suurten onkaloiden injektoinnissa käyttää lentotuhkaa. Iso-Britanniassa on yleisesti käytetty lentotuhka-vesi-suhdetta 2:1. Lentotuhkamassalla on hyvä pumpattavuus. Sopivan raekokonsa ansiosta se vähentää injektointimassan erottumista ja parantaa sen homogeenisuutta. Ominaisuudet johtuvat tuhkan sisältämästä suuresta pallomaisten rakeiden määrästä. Rakeet saavat aikaan "kuulalaakerivaikutuksen". Käytettäessä lentotuhkaa lisäaineena sementti-injektoinnissa vähenee injektointimassan sedimentoituminen, kun lentotuhkan osuus on vähintään 20 % seoksen kokonaispanosta. Lentotuhkan soveltuvuus injektointiin riippuu sen kemiallisesta ja minerologisesta koostumuksesta. Hieno, kuiva tuhka saadaan talteen voimalaitosten suodattimilla, jolloin tuhkan laatu vaihtelee voimalaitostyyppin mukaan /14/.

Muita suspensioita ovat savet ja niiden sekoitukset. Bentoniittisavilla on hyvät tunkeutumisominaisuudet. Kovettumisajan kontrolloimiseksi käytetään bentoniitin kanssa vesilasia. Bentoniittisaven loppulujuus jää heikoksi /30,53/. Muita suspensioita käsitellään tarkemmin lähteissä /13,17/.

8.3

Kemialliset injektointiaineet

Kemialliset injektointiaineet jaetaan tässä siliikaattiperusteisiin ja polymeerimuotoisiin aineisiin. Muiden kemiallisten aineiden suhteen viitataan lähteisiin /13,17,30,70/.

8.31

Siliikaattiperusteiset injektointiaineet

Siliikaattiperusteisissa injektointimenetelmissä vesilasia eli natriumsiliikaattia, Na_2O , käsitellään jollakin elektrolyytillä, jolloin muodostuu kolloidinen seos. Tämä saostuu eli koaguloituu veteen liukenemattomaksi, jäykäksi geeliksi /30/.

Siliikaattiyhdisteiden viskositeetti on 5-15 cP, mutta se vaihtelee voimakkaasti seossuhteiden mukaan. Seoksessa on vesilasia, vettä ja kovettajaa /53/.

Injektoinnin alussa seos käyttäytyy newtonilaisen nesteen tavoin. Kovettumisreaktio alkaa tapahtua välittömästi, jolloin viskositeetti ja leikkauslujuus alkavat kasvaa ajan funktiona.

Kutistuma riippuu seossuhteista niin, että mitä lujempi massa loppulujuudeltaan vaaditaan sitä suurempi on myös kutistuma. Vesilasiyhdisteet eivät ole myrkyllisiä komponenttimuodossa eivätkä lopullisessa muodossaan /70/.

Injektointi voidaan suorittaa joko yksi- tai kaksiliuosmenetelmällä riippuen siliikaattiyhdisteestä /13/.

Suomessa on käytössä polymerisoituun alkalisisiliikaattiin perustuvia injektointiaineita. Ne tunnetaan kauppanimeltä, esim Stabilodur F. Se koostuu neljästä komponentista: polymerisoitu alkalisisiliikaatti, kovettaja, kiihdyttäjä ja vesi /10/. Kovettumisaikaa voidaan säädellä eri seossuhteilla. Geelitysmisaikana on käytetty 15-60 min.

8.32

Polymeerimuotoiset injektointiaineet

Polymeroituminen on reaktio, jossa yksittäiset orgaaniset molekyylit yhdistyvät muodostaen orgaanisen makromolekyylin ns. polymeerin. Muovit ja miltei kaikki hartsit ovat polymeerejä. Hartsit voidaan jakaa kahteen pääryhmään, esikäsiteltyihin polymeereihin ja nestemäisiin monomeereihin /70/.

Tällaisia perusosana käytettäviä aineita ovat fenoli- ja akryliamidiperustaiset hartsit. Injektointiaineseos koostuu perusaineesta, kiihdyttimestä ja vedestä /53/.

Aineiden viskositeetti on alimmillaan hyvin lähellä veden viskositeettia ts. 1-5 cP. Viskositeetti on vakio polymerisaatioreaktion alkuun saakka, johon asti aineet käyttäytyvät newtonilaisen nesteen tavoin /70/.

Kovettumisreaktiota voidaan säädellä kiihdyttimen määrän avulla. Säättömahdollisuudet vaihtelevat rajoissa muutama minuutti-useampi tunti. Suorittamalla injektointi kaksiliuosmenetelmällä voidaan geeliytymisaika käyttää tehokkaasti hyväksi /53/.

Käytettävät injektointiaineet ovat yleensä tavaramerkkejä, joiden valmistaminen on patentoitu. Suomessa on käytössä englantilainen Geoseal-niminen injektointiaine. Se koostuu jauhemaisesta perusaineesta (MQ-4) ja nestemäisestä kiihdyttimestä (MQ-8) ja vedestä. Loppulujuus riippuu seossuhteista samoin kuin geeliytymisaika, jona on käytetty 15-30 min /43/.

9.

ESI-INJEKTOINNIN KUSTANNUKSET

Suomessa on toteutettu vähän tunnelilouhintahankkeita, joissa on suoritettu laajamittaisia esi-injektointeja. Kustannusten selvittämistä vaikeuttaa lisäksi se, että muodostuvat kustannukset ovat voimakkaasti louhintakohteesta riippuvaisia. Tällaisia tekijöitä ovat kallion laatu ja tunnelin alkuperäinen vuotovesimäärä ennen tiivistämistä ja luonnollisesti tiiveystavoite. Toisaalta kirjallisuudessa esiintyvissä kustannustiedoissa on yleensä mukana myös jälki-injektointikustannukset.

9.1

Vaikutus kokonaiskustannuksiin

Pientunnelihankkeissa kustannukset ovat keskimäärin jakautuneet /42/:

- louhintakalusto, irroitustyö	35-45 %
- räjäytysaineet	15-20 %
- varustelu (paineilma-, sähkölinjat)	10-25 %
- tukeminen, tiivistäminen ym.lujitus	5-15 %
	<u>100 %</u>

Tiivistystöiden osuus pitkissä tunnelitöissä on ollut varsin pieni. Tiukemmat tiiveysvaatimukset asutuilla alueilla nostavat injektointikustannusten merkitystä. Tiivistystöiden osuus kokonaislaskutuksesta voi olla jopa 30-40 % /69/.

9.2

Kustannusten jakautuminen

Esi-injektointikustannukset voidaan jakaa välittömiin työkustannuksiin ja välillisiin kustannuksiin, jotka aiheutuvat louhinnan keskeytymisestä injektointivaiheeseen.

9.21

Välittömät kustannukset

Esi-injektoinnin välittömät kustannukset muodostuvat seuraavista kustannustekijöistä:

- tunnustelu- ja injektointireikien poraus
- vesimenekkiekokeet
- varsinainen injektointityö
- injektointiaineet

Kustannukset ovat jakautuneet injektointitoissa lähteen /67/ mukaan (jälki-injektointi mukana):

- | | |
|-----------------------------|---------|
| - konevuokra ja työ | 75-80 % |
| - injektointireikien poraus | 15-20 % |
| - injektointiaine | 5-10 % |

Verrattaessa jakautumaa alla esitettyihin on huomioitava konevuokran erilainen jakoperuste.

Vantaan meriviemäritunnelissa (osuus Savio-Koivuhaka) kustannusjakautuma esi-injektoinnissa on ollut /69/:

- | | |
|---------------------|---------|
| - poraus | 40-60 % |
| - vesimenekikokeet | 10 % |
| - injektointityö | 20-40 % |
| - injektointiaineet | 8-11 % |

Reikien poraus ja vesimenekikokeet on tehty injektointia edeltävässä vuorossa. Tunnelin poikkipinta-ala on n. 9 m² ja injektointireiät 15 m pitkiä ja niitä on porattu kerralla 10 kpl. Kustannukset tunnelin seinämäneliötä kohti ovat 90-130 mk/m².

Helsingin metron Kaivokadun aseman itäisen ilmanvaihtokuilun vaakatunnelin esi-injektoinninkustannukset jakautuivat /70/:

- | | |
|------------------|------|
| - poraus | 21 % |
| - injektointityö | 72 % |
| - aineet | 7 % |

Ylemmän kohteen porauskustannusten suuri osuus johtuu tehokkaasta injektoinnista ja kemiallisen injektointiaineen käytöstä.

Injektointiaineiden osuus kustannuksista on huomattavan pieni.

9.22

Välilliset kustannukset

Louhinnan viivästymisen aiheuttaa seuraavia lisäkustannustekijöitä /69/:

- kiinteät kustannukset
- louhintamiehistön palkat (siltä osin kun eivät osallistu injektointityöhön)
- louhintakaluston seisonnakustannukset
- alaurakoiden odotusajan lisääntyminen
- indeksin korottava vaikutus kustannuksiin

Työjärjestelyt vähentävät tämän kustannustekijän merkitystä, mutta vaihtoperälouhinnassa ja yhden perän louhinnassa esi-injektointi aiheuttaa louhintatehon laskun puoleen tai keskeyttää louhinnan kokonaan injektoinnin ajaksi.

Vantaan meriviemäritunnelilla saatujen kokemusten perusteella louhinnan keskeytyminen on aiheuttanut kustannustason nousua 35-55 %. Injektoinnin työ-
kustannukset ja louhinnan keskeytymisestä aiheutuneet kustannukset ovat samaa suuruusluokkaa /69/.

9.23

Esi-injektointivuoron kustannus

Esi-injektointityön korvaaminen on tapahtunut aikaperusteisesti. Tässä pyritään selvittämään injektointivuoron kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä sekä määrittämään kustannuksen suuruusluokka. Kustannustiedot perustuvat eri urakoitsijoiden antamiin lähtötietoihin. Hintataso vastaa kevään 1981 tasoa.

Injektointivuoroon kuuluu työnjohtaja ja kaksi ammattimiestä. Palkkakustannus on n. 70,- mk/h, kun otetaan huomioon sosiaalikulut, päivärahat ja asumiskustannukset. Sementti-injektointilaitteiston hinta on n. 130 000 mk. Laskentaperusteena käytetään tässä kuoletusaikaa 3 vuotta ja laskentakorkona 12 %. Kuoletukset voidaan tehdä vain urakka-ajalla, jolloin kaluston vuotuinen käyttöaste pienenee. Laskelmassa on käyttöasteeksi arvioitu 70 %. Kuluvien osien ja energian osuuden arvioidaan olevan yhtäsuuri poistokustannuksen kanssa. Varaosakustannus ja kunnossapitokustannus sisällytetään tässä kuluvien osien kustannukseen. Tehokasta työaikaa kaksivuorotyössä on vuodessa 4080 h. Injektointivuoron kustannus on:

- palkkakustannus	24 x 70,-	1680 mk/vro
- poistokustannus	$\frac{130\ 000 \times 0.7118 \times 8}{0.7 \times 4080}$	260 mk/vro
- kulutus- ja varaosat, kunnossapito ja energia		<u>260 mk/vro</u>
		2200 mk/vro

Louhinnan keskeytymisestä aiheutuvan kustannuksen yleispätevä selvittäminen on vaikeampaa. Tämä johtuu erilaisesta kustannusten kohdistamisesta eri tekijöille, erilaisesta kalustosta ja toisaalta kaluston iästä ja siitä, kuinka monen henkilön

palkkakustannukset sisällytetään keskeytyskustannukseen. Kohdassa 9.22 on esitetty ne lisäkustannustekijät, jotka aiheutuvat keskeytymisestä. Kun otetaan huomioon palkkakustannuksissa kolmen miehen palkkaus ja kalleimman louhintalaitteen, porauslaite, pääomakustannus, saadaan keskeytymiskustannukseksi:

- palkkakustannus	24 x 70	1680 mk/vro
- pääomakustannus (laskentaperuste sama kuin edellä)	$\frac{1000000 \times 0.7118 \times 8}{4080 \times 0.7}$	1995 mk/vro
		3675 mk/vro

Muiden tekijöiden osuutta on vaikeampi arvoida ja niiden sisällyttäminen keskeytyskustannuksiin riippuu urakoitsijasta.

Laskelman perusteella esi-injektointivuoron kustannus, kun louhinta keskeytyy täysin, on suuruusluokaltaan 5000-6000 mk/vro.

10.

ESI-INJEKTOINNIN HUOMIOIMINEN URAKKA-ASIAKIRJOISSA

Epärealistiset injektointimäärien arviot ovat vaikeuttaneet louhintatöiden urakointia. Koska injektointimäärät eivät usein ole selvillä vielä työn aikanakaan, on sopimusmuodon ja maksuperusteiden oltava joustavia.

Nykyisen käytännön kartoittamiseksi tutkittiin seitsemän 1978 jälkeen louhitun tunnelihankkeen urakka-asiakirjoja. Jokaisessa kohteessa oli määritetty injektointitarvetta. Tutkimuksessa keskityttiin urakkaohjelmaan, maksu- ja mittausperusteisiin sekä työselityksiin. Lisäksi käytiin keskusteluja rakennuttajien, suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden kanssa.

Urakkasopimukseen oikeudellisenä käsitteenä ei tässä puututa.

10.1

Nykyinen käytäntö

10.11.

Urakkasopimusmuoto

Tunnelihankkeiden sopimusmuodot ovat olleet suoritusterusteisia. Käytössä on ollut pääsääntöisesti joko kokonaishinta- tai yksikköhintaurakka sovellettuna seuraavasti:

- 1) Louhintaurakka kokonaishintaurakkana. Kokonaishintaurakkaan sisältyy tietty määrä esi-injektointia.
- 2) Louhintaurakka on yksikköhintaurakka, joka sisältää myös tietyn määrän injektointityötä.
- 3) Louhintaurakka on kokonaishintaurakka. Lujitus- ja tiivistystyöt erillisenä yksikköhintaurakka-pakettina.

Kokonaishintaurakoissa siirrytään käyttämään yksikköhintoja, kun arvioidut työmäärät ylittyvät. Jos työmäärät jäävät alle ennakoitujen, on rakennuttaja saamassa hyvitystä samoilla yksikköhinnoilla.

Kokonaishintaurakassa rakennuttajalla on selvä käsitys hankkeen toteuttamiskustannuksista edellyttäen, että työnaikaiset muutokset eivät muodostu oleellisiksi. Myös tarjousten vertailu on helppoa. Toisaalta urakoitsija säilyttää mahdollisuuden menetelmien rationalisoinnin tuomiin kustannussäätöihin. Samalla urakoitsijan on otettava riski kustannustason noususta. Perusedellytys kokonaishintaurakan käyttämiselle on, että luotettava

kustannusarvio voidaan tehdä etukäteen. Tämä edellyttää suunnitelmille tiettyä valmiusastetta jo urakkatarjousvaiheessa /62/.

Yksikköhintaaurakka on joustava suoritemäärien muutosten suhteen. Perusedellytys on, että työn luonne voidaan yksilöidä niin selvästi, että yksikköhinnan laskeminen on mahdollista. Urakoitsijat edellyttävät, että suoritemäärien suuruusluokat on pystyttävä esittämään riittävällä tarkkuudella, jotta urakan kiinteät kustannukset voidaan kohdistaa oikealla tavalla yksikköhinnoille. Lisäksi on esitettävä ne työmäärärajat, joiden sisällä yksikköhinnat pätevät ja yksikköhintojen maksu- ja mittausperusteet on yksilöitävä selvästi. Epävarmuuden tulee rajoittua työmääriin /62/.

Koska injektointimäärä on useissa hankkeissa ylittänyt ennakoidun määrän, voidaan puhua yhdistetystä kokonais-yksikköhintaaurakasta. Edellä esitetyistä tapauksista 1) ja 2) ovat luonteeltaan samanlaisia, kun laskutusperusteet ovat yhtäläiset. Yksikköhintaaurakassa korvataan injektointityö heti yksikköhintojen mukaisesti. Tapauksessa 3) injektointimäärätä on ilmoitettu sitoumuksetta ja injektointityön korvaus aloitetaan heti yksikköhinnoilla.

Urakkaohjelmaan on usein sisällytetty lause, jonka mukaan työmäärien poikkeaminen ennakoidusta ei oikeuta urakoitsijaa eikä rakennuttajaa vaatimaan muutoksia yksikköhintoihin. Näin urakoitsijalle lankeaa osittain myös määräriski. Tarjousten vertailukelpoisuuden takeena on kaikissa tapauksissa työmäärien ilmoittaminen.

Toisaalta, jos rakennuttaja ei ota vastuuta maapohjaa koskevista tiedoista, on urakoitsija ottanut riskin siitä, minkälainen maapohja todellisuudessa on. Yleisten sopimusehtojen mukaisesti, kun rakennusalueesta ilmoitetut tiedot poikkeavat huomattavasti ja kysymyksessä olevalta osalta tehtävään työmäärään nähden 5 % ilmoitetusta, on sen sopijapuolen, joka katsoo sitä etunsa vaativan, pyydetävä katselmusta, jossa asiantila todetaan. Jos poikkeama nousee vähintään 5 %:n määrään, siitä aiheutunut kustannussäästö tai kustannusten lisäys otetaan sopijapuolten välillä huomioon täysimääräisenä /22/.

Kustannusperusteisia sopimusmuotoja on syytä välttää. Injektointitöiden suorittaminen laskutyönä eliminoi osittain kilpailua ja louhinnan luotettava hinnoittelu on mahdotonta /69/. Laskutyötä käytetään erikoistapauksissa ja useammin jälkinjektoinnin yhteydessä.

10.12

Yksikköhinnat ja maksuperusteet

Esi-injektoinnin hinnoittelu on perustunut eri työvaiheiden hinnoitteluun. Eri työvaiheet ovat:

- tunnusteluporaus
- vesimenekkiporaukset tai -kokeet
- injektointireikien poraus
- reikien huuhtelu (ja painekoeistus)
- injektointityö ts. massan pumppaaminen

Varsinainen injektointityö on korvattu aikaperusteisesti ja muut työt urakka-perusteisesti.

Tunnustelu- ja injektointireikien poraus:

Porauksen maksuperusteena on porametri. Porametrit on jaettu poraustavan mukaan siten, että kiintokankiporaukselle ja jatkotankoporaukselle on eri hinnat. Jatkotankoporaus on jaettu metrimäärien mukaan esim. alle ja yli 10 m.

Vesimenekkiporaukset:

Tunnusteluporauksen yhteydessä tehtävien vesimenekkiporauksien hinta on sisällytetty tunnusteluporauksen hintaan. Mikäli vesimenekkiporauksia tehdään injektointiviuhkan rei'issä, on syytä pyytää vesimenekkiporauksille kappalehinta.

Injektointityö:

Varsinainen injektointityö koostuu reikien puhdistamisesta, painekoeistuksesta ja massan pumppauksesta. Lisäksi työn yksikköhinnan tulee sisältää kaluston kunnossapitokustannukset, käyttövoiman ja paineveden aiheuttamat kustannukset.

Injektointityön korvausperusteena on mk/vro tai mk/h. Aikaan sidotun kustannuksen tulee kattaa työnjohtajan ja kahden ammattimiehen palkkauskustannukset sekä kaluston ja sen työmaalla tehtävien siirtojen kustannukset. Työaikaan kuuluu myös välineiden pesuun kuluva aika.

Louhinnan keskeytymisestä muodostuva kustannus on myös aikapohjainen. Tämä ns. seisontakustannus on sisällytetty injektointityövuoron hintaan. Injektointityövuorolle on kysyttävä eri hinnat sen mukaan, miten louhinta eri tapauksissa keskeytyy.

10.2

Urakointimenettelyn heikkoudet ja sen muuttaminen

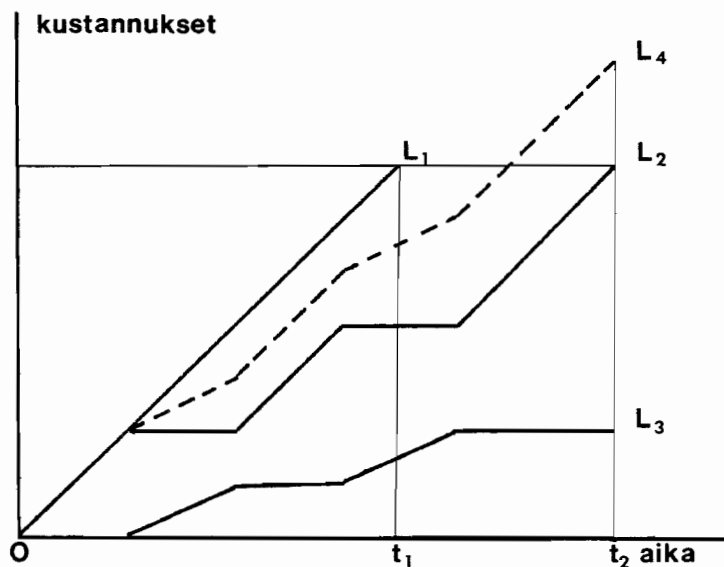
Käytyjen keskustelujen ja osittain INSKO:n järjestämän jatkokoulutustilaisuuden "Kalliorakenteiden ja -tilojen lujittaminen ja tiivistäminen" 2.-3.4.1981 yhteydessä vaihdettujen mielipiteiden perusteella on tähän koottu urakointimenettelyssä havaittuja epäkohtia. Lisäksi esitetään muutamia parannusehdotuksia.

10.21

Todetut epäkohdat

Vaikeutena ovat olleet eri rakennuttajien ja suunnittelijoiden käyttämien työselitysten ja maksupöytäkirjojen erilaisuus. Toisaalta aikaperusteiseen urakointiin liittyy tiettyjä epäkohtia. Eri rakennuttajat käyttävät lisäksi erilaisia urakkasopimusmuotoja. Menettelyn pääongelmana on kuitenkin epämääräisyys injektointimäärien arvioissa.

Kuvassa 27. on esitetty hankkeen kustannusten periaatteellinen muodostuminen kun injektointimäärät ylittävät huomattavasti urakka-asiakirjoissa esitettyt määrät.



Kuva 27. Kustannusten periaatteellinen muodostuminen esi-injektointimäärien kasvaessa.

Urakka-asiakirjoissa esitettyjen työmäärien mukainen kustannuskehitys on esitetty suoralla OL₁. Mikäli esi-injektointimäärät kasvavat, eivät niiden kustannukset sisälly kokonaishintaurakkaan. Kokonaishintaurakkaan kuuluvien töiden kustannuskehitys on esitetty murtoviivalla OL₂. Samalla valmistusajankohta siirtyy kohdasta t₁ kohtaan t₂. Lisätöiden kustannuskehitys on esitetty murtoviivalla OL₃. Kokonaiskustannuskehitystä kuvaa katkoviiva OL₄. Määrien kasvaessa oleellisesti muuttuu urakan luonne. Mikäli louhinnan keskeytymisestä aiheutuva seisontakustannus on oikein mitoitettu, ei määrän kasvu vaikuta yksikköhintoihin.

Kun urakka-aika kasvaa huomattavasti ennakoidusta, alkaa kiinteiden kustannusten, alaurakoiden odotusajan ja indeksin korottavan vaikutuksen merkitys kasvaa laskettaessa louhinnan keskeytymiskustannusta.

Esi-injektointityön luonteen mukaisesti sopivin sopimusmuoto on suora yksikköhintaurakka, koska epävarmuus koskee juuri työmääriä. Yksikköhintaurakan heikkous on se, että se ei kannusta urakoitsijaa kehittämään injektointimenetelmiä, koska sama korvaus saadaan aina, kun lähtöedellytykset ovat voimassa.

Aikaperusteinen injektointityön korvaus on sinänsä selväpiirteinen, koska kustannukset on helposti laskettavissa. Se asettaa kuitenkin erilaisilla kalustoilla ja tekniikoilla varustetut urakoitsijat eriarvoiseen asemaan. Heikommilla menetelmillä on mahdollisuus saada suurempi korvaus samasta työstä.

10.22

Korjausehdotukset

Injektointimäärien kasvaminen huomattavasti urakka-asiakirjoissa esitetyistä määristä voidaan huomioida kahdella tavalla:

Ehdotus 1

Esi-injektoinnin aikaperusteiseen yksikköhintaan sisällytetään kaikki louhinnan keskeytymisestä aiheutuvat kustannukset. Mukaan tulee tällöin huomioida kaikki työmaan kiinteät kustannukset sekä alaurakoiden odotusajan lisäyksestä ja indeksin korottumisesta aiheutuvat kustannukset. Rakenuttajan kannalta menetelmä muistuttaa viimeisissä urakka-asiakirjoissa esiintynyttä tapaa, mutta käytännössä mainittujen kustannuslajien sisällyttäminen täysimääräisenä muuttaa kohdassa 9.23 esitetyn keskeytymiskustannuksen suuruusluokkaa.

Ehdotus 2

Esi-injektointimäärien kasvu huomioidaan siten, että pyydetään tarjouspyynnössä eri yksikköhinnat määrärien kasvun mukaisesti /69/. Rajoina voidaan pitää 25, 50, 100 % jne. kasvua ennakoituista määräistä. Kehittyneempi menetelmä on yksikköhinnan ilmoittaminen jatkuvana käyränä määrän kasvun funktiona.

Kumpikaan ehdotus ei täysin tule poistamaan käsillä olevaa ongelmaa, sillä esim. tiukka tarjouskilpailutilanne aiheuttanee liukumia eri kustannusten sisällyttämisessä keskeytymiskustannukseen.

Kokonaishintaurakan on todettu olevan edullinen sopimusmuoto sekä rakennuttajan että urakoitsijan kannalta. Injektointimäärien muuttuminen kasvattaa lisä- ja muutostöitä varten laadittavan yksikköhintaluettelon merkitystä. Luettelon laadinnassa tulee noudattaa kohdassa 10.12 esitettyjä periaatteita.

Injektointikalustojen eriarvoisuutta voidaan vähentää yhtenäistämällä kalustoa koskevia vaatimuksia. Toisaalta voidaan pyytää erilainen yksikköhinta eritehoisille kalustoille /69/.

Aikaperusteisen työn heikkoudet voidaan välttää kokonaan siirtymällä esi-injektoinnissa urakkatyöhön. Urakkatyössä maksuperusteet voivat olla:

- poraus, mk/pom
- vesimenekkiekoe, mk/kpl
- injektoitu reikä, mk/kpl (reiän pituus määritetään suunnitelmissa)
- injektoinnin aloituskerta, mk/kpl

Koska louhinnan keskeytymiskustannuksen sisällyttäminen em. hintoihin on hyvin vaikeaa, voidaan keskeytymishinta kysyä erikseen käytettäessä suoriteperusteista urakointia.

Urakkatyön edellytyksenä ovat selvät säännöt siitä, mitkä toimenpiteet kuuluvat yhteen injektointireikään: aloitus-, seossuhtenvaihto- ja lopetuskriteerit. Lisäksi tarvitaan ohjeet siitä, kuinka kuinka siirrytään aikaperusteiseen työhön edellisten määräysten ulkopuolella. Työmäärät voidaan sisällyttää nykyisen käytännön mukaisesti kokonaishintaurakkaan. Yksikköhintoja käytetään, kun urakka-asiakirjoissa ilmoitetut määrät ylittyvät.

Urakkaluonteiseen esi-injektointiin ei voida siirtyä välittömästi. Sitä ennen on kerättävä kokemuksia injektointityön systemaattisesta suorittamisesta. Toisalta tarvitaan yleinen, kaikkien käyttämä työselitys, josta käyvät ilmi käytettävät työmenetelmät ja laatuvaatimukset.

Nykyisen käytännön yhtenäistämiseksi on liitteessä 3. esitetty ehdotus esi-injektoinnin yleiseksi työselitykseksi. Laadintaperusteena on ollut esi-injektoinnin louhintarytmille aiheuttaman haitan vähentäminen. Työselityksessä on uusien työmenetelmien lisäksi esitetty uudet kalustovaatimukset. Kalustolle asetettavien vaatimusten laadinnassa tulee huomioida injektointikohteen laajuus, ja uudistuksia yleensäkin tehtäessä on tarkoin punnittava, saavutetaanko muutoksella taloudellista hyötyä. Koska työselitys on yleisluonteinen, tulee yksityiskohtia lisätä tapauskohtaisesti.

11. YHTEENVETO

Tunnelin injektointitarve määräytyy tunnelin ympäristön ja käyttötarkoituksen perusteella määritettävästä tiiveystavoitteesta ja kallion ominaisuuksista. Niiden perusteella tunnelilinja voidaan jakaa tiiveysluokkiin ja tehdä esi-injektointin toimenpide-ennuste.

Tunnelin tiiveystavoitteen määrittämiseen tulee erityisesti kiinnittää huomiota, koska injektointikustannukset merkittävästi lisääntyvät tiiveystavoitteen kasvun funktiona.

Nykyisillä menetelmillä ja nykyisessä laajuudessaan suoritettavilla kallion rakoilua ja vedenjohtavuutta koskevilla esitutkimuksilla ei tunnelin vuoto-
vesimäärää ja siten myös injektointitarvetta voida tarkasti etukäteen määrittää. Täysin paikkansa pitävää tietoa kallio-olosuhteista tunnelitasossa saadaan vasta tunnelin louhinnan yhteydessä tai etukäteen tehtävästä pilottitunnelista. Suunnitelmissa esitettäviä injektointimääriä on tästä johtuen pidettävä ennusteena.

Lopullinen injektointitarve määritetään louhinnan aikana vesimenekikokeiden perusteella. Suomessa käytetyt injektointin aloituskriteerit ovat olleet kokemusperäisiä ja usein silmämääräiseen arvioon perustuvia. Tukholman Rakennusviraston kehittämän injektointin aloituskriteerin soveltuvuutta on syytä kokeilla myös täällä.

Esi-injektoinnissa on pyrittävä nopeaan ja tehokkaaseen kallion tiivistämiseen siten, että louhintarytmi häiriintyy mahdollisimman vähän. Työn nopeuttamiseksi on esi-injektointin porauskaavio pidettävä vakiona ja injektoinnissa on noudatettava etukäteen laadittua suunnitelmaa, jolla rajataan yhden injektointireiän käsittelyaika. Edellytykset ovat tehokaan kaluston käyttö, mahdollisuus monireikäinjektointiin ja tiiveystavoitteen ollessa tiukka yhdistetty sementti-kemiallinen injektointi.

Kallio-olosuhteiden muuttuessa selvästi ennustetusta on suunnitelmia voitava muuttaa tilannetta vastaavaksi ja yllättävien, suurien vesivuotojen yhteydessä on injektointisuunnitelmat tehtävä tapauskohtaisesti.

Työssä on esitetty ehdotus esi-injektoinnin yleiseksi työselitykseksi. Siinä on otettu huomioon uusimmat työmenetelmät ja kalustovaatimukset on asetettu sen mukaisesti.

Kun esi-injektointi keskeyttää louhinnan täysin, ovat siitä aiheutuneet louhinnan keskeytymiskustannukset samaa suuruusluokkaa varsinaisten esi-injektointikustannusten kanssa. Urakka-asiakirjoissa louhinnan keskeytymiskustannukset voidaan sisällyttää aikaperusteisen injektointityön hintaan. Kun käytetään suoriteperusteista urakointia, on keskeytymiskustannus kysyttävä erikseen.

Kun injektointimäärät ovat selvästi ylittäneet asiakirjoissa esitetyt määrät, eivät tarjouspyyntövaiheessa ilmoitetut yksikköhinnat ole olleet urakoitsijoiden kannalta edullisia. Tämä on johtunut siitä, ettei työmaan kiinteitä kustannuksia ole riittävästi osattu sisällyttää yksikköhintaan.

Ratkaisuksi on ehdotettu kahta erilaista menetelmää: Esi-injektoinnin yksikköhintaan sisällytetään kaikki louhinnan keskeytymisestä aiheutuvat kustannukset siten, että injektointimäärien kasvu ei vaikuta kokonaistulokseen urakoitsijan kannalta. Tämä nostaa nykyisissä urakka-asiakirjoissa olevien esi-injektoinnin yksikköhintojen suuruusluokkaa. Toisessa menetelmässä kysytään eri yksikköhinnat injektointimäärien kasvun mukaisesti. Rajana voi olla esimerkiksi 25, 50, 100 % jne. ylitys ennakkoarvioissa.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Airaksinen, J., Maa ja pohjavesihydrologia. Oulu 1978. S. 60-93.
- /2/ Alte, B., Olsson, T., Bestämning av sprickvattentryck i berg kring tunnlar och bergrum med hänsyn till risken för grundvattensänkning. Byggforskningen rapport R144:1979. Tukholma 1979. 29 s.
- /3/ Anttikoski, U., Maanalaisen rakentamisen vaikutus pohjaveteen kaupunkialueilla. Vesitalous 1974:1. S.10-16.
- /4/ Anvisningar för utförande av cementinjektering i berg. Utgiven av BT. 1968. 28 s.
- /5/ Banks, D.C., In situ measurement of permeability in basalt. Symposium of percolation through fissured rock. Stuttgart 1972. ISRM. 6 s.
- /6/ Barra Inj-esite, Cementsa Ab, Malmö, Ruotsi.
- /7/ Bergman, G., Långtidsseffekten av tätning i bergtunnlar. Sammanställning av grundvattenläckaget i bergtunnlar i Stockholm under åren 1969-1979. Tukholma 1979. Byggforskningen rapport R143:1979. 32 s.
- /8/ Bergman, M., Grundvatteninläckning i tunnlar och bergrum. En dokumentation av förhållandena vid 73 tunnelavsnitt och bergrum i Sverige. Tukholma 1977. Byggforskningen rapport R51:1977. 32 s.
- /9/ Bergman, S.G., Tunneltätning. Injekteringsmedel inträngning i sand och smala spalter. Tukholma 1970. Byggforskningen rapport R45:1970. 65 s.
- /10/ Bergman, S.G., et al, Tunneltätning mot små läckage. Tukholma 1975. Byggforskningen rapport R25:1975. 82 s.
- /11/ Bergtekniska anvisningar vid utsprängning av tunnlar och bergrum med hänsyn till främst bergtäckning och täthetskrav. Tukholma 1977. Stockholms Gatukontor Ritning 21013.
- /12/ Borchardt, P., Tätning av finsprickigt berg med injekteringsmedlet Terraseal vid hetvattentunnel under Göta älv i Göteborg. Diskussionsinlägg. Bergmekanikdag 1980. Tukholma 1980. S. 145-149.
- /13/ Bowen, R., Grouting in engineering practice. Lontoo 1975. 187 s.
- /14/ Bradbury, H.W., Boyes, R.G.H., Lentotuhka injektioinnissa. International conference on the use of by-products and waste in civilengineering. Pariisi, November 28-30, 1978. Vol II. Suomennos (J. Havukainen). 10 s.

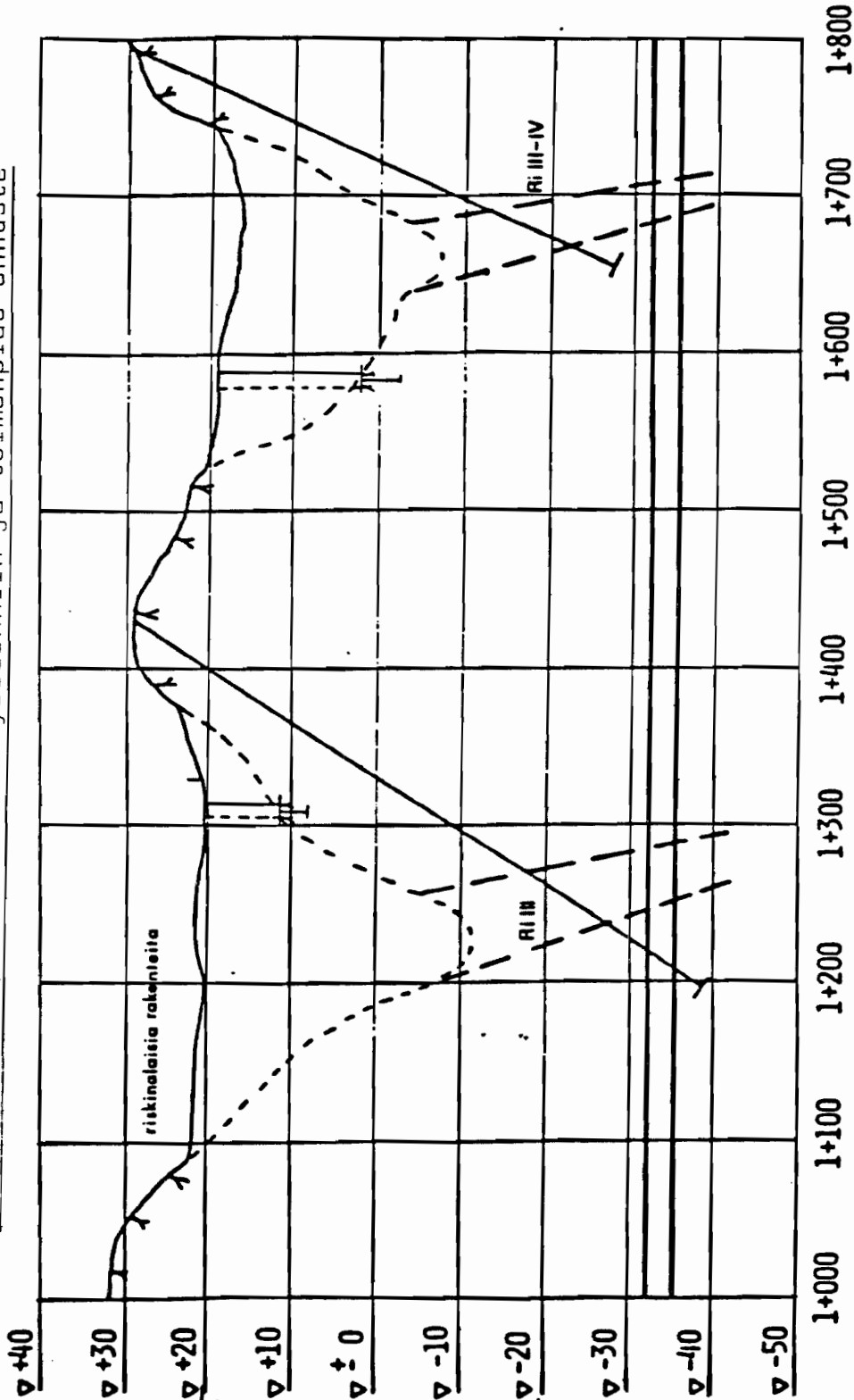
- /15/ Broms, B., Grundvattensänkning - ett geotekniskt problem. Väg och vatten byggaren 1973:6. S.594-597.
- /16/ Bruce, N.E., et al, Grouting of tunnels in order to avoid detrimental groundwaterlowering. Subsurface space. Rockstore 80. Proceedings of international symposium. Vol 1. Tukholma 23.-27.6.1980. S. 89-95.
- /17/ Cambefort, H., Bodeninjektionstechnik. Wiesbaden 1969. 543 s.
- /18/ Carlsson, A., Olsson, T., Hydraulic properties of Swedish crystalline rocks. Hydraulic conductivity and its relation to depth. Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala. Uppsala 1977. S. 71-84.
- /19/ Carlsson, A., Olsson, T., Waterleakage in the Forsmark tunnel, Uppland, Sweden. Tukholma 1977. SGU, Serie C nr. 734. 45 s.
- /20/ Carlsson, L., Olsson, T., Hydrogeologiska synpunkter på grundvattenläckage i tunnlar. Bergmekanikdag 1979. Tukholma 1979. S. 231-249.
- /21/ Egger, P., Rock stabilisation. Rock mechanics. Udine 1974. International Centre for Mechanical Sciences. Courses and lectures no. 165. S. 241-282.
- /22/ Erma, R., Rakennusurakan sopimusehdot I. Helsinki 1974. S. 245-251.
- /23/ Gardemeister, R., Naantali-Turku kaukolämpötunnelin lujituksen ja tiivistyksen pääperiaatteet. 1980 julkaisematon. 5 s.
- /24/ Gardemeister, R., et al, Rakennusgeologisen kallioluokituksen soveltaminen. Espoo 1976. VTT Geotekniikan laboratorio. Tiedonanto 25. 38 s.
- /25/ Gustafsson, Y., et al, Grundvattensänkning vid tunneldrivning. Byggmästaren 49 (1970) 6. S. 23-26.
- /26/ Harding, P.G., Multiple grouting techniques beat Stockholm's ground water. Tunnels and Tunneling 12 (1980) 6. S. 41-43.
- /27/ Hartikainen, J., Helsingin metron pohjavesitarkkailujärjestelmä. Vesitalous 1974:1. S. 17-24.
- /28/ Helfrich, H., et al, Förundersökningars värde och omfattning. Tukholma 1979. BeFo. Rapport nr. 18:2/79. 226 s.
- /29/ Hoek, E., Bray, J.W., Rock slope engineering. Groundwater flow: permeability and pressure. Lontoo 1977. S. 127-149.
- /30/ Holopainen, P., Kallion tiivistäminen injektoimalla. Diplomityö. TTKK. Espoo 1977. 88 s.
- /31/ Holopainen, P., Vesimenekkimittaus. Rakennusalan Kalliotutkimusohjeet RKO-79. Käsikirjoitus. Julkaisematon 1979. 6 s.

- /32/ Houlsby, A.C., Routine interpretation of Lugeon watertest. Quarterly Journal Engineering Geology 9 (1976) S. 303-313.
- /33/ Intraplast A-esite. Ab Svenska Sica, Järfalla, Ruotsi.
- /34/ Intrusion Aid-esite. Prepakt Iberica S.A., Madrid, Espanja.
- /35/ Kairausopas IV. Pohjaveden pinnan mittaaminen. SGY. Otaniemi 1975. 26 s.
- /36/ Karlsson, B., Erfarenheter från drivning av tunnel under Göta älv. Bergsprängningskomitten. Protokoll från diskussionsmöte. Tukholma 1980. S. 215-237.
- /37/ Karlsson, L., Sprutbetongens vidhäftning mot olika bergunderlag - fältförsök. Bergmekanikdag 1978. BeFo. Tukholma 1978. S. 167-177.
- /38/ Karlsson, L., Bergförstärkning, Julkaisematon.
- /39/ Kauranne, L.K., et al, Rakennusgeologia II. Otaniemi 1972. 530 s.
- /40/ Kähönen, Y., Helsingin kalliotunneleiden lujitus- ja vuotovesimäärät sekä tarkemittauskäytäntö. Kalliomekaniikan päivä 1979. Helsinki 1979. Rakennusgeologinen yhdistys. 16 s.
- /41/ Lehtinen, P., Injektointityöselitys. Helsinki 1980 julkaisematon. 5 s.
- /42/ Liisanantti, P., Tukemis-, lujitus- ja tiivistystöiden suunnittelun toteuttamisen taloudellinen merkitys. Helsinki 1981. INSKO, julkaisu 49-81. Kalliorakenteiden ja tilojen lujittaminen ja tiivistäminen. 6 s.
- /43/ Liljestränd, B., Meriviemärin injektointipäivä - seminaari. Espoo 1980, julkaisematon.
- /44/ Lindskoug, N-E., Nilsson, L-Y., Grundvatten och byggande. Tukholma 1974. Byggforskningen rapport R20:1974, 163 s.
- /45/ Louis, C., Rock hydraulics. Rock mechanics. Udine 1974. International Centere for Mechanical Scienses. Courses and lectures no. 165. S. 241-282.
- /46/ Morfeldt, C-O., Hultsjö, S., Litet dropp stälper ofta stor stad. Väg och vattenbyggaren 1973:6. S. 601-604.
- /47/ Morfeldt, C-O., Är injektering i berg en svartkonst. Täta tunnlar bättre - seminaari. Tukholma 1979. BeFo rapport nr. 302:1/79. 12 s.
- /48/ Niini, H., Kallion luonnollinen vaihtelu ja rakotihyden mittaaminen. Helsinki 1976. INSKO, julkaisu 122-76. Kalliomekaniikan päivä - Kalliotilojen pysyvyys. 25 s.

- /49/ Olofsson, S., Svantsson, V., Geohydrologiska underökningar vid tunnelbyggnad. Väg och vattenbyggaren 1973:6 S. 610-612.
- /50/ Olsson, T., Carlsson, A., Vatteninläckning till berganläggningar. Förväntningsmodell av influensområde. Byggmästaren 1978: 11. S. 14-16
- /51/ Paasila, K., Injektointi. Rakennustaito 1974:11. S. 20-31.
- /52/ Peltomaa, P., Injektoinnin suunnitteluun liittyvät tutkimukset. Helsinki 1981. INSKO, julkaisu 49-81. Kalliorakenteiden ja -tilojen lujittaminen ja tiivistäminen. 15 s.
- /53/ Peltomaa, P., Injektointimenetelmät ja injektointityön suoritus. Helsinki 1981. INSKO, julkaisu 49-81. Kalliorakenteiden ja -tilojen lujittaminen ja tiivistäminen. 11 s.
- /54/ Pokki, E., Pohjavesikysymys Päijännetunnelissa. Kalliomekaniikan päivä 1979. Helsinki 1979. Rakennusgeologinen yhdistys. 11 s.
- /54/ Puttonen, J., Salo, J-P., Pohjavesivirtausten selvittäminen osana kallioon sijoitettavan ydinjätevaraston turvallisuusanalyysia. Kalliomekaniikan päivä 1979. Helsinki 1979. 19 s.
- /56/ Pöllä, J., Esi-injektoinnin vaikutus kallion louhintatyön taloudellisuuteen. Helsinki 1981. INSKO, julkaisu 49-81. Kalliorkenteiden ja -tilojen lujittaminen ja tiivistäminen. 5 s.
- /76/ Rakennusalan kalliotutkimusohjeet, RKO-79. Helsinki 1979. 55 s.
- /58/ Raudasmaa, P., Pohjavesikysymykset louhintatöissä. Helsinki 1980. INSKO, julkaisu 1-80. Louhinta asutuskeskuksissa. 6 s.
- /59/ Räsänen, T., Vesihuoltotunnelit. Maa- ja kalliorakennus. Helsinki 1976. S. 367-369.
- /50/ Saanio, V., Kalliomekaniikan luentomoniste. Osa I. Espoo 1978. S. 140-144.
- /61/ Saari, K., Kallion läpäisevyys ja vedenjohtavuus. Kalliomekaniikan päivä 1979. Helsinki 1979. 8 s.
- /62/ Saarilahti, A., Urakkamuodot ja niiden käyttömahdollisuudet maa- ja vesirakennustöissä. Helsinki 1978. INSKO, julkaisu 125-78. Maa- ja vesirakennustöiden rakennuttaminen. 14 s.
- /63/ Sage, R., Groundwater chapter. Pit slope manual. Ottawa 1977. 240 s.
- /64/ Solovjew, N., Kallioinjektointi. Maa- ja kalliorakennus. Helsinki 1976. S. 416-419.
- /65/ Solovjew, N., Injektointi. Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja. Käsikirjoitus. 9 s.

- /66/ Solovjew, N., Injektointi ja jäädytys kalliorakentamisesta. Helsinki 1974. INSKO, julkaisu 74-19. Kalliorakenteiden suunnittelu ja toteuttaminen, 22 s.
- /67/ Sund, B., Tätä tunnlär bättre - seminaari. Tukholma 1979. BeFo rapport nr. 302:1/79. 4 s.
- /68/ Taanila, P., Seisminen tutkimus. Maa- ja kalliorakennus. Helsinki 1976. S. 229-232.
- /69/ Tervilä, K., Esi-injektoinnin suorittaminen, kustannukset ja huomioiminen urakka-asiakirjoissa. Helsinki 1981. INSKO, julkaisu 49-81. Kalliorakenteiden ja -tilojen lujittaminen ja tiivistäminen. 8 s.
- /70/ Tiainen, I., Raudasmaa, P., Metrotunnelien injektointi. Geoteknillisen toimiston tiedote 8, 1.4.1977. Helsinki. 51 s.
- /71/ Vesimenekkilaitte "IVO". Esite. Julkaisematon. 10 s.
- /72/ Vuolio, Raimo., Louhintaräjätysten suunnittelu ja suorittaminen. Helsinki 1980. S. 24.

Tunnelilinjan jakaminen tiiveysluokkiin ja toimenpide-ennuste

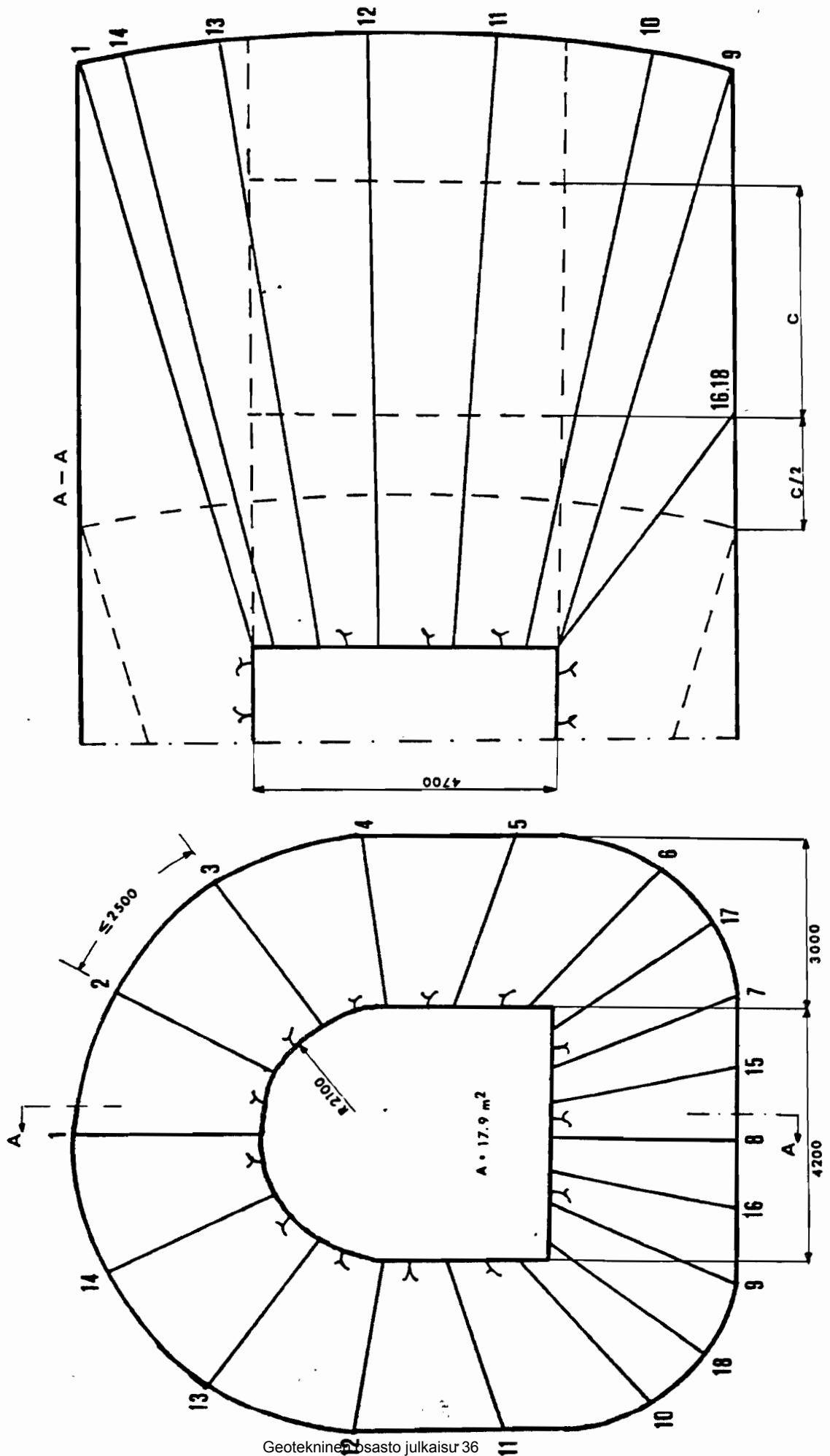


TIIVEYSLUOKKA	Q 1/100 m
I	Q < 4
II	4 ≤ Q < 8
III	Q ≥ 8

toimenpide
varauduttava toimenpiteeseen

tiiveysluokka	III
tunnusteluopetus	III
esi-injektointi	III

Esi-injektioinnin porauskaavio eräässä tunnelipoikkeileikkauksessa



EHDOTUS

1 (4)

ESI-INJEKTOINNIN YLEINEN TYÖSELITYS

- työselitys noudattaa Talo-70 jakoa
- urakkasopimusmuoto: kokonaishintaurakka
- selityksen tarkoituksena on vähentää esi-injektionnin louhintarytmille aiheuttamaa haittaa
- työselitystä on täydennettävä kunkin kohteen erikoisvaatimusten mukaisesti

190

Yleistä, työn laajuus

Urakkaan kuuluvat kaikki louhintakohteen vaatimat tiivistystyöt. Kokonaishintaan kuuluvat suunnittelijan arvioimat massamäärät. Määrät on ilmoitettu urakkaohjelmassa ja suunnittelijan arvioimat toimenpidealueet on esitetty piirustuksissa. Mahdolliset muutokset määrissä korvataan yksikköhinnoilla urakkaohjelman ja työselityksen mukaisesti.

Tunnelin lopullinen sallittu vuotovesimäärä kullakin tunneliosuudella (tiiveysluokat) ja arvioitu pohjavedenpaine on esitetty piirustuksissa.

1911

Injektointiaineet ja kalusto

Injektointityössä käytetään pääsääntöisesti pika-sementtiä (Rapid). Seoksessa käytetään tunkeutuvuutta ja pumpattavuutta parantavaa sekä kutistumista ja erottumista ehkäisevää lisäainetta (esim. bentoniitti, IA, lentotuhka). Valittavasta lisäaineesta sovitaan rakennuttajan kanssa. Poikkeuksellisesti suurten rakojen yhteydessä voidaan käyttää normaalisementtiä sekä hiekkaa, lentotuhkaa, yms. täyteainetta. Käytöstä sovitaan rakennuttajan valvojan kanssa.

Jäljempänä esitettävien sääntöjen perusteella voidaan käyttää kemiallista injektointiainetta. Käytettävistä aineista sovitaan rakennuttajan kanssa.

Sementtilaasti sekoitetaan nopeasti pyörivässä sekoittimessa (kierrosnopeus 1500-3000 r/min). Sekoitusaika on oltava vähintään 4 minuuttia. Sekoittimen ja pumpun välissä on oltava välihämmentin.

Injektointipumppujen ja sekoittimien tulee olla konekäyttöisiä ja injektointitöissä yleisesti käytettävää tyyppiä. Pumppu varustetaan jokaista ulosottoa varten erillisellä painemittarilla.

Injektointipumpun käyttöpainetehon on oltava 3 MPa ja sen tulee antaa tasainen syöttö vakioaineella kuuteen erilliseen painepiiriin.

Injektointiputkiston on oltava sisähalkaisijaltaan vähintään $\varnothing 1''$ ja käytettävien tulppien on sulkeuttava tiiviisti kaikilla mahdollisilla käyttöaineilla.

Kemialliseen injektointiin käytetään erillistä kalustoa, joka valitaan käytettävän aineyhdistelmän perusteella.

Urakoitsijan on hyväksyttävä kalusto rakennuttajalla ennen työn aloittamista.

1912

Työn suoritus

Esi-injektointi suoritetaan pääsääntöisesti alla esitettävien ohjeiden mukaisesti. Mikäli kallioolosuhteet poikkeavat ennustetusta, on rakennuttajalla (valvojalla) oikeus antaa yksittäisissä tapauksissa eri ohjeet injektoinnin suorittamisesta.

Tunnusteluporaus suoritetaan piirustuksissa esitetyillä alueilla ja muuten kallio-olosuhteiden niin määrätessä (valvojan ohjeiden mukaan). Reiät porataan piirustuksissa esitettävällä tavalla tunnelin pohjaan ja kattoon siten, että reiän päätepiste on korkeintaan 1 m teoreettisen profiilin ulkopuolella (reikiä voidaan alkuosaltaan käyttää hyväksi louhinnassa). Jos tunnustelu suoritetaan esi-injektoidulla alueella, tunnustelureiät porataan injektointiporauskaavion mukaisesti.

Injektointiporaus suoritetaan piirustuksissa esitettyjen porauskaavion mukaisesti. Jokaiselle tiiveysluokalle on oma kaavionsa. Reiät porataan kerralla täyteen pituuteensa. Injektointireikien poraus on pyrittävä suorittamaan kokonaisuudessaan injektointia edeltävässä vuorossa. Systemaattisen esi-injektoinnin alueella porataan reiät suoraan kaavion mukaisesti ja muualla tunnustelurei'issä suoritettujen vesimenekikokeiden perusteella.

Reikien pituus (tunnustelu ja injektointi) valitaan urakoitsijan louhintarytmin ja katkon pituuden perusteella siten, että injektointia aluetta on 2-5 katkon edellyttämä matka perän edessä.

Reiät, joita ei injektoida, tulee juottaa sementtilaastilla umpeen.

Kallio-olosuhteiden vaatiessa, voidaan porauskaaviota muuttaa tilanteeseen sopivaksi ja suorittaa tarvittaessa vaiheittainen poraus ja injektointi valvojan antamien ohjeiden mukaisesti.

Vesimenekkipokeet suoritetaan tunnustelurei'issä ja valvojan vaatiessa kaikissa injektoitavaksi aiotuissa rei'issä. Vesimenekkipoke tehdään yksitulppamenetelmällä 0.5 MPa:n ylipaineella pohjavedenpaineeseen nähden. Tulppa on asetettava riittävän syvälle reikään (0.8-1.5 m kallion rikkonaisuudesta riippuen). Mittauksessa paineen on pysyttävä 5 minuuttia.

Porattavien reikien määrä ja injektointitoimenpiteiden laajuus määritetään ns. ruotsalaista sääntöä käyttäen.

Porauksen jälkeen reiät puhdistetaan aina vedellä. Sementti-injektointi aloitetaan vesisementtisuhteella 3:1. Mikäli paine ei nouse 30 minuutin aikana, saennetaan laastia seossuhteeseen 2:1. Mikäli paine ei nouse tällöin 50 minuutin kuluessa, saennetaan laastia vielä seossuhteeseen 1:1. Jos paine ei vielääkään nouse 10 minuutin kuluessa ja menekki on suuri, voidaan laastia saentaa vielä seossuhteeseen 0.5:1. Jos paine ei tällä seossuhteellakaan nouse 10 minuutin kuluessa, pyydetään valvojalta lisäohjeita.

Lopetuspaine on X.X MPa (valitaan kohteen mukaan). Massan menekin tulee pysähtyä paineessa, joka ei alita maksimipainetta 20 %, ja paineen on tällöin pysyttävä 5 minuutin ajan.

Paineen nousun tulee olla tasainen. Mikäli paine nousee huomattavan nopeasti, on reikä huuhdeltava ja injektointi aloitetaan uudestaan. Ilman pakoitavaa syytä ei injektointia saa keskeyttää, mutta mikäli tähän joudutaan on reikä huuhdeltava. Injektoinnin jälkeen reiät täytetään sementtilaastilla siten, että niistä ei jää tippumaan vuotovesiä.

Kun tiiveystavoite on pienempi kuin 6-5 (l/min 100 m tunnelia), ryhdytään kemialliseen injektointiin niissä rei'issä, joissa vesimenekki on pienempi kuin 1 (l/min m MPa). Myös sementillä injektoidut reiät käsitellään lopuksi kemiallisesti. Ennen kemiallisen käsittelyn aloittamista on sementillä käsiteltyt reiät puhdistettava huolellisesti vedellä. Geeliytymisajaksi valitaan 15-30 minuuttia. Kemiallisen injektoinnin ohjeellinen kesto aika on 10-15 min/reikä.

Täydentävän kemiallisen injektoinnin yhteydessä voidaan tarvittaessa poiketa edellä esitetystä sementti-injektointiohjeesta.

Injektointiryhmään kuuluu työnjohtaja ja kaksi ammattimiestä. Työnjohtajan tulee olla täysin injektointia hallitseva. Työnjohtaja pitää jokaisesta työvuorosta injektointipöytäkirjaa, josta ilmenee kaikki injektoinnin aikana tehtyt toimenpiteet ja tapahtumat. Rakennuttaja toimittaa pöytäkirjamallit. Työnjohtajan on lisäksi pidettävä työmaalla piirustusta, johon päivittäin merkitään valmistuneet reiät ja niiden sementtimenekit ja kemiallisen aineen kulutus sekä vesimenekkimittauksen tulokset.

1913

Maksu- ja mittausperusteet

Esi-injektointihinnat sisältävät myös kaikki injektoinnista muille töille aiheutuvat haittavaikutukset louhintatyön keskeytymiskustannuksineen.

Tunnusteluporaukseen kuuluu reiän poraus ja vesimenekikokeen suorittaminen sekä reiän juottaminen umpeen. Korvausperuste on mk/reikäjm. Yksikköhinat jaetaan reikäpituuden mukaan alle XX m ja yli XX m. Yli XX m:n rei'issä korvataan vesimenekikoe alla esitettävällä tavalla.

Injektointireikien poraukseen kuuluu reikien poraus. Korvausperuste on mk/reikäjm. Yksikköhinat jaetaan reikäpituuden mukaan alle 10 m ja yli 10 m.

Vesimenekikokeeseen kuuluu kokeen suorittaminen yksitulppamenetelmällä. Korvausperuste on mk/koe. Hintaan sisältyy kokeen tuloksen ilmoittaminen injektointipöytäkirjassa.

Injektointityöhön kuuluu tarvikkeiden hankinta, reikien puhdistus ja massan pumppaaminen. Hinnan tulee sisältää työnjohtajan ja kahden ammattimiehen palkkakustannukset ja kalustokustannukset, joihin kuuluvat lisäksi kaluston kunnossapitokustannukset ja huoltoon tarvittavat materiaalit sekä käyttövoima ja painevesi. Työaikaan lasketaan lisäksi kaluston siirto työmaalla ja kaluston pesuun kuluva aika. Korvausperuste on mk/h.

Injektointiaineet korvataan käytetyn määrän perusteella omakustannushintaan tunnelissa, johon lisätään yleiskustannuslisänä xx %.

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

1. Anttikoski, U., Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen. 1973. 30,-
2. Anttikoski, U., Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1973. 50,-
3. Anttikoski, U., Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1974. 50,-
4. Mäkinen, R., Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella. 1974. 50,-
5. Saarelma, M., Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys. 1974. 30,-
6. Saarelma, M., Kitkapaalujen kantavuus. 1976. 30,-
7. Petäjä, J., Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen. 1977. 50,-
8. Raudasmaa, P., Metrotunneleiden injektointi. 1977. 120,-
9. Anttikoski, U., Kalliotunnelien käyttö varastointiin. 1977. 50,-
10. Tikkanen, H., Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa. 1978. 70,-
11. Arkima, O., Kluuvin ruhjeen jäädytys. 1978. 120,-
12. Raudasmaa, P., Puiset perustusrakenteet. 1979. 50,-
13. Havukainen, J., Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa. 1979. 50,-
14. Vähäaho, I., Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen. 1979. 50,-
15. Raudasmaa, P., Pohjavesitarkkailu -80. 1980. 50,-
16. Anttikoski, U., Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunneli-konferenssin kokemusten perusteella. 1979.
17. Roinisto, J., Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin. 1981. 50,-
18. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa. 1981. 50,-
19. Roinisto, J., Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys. 1981. 50,-
20. Vuola, P., Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta. 1981. 50,-
21. Havukainen, J., Korhonen, O., Tonttialueiden maarakenteet. 1981. 30,-
22. Havukainen, J., Esimerkkejä jätteen hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä. 1981.
23. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa. 1982. 50,-
24. Latvala, A., Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys. 1982. 30,-
25. Havukainen, J., Hämäläinen, A., Sulamäki, A., Alustava selvitys polttoainelaitoskuonan hyötykäyttö-mahdollisuuksista maarakentamisessa. 1982. 30,-
26. Halkola, H., Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä. 1982.
27. Paavola, P., Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannus selvitys. 1982. 50,-
28. Vähäaho, I., Maarakennusta koskeva mallityöselitys. 1982. 70,-
29. Gulin, K., Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa. 1982. 50,-
30. Halkola, H., Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät. 1982. 50,-
31. Havukainen, J., Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet. 1983. 30,-
32. Havukainen, J., Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar. 1983. 30,-
33. Havukainen, J., The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines. 1983. 30,-
34. Salmelainen, J., Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta. 1983. 50,-
35. Havukainen, J., Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista. 1983.
36. Hytti, P., Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa. 1984. 60,-