HELSINGIN KAUPUNGIN
GEOTEKNILLINEN TOIMISTO

METROTUNNELIEN INJEKTOINTI

Geoteknillisen toimiston
tiedote 8 1. 4. 1977

[redacted]

METROTUNNELIEN INJEKTOINTI

Tämä selvitys on tehty metrotoimiston toimeksiannosta geoteknillisessä toimistossa. Selvityksen tiedot vastaavat tilannetta 31.12.1976.

Sisällysluettelo:

Sivu

1. JOHDANTO 5

2. METROSSA SUORITETTU INJEKTOINTI 6

2.1 Lähtöaineisto 6

2.2 Injektoidun sementin määrä 6

2.3 Injektointikustannukset 6

2.4 Injektointi urakkavaiheittain 7

2.41 Kamppi-Kaivokatu/Elovuori Oy 7
2.42 Kaivokatu-Mikonkatu/Vesto Oy 8
2.43 Kampin aseman laajennuslouhinnat/Lemminkäinen Oy 9
2.44 Kluuvin ruhjeen läpäisy/Lemminkäinen Oy 9
2.45 Siltasalmi-Mikonkatu/Vesi-Pekka Oy 10
2.46 Siltasalmi-Karhupuisto/Vesto Oy ja Hakaniemen aseman laajennuslouhinnat/Rilke Oy 10
2.47 Junatie-Karhupuisto/Karppinen Oy 11

2.5 Kaivokadun aseman itäisen ilmanvaihtokuilun injektointi 11

2.51 Kuilun sijainti 11
2.52 Louhinta 11
2.53 Kallion laatu 12
2.54 Esi-injektointi 12
2.55 Paikoittainen jälki-injektointi 15
2.56 Systemaattinen jälki-injektointi 16
2.57 Injektoinnin kustannukset 17

2.6 Stabilodur-C-injektointi eteläisessä raidetunnelissa paaluvälillä 58+15 ... 58+55 19

2.61 Esi-injektointi 19
2.62 Jälki-injektointi sementillä 19
2.63 Kemiallinen injektointi 19
2.64 Injektointikustannukset 19

3. INJEKTOINNIN PERUSTEISTA 21

3.1 Laskumenetelmät 21

3.11 Ongelmat 21
3.12 Aineen virtaus maassa ja kalliossa 21
3.13 Injektointiaineiden ominaisuudet virtauksen kannalta 22
3.14 Injektointipaine 22
3.15 Kaivantojen injektointilaskelmat 24

3.2 Injektointimenetelmän valinta 25

Sivu

4. INJEKTOINTIAINEET 29

4.1 Aiheen rajaus 29

4.2 Injektointiaineiden tärkeimmät ominaisuudet .. 29

4.21 Tunkeutuvuus 29
4.22 Kovettuminen 29
4.23 Myrkyllisyys 30

4.3 Yleisimmät injektointiaineet 30

4.31 Aineiden ryhmittely 30
4.32 Injektointiaineet 30
Sementti 30
Kemialliset aineet 31
Bitumipohjaiset aineet 33
Ligniinit 34

5. INJEKTOINNIN SUUNNITTELU 35

5.1 Injektoinnin tavoitteet 35

5.2 Injektointia edeltävät tutkimukset 35

5.21 Kallion ja vuotokohtien kartoitus 35
5.22 Vesimenekkimittaukset 35

5.3 Esi-injektointi 37

5.31 Esi-injektoinnin tavoite 37
5.32 Esi-injektointitarpeen määrittely sallitun vuotovesimäärän perusteella 37
5.33 Injektointi- ja tunnustelureikien poraus 38
5.34 Vesimenekkikokeet 41
5.35 Reikien injektointi 41
5.36 Louhinta 41

5.4 Jälki-injektointi 42

5.41 Tunnelitilojen jälki-injektointi 42
Yleistä 42
Injektoimisajankohta 42
Porauskaaviot 42

6. INJEKTOINTITYÖN SUORITUS 45

6.1 Vuotovesimäärän tarkkailu 45

6.11 Tarkkailun tavoitteet 45
6.12 Vuotovesien mittaaminen 45

6.2 Injektointipöytäkirjat 45

6.21 Pöytäkirjojen tarpeellisuus 45
6.22 Nykyinen käytäntö 45
6.23 Uudet pöytäkirjamallit 47

Sivu

6.3 Injektointityöselitykset 47

6.31 Kokemuksia käytössä olleista työselityksistä 47

6.32 Injektointityöselitykseen sisällytettävät asiat 48

Injektointipöytäkirjat ja piirustukset ... 48

Injektointireikien poraus 48

Injektointireikien huuhtelu 48

Injektointireikien täyttö 48

Vesimenekkikokeen suoritus 48

Injektointiaine 49

Injektointikalusto 49

Injektointilaastin vesi-sementtisuhde 49

Injektoinnin huomioiminen louhinnassa (Gatukontor, Tukholma) 50

Injektoinnin ohjaus työn aikana 50

7. KIRJALLISUUTTA 51

LIITTEET 1 ... 6

PIIRUSTUKSET 1737.301 ... 305

1. JOHDANTO

Metrotoimiston toimeksiannosta (3195 SRM 2) on geoteknillinen toimisto laatinut selvityksen metrotunneleissa suoritetuista injektoinneista. Selvityksessä on käsitelty tehtyjen inventointien lisäksi lyhyesti yleisempiä injektointiaineita, injektoinnin suunnittelua sekä työselityksiä. Selvityksessä on pääpaino ollut suoritetuissa töissä saatujen tietojen ja kokemusten kokoamisessa. Työn ovat geoteknillisessä toimistossa suorittaneet fil.maist. Pekka Raudasmaa ja tekn. yo Ilkka Tiainen toimistopäällikkö Usko Anttikosken johdolla. Tietojen kokoamisen on suorittanut tekn. yo Ilkka Tiainen metrotoimiston rakentamisosaston työmaavalvojien avustamana. Työ on tehty aikana 1.10.1976 ... 15.3.1977.

Metrotunneleiden tiiveystasosta ja injektointitavoitteista tehdään ilmeisesti päätöksiä v. 1977 aikana. Injektointiselvitys pyrkii palvelemaan injektoinnin jatkosuunnittelun tarpeita sekä antaa kokonaiskuvan tehtyjen injektointitöiden laajuudesta.

2. METROSSA SUORITETTU INJEKTOINTI

2.1 Lähtöaineisto

Yhtenäisten suunnittelu- ja työohjeiden puuttuessa on injektointia koskevien tietojen merkitseminen pöytäkirjoihin tai piirustuksiin vaihdellut suuresti urakoitsijasta ja työkohteesta riippuen. Injektointipöytäkirjojen perusteella ei ole aina voitu tarkasti paikantaa injektointireikiä. Myöskin esi- ja jälki-injektoinnin erottaminen toisistaan on ollut vaikeaa esim. tapauksissa, joissa raidetunneleiden jälki-injektointi on ollut laajennuslouhintojen esi-injektointia.

Injektoinnin vaikutusta vuotovesimäärään ei ole voitu tarkemmin määritellä lukuunottamatta Kaivokadun kahta erillisinjektointikohdetta.

2.2 Injektoidun sementin määrä

Sementtimenekki 10 tunnelimetriä kohti esitetään graafisesti karttapiirustuksissa 1737.302... 305. Laiturihallin ja yhdyssolien sementtimenekit on jaettu raidetunneleiden kesken. Sementtimenekki metrolinjan 50 m kohden esitetään leikkauspiirustuksessa 1737.301 ja liitteessä 1.

Yhteensä sementtiä on injektoitu metrotunneleihin noin 460 t. Eniten sementtiä on kulunut Kaivokadun asemalla, jossa sementtimenekki on ollut 140 t.

2.3 Injektointikustannukset

Metrossa on v.1976 loppuun mennessä käytetty tunnelitason vuotojen injektointiin 4,18 Mmk. Injektointikustannukset eri louhintaurakoiden aikana on esitetty taulukossa 1.

Selostuksessa esitettävät kustannukset ovat urakoitsijoiden injektointityöstä laskuttamia kustannuksia eikä niihin sisälly työn suunnittelu- ja valvontakustannuksia.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Taulukko 1. Injektointikustannukset eri louhintaurakoiden aikana:

Urakka	Kustannukset Mmk
Kamppi-Kaivokatu/Elovuori Oy	0,81
Kampin aseman laajennuslouhinnat/Lemminkäinen Oy	0,12
Kaivokatu-Mikonkatu/Vesto Oy	0,92
Kluuvin ruhjeen läpäisy/ Lemminkäinen Oy	0,37
Siltasalmi-Mikonkatu/Vesi-Pekka Oy	1,10
Siltasalmi-Karhupuisto ja Hakaniemen aseman laajennuslouhinnat/ Vesto Oy ja Rilke Oy	0,41
Junatie-Karhupuisto/Karppinen Oy	0,45
Yht.	4,18 Mmk

Injektointikustannukset perustuvat metrotoimiston suorittamaan jälkilaskentaan. Osa tiedoista on koottu suoraan laskutuksesta. Kaikki ilmoitetut kustannukset on muutettu joulukuun 1976 hintatasoon käyttämällä rakennuskustannusindeksin ryhmää 1.26 Kallionlouhinta- ja maansiirtotyöt.

2.4 Injektointi urakkavaiheittain

2.41 Kamppi-Kaivokatu/Elovuori Oy

Kamppi-Kaivokatu-louhintaurakkaan kuului Kampin työtunnelin ja raidetunneleiden louhinta välillä Kamppi-Kaivokatu. Louhinta alkoi v. 1973 alussa ja päättyi elokuussa 1974.

Injektointitiedot perustuvat Peratek Oy:n laatimaan raporttiin ja kustannusten osalta jälkilaskentatietoihin. Pääosa injektoinneista on suoritettu Kampin ja Kaivokadun asemien laajennuslouhintaa varten. Sementtimenekki on ollut raportin mukaan noin 100 t, laskutuksen mukaan 145 t. Laskutuksessa esitettyyn sementtimäärään sisältyy myös injektointireikien juottamisessa kulunut sementti sekä muu hukkamassa. Hukka-% on täten noin 30 %.

Injektointikustannukset ja niiden jakautuminen on esitetty taulukossa 2.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Taulukko 2. Kamppi-Kaivokatu-louhintaurakan injektointikustannukset ja niiden jakautuminen

	Kustannukset	
Kampin asema	0,26 milj.mk	
Ratatunnelit	0,03 "	
Kaivokadun asema	0,52 "	
	Yht. 0,81 milj.mk	
Esi-injektointi	0,08 milj.mk	
Jälki-injektointi	0,73 "	
	Yht. 0,81 milj.mk	
Injektointikalusto	0,24 milj.mk	29 %
Poraus	0,54 "	66 %
Sementti	0,03 "	5 %
	Yht. 0,81 milj.mk	100 %

Kampin aseman vuotovesimäärä on ollut 20 ... 30 l/min raidetunneleiden ja aseman laajennuslouhintojen ajan. Injektointi on Kampin asemalla ollut osaksi lujitusinjektointia.

2.42
Kaivokatu-Mikonkatu/Vesto Oy

Kaivokatu-Mikonkatu-louhintaurakka käsitti Kaivokadun aseman laajennuslouhinnat sekä raidetunneleiden louhinnan Kluuvin ruhjeen urakkarajalle. Louhinta alkoi elokuussa 1975 ja päättyi raidetunneleiden osalta saman vuoden joulukuussa sekä laajennuslouhintojen osalta elokuussa 1976.

Urakan aikana on vuoden 1976 loppuun mennessä injektoitu sementtiä noin 130 t. Tästä on esi-injektoinnin osuus noin 24 t. Itäisen ilmanvaihtokuilun injektointiin on kulunut noin 50 % sementistä. Eteläisessä raidetunnelissa on lisäksi suoritettu Stabilodur-C-injektointi, jossa injektointiainetta on kulunut 4200 kg. Stabilodur-C-injektoinnista ja itäisen ilmanvaihtokuilun injektoinnista on esitetty erilliset selostukset kohdassa 2.5.

Injektointikustannukset ovat olleet v. 1976 loppuun mennessä noin 0,92 milj.mk. Esi-injektoinnin osuus on n. 0,15 milj.mk. Injektoinnin osuus louhintaurakan kokonaiskustannuksista on 9 %. Kustannusten jakautumista porauksen, kone- ja työvoimakustannusten välillä ei töiden vielä jatkuessa ole voitu määrittää erilliskohteita lukuunottamatta.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Vuotovesimittaukset asema-alueella on aloitettu helmikuussa 1976, jolloin vuotovesimäärä oli noin 20 l/min. Laajennuslouhintojen loputtua vuotovesimäärä oli noin 32 l/min. Ilmanvaihtokuilujen injektoinnin jälkeen on vuotovesimäärä laskenut tasolle noin 23 l/min. Tavoitteena on Kaivokadun aseman laiturihallin osalta pidetty vuotovesimäärää 15 l/min.

2.43
Kampin aseman laajennuslouhinnat/Lemminkäinen Oy

Kampin aseman louhintaurakkaan on kuulunut aseman laajennuslouhinnat sekä varajunaraiteen louhinta. Työ alkoi syyskuussa 1975 ja päättyi toukokuussa 1976.

Aseman laajennuslouhintojen aikana on suoritettu jälki-injektointia ja varajunaraiteen louhinnan yhteydessä sekä esi- että jälki-injektointia. Asema-alueen injektoinnissa sementtiä on kulunut noin 6 t. Varajunaraiteen injektoinnissa on sementtiä kulunut noin 5 t ja jälki-injektoinnissa noin 15 t.

Urakan injektointikustannukset ovat noin 0,12 milj. mk.

Kampin aseman vuotovesimäärä oli louhinnan alkaessa noin 21 l/min. Injektoinnin vaikutusta vuotovesimäärään ei voida määritellä, koska ympäristöriskien vähäisyydestä johtuen vuotovesitarkkailu on ollut suppeaa.

2.44
Kluuvin ruhjeen läpäisy/Lemminkäinen Oy

Suurimpana louhintatyönä kuuluu Kluuvin ruhjeen urakkaan porauskammioiden louhinta. Urakoitsija aloitti urakkaan liittyvät työt lokakuun alussa 1976. Tunneleiden Kluuvin ruhjeen lävitse tulisi olla valmiina vuoden 1977 loppupuolella.

Jäädytysreikien porauskammioiden louhinnassa on käytetty runsaasti esi-injektointia. Injektoinnissa on kyse vuotojen tiivistämisen lisäksi myöskin lujituksesta. Sementtiä on v. 1976 loppuun mennessä käytetty noin 41 t.

Injektointikustannukset ovat v. 1976 loppuun mennessä noin 0,37 milj.mk.

Vuotovesimäärä on v. 1977 alussa kustakin perästä noin 1 l/min, paitsi Kampin eteläisessä kammiossa, jossa vuotovesimäärä on 3 l/min.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

2.45
Siltasalmi-Mikonkatu/Vesi-Pekka Oy

Siltasalmi-Mikonkatu-louhintaurakka käsitti raidetunneleiden louhinnan välillä Siltasalmi-Mikonkatu sekä Kluuvin aseman laajennuslouhinnat. Louhinta alkoi Siltasalmessa maaliskuussa 1973 ja päättyi Mikonkadulla maaliskuussa 1975.

Tunneliosuudella on suoritettu järjestelmällinen esi-injektointi, jonka laajuus on vaihdellut kallion laadun mukaan. Esi-injektoinnissa on kulunut sementtiä noin 23 t. Injektointireikää on porattu noin 7000 m. Kluuvin aseman alueella on esi-injektointiin käytetty 92 työvuoroa ja injektointireikää on porattu noin 6200 m. Sementtimenekki on 38 t.

Jälki-injektointia on tunneliosuudella suoritettu yksittäisissä vuotokohteissa. Näihin on käytetty sementtiä noin 6 t ja injektointireikää on porattu 188 m. Kluuvin asemalla sementtimenekki on ollut 14 t. Injektointiin on käytetty 44 työvuoroa ja reikää porattu 1075 m.

Injektoinnin kokonaiskustannukset ovat olleet noin 1,10 milj. mk. Tästä on ratatunneleiden osuus 0,59 milj. mk ja Kluuvin aseman osuus 0,51 milj. mk. Kustannuksista oli kalusto- ja miestyövoiman osuus 69 %, porauksen 28 % ja injektointiaineen 3 %.

2.46
Siltasalmi-Karhupuisto/Vesto Oy ja
Hakaniemen aseman laajennuslouhinnat/Rilke Oy

Siltasalmi-Karhupuisto-louhintaurakkaan kuului raidetunneleiden louhinta tällä osuudella. Aseman laajennuslouhintaurakkaan kuuluivat laiturihallin laajennuslouhinnat ja pohjoisen lippuhallin louhinta. Louhinnat alkoivat v. 1972 ja päättyivät toukokuussa 1976. Ennen näitä louhintaurakoita oli erillisenä urakkana louhittu Hakaniemen työtunneli, jossa ei kuitenkaan suoritettu injektointia.

Eri urakoiden aikana on Hakaniemessä suoritettu sekä esi- että jälki-injektointia, joita ei aivan tarkasti ole voitu eritellä toisistaan. Injektoidun sementin kokonaismenekki on ollut vain noin 24 t.

Injektoinnin kokonaiskustannukset ovat olleet 0,41 milj.mk. Tästä laiturihallin injektointiin on kulunut 82 % ja raidetunneleiden injektointiin 18 %. Laiturihallissa on injektointi ollut pääasiassa

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Taulukko 2. Kamppi-Kaivokatu-louhintaurakan injektointikustannukset ja niiden jakautuminen

	Kustannukset	
Kampin asema	0,26 milj.mk	
Ratatunnelit	0,03 "	
Kaivokadun asema	0,52 "	
	Yht. 0,81 milj.mk	
Esi-injektointi	0,08 milj.mk	
Jälki-injektointi	0,73 "	
	Yht. 0,81 milj.mk	
Injektointikalusto	0,24 milj.mk	29 %
Poraus	0,54 "	66 %
Sementti	0,03 "	5 %
	Yht. 0,81 milj.mk	100 %

Kampin aseman vuotovesimäärä on ollut 20 ... 30 l/min raidetunneleiden ja aseman laajennuslouhintojen ajan. Injektointi on Kampin asemalla ollut osaksi lujitusinjektointia.

2.42
Kaivokatu-Mikonkatu/Vesto Oy

Kaivokatu-Mikonkatu-louhintaurakka käsitti Kaivokadun aseman laajennuslouhinnat sekä raidetunneleiden louhinnan Kluuvin ruhjeen urakkarajalle. Louhinta alkoi elokuussa 1975 ja päättyi raidetunneleiden osalta saman vuoden joulukuussa sekä laajennuslouhintojen osalta elokuussa 1976.

Urakan aikana on vuoden 1976 loppuun mennessä injektoitu sementtiä noin 130 t. Tästä on esi-injektoinnin osuus noin 24 t. Itäisen ilmanvaihtokuilun injektointiin on kulunut noin 50 % sementistä. Eteläisessä raidetunnelissa on lisäksi suoritettu Stabilodur-C-injektointi, jossa injektointiainetta on kulunut 4200 kg. Stabilodur-C-injektoinnista ja itäisen ilmanvaihtokuilun injektoinnista on esitetty erilliset selostukset kohdassa 2.5.

Injektointikustannukset ovat olleet v. 1976 loppuun mennessä noin 0,92 milj.mk. Esi-injektoinnin osuus on n. 0,15 milj.mk. Injektoinnin osuus louhintaurakan kokonaiskustannuksista on 9 %. Kustannusten jakautumista porauksen, kone- ja työvoimakustannusten välillä ei töiden vielä jatkuessa ole voitu määrittää erilliskohteita lukuunottamatta.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Vuotovesimittaukset asema-alueella on aloitettu helmikuussa 1976, jolloin vuotovesimäärä oli noin 20 l/min. Laajennuslouhintojen loputtua vuotovesimäärä oli noin 32 l/min. Ilmanvaihtokuilujen injektoinnin jälkeen on vuotovesimäärä laskenut tasolle noin 23 l/min. Tavoitteena on Kaivokadun aseman laiturihallin osalta pidetty vuotovesimäärää 15 l/min.

2.43
Kampin aseman laajennuslouhinnat/Lemminkäinen Oy

Kampin aseman louhintaurakkaan on kuulunut aseman laajennuslouhinnat sekä varajunaraiteen louhinta. Työ alkoi syyskuussa 1975 ja päättyi toukokuussa 1976.

Aseman laajennuslouhintojen aikana on suoritettu jälki-injektointia ja varajunaraiteen louhinnan yhteydessä sekä esi- että jälki-injektointia. Asema-alueen injektoinnissa sementtiä on kulunut noin 6 t. Varajunaraiteen injektoinnissa on sementtiä kulunut noin 5 t ja jälki-injektoinnissa noin 15 t.

Urakan injektointikustannukset ovat noin 0,12 milj. mk.

Kampin aseman vuotovesimäärä oli louhinnan alkaessa noin 21 l/min. Injektoinnin vaikutusta vuotovesimäärään ei voida määritellä, koska ympäristöriskien vähäisyydestä johtuen vuotovesitarkkailu on ollut suppeaa.

2.44
Kluuvin ruhjeen läpäisy/Lemminkäinen Oy

Suurimpana louhintatyönä kuuluu Kluuvin ruhjeen urakkaan porauskammioiden louhinta. Urakoitsija aloitti urakkaan liittyvät työt lokakuun alussa 1976. Tunneleiden Kluuvin ruhjeen lävitse tulisi olla valmiina vuoden 1977 loppupuolella.

Jäädytysreikien porauskammioiden louhinnassa on käytetty runsaasti esi-injektointia. Injektoinnissa on kyse vuotojen tiivistämisen lisäksi myöskin lujituksesta. Sementtiä on v. 1976 loppuun mennessä käytetty noin 41 t.

Injektointikustannukset ovat v. 1976 loppuun mennessä noin 0,37 milj.mk.

Vuotovesimäärä on v. 1977 alussa kustakin perästä noin 1 l/min, paitsi Kampin eteläisessä kammiossa, jossa vuotovesimäärä on 3 l/min.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

2.45
Siltasalmi-Mikonkatu/Vesi-Pekka Oy

Siltasalmi-Mikonkatu-louhintaurakka käsitti raidetunneleiden louhinnan välillä Siltasalmi-Mikonkatu sekä Kluuvin aseman laajennuslouhinnat. Louhinta alkoi Siltasalmessa maaliskuussa 1973 ja päättyi Mikonkadulla maaliskuussa 1975.

Tunneliosuudella on suoritettu järjestelmällinen esi-injektointi, jonka laajuus on vaihdellut kallion laadun mukaan. Esi-injektoinnissa on kulunut sementtiä noin 23 t. Injektointireikää on porattu noin 7000 m. Kluuvin aseman alueella on esi-injektointiin käytetty 92 työvuoroa ja injektointireikää on porattu noin 6200 m. Sementtimenekki on 38 t.

Jälki-injektointia on tunneliosuudella suoritettu yksittäisissä vuotokohteissa. Näihin on käytetty sementtiä noin 6 t ja injektointireikää on porattu 188 m. Kluuvin asemalla sementtimenekki on ollut 14 t. Injektointiin on käytetty 44 työvuoroa ja reikää porattu 1075 m.

Injektoinnin kokonaiskustannukset ovat olleet noin 1,10 milj. mk. Tästä on ratatunneleiden osuus 0,59 milj. mk ja Kluuvin aseman osuus 0,51 milj. mk. Kustannuksista oli kalusto- ja miestyövoiman osuus 69 %, porauksen 28 % ja injektointiaineen 3 %.

2.46
Siltasalmi-Karhupuisto/Vesto Oy ja
Hakaniemen aseman laajennuslouhinnat/Rilke Oy

Siltasalmi-Karhupuisto-louhintaurakkaan kuului raidetunneleiden louhinta tällä osuudella. Aseman laajennuslouhintaurakkaan kuuluivat laiturihallin laajennuslouhinnat ja pohjoisen lippuhallin louhinta. Louhinnat alkoivat v. 1972 ja päättyivät toukokuussa 1976. Ennen näitä louhintaurakoita oli erillisenä urakkana louhittu Hakaniemen työtunneli, jossa ei kuitenkaan suoritettu injektointia.

Eri urakoiden aikana on Hakaniemessä suoritettu sekä esi- että jälki-injektointia, joita ei aivan tarkasti ole voitu eritellä toisistaan. Injektoidun sementin kokonaismenekki on ollut vain noin 24 t.

Injektoinnin kokonaiskustannukset ovat olleet 0,41 milj.mk. Tästä laiturihallin injektointiin on kulunut 82 % ja raidetunneleiden injektointiin 18 %. Laiturihallissa on injektointi ollut pääasiassa

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Taulukko 2. Kamppi-Kaivokatu-louhintaurakan injektointikustannukset ja niiden jakautuminen

	Kustannukset	
Kampin asema	0,26 milj.mk	
Ratatunnelit	0,03 "	
Kaivokadun asema	0,52 "	
	Yht. 0,81 milj.mk	
Esi-injektointi	0,08 milj.mk	
Jälki-injektointi	0,73 "	
	Yht. 0,81 milj.mk	
Injektointikalusto	0,24 milj.mk	29 %
Poraus	0,54 "	66 %
Sementti	0,03 "	5 %
	Yht. 0,81 milj.mk	100 %

Kampin aseman vuotovesimäärä on ollut 20 ... 30 l/min raidetunneleiden ja aseman laajennuslouhintojen ajan. Injektointi on Kampin asemalla ollut osaksi lujitusinjektointia.

2.42
Kaivokatu-Mikonkatu/Vesto Oy

Kaivokatu-Mikonkatu-louhintaurakka käsitti Kaivokadun aseman laajennuslouhinnat sekä raidetunneleiden louhinnan Kluuvin ruhjeen urakkarajalle. Louhinta alkoi elokuussa 1975 ja päättyi raidetunneleiden osalta saman vuoden joulukuussa sekä laajennuslouhintojen osalta elokuussa 1976.

Urakan aikana on vuoden 1976 loppuun mennessä injektoitu sementtiä noin 130 t. Tästä on esi-injektoinnin osuus noin 24 t. Itäisen ilmanvaihtokuilun injektointiin on kulunut noin 50 % sementistä. Eteläisessä raidetunnelissa on lisäksi suoritettu Stabilodur-C-injektointi, jossa injektointiainetta on kulunut 4200 kg. Stabilodur-C-injektoinnista ja itäisen ilmanvaihtokuilun injektoinnista on esitetty erilliset selostukset kohdassa 2.5.

Injektointikustannukset ovat olleet v. 1976 loppuun mennessä noin 0,92 milj.mk. Esi-injektoinnin osuus on n. 0,15 milj.mk. Injektoinnin osuus louhintaurakan kokonaiskustannuksista on 9 %. Kustannusten jakautumista porauksen, kone- ja työvoimakustannusten välillä ei töiden vielä jatkuessa ole voitu määrittää erilliskohteita lukuunottamatta.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Taulukko 2. Kamppi-Kaivokatu-louhintaurakan injektointikustannukset ja niiden jakautuminen

	Kustannukset	
Kampin asema	0,26 milj.mk	
Ratatunnelit	0,03 "	
Kaivokadun asema	0,52 "	
	Yht. 0,81 milj.mk	
Esi-injektointi	0,08 milj.mk	
Jälki-injektointi	0,73 "	
	Yht. 0,81 milj.mk	
Injektointikalusto	0,24 milj.mk	29 %
Poraus	0,54 "	66 %
Sementti	0,03 "	5 %
	Yht. 0,81 milj.mk	100 %

Kampin aseman vuotovesimäärä on ollut 20 ... 30 l/min raidetunneleiden ja aseman laajennuslouhintojen ajan. Injektointi on Kampin asemalla ollut osaksi lujitusinjektointia.

2.42
Kaivokatu-Mikonkatu/Vesto Oy

Kaivokatu-Mikonkatu-louhintaurakka käsitti Kaivokadun aseman laajennuslouhinnat sekä raidetunneleiden louhinnan Kluuvin ruhjeen urakkarajalle. Louhinta alkoi elokuussa 1975 ja päättyi raidetunneleiden osalta saman vuoden joulukuussa sekä laajennuslouhintojen osalta elokuussa 1976.

Urakan aikana on vuoden 1976 loppuun mennessä injektoitu sementtiä noin 130 t. Tästä on esi-injektoinnin osuus noin 24 t. Itäisen ilmanvaihtokuilun injektointiin on kulunut noin 50 % sementistä. Eteläisessä raidetunnelissa on lisäksi suoritettu Stabilodur-C-injektointi, jossa injektointiainetta on kulunut 4200 kg. Stabilodur-C-injektoinnista ja itäisen ilmanvaihtokuilun injektoinnista on esitetty erilliset selostukset kohdassa 2.5.

Injektointikustannukset ovat olleet v. 1976 loppuun mennessä noin 0,92 milj.mk. Esi-injektoinnin osuus on n. 0,15 milj.mk. Injektoinnin osuus louhintaurakan kokonaiskustannuksista on 9 %. Kustannusten jakautumista porauksen, kone- ja työvoimakustannusten välillä ei töiden vielä jatkuessa ole voitu määrittää erilliskohteita lukuunottamatta.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Vuotovesimittaukset asema-alueella on aloitettu helmikuussa 1976, jolloin vuotovesimäärä oli noin 20 l/min. Laajennuslouhintojen loputtua vuotovesimäärä oli noin 32 l/min. Ilmanvaihtokuilujen injektoinnin jälkeen on vuotovesimäärä laskenut tasolle noin 23 l/min. Tavoitteena on Kaivokadun aseman laiturihallin osalta pidetty vuotovesimäärää 15 l/min.

2.43
Kampin aseman laajennuslouhinnat/Lemminkäinen Oy

Kampin aseman louhintaurakkaan on kuulunut aseman laajennuslouhinnat sekä varajunaraiteen louhinta. Työ alkoi syyskuussa 1975 ja päättyi toukokuussa 1976.

Aseman laajennuslouhintojen aikana on suoritettu jälki-injektointia ja varajunaraiteen louhinnan yhteydessä sekä esi- että jälki-injektointia. Asema-alueen injektoinnissa sementtiä on kulunut noin 6 t. Varajunaraiteen injektoinnissa on sementtiä kulunut noin 5 t ja jälki-injektoinnissa noin 15 t.

Urakan injektointikustannukset ovat noin 0,12 milj. mk.

Kampin aseman vuotovesimäärä oli louhinnan alkaessa noin 21 l/min. Injektoinnin vaikutusta vuotovesimäärään ei voida määritellä, koska ympäristöriskien vähäisyydestä johtuen vuotovesitarkkailu on ollut suppeaa.

2.44
Kluuvin ruhjeen läpäisy/Lemminkäinen Oy

Suurimpana louhintatyönä kuuluu Kluuvin ruhjeen urakkaan porauskammioiden louhinta. Urakoitsija aloitti urakkaan liittyvät työt lokakuun alussa 1976. Tunneleiden Kluuvin ruhjeen lävitse tulisi olla valmiina vuoden 1977 loppupuolella.

Jäädytysreikien porauskammioiden louhinnassa on käytetty runsaasti esi-injektointia. Injektoinnissa on kyse vuotojen tiivistämisen lisäksi myöskin lujituksesta. Sementtiä on v. 1976 loppuun mennessä käytetty noin 41 t.

Injektointikustannukset ovat v. 1976 loppuun mennessä noin 0,37 milj.mk.

Vuotovesimäärä on v. 1977 alussa kustakin perästä noin 1 l/min, paitsi Kampin eteläisessä kammiossa, jossa vuotovesimäärä on 3 l/min.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

2.45
Siltasalmi-Mikonkatu/Vesi-Pekka Oy

Siltasalmi-Mikonkatu-louhintaurakka käsitti raidetunneleiden louhinnan välillä Siltasalmi-Mikonkatu sekä Kluuvin aseman laajennuslouhinnat. Louhinta alkoi Siltasalmessa maaliskuussa 1973 ja päättyi Mikonkadulla maaliskuussa 1975.

Tunneliosuudella on suoritettu järjestelmällinen esi-injektointi, jonka laajuus on vaihdellut kallion laadun mukaan. Esi-injektoinnissa on kulunut sementtiä noin 23 t. Injektointireikää on porattu noin 7000 m. Kluuvin aseman alueella on esi-injektointiin käytetty 92 työvuoroa ja injektointireikää on porattu noin 6200 m. Sementtimenekki on 38 t.

Jälki-injektointia on tunneliosuudella suoritettu yksittäisissä vuotokohteissa. Näihin on käytetty sementtiä noin 6 t ja injektointireikää on porattu 188 m. Kluuvin asemalla sementtimenekki on ollut 14 t. Injektointiin on käytetty 44 työvuoroa ja reikää porattu 1075 m.

Injektoinnin kokonaiskustannukset ovat olleet noin 1,10 milj. mk. Tästä on ratatunneleiden osuus 0,59 milj. mk ja Kluuvin aseman osuus 0,51 milj. mk. Kustannuksista oli kalusto- ja miestyövoiman osuus 69 %, porauksen 28 % ja injektointiaineen 3 %.

2.46
Siltasalmi-Karhupuisto/Vesto Oy ja
Hakaniemen aseman laajennuslouhinnat/Rilke Oy

Siltasalmi-Karhupuisto-louhintaurakkaan kuului raidetunneleiden louhinta tällä osuudella. Aseman laajennuslouhintaurakkaan kuuluivat laiturihallin laajennuslouhinnat ja pohjoisen lippuhallin louhinta. Louhinnat alkoivat v. 1972 ja päättyivät toukokuussa 1976. Ennen näitä louhintaurakoita oli erillisenä urakkana louhittu Hakaniemen työtunneli, jossa ei kuitenkaan suoritettu injektointia.

Eri urakoiden aikana on Hakaniemessä suoritettu sekä esi- että jälki-injektointia, joita ei aivan tarkasti ole voitu eritellä toisistaan. Injektoidun sementin kokonaismenekki on ollut vain noin 24 t.

Injektoinnin kokonaiskustannukset ovat olleet 0,41 milj.mk. Tästä laiturihallin injektointiin on kulunut 82 % ja raidetunneleiden injektointiin 18 %. Laiturihallissa on injektointi ollut pääasiassa

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

laajennuslouhintoja varten suoritettua esi-injektointia.

Injektointityön kustannukset ovat jakautuneet siten, että porauksen osuus on 36 %, kalustovuokrien ja palkkojen osuus 63 % ja aineen osuus 1 %.

Vuotovesimäärien kehitystä ei Hakaniemen osalta tunneta niin tarkasti, että injektoinnin vaikutus olisi eriteltävissä. Hakaniemen laiturihalli vuotaa v. 1977 alussa kuitenkin vain 10 l/min. Tähän arvoon on päästy suorittamalla esi-injektointia laajennuslouhintojen yhteydessä. Jälki-injektointia jatketaan vielä laiturihallin ja työtunnelin välisellä raidetunneliosuudella, joka vuotaa 25 l/min.

2.47
Junatie-Karhupuisto/Karppinen Oy

Junatie-Karhupuisto-louhintaurakka käsitti raidetunneleiden louhinnan Junatieltä Karhupuistoon sekä Sörnäisten aseman laajennuslouhinnan. Louhinta alkoi tammikuussa 1973 ja päättyi kesäkuussa 1974.

Urakan aikana on vesivuotojen injektointia suoritettu ainoastaan Sörnäisten laiturihallin alueella. Sementin kokonaismenekki oli noin 25 t.

Injektoinnin kokonaiskustannukset ovat olleet 0,45 milj.mk. Tarkempaa erittelyä kustannuksista ei ole saatavissa.

Vesivuotojen injektointien lisäksi on Junatien elementtitunnelin ja kallion kontaktia lujitettu sementti-injektoinnilla. Tässä injektoinnissa on sementtiä kulunut noin 71 t. Kustannuksista ei ole saatu tarkkaa tietoa.

2.5
Kaivokadun aseman itäisen ilmanvaihtokuilun injektointi

2.51
Kuilun sijainti

Itäinen ilmanvaihtokuilu sijaitsee rautatieaseman eteläisen sisäänkäynnin kohdalla pohjoisen raidetunnelin pohjoispuolella paaluvälillä 56+80 - 57+60.

2.52
Louhinta

Raidetunneli ko. paaluvälillä on louhittu pääosin syyskuussa 1975. Ilmanvaihtokuilu on louhittu 22.-28.12.1975. Itäisin yhdyssola on puhkaistu myöhemmin, 15.1.-20.2.1976.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

2.53 Kallion laatu

Kallio on ilmanvaihtokuilun kohdalla pääosiltaan ehjää graniittia. Pystykuilun kohdalla kallio on kuitenkin runsasrakoista ja rapautunutta. Lisäksi koko kallion alueella esiintyy hyvin kehittynyt avoin vaakarakoilu. Vaakarakoilun esiintyminen alueella on todettu jo metron yleissuunnitteluvaiheessa (Gtt 1969/642). Lisäksi sitä on todettu esiintyvän samassa graniittivyöhykkeessä ns. Postitalon kuilussa.

Voimakas vaakarakoilu tuli esiin myös injektoinnin yhteydessä tehdyssä huuhtelussa, jossa kattoon porattujen reikien välillä oli hyvä vesiyhteys. Kallioon pumpattu suuri sementtimäärä (n. 30 t) selittyy myös avonaisen vaakarakoilun esiintymisellä.

2.54 Esi-injektointi

Esi-injektoinnin suorituskohdat ilmenevät kuvasta 1 . Esi-injektoinnin tarve pääteltiin porattaessa louhintareikiä. Jos poratusta reiästä katsottiin tulevan liikaa vettä, sitä pidennettiin 4,8- tai 6,4-metriseksi ja suoritettiin injektointi sementtivellillä. Yleisin vesisementtisuhde oli tällöin 4, joskin myös muita vesisementtisuhteita käytettiin. Reikä injektoitiin aina yhdellä kertaa. Käytetyt injektointipaineet vaihtelivat 0,4 ... 1 MPa, ja 1 MPa oli käytetty max-paine. Käytetyt sementtimäärät ja porattu reikämäärä on esitetty kuvissa 1 ja 2 .

Esi-injektoinnista ei ollut varsinaista suunnitelmaa, vaan suunnittelu tapahtui louhinnan edistyessä katkon porauksen yhteydessä. Injektointireiät porattiin arvioidulle paikalle 4,2 - 6,4 m pitkinä siten, että niiden pohja oli noin 1 - 1,5 m etäisyydellä teoreettisesta tunnelin pinnasta. Injektointireikiä ei käytetty louhintareikinä.

Injektointi keskittyi voimakkaasti välille 57+25 - 57+40, johon injektoitiin 10,7 tonnia sementtiä. Tästä huolimatta jouduttiin väliä vielä jälki-injektoimaan. Ilmanvaihtotunnelissa pahimmin vuotavaa kohtaa pl 57+50 - 57+60 ei sensijaan esi-injektoitu läheskään samassa määrin. Esi-injektoinnin vaikutusta vuotovesiin on vaikea arvioida, sillä osassa tunnelia, pl 57+30 - 58+50 tehtiin välittömästi jälki-injektointia. Vuotovesien määrä on louhinnan ja heti suoritetun jälki-injektoinnin jälkeen n. 3,5 l/min., joka on 10 l/min · 100 m.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Taulukko 2. Kamppi-Kaivokatu-louhintaurakan injektointikustannukset ja niiden jakautuminen

	Kustannukset	
Kampin asema	0,26 milj.mk	
Ratatunnelit	0,03 "	
Kaivokadun asema	0,52 "	
	Yht. 0,81 milj.mk	
Esi-injektointi	0,08 milj.mk	
Jälki-injektointi	0,73 "	
	Yht. 0,81 milj.mk	
Injektointikalusto	0,24 milj.mk	29 %
Poraus	0,54 "	66 %
Sementti	0,03 "	5 %
	Yht. 0,81 milj.mk	100 %

Kampin aseman vuotovesimäärä on ollut 20 ... 30 l/min raidetunneleiden ja aseman laajennuslouhintojen ajan. Injektointi on Kampin asemalla ollut osaksi lujitusinjektointia.

2.42
Kaivokatu-Mikonkatu/Vesto Oy

Kaivokatu-Mikonkatu-louhintaurakka käsitti Kaivokadun aseman laajennuslouhinnat sekä raidetunneleiden louhinnan Kluuvin ruhjeen urakkarajalle. Louhinta alkoi elokuussa 1975 ja päättyi raidetunneleiden osalta saman vuoden joulukuussa sekä laajennuslouhintojen osalta elokuussa 1976.

Urakan aikana on vuoden 1976 loppuun mennessä injektoitu sementtiä noin 130 t. Tästä on esi-injektoinnin osuus noin 24 t. Itäisen ilmanvaihtokuilun injektointiin on kulunut noin 50 % sementistä. Eteläisessä raidetunnelissa on lisäksi suoritettu Stabilodur-C-injektointi, jossa injektointiainetta on kulunut 4200 kg. Stabilodur-C-injektoinnista ja itäisen ilmanvaihtokuilun injektoinnista on esitetty erilliset selostukset kohdassa 2.5.

Injektointikustannukset ovat olleet v. 1976 loppuun mennessä noin 0,92 milj.mk. Esi-injektoinnin osuus on n. 0,15 milj.mk. Injektoinnin osuus louhintaurakan kokonaiskustannuksista on 9 %. Kustannusten jakautumista porauksen, kone- ja työvoimakustannusten välillä ei töiden vielä jatkuessa ole voitu määrittää erilliskohteita lukuunottamatta.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Vuotovesimittaukset asema-alueella on aloitettu helmikuussa 1976, jolloin vuotovesimäärä oli noin 20 l/min. Laajennuslouhintojen loputtua vuotovesimäärä oli noin 32 l/min. Ilmanvaihtokuilujen injektoinnin jälkeen on vuotovesimäärä laskenut tasolle noin 23 l/min. Tavoitteena on Kaivokadun aseman laiturihallin osalta pidetty vuotovesimäärää 15 l/min.

2.43
Kampin aseman laajennuslouhinnat/Lemminkäinen Oy

Kampin aseman louhintaurakkaan on kuulunut aseman laajennuslouhinnat sekä varajunaraiteen louhinta. Työ alkoi syyskuussa 1975 ja päättyi toukokuussa 1976.

Aseman laajennuslouhintojen aikana on suoritettu jälki-injektointia ja varajunaraiteen louhinnan yhteydessä sekä esi- että jälki-injektointia. Asema-alueen injektoinnissa sementtiä on kulunut noin 6 t. Varajunaraiteen injektoinnissa on sementtiä kulunut noin 5 t ja jälki-injektoinnissa noin 15 t.

Urakan injektointikustannukset ovat noin 0,12 milj. mk.

Kampin aseman vuotovesimäärä oli louhinnan alkaessa noin 21 l/min. Injektoinnin vaikutusta vuotovesimäärään ei voida määritellä, koska ympäristöriskien vähäisyydestä johtuen vuotovesitarkkailu on ollut suppeaa.

2.44
Kluuvin ruhjeen läpäisy/Lemminkäinen Oy

Suurimpana louhintatyönä kuuluu Kluuvin ruhjeen urakkaan porauskammioiden louhinta. Urakoitsija aloitti urakkaan liittyvät työt lokakuun alussa 1976. Tunneleiden Kluuvin ruhjeen lävitse tulisi olla valmiina vuoden 1977 loppupuolella.

Jäädytysreikien porauskammioiden louhinnassa on käytetty runsaasti esi-injektointia. Injektoinnissa on kyse vuotojen tiivistämisen lisäksi myöskin lujituksesta. Sementtiä on v. 1976 loppuun mennessä käytetty noin 41 t.

Injektointikustannukset ovat v. 1976 loppuun mennessä noin 0,37 milj.mk.

Vuotovesimäärä on v. 1977 alussa kustakin perästä noin 1 l/min, paitsi Kampin eteläisessä kammiossa, jossa vuotovesimäärä on 3 l/min.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

2.45
Siltasalmi-Mikonkatu/Vesi-Pekka Oy

Siltasalmi-Mikonkatu-louhintaurakka käsitti raidetunneleiden louhinnan välillä Siltasalmi-Mikonkatu sekä Kluuvin aseman laajennuslouhinnat. Louhinta alkoi Siltasalmessa maaliskuussa 1973 ja päättyi Mikonkadulla maaliskuussa 1975.

Tunneliosuudella on suoritettu järjestelmällinen esi-injektointi, jonka laajuus on vaihdellut kallion laadun mukaan. Esi-injektoinnissa on kulunut sementtiä noin 23 t. Injektointireikää on porattu noin 7000 m. Kluuvin aseman alueella on esi-injektointiin käytetty 92 työvuoroa ja injektointireikää on porattu noin 6200 m. Sementtimenekki on 38 t.

Jälki-injektointia on tunneliosuudella suoritettu yksittäisissä vuotokohteissa. Näihin on käytetty sementtiä noin 6 t ja injektointireikää on porattu 188 m. Kluuvin asemalla sementtimenekki on ollut 14 t. Injektointiin on käytetty 44 työvuoroa ja reikää porattu 1075 m.

Injektoinnin kokonaiskustannukset ovat olleet noin 1,10 milj. mk. Tästä on ratatunneleiden osuus 0,59 milj. mk ja Kluuvin aseman osuus 0,51 milj. mk. Kustannuksista oli kalusto- ja miestyövoiman osuus 69 %, porauksen 28 % ja injektointiaineen 3 %.

2.46
Siltasalmi-Karhupuisto/Vesto Oy ja
Hakaniemen aseman laajennuslouhinnat/Rilke Oy

Siltasalmi-Karhupuisto-louhintaurakkaan kuului raidetunneleiden louhinta tällä osuudella. Aseman laajennuslouhintaurakkaan kuuluivat laiturihallin laajennuslouhinnat ja pohjoisen lippuhallin louhinta. Louhinnat alkoivat v. 1972 ja päättyivät toukokuussa 1976. Ennen näitä louhintaurakoita oli erillisenä urakkana louhittu Hakaniemen työtunneli, jossa ei kuitenkaan suoritettu injektointia.

Eri urakoiden aikana on Hakaniemessä suoritettu sekä esi- että jälki-injektointia, joita ei aivan tarkasti ole voitu eritellä toisistaan. Injektoidun sementin kokonaismenekki on ollut vain noin 24 t.

Injektoinnin kokonaiskustannukset ovat olleet 0,41 milj.mk. Tästä laiturihallin injektointiin on kulunut 82 % ja raidetunneleiden injektointiin 18 %. Laiturihallissa on injektointi ollut pääasiassa

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

laajennuslouhintoja varten suoritettua esi-injektointia.

Injektointityön kustannukset ovat jakautuneet siten, että porauksen osuus on 36 %, kalustovuokrien ja palkkojen osuus 63 % ja aineen osuus 1 %.

Vuotovesimäärien kehitystä ei Hakaniemen osalta tunneta niin tarkasti, että injektoinnin vaikutus olisi eriteltävissä. Hakaniemen laiturihalli vuotaa v. 1977 alussa kuitenkin vain 10 l/min. Tähän arvoon on päästy suorittamalla esi-injektointia laajennuslouhintojen yhteydessä. Jälki-injektointia jatketaan vielä laiturihallin ja työtunnelin välisellä raidetunneliosuudella, joka vuotaa 25 l/min.

2.47
Junatie-Karhupuisto/Karppinen Oy

Junatie-Karhupuisto-louhintaurakka käsitti raidetunneleiden louhinnan Junatieltä Karhupuistoon sekä Sörnäisten aseman laajennuslouhinnan. Louhinta alkoi tammikuussa 1973 ja päättyi kesäkuussa 1974.

Urakan aikana on vesivuotojen injektointia suoritettu ainoastaan Sörnäisten laiturihallin alueella. Sementin kokonaismenekki oli noin 25 t.

Injektoinnin kokonaiskustannukset ovat olleet 0,45 milj.mk. Tarkempaa erittelyä kustannuksista ei ole saatavissa.

Vesivuotojen injektointien lisäksi on Junatien elementtitunnelin ja kallion kontaktia lujitettu sementti-injektoinnilla. Tässä injektoinnissa on sementtiä kulunut noin 71 t. Kustannuksista ei ole saatu tarkkaa tietoa.

2.5
Kaivokadun aseman itäisen ilmanvaihtokuilun injektointi

2.51
Kuilun sijainti

Itäinen ilmanvaihtokuilu sijaitsee rautatieaseman eteläisen sisäänkäynnin kohdalla pohjoisen raidetunnelin pohjoispuolella paaluvälillä 56+80 - 57+60.

2.52
Louhinta

Raidetunneli ko. paaluvälillä on louhittu pääosin syyskuussa 1975. Ilmanvaihtokuilu on louhittu 22.-28.12.1975. Itäisin yhdyssola on puhkaistu myöhemmin, 15.1.-20.2.1976.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

2.53 Kallion laatu

Kallio on ilmanvaihtokuilun kohdalla pääosiltaan ehjää graniittia. Pystykuilun kohdalla kallio on kuitenkin runsasrakoista ja rapautunutta. Lisäksi koko kallion alueella esiintyy hyvin kehittynyt avoin vaakarakoilu. Vaakarakoilun esiintyminen alueella on todettu jo metron yleissuunnitteluvaiheessa (Gtt 1969/642). Lisäksi sitä on todettu esiintyvän samassa graniittivyöhykkeessä ns. Postitalon kuilussa.

Voimakas vaakarakoilu tuli esiin myös injektoinnin yhteydessä tehdyssä huuhtelussa, jossa kattoon porattujen reikien välillä oli hyvä vesiyhteys. Kallioon pumpattu suuri sementtimäärä (n. 30 t) selittyy myös avonaisen vaakarakoilun esiintymisellä.

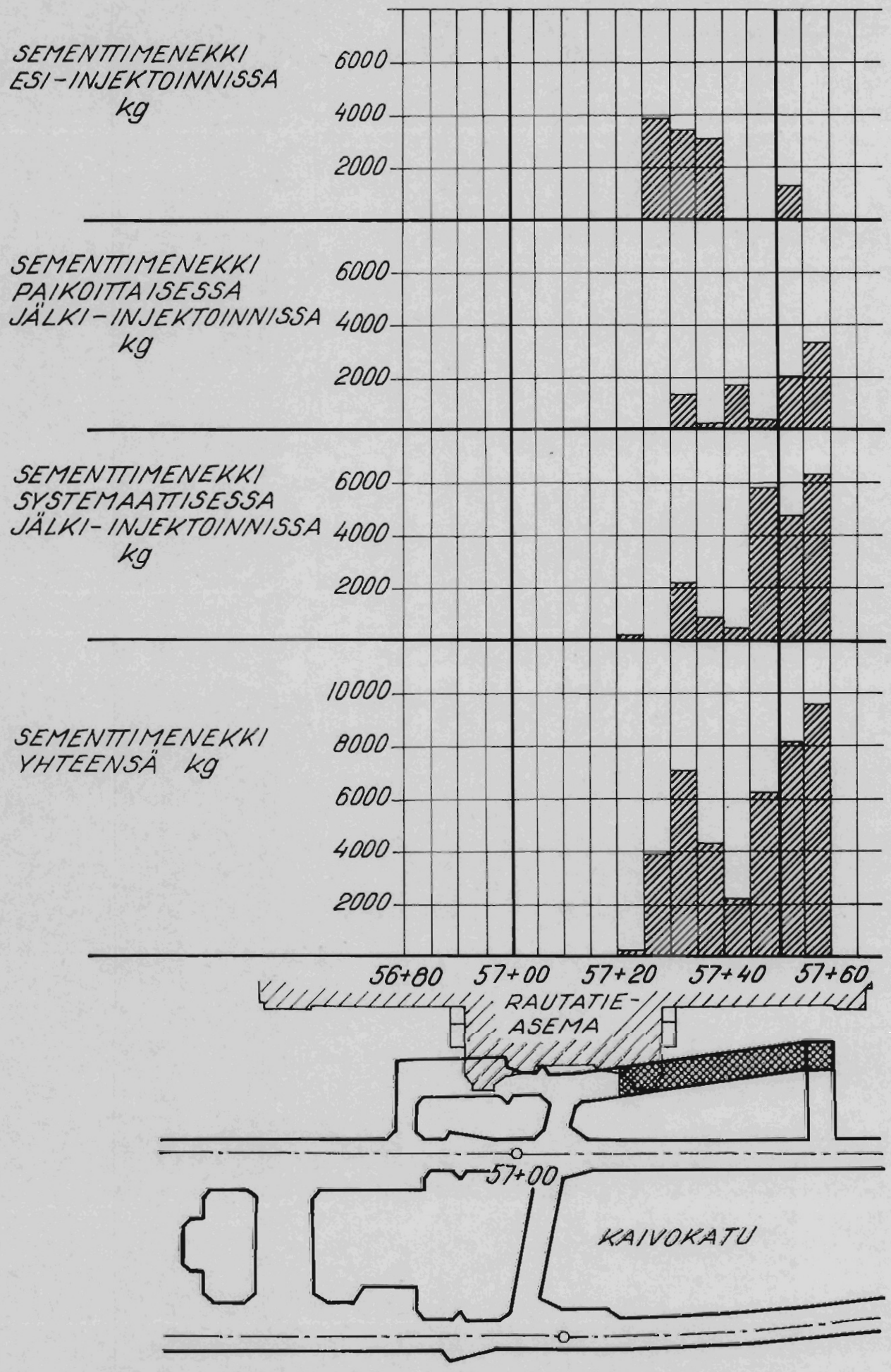
2.54 Esi-injektointi

Esi-injektoinnin suorituskohdat ilmenevät kuvasta 1 . Esi-injektoinnin tarve pääteltiin porattaessa louhintareikiä. Jos poratusta reiästä katsottiin tulevan liikaa vettä, sitä pidennettiin 4,8- tai 6,4-metriseksi ja suoritettiin injektointi sementtivellillä. Yleisin vesisementtisuhde oli tällöin 4, joskin myös muita vesisementtisuhteita käytettiin. Reikä injektoitiin aina yhdellä kertaa. Käytetyt injektointipaineet vaihtelivat 0,4 ... 1 MPa, ja 1 MPa oli käytetty max-paine. Käytetyt sementtimäärät ja porattu reikämäärä on esitetty kuvissa 1 ja 2 .

Esi-injektoinnista ei ollut varsinaista suunnitelmaa, vaan suunnittelu tapahtui louhinnan edistyessä katkon porauksen yhteydessä. Injektointireiät porattiin arvioidulle paikalle 4,2 - 6,4 m pitkinä siten, että niiden pohja oli noin 1 - 1,5 m etäisyydellä teoreettisesta tunnelin pinnasta. Injektointireikiä ei käytetty louhintareikinä.

Injektointi keskittyi voimakkaasti välille 57+25 - 57+40, johon injektoitiin 10,7 tonnia sementtiä. Tästä huolimatta jouduttiin väliä vielä jälki-injektoimaan. Ilmanvaihtotunnelissa pahimmin vuotavaa kohtaa pl 57+50 - 57+60 ei sensijaan esi-injektoitu läheskään samassa määrin. Esi-injektoinnin vaikutusta vuotovesiin on vaikea arvioida, sillä osassa tunnelia, pl 57+30 - 58+50 tehtiin välittömästi jälki-injektointia. Vuotovesien määrä on louhinnan ja heti suoritetun jälki-injektoinnin jälkeen n. 3,5 l/min., joka on 10 l/min · 100 m.

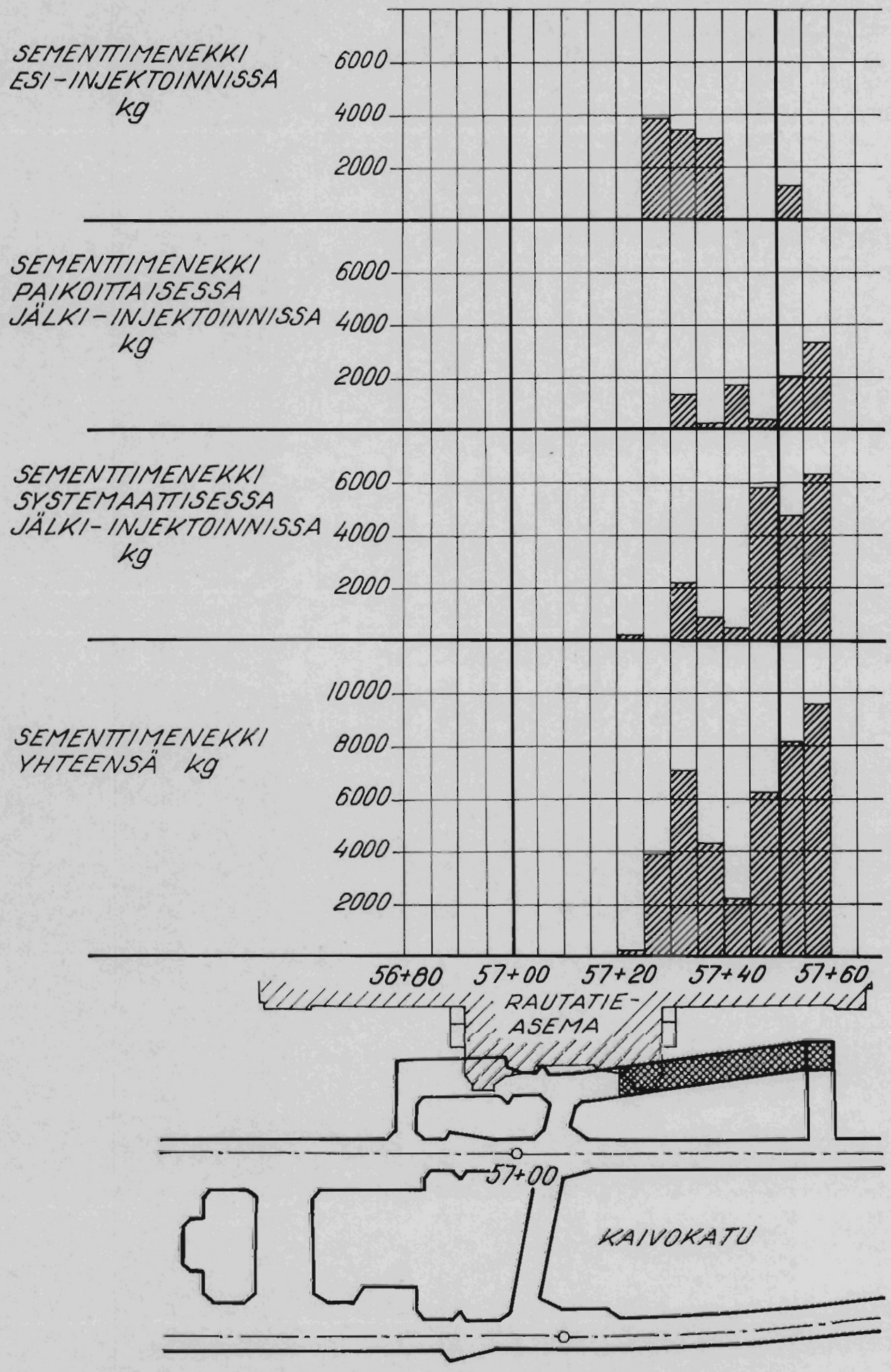
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto



KUVA 1 SEMENTTIMENEKKI KAIVOKADUN ASEMAN ITÄISEN ILMANVAIHTOKUILUN VAAKATUNNELIN INJEKTOINNISSA

Geotekninen osasto Tulkaisu 8

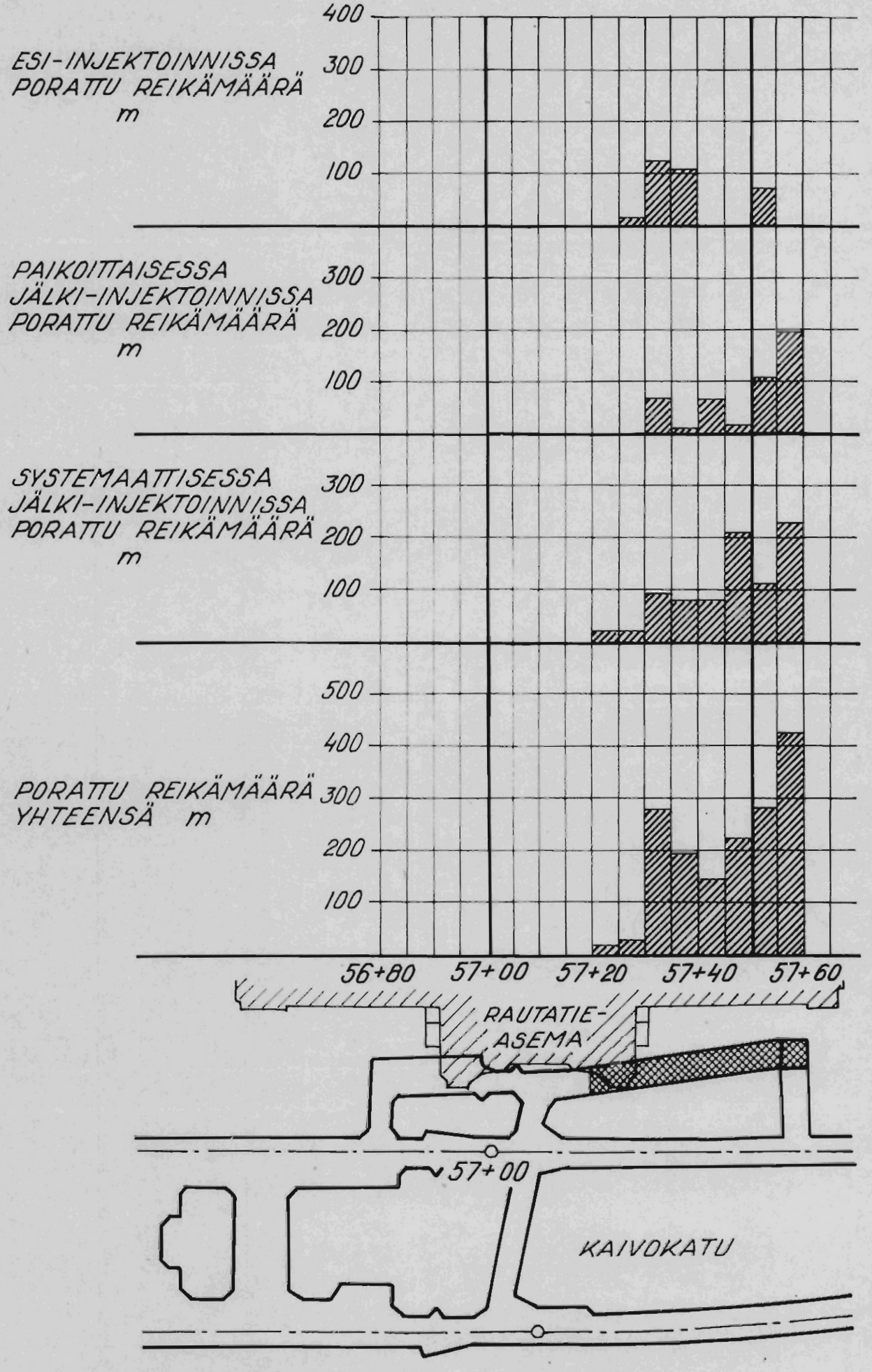
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto



KUVA 1 SEMENTTIMENEKKI KAIVOKADUN ASEMAN ITÄISEN ILMANVAIHTOKUILUN VAAKATUNNELIN INJEKTOINNISSA

Geotekninen osasto Tulkaisu 8

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto



KUVA 2 PORATTU JM-MÄÄRÄ KAIVOKADUN ASEMAN ITÄISEN ILMANVAIHTOKUILUN VAAKATUNNELIN INJEKTOINNISSA

Geoteknisen osaston julkaisu 8

Injektointipöytäkirjat ovat puutteellisia ja niiden perusteella on vaikeaa tarkoin selvittää injektoinnin kulkua. Injektointireikien sijainti ilmoitetaan yleensä vain paalulukeman avulla, selventävää sijaintipiirrosta ei ole. Täten ei voida selvittää, onko injektoitu pohjaa, seiniä vai kattoa. Injektointireikien numeroinnissa ei ole ollut yhtenäistä käytäntöä. Osassa pöytäkirjoja on käytetty juoksevaa numerointia, osassa taas muita merkintätapoja. Tällaista merkintätapaa käytettäessä ei myöskään voida selvittää, onko peräkkäisissä työvuoroissa injektoitu samaa reikää vai ei. Pöytäkirjoista ei myöskään löydy merkintää siitä, onko injektointireikiä käytetty louhintareikinä vai ei. Mitään tietoja poratuista rei´istä, joissa ei katsottu olevan injektointitarvetta, ei pöytäkirjoissa ole.

Esi-injektoinnin kokonaiskustannukset olivat n. 53 200 mk. Ne jakautuivat seuraavasti:

Poraus	300 jm á 37,- mk	11 100 mk
Työ	25 vuoroa á 1 500,- mk	38 200 "
Sementti	11 700 kg á 0,34 mk	4 000 "
	yht.	53 200 mk

Poraus-jm hinta on 37,- mk < 6,4 m.

Työvuoron hinta koostuu:	konekust.	390,-mk/tv
	työnjohto	347,-mk/tv
	am.mies	325,-mk/tv

Miehistömäärä hieman vaihteli, jolloin myös työvuoron hinta muuttui, mutta keskimääräisenä työvuoron hintana voidaan pitää 1500,- mk. Sementin hinta on 0,34 mk/kg.

Injektoitu sementti maksoi 4,40 mk/kg.
Työkustannukset muodostivat 71 % kokonaiskustannuksista.

2.55
Paikoittainen jälki-injektointi

Jälki-injektointia suoritettiin useassa vaiheessa. Heti louhinnan jälkeen syyskuussa 1975 suoritettiin injektointia paaluvälillä 57+40 - 57+50. Huhtikuussa 1976 injektoitiin vaakatunnelin nurkkaa tulevan ilmanvaihtokuilun kohdalta. Tämä injektointi oli osaksi pystykuilun esi-injektointia. Heinä- ja elokuun 1976 aikana suoritettiin injektointia koko ilmanvaihtotunnelin pituudelta.

Injektointikohdat määrättiin tunnelissa näkyvistä vesivuodoista. Injektointireikien määrä ja sijainti suunniteltiin injektoinnin edistymisen myötä. Injektoinnissa max. paine oli 1 MPa. Vesisementtisuhde oli yleensä 4. Reikä injektoitiin yhdellä kertaa. Käytetyt sementtimäärät ja poratut jm-määrät ilmenevät kuvista 1 ja 2 .

Jälki-injektointi ei vaikuttanut lainkaan vuotovesien määrään, ne pysyivät edelleen 3,5 l/min eli 10 l/min · 100 m. Tunnelissa esiintyi ennen jälki-injektointia vuotoja erityisesti pl 57+45 - 57+60. Vaikka tälle osalle injektoitiin sementtiä 6500 kg, ei kokonaisvuotojen määrä pienentynyt.

Injektointipöytäkirjat ja reikien sijaintipiirrokset ovat myös jälki-injektoinnin osalta puutteelliset.

Jälki-injektoinnin kustannukset olivat 83 700,- mk, jotka jakaantuivat:

Poraus 460 jm á 37,- mk	17 000 mk
Työ 40 tv 1590,- mk	63 700 "
Sementti 9000 kg á 0,34	3 000 "
yht.	83 700,- mk

Yksikköhinnat ovat muuten samat kuin esi-injektoinnilla, lukuunottamatta kalustoa, jonka hinta oli 380,- mk/tv. Injektoitu sementti maksoi 9,30 mk/kg. Työkustannukset muodostivat 76 % kustannuksista.

2.56 Systemaattinen jälki-injektointi

Edellisten injektointien lisäksi on Peratek Oy suorittanut injektointia ilmanvaihtotunnelissa pl 57+20 - 57+60 Oy Hagconsultin laatiman suunnitelman mukaan. Injektointi suoritettiin 20.-9.-23.10. 1976.

Injektointitarpeen tarkentamiseksi tehtiin vesipainekokeita sekä rakohuuhtelua koko injektointivälillä. Näin pyrittiin saamaan aikaan yhteyksiä eri injektointireikien ja rakosysteemien välillä ja huuhtelemaan savitäytettä pois raoista. Tämä onnistui hyvin, sillä yhteyksiä saatiin sekä porareikiin että tunnelin seiniin varsin runsaasti. Vesipainekoe suoritettiin porareiässä välillä 0.5 - 4,0 m eli koko reiän pituudella, joten rakojen sijainnista ei saatu sen tarkempia tietoja.

Injektointi suoritettiin vesimenekkimittauksista saatujen tietojen perusteella. Injektointireiät po-

rattiin viuhkan muotoon viuhkavälin ollessa 4 m. (kuva 3). Pohja injektoitiin ensiksi, sen jälkeen seinät ja katto. Käytetty max.paine oli 1,0 MPa. Vesisementtisuhde vaihteli 5 - 0.8 välillä menekin mukaan. Injektointi kohdistui voimakkaasti pl 57+45 - 57+60 välille, jossa vuodot olivat runsaat. Käytetyt sementtimäärät on esitetty kuvassa 1 . Lisäreikiä porattiin tarpeelliseksi katsottuihin paikkoihin. Rakoja yritettiin tukkia ruiskubetonoimalla.

Vuotovesimäärät pienenivät arvosta 3,5 l/min arvoon 2 l/min. Vuotovesimäärä vastaa 6 l/min · 100 m. Vuodot sijaitsevat edelleen pääosin pl 57+45 - 57+60 välillä eli pystykuilun kohdalla.

Käytetyt pöytäkirjat olivat selviä, sijaintipiirroksista selviää reikien sijainti ja havaitut yhteydet muihin reikiin ja rakoihin, samoin ilmenivät vesimenekit rei´ittäin. Pöytäkirjoista käy ilmi injektointisyvyys, joskin injektointi tapahtui koko reikä yhdellä kertaa.

Kokonaiskustannukset systemaattisen jälki-injektoinnin osalta olivat 165 000,- mk, joka jakaantui:

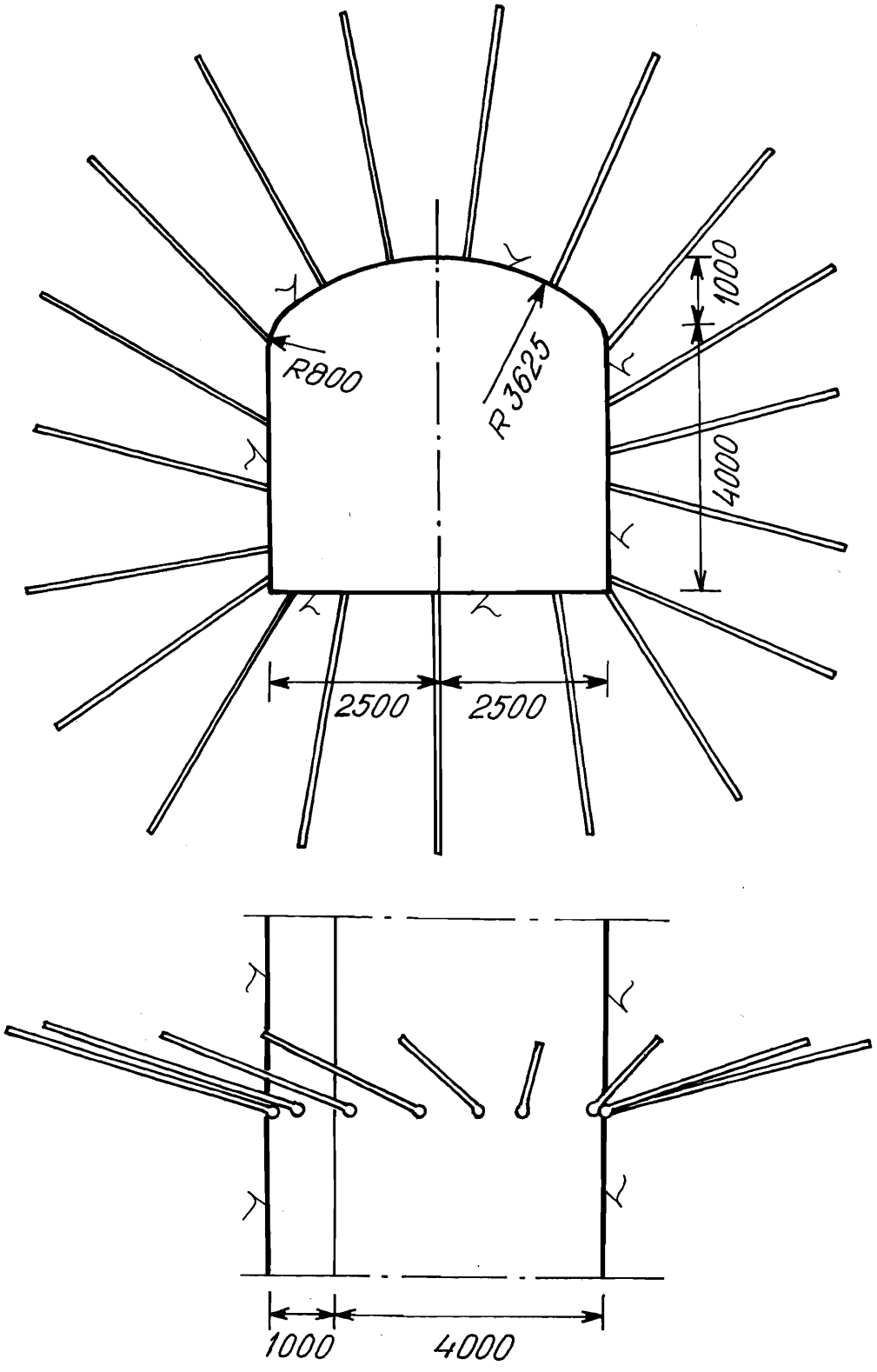
Poraus 844 jm á 37,- mk	31 300 mk
Työ 60 tv á 2100,- mk	126 700 "
Sementti 20700 kg	7 000 "
Yht.	165 000 mk

Työvuoron kalleus johtuu osaksi käytetystä lisäpumpusta. Injektointisementti maksoi 7,70 mk/kg. Työkustannukset muodostivat 77 % kokonaiskustannuksista.

2.57 Injektoinnin kustannukset

Eri injektointivaiheiden kustannuksia on esitetty kohdissa 2.54 ... 2.56. Kokonaisuudessaan injektointikustannukset muodostuivat seuraaviksi:

Esi-injektointi	53 200,- mk
Paikoittainen jälki-injektointi	84 000,- "
Systemaattinen jälki-injektointi	165 000,- "
Yht.	302 200,- mk



KUVA 3 INJEKTOINTIREIKIEN VIUHKA ITÄISEN ILMANVAIHTOKUILUN VAAKATUNNELIN SYSTEMAATTISESSA JÄLKI-INJEKTOINNISSA

2.6
Stabilodur-C-injektointi eteläisessä raidetunnelissa paaluvälillä 58+15 ... 58+55

2.61
Esi-injektointi

Louhinnan yhteydessä suoritettiin paaluvälillä 58+30 ... 58+55 esi-injektointi. Injektoinnissa kului sementtiä 10100 kg. Esi-injektoinnin ja sitä seuranneiden injektointien ainemenekit on esitetty kuvassa 4 .

2.62
Jälki-injektointi sementillä

Jälki-injektointi oli paikoittaista ja siinä kului sementtiä 14500 kg. Jälki-injektoinnin jälkeen oli vuotovesimäärä paaluvälillä 58+15 ...70 sama kuin ennen eli n. 6,5 l/min.

2.63
Kemiallinen injektointi

Kallio todettiin laadultaan rapautuneeksi ja oletettiin sen olevan syynä sementti-injektoinnin heikkoon tulokseen. Kemialliseksi injektointiaineeksi valittiin Stabilodur-C-niminen vesilasipohjainen injektointiaine. Aineen geeliytymisikana käytettiin 60 min.

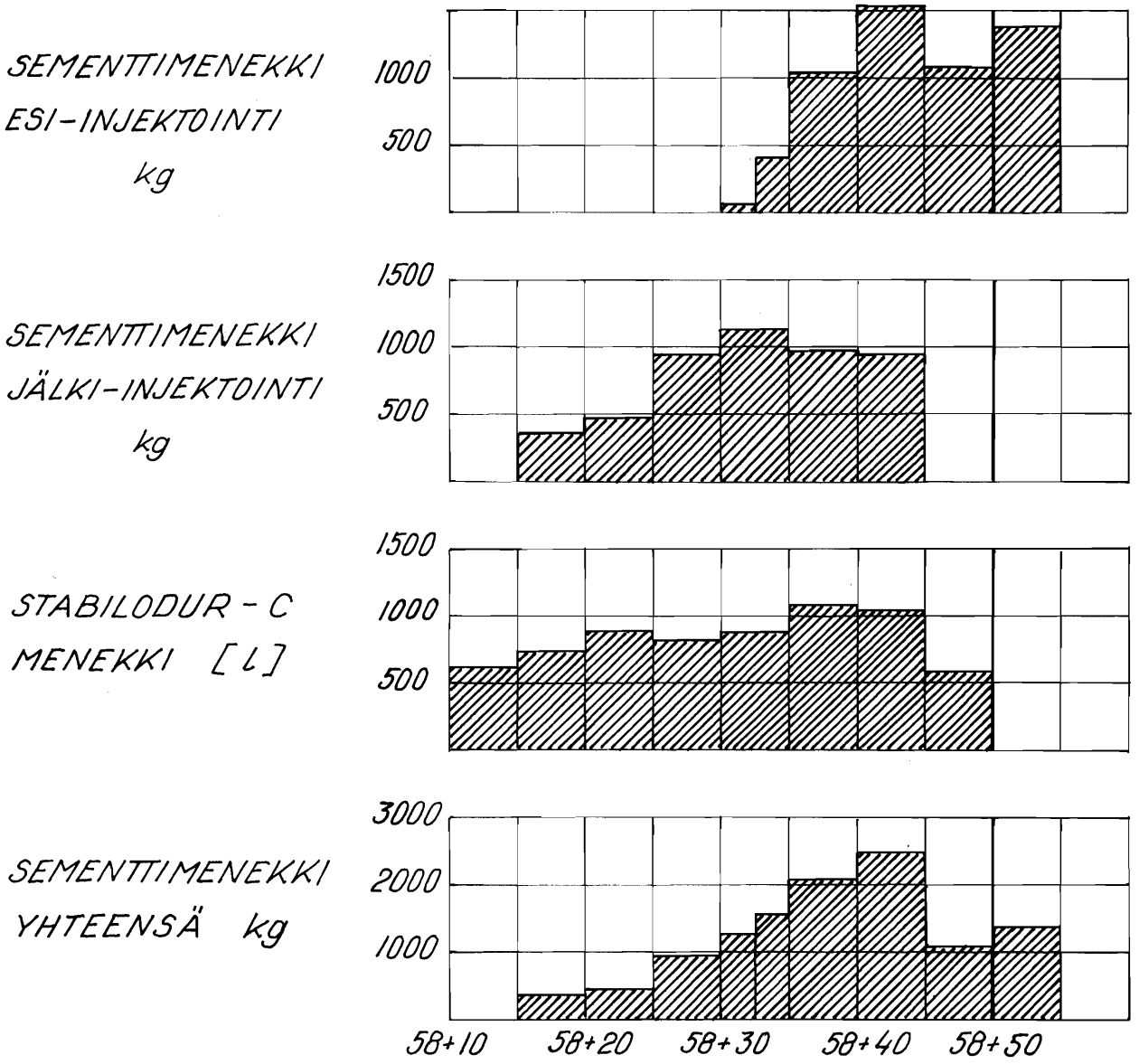
Injektointityön suoritti Peratek Oy aineen valmistajan ohjeiden ja Linjasuunnittelu Oy:n laatimien porauskaavioiden mukaan. Injektointireiät porattiin 16 reiän viuhkoihin. Viuhkaväli oli ensimmäisessä vaiheessa 5 m. Myöhemmin viuhkaväli puolitettiin katon ja seinien osalta. Injektointiainetta kului noin 400 kg. Vuotovesimittausten perusteella ei todettu vuotojen vähenemistä. Vuotovesikartoitusten perusteella tapahtui vuotojen vähentymistä ja siirtymistä. Urakoitsijan mukaan heikkoon lopputulokseen vaikuttivat mm. seuraavat syyt:

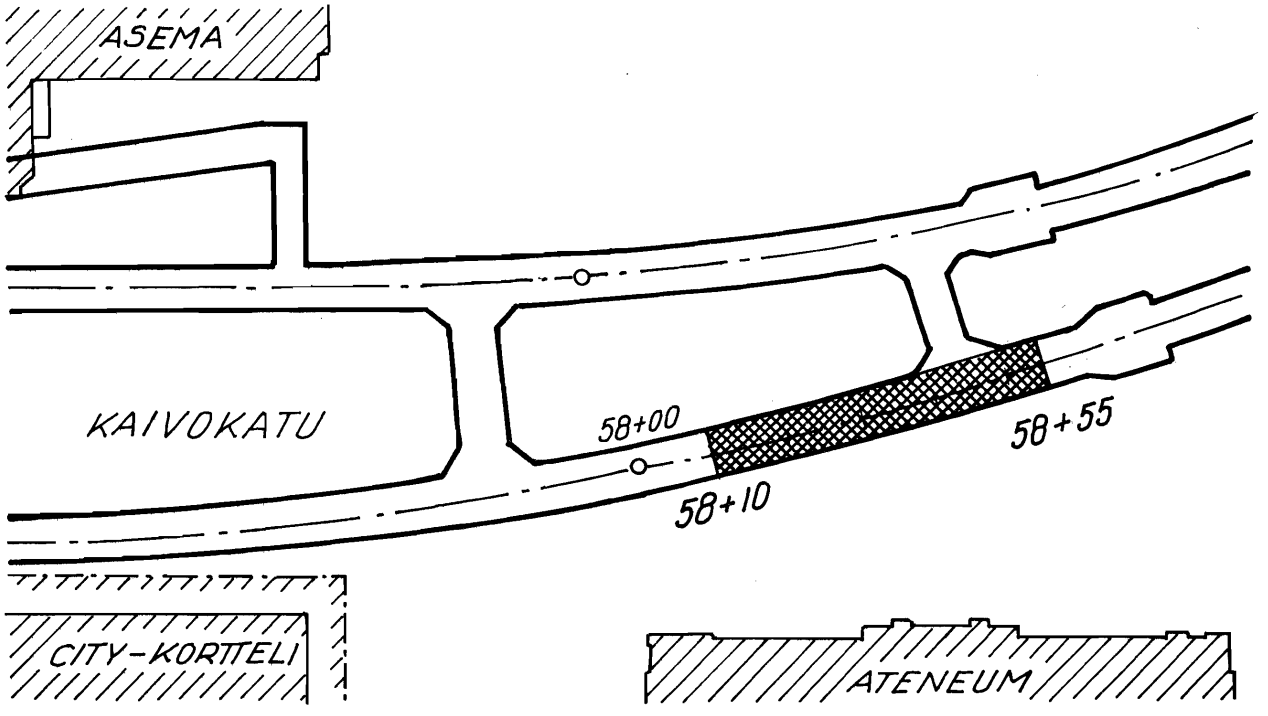
- Vuodot siirtyivät esi-injektoidulle alueelle tunnelin perään päin.
- Injektointireikien väli oli liian suuri.
- Mittaustulokset olivat epätarkkoja.

2.64
Injektointikustannukset

Kemiallisen injektoinnin kustannukset olivat yhteensä 125 000,- mk. Esi- ja jälki-injektointi sementillä maksoi 190 000,- mk. Karkea kustannusten jakautuminen on seuraava:

Poraus	104 000,- mk
Kemiallinen injektointiaine	21 000,- "
Sementti	5 000,- "
Työ konevuokrat + työpalkat	185 000,- "


SEMENTTIMENEKKI
ESI-INJEKTOINTI
kg
1000
500
SEMENTTIMENEKKI
JÄLKI-INJEKTOINTI
kg
1500
1000
500
STABILODUR - C
MENEKKI [l]
1500
1000
500
SEMENTTIMENEKKI
YHTEENSÄ kg
3000
2000
1000
58+10
58+20
58+30
58+40
58+50


ASEMA
KAIVOKATU
58+00
58+10
58+55
CITY-KORTTELI
ATENEUM

KUVA 4

3. INJEKTOINNIN PERUSTEISTA

3.1 Laskumenetelmät

3.11 Ongelmat

Injektoinnin suunnittelussa on eräänä ongelmana injektointiaineen etenemän arvioiminen ja siihen liittyen oikean reikävälin määrääminen. Injektointipaineen määrääminen perustuu myös suunnittelijan kokemukseen ja karkeisiin likimääräislaskelmiin. Paineen leviämistä injektointireiän ympärillä ei myöskään tunneta.

Käytännön kysymyksiin vastaavaa yleispätevää teoriaa ei ole esitetty, vaikka kysymyksiä on kirjallisuudessa laajalti pohdittu. Seuraavassa esitetään ne keskeiset vaikeudet, joihin laskumenetelmiä kehitettäessä tullaan törmäämään.

Käytäntöön sopivia laskumenetelmiä perustutkimuksen puuttuessa ei tässä yhteydessä ole voitu esittää.

3.12 Aineen virtaus maassa ja kalliossa

Maata voidaan pitää huokoisena aineena, jossa virtaus tapahtuu pistemäisestä lähteestä pallosymmetrisesti. Tällainen tila voidaan helposti hallita matemaattisesti, vaikeutena on huokoisuuden vaihtelu ja maan virtausvastuksen, k-arvon, vaihtelu mahdollisen anisotropian vallitessa.

Kalliota voidaan pitää puolestaan läpäisemättömänä, jolloin virtaus tapahtuu kalliorakenteessa olevia rakoja pitkin. Rakojen virtausvastuksen arvo riippuu raon avonaisuudesta, rakotäytteen laadusta ja raon läpimitasta. Haittana on myös kallion epähomogeeninen rakenne, joka vaihtelee rakojen suhteen hyvinkin nopeasti.

Virtausvastuksen arvo voidaan esittää kahden levyn välissä kaavalla

$$k = \frac{\gamma}{\eta} e^2$$

γ = virt.aineen til.paino
η = " viskosit.
e = raon läpimitta

Kun raon läpimitta ei ole vakio, sen suunta vaihtelee ja kun rakotäytteen laatu vaikuttaa virtausvastuksen arvoon, on kallion keskimääräisen k-arvon määrittäminen mahdotonta.

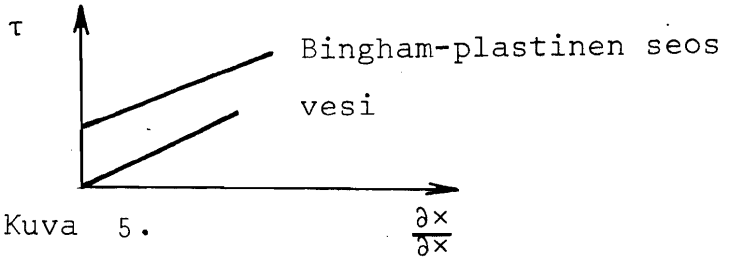
3.13 Injektointiaineiden ominaisuudet virtauksen kannalta

Virtausnopeus väliaineessa voidaan kirjoittaa

$$v_x = \frac{k'_x}{\eta}\frac{\partial p}{\partial x} \qquad v_y = \frac{k'_y}{\eta}\frac{\partial p}{\partial y} \qquad v_z = \frac{k'_z}{\eta}\frac{\partial p}{\partial z}$$

Kaavasta nähdään virtausnopeuden riippuvuus viskositeetista. Kaava pätee newtonilaisille nesteille kuten vedelle.

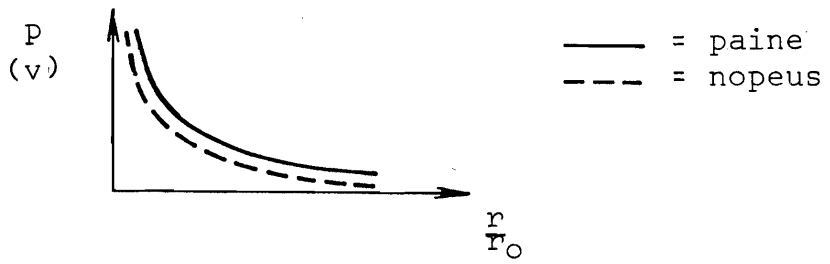
Injektointiaineet ovat ominaisuuksiltaan ajan mukana muuttuvia nesteitä, ns. rheopektisiä, koska niiden leikkauslujuus kasvaa ajan mukana. Monet ovat myös bingham-plastisia nesteitä, jolloin niiden leikkauslujuus riipuu virtausnopeudesta kuvassa 5 esitetyllä tavalla. Näin ollen on injektointiaineiden virtausta käsiteltäessä otettava huomioon niiden riippuvuus ajasta sekä käytettävä ei-newtonilaisten nesteiden teoriaa. Lisäksi on vaikeutena turbulenssi-ilmiön vaikutus. Turbulenssilla on energiahäviöitä suuresti kasvattava vaikutus.



Kuva 5.

3.14 Injektointipaine

Injektointireiässä vallitseva ylipaine saa aikaan injektointiaineen virtauksen pois reiästä. Ylipaineen suuruudesta riippuu aineen etenemä sekä virtausnopeus. Paineen ja nopeuden kehittymistä porareiän ulkopuolella on esitetty kuvassa 6 .



Kuva 6.

Paikallisia nopeuden muutoksia voi tapahtua huokostilan tai kallioraon mittojen muuttuessa. Paine saattaa avata rakoja, jolloin virtaus helpottuu. Mahdollinen sedimentoituminen voimistuu myös virtausnopeuden pienetessä. Tällöin injektoinnin ulottuma on jokseenkin sama kuin etäisyys, jolla sedimentaatio voimakkaasti lisääntyy.

Bingham-plastisen nesteen tapauksessa voidaan laskea tarvittava ylipaine, jotta injektioaine, jonka määrä = Q, etenisi etäisyydelle R. Tällöin

$$p_o - p = \frac{\nu}{1-\alpha}\left(\frac{Q\varpi}{4\pi} \cdot \frac{1+2\alpha}{\alpha}\right)\left(\frac{2}{e}\right)^{1+2\alpha}\left(R^{1-\alpha} - r_o^{\,1-\alpha}\right) +$$

$$\frac{\varpi}{4g}\ \frac{1+2\alpha}{2+3\alpha}\ \frac{Q^2}{\pi^2 e^2}\left(\frac{1}{r_o^{\,2}} - \frac{1}{e^2}\right)$$

ν = viskositeetti kerroin
α = virtauskerroin
ϖ = tilavuuspaino
e = raon leveys
Q = injektointiaineen määrä
p_o = paine injekt. reiässä
p = paine etäisyydelle R
R = etenemä

Tarvittavan paineen laskeminen vaatii $\nu, \alpha, e, \bar{\omega}, Q$ määräämistä jokaiselle injektointireiälle erikseen, joten laskutekniikka muodostuu hankalaksi.

Injektointipaine on paras määrätä mahdollisimman korkeaksi ottaen huomioon, ettei paine saa aiheuttaa vaurioita kalliossa tai muissa rakenteissa. On huomioitava myös kallion kohoamisen vaara. Lopullisessa tilanteessa on otettava huomioon myös kallion laadun vaikutus.

Porareiän halkaisijalla ei ole käytännössä havaittu olevan merkitystä injektoinnin onnistumiseen, vaikka teoriassa pienemmässä reiässä vaaditaan suurempi paine saman etenemän saavuttamiseksi.

3.15
Kaivantojen injektointilaskelmat

Injektointiverhon sijaintia ja kaivannon vuotovesimäärää on analysoitu Hakaniemen ja Sörnäisten metroasemien lippuhallisuunnitelmien yhteydessä (6,7). Analyysit on suoritettu käyttämällä Finite-element-menetelmää.

Menetelmässä on laadittu pohjasuhteiden mukaan kaksiulotteinen maastomalli. Malli rakentuu pistejoukosta, jossa pisteille on annettu sijaintitietojen lisäksi mm. maakerrosten tai kallion vedenläpäisevyysarvoja. Laskettaessa veden virtausta avokaivantoon mallissa annettujen lähtötietojen pohjalta on ratkaistava Laplacen virtausyhtälö. Tämä tapahtuu yksinkertaisimmin tietokoneella käyttäen ratkaisumetodina em. Finite-element-menetelmää.

Laskelmissa on käytännön kannalta virheellistä se, että kallion on oletettu olevan homogeenista ainetta, jonka vedenläpäisevyysarvo on vakio. Myös injektoinnin vaikutusta laskettaessa on injektoidun kallio-osan vedenläpäisevyyden oletettu pienentyvän tiettyyn vakioarvoon.

Laskentamenetelmiä voidaan käyttää hyväksi injektointivaihtoehdon valinnassa. Mm. Hakaniemen laskenta antaa tuloksen, jonka mukaan pohjan injektointi on edullisempaa kuin verhoinjektointi. Injektointimenetelmän valintaa on käsitelty tunneli-injektoinnin osalta kohdassa 3.2.

3.2 Injektointimenetelmän valinta

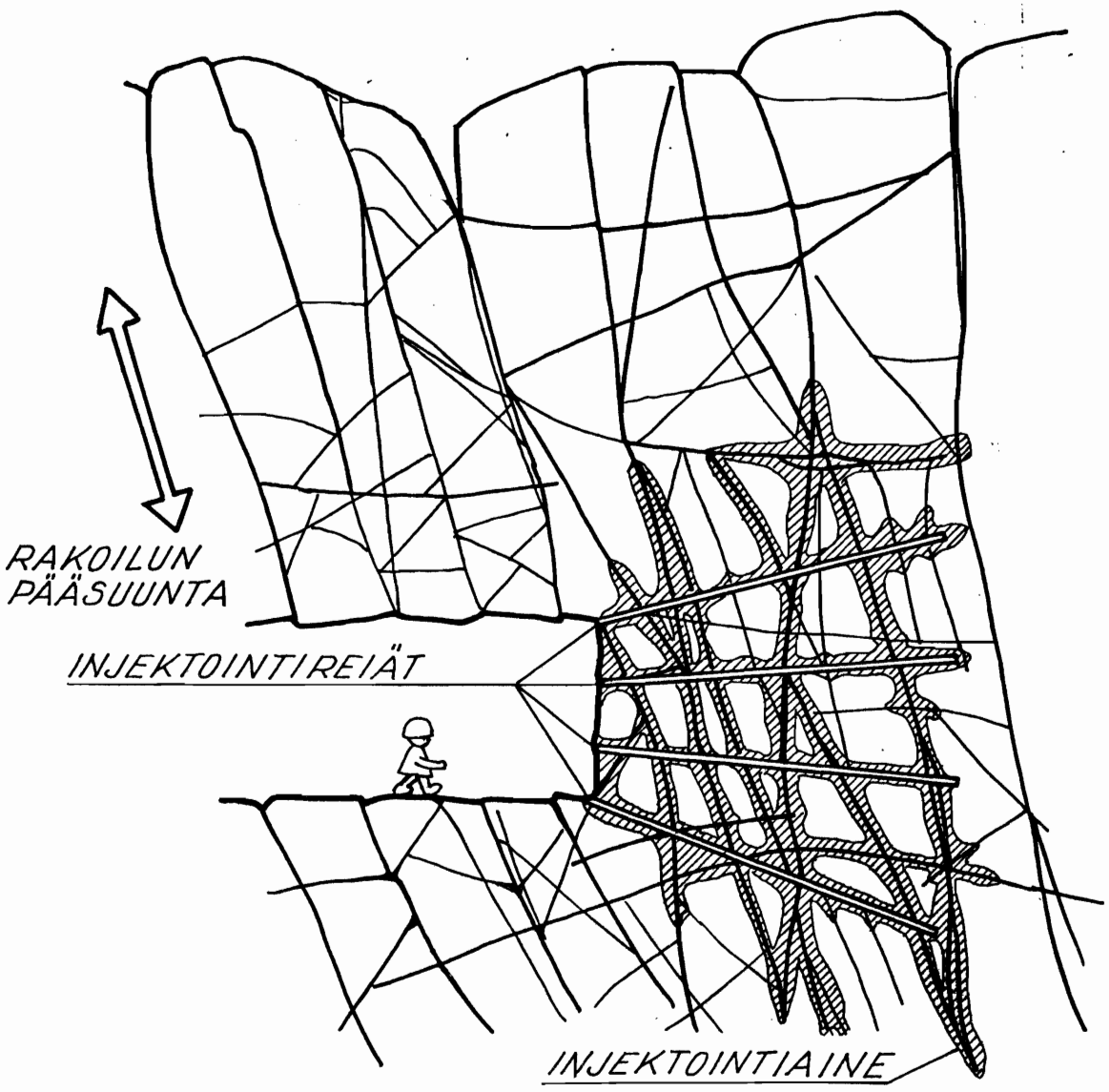
Tunnelisuunnittelijan on tehtävä arvio mm. esi-injektoinnin laajuudesta louhintakohteessa. Esi-injektoinnin tehosta on hyviä kokemuksia jälki-injektointiin verrattuna, mutta toisaalta se on kallista aiheuttaessaan louhintarytmiin häiriöitä. Teoreettista vertailua menetelmien välillä ei juuri ole suoritettu.

Maa- ja kalliorakennuskäsikirjan(10) mukaan esi-injektointi onnistuu paremmin kuin jälki-injektointi mm. siksi, että esi-injektoinnissa voidaan

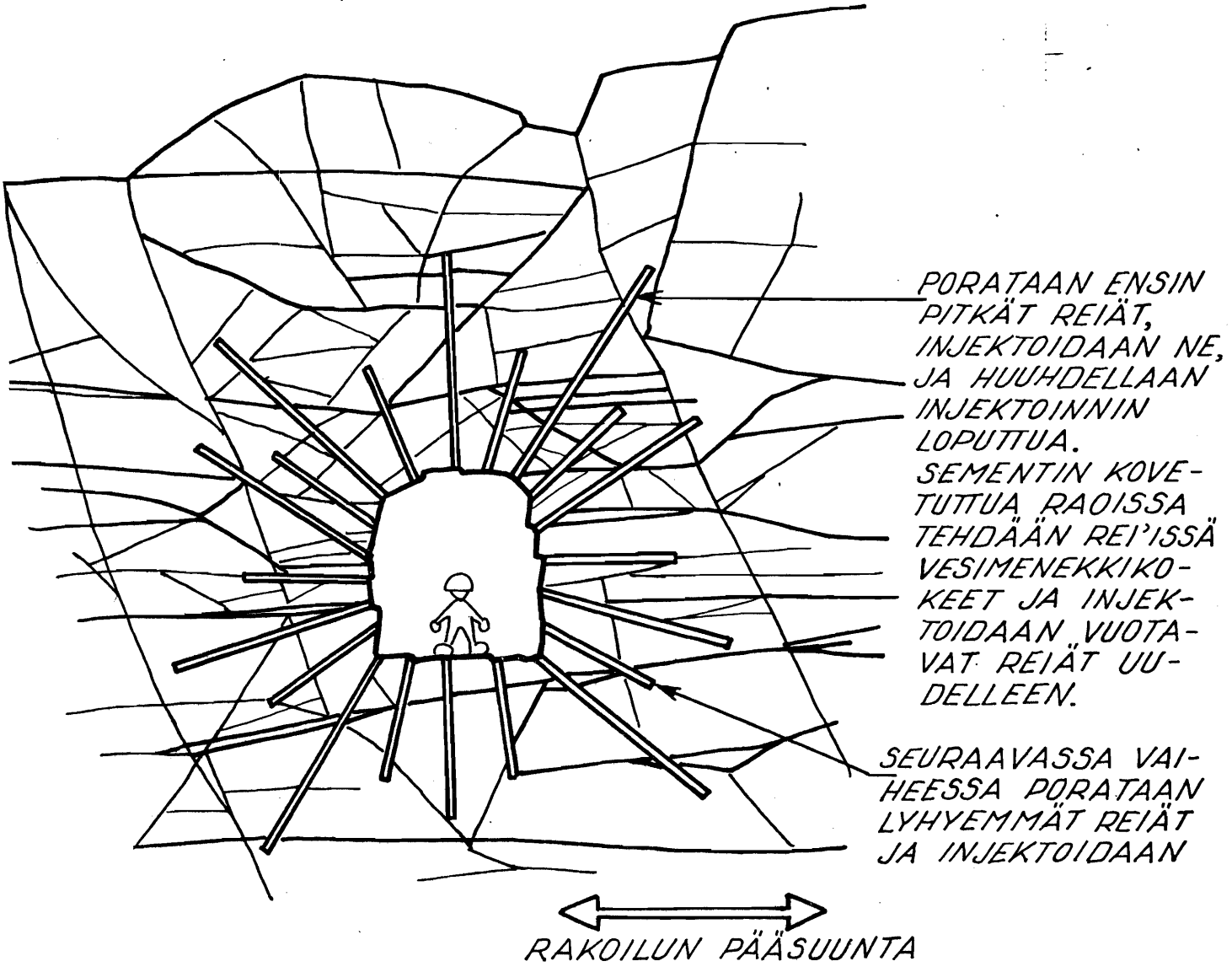
- käyttää korkeampia paineita
- vähentää injektointimassojen vuotoja kallio-halkeamiin
- vähentää injektointimassojen käyttöä yleensä
- parantaa louhintajälkeä
- parantaa turvallisuutta veden tunkeutumista vastaan
- vähentää poraus- ja louhintakustannuksia
- saada lattian lujuus ja tiiviys varmistetuiksi.

Esi-injektoinnin onnistumisen edellytyksiä lisää kallioperän rakenne Helsingin keskustan suuntautuneen kalliolaadun alueella. Pystyasentoisen liuskeisuuden suunnassa esiintyy aina voimakasta haarniskarakoilua sekä murros- ja ruhjerakenteisia vyöhykkeitä. Injektointiaineen leviämistä gneissisessä kallioperässä on esitetty kuvassa 7 .

Graniittisissa kivilajeissa esiintyy usein avointa vaakarakoilua, jolloin injektointitulos sekä esi- että jälki-injektoinnissa jää heikoksi. Teoriassa päästäisiin tällaisissa kalliolaaduissa parhaimpaan tulokseen ehkä vaiheittaisella injektoinnilla, jollaista on jälki-injektoinnin osalta hahmoteltu kuvassa 8 .



Kuva 7. Esi-injektointi Helsingin keskustan liuskeisissa kalliolaaduissa. Injektointiaine leviää pystyasentoisen rakoilun takia hyvin kallioperään.



Kuva 8 . "Vaiheittainen jälki-injektointi" vaakarakoilleessa kalliossa. Vaiheet ovat
a) porataan pitkät reiät, injektoidaan ja huuhdellaan injektoinnin loputtua,
b) sementin kovetuttua raoissa tehdään rei´issä vesimenekkikokeet ja injektoidaan "harvat" reiät uudelleen,
c) porataan lyhyempiä reikiä ja injektoidaan ne.

Myös kallioperän jännitystila muuttuu louhinnan jälkeen epäedullisemmaksi injektointia ajatellen. Louhinnan jälkeen syntyy tavallisesti luolan seinäosiin vetovyöhykkeitä, joissa kalliomassa on "löyhässä" ja joissa vuodot helposti siirtyvät injektoinnin aikana paikasta toiseen. Vetojännitysten alaiset kalliomassat tulisi jälki-injektoinnissa ilmeisesti ohittaa pitkillä injektointireiillä.

4. INJEKTOINTIAINEET

4.1 Aiheen rajaus

Ulkomailla julkaistussa kirjallisuudessa (esim. Cambefort 1969) on yleisimpiä injektointiaineita ja niiden ominaisuuksia käsitelty varsin laajasti. Tässä rajoitutaan käsittelemään vain injektointiaineiden tärkeimpiä ominaisuuksia sekä yleisimpiä injektointiaineita.

4.2 Injektointiaineiden tärkeimmät ominaisuudet

4.21 Tunkeutuvuus

Pienvuotojen injektoinnissa on aineen tunkeutuvuusominaisuuksia pidettävä ainakin yhtä tärkeinä kuin lujuusominaisuuksia. Aineen tunkeutumisen mittana voidaan pitää sen viskositeettia. Tunkeutuvuutta kuvaavat viskositeetin arvot eri aineille on esitetty kuvassa 9 (sivu 32).

Injektointiaine kulkee siihen suuntaan, jossa virtauksen energiahäviö on pienin. Siten poranreikää leikkaavissa avoimissa raoissa esim. vesi-sementtiseos kulkee useitakin metrejä, mutta tiiviimmissä raoissa tunkeutuvuus saattaa jäädä muutamiin senttimetreihin. Rakojen avonaisuutta eli kallion läpäisevyyttä kuvataan väliaineen virtausvastuksen arvolla, ns. k -arvolla. Kun kyseessä on injektointiaineen laminaarinen (pyörteetön) virtaus, virtaus - vastus on kääntäen verrannollinen aineen viskositeettiin. Tunkeutuma riippuu myös aineen adsorptioominaisuuksista.

Aineiden tunkeutuvuusominaisuudet olisi huomioitava siten, että siirryttäisiin sementti-injektoinnista oikea-aikaisesti kemialliseen injektointiin. Kemiallista injektointia ei saa aloittaa ennen perusteellista sementti-injektointia, sillä hyvän tunkeutuvuuden omaava kemiallinen aine tunkeutuu avonaisia rakoja pitkin kauas pienempien rakojen jäädessä edelleen tukkeutumatta.

4.22 Kovettuminen

Injektointiaineiden on injektoinnin päättyessä pystyttävä sen hetkisillä aineominaisuuksillaan kestä-

mään pohjaveden paineesta johtuva rasitus. Injektointiaika on yleensä alle 1 tunnin. Injektointiaineiden on myös pystyttävä kestämään kuormituksia jopa vuosikymmenien ajan, jolloin loppulujuuden ohella on hiipuman vaikutus merkittävä.

4.23
Myrkyllisyys

Injektointiaineet joutuvat yleensä kosketuksiin pohjaveden kanssa. Tällöin niiden on oltava käyttötilassa myrkyttömiä, eivätkä aineiden ominaisuudet saa ajan mittaan muuttua.

4.3
Yleisimmät injektointiaineet

4.31
Aineiden ryhmittely

Injektointiaineet voidaan jakaa ryhmiin monellakin tavalla. Tässä on jako suoritettu pääasiallisesta injektointitehosta vastaavan aineryhmän mukaan. Tällöin voidaan erottaa kolme pääryhmää
- sementtipohjaiset aineet
- kemialliset aineet
- bitumiset aineet.

Kemiallisten injektioaineiden ryhmitys on epätarkka. Tässä tällaisilla aineilla tarkoitetaan yhdisteitä, joiden kovettuminen tapahtuu kahden tai useamman aineen kemiallisen reaktion tuloksena, jolloin alkuperäinen aineen olomuoto muuttuu ja syntyneen yhdisteen rakenne olennaisesti poikkeaa alkuperäisestä. Kemiallisten aineiden ryhmä jaetaan tässä edelleen
- natriumsilikaattipohjaisiin
- orgaanisiin hartseihin
- ligniinipohjaisiin.

4.32
Injektointiaineet

Sementti

Sementin ja veden seos on yleisin injektointiaine, seoksen vesisementtisuhteen ollessa 4 on viskositeetti noin 100 cP. Viskositeetti vaihtelee vesisementtisuhteen, sekoituksesta kuluneen ajan ja lämpötilan mukaan.

Vesi-sementtiseos on virtausominaisuuksiltaan bingham-plastinen neste. Tällöin sen leikkauslujuudella on raja-arvo, joka ei alitu missään

olosuhteissa. Tämän johdosta on seoksella tietyssä raossa maksimietenemä, jota ei ylitetä ellei injektointipainetta lisätä.

Sementti pyrkii myös sedimentoitumaan virtausnopeuden laskiessa. Tällöin vesi alkaa virrata sedimentoituneen sementtipatjan yli ja sementin etenemistä ei enää tapahdu. Tämä ilmiö saadaan osittain estettyä lisäämällä seokseen 2-5 % bentoniittia.

Suurimpien sementtihiukkasten koko on ≈ 0,1 mm, jota pienempiin rakoihin sementin ei katsota tunkeutuvan. Tämän lisäksi sementtihiukkaset takertuvat helposti toisiinsa muodostaen holvin, joka virtausnopeuden ollessa pieni ei murru vaan estää muiden hiukkasten pääsyn holvin läpi. Tätä taipumusta ei saada poistettua tai edes merkittävästi vähennettyä vesi-sementtisuhdetta muuttamalla.

Sementtiseoksen sitoutuminen alkaa tapahtua hitaasti heti sekoittamisen jälkeen. Sitoutumisaikaan sekä loppulujuuteen vaikuttavat mm. raoissa olevan seoksen vesi-sementtisuhde, seokseen sekoittuneen rakomateriaalin ominaisuudet, kalliossa olevan pohjaveden laatu ja lämpötila. Loppulujuus saattaa epäedullisissa olosuhteissa jäädä lähes olemattomaksi. Hiipuma ei ole sementtiseosten kohdalla merkittävä, vaan ne kestävät melko hyvin myös yksipuolista vedenpainetta.

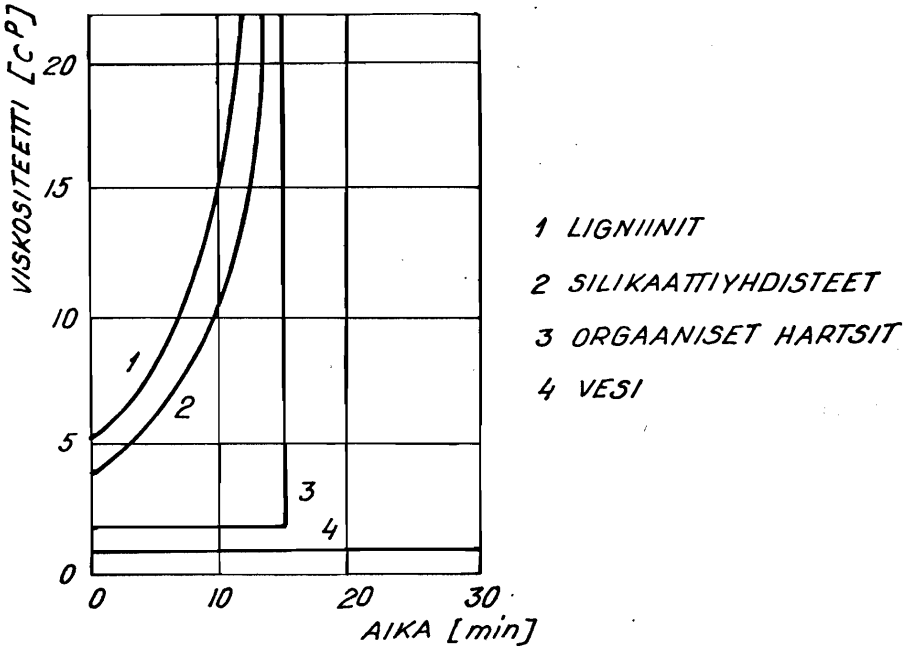
Kemialliset aineet

Natriumsilikaattipohjaiset aineet

Natriumsilikaatin rakenne voidaan esittää kaavalla $NA_2O \cdot 3\text{-}4\ S_iO_2$. Yhdistettä nimitetään myös vesilasiksi. Natriumsilikaatin vesiliuos on kirkasta nestettä, johon lisäämällä jotakin suolaa, esim. $CaCl_2$ saadaan saostumaan piidioksidiksi l. silikageeliksi.

Silikaattiaineiden viskositeetti on alimmillaan ≈ 5 cp, joskin viskositeetti vaihtelee seossuhteiden mukaan. Injektoinnin alussa seos käyttäytyy likimain veden tavoin (Newtonilainen neste). Koska reaktio alkaa tapahtua välittömästi kasvavat sekä leikkauslujuus että viskositeetti ajan mukana. Injektointiaineen tunkeutuma huononee ajan mukana. Tunkeumaan vaikuttaa reaktionopeus, jota voidaan säätää seossuhteita muuttamalla. Holvautumista eikä sedimentaatiota ei tapahdu.

Silikaatin kovettumisreaktio alkaa välittömästi sen vesiliuoksen joudutta käytetyn suolareagenssin kanssa kosketuksiin. Kovettuminen tapahtuu aluksi hitaammin, mutta kiihtyy vähitellen, kunnes tullaan ns. juoksurajalle, jolloin aine jähmettyy eikä virtausta enää tapahdu. Kovettumisen minimiaika on n. 15 min. Kovettumisreaktiota saattavat haitata mm. pohjaveteen liuenneet metallit ja pohjaveden pH. Kovettumisreaktiota on kuvattu viskositeetin kasvulla kuvassa 9. (Cambefort 1969)



Kuva 9.

Saavutettavat loppulujuudet riippuvat seossuhteista sekä kemiallisista olosuhteista kalliossa. Natriumsilikaattiyhdisteiden hiipuman on esitetty olevan merkittävä, joskaan luotettavia koetuloksia ei ole saatavilla.

Vesilasiyhdisteet eivät ole myrkyllisiä komponenttimuodossa eivätkä lopullisessa muodossaan.

Orgaaniset hartsit

Näiden aineiden perusosana on orgaaninen valmiste, joka katalyyttien vaikutuksesta polymerisoituu ja kiinteytyy. Hartsit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: esikäsiteltyihin polymeereihin ja nestemäisiin monomeereihin (Am-9). Tällaisia perusosana käytettäviä aineita ovat mm. fenolihartsit ja akryyliamidit. Käytetyt katalyytit ovat varsin monimutkaisia kemiallisia aineyh-

disteitä. Käytettävät injektointiaineet ovat yleensä tavaramerkkejä, joiden valmistaminen on patentoitu.

Orgaanisten hartsien viskositeetti on alimmillaan hyvin lähellä veden viskositeettia, ≈ 1-5 cP. Viskositeetti on vakio aina polymerisaation alkuun saakka, jonka jälkeen se kasvaa erittäin nopeasti (kuva 9).

Aineet käyttäytyvät reaktion alkamiseen asti Newtonilaisen nesteen tavoin. Aineominaisuudet pysyvät myös vakiona reaktion alkuun asti, joten aineet käyttäytyvät samoin kuin vesi. Virtaus pysähtyy välittömästi kovettumisreaktion alkaessa. Injektoinnin katsotaan olevan tehokasta rakoleveyksissä ≥ 0,01 mm.

Kovettuminen

Kovettumisreaktion alkamisajankohta voidaan katalyyttien määrän avulla säätää muutamista sekunneista tunteihin.

Kovettumisreaktiota voivat haitata muut orgaaniset aineet, joita saattaa olla pohjavedessä. Lisäksi pohjavesi voi laimentaa liuosta ja pidentää kovettumisaikaa.

Saavutettavat lujuudet riippuvat käytetyn aineen tyypistä. Jotkut hartsit saavuttavat tietyissä olosuhteissa betoniin verrattavia lujuuksia. Lujuus on riippuvainen myös katalyyttien määrästä. Vesivuotojen tiivistyksessä käytettyjen aineiden loppulujuudet voivat olla noin 0,5 MN/m^2 (5 kp/cm^2). Aineiden hiipumasta ei ole saatavissa tietoja.

Aineryhmän komponentit saattavat olla myrkyllisiä, kuten Suomessakin käytetyn AM-9 yhdisteen. Kovettunut yhdiste ei sensijaan ole myrkyllinen.

Bitumipohjaiset aineet

Kuumennettujen bitumien käytöstä kallion vesivuotojen injektoinnissa ei Suomessa tiettävästi ole kokemuksia. Bitumeja voidaan myös liuottaa kemikaaleihin, jolloin saadaan kylmässäkin juoksevia nesteitä. Alimmillaan viskositeetti voi olla noin 10 cP.

Bitumin tai bitumiemulsioiden tiivistysteho perustuu bitumin ja kallion väliseen adheesioon ja bitumin kovettumiseen.

Bitumilla on hiipumistaipumus, joten sen käyttöön on suhtauduttava varovasti.

Bitumia voitaneen pääasiassa käyttää vain avoimien rakojen tukkimiseen tapauksissa, jolloin pohjavesi ajoittain nousee injektoitavien rakojen yläpuolelle.

Ligniinit

Puunjalostusteollisuuden jäteaineena syntyvä ligniini saadaan geeliytymään sekoittamalla siihen natriumbikromaattia. Ligniinin ja natriumbikromaatin seoksen viskositeetti on ennen geeliytymistä suunnilleen sama kuin veden eli sitä voidaan verrata tunkeutuvuudeltaan esim. Am-9:ään. Seos on virtausominaisuuksiltaan bingham-plastinen.

Kovettumisreaktio ligniinin ja kromaatin välillä alkaa tapahtua heti sekoituksen jälkeen, mutta se on melko hidas. Lyhin sitoutumisaika on noin 30 min, joten aineen lujuusominaisuuksien muutos on hidasta. Saavutettavat loppulujuudet ovat suuruusluokkaa 0,5 MN/m^2 (5 kp/cm^2). Veden pH-arvo vaikuttaa sitoutumisaikaan ja loppulujuuteen.

Aineen komponenteista on bikromaatti myrkyllinen. Lopullisen yhdisteen vesiliukoisuutta ja syntyvän vesiliuoksen myrkyllisyyttä ei tunneta.

5. INJEKTOINNIN SUUNNITTELU

5.1 Injektoinnin tavoitteet

Tunnelille asetettu tiiveystavoite ja kallion laatu määrittelevät tiivistystavan.

Metrotunnelien tiivistystavoitetta on jatkuvasti tiukennettu työn aikana. Tiivistysvaatimuksia on käsitelty mm. geoteknillisen toimiston pohjavesitarkkailua koskevissa väliraporteissa.Tiivistystavoitteet on annettu yleensä ruotsalaisten kokemusten perusteella. Selviä yhtenäisiä tavoitteita ei ole vielä lopullisesti annettu. Nämä pyritään antamaan vuoden 1977 aikana. Tukholmassa (Gatukontor) on käytössä ohjeet, joiden mukaan esi-injektointi on suoritettava täydellisesti silloin, kun vuotovesimäärän on oltava alle 1 l/min. 100 m kohden. Jos vuotovesimäärän on oltava alle 5 l/min, on tunnelin pohja aina esi-injektoitava. Tukholman ohjeita on käsitelty kohdassa 5.3.

5.2 Injektointia edeltävät tutkimukset

5.21 Kallion ja vuotokohtien kartoitus

Jälki-injektointikohteessa tulisi ennen injektointia ja ruiskubetonointia tehdä kallio- ja vuotovesikartoitus. Kartoitus on erityisen tarpeellinen silloin, kun kallion laatu huomattavasti vaihtelee injektoitavalla tunneliosuudella. Kartoituksessa tulee kiinnittää huomiota rakosuuntiin, rakotäytteisiin sekä murrosvyöhykkeisiin.

Erityistä huomiota on kiinnitettävä kallion vuotokohtien rapautuneisuuteen. Injektointiaineen valinnassa on tiedettävä, tulevatko vuodot avoimista raoista vai ovatko ne rapautuneesta kalliomassasta tulevia tihkuvuotoja.

5.22 Vesimenekkimittaukset

Tukholmassa (Gatukontor) on injektointitapaa luokiteltu vesimenekin perusteella seuraavasti:

Vesimenekki l/min · m · MPa	Injektointitapa
alle 0,2	Injektointia ei tavallisesti suoriteta, kemiallinen injektointi mahdollista
0,2 ...1	Sementti-injektoinnilla ei päästä tuloksiin, suositellaan kemiallista injektointia
yli 1	Sementti-injektointi

Metrotoimiston injektointiryhmä on suositellut sementti-injektoinnin aloittamista vasta vesimenekin ollessa yli 3 l/min · m · MPa.

Vesimenekkikokeen perusteella voidaan periaatteessa saada tarkkaa tietoa kalliossa tapahtuvasta veden virtauksesta piirtämällä vesimenekki paineen funktiona. Kokeen suorittaminen näiden tuloksien saamiseksi vaatii tarkkoja mittalaitteita, sillä paineen korotuksen on tapahduttava hitaasti, jotta käyrien muoto saadaan varmasti selville.

Vesipainekokeen tuloksena saadaan karkea arvio injektointiaineen menekistä. Vesimenekki paljastaa avonaisten rakojen olemassaolon. Metron injektointitöistä lasketut korrelaatiot vesimenekin ja injektointiainemenekin välillä ovat 20 ... 40 % eli korrelaatiota ei ole havaittavissa. Tosin tämä johtuu myös siitä, että vesimenekit on mitattu koko viuhkasta kerralla, jolloin reikien väliset yhteydet antavat ainemenekkiin verrattaessa väärän lopputuloksen.

Vesimenekkikokeessa on metrossa käytetty yleensä paineita 0,5 ... 1 MPa (5 ... 10 kp/cm^2). Näiden paineiden ei vielä katsota vaikuttavan itse kallioon haitallisesti rakoja avaamalla tai aiheuttamalla kallion vetolujuuden ylittymistä porareiän reunoilla.

Vesimenekkikokeiden osuus injektointikustannuksista on vaihdellut metrossa välillä 5 ... 30 %. Kustannusten suhteellisen osuuden vaihtelu johtuu pääasiassa kallion laadun vaihtelusta so. tiiviiden ja runsaasti injektointia vaativien reikien jakautumasta työkohteessa.

Jos injektointi tehdään sementillä, voidaan vuotavat reiät injektoida myös tekemättä vesimenekkikoetta.

Vesimenekkikokeen säännöllistä suorittamista pidetään yleensä suositeltavana, koska parempiakaan menetelmiä kallion injektoitavuuden mittaamiseksi ei tunneta.

5.3 Esi-injektointi

5.31 Esi-injektoinnin tavoite

Kallion tiivistäminen on ensisijaisesti suoritettava esi-injektoinnilla. Jos vaadittua tiiveyttä ei saavuteta, on suoritettava jälki-injektointi vuotojen lopettamiseksi. Tiivistys on suoritettava siten, ettei rakennusaikanakaan ylitetä sallittuja vuotovesimääriä. Paikalliset vuodot tiivistetään aina, vaikka kokonaisvuotovesimäärä pysyisikin sallituissa rajoissa.

Esi-injektoinnin onnistumismahdollisuudet ovat paremmat kuin jälki-injektoinnin. Injektointimuotojen teoreettista vertailua on suoritettu kohdassa 3.

5.32 Esi-injektointitarpeen määrittely sallitun vuotovesimäärän perusteella

Pohjaveden alenemisen aiheuttamat ympäristöriskit määrittelevät metrotunneleiden tiiveysvaatimukset. Tukholman (Gatukontor) ohjeiden mukaan esi-injektointia suoritetaan eri tiiveysvaatimusluokissa taulukossa 10 esitetyssä laajuudessa. Vierekkäiset tunnelit voidaan katsoa olosuhteiden mukaan yhdeksi tunneliksi.

Taulukko 10.

tiiveys luokka	sallittu vuotovesimäärä l/min ·100 m	tiivistämistoimenpide
I	0 - 1	täydellinen esi-injektointi
II	1 - 5	esi-injek.laajuus päätetään vesimenekin mukaan. Pohja injek.aina
III	> 5	työtekniilliset ja toiminnalliset seikat määräävät injektoinnin

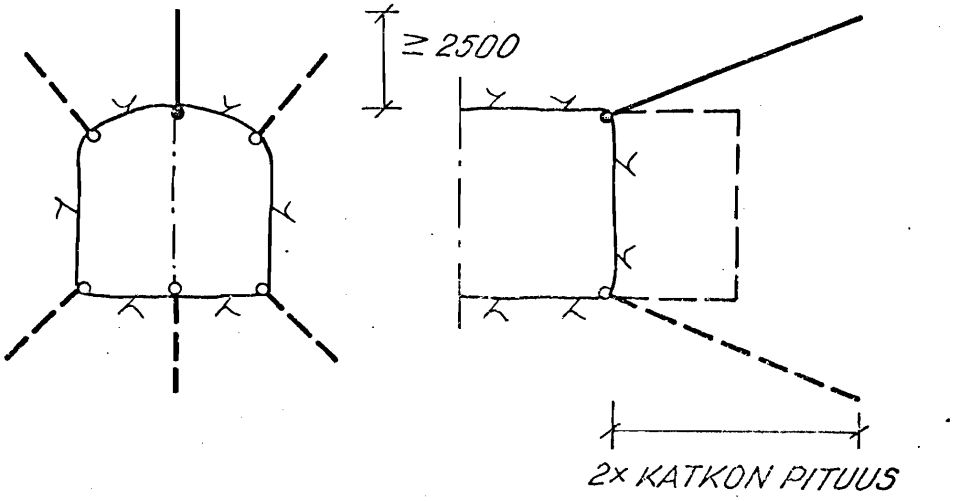
Tukholman ohjeiden ja Helsingin metron vuotovesivaatimusten mukaan olisi lähes aina ollut välttämätöntä suorittaa pohjan esi-injektointi.

5.33

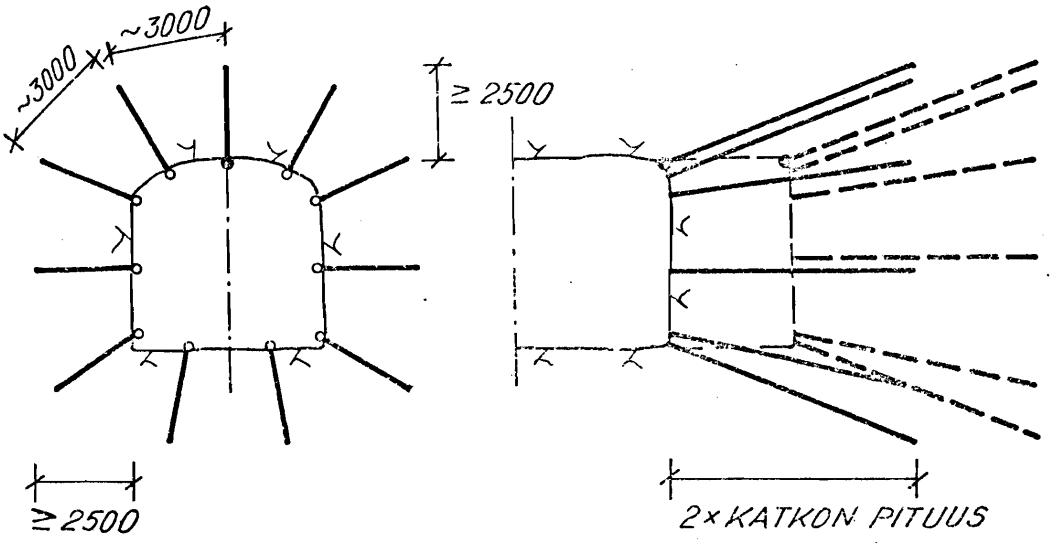
Injektointi- ja tunnustelureikien poraus

Kuvissa 11...13 on esitetty tunnustelu- ja injektointireikien poraus vaiheittain(Linjasuunnittelu Oy, Kluuvin ruhje). Kuvan 11 porauskaaviota voidaan pitää miniminä gneissikivilajeissa Helsingin keskustassa. Porauskaavioita ei yleensä pidetäkään vakioina, vaan vuotojen esiintyessä reikäväliä tihennetään esim. puolitusperiaatteella. Myös vuotavat louhintareiät injektoidaan.

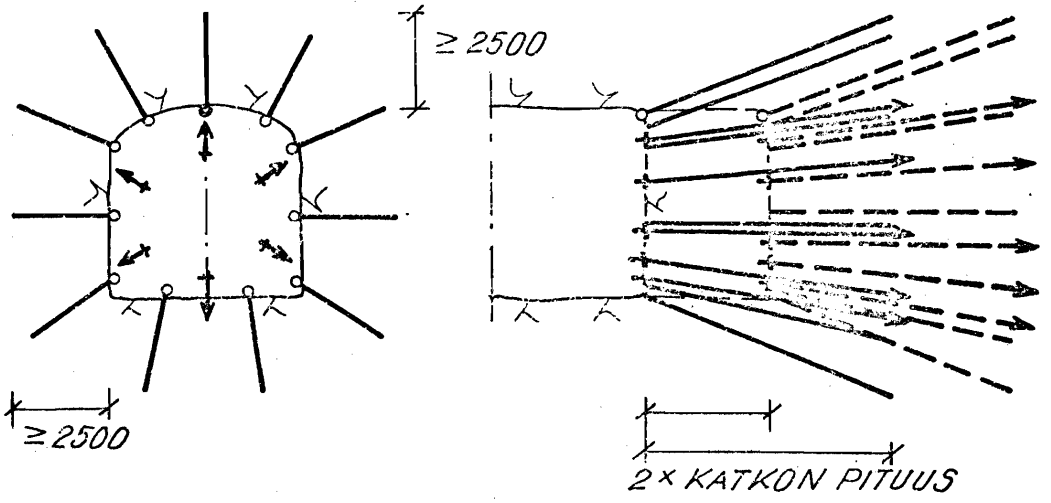
Tukholman kaupungin (13) ohjeet esi-injektoinnin porauskaavioksi on esitetty kuvassa 14.



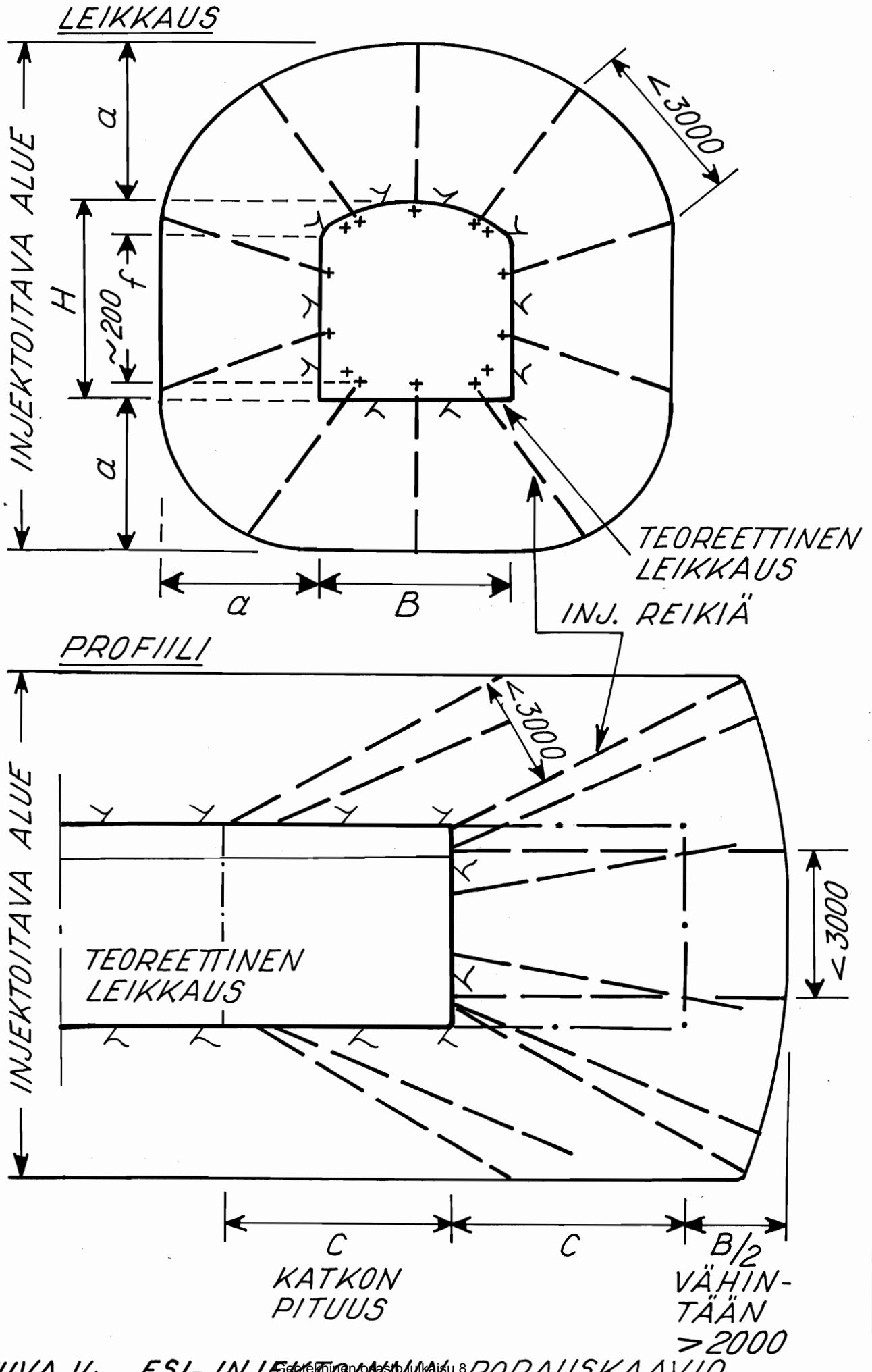
Kuva 11. Tunnustelureikien porauskaavio. Reikien vuotojen, vesimenekkikokeiden tulosten perusteella päätetään esi-injektoinnista tai louhinnasta.



Kuva 12 Tunnelin reunavyöhykkeen injektointikaavio



Kuva 13 Kaavio koko tunneliperän esi-injektointia varten.
Kaaviota käytetään silloin, kun koko tunnelin perä vuotaa tai vuodot siirtyvät perään reunavyöhykkeen injektoinnin jälkeen



KUVA 14 ESI-INJEKTOINNIN PORAUSKAAVIO
(TUKHOLMA GATUKONTOR)

5.34
Vesimenekkikokeet

Ennen esi-injektointia tehdään vesipainekokeet huuhdotuissa reiissä 0,5 MPa (5 kp/cm^2) ylipaineella. Kokeen suorittamista on käsitelty kohdassa 6.

5.35
Reikien injektointi

Puhtaaksihuuhdelluissa reiissä suoritetaan sementti-injektointi. Vain ne reiät injektoidaan, jotka vuotavat tai joiden vesimenekki on yli 1 l/min·m·MPa. Sementin lisäaineena käytetään 5 % bentoniittia (esim. Yellowstone-tyyppiä). Maksimipaineena käytetään 1 MPa (10 kp/cm^2).

Jos esi-injektoinnilla pyritään I tiiveysluokkaan, on harkittava niiden reikien kemiallista injektointia, joissa vesimenekki on alle 1 l/min·m·MPa.

5.36
Louhinta

Esi-injektoidussa kalliossa on louhintareikien suuntauksen oltava tarkka. Reunareiissä on käytettävä tarkkuuslouhintaa.

Taulukossa 15 on esitetty rajoitukset esi-injektoidun kalliomassan louhinnalle. (Tukholma, Gatukontor)

Taulukko 15.

	Pohjapanos		Varsipanos		
	lataus/ reikä	räjähdys-aine	lataus/ m	räj.aine	suurin reikäet.
reunareikä katossa tai seinässä	max 0,2 kg	Dynamex A tai vastaava	Ø 17	Gurit A	0,6 m
reunareikä pohjassa	max 0,5 kg	Dynamex A tai vastaava	max 0,5 kg	Dynamex A tai vastaava	0,6 m
reunareiän viereinen avarr.reikä	max 0,5 kg	Dynamex A tai vastaava	Ø 22	Nabit A tai vastaava	-

5.4
Jälki-injektointi
5.41
Tunnelitilojen jälki-injektointi

Yleistä

Jälki-injektoinnissa pätee suurelta osalta samat suunnitteluohjeet kuin esi-injektoinnissa. Seuraavassa onkin rajoituttu tarkastelemaan jälki-injektoinnin suunnittelua vain niiltä osin kuin se poikkeaa esi-injektoinnista.

Injektoimisajankohta

Injektointituloksen kannalta edullisinta injektointiajankohtaa louhinnan jälkeen ei tunneta. Joidenkin mielipiteiden mukaan jälki-injektointi on pyrittävä suorittamaan heti louhinnan jälkeen ennen pultitusta ja ruiskubetonointia. Toisten mielipiteiden mukaan injektointi tulisi suorittaa vasta ruiskubetonikerroksen lävitse, jolloin injektointipaine leviää edullisimmin. Myös työturvallisuusnäkökohdat puoltavat ruiskubetonoinnin jälkeen suoritettua injektointia.

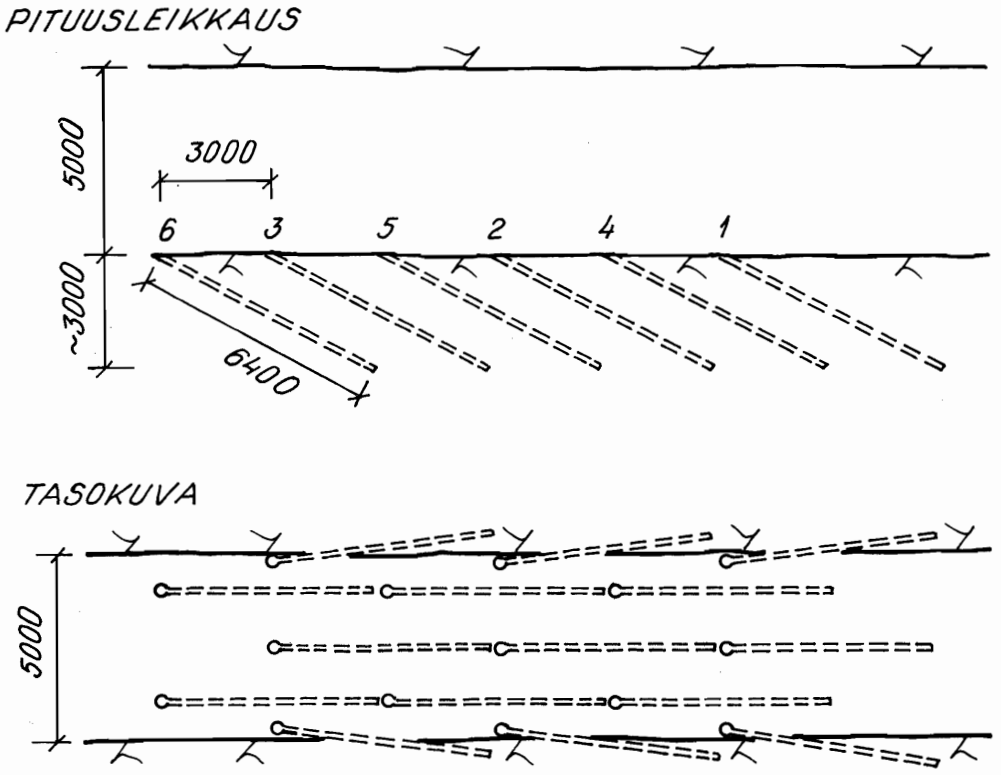
Rakennusaikaisten vuotojen pienentämiseksi olisi injektointi suoritettava mahdollisimman pian louhinnan jälkeen. Tällöin injektointiajankohdan määrittelee tarkemmin louhinta- ja lujitustöiden rytmitys.

Porauskaaviot

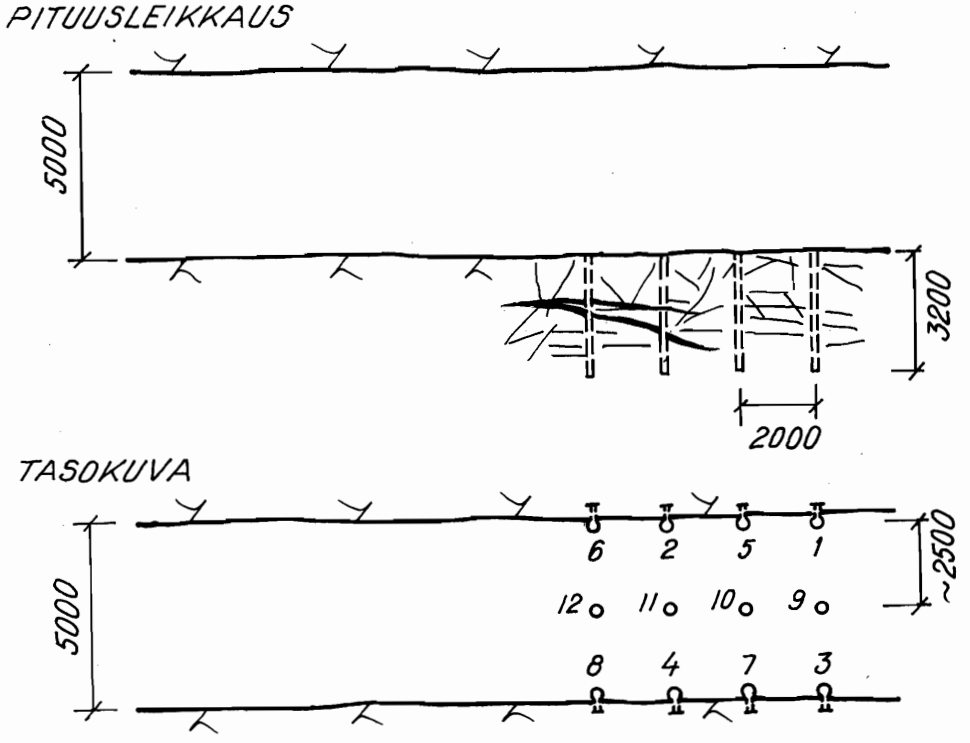
Reikien porauksesta ja niiden injektoinnista pistemäisten vuotojen ollessa kyseessä on vaikea antaa yleispäteviä ohjeita. Reiät pyritään yleensä suuntaamaan siten, että ne parhaiten leikkaavat vuotavia rakoja.

Ruotsalaisten lähteiden mukaan noin 70 % vuodoista tulee tunnelin pohjasta. Tähän saattaa olla syynä veden kiertäminen ruiskubetonoidun katon ja seinien takaa ja se, että paine-ero on suurin lattian kohdalla. Lisäksi on huomattava, että louhinnassa pohjareissä käytetään eniten räjähdysainetta, jolloin lattia saattaa louhinnassa rikkoutua enemmän kuin katto ja seinät. Jälki-injektointikohteissa tulisi yleensä mitata vuotojen jakautuminen lattian ja muun profiilin kesken.

Kuvissa 16 ja 17 on esitetty ehdotuksia porauskaavioksi metrotunnelin pohjan injektoinnissa. Kuvan 16 porauskaavio pätee tapauksissa, joissa rakoilu on sekarakoilua tai tunnelin suuntaan poikittaista



KUVA 16 PORAUSKAAVIO POHJAN INJEKTOINNISSA SEKARAKOILLEESSA KALLIOSSA. NUMEROT OSOITTAVAT REIKÄRIVIEN PORAUS – JA INJEKTOINTIJÄRJESTYSTÄ



KUVA 17 METROTUNNELIN POHJAN INJEKTOINTI VAAKARAKOILLEESSA KALLIOSSA. NUMEROT OSOITTAVAT REIKIEN PORAUS – JA INJEKTOINTIJÄRJESTYSTÄ

pystyrakoilua. Jos kallio on voimakkaasti vaakarakoillutta, on edullisempaa käyttää kuvassa 15 esitettyä porauskaaviota. Injektointireikien suuntauksessa pitäisi pyrkiä siihen, että reiät leikkaavat päärakoilusuunnan yli 30° kulmassa, mieluiten mahdollisimman jyrkästi. Jos erityistä rakoilua ei esiinny, on reiät porattava kohtisuorasti tunnelin pintaa vasten tai pyrittävä ns. trumpetti-injektointiin, jota kuvan 16 injektointi esittää pohjan osalta.

Sementti-injektoinnissa ei reikäväli saisi olla suurempi kuin 3 m. Jos injektointi ei tehoa kolmen metrin reikävälillä, on suunnitelmassa varauduttava reikävälin pienentämiseen puolittamalla. 0,5 ... 0,75 metrin reikäväli on katsottava sementti-injektoinnissa minimiarvoksi. Reikäväli määräytyy tarkemmin ainemenekkien ja vesimenekkikoetulosten perusteella.

6. INJEKTOINTITYÖN SUORITUS

6.1 Vuotovesimäärän tarkkailu

6.11 Tarkkailun tavoitteet

Lähes kaikki maanalaisten tilojen rakentamisosapuolet tarvitsevat tietoja vuotovesimääristä. Louhinnan aikana on vuotovesimäärän kehittymistä seurattava ja tehtävä päätökset esi- ja jälki-injektoinnista, jotta rakennusaikainen vuotovesimäärä pysyy kohtuullisena. Välttämätöntä vuotovesitarkkailu on myös injektointityön tuloksen seurannasssa.

6.12 Vuotovesien mittaaminen

Vuotovesien mittaamisesta tulisi esittää suunnitelma louhintasuunnitelman yhteydessä. Mittausmenetelmien yksityiskohtiin ei tässä yhteydessä puututa. Periaatteena on, että maanalaiset tilat jaetaan padoilla suppeisiin alueisiin, jolloin kunkin alueen vuotovesimäärä on määriteltävissä pato- ja pumppaustiedoista. Patojen tiiveydestä on huolehdittava injektoimalla kallio padon alapuolella. Esimerkki padon rakenteesta on esitetty kuvassa 16. (Tukholma, Gatukontor)

6.2 Injektointipöytäkirjat

6.21 Pöytäkirjojen tarpeellisuus

Pohjarakennustöissä vaaditaan pöytäkirjan täyttämistä tapauksissa, joissa työn tulos jää piiloon ts. työn suoritusta voidaan jälkeenpäin arvioida vain työn tapahtumisaikana tehtyjen muistiinpanojen avulla. Pöytäkirjojen tietoja tarvitsee myös suunnittelija jatkosuunnitelmia laatiessaan sekä varmistuakseen siitä, että työ on suoritettu suunnitelmien ja ohjeiden mukaan. Työn valvonnassa pöytäkirjojen täyttäminen on myös välttämätöntä.

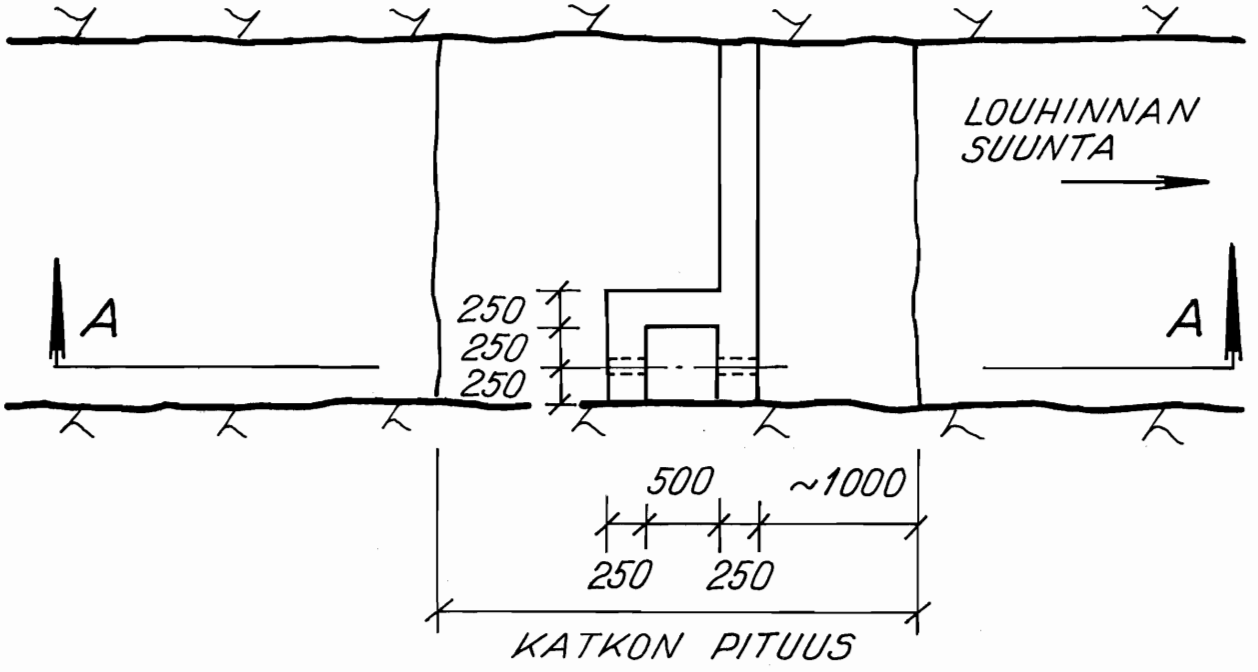
6.22 Nykyinen käytäntö

Esimerkkejä käytössä olleista pöytäkirjoista ja niiden täyttämisestä on esitetty liitteissä 2 ja 3.

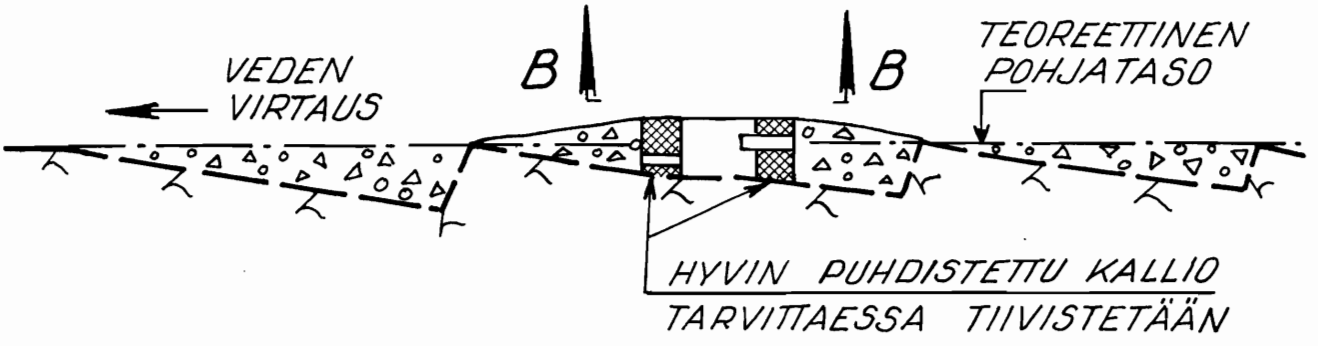
Tehdyissä injektoinneissa on pidetty pöytäkirjaa työvuoroittain. Käytettävästä pöytäkirjasta ja sen

1737/46

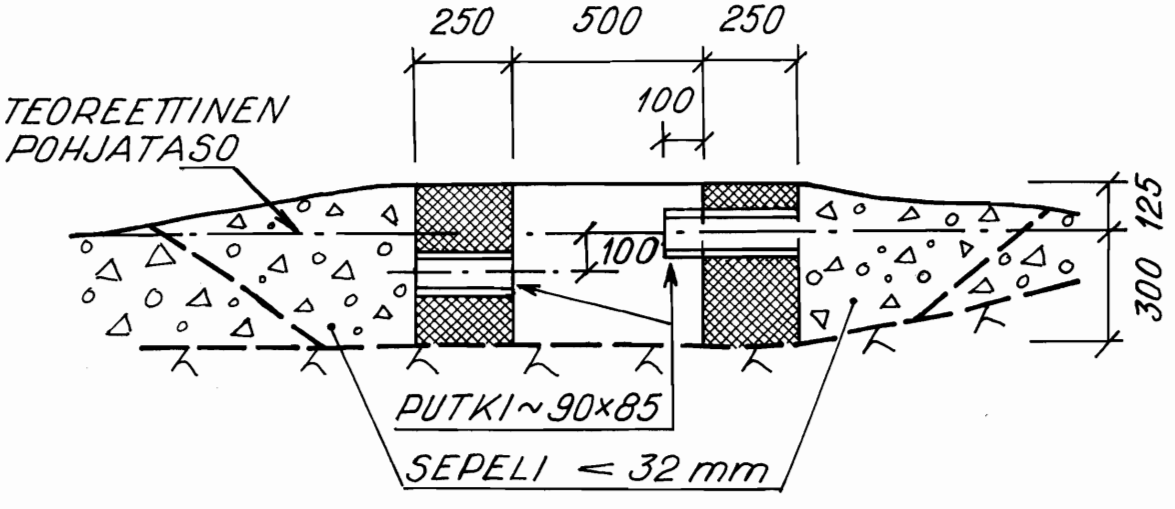
MITTAPADON RAKENNE 1:50



LEIKKAUS A-A 1:50



YKSITYISKOHTA B-B 1:20



KUVA 18

täyttämisestä ei ole ollut yksityiskohtaisia ohjeita.

Suurimpina havaittuina puutteina on ollut injektointireikien yksikäsitteisen numeroinnin, sijaintipiirrosten, injektointilajin ja injektointiajankohdan puuttuminen. Lisäksi joissakin tapauksissa on sekaannusta aiheuttanut se, että vesipainekokeissa on käytetty samaa pöytäkirjaa kuin injektoinnissa.

6.23
Uudet pöytäkirjamallit

Liitteessä 4 on esitetty uusi ehdotus pöytäkirjaksi injektointia varten ja liitteessä 5 vesipainekoetta varten. Pöytäkirjojen lisäksi tulee injektointiurakoitsijan tehdä erillinen piirros injektointikohteesta, josta käyvät ilmi reikien sijainti, pituus, ainemenekki rei´ittäin sekä vesimenekit rei´issä. Piirrostavasta on esitetty malli liitteessä 6, joka on otettu VTT:n geotekniikan laboratorion tiedonannosta No 25.

Injektointipöytäkirjoista on pyritty tekemään sellaiset, että niihin sisältyvät injektointityön pääasiat. Pöytäkirjojen huolellinen täyttäminen on injektointityössä oleellisen tärkeätä, sillä ilman niitä ei työn seuraaminen ja tuloksen tarkistaminen ole mahdollista.

6.3
Injektointityöselitykset
6.31
Kokemuksia käytössä olleista työselityksistä

Metron tunneleiden injektoinneissa ei ole käytetty erillisiä injektointityöselityksiä. Louhintatyöselitykseen on lisätty eräitä injektointityön suoritustapaa koskevia vaatimuksia.

Kaivokadun lippuhallin verhoinjektointia varten on laadittu injektointityöselitys. Puutteita työselityksessä on injektointityön aikana todettu olevan mainmnoissa, jotka koskevat henkilöiden ammattikokemusta ja kaluston laatua. Erimielisyyksiä on mm. aiheutunut siitä, onko paalujen kontakti-injektointia aikaisemmin suorittanut työnjohto ja miehistö katsottava ammattitaitoiseksi suorittamaan kallion injektointia. Samoin injektointikalustossa on ilmennyt puutteita, jotka johtuvat kaluston kirjavuudesta. Työselitykseen tulisi aina lisätä mai-

ninta, että urakoitsijan on hyväksytettävä kalustonsa rakennuttajalla ennen työn aloittamista. Esim. paalujen kontakti-injektoinnissa käytetty kalusto ei sellaisenaan sovi laajamittaiseen verhoinjektointiin.

6.32
Injektointityöselitykseen sisällytettävät asiat

Injektointipöytäkirjat ja piirustukset

Kohdassa 6.23 on esitetty pöytäkirjan täyttöä koskevat ohjeet. Työselityksessä on vaadittava pöytäkirjan täyttämistä työvuorottain. Työmaalla pidettävän piirustuksen lisäksi on urakoitsijan työn loputtua määrätyn ajan kuluessa toimitettava työn tilaajalle puhtaaksipiirretty piirros, jossa ilmenee injektointireikien sijainti, reikien kokonaismäärä, vesipainekokeiden tulokset ja massamenekit.

Injektointireikien poraus

Poratun reiän halkaisijalla on varsin vähäinen merkitys injektointimassan kulkeutumisessa kallioon. Verhoinjektoinnissa edellyetään tavallisesti injektointiputkiston olevan sisähalkaisijaltaan 1" suuruinen, jolloin kalliossa olevan injektointireiän alkuosan on oltava vähintään Ø 50 mm.

Injektointireikien huuhtelu

Porauksen jälkeen on reiät huuhdeltava vedellä puhtaaksi. Mikäli poratut reiät ovat yhteydessä toisiinsa, annetaan rakohuuhtelua varten erilliset ohjeet. Huuhtelussa ei paine milloinkaan saa ylittää käytettäväksi aiottua injektointipainetta. Reikä on myös huuhdeltava silloin, jos injektointi jostain syystä keskeytyy.

Injektointireikien täyttö

Injektoinnin jälkeen injektointireikä on huuhdeltava ja täytettävä jäykällä massalla, jossa on yksi osa sementtiä ja yksi osa hiekkaa 0 ... 2 mm. Reikä on täytettävä letkulla alkaen reiän pohjasta.

Vesimenekkikokeen suoritus

Vesimenekkikokeet tehdään huuhdotuissa reiissä porauksen yhteydessä 0,5 MPa (5 kp/cm^2) ylipaineella pohjaveden hydrostaattiseen paineeseen nähden. Paineen annetaan vaikuttaa 5 min. ajan. Painelukko asetetaan mahdollisimman ylös reikään ja koko reikä koestetaan yhdellä kertaa. Vesimenekki määritetään

kun tasapainotila on saavutettu. Vesimenekki ilmoitetaan (l/min.m .Mpa) kohti. Tällöin MPa ilmoittaa käytetyn ylipaineen. Jos vesimenekki nousee yli 2 l/min.m·Mpa tiivistetään reikä painelukolla. Mahdolliset ohivuodot muihin reikiin tai tunneliin merkitään muistiin. Tiedot merkitään liitteessä esitetylle lomakkeelle.

Injektointiaine

Sementti-injektoinnissa voidaan käyttää joko normaali- tai pikasementtiä. Seoksessa suositellaan käytettäväksi 2 ... 5 % bentoniittia.

Kemiallisten injektointiaineiden käytöstä on Suomessa toistaiseksi niin vähän kokemuksia, että yleispäteviä työohjeita ei voida vielä antaa.

Injektointikalusto

Injektointilaastin valmistusta varten tarvitaan nopeasti pyörivät erikoissekoittimet. Sekoittajien kierrosluvun tulee olla n. 500 ... 1700 r/min. Sekoittajan ja pumpun välillä tarvitaan hämmennin, jonka kierrosluku on 20 ... 30 r/min. Reiän injektoinnin saa keskeyttää vain pakottavasta syystä, joten sekoittajan tehon tulee olla vähintään sama kuin injektointipumpun. Pitkien reikien injektoinnissa tulee varautua siihen, että kalustolla voidaan pumpata seosta reikään teholla 50 ... 100 l/min. Tähän voidaan päästä yhdistelemällä letkuilla useampia yksiköitä saman reiän injektointiin.

Injektointipumppujen tulee olla konekäyttöisiä mäntäpumppuja. Pumpussa on oltava painemittari, samoin tulpassa injektointireiän suulla. Injektointipumpun painetehon on oltava riittävä ja sen tulee antaa tasainen syöttö ja vakiopaine. Massamenekin säädössä on voitava käyttää palautusta.

Injektointiputkiston (letkut, painelukut, hanat ja liittimet) on oltava vähintään Ø 1" sisähalkaisijaltaan. Injektointiputket on varustettava painelukoilla, jotka sulkeutuvat tiiviisti kaikilla esiintyvillä paineilla. Maksimi-injektointipaineena on pidettävä arvoa 1,0 MPa.

Injektointilaastin vesi-sementtisuhde

Laastin vesi-sementtisuhteena käytetään arvoa 4:1. Vain poikkeustapauksissa menekin ollessa erittäin suuri, saennetaan laastia.

Injektoinnin huomioiminen louhinnassa (Gatukontor, Tukholma)

Louhintareikien porauksen ja injektoinnin välillä on pidettävä vähintään viiden (5) tunnin tauko. Injektoinnin tulos tarkistetaan suorittamalla riittävän monessa reunareiässä vesipainekoe.

Jos louhintareikien porauksen yhteydessä esiintyy vesivuoto, on poraus välittömästi keskeytettävä ja vuoto injektoitava. Louhittaessa luokissa I ja II (vrt. kohdat 5.32 ja 5.36) on valvojan hyväksyttävä louhintareikien porauksen jälkeen kallion tiiveys. Lataamisen saa suorittaa vasta tämän jälkeen.

Injektoinnin ohjaus työn aikana

Injektoitaessa saadaan kustakin injektointireiästä lisäinformaatiota, joka on käytettävä hyväksi seuraavien reikien injektoinnissa. Tästä syystä alkuperäistä injektointisuunnitelmaa joudutaan usein tarkistamaan työn aikana, jolloin suunnittelijan ja valvojan mahdollisuus vaikuttaa injektointityön kulkuun määritellään tavallisesti työselityksessä yleisluontoisella ohjeella. Työselitykseen sisällytetään mainintoja, joiden mukaan injektointi suoritetaan annetun alkuperäisen suunnitelman, siihen myöhemmin mahdollisesti tehtyjen muutosten sekä valvojan työn aikana antamien ohjeiden ja harkinnan mukaan.

KIRJALLISUUTTA:

(1) AHLFORS, B. Kallion ja maaperän injektointi Am-9-nimisellä akryliamidikemikaalivalmisteella. TKK, lisensiaattityö 1973.

(2) ALBERTS, C. Speciella förfaranden vid betongarbeten och injektering. Stockholm 1969.

(3) ANTTIKOSKI, HARTIKAINEN och SAARELAINEN. Metrobyggets inverkan på grundvattnet inom Helsingfors innerstadsområde. Nordisk geoteknikermøde i København 1975.

(4) BERGMAN, S.G.A., LINDMAN, K., LUNDSTRÖM, L., SÖDERMAN, P., ULLERUD, S. Tunneltätning mot små läckage. Byggforskningen, Rapport 25, Stockholm 1975.

(5) CAMBEFORT, H. Boden Inektionstechnik. Wiesbaden und Berlin 1969.

(6) HELSINGIN KAUPUNGIN GEOTEKNILLINEN TOIMISTO. Hakaniemen metroasema, Pohjavesiselvitys. Helsinki 1976.

(7) HELSINGIN KAUPUNGIN GEOTEKNILLINEN TOIMISTO. Sörnäisten metroasema. Lippuhallin pohjavesiselvitys. Helsinki 1975.

(8) HOLTZLÖHNER, U. Der Injektionsvorgang in klüftigem Fels, Rock Mechanics, May 1970.

(9) LYSÉN, L., PALMQVIST, K. Tätning av bergtunnlar. Projekteringsmetodik, injektering och forstärkning, BFR. R4; 1976.

(10) MAA- JA KALLIORAKENNUS. RIL 98. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Helsinki 1976.

(11) PUSCH, R. Geoteknik/Bergmekanik. Uppsala 1974.

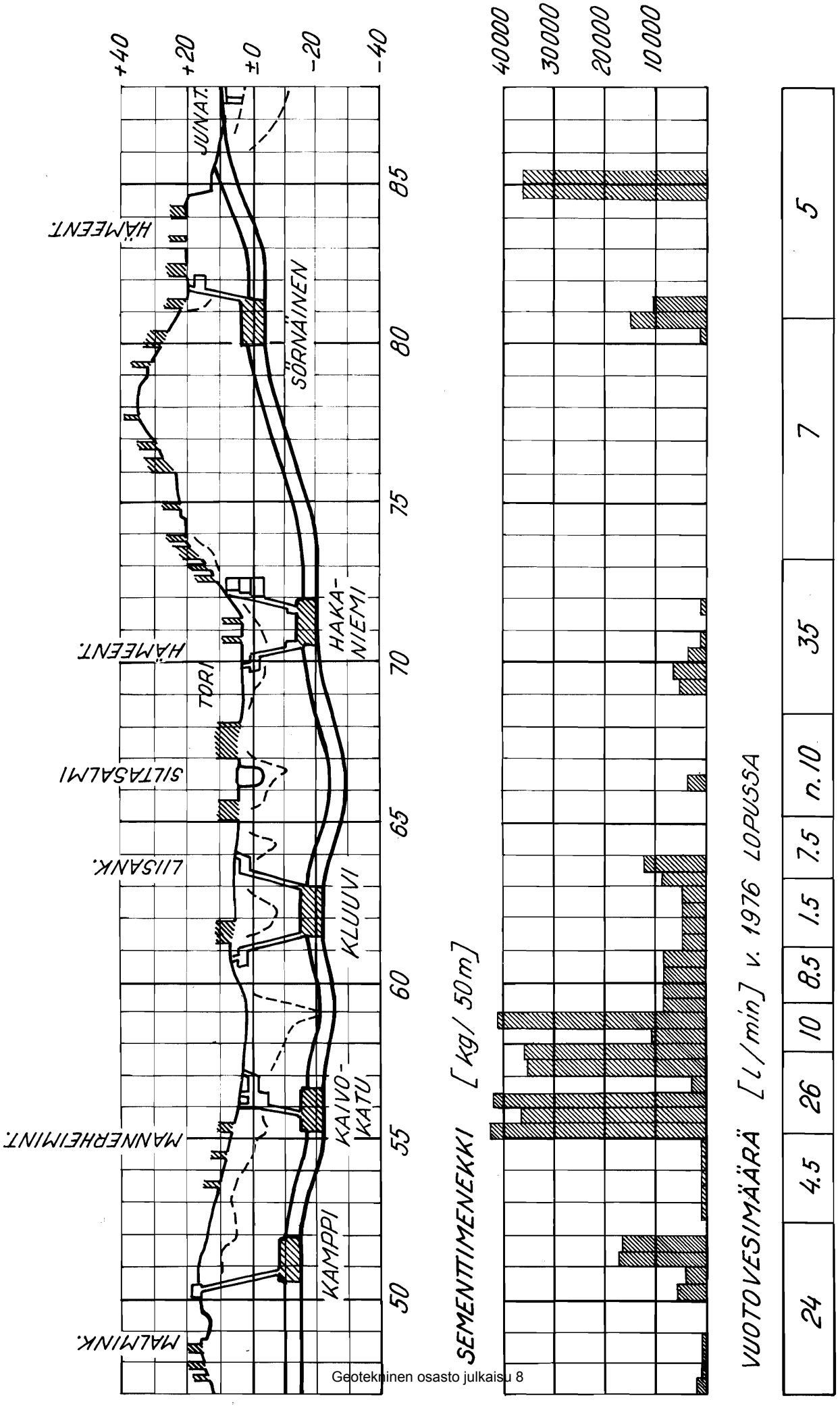
(12) SOLOVJEW, N. Lujitus- ja injektointi. INSKO 46-76. Helsinki 1976.

(13) STOCKHOLMS GATUKONTOR, UTREDNINGSAVDELNINGEN. Bergtekniska anvisningar vid utsprängning av tunnlar och bergrum. Ritning 21013. Stockholm 1974.

(14) WITTKE, W. Zur Reichweite von Injektionen in klüftigen Fels. XVII Kolloquim der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik.

(15) VTT, GEOTEKNIIKAN LABORATORIO.Tiedonanto 25. Rakennusgeologisen kallioluokituksen soveltaminen. Espoo 1976.

LIITE 1



INJEKTOINNIN SEMENTTIMENEKKI SEKÄ TUNNELEIDEN VUOTOVESI-MÄÄRÄT METROSSA v. 1976 LOPUSSA

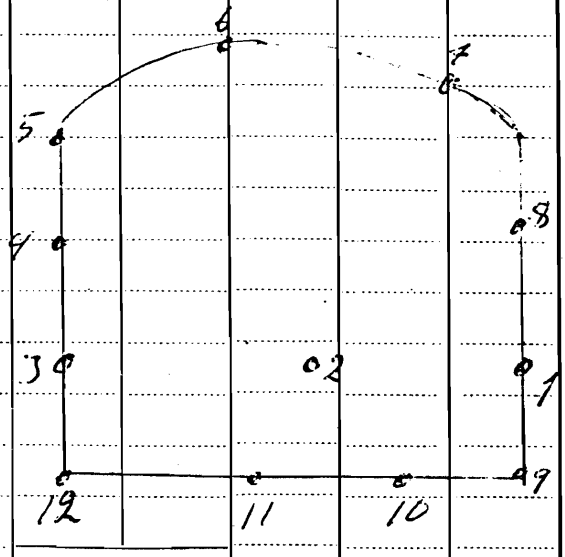
LIITE 2

INJEKTOINTIPÖYTÄKIRJA

Työvuoron N:o 33
Pvm. 6.5 - 1974
Klo 02⁰⁰ - 05⁰⁰

Työmaa Metro
Inj.kohde Et. tunneli Pl. 63+62

Klo	Reikä			Seoserä			Sementtimenekki rei'ittäin				
	Reiän N:o	Syvyys m	Paine kp/cm²	Vettä l	Sem. kg	Seoserä l	Reiän N:o	Syvyys m	Sem. kg	Seoserä l	Toimen-pide
2⁰⁰-3⁰⁰	1	6,4	10	1,2	min	tutkimusreikä					
"	2	6,4	10	4,0	"	— " —					
"	3	6,4	10	—	—	—	—				
03-04	1-2	6,4	10-14	200	50	216					
04-04,15	3-8	6,4	10	—	—	—					
04,15-5⁰⁰	9-12	6,4	10-14	300	100	316					
Yhteensä				—	150	532	Hukka				—
							Jäännös				
							Yhteensä				



Injektointilaji

Kone	N:o						

Valmistunut reikiä 12 kpl
Valmistunut reikää 76,8 jm
Vesimenekk. mitattu 3 kpl

Tark.

LIITE 3

INJEKTOINTIPÖYTÄKIRJA

Työvuoron N:o 20
Pvm. 24.6.74
Klo 6.00 - 11.00

Työmaa Metro
Inj.kohde [redacted] osalta [illegible]

Klo	Reikä			Seoserä			Sementtimenekki rei'ittäin				
	Reiän N:o	Syvyys m	Paine kp/cm²	Vettä l	Sem. kg	Seoserä l	Reiän N:o	Syvyys m	Sem. kg	Seoserä l	Toimenpide
6.00	1	6,4	12								
	2	6,4	12								
	3	6,4	10		150						
	4	6,4	10								
	5	6,4	10								
	6	6,4	12								
	7	6,4	12								
10.00	8	6,4	12								
							Hukka				
							Jäännös				
Yhteensä				—			Yhteensä				—

Injektointilaji

Kone	N:o						

Valmistunut reikiä 8 kpl
Valmistunut reikää 51,2 jm
Vesimenekk. mitattu ..... kpl

Työnjohtaja

Helsingin Kaupunki, Kiinteistövirasto

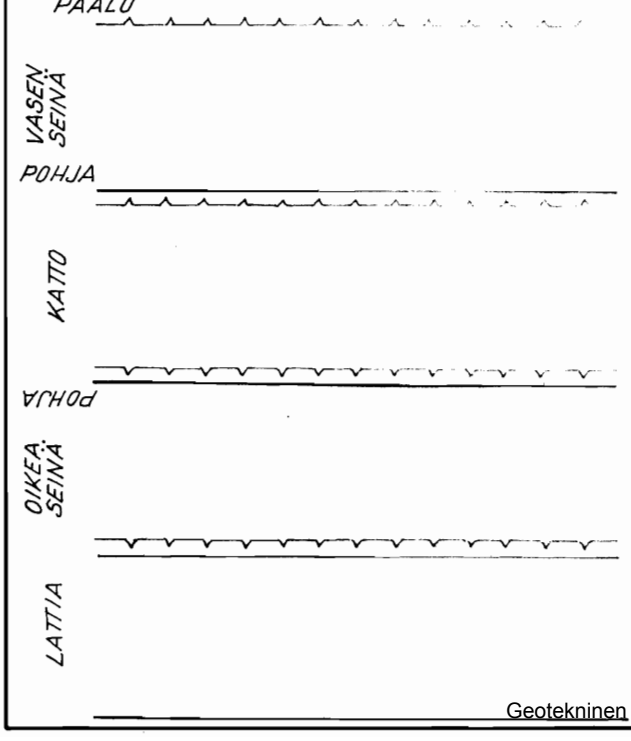
INJEKTOINTIPÖYTÄKIRJA

TILAAJA	URAKOITSIJA	INJ. LAJI	PVM	AIKA

INJ. AINE	INJ. KOHDE	INJ. ALUE PL – PL	TYÖVUORO N:o

REIKÄ N:o	PITUUS m	ϕ mm	INJ. SYVYYS m – m	PAINE MPa	AINE-MENEKKI kg	SEOS SUHDE	INJ. AIKA min.	VESI-MENEKKI l/m, min, MPa	HUOMIOITA
			HUKKAMASSA						

SIJAINTIPIIR.



INJ. KALUSTO

HUOM

LAATINUT

TARKASTANUT

LIITE 5

VESIMENEKKIKOEPÖYTÄKIRJA

TILAAJA	URAKOITSIJA	TYÖKOHDE	TYÖVUORO	PVM

REIKÄ Nº	PITUUS m	ϕ mm	KOESTUS-SYVYYS m — m	PAINE MPa	KOESTUS-AIKA min	VESI-MÄÄRÄ L/min	VESI-MENEKKI L/m, min, MPa	HUOM

SIJAINTIPIIR.

PAALU

VASEN SEINÄ

POHJA

KATTO

POHJA

OIKEA SEINÄ

LATTIA

KALUSTO

HUOM

LAATINUT

TARKASTANUT

LIITE 6

	KALLION LUJITUS JA TIIVISTYS	No Pvm

Tilaaja: Rahoittaja Oy

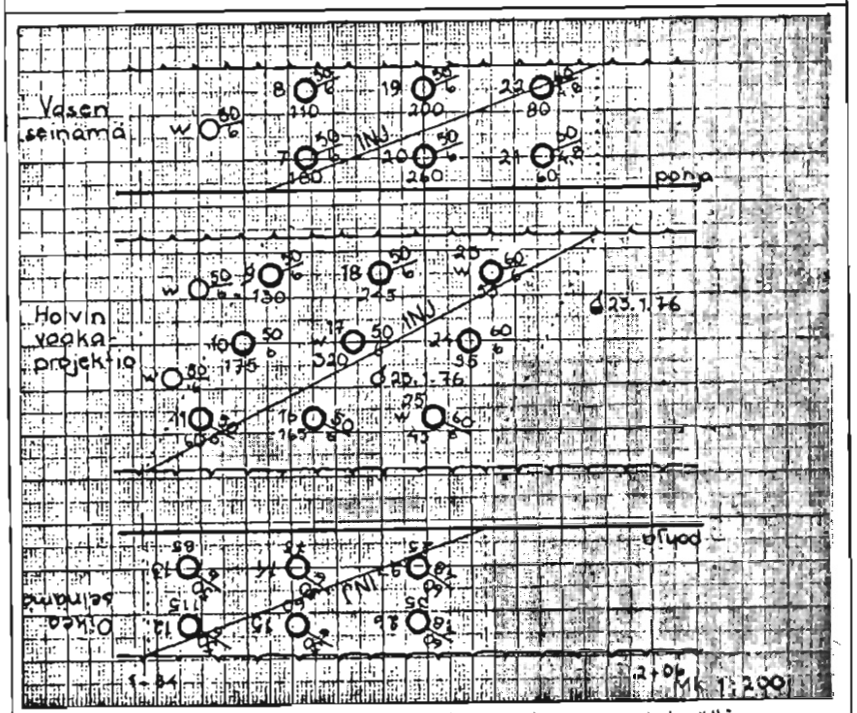
Työkohde: Varaston yhdystunneli

Työn suorittaja: Tiivistys Oy Laatija: E. Miekkonen

Paikannus: pl. 1+84 ··· 2+06

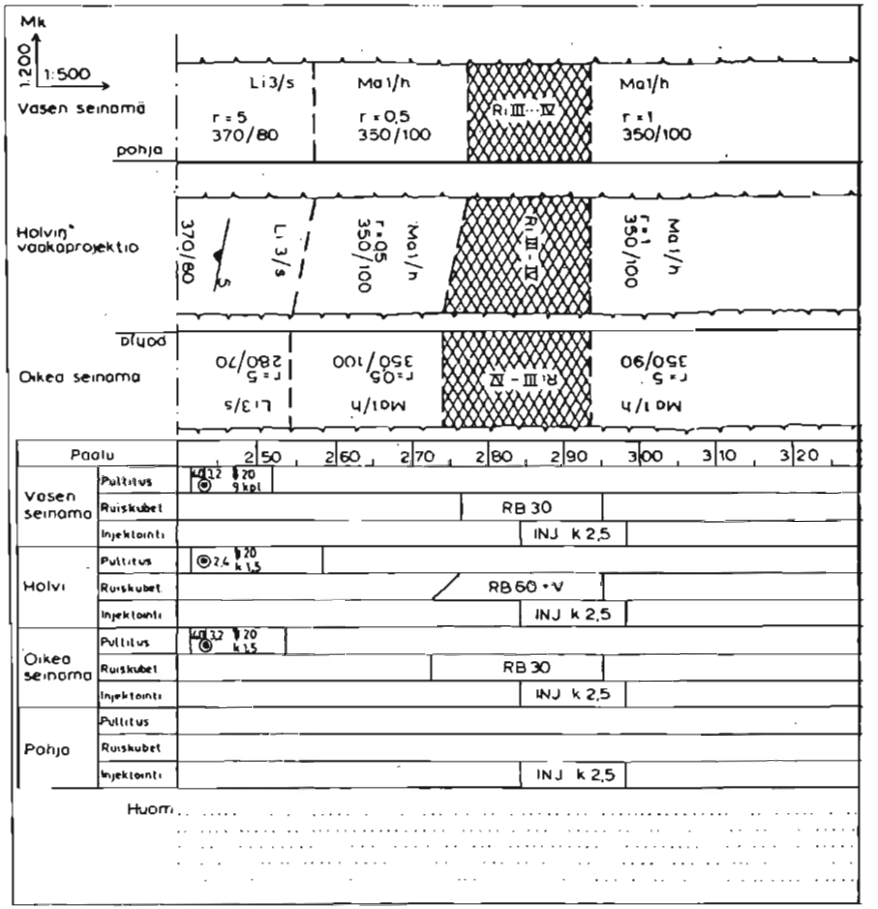
Lujitus: .....

Tiivistys: Injektointiaine vesi-sementtiseos w 4 ··· 1. Injektointipaine maksimi 0,5 MPa. Lisäaine Intrusion Aid 0,7%. Injektointi tehty 1-tulppamenetelmällä 9 ··· 18.1.76



Huom. Vesimenekki mitattu 8 reiässä 1-tulppamenetelmällä 7 ··· 8.1.76

Esimerkki kallion tiivistyksen tall



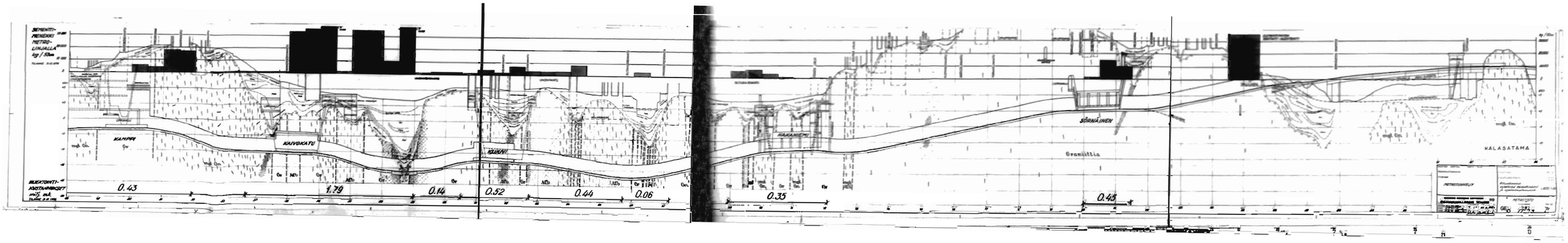
Esimerkki tallennuksen yhdistelmäpiirustuksesta (taltiointipiirustuksesta).

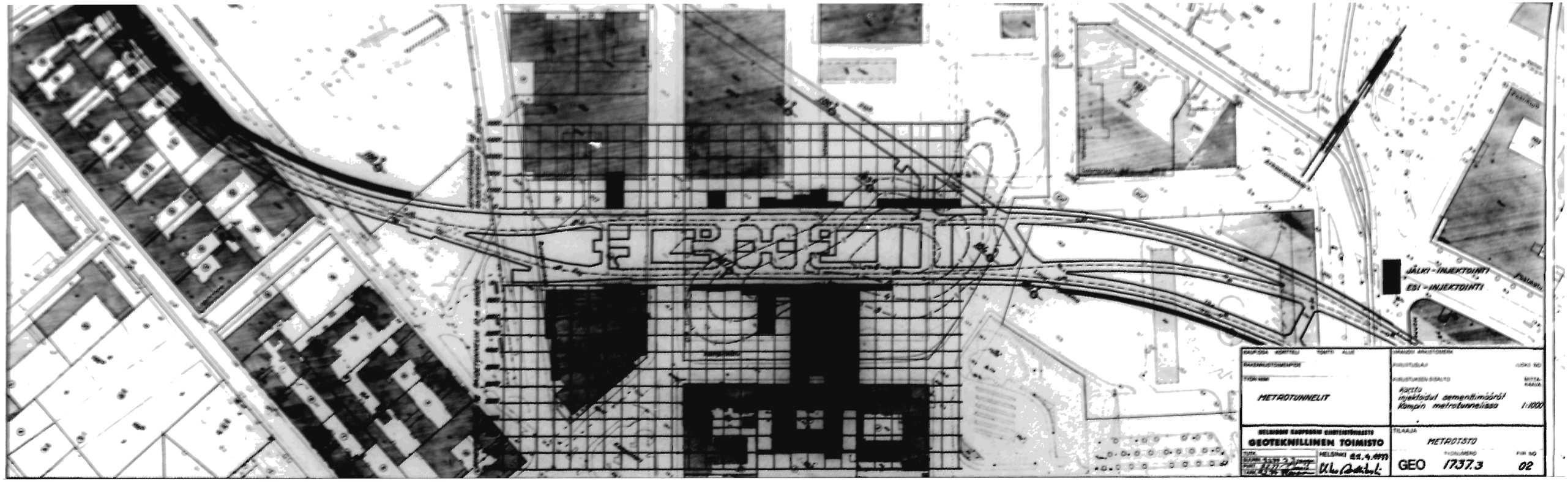
INJEKTOINTI

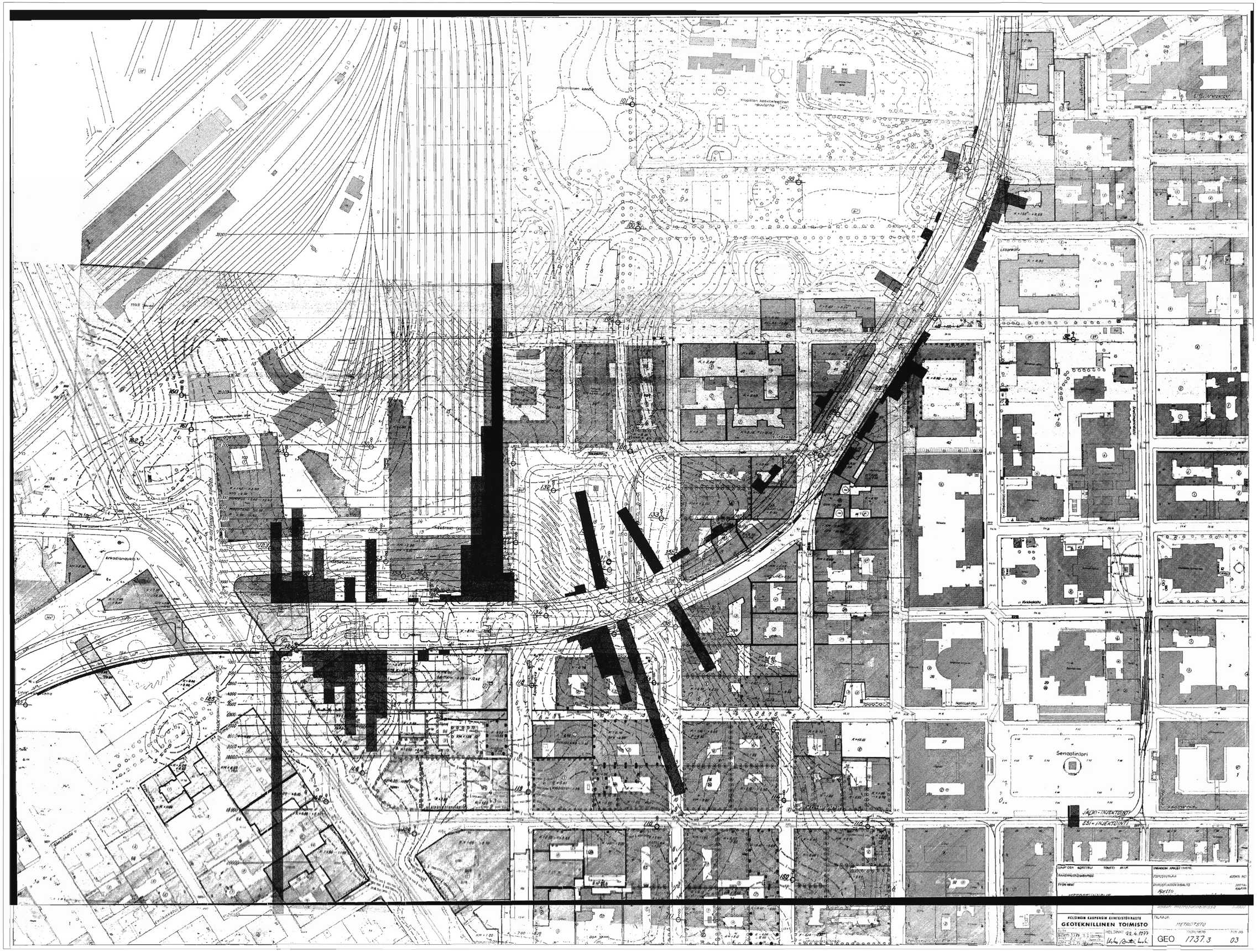
Ow Vesimenekkimittaus

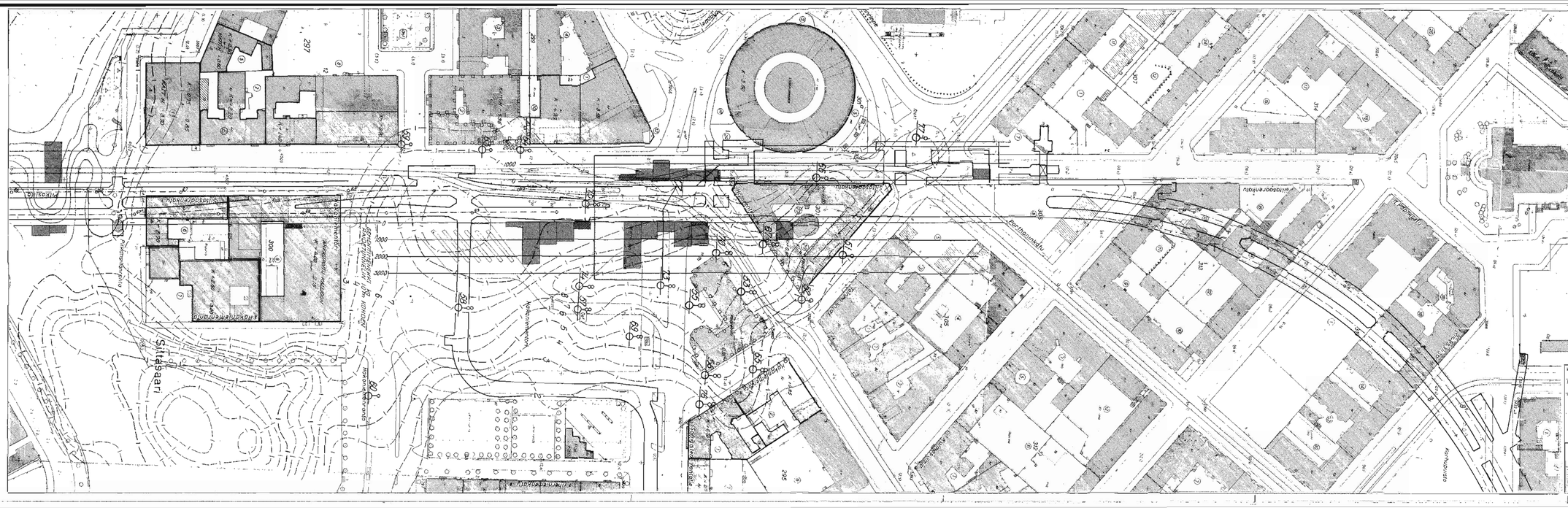
12 O 50/7,5 34 Injektointireikä, numero, 12, suuntakulma, 50(gon) injektoitavaan alustaan nähden, injektointireiän pituus, 7,5(m) ja injektiomassan kuivaainesmenekki, 34(kg/reikämetri)

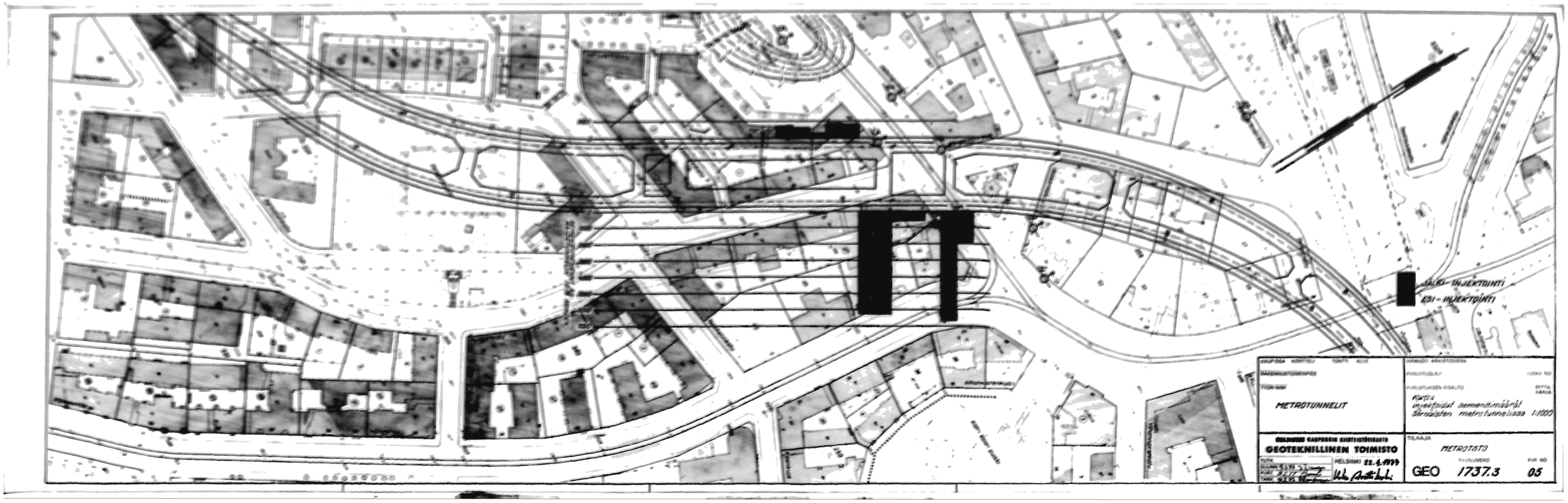
Injektointialue


SEMENTI-MENEKKI METRO-LINJALLA kg / 50m
KAMPPI
KAIVOKATU
KIUUNI
SÖRNÄINEN
Graniittia
KALASATAMA
0.43
1.79
0.14
0.52
0.44
0.06
0.35
0.45


JÄLKI-INJEKTOINTI
ESI-INJEKTOINTI
METROTUNNELIT
Kartta injektoidut sementimäärät Kampin metrotunnelissa
1:1000
HELSINGIN KAUPUNGIN KIINTEISTÖVIRASTO
GEOTEKNILLINEN TOIMISTO
HELSINKI 22.4.1977
METROTSTO
GEO 1737.3
02


Seriaatintori
JÄÄKI-INJEKTOINTI
ESI-INJEKTOINTI
HELSINGIN KAUPUNGIN KIINTEISTÖVIRASTO
GEOTEKNILLINEN TOIMISTO
TILAAJA
METROTSTO
GEO
1737.3
03


Siltasaari
Siltasaarenkatu
Siltasaarenranta
Siltasaarenranta
Siltasaarenranta


[redacted]
[redacted]
[redacted]