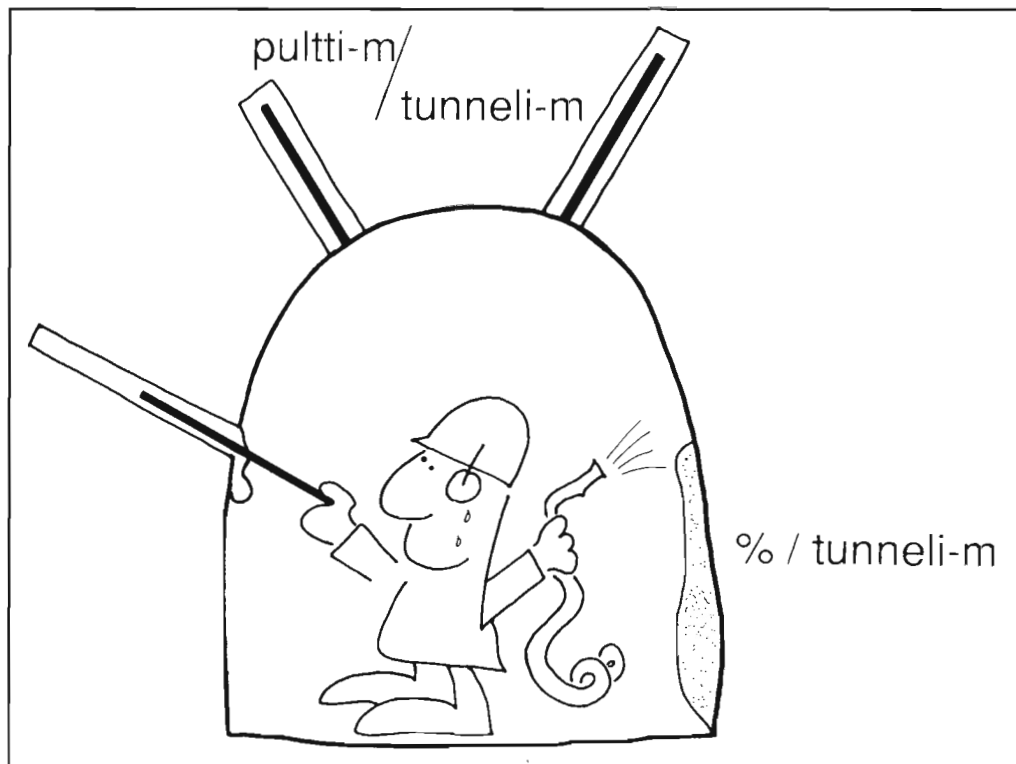




LUJITUS- JA TIIVISTYSMÄÄRÄT HELSINGIN PIENTUNNELEISSA

Jukka Ahola • Raimo Viitala



HELSINGIN KAUPUNKI
KIINTEISTÖVIRASTO

G E O T E K N I N E N O S A S T O

ALKULAUSE

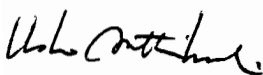
Helsingin kaupunki rakennuttaa vuosina 1990 - 1995 noin 40 km kunnallisteknisiä tunnelleita. Näiden tutkimuksen, kalliorakennussuunnittelun ja osittain valvonnan suorittaa Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekninen osasto. Tunnelit rakennetaan kokonaishintaurakkana, jolloin lujitus- ja tiivistysmäärät arvioidaan etukäteen ja ilmoitetaan urakkatarjouksia pyydettyäessä. Mikäli määrät ylittyvät tai alittuvat niin maksuliikenne on sidottu urakoitsijoiden ilmoittamiin yksikköhintoihin. Jotta yksikköhinnat olisivat mahdollisimman totuudenmukaisia ja täten työnteon kannalta mielekkäitä, niin urakoitsijoiden täytyy luottaa urakassa ilmoitettuihin määriin. Rakennuttajan kannalta on myös tärkeää, ettei lopullinen urakkahinta nouse huomattavasti lisääntyneiden lujitusten tai tiivistystöiden takia.

Geotekninen osasto teetti tämän tutkimuksen Teknillisen korkeakoulun prosessi- ja materiaali-tekniikan osastolla. Työn teki DI Jukka Ahola diplomityönään. Tutkimukseen on osallistunut toimeksiantajan edustajina DI Pekka Holopainen, insinööri Yrjö Kähönen, fil.maist. Pekka Raudasmaa ja DI Raimo Viitala. Lisäksi tutkimukseen ovat osallistuneet osastopäällikkö Usko Anttikoski geotekniseltä osastolta ja professori Raimo Matikainen Teknillisestä korkeakoulusta.

Selvityksessä tutkittiin Helsingissä 1980-luvulla rakennettuihin kuuteen tunneliin, yhteispituudeltaan noin 25 km, käytetyt tiivistys- ja lujitusmäärät. Määriä verrattiin tunnelleiden seurantapiirustuksista saatuihin kalliolaatuluokkiin.

Seurantapiirustuksissa on esitetty kunkin kohteen tiivistys- ja lujitustoimenpiteet sekä rakennus-geologinen kartoitus. Tutkimuksen tuloksena saatiin tilastollinen aineisto käytetyistä tiivistys- ja lujitusmääristä. Tutkittujen tunnelleiden kalliolaatu, ympäristötekijät ja käyttötarkoitus vaihtelivat niin paljon ettei, suoranaista määrälaskentaan liittyvää ohjetta löytynyt. Saatuja määriä tarkasteltaessa on otettava huomioon ettei määriä laskettaessa ole huomioitu risteysalueita, erikoistilanteita eikä lastaussyvennyksiä.

Helsingissä, maaliskuun 26. päivänä 1992



Usko Anttikoski
osastopäällikkö

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää Helsingissä 1980-luvulla rakennettujen tunnelien tiivistys- ja lujitusmäärät sekä niiden yhteys kalliolaatuluokkiin. Tulosten perusteella tulevien hankkeiden määrä- ja kustannusarviot tarkentuvat entisestään.

Kirjallisuustutkimuksessa on selvitetty kalliolaatuluokitusten, tiivistyksen ja lujituksen mitoituksen sekä menekkiarvioinnin teoriaa.

Menekit ja kalliolaadut on selvitetty kuudesta poikkileikkaukseltaan 7 - 18 m²:n tunnelista. Lähtöaineistona oli tunnelien seurantapiirustukset, joissa on esitetty tiivistys- ja lujitustoimenpiteet sekä rakennusgeologinen kartoitus. Tilastollinen tarkastelu on tehty vertaamalla menekkejä erikseen tunneleissa ja kalliolaatuluokissa. Keskiarvojen luotettavuutta on tutkittu vertaamalla niitä keskihajontoihin.

Saatujen tulosten mukaan tunnelimetriä kohti on tehty injektointiporausta keskimäärin 0,60 porametriä, käytetty massaa 37,35 kg ja työvuoroja 0,013 kpl. Jälki-injektoinnin osuus on ollut noin 16 % kokonaisinjektoinnista. Pultteja on asennettu keskimäärin 0,52 metriä. Louhintatyönaikaisen pultituksen osuus tästä on 6 %. 40 mm paksua ruiskubetonia on tehty keskimäärin 27 % ja 70 mm:n verkolla vahvistettuna 7 % tunnelin pinta-alasta. 40 mm:n ruiskubetonista on louhintatyönaikaista keskimäärin 7 % ja 70 mm:n ruiskubetonista alle 1 %. Keskiarvojen hajonnat ovat suuria johtuen tunnelien välisistä eroista.

Menekkien vaihtelut kalliolaatuluokissa ovat suuria ja johtuvat mahdollisesti muista ympäristötekijöistä sekä eri suunnittelijoiden näkemyseroista. Suurin tiivistyskustannus 426 mk tunnelimetriä kohti on rikkonaisessa murrosrakenteisessa kalliolaadussa ja pienin, 82 mk, kiinteässä vähärakoisessa kalliolaadussa. Suurin lujituskustannus, 1026 mk, on rikkonaisessa savirakenteisessa kalliolaadussa ja pienin, 154 mk, kiinteässä vähärakoisessa kalliolaadussa.

Johtopäätöksenä saaduista tuloksista voidaan todeta, että keskimääräiset menekit ovat suuntaa antavia. Tarkempaan tulokseen pyrittäessä on määrärajoitinta tehtävä tunnelikohtaisten menekki-perusteella.

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the quantities of grouting and support and their relationship to rock quality classes in tunnels built in Helsinki in the 1980's. The results are to be used in planning of future tunnels.

The scope of the literature study included theory of rock classification, grout and support planning and estimation of specific consumption quantities.

The consumption quantities and rock quality were determined from six tunnels of cross-sectional area 7 - 18 m². The data was collected from maps drawn according to the Finnish standard, which includes grouting and tunnel reinforcement documents and the engineering-geological determination. The statistical examination was done by comparing the average consumption values separately in tunnels and in rock quality classes. The accuracy of average values was estimated by comparing them with standard deviations.

The results are, that per tunnel metre 0,60 m grout hole drilling, 37,35 kg grout and 0,013 workshifts have been spent. The amount of grouting after blasting was about 16 % of the total. Rock bolts were installed on average 0,52 m per tunnel metre. The amount of initial bolting was 6 % of the total. 40 mm shotcrete and 70 mm reinforced shotcrete covered, respectively, 27 % and 7 % of the tunnel sides and ceiling surface areas. Initial shotcreting formed 7 % of the 40 mm shotcrete and <1 % of the 70 mm shotcrete. The standard deviations of the averages are extensive due to differences between the tunnels.

The quantities varied widely because of environmental reasons and the views of different engineers. The greatest cost of grouting, 426 mk per metre of tunnel, was in broken fracture-structured rock and least, 82 mk, in intact slightly jointed rock. The greatest reinforcement cost, 1026 mk, was in broken clayey-structured rock and least, 154 mk, in intact slightly jointed rock.

In conclusion it may be said, that the consumption averages are nominal. Better results can be achieved by estimating the quantities on the basis of each tunnel. Results can further be adjusted using averages and standard deviations of the rock quality classes, namely on the basis of joint frequency and degree of fragmentation.

LIITELUETTELO

1. Seurantapiirustus
2. Kivikko-Malmi kaukolämpötunneli, sijaintikartta, pituus ja poikkileikkaus
3. Roihuvuoren viemäritunneli, sijaintikartta, pituus ja poikkileikkaus
4. Munkkisaari-Mäntymäki viemäritunneli, sijaintikartta
5. Munkkisaari-Mäntymäki viemäritunneli, pituus ja poikkileikkaus
6. Tali-Lassila viemäritunneli, sijaintikartta, pituus ja poikkileikkaus
7. Pihlajamäen viemäritunnelin siirto, sijaintikartta
8. Pihlajamäen viemäritunnelin siirto, pituus ja poikkileikkaus
9. Puhdistettujen jätevesien poistotunneli, sijaintikartta
10. Puhdistettujen jätevesien poistotunneli, pituus- ja poikkileikkaukset

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE
 TIIVISTELMÄ
 ABSTRACT
 LIITELUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto.....	1
2 Kallioluokitukset.....	2
2.1 RG-luokitus.....	2
2.2 NGI-luokitus ja Rock Mass Quality (Q-luku).....	3
2.3 CSIR-luokitus ja Rock Mass Rating (RMR-luku).....	3
2.4 RG-luokituksen ja Q-luvun suhde.....	4
3 Lujitus- ja tiivistystarpeeseen vaikuttavat seikat	6
3.1 Kallion laatu.....	6
3.2 Geometriset tekijät.....	8
3.3 Tunnelin käyttötarkoitus.....	9
3.4 Ympäristö.....	9
4 Lujitus- ja tiivistystapojen arvioinnin perusteet.....	11
4.1 Tunnusteluporaus ja injektointi.....	11
4.2 Pultitus.....	13
4.3 Ruiskubetonointi.....	15
5 Tiivistystä ja lujituksia koskevat tiedot Helsingin rakentamis- asiakirjoissa ja tietojen taltiointi.....	18
6 Tiivistys- ja lujitusmäärät sekä kalliodaadut tarkastelluissa tunneleissa.....	20
6.1 Tarkastelumenetelmä.....	20
6.2 Kivikko-Malmi kaukolämpötunneli.....	22
6.2.1 Yleistiedot tunnelista.....	22
6.2.2 Kallion laatu.....	23
6.2.3 Tiivistys- ja lujitusmäärät.....	23
6.3 Roihuvuoren viemäritunneli.....	24
6.3.1 Yleistiedot tunnelista.....	24
6.3.2 Kallion laatu.....	25
6.3.3 Tiivistys- ja lujitusmäärät.....	25
6.4 Munkkisaari-Mäntymäki viemäritunneli.....	27
6.4.1 Yleistiedot tunnelista.....	27
6.4.2 Kallion laatu.....	28
6.4.3 Tiivistys- ja lujitusmäärät.....	28
6.5 Tali-Lassila viemäritunneli.....	30
6.5.1 Yleistiedot tunnelista.....	30
6.5.2 Kallion laatu.....	30
6.5.3 Tiivistys- ja lujitusmäärät.....	31
6.6 Pihlajamäen viemäritunnelin siirto.....	33
6.6.1 Yleistiedot tunnelista.....	33
6.6.2 Kallion laatu.....	33
6.6.3 Tiivistys- ja lujitusmäärät.....	33

6.7 Puhdistettujen jätevesien poistotunneli.....	35
6.7.1 Yleistiedot tunnelista.	35
6.7.2 Kallion laatu.....	36
6.7.3 Tiivistys- ja lujitusmäärät osuudella Viikki-Hakaniemenranta (plv 0-6000).	39
6.7.4 Tiivistys- ja lujitusmäärät osuudella Hakaniemenranta- Eteläesplanadi (plv 6000-7400).	41
6.7.5 Tiivistys- ja lujitusmäärät osuudella Eteläesplanadi- Munkkisaari (plv 7400-8600).	43
6.7.6 Tiivistys- ja lujitusmäärät osuudella Munkkisaari- Pihlajasaari (plv 8600-10700).	45
6.7.7 Tiivistys- ja lujitusmäärät osuudella Pihlajasaari- Katajaluoto (plv 10700-16775).	47
7 Tiivistys- ja lujitusmäärien vertailu tunneleittain ja yhteys kalliolaatuun.....	50
7.1 Kallio-olosuhteet tunneleissa.	50
7.2 Tiivistyksen ja lujitusten osuudet ja menekit tunneleissa.....	51
7.2.1 Yleistä.	51
7.2.2 Injektointi.	51
7.2.3 Pultitus.	53
7.2.4 Ruiskubetonointi.	54
7.2.5 Yhteenveto tiivistyksen ja lujitusten osuuksista ja menekeistä.	55
7.3 Tiivistyksen ja lujitusten osuudet ja määrät kalliolaaduissa.	56
7.3.1 Menetelmäkuvaus.	56
7.3.2 Injektointi.	57
7.3.3 Pultitus.	58
7.3.4 Ruiskubetonointi.	61
7.3.5 Määrien ja osuuksien yhteenveto.	63
7.3.6 Kustannukset kalliolaatuluokissa.	64
7.4 Q-luvun ja lujitusten välinen yhteys.	65
8 Johtopäätökset.....	68
9 Yhteenveto.	70

Viiteluettelo
Liitteet

1 JOHDANTO

Tunnelin lujituskustannukset vaihtelevat laajoissa rajoissa kalliolaadun takia. Uuden tunnelihankkeen kustannusten arviointiin tarvitaan tiedot tiivistys- ja lujitusmääristä. Määriä on vaikea arvioida ennakolta, sillä riittäviä tutkimuksia kalliolaadusta ei kannata tehdä koko tunnelin matkalle. Tilastollisesti voidaan olettaa kalliolaatujen esiintyvän alueittain tietyissä määräsuhteissa toisiinsa nähden. Pientunneleiden lujitus ja tiivistysmääristä on urakoitsijoiden ja rakennuttajien jälkilaskentoja lukuunottamatta tehty vain harvoja selvityksiä. Näissä ei yleensä ole huomioitu kallion laatua.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää Helsingissä 1980-luvulla rakennettujen tunneleiden tiivistys- ja lujitusmäärät tulevien tunnelihankkeiden määräarvioinnin perustaksi. Lisäksi tavoitteena oli selvittää kalliolaadun yhteys tiivistys- ja lujitusmääriin. Kirjallisuustutkimuksen tavoitteena oli selvittää teoreettisten määräarviomenetelmien soveltuvuutta pientunneleihin.

Kohteeksi valittiin kuusi poikkileikkauksaltaan 7-18 m² tunnelia. Kaukolämpötunneleita on yksi, Kivikko-Malmin tunneli. Paineettomia jätevesitunneleita on kolme, Roihuvuoren, Munkkisaari-Mäntymäen sekä Tali-Lassilan viemäritunnelit. Paineellisia tunneleita on kaksi, Pihlajamäen viemäritunnelin siirto-osuus ja puhdistettujen jätevesien poistotunneli. Tunneleista tarkasteltiin osuuksia, joissa tiivistyksen ja lujitusten määräämisperusteet ovat samanlaiset. Tämän vuoksi jätettiin käsittelemättä ajotunnelit, joissa maanpinnan läheisyydellä on vaikutus lujitusmääriin. Rakoilun suuntien vaikutusta ei ole tässä työssä käsitelty.

Lähtöaineistona oli tunneleista laaditut seurantapiirustukset, joissa on esitetty kalliolaatu sekä tehdyt tiivistys ja lujitustoimenpiteet. Tutkimus tehtiin laskemalla tiivistys- ja lujitusmäärät urakka-asiakirjojen mukaisin yksiköin sekä tunneleista että kalliolaatuluokista. Lisäksi on laskettu prosenttiosuudet pituuksista joissa kutakin työtä on tehty.

Tuloksena on saatu suuri määrä tunnuslukuja sekä tunneleille että kalliolaatuluokille, joista tärkeimmät on koottu yhteenvetoon.

2 KALLIOLUOKITUKSET

Kallioluokituksia on laadittu mm. geologisten olosuhteiden, louhittavuuden ja lujitustarpeen arvioimiseksi. Yleisimmät ulkomailla käytetyt kallioluokitukset ovat South African Council for Scientific and Industrial Researchissa laadittu CSIR-luokitus ja Norjan geoteknisessä instituutissa laadittu NGI-luokitus. Kumpikin on tarkoitettu lujitustarpeen määrittämiseen. Suomessa käytössä oleva rakennusgeologinen (RG) kallioluokitus on tarkoitettu kuvaamaan kallion ominaisuuksia rakennettavuuden ja louhittavuuden kannalta, eikä antamaan lujitus-suositusta. Se ei ole myöskään suoraan vertailukelpoinen edellämainittuihin, sillä siitä puuttuu osa muissa määritettävistä ominaisuuksista.

2.1 RG-luokitus

RG-luokitus on laadittu Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen geotekniikan laboratoriossa kalliolaadun kuvaamiseksi kaikkien kalliorakennusalan ihmisten kesken yhteisellä tavalla. Se on kehitetty Suomen kallioperäolosuhteita varten ja sitä sovelletaan yleisesti kalliorakennus-töissä. Luokitusperusteet ovat rakennetyyppi ja rakoilu, joiden avulla määritetään kalliolaatu. Rakennetyyppi on jaettu kolmeen pääluokkaan: kiinteä, löyhä sekä rikkonainen. Tunnelirakentamisen kannalta tärkein on heikkousvyöhykkeissä esiintyvä rikkonainen kallio-laatu, jonka lujituskustannukset ovat suurimmat /1/. Kalliolaatu määritetään yhden neliömetrin alalta kalliopinnasta tai yhden metrin pituudelta kairausnäytteestä tai edustavasta näytekappaleesta. Rakoilu määritetään laaja-alaisesta kallionosasta tai kairausreikää edus-tavasta sydännäytteestä /2/.

Taulukko 1. Kalliolaadun kuvaus rakennusgeologisen kallioluokituksen mukaisesti /3/.

Rakenteellinen kiinteys	Rakennetyyppi	Rakennetyyppi ja tihein rakoilu	Vallitsevien kivilaa-tujen kovuus/sitkeys
kiinteä kallio	massarakenteinen Ma	harvarakoinen Ma1 vähärakoinen Ma2 runsarakoinen Ma3	pehmeä, p hauras, h sitkeä, s kova, k
	liuskerakenteinen Li	harvarakoinen Li1 vähärakoinen Li2 runsarakoinen Li3	
	seosrakenteinen Se	harvarakoinen Se1 vähärakoinen Se2 runsarakoinen Se3	
löyhä kallio	löyhärakenteinen Lö	harvarakoinen Lö1 vähärakoinen Lö2 runsarakoinen Lö3	
	raparakenteinen Ra	kuvataan kiviladun perusteella niin laajasti kuin se on rapautumisaste huomioon ottaen mahdollista	
rikkonainen kallio	halkeamarakentei-nen RiI	tasomaiset raot jakavat kallion kahteen tai useam-paan erilliseen osaan	
	rakorakenteinen RiII	runsarakoinen	ei rakotäytettä
	murrosrakenteinen RiIII	tiheärakoinen	rakojen täytteisyyttä vähäistä
	ruhrakenteinen RiIV	runsa tai tiheärakoinen	raoissa saviäytettyä
	savirakenteinen RiV	-	runsaasti kalliösavea

RG-luokituksen mukaan kalliolaadusta luokitusominaisuudet ovat (taulukko 1):

- rakenteellinen kiinteys
- rakennetyyppi
- rakoilu
- kovuus ja sitkeys

2.2 NGI-luokitus ja Rock Mass Quality (Q-luku)

Norjan geoteknisessä instituutissa kehitetty Q-luku kuvaa kallion laatua tarvittavan lujituksen määräämistä varten. Sen arvot ovat välillä 0,001...1000, josta 1000 on paras. Luku lasketaan kaavasta /4/:

$$Q = RQD/J_n \times J_r/J_a \times J_w/SRF \quad (1)$$

jossa: RQD = rakoilua kuvaava luku ja vaihtelee välillä 10...100 %
 J_n = rakosuuntien lukumäärä (0,5...20)
 J_r = rakojen karkeusluku (1..4)
 J_a = rakojen muuttuneisuusluku (0,75...20)
 J_w = rakojen vesitekijä (0,05...1)
 SRF = jännitystilaluku (0,5...20)

Lujitustavan valitsemiseksi tarvitaan vielä kalliotilan mitat sekä käyttötarkoituksen perusteella määritettävä Excavation Support Ratio (ESR). Q-luvun ja ESR:n perusteella valitaan tarpeellinen lujitus taulukosta, joka on laadittu laskemalla Q- ja ESR-luvut useista kallio-tiloista. /4/

Luokituksen tekeminen on suuritöistä, sillä määritettäviä ominaisuuksia on useita ja niiden määrittäminen hankalaa. Tunneleissa ominaisuudet lujitusluku vaihtelevat jo lyhyehköin välimatkoin ja tutkimuksia tulisi tehdä niin paljon, että se ei ole taloudellisesti järkevää. Suurempiin kalliotiloihin, joista muutenkin tehdään lujuuslaskelmat, menetelmä soveltuu paremmin.

2.3 CSIR-luokitus ja Rock Mass Rating (RMR-luku)

CSIR-luokituksessa kalliolle lasketaan RMR-luku. Sen arvot ovat välillä 0...100, joista 100 on paras. Luku on alunperin Bieniawskin kehittämä ja Laubscher on siitä edelleen kehittänyt oman lukunsa. Käytössä on siis Bieniawski-RMR ja Laubscher-RMR. Kummassakin annetaan ominaisuuksille pisteitä ja näistä edelleen saadaan kalliotilan koosta ja käyttötarkoituksesta riippuva lujitussuositus.

CSIR-luokituksessa määritettävät ominaisuudet Bieniawskin mukaan ovat:

- ehjän kiven yksiakselinen puristusmurtolujuus tai pistekuormitusindeksi
- RQD-luku
- rakotiheys
- rakojen laatu
- pohjavesi

RMR-luku voidaan laskea Q-luvun perusteella kaavasta /5/:

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (2)$$

2.4 RG-luokituksen ja Q-luvun suhde

Q-luku voidaan laskea RG-luokille, kun arvioidaan kullekin ominaisuudelle ääriarvot, joiden välillä ne vaihtelevat. Luokitusten erilaisuudesta johtuen ominaisuudet saavat suuren vaihteluvälin. Tämän johdosta eri kalliolaatuluokat menevät osittain päällekkäin /7/.

RQD voidaan laskea usean rakosuunnan esiintyessä rakojen määrästä kuutiometriä kohti: /4/

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad (3)$$

jossa J_v = rakojen summa/m³.

Laskemalla rakojen määrät kuutiometriä kohti saadaan RG-luokituksen rakoiluille:

Tihein rakoilu	rakoa / m	rakoa/m ³	RQD (%)
harvarakoinen	< 1	1	100
vähärakoinen	1...3	1...9	85...100
runsarakoinen	3...10	3...30	15...100
tiheärakoinen	> 10	-	10...15

RQD-luvuksi saadaan rakojen määrästä kuutiometriä kohti Ma, Li, Se 1-2:lle väli 85...100, Ma, Li, Se 3 ja Ri I-II:lle väli 15...100 %. Ri III-V:n väli on 10...15 %, koska sen rakoilu on aina runsarakoista kalliota tiheämpää ja Q-luvun määritelmän mukaan sen pienin arvo on 10 %.

Rakoluvun J_n arvoiksi voidaan olettaa Ma, Li, Se 1-2:ssa olevan välillä 0,5...9, Ma, Li, Se 3:ssa välillä 2...9, Ri I-II:ssa 2...12, Ri III:ssa välillä 2...15 ja Ri IV-V:ssä J_n on 20.

Rakojen karkeusluku J_r voidaan olettaa vaihtelevan välillä 1...4 riippumatta kalliolaadusta.

Rakojen muuttuneisuuslukua J_a varten Ma, Li ja Se-kalliolaadut voidaan rakoilusta riippumatta arvioida olevan välillä 0,75...2, Ri I-II:n olevan 1, Ri III:n välillä 1...4 ja Ri IV-V välillä 3...12.

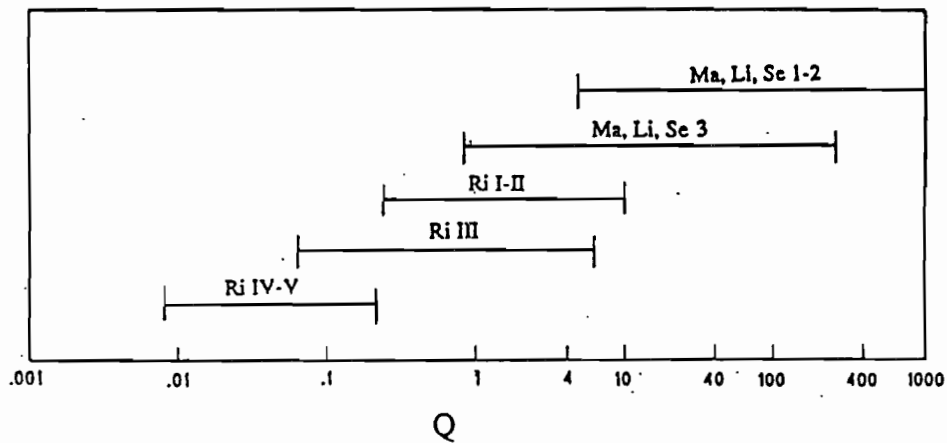
Rakojen vesitekijä J_w voidaan olettaa olevan poikkeuksetta 1, koska suurempien vuotomäärien esiintyessä aloitetaan injektointi ja se lopetetaan kun ollaan päästy J_w :n arvoa 1 pienempään vuotomäärään.

Jännitystilaluku SRF:stä oletetaan, että Ma, Li ja Se 1-3:ssä se on 1 ja Ri I-V:ssä se on 5.

Laskemalla Q-luku näillä arvoilla saadaan ääriarvoiksi:

Ma, Li, Se 1-2:	$Q = 4,7...1000$
Ma, Li, Se 3:	$Q = 0,83...265$
Ri I-II:	$Q = 0,25...10$
Ri III:	$Q = 0,03...6$
Ri IV-V:	$Q = 0,008...0,2$

Q-luvut menevät RG-luokissa osittain päällekkäin (kuva 1).



Kuva 1. Q-luuujen ja RG-luokkien vastaavuus RG-luokat menevät osittain päällekkäin.

3 LUJITUS- JA TIIVISTYSTARPEeseen VAIKUTTAVAT SEIKAT

Tunnelin suunnitteluajana pyritään louhinnasta aiheutuvat kustannukset saamaan mahdollisimman pieniksi. Eri seikkoja vertailemalla pyritään saamaan edullisin tunnelin linjaus, syvyysasema ja poikkileikkaus. Tutkimuskustannusten kalleudesta johtuen on useiden tekijöiden kohdalla tyydyttävä arvioon.

3.1 Kallion laatu

Vaikeimmin ennustettava tekijä lujitus- ja tiivistystarpeen arvioimisessa on kallion laatu. Sillä on kuitenkin keskeinen vaikutus louhintakustannuksiin. Huonossa kalliolaadussa louhintakustannukset voivat muodostua moninkertaisiksi /1/. Suunnitteluajana pyritään selvittämään alueet, joissa esiintyy:

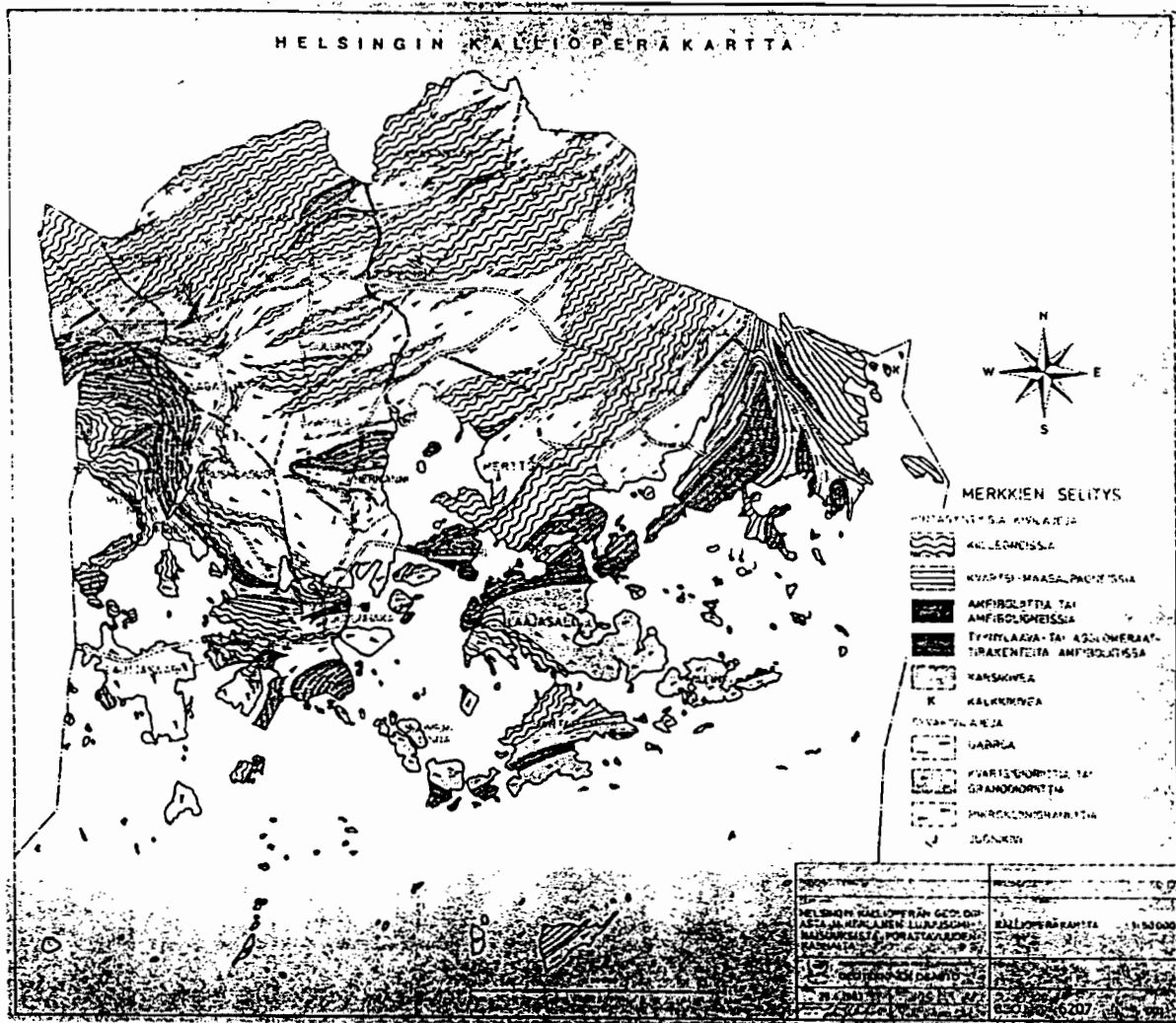
- rikkonaisuusvyöhykkeitä
- runsaasti rakoillutta kiveä (3-10 rako/cm)
- tunnelin suuntaan nähden suunnaltaan tai kaateeltaan epäedullista rakoilua

Helsingissä on taajan rakentamisen vuoksi tehty paljon pohjatutkimuksia, joiden tulokset on arkistoitu. Niistä selviää kalliopinnan korkeusasema. Kalliolaadusta saadaan tietoa kallio-paljastumista, kaivannoista sekä aikaisemmin rakennetuista maanalaisista tiloista. Lisäksi kallion laatua voidaan arvioida tekemällä porakonekairauksia, seismisiä- ja maatulka-luotauksia. Selvät ruhjevyyhykkeet voidaan tarvittaessa kalliönäyttekairata. Tutkimusten kalleudesta johtuen niitä ei kannata yleensä tehdä täydellisen kallioluokituksen tekemiseksi. Ruhje- ja muut rakentamista haittaavat vyyhykkeet on kuitenkin selvitettävä tarkoin ja linjausta on tarvittaessa muutettava.

Helsingin kallioperä koostuu taulukossa 2 esitetyistä kivilajeista. Niiden sijainti on esitetty kuvassa 2.

Taulukko 2. Eri kivilajien esiintymismäärät kartta-aloina Helsingin alueella /7/.

Pintasynnyiset kivilajit	Emäksiset ja intermediaariset vulkaniitit sekä amfiboliitit	15,0 %
	Happamat vulkaniitit ja kvartsi- maasälpagneissit	5,9 %
	Kiilleagneissit	34,1 %
	Kalkkikivet ja karret	0,1 %
	Yht.	55,1 %
Syväkivet	Gabrot ja dioriitit	1,0 %
	Kvartsi- ja granodioriitit	15,2 %
	Graniitit	28,7 %
	Yht.	44,9 %
Yhteensä		100,0 %



Kuva 2. Helsingin kallioperäkartta [7].

Helsingin alueelle on tyypillistä kivilajien suuntauksen alueelliset vaihtelut. Kaateet ovat yleensä pystyjä tai jyrkkiä. Pienpoimutusta esiintyy myös runsaasti /8/. Liuskeisuus on Helsingin kivilajeissa lähes pystyasentoista. Päärakosuunta riippuu lähes poikkeuksetta liuskeisuuden suunnasta. Ehjimpiä alueita ovat graniittiset lohkot, tiheimmin rakoilleita ovat liuskeiset ja hauraat gneissit, kuten esim. kvartsi-maasälpägneissit. Näiden rakotäyte voi olla kiinteän mineralisaation lisäksi ns. kalliosavea. Suurten kalliolohkojen siirroksissa (kuva 3) on syntynyt rakotihentymiä, murroksia ja ruhjeita. Näissä kivi on rikkoutunut ja ruhjoutunut sekä usein myös rapautunut löyhäksi kalliomateriaaliksi /7/. Kallioperä koostuu suurehkoista lohkoista, joissa muuttuneisuus on vähäistä. Niissä esiintyy harvaa rakoilua. Lohkoja erottaa toisistaan tiheämpirakoiset vyöhykkeet, joissa muuttuneisuus on voimakkaampaa, jopa Ri-V kalliolaatuun asti.

Viikinnmäen keskuspuhdistamon tutkimuksissa Q-luku vaihteli välillä 0,028...156. RMR-lukujen mediaani vaihteli välillä 61 - 80 ja äärimmäiset arvot olivat 30 - 87 /9/. NGI- ja CSIR-luokitusten mukaan kalliolaatu vaihtelee erittäin huonosta erittäin hyvään.



Kuva 3. Murrosvyöhykkeet Helsingin alueella /10/.

Sekä tiivistys- että lujitustarpeeseen kallion laatu vaikuttaa huomattavasti. Parhaimmissa kalliolaaduissa tarve on vähäinen. Rikkonaisessa kalliiossa vesivuodot ovat yleisiä ja lujitustöitä joudutaan suorittamaan louhinnan aikana. /11/

3.2 Geometriset tekijät

Geometrisillä tekijöillä tarkoitetaan tässä yhteydessä niitä kalliomekaanisia ja rakennusgeologisia tekijöitä, joilla on merkitystä lujituksen kannalta. Niitä ovat kallion osalta sen

rakenne, rakoilun tiheys ja suunnat, kallion jännitystila sekä kivilajin lujuusominaisuudet. Kalliotilan osalta niitä ovat tilan korkeus, jänneväli, kalliokaton paksuus sekä ympäristössä sijaitsevat kalliotilat.

Suunnittelija voi vaikuttaa tunnelin geometrisiin tekijöihin rakennuttajan antamien reuna-ehdojen puitteissa. Lujituskustannusten riippuvuus geometrisistä tekijöistä voi nousta suureksi.

Suunnitteluajana tiedetään tunnelin vähimmäismitat, joihin viemäritunnelin pohjalaatan tai yhteiskäyttötunnelin putkistojen on mahduttava. Urakoistija voi tehdä esityksen vaihtoehtoisesta poikkileikkausmuodosta kalustonsa ja työjärjestelyjensä takia. Tällöin voi poikkileikkausala ja samalla lujitustarve kasvaa, lujitusmäärät ainakin kasvavat pinta-alan myötä.

Ohut kalliokatto voi määrätyissä kalliolaaduissa estää luonnollisen holvin muodostumisen. Tämä voi aiheuttaa lujitustarpeen hyvässäkin kalliossa. Lujitustarvetta voi aiheuttaa myös paksusta maakerroksesta johtuva lisäkuorma.

Kuilujen, risteysten ja levennysten kohdalla tarvitaan suurempien jänneväliden johdosta raskaampi lujitus. Muiden tunneleiden läheisyydessä voidaan myös joutua lujittamaan normaalia enemmän, jotta ohut kallio kestäisi louhinnan.

Tunnelin poikkileikkaus ja kuiluille johtavien haarautumien sijainti ovat tekijöitä, joihin suunnittelija voi vaikuttaa eniten. Syvyysaseman ja linjauksen muuttamisessa joudutaan tekemään kompromissi aiheutuvien lisäkustannusten kesken. Kustannuksia aiheuttaa yhteiskäyttötunneleissa johtojen lisääntyvä pituus ja viemäritunneleissa mahdollisesti pumpaamiskorkeuden kasvu.

3.3 Tunnelin käyttötarkoitus

Viemäritunneleissa jälkeensä suoritettavat korjaustyöt ovat hankalia ja kalliita. Käytön aikana ne ovat erittäin hankalia suorittaa. Lujitusten on kestävä satoja vuosia. Rakotäyteen huuhtoutuminen voi ajan mittaan aiheuttaa eroosiota, joten ruiskubetonointi on syytä tehdä täytteisiin kohtiin. Vähäistä pienten kivien irtoamista voinnee kuitenkin sallia, jollei siitä aiheudu haittaa tunnelin käytölle /12/. Tunneliin tulevien vesivuotojen paikalla ei ole merkitystä, kunhan sallittu enimmäismäärä ei ylity.

Vesijohto-, kaukolämpö- ja yhteiskäyttötunneleissa lujitusten kuntoa voidaan jatkuvasti tarkkailla. Lujitusten kestoikää ei välttämättä tarvitse suunnitella viemäritunneleita vastaavaksi, sillä korjaustyöt ovat helpompia suorittaa käytön häiriintymättä. Johtoja huoltavan henkilökunnan työturvallisuuden ja mahdollisten johtovaurioiden takia lujitus on kuitenkin tehtävä huolellisesti. Vuotovedet on ohjattava pois laitteistojen kohdalta.

3.4 Ympäristö

Suunnitelmissa on varauduttava tunnelin lähelle tulevien perustus ym. kalliokaivantojen, putki- ja johtokanaalien, tunneleiden ja muiden kalliotilojen rakentamisesta aiheutuvaan louhintatarinaan /12/. Viemäritunnelit joudutaan lujittamaan ennakolta koko pituudeltaan niin, ettei lisälujitusta myöhemmin tarvita. Käyttöajana lujitustöitä ei voi suorittaa myrskyl-

listen kaasujen takia. Tunnelin käyttöä ei voi myöskään keskeyttää, sillä vaihtoehtoreittejä ei viemärivedelle ole. Yhteiskäyttötunneleitaakaan ei voida jälkeinpäin lujittaa käyttöä häiritsemättä. Mikäli tunnelilinjan kohdalle tuleva rakentaminen on tiedossa, joudutaan se ottamaan huomioon lujituksissa.

Pohjaveden alenemista ei voida yleensä sallia. Savikkoalueilla maanpinta voi vajota ja aiheuttaa perustusten kallistumista ja vajoamista. Paalujen kantokyky voi heiketä negatiivisen vaippahankauksen takia ja puupaalut voivat lahota. Lisäksi syynä ovat kasvillisuudelle ja kaivoille aiheutuvat haitat. /12,13/.

4 LUJITUS- JA TIIVISTYSTAPOJEN ARVIOINNIN PERUSTEET

Suunnitteluajana tarvitaan arvio lujitus- ja tiivistysmääristä kustannuslaskentaa varten. Lujitettavien ja tiivistettävien kohteiden sijainnin ja töiden suorittamisen määrää suunnittelija ja valvoja vasta työn aikana. Tällöin kallio-olosuhteet voidaan arvioida tarkemmin paikan päällä. Samalla päätetään myös töiden suoritusajankohta: tehdäänkö työ yksikköhinnaltaan kalliimpana louhintatyön aikana, vai halvempaan louhintatyön jälkeen.

4.1 Tunnusteluporaus ja injektointi

Määrien arviointi

Suunnitteluajana kalliosta ei yleensä ole tarpeeksi tietoa injektointitarpeen määrittämistä varten. Verrattuna injektoinnin yksikköhintoihin tutkimuskustannukset olisivat kohtuuttomat. Jos porakone- tai kallionäytekairauksia on tehty muista syistä, esimerkiksi heikkousvyöhykkeiden tutkimiseksi, rei'istä voidaan määrittää pohjaveden korkausasema ja kallion vedenjohtavuus /14/.

Injektointitarve arvioidaan seuraavien tekijöiden perusteella /15/:

- louhintatekniset syyt
- tunnelin käyttötarkoitus
- kallion stabiliteetti
- ympäristöriski

Suuremmat vesivuodot voivat haitata louhintaa ja jopa pysäyttää sen. Vuodot voivat vaikeuttaa myös lujitustöitä /14/.

Tunnelin käyttötarkoitus ratkaisee eräissä tapauksissa sallitun vuotovesimäärän. Viemäritunneleissa vuotovedet siirtyvät pumppaamojen kautta puhdistamolle, jolloin niistä aiheutuu sekä pumppaus- että käsittelykustannuksia. Tiivistystä tehdään yleensä siinä määrin, että vuotovesien määrä pysyy kohtuullisena. Yhteiskäyttötunneleissa tiivistetään suuret vuodot sen takia, ettei niistä aiheudu haittaa laitteistoille /14/.

Paineellisen veden tunneleissa on työnaikainen tilanne usein vaikein, koska käyttötilanteessa virtaavan veden paine vastaa yleensä pohjaveden painetta. Tunnelista ulospäin tapahtuvan virtauksen estämiseksi voidaan joutua injektointiin /14/.

Pohjaveden riskialueilla määritellään sallitut vuodot pohjavedenpinnan korkeushavaintojen sekä vuotovesimittaustulosten perusteella. Riskien suuruus vaikuttaa tarkastelutapaan. Jos kyseessä on Helsingin keskustan tapainen riskialue, jossa on merkittäviä rakennuksia puupaaluilla, ei pohjaveden työnaikaistakaan alenemista voida sallia. Riskien ollessa vähäisiä on Helsingissä eräillä savialueilla arvioitu sallittu vuotovesimäärä siten, että sitä on verrattu sadevedestä muodostuvan pohjaveden määrään. Jos vuoto on vähäinen muodostuvan pohjaveden määrään verrattuna, on katsottu, ettei vuodoista voi aiheutua merkittävää haittaa ympäristölle /15/.

Muualla on sallitulle vuotovesimäärälle käytetty moniluokkaisia standardeja. Tukholman

rakennusvirasto käyttää seuraavaa luokitusta /16/:

I	0-2	l/min/100 m
II	2-5	l/min/100 m
III	5-10	l/min/100 m
IV	>10	l/min/100 m

Naantali-Turku kaukolämpötunnelissa ympäristön pohjavesi- ja painumaselvitysten perusteella valitut luokat olivat /17/:

alle	3	l/min/100 m
	5	l/min/100 m
ja	10	l/min/100 m

Tunnelin stabiilitettä voi heikentää vuotovesien raoista huuhtoma kalliosavi, jolloin rakojen kitka ja koheesio vähenevät. Tämä voi johtaa sortumiin /15/. Rakotäytteen laadun selvittäminen ennen louhintaa on kuitenkin vaikeaa /14/.

Ympäristöriski vaihtelee alueittain. Helsingissä on kartoitettu pohjaveden riskialueita, joissa pohjaveden alentaminen voi johtaa perustusten heikkenemiseen, savialueiden painumiseen sekä kaivojen kuivumiseen. Näillä alueilla injektoinnin tarvetta arvioidaan sallittavan vuotovesimäärän perusteella. Tällöin on huomioitava vuodenaikasta, pohjasuhteista ja lähialueiden rakentamisesta johtuvat pohjaveden vaihtelut ja korvautuminen meri- tai sadevedellä /18/. Pohjavesiriskistä on tehtävä selvitys niillä alueilla, joita ei ole ennestään tutkittu. Esi- ja jälki-injektoinnin kokonaisedullisuutta verrattaessa vaikuttavat myös ympäristötekijät, sillä joskus voidaan sallia pohjaveden hyvin lyhytaikainen aleneminen. Tällöin tunneli jälki-injektoidaan mahdollisimman pian louhinnan jälkeen.

Urakka-asiakirjoja varten arvioidaan injektoinnin työvuoro-, poraus- ja massamenekit. Tämä tehdään määrittämällä injektointivien louhintakatkosten lukumäärä. Näiden perusteella arvioidaan injektointiin kuluvat työvuorot, joista edelleen porametrit ja sementtikilot. Työ- ja materiaalimenekkejä on julkaistu vähän. Naantali-Turku kaukolämpötunnelissa keskimääräiset menekit olivat:/17/

Esi-injektointi: 44,8 kg/porametri	76 kg/tunnelimetri
Jälki-injektointi:38,0 kg/porametri	64 kg/tunnelimetri

Helsingin metrotunneleissa esiintyneitä massamenekkejä oli seuraavasti:/19/

Suunnittelemaan esi-injektointi:	39 kg/porametri
Paikoittainen jälki-injektointi:	20 kg/porametri
Systemaattinen jälki-injektointi:	25 kg/porametri

Urakoitsijat, rakennuttajat ja suunnittelijat perustavat määräärvionsa aikaisemmista tunneleista saamiinsa kokemuksiin.

Tunnusteluporaus

Lähestyttäessä kohtaa jossa voidaan tarvita injektointia, on tehtävä päätös injektoinnin aloit-

tamisesta. Se voidaan aloittaa panostusrei'istä vuotavan veden määrän perusteella. Toinen tapa on suorittaa tunnusteluporaus. Reiässä tehdyn vesimenekikokeen tulokselle voidaan määrittää kriteeri, jonka perusteella injektointi aloitetaan.

Yleensä tunnusteluporaus aloitetaan lähestyttäessä ennakoitua ruhevyöhykettä tai tunnelin perästä vuotavan suurehkon vesimäärän perusteella. Pohjavesiriskialueilla tehdään tarvittaessa vesimenekikokeita injektointitarpeen arvioimiseksi. Suomessa on käytetty esi-injektointin aloituskriteerinä 1...3 Lugeonin vesimenekkiä /14/.

Tunnusteluporaus antaa myös viitteitä pultitus- ja ruiskubetonointitarpeesta, sillä se antaa kuvan kallion rikkonaisuudesta.

Esi- ja jälki-injektointi

Rakennusaikana injektointin tarvetta arvioidaan tunnusteluporaus- ja vesimenekikokeiden avulla. Tiivistysnormin ylittymistä arvioidaan vuotokohdista ja mittapadoista mitatun vuoto-vesimäärän perusteella /14/.

Esi-injektointi vaikuttaa ensisijaisesti louhintakustannuksiin, koska se keskeyttää louhinnan. Se yritetään korvata jälki-injektoinnilla, jolla ei kuitenkaan saavuteta yhtä hyvää tulosta, koska injektointimassa pyrkii purkautumaan rakoja pitkin tunneliin. Esi- ja jälki-injektointin edullisuutta on siis vertailtava tapauskohtaisesti keskenään /14/.

4.2 Pultitus

Määrien arviointi

Urakka-asiakirjoihin pultitusmäärät arvioidaan vanhojen tilastojen perusteella. Lisäksi käytetään vertailua vastaavanlaisiin tunneleihin ja kalliolaatuuihin.

Helsingissä tyypillisiä pultituksen tunnuslukuja on 0,06...0,39 pulttim./tunnelim., eli 0,025...0,16 kpl/tunnelim. (2,4 m:n pultit) /12/.

Risteyksiin, levennyksiin, kuilujen läheisyyteen, toisten tunneleiden ylityksiin ja alituksiin tehdään usein systeemipultitus ja määrät arvioidaan tapauskohtaisesti.

Mitoitus

Rakennusaikana pultituksen mitoitus, jossa määritetään pulttien tyyppi, paikat, pituudet ja paksuudet, tehdään paikan päällä. Kalliolaadun vaihdellessa tunnelin eri kohdissa on mitoitusperusteita muutettava olosuhteiden mukaan. Nykyään ei ole mitoittamista ohjaavaa säännöstöä, vaan erilaisia mitoitusperusteita on sovellettava tilanteen mukaan. Pientunneleissa mitoitus määritetään paikalla rakosuuntien ja -tiheyden perusteella. Erikoistapauksissa käytetään numeerisia menetelmiä.

Useimmissa pultitettavissa kohdissa riittää hajapultitus. Tarkkailemalla rakosuuntia, etsitään

ne lohkareet, jotka voivat irrota. Yksinkertaisin ja yleensä riittävä mitoitustapa on silmämääräisesti arvioida lohkareen paino, tukivoimat ja sen paikoillaan pitämiseen vaadittavien pulttien lukumäärä. /20/ Ei ole merkitystä lasketaanko pulttien lukumäärä vedolle vai leikkaukselle, sillä arvio lohkareen painosta ei ole riittävän tarkka. Kun pultit mitoitetaan lohkareen painon mukaisesti myötörajalle, voidaan olettaa, että varmuuskerroin koostuu kitkasta, koheesiosta ja mahdollisesta holvivaikutuksesta eikä niiden varmuuskertoimien suuruutta tarvitse erikseen arvioida. Tämän jälkeen valitaan edullisimmat pulttien suunnat. Yleensä käytetään vähintään kahta pulttia. Jos epäillään näiden riittävyyttä, tulee halvemmaksi lisätä kolmas pultti, kuin määrittää rakojen kitkakulma ja koheesio tarkemman mitoituksen tekemiseksi.

Pultit voidaan mitoittaa joko vetojännitykselle, leikkausjännitykselle, tai näiden yhdistelmälle. Yksi pultti (A 500 H, 20 mm, L=2400) on alemmalta myötörajaltaan 157 kN ja pitää siis vetojännityksen suunnassa paikoillaan 157 kN (n. 16 tonnin) painoisen kiven. Helsingin kivilajeissa tämän painoisen lohkareen tilavuus on noin kuusi kuutiometriä /7/. Leikkaukselle mitoitettaessa kantokyky on 0,8 kertaa vedolle mitoitettu kantokyky /21/. Valitsemalla pulttien suunnat siten, että pultteihin aiheutuu leikkausvoimia, saadaan lohkare täysin liikkumattomaksi.

Riittävä tartuntapituus tulee huomioida sekä ehjässä kalliossa että pultitettavassa lohkareessa. Ehjässä kalliossa on esitetty vähimmäispituudeksi 1..2 m /20/. Betoninormien BY 5 mukaan K35 juotoslaastin vähimmäistartuntapituus 20 mm:n pultille on 490 mm ja 25 mm:n pultille 615 mm. Kallio-olosuhteet voivat estää pulttien käytön, koska Ri-vyöhykkeissä pulteille on vaikea saada riittävää tarttumisvoimaa. Tällöin pultteja ei voida mitoittaa pelkästään vetojännitykselle, myös leikkausjännitys on oltava mukana.

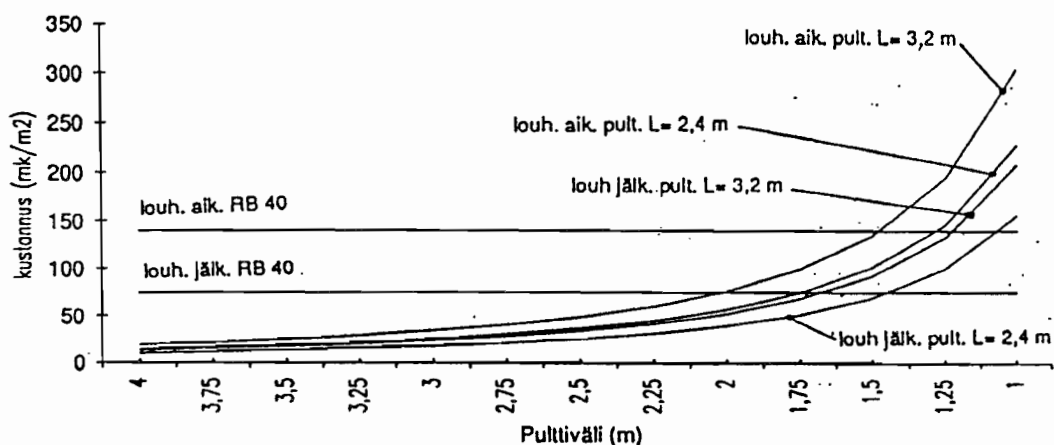
Jännitettyjä pultteja ja aluslevyjä voi tarpeen mukaan käyttää. Aluslevy siirtää yhdessä pultin kanssa esijännityskuorman lohkareesta kallioon /22/. Jännitys saa pultin kantamaan jo ennen juotosmassan kovettumista ja louhintaa voidaan jatkaa välittömästi. Myös muita välittömästi kantavia pulttityyppejä on käytössä.

Kalliokaton passiivisen systeemipultituksen pulttiväli voidaan laskea kaavasta: /23/

$$\gamma_k t s^2 = \frac{A_s f_{sk}}{\gamma} \quad (4)$$

jossa γ_k = kallion tilavuuspaino
 t = pultitettavan kalliokaton osapaksuus
 s = pulttiväli molemmissa suunnissa
 A_s = pultin poikkileikkausala
 f_{sk} = pultin alempi myötöraja
 γ = pultin vetolujuuden varmuuskerroin

Jos pultitus tehdään suurelle alalle riittävän tiheäksi, voi taloudellisempi vaihtoehto olla ruiskubetoni, jota useimmiten käytetään pienten kivien sitomiseksi. Kuvassa 4 on esitetty kahden eripituisen harjateräspultin kustannusten riippuvuutta pultitustiheydestä sekä ruiskubetonin neliöhinta.



Kuva 4. Kustannukset pulttitiheyden funktiona 20 mm pulteille A 400 H, L=2400 ja L=3200 sekä ruiskubetonille RB 40. Yksikköhinnat on muutettu pohjarakennuskustannusindeksi huomioiden vuoden 1984 hintatasosta 1990 tasoon /24/.

Mitoitusperiaatteena on siis käytettävä kulloinkin edullisinta menetelmää. Kokemus auttaa menetelmän valinnassa.

Pultituksen ajankohdan vaikutus

Kallio-olosuhteiden takia louhinta voidaan joutua keskeyttämään sortumavaaran takia, jolloin on ryhdyttävä välittömästi pultittamaan. Nykyisen urakkakäytännön mukaan vain juotettua harjateräspulttia pidetään käyttöiältään riittävänä lopulliseen pultitukseen. Jännittynä sen lujuusvaikutus alkaa välittömästi, hartsilla juotettuna lähes välittömästi. Muut käytetyt pulttityypit (Swelllex, Split-Set jne.) ovat pelkästään työaikaista lujuutta varten ja ne joudutaan korroosiovaaran vuoksi myöhemmin korvaamaan juotetulla harjateräspultilla. Louhintatyön jälkeen käytettävän pulttityypin valinnan määrää käyttöikä. Yleisimmin käytetään sementillä juotettuja harjateräspultteja.

4.3 Ruiskubetonointi

Määrien arviointi

Suunnitteluajana määrät arvioidaan urakka-asiakirjoja varten kalliotutkimusten ja vastaaviin kallio-olosuhteisiin tehtyjen tunneleiden perusteella.

Mitoitus

Ruiskubetonin numeerisia mitoitusmenetelmiä ei Suomen kivilaaduissa pystytä soveltamaan,

vaan mitoitus perustuu kokemukseen /25/. Taulukossa 3 on esitetty Suomessa käytettäviä ruiskubetonipaksuuksia eri kalliolaaduissa.

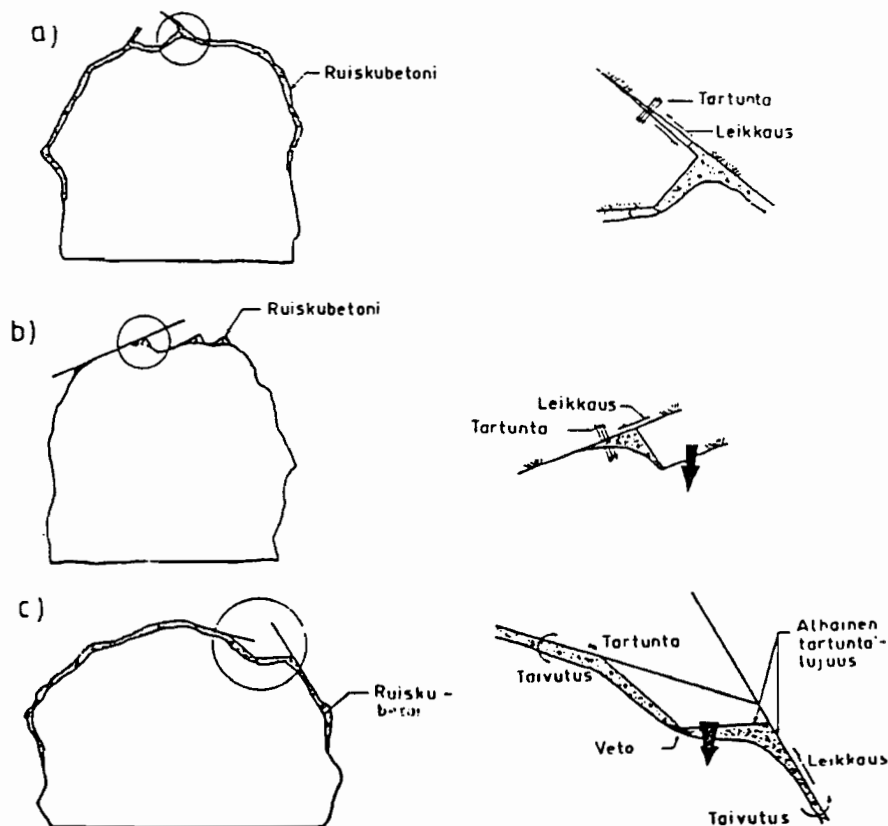
Taulukko 4. "Suomessa yleisesti käytettävät ruiskubetonin kerrospaksuudet. Kallion rikkonaisuusluokka on vahvasti suuntaa-antava ja yksittäistapauksissa esiintyy suurta vaihtelua." /25/

Tila	Kallion rakenne	Kerros- paksuus mm	Raudoi- tus	Huomautuksia
Tunnelit	Ri I-II	-	-	Rakojen ja halkeamien täyttö
	Ri II-III	30 - 40	-	Katossa tarvittaessa 60 - 70 mm ja verkko
	Ri III-IV	60 - 70	on	Raudoitusverkko
	Ri IV-V	70 - 150	on	Rikkonaisuusluokassa Ri V harjateräs
Väestönsuojat				
katto	-	60 - 70	on	Lujitus väestönsuojamääräysten mukaisesti
seinät	-	30 - 40	-	
Mut hallitilat				
katto	-	60 - 70	on	Lujitus yleensä väestönsuojamääräysten mukaisesti
seinät	-	30 - 40	-	

Ruiskubetonoinnin tarkoituksena on sitoa lohkat niin liikkumattomiksi, ettei raon leikkausjännityksen huippuarvo ylitä. "Ohuen ruiskubetonin lujittava vaikutus perustuu kolmeen seikkaan (kuva 5):

- ruiskubetoni jäykistää ja lujittaa kalliota täyttämällä avoimia rakoja ja halkeamia,
- ruiskubetonikerros siirtää kuormia ehjälle kalliolle tartunta ja leikkausjännitysten avulla,
- jatkuva ruiskubetonikerros toimii kuorena, joka ottaa vastaan taivutus- ja vetojännitykset silloin, kun ruiskubetonin ja kallion välinen tartunta on huono." /25/

Louhintatyön aikana ruiskubetonointi tehdään tavallisimmin työturvallisuuden takia. Samalla estetään heti louhinnan jälkeen syntyvä kalliomassan primaarisiirtymä. Välillisten kustannusten vähentämiseksi pyritään käyttämään pulttitusta.



Kuva 5. Ohuen ruiskubetonikerroksen lujittava vaikutus a) rakojen täyttyminen, b) kuormitusten siirtyminen, c) ruiskubetonin käyttäytyminen kuorena /25/.

Mitoitus voidaan suorittaa numeerisilla menetelmillä. Menetelmät on kuitenkin laadittu suurille ruiskutuspaksuuksille. Laskemalla saataisiin ylipaksuja kerroksia käytännön kokemuksiin verrattuna. Lisäksi tarvitaan yksityiskohtaiset tiedot jokaisesta lohkarresta. Pientunneleissa ei näin suuritoisen menetelmän käyttö ole kannattavaa.

Salaojat

Yhteiskäyttötunneleissa vuotovesi ohjataan salaojan avulla tunnelin lattiatasoon, jottei se tiheä ruiskubetonin läpi haitalliseen paikkaan /14/. Putkistoja ja laitteistoja sisältävissä tunneleissa vesi voi aiheuttaa korroosiovaaran. Viemäritunneleissa salaojitusta tarvitaan vuoto-vesien ohjaamiseen ruiskubetonoinnin sekä pohjalaatan valamisen aikana.

Täyttöruiskutus

Määrien arvioiminen urakka-asiakirjoihin on vaikeaa, koska kalliolaadusta ei ole riittävästi tietoa. Arvio tehdään aikaisempien kokemusten perusteella. Työn aikana on korvausta varten päätettävä johtuiko toteutunut ryöstö louhinnasta vai kalliolaadusta. Korvaus urakoitsijalle maksetaan vain kalliolaadun perusteella.

5 TIIVISTYSTÄ JA LUJITUKSIA KOSKEVAT TIEDOT HELSINGIN RAKENTAMISASIAKIRJOISSA JA TIETOJEN TALTIOINTI

Urakat ovat useimmiten kokonaishintaurakoita, joihin on sisällytetty arvioidut määrät lujitus- ja tiivistystöitä. Määrien ylityksestä urakoitsija saa korvauksen antamansa yksikköhintaluettelon perusteella. Päinvastaisessa tapauksessa urakoitsija joutuu hyvittämään tekemättömät työt. Käytännön tarkoituksena on urakoitsijalle aiheutavan lujitusmäärien muuttumisesta johtuvan riskin pienentäminen. Kun riskiä ei tarvitse sisällyttää urakkasummaan, saadaan kohtuuhintaisempia tarjouksia.

Louhintatyöselitys

Louhintatyöselitys on asiakirja, jossa ilmoitetaan miten työt tehdään. Tästä on poikkeuksena Helsingin kaupungin käytäntö, jossa suunnittelija ilmoittaa myös arvioimansa lujitus- ja tiivistysmäärät. Syynä käytäntöön on määrien helppo löytäminen työmaalla.

Esi-injektoinnissa tunnusteluporaus on yhdistetty injektointireikien poraukseen. Esi- ja jälki-injektoinnissa alle ja yli 8 m pitkät reiät ilmoitetaan erikseen. Yksikkönä käytetään porametriä. Sementtimäärät ilmoitetaan kilogrammoina. Työ ilmoitetaan vuoroina tai tunteina.

Louhinnan aikana ja jälkeen tehtävä pultitus ilmoitetaan erikseen. Pultin nimellishalkaisijat (20 mm, 25 mm) ilmoitetaan erikseen. Yksikkönä on pulttimetri.

Sekä louhintatyön aikana ja jälkeen tehtävien 20, 40 ja 70 mm:n verkotetun ruiskubetonin neliömäärät ilmoitetaan erikseen. Seinien ja katon määrät on yhdistetty.

Urakkaohjelma

Urakkaohjelma on sopimusasiakirja, jossa ilmoitetaan mitä tehdään, eli urakkaan kuuluvat työt. Asiakirjojen pätevyysjärjestyksessä se on työselityksen edellä. Urakkaohjelmassa rakennuttaja ilmoittaa samat määrät, jotka suunnittelija on arvioinut työselitykseen.

Maksu ja mittausperusteet

Urakka-asiakirjoissa tehtäväksi ilmoitettuja työmääriä voidaan joutua muuttamaan työn aikana. Sopimukset on laadittu siten, että muutoksista aiheutuvat kustannukset eivät aiheuta kohtuutonta taloudellista menetystä millekään osapuolelle.

Injektoinneista urakoitsija laatii pöytäkirjat, joiden perusteella lasketaan määrät. Tekemänsä lujitukset urakoitsija merkitsee seurantapiirustukseen. Pultitus lasketaan tehtyinä pulttimetreinä. Ruiskubetonimäärät lasketaan neliömetreinä teoreettisen poikkileikkauksen perusteella. Kallio-olosuhteista johtuvat ryöstöt mitataan ja lisääntyneet määrät korvataan urakoitsijalle.

Louhintatyön keskeyttävissä tiivistys- ja lujitustöissä käytetään korkeampia yksikköhintoja, jotka urakoitsija on antanut tarjouksessaan.

Rakennusgeologinen kartoitus

Tulevaisuudessa tehtäviä rakennushankkeita varten tarvitaan tietoja kallio-olosuhteista. Suomessa yleisesti käytössä oleva Rakennusgeologinen kallioluokitus antaa riittävät tiedot tunneleista. Geologi kartoittaa tunnelin tämän mukaisesti.

Lujitus- ja injektointikansiot

Työmaalla määrättyjen lujitusten kirjaamiseksi suunnittelija merkitsee sopimuspiirustuksiin määräämänsä lujituskohdat ja -määrät. Urakan valmistuttua kansio toimitetaan geotekniselle osastolle. Kansiota löytyy tarvittaessa lujitusten yksityiskohdat.

Seurantapiirustukset

Kallion laadusta ja tehdyistä töistä saa selkeimmän kuvan seurantapiirustuksista (liite 1). Niissä on samaan piirustukseen yhdistetty tärkeimmät tiedot kalliolaadusta, lujituksista, injektoinnista, salaojituksesta, vesivuodoista sekä louhintatyön etenemisestä. Nykyisen urakkasopimuskäytännön mukaan urakoitsija täydentää seurantapiirustukset suorittamillaan töillä. Suunnitteluorganisaatio täydentää ne kalliolaadun ja mittausten osalta. Seurantapiirustus laaditaan "Rakennusgeologisen kallioluokituksen soveltaminen" /3/ mukaisesti.

6 TIIVISTYS- JA LUJITUSMÄÄRÄT SEKÄ KALLIOLAADUT TARKASTEL- LUISSA TUNNELEISSA

Tässä työssä on valittu tarkastelukohteeksi poikkileikkausaltaan samankaltaisia tunneleita. Kalliolaatujen vaikutuksen selvittämiseksi on valittu erilaisissa kallio-olosuhteissa sijaitsevia tunneleita.

6.1 Tarkastelumenetelmä

Pääperiaatteena on ollut käyttää injektoinnin, pultituksen ja ruiskubetonoinnin menekeille (määrä/tunnelimetri) urakka-asiakirjojen mukaisia yksiköitä, jotta uusien hankkeiden määrät saadaan arvioitua kertomalla menekki tunnelin pituudella. Tunnelikohtaiset menekit on laskettu jakamalla koko määrä tunnelin pituudella. Kalliolaatukohtaiset menekit on laskettu vastaavasti luokassa käytetty määrä luokan pituudella. Prosenttiosuudet sekä tunneleiden että kalliolaatuluokkien pituuksista on laskettu vastaavalla tavalla.

Tunneliosuudet, joissa on voitu olettaa lujituksen johtuvan muista syistä kuin kalliolaadusta, on jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Tällaisia kohtia ovat suuaukot, kuilujen lähistöt sekä risteyskohdat. Myös muiden maanalaisten tilojen läheisyydessä olevat osuudet on jätetty tarkastelematta. Samasta tunnelista on valittu tarkasteltavaksi vain samaa yhtä poikkileikkaustyyppiä olevat osuudet.

Tietolähteet

Lähtötiedot on saatu pääosin seurantapiirustuksista. Niiden lisäksi on käytetty tarkepiirustuksia, lujituskansioita sekä injektointipöytäkirjoja. Toteutuneet poikkileikkaukset on saatu kaupunkimittaussastosta.

Kalliolaatuluokkien yhdistämisperusteet

Geologi on usein merkinnyt seurantapiirustukseen luokituksen vaihtelevan jollakin välillä, esim. Ma 3-4. Lisäksi eri tunnelit voivat olla kartoitetut eri tarkkuudella /26/, jolloin niitä ei voida verrata keskenään. Tästä aiheutuu tarve yhdistää luokkia laskentaa varten. Jos yhdistämistä tai tulkintaa ei tekisi, olisi luokkia lisättävä. Käyttöön tulisi luokat Ma 3, Ma 3-4, Ma 4 jne.

Jos seurantapiirustukseen on merkitty tunneliosuuden olevan kahden luokan yhdistelmä, esim. Ri II-III, on tämä tulkittu huonommaksi, eli Ri III:ksi. Tästä aiheutuu huonompien kalliolaatujen osuuden lisääntyminen.

Työmäärän vähentämiseksi kalliolaatuluokat on yhdistetty rakennetyypin ja rakoilun perusteella yhdeksäksi luokaksi. Massamaisen kalliolaadun luokat ovat Ma 1-2 ja 3, liuskeisen Li 1-2 ja 3 sekä seosrakenteisen luokat Se 1-2 ja 3. Rikkonaisen kalliolaadun luokat ovat Ri I-II, III ja IV-V.

Havaintoaineiston riittämättömyyden vuoksi voidaan luokkia yhdistää, jolloin hajonnat

pienenevät /27/. Yhdistämällä seitsemän luokkaa kolmeksi rakotiheyden ja rikkonaisuuden perusteella voidaan tutkia korrelaatiota samoilla tiedoilla, jotka tunneleista on suunnittelu-vaiheessa. Näin saadut kiinteän kallion rakotiheyteen perustuvat luokat ovat Ma, Li, Se 1-2 ja 3. Rikkonainen kalliolaatu on yhdistetty yhdeksi luokaksi Ri I-V.

Laskennan suorittaminen

Injektoinnin menekit on laskettu injektoinnin aloituskohdasta porauksen päättymiskohtaan saakka (yleensä 20 m). Jos kalliolaatu on vaihtunut injektoidulla tunneliosuudella, on määrät laskettu erikseen kullekin kalliolaatuosuudelle. Tällöin on varmuus ainoastaan injektointi-reikien porauksesta kussakin kalliolaadussa. Sen sijaan on mahdotonta päätellä sementin ja työvuorojen menekkejä injektoidulla osuudella.

Jälki-injektointi on laskettu yhden tunnelimetrimin matkalle porauspaikasta, jollei paaluväliä ole esitetty seurantapiirustuksessa. Vaikutusmatkaa on mahdoton arvioida, koska porauksen suuntaa ei ole esitetty seurantapiirustuksessa eikä injektointipöytäkirjoissa.

Pulttitettujen osuukien pituudet on laskettu seurantapiirustuksesta, joissa ne on esitetty rasteroituna. Menekki on laskettu seurantapiirustuksen puuttuessa tarkepiirustusten perusteella. Niissä yksittäisten pulttien paikat on ilmoitettu paalulukuna. Menekki on tällöin laskettu siten, että yhden pultin osuus tunnelin pituudesta on yksi metri ja menekki on pultti/metri, eli 2,4 tai 3,2 pulttim./tunnelim. riippuen pulttipituudesta. Seurantapiirustukseen ei ole erikseen merkitty katon ja seinien pultitusta, joten niitä ei ole käsitelty erikseen.

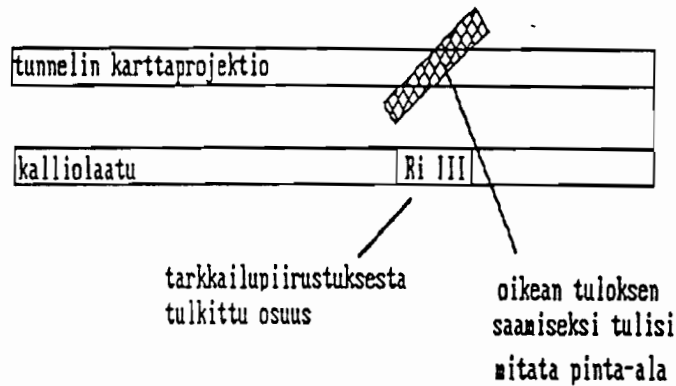
Ruiskubetonoinnin menekit on laskettu prosentteina tunnelin pinta-alasta. Pinta-alat on laskettu erikseen seinistä ja katosta. Koska urakka-asiakirjojen mukaan katon ruiskubetonointia jatketaan 40 cm kummallekin seinälle, on katon piiriin on lisätty 40 cm kummallekin puolelle. Seinistä vastaava osuus on vähennetty. Seinistä ja katosta on paikoitellen jätetty osia ruiskubetonimatta ruiskubetonoiduilla osuuksilla. Osien yhteinen pinta-ala on 10 % lasketusta ruiskubetonoinnin pinta-alasta ja myös se on vähennetty.

Tarkkuus

Kaikki laskelmat perustuvat paaluväleihin yhden metrin tarkkuudella. Määrät ja menekit on otettu seurantapiirustuksesta niissä olleella tarkkuudella.

Lähtötietojen tulkinta

Kalliolaadun selvittämiseksi kalliolaatuluokat on laskettu paaluväleittäin seurantapiirustuksesta. Jos paaluvälillä on kahta kalliolaatuluokkaa, joista toinen on viistosti tunnelin poikki kulkeva Ri-vyöhyke, on koko paaluväli luokiteltu huonommaksi (Kuva 6.), kuten seurantapiirustuksessakin on tehty. Tällä on tärkeä merkitys kalliolaatuluokan ja lujituksen korrelaation selvittämisen kannalta, sillä lujitustarpeen on aiheuttanut Ri-vyöhyke, eikä parempi kalliolaatu. Tulkinnasta aiheutuu huonompien kalliolaatuluokkien osuuden kasvu. Oikeaan tulokseen päästäisiin mittaamalla pinta-ala. Tämän laskennan lukuja ei tule yleistää kuvaamaan kallion todellista laatua.



Kuva 6. Kalliolaadun tulkinta kahden luokan osuessa samalle paaluvälille.

Analysointi

Kerätystä aineistosta on työläji kerrallaan laskettu keskiarvo ja keskihajonta. Keskihajonta ilmaisee kuinka paljon luvut keskimäärin poikkeavat keskiarvostaan. Jos hajonta on pientä, voidaan päätellä että keskiarvo on luotettava. Jos hajonta on suurta, voivat todelliset menekit ja osuudet poiketa keskiarvosta paljonkin suuntaan tai toiseen.

Virhelähteet ja niiden vaikutus

Suurimman virheen aiheuttaa viistosti tunnelin leikkaavien Ri-vyöhykkeiden tulkinta. Viistoja osuuksia on kuitenkin vähän verrattuna kohtisuoriin. Tunnelin kokonaispinta-alasta ja samoin kalliolaatuluokkien pinta-alasta virhe on yhden prosentin luokkaa. Osuuksien ja menekkien hajontoihin verrattuna virhe on merkityksetön.

Injektoinnissa sementti- ja työvuoromenekit on laskettu jakamalla määrät koko injektoidun osuuden pituudella. Jos kalliolaatu on vaihtunut tällä osuudella, voi menekki todellisuudessa olla eri kalliolaaduissa eri suuruinen. Virheiden vaikutus kuitenkin pienenee suuren otoksen johdosta. Lisäksi tunneleista johtuva hajonta on niin suuri, ettei injektointimenekkien virheellä ole merkitystä tässä työssä.

6.2 Kivikko-Malmi kaukolämpötunneli

6.2.1 Yleistiedot tunnelista

Tunneli on tehty kaukolämpöputkistojen johtamiseksi Lahdentien ali Kivikon ja Malmin välillä. Se kulkee luode-kaakko suunnassa Kehä I:n ja Lahden moottoritien ali. Tunneli on rakennettu vuonna 1990. Tunnelin pituus on 1065 m, josta on tarkasteltu 397 metriä. Tunneli alkaa Malmin ajotunnelista tasosta + 20. Ajotunneli on kaltevuudeltaan 1:8. Varsinainen tunneliosuus alkaa siirrinaseman jälkeen paalulta 180, jossa lattian taso on +0,5. Tunneli laskee kaltevuudella 1:8 tasoon -11 paalulle 275, josta se jatkuu ylöspäin yhden prosentin kaltevuudella paalulle 800 tasoon -5 Kivikon ajotunnelin päähän. Tunnelin leveys on 4,5 m,

korkeus 3,8 m, poikkileikkausala 17,0 m², seinäkorkeus 3,0 m ja kattoholvin piiri 5,7 m. Kalliokaton paksuus vaihtelee välillä 15 - 25 m. Ympäristö ei ole asettanut erityisvaatimuksia tunnelin tiivistämiselle eikä lujittamiselle. Tunnelin sijainti, pituus- ja poikkileikkaus on esitetty liitteessä 2.

6.2.2 Kallion laatu

Pääkivilaji on graniitti. Paalulta 300 eteenpäin esiintyy graniitin seassa myös pieniä määriä amfiboliittia ja kiillegneissejä. Massamainen kallio on rapautumatonta tai vähän rapautunutta (Rp 0-1). Päärakoilusuuntia on kaksi ja ne ovat tunneliin nähden 30-60 gonin kulmassa. Kaateet vaihtelevat kummassakin 70-100 gonia pystyn molemmin puolin. Tunneli lävistää suurempia heikkousvyöhykkeitä paaluväleillä 160-200, 240-280, 340-360 sekä paalulta 520 eteenpäin ainakin paalulle 577 asti, josta eteenpäin ei ole tietoa kartoituksen puuttumisen takia. Kallion laatuiluokkien osuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella on esitetty taulukossa 4 ja rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella taulukossa 5. Tunnelissa on heikkousvyöhykkeitä keskimääräistä enemmän.

Taulukko 4. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakennetyypin ja rakoilun perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma 1-2	60	15
Ma 3	173	44
Ri III	50	13
Ri IV-V	114	29
Yhteensä	397	100

Taulukko 5. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakotiheden ja rikkonaisuuden perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma, Li, Se 1-2	60	15
Ma, Li, Se 3	173	44
Ri I-V	164	41
Yhteensä	397	100

6.2.3 Tiivistys- ja lujitusmäärät

Tunnelista on tarkasteltu yhteensä 397 tunnelimetriä paaluvälillä 180-577. Tunnelia ei ole injektoitu tarkastelluilla osuuksilla. Pulttitusta on tehty 437 pulttimetriä ja ruiskubetonointia 1978 m².

Pulttitus

Työnaikaista pulttitusta ei ole tehty. Pulttitus on tehty hajapulttituksena, eikä mitään kohtaa ole erityisen tiheästi pulttitettu. Pultituksen osuus tunnelin pituudesta on 45 % ja menekki 1,10 pulttim./tunnelim. Pultituksen osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Pultituksen osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Pultitettu luokasta	Määrä	Osuus luokan pituudesta	Menekki
	tunnelim.	pulttim.	%	pulttim. / tunnelim.
Ma 1-2	2	14	3	0.23
Ma 3	68	124	39	0.72
Ri III	14	57	28	1.14
Ri IV-V	94	242	82	2.12
yht./ keskia.	178	437	45	1.10

Ruiskubetonointi

Työnaikaista ruiskubetonointia ei ole tehty. Lähes koko tunneli on ruiskubetonoitu 10...100 m:n pituisin osuuksin. Ruiskubetonoinnattomat osuudet vaihtelevat pituudeltaan välillä 10...70 m. Seinien ja katon yhteenlasketusta pinta-alasta on ruiskubetonoitu 62 %. Alasta on 40 mm:n ruiskubetonointia 48 % ja 70 mm:n verkolla vahvistettua 14 %. Ruiskubetonoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Louhintatyönjälkeisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa yhteensä				Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa				Osuus pinta- alasta	
	RB 40		RB 70+V		RB 40		RB 70+V		RB 40	RB 70 +V
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	%	%
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	m2	m2	%	%
Ma 1-2	10	0	0	0	59	0	0	0	12	0
Ma 3	122	41	2	8	714	89	12	17	58	2
Ri III	38	5	12	8	222	11	70	16	58	22
Ri IV-V	55	47	45	38	322	102	263	82	46	38
yht./ keskia.	225	93	59	54	1316	201	345	116	48	14

6.3 Roihuvuoren viemäritunneli

6.3.1 Yleistiedot tunnelista

Tunneli kuljettaa Roihuvuoren ja Herttoniemen jätevedet Sahaajankadun kokoojaviemäristä Strömsin pumppaamoon, josta ne edelleen johdetaan verkostoa pitkin Vuosaaren puhdistamoon. Tunneli alkaa Sahaajankadun suuaukosta, kulkee lännestä itään ja päättyy maanpinnan tasossa olevaan suuaukkoon, josta lähtee Strömsin pumppaamoon johtava viemäriputki. Tunneli on rakennettu vuosina 1984-85. Tunnelin pituus on 1,2 km. Tunneli alkaa tasosta -2 ja päättyy tasoon -4. Kaltevuus on 1,5 promillea. Tunnelin leveys on 3 m, korkeus 4,5 m, poikkileikkausala 12,0 m², seinäkorkeus 2,7 m ja katon piiri on 4,9 m. Tunneli ylittää Roihuvuoren vesijohtotunnelin paaluvälillä 210-220. Tämä osuus on systeemipultitettu. Hiekkasiilojen ajotunnelin risteysalue sijaitsee paaluvälillä 242-280. Vähäisen kalliokaton, 5 m, takia tunneli on tehty 2 m alempaan tasoon paaluvälillä 1000-1100. Kalliokaton paksuus

vaihtelee välillä 10-30 m. Ympäristö ei ole asettanut erityisvaatimuksia tunnelin tiivistämiselle eikä lujittamiselle. Tunnelin sijainti, pituus- ja poikkileikkaus on esitetty liitteessä 3.

6.3.2 Kallion laatu

Pääkivilaji on sarvivälke-kiillegneissi. Kivi on pääosin rapautumatonta (Rp 0-1). Rakoilun pääsuunta on paaluvälillä 0-700 120-140 gonia, kaateen ollessa 90-100 gonia. Paaluvälillä 700-1100 rakoilun suunta on 150-190 gonia ja kaade 80-100 gonia. Loppusuudella rakoilun suunta on 210-220 gonia, kaateen ollessa 90-100 gonia. Rakoilu on siis koko matkalla tunnelin suuntaan nähden 30-60 gonin kulmassa. Lisäksi tunnelissa esiintyy yleisesti loiva-vaaka-asentoista, savitäytteistä rakoilua /28/. Tunneli lävistää yhden suuremman, 25 m pitkän heikkousvyöhykkeen paalulla 800 ja yhdeksän pienempää, 5-10 m pituista. Kallion laatu-luokkien osuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella on esitetty taulukossa 8. Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella luokitellut osuudet on esitetty taulukossa 9. Liuserakenteinen kalliolaatu on vallitseva, rikkonaista kalliolaatua on yhdeksän prosenttia tunnelin pituudesta.

Taulukko 8. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakennetyypin ja rakoilun perusteella.

Kalliolaatu-luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma 1-2	8	1
Li 1-2	355	34
Li 3	436	42
Se 1-2	41	4
Se 3	115	11
Ri III	40	4
Ri IV-V	50	5
Yhteensä	1045	100

Taulukko 9. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakotiheyden ja rikkonaisuuden perusteella.

Kalliolaatu-luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma, Li, Se 1-2	404	39
Ma, Li, Se 3	551	53
Ri I-V	90	9
Yhteensä	1045	100

6.3.3 Tiivistys- ja lujitusmäärät

Tunnelista on tarkasteltu yhteensä 1045 tunnelimetriä paaluvälillä 0-1200. Injektointi- ja tunnustelureikien porausta on tehty 54 porametriä, sementtiä on käytetty 12700 kg ja työvuoroja 9. Pulttista on tehty 112 pulttimetriä ja ruiskubetonointia 3273 m³.

Tunnusteluporaus ja injektointi

Tunnusteluporaus on tehty urakka-asiakirjojen määräämälle paaluvälille. Porausta on tehty Ma 3 kalliolaatuun 4 porametriä, eli 0,009 porametriä tunnelimetriä kohti ja Se 3 kalliolaatuun 10 porametriä, eli 0,9 porametriä tunnelimetriä kohti. Tunnelia ei ole esi-injektoitu. Jälki-injektointia on tehty neljässä paikassa sekä kiinteässä että rikkonaisessa kalliolaadussa. Osuudet ovat niin lyhyitä ettei niiden vaikutusmatkaa voi päätellä. Siksi laskelmat on tehty

yhden metrin matkalle. Jälki-injektoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Jälki-injektoinnin osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa	Osuus luokan pituudesta	Tehty luokassa yhteensä			Menekki		
			poraus	massa	työ	poraus	massa	työ
	tunnelim.	%	poram.	kg	vuoroa	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.	vuoroa / tunnelim.
Li 1-2	1	0	8	1750	1.0	0.02	4.93	0.003
Li 3	1	0	16	5800	3.0	0.04	13.30	0.007
Ri III	2	5	8	1750	1.0	0.20	43.75	0.025
Ri IV-V	1	2	8	3400	4.0	0.16	68.00	0.080
yht./ keskia.	5	0	40	12700	9.0	0.04	12.15	0.009

Pultitus

Louhintatyönaikaista pultitusta ei tehty käsitellyillä tunneliosuuksilla. Louhintatyönjälkeinen pultitus on tehty paaluvälille 400-1000, eli lähes koko tunnelin pituudelle. Pultitus jakautuu tasaisesti koko tälle osuudelle. Pultituksen osuus tunnelin pituudesta on 5 % ja menekki 0,11 pulttim./tunnelim. Louhintatyön jälkeen tehdyn pultituksen osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Pultituksen osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Pultitettu luokasta	Määrä	Osuus luokan pituudesta	Menekki
	tunnelim.	pulttim.	%	pulttim. / tunnelim.
Li 1-2	39	68	11	0.19
Li 3	9	23	2	0.05
Ri III	6	21	15	0.53
yht./ keskia.	54	112	5	0.11

Ruiskubetonointi

Ruiskubetonoidut osuudet ovat jakaantuneet tasaisesti koko tunneliin. Niiden pituudet vaihtelevat välillä 2...90 m. Ruiskubetonoidut osuudet vaihtelevat pituudeltaan välillä 5...140 m. Seinien ja katon yhteenlasketusta pinta-alasta on ruiskubetonoitu 41 %. Alasta on louhintatyönaikaista 40 mm:n ruiskubetonointia 6 %, louhintatyönjälkeistä 40 mm:n ruiskubetonointia 28 % ja 70 mm:n verkolla vahvistettua 7 %. Louhintatyönaikaista 70 mm:n ruiskubetonointia ei ole tehty. Ruiskubetonoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 12 ja 13.

Taulukko 12. Louhintatyönaikaisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu-luokka	Tehty luokassa yhteensä		Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa		Osuus pinta-alasta
	katto	seinät	katto	seinät	
	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	%
Li 3	48	6	246	10	8
Ri III	19	10	97	18	41
Ri IV-V	7	0	36	0	10
yht./ keskia.	74	15	380	28	6

Taulukko 13. Louhintatyönjälkeisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu-luokka	Tehty luokassa yhteensä				Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa				Osuus pinta-alasta	
	RB 40		RB 70+V		RB 40		RB 70+V		RB 40	RB 70
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	%	+V
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	m2	m2	%	%
Li 1-2	78	27	2	22	400	50	10	42	18	2
Li 3	127	122	48	0	652	230	245	0	29	8
Se 3	71	25	0	0	364	47	0	0	51	0
Ri III	10	12	19	0	51	22	97	0	26	35
Ri IV-V	35	29	15	8	234	234	77	15	67	26
yht./ keskia.	321	214	84	30	1702	583	429	57	28	7

6.4 Munkkisaari-Mäntymäki viemäritunneli

6.4.1 Yleistiedot tunnelista

Tunneli johtaa käytöstä poistettavaan Munkkisaaren puhdistamoon johdetut vedet Mäntymäen pumppaamoon, josta ne edelleen johdetaan tunneliverkostoa pitkin Kyläsaaren puhdistamoon. Tunneli alkaa Munkkisaaren pystykuilusta, kulkee pohjoiseen päin keskustan ali ja päättyy Mäntymäen pumppaamoon. Tunneli on rakennettu vuosina 1990-1991. Tunnelin pituus on 3425 m. Kalliokaton paksuus vaihtelee välillä 15-45 m. Syvyysasema on Munkkisaarella -23 ja Mäntymäessä -29. Kaltevuus on 1,5 promillea. Tunnelin leveys on 3,0 m, korkeus 3,9 m, poikkileikkausala 10,0 m², seinäkorkeus 2,6 m ja kattoholvin piiri on 4,7 m. Tunneli on louhittu kiskokalustolla. Tunnelin sijainti on esitetty liitteessä 4 ja pituus- ja poikkileikkaus liitteessä 5.

Tunneli kulkee Helsingin keskustan alueella useiden maanalaisten tilojen lähellä. Lujituksiin nämä tilat ovat vaikuttaneet risteävän tilan ollessa enintään viiden metrin etäisyydellä tunnelista. Myös haarautumat on lujitettu muuta tunnelia raskaammin. Ensimmäinen tällainen kohta on Hietalahden tunnelin haara (plv 570-610) johon on pultitettu 7 kpl 5 m:n pituisia 20 mm:n harjateräspulttia. Kampin ajotunneli ja ratapiha (plv 1460-1490) on pultitettu 141 kpl:lla 2,4 m:n pituisella 20 mm:n harjateräspultilla. Metrotunnelin viemäritunneli alittaa neljän metrin kalliokaton paksuudella (plv 1610-1710) ja pultituksena on 36 kpl 12 m:n pituisia 25 mm:n pulttia sekä 22 kpl 6 m:n pituisia pulttia. Kaikki edellämainitut osuudet on myös ruiskubetonoitu.

Postitalon ja Eduskuntatalon lähistö (plv 1600 - 2100) on ydinkeskustan pohjaveden riskialuetta. Pohjaveden taso on lähellä 0-tasoa, siis noin 25 m tunnelia ylempänä.

6.4.2 Kallion laatu

Munkkisaaresta Bulevardille (plv 0-1000) pääkivilajeina on graniittia, amfiboliittia, pegmatiittia. Bulevardilta Oopperatalolle (plv 1000- 2900) pääkivilajeina on kiillegneissi ja graniitti. Oopperatalolta Mäntymäkeen (plv 2900-3425) pääkivilajeina on graniitti ja amfiboliitti. Rapautuneisuus on koko tunnelissa vähäistä (Rp 0-1). Rakoilu on Munkkisaaren ja Finlandiatalon välillä (plv 0-2150) pääosin pystyasentoista ja tunnelin suuntaan nähden 50-100 gonin kulmassa. Finlandiatalon ja Hesperiankatujen välillä (plv 2150-2500) rakoilun pääsuunta on tunnelin suuntaan nähden 0-50 gonin kulmassa. Kaateet ovat pystyjä, 75-100 gonia. Hesperiankatujen ja Mäntymäen välillä päärakoilusuuntia on kaksi: tunnelia vastaan lähes kohtisuora (75-100 gonia) on pystyasentoista ja lähes tunnelin suuntainen on kaateeltaan 65-90 gonia. Munkkisaaren ja Pohjoisen rautatiekadun välillä (plv 0-1780) ruhjevyöhykkeitä on harvassa ja niiden pituudet vaihtelevat kahdesta kymmeneen metriin. Pohjoisen rautatiekadun ja Hesperiankatujen välillä (plv 1780-2600) ruhjevyöhykkeitä on paljon, yli 50 % paaluvälin pituudesta. Pisin vyöhyke on 160 m pitkä. Hesperiankatujen ja Mäntymäen välillä (plv 2600-3425) ruhjevyöhykkeitä on harvassa ja niiden pituudet vaihtelevat välillä 7-45 m. Kallion laatuluokkien osuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella on esitetty taulukossa 14. Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella luokitellut osuudet on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 14. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakennetyypin ja rakoilun perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma 1-2	708	23
Ma 3	200	7
Li 1-2	186	6
Se 1-2	628	20
Se 3	589	19
Ri I-II	268	9
Ri III	477	16
Ri IV-V	16	1
Yhteensä	3072	100

Taulukko 15. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakotihedeyden ja rikkonaisuuden perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma, Li, Se 1-2	1522	50
Ma, Li, Se 3	789	26
Ri I-V	761	25
Yhteensä	3072	100

6.4.3 Tiivistys- ja lujitusmäärät

Tunnelista on tarkasteltu yhteensä 3072 tunnelimetriä paaluvälillä 0-3425. Injektointi- ja tunnustelureikien porausta on tehty 1271 porametriä, sementtiä on käytetty 56793 kg ja työvuoroja 46. Pulttusta ei ole tehty tarkastelluilla tunneliosuuksilla. Ruiskubetonointia on tehty 9288 m³.

Injektointi

Esi-injektointi on tehty pääosin ydinkeskustan alueelle (plv 1830-1880), joka on pohjaveden riskialuetta. Muualla osuuksien pituudet vaihtelivat välillä 8...40 m. Tunnelin pituudesta on injektoitu 5 %. Injektointien jakaantuminen kalliolaaduissa on esitetty taulukoissa 16 ja 17.

Taulukko 16. Esi-injektoinnin osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Esi-injektointi		Tehty luokassa yhteensä			Menekki		
	tehty luokassa	osuus luokan pituudesta	tunnust. ja esi-inj. poraus	massa	työ	poraus	massa	työ
	Tunnelim.	%	poram.	kg	vuorok.	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.	vuorok. / tunnelim.
Ma 1-2	36	5	303	14667	3.9	0.43	20.72	0.005
Li 1-2	14	8	68	478	0.7	0.37	2.57	0.004
Se 1-2	20	3	200	10080	14.0	0.32	16.05	0.022
Se 3	8	1	42	4534	3.0	0.07	7.70	0.005
Ri I-II	42	16	261	19287	14.5	0.97	71.97	0.054
Ri III	42	9	313	7627	6.5	0.66	15.99	0.014
yht./ keskia.	162	5	1187	56673	42.6	0.39	18.45	0.014

Taulukko 17. Jälki-injektoinnin osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa	Osuus luokan pituudesta	Tehty luokassa yhteensä			Menekki		
			poraus	massa	työ	poraus	massa	työ
	tunnelim.	%	poram.	kg	vuorok.	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.	vuorok. / tunnelim.
Li 1-2	1	1	19	33	1.0	0.10	0.18	0.005
Se 3	1	0	20	32	0.8	0.03	0.05	0.001
Ri III	5	1	45	55	1.0	0.09	0.12	0.002
yht./ keskia.	7	0	84	120	2.8	0.03	0.04	0.001

Pultitus

Kaikki pultitus on tehty risteävien tunneleiden kohdalle, kuiluihin ja haarautumiin.

Ruiskubetonointi

Työnaikaista ruiskubetonointia ei ole tehty. Työnjälkeistä ruiskubetonointia on tehty lähes koko tunnelin matkalla. Usean sadan metrin pituiset osuudet ovat yleisiä. Vähiten ruiskubetonoituja osuuksia olivat tunnelin alkupäässä paaluvälillä 0-250, jossa on vain 9 m:n pituinen osuus ruiskubetonoitu sekä paaluväli 1000-1440, jossa yhteensä 70 m on ruiskubetonoitu 2...25 m:n pituisin osuuksin. Seinien ja katon yhteenlasketusta pinta-alasta on ruiskubetonoitu 45 %. Alasta on 40 mm:n ruiskubetonointia on 41 % ja 70 mm:n verkolla

vahvistettua 4 %. Ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 18.

Taulukko 18. Louhintatyönjälkeisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa yhteensä				Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa				Osuus pinta- alasta	
	RB 40		RB 70+V		RB 40		RB 70+V		RB 40	RB 70
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät		+V
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	m2	m2	%	%
Ma 1-2	462	188	47	46	2287	338	233	82	55	7
Ma 3	200	107	0	0	990	192	0	0	88	0
Li 1-2	56	43	0	0	277	77	0	0	28	0
Se 1-2	60	42	0	0	297	75	0	0	9	0
Se 3	209	192	7	5	1035	346	35	9	35	1
Ri I-II	134	140	17	17	663	251	84	31	51	6
Ri III	216	341	37	43	1069	614	183	77	52	8
Ri IV-V	0	9	4	6	0	16	20	10	15	28
yht/ keskia.	1337	1060	112	116	6618	1908	554	208	41	4

6.5 Tali-Lassila viemäritunneli

6.5.1 Yleistiedot tunnelista

Tunneli kuljettaa Munkkiniemestä ja Pitäjänmäestä entiselle Talin puhdistamolle tulevat jätevedet Lassilan pumpppaamoon, josta ne edelleen johdetaan tunneliverkostoa pitkin Kyläsaaren puhdistamoon. Tunneli alkaa Talin puhdistamolta, kulkee Pitäjänmäen teollisuusalueen ali ja päättyy Lassilan pumpppaamokuilun alapäähän. Tunneli on rakennettu vuonna 1986. Tunneli on louhittu kiskokalustolla. Tunnelin pituus on 2545 m. Syvyysasema Talissa on -3,2 ja Lassilassa -6,1 ja kaltevuus on yksi promille. Tunnelin leveys on 2,5 m, korkeus 3,5 m, poikkileikkausala 7,0 m², seinäkorkeus 2,0 m ja katon piiri 3,8 m. Tunnelin suuaukko on lujitettu pultittamalla ja ruiskubetonilla. Alkupäässä (plv 160-210) on väestösuoja, jonka alitusta varten on tehty systeemipultitus. Talin urheilupuiston ali tunneli kulkee ohuimmillaan viiden metrin paksuisen kalliokaton alla, mutta osuutta ei ole lujitettu. HPY:n tulevaa rakennuskaivantoa varten on (plv 1003-1016) tehty verkolla vahvistettu 70 mm:n ruiskubetonointi. Tunnelin puolivälissä on Kernetinkujan ajotunneli, jonka alapäässä sijaitsee ratapiha (plv 1304-1410). Ratapihan katto on systeemipultitettu. Kalliokaton paksuus vaihtelee välillä 3...22 m. Vihdintien alituskohda (pl 2200) on pohjaveden riskialue. Tunnelin pituus- ja poikkileikkaus on esitetty liitteessä 6.

6.5.2 Kallion laatu

Pääkivilajina tunnelilinjalla on graniitti, josta osa on migmatiittista. Lisäksi esiintyy kiillegneissisiä ja amfiboliittia. Rapautuneisuus on vähäistä (Rp 0-1). Rakoilun pääsuunta on Talin päästä paalulle 600 tunneliin nähden kohtisuorassa. Paaluvälillä 600-950 esiintyy pääasiassa vaakarakoilua. Paalulta 950 Lassilan pumpppaamolle rakoilu on kohtisuorassa tunneliin nähden. Kaateet rakoilulla ovat 75-100 gonia. Paaluvälillä 0-450 on heikkousvyöhykkeitä, joiden paksuus vaihtelee välillä 2...25 m. Paaluvälillä 450-950 ei ole heikkousvyöhykkeitä. Loppuosuudella heikkousvyöhykkeiden pitoisuudet vaihtelevat välillä 2...10 m. Kallion laatu-

luokkien osuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella on esitetty taulukossa 19. Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella luokitellut osuudet on esitetty taulukossa 20.

Taulukko 19. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakennetyypin ja rakoilun perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma 1-2	213	10
Ma 3	15	1
Li 1-2	151	7
Li 3	56	3
Se 1-2	405	19
Se 3	731	34
Ri I-II	123	6
Ri III	228	10
Ri IV-V	251	12
Yhteensä	2173	100

Taulukko 20. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakotiheyden ja rikkonaisuuden perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma, Li, Se 1-2	769	35
Ma, Li, Se 3	802	37
Ri I-V	602	28
Yhteensä	2173	100

6.5.3 Tiivistys- ja lujitusmäärät

Tunnelista on tarkasteltu yhteensä 2173 tunnelimetriä paaluvälillä 0-2550. Tunnelissa ei tehty louhintaa keskeyttäviä lujitustöitä. Injektointi- ja tunnustelureikien porausta on tehty 2845 porametriä, sementtiä on käytetty 170068 kg ja työvuoroja 51. Pulttitusta on tehty 237 pulttimetriä. Ruiskubetonointia on tehty 3902 m³.

Injektointi

Tunnelin pituudesta on injektoitu 14 %. Pääosa injektoinnista on tehty paaluvälille 1480-1560 Pitäjänmäen teollisuusalueella sekä paaluvälillä 2150-2300, joka sijaitsee Vihdintien länsipuolisessa painanteessa. Jälkimmäinen kohta on pohjaveden riskialuetta. Tunnelia ei ole jälki-injektoitu. Esi-injektoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 21.

Pultitus

Pultitus on jakaantunut muutamien pulttien osuuksiin koko tunnelin pituudelle. Pultituksen osuus tunnelin pituudesta on 5 % ja menekki 0,11 pulttim./tunnelim. Pultituksen osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 22.

Ruiskubetonointi

Tunnelissa on ruiskubetonointia tehty pääosin kolmessa osuudessa. Paaluväli 0-450 on

Taulukko 21. Esi-injektoinnin osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Tunnust. poraus tehty luokassa	Esi-injektointi		Tehty luokassa yhteensä			Menekki		
		tehty luokassa	osuus luokan pituudesta	tunnust. ja esi-inj. poraus	massa	työ	poraus	massa	työ
		Tunnelim.	Tunnelim.	%	poram.	kg	vuoraa	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.
Li 3	0	22	39	188	7434	0.5	3.36	132.75	0.009
Se 3	0	124	17	1143	72060	15.4	1.56	98.58	0.021
Ri I-II	0	17	14	137	8515	0.5	1.11	69.23	0.004
Ri III	4	133	58	1218	67678	32.7	5.34	296.83	0.144
Ri IV-V	6	19	8	158	14381	2.2	0.63	57.29	0.009
yht./ keskia.	10	315	14	2845	170068	51.4	1.31	78.26	0.024

ruiskubetonoitu kolmella 50...130 m:n pituisella osuudella. Tällä osuudella on runsaasti heikkousvyöhykkeitä. Paaluvälillä 930-1200 on ruiskubetonoitu kolme 10...75 m:n pituista osuutta. Paaluvälillä 2100-2300 ruiskubetonointi on useissa 5...45 m:n pituisissa osuudessa. Seinien ja katon yhteenlasketusta pinta-alasta on ruiskubetonoitu 32 %. Alasta on 40 mm:n ruiskubetonointia 32 % ja 70 mm:n verkolla vahvistettua alle yksi prosentti.

Taulukko 22. Pultituksen osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Pultitettu luokasta	Määrä	Osuus luokan pituudesta	Menekki
	tunnelim.	pulttim.	%	pulttim. / tunnelim.
Ma 1-2	22	41	10	0.19
Ma 3	2	5	13	0.33
Li 1-2	9	11	6	0.07
Li 3	4	5	7	0.09
Se 1-2	15	36	4	0.09
Se 3	55	132	8	0.18
Ri III	4	7	2	0.03
yht./ keskia.	111	237	5	0.11

Taulukko 23. Louhintatyönjälkeisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa yhteensä				Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa				Osuus pinta- alasta	
	RB 40		RB 70+V		RB 40		RB 70+V		RB 40	RB 70
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	+V	
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	m2	m2	%	%
Ma 1-2	17	16	0	0	70	23	0	0	8	0
Ma 3	3	3	0	0	12	4	0	0	20	0
Li 1-2	59	16	0	0	242	23	0	0	32	0
Li 3	29	10	0	0	119	14	0	0	43	0
Se 1-2	12	26	0	3	49	37	0	4	4	0
Se 3	256	201	0	0	1048	289	0	0	33	0
Ri I-II	97	93	0	0	397	133	0	0	78	0
Ri III	113	63	0	1	463	90	0	1	44	0
Ri IV-V	160	159	0	0	655	228	0	0	64	0
yht./ keskia.	746	585	0	4	3055	842	0	5	32	0

6.6 Pihlajamäen viemäritunnelin siirto

6.6.1 Yleistiedot tunnelista

Tunneli on rakennettu korvaamaan Viikin puhdistamolle johtava Pihlajamäen viemäritunneli, joka kulki nykyisen keskuspuhdistamon kohdalta. Tunneli kiertää keskuspuhdistamon länsipuolelta. Tunneli on verhoamaton paineellinen jätevesitunneli. Sen kokonaispituus on 650 m. Tunneli on rakennettu vuonna 1988. Tunnelin sijainti on esitetty liitteessä . Tunneli alkaa tasosta + 4 ja päättyy tasoon -7. Kaltevuus vaihtelee välillä 0,1...14 %. Tunnelin leveys on 3,6 m, korkeus 4,5 m, poikkileikkausala 14,8 m², seinäkorkeus 2,9 m ja kattoholvin piiri on 5,9 m. Koska keskuspuhdistamon kalliotilat ja tunnelit sijaitsevat tunnelin läheisyydessä, paalun 332 jälkeen on suunnitelmapiiirustuksissa määrätty lujituksina ruiskubetonointia ja systeemipulttitusta. Tällä osuudella on myös suurempia jännevälejä. Tunnelin pituus- ja poikkileikkaus on esitetty liitteessä 8.

Viikinmäen keskuspuhdistamon louhintatyöt tehdään tunnelin läheisyydessä, joten lujitukset on mitoitettu kestämiään louhintatärinöitä.

6.6.2 Kallion laatu

Paaluvälillä 0-340 kallioperä koostuu pääasiassa graniitista, kiillegneissistä ja amfiboliitista. Kivi on rapautumatonta (Rp 0-1). Rakoilun pääsuunta on tunneliin nähden 33-66 gonia ja kaateet yli 70 gonia. Heikkousvyöhykkeitä tunneliosuudella on kaksi. Kumpikin on noin 10 metrin pituinen. Paalulta 190 eteenpäin esiintyy 60 metrin matkalla täytteistä rakoilua. Kallion laatuluokkien osuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella on esitetty taulukossa 24. Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella luokitellut osuudet on esitetty taulukossa 25.

6.6.3 Tiivistys- ja lujitusmäärät

Tunnelista on tarkasteltu yhteensä 282 tunnelimetriä paaluvälillä 35-331. Tunnustelureikien porausta on tehty 20 porametriä. Tarkasteltua tunneliosuutta ei ole injektoitu. Pulttitusta on tehty 163 pulttimetriä. Ruiskubetonointia on tehty 458 m².

Tunnusteluporaus

Tunnusteluporausta on tehty kalliolaatuluokassa Ma 1-2 yhteensä 20 porametriä neljän tunnelimetrimin matkalle. Menekki on viisi poram./tunnelim.

Pultitus

Louhintatyön aikana ei tehty pulttitusta tarkastelluilla tunneliosuuksilla. Louhintatyön jälkeen tehty pultitus on hajapulttitusta. Mitään kohtaa ole pulttitettu erityisen tiheästi. Pultittamattomia pitkiä osuuksia ei ole. Käytetty pulttipituus on yksinomaan 2,4 m. Pultituksen osuus tunnelin pituudesta on 19 % ja menekki 0,58 pulttim./tunnelim. Louhintatyön jälkeen tehdyn pultituksen osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty

taulukossa 26.

Taulukko 24. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakennetyypin ja rakoilun perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma 1-2	23	8
Se 1-2	123	44
Se 3	55	20
Ri III	20	7
Ri IV-V	61	22
Yhteensä	282	100

Taulukko 25. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakotiheden ja rikkonaisuuden perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma, Li, Se 1-2	146	52
Ma, Li, Se 3	55	20
Ri I-V	81	29
Yhteensä	282	100

Taulukko 26. Pultituksen osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Pultitettu luokasta	Määrä	Osuus luokan pituudesta	Menekki
	tunnelim.	pulttim.	%	pulttim. / tunnelim.
Se 1-2	17	55	14	0,45
Se 3	17	43	31	0,78
Ri III	2	5	10	0,25
Ri IV-V	18	60	30	0,98
yht./ keskia.	54	163	19	0,58

Taulukko 27. Louhintatyönjälkeisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa yhteensä				Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa				Osuus pinta- alasta	
	RB 40		RB 70+V		RB 40		RB 70+V		RB 40	RB 70 +V
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät		
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	m2	m2	%	%
Ma 1-2	0	0	2	2	0	0	11	4	0	9
Se 1-2	0	0	1	1	0	0	6	2	0	1
Se 3	2	1	0	0	11	2	0	0	3	0
Ri IV-V	52	35	9	9	290	65	50	17	78	15
yht./ keskia.	54	36	12	12	301	67	67	23	17	4

Ruiskubetonointi

Louhintatyön aikana ei ole tehty ruiskubetonointia tarkastellulla tunneliosuudella. Kaikki 70 mm:n verkotettu ruiskubetoni on tehty tunnelin alkupäässä Ri-vyöhykkeen kohdalle. Kaikki 40 mm:n ruiskubetoni on tehty paaluvälillä 278-332 olevaan täytteiseen vaakarakoiluun. Seinien ja katon yhteenlasketusta pinta-alasta on ruiskubetonoitu 21 %. Alasta on 40 mm:n ruiskubetonointia 17 % ja 70 mm:n verkolla vahvistettua 4 %. Louhintatyön jälkeen tehdyn ruiskubetonoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 27.

6.7 Puhdistettujen jätevesien poistotunneli

6.7.1 Yleistiedot tunnelista

Tunneli kuljettaa puhdistamoissa puhdistetun veden merelle. Siihen on liitetty Viikin, Kyläsaaren ja Munkkisaaren puhdistamot. Tyypiltään se on verhoamaton paineellinen vesitunneli. Tunneli alkaa Viikistä ja kulkee Hakaniemen torin ja Esplanadin kautta Munkkisaareen. Sen kokonaispituus on 16775 m. Munkkisaarella tunneli on jaettu kahteen erikseen tyhjennettävään osaan, meri- ja mannerosaan. Molemmat ovat kaltevia Munkkisaaren päin. Meriosa kulkee Pihlajasaaren ja Katajaluodon kautta etelään, jossa tunneli päättyy meren pohjaan johtavaan purkukuiluun. Syvyysasema on mannerosalla välillä -50...-80 m ja meriosalla välillä -70...-85 m. Kalliokaton paksuus vaihtelee välillä 14...45 m.

Louhintatyö oli jaettu neljään urakkaosuuteen. Viikin urakkaosuus (plv 0-2535) on rakennettu vuosina 1985-87, Kyläsaaren urakkaosuus (plv 2535-6500) vuosina 1985-86, Munkkisaaren urakkaosuus (plv 6500-11430) vuosina 1982-85 ja Tammakarin urakkaosuus (plv 11430-16775) vuosina 1982-84.

Tunnelin poikkileikkausala on Viikin urakkaosuudella 14,5 m² ja muilla urakkaosuuksilla 18 m². Viikin urakkaosuudella tunnelin leveys on 3,6 m, korkeus 4,5 m, seinäkorkeus 3,0 m ja katon piiri 4,5 m. Kyläsaaren ja Munkkisaaren urakkaosuuksilla tunnelin leveys on 4,1 m, korkeus 5,0 m, seinäkorkeus 2,5 m ja katon piiri 7,1 m. Tammakarin urakkaosuudella tunnelin leveys on 4,0 m, korkeus 4,5 m, katon piiri 5,3 m ja seinäkorkeus 3,5 m. Tunneli päättyy meren pohjaan johtavaan pystykuiluun, jonka takia poikkileikkaus muuttuu suuremmaksi paalulta 16750 lähtien. Tunnelin sijainti on esitetty liitteessä 9 ja pituus- ja poikkileikkaukset liitteessä 10.

Tunnelin tiivistykseen ovat vaikuttaneet sekä pohjavesiriskialueet, että meren alla ja läheisyydessä vuotovedet. Viikissä tiivistystarvetta ovat aiheuttaneet pohjavesikaivot. Varsinaiset pohjavesiriskialueet ovat: Hämeentien maasillan maastopainanne (plv 3000-3500), Aleksis Kivenkadun alkupään alue (pl 4500), Hakaniemen torin ympäristö (pl 6000), Metsätalon kohta (plv 6500-6700) sekä Esplanadin ympäristö (plv 7000-7500). Tunnelin loppupäässä on rakentamisen yhteydessä mitattu suuria vuotovesimääriä /29/. Munkkisaaren urakkaosuudella (plv 6500-11430) suurin vuoto oli 486 l/min/100 m. Tammakarin urakkaosuudella (plv 11430-16775) oli suurin mitattu vuoto 804 l/min/100 m.

Pitkä tunneli läpäisee kalliolaadultaan eri tyyppisiä vyöhykkeitä. Vyöhykekohtaisten menekkien selvittämiseksi tunneli on jaettu viiteen osaan:

Viikki - Hakaniemenranta (plv 0-6000)
Hakaniemenranta- Eteläesplanadi (plv 6000-7400)
Eteläesplanadi - Munkkisaari (plv 7400-8600)
Munkkisaari - Pihlajasaari (plv 8600-10700)
Pihlajasaari - Katajaluoto (plv 10700-16775)

6.7.2 Kallion laatu

Viikki - Hakaniemenranta (plv 0-6000)

Tunnelin alkupäässä paaluvälillä 0-700 kallioperä on graniittia ja kiillegneissia. Päärakoilu on vaaka-asentoista. Viikin ja Sörnäisen välillä (plv 700-4100) pääkivilajeina ovat graniitti, kiillegneissi ja amfiboliitti. Rakoilun pääsuunta on tunneliin nähden kohtisuoraa ja kaade on 60-90 gonia. Sörnäisen ja Aleksis Kivenkadun välillä (plv 4100-4500) pääkivilajeina on migmatiittinen graniitti ja mikrokliinigraniitti. Päärakoilu on lähes tunnelin suuntaista, kaateen ollessa 50-85 gon. Aleksis Kivenkadulta Hakaniementorille (plv 4500-6000) pääkivilajeina on migmatiittinen graniitti ja mikrokliinigraniitti. Rakoilun pääsuunta on tunneliin nähden kohtisuorassa ja kaade on 50-80 gonia. Rapautuminen on vähäistä sekä kiinteässä kalliassa (Rp 0-1) että heikkousvyöhykkeissä (Rp 0-2). Heikkousvyöhykkeitä esiintyy koko tunneliosuudella, erityisen tiheässä niitä ei ole missään kohtaa. Pituudeltaan ne vaihtelevat välillä 5...50 m. Kallion laatuluokkien osuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella on esitetty taulukossa 28. Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella luokitellut osuudet on esitetty taulukossa 29.

Taulukko 28. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakennetyypin ja rakoilun perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma 1-2	1210	21
Ma 3	98	2
Li 1-2	594	10
Li 3	109	2
Se 1-2	2312	39
Se 3	648	11
Ri I-II	109	2
Ri III	237	4
Ri IV-V	554	9
Yhteensä	5871	100

Taulukko 29. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakotihedden ja rikkonaisuuden perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma, Li, Se 1-2	4116	70
Ma, Li, Se 3	855	15
Ri I-V	900	15
Yhteensä	5871	100

Hakaniemenranta - Eteläesplanadi (plv 6000-7400)

Koko tunneliosuudella on pääkivilajeina graniitti, kiillegneissi ja kvartsidioriitti. Rakoilun pääsuunta on tunneliin nähden lähes kohtisuorassa ja kaade on 50-90 gonia. Rapautuminen on vähäistä (Rp 0-1). Heikkousvyöhykkeitä esiintyy koko tunneliosuudella ja ne ovat pituudeltaan 10...30 m. Huomattavin heikkousvyöhyke on Kluuvin ruhje (plv 7000-7214). Kallion laatuluokkien osuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella on esitetty taulukossa 30. Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella luokitellut osuudet on esitetty taulukossa 31.

Taulukko 30. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakennetyypin ja rakoilun perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma 3	42	4
Li 1-2	59	5
Li 3	3	0
Se 1-2	733	64
Se 3	9	1
Ri I-II	22	2
Ri III	70	6
Ri IV-V	207	18
Yhteensä	1145	100

Taulukko 31. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakotiheyden ja rikkonaisuuden perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma, Li, Se 1-2	792	69
Ma, Li, Se 3	54	5
Ri I-V	299	26
Yhteensä	1145	100

Eteläesplanadi - Munkkisaari (plv 7400-8600)

Kasarmitorin kohdalla (plv 7400-7500) pääkivilajit ovat graniitti, kiillegneissi sekä kvartsidioriitti. Päärakoilu on lähes kohtisuorassa tunnelia vastaan ja sen kaade on 50-90 gonia. Kasarmitorin ja Tehtaankadun puiston välillä (plv 7500-8350) pääkivilajeina on graniitti, kiillegneissi ja amfiboliitti. Rakoilun pääsuunta on viistosti (33-66 gon) tunnelin suuntaan nähden ja kaade 60-90 gon. Tehtaankadun puiston ja Tehtaankadun välillä (plv 8350-8600) kivilajina on migmatiittinen graniitti. Rakoilu on lähes kohtisuoraa ja kaade 70-90 gonia. Rapautuminen on koko tunneliosuudella vähäistä (Rp 0-2). Heikkousvyöhykkeitä esiintyy koko tunneliosuudella ja ne ovat pituudeltaan 15...40 m. Kallion laatuluokkien osuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella on esitetty taulukossa 32. Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella luokitellut osuudet on esitetty taulukossa 33.

Munkkisaari - Pihlajasaari (plv 8600-10700)

Tehtaankadulta meriosan alkupäähän (plv 8600-9400) pääkivilajeina on graniitti ja amfiboliitti. Päärakoilu on tunnelin suuntaista ja vaakarakoilua, kaade on välillä 60-90 gonia. Paaluvälillä 9400-10150 pääkivilajeina on graniitti ja amfiboliitti. Rakoilu on 33-66 gonia tunnelin suuntaan nähden ja kaade 60-90 gonia. Paaluvälillä 10150-10300 kivilajeina on graniitti ja kiillegneissi. Rakoilun pääsuunnat ovat kohtisuora, kaateeltaan 50-90 gonia sekä vaakarakoilu. Paaluvälillä 10300-10700 kivilajeina on graniitti, kiillegneissi ja granodioriitti.

Päärakoilusuunat ovat tunnelin suuntainen, kaateeltaan 65-90 gonia sekä vaakarakoilu. Rapautuminen on koko tunneliosuudella vähäistä (Rp 0-2). Heikkousvyöhykkeitä esiintyy koko tunneliosuudella ja niiden pituudet vaihtelevat välillä 5...80 m. Kallion laatuluokkien osuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella on esitetty taulukossa 34. Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella luokitellut osuudet on esitetty taulukossa 35.

Taulukko 32. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakennetyypin ja rakoilun perusteella.

Kalliolaatu-luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma 1-2	181	26
Ma 3	58	8
Se 1-2	272	38
Se 3	74	10
Ri I-II	31	4
Ri III	53	7
Ri IV-V	38	5
Yhteensä	707	100

Taulukko 33. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakotihyden ja rikkonaisuuden perusteella.

Kalliolaatu-luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma, Li, Se 1-2	453	64
Ma, Li, Se 3	132	19
Ri I-V	122	17
Yhteensä	707	100

Taulukko 34. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakennetyypin ja rakoilun perusteella.

Kalliolaatu-luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma 1-2	241	12
Ma 3	187	9
Se 1-2	419	20
Se 3	442	21
Ri I-II	251	12
Ri III	409	20
Ri IV-V	130	6
Yhteensä	2079	100

Taulukko 35. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakotihyden ja rikkonaisuuden perusteella.

Kalliolaatu-luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma, Li, Se 1-2	660	32
Ma, Li, Se 3	629	30
Ri I-V	790	38
Yhteensä	2079	100

Pihlajasaari - Katajaluoto (plv 10700-16775)

Koko osuudella pääkivilajeina on migmatiittinen graniitti ja migmatiittinen kiillegneissi. Päärakoiu on koko osuudella vinoa (33-66 gonia) tunneliin nähden kaateen ollessa 60-90 gonia. Rapautuminen on vähäistä (Rp 0-2). Heikkousvyöhykkeitä esiintyy koko tunneliosuudella ja ne ovat pituudeltaan 5...70 m. Kallion laatuluokkien osuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella on esitetty taulukossa 36. Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella luokitellut osuudet on esitetty taulukossa 37.

Taulukko 36. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakennetyypin ja rakoilun perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma 1-2	366	6
Ma 3	729	12
Li 1-2	93	2
Li 3	55	1
Se 1-2	1991	33
Se 3	1958	33
Ri I-II	92	2
Ri III	425	7
Ri IV-V	276	5
Yhteensä	5985	100

Taulukko 37. Tunnelin kalliolaatuluokat yhdistettynä rakotiheyden ja rikkonaisuuden perusteella.

Kalliolaatu- luokka	Tunnelissa yhteensä	Osuus tunnelin pituudesta
	tunnelim.	%
Ma, Li, Se 1-2	2450	41
Ma, Li, Se 3	2742	46
Ri I-V	793	13
Yhteensä	5985	100

6.7.3 Tiivistys- ja lujitusmäärät osuudella Viikki-Hakaniemenranta (plv 0-6000)

Tunnelista on tarkasteltu yhteensä 5871 tunnelimetriä paaluvälillä 0-6000. Injektointi- ja tunnustelureikien porausta on tehty 2410 porametriä, sementtiä on käytetty 57851 kg ja työvuoroja 28. Pulttusta on tehty 1785 pulttimetriä. Ruiskubetonointia on tehty 11807 m³.

Injektointi

Tunnelin pituudesta on injektoitu 4 %. Tunnusteluporausta on tehty Viikissä (pl 380) 15 m:n matkalle, mutta osuutta ei ole injektoitu. Esi-injektointia on tehty Intiankadun kohdalla (plv 2390-2470). Hämeentien maasillan kohdalla olevassa pohjaveden riskialueessa on injektoitu noin 10 m:n pituisin osuuksin paaluilla 3210-3270, 3280 ja 3400. Sörnäisissä on injektoitu 40 m:n pituista osuutta paalulla 4700 ja 50 m:n pituista osuutta paalulla 4900. Hakaniementorin pohjaveden riskialueella on injektoitu 33 m:n osuus paalulla 5950. Jälki-injektoinnin työvuorojen määrää ei ole ilmoitettu seurantapiirustuksessa. Esi-injektoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 38 ja jälki-injektoinnin osuudet ja menekit taulukossa 39.

Pultitus

Louhintatyön aikana on pultitettu heikkousvyöhykkeitä ruiskubetonoinnin yhteydessä. Muulla tunneliosuudella työnaikaista pulttusta on tehty vähän. Louhintatyön jälkeinen pultitus on tehty hajapultituksena. Pultituksen osuus tunnelin pituudesta on 11 % ja menekki 0,30 pulttim./tunnelim. Erityisiä osuuksia ei ole. Pultituksen osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 40.

Ruiskubetonointi

Louhintatyön aikana on ruiskubetonoitu 6...30 m:n pituisia osuuksia. Louhintatyön jälkeen on ruiskubetonoitu 5...50 m:n osuuksia. Eniten ruiskubetonoitu kohta on Intiankadun lähellä (plv 2530-2750), jossa on 220 m pitkä yhtenäinen ruiskubetonoitu osuus. Seinien ja katon yhteenlasketusta pinta-alasta on ruiskubetonoitu 22 %. Alasta on 40 mm:n ruiskubetonointia 21 % ja 70 mm:n verkolla vahvistettua 1 %. Ruiskubetonoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukoissa 41 ja 42. Pinta-alan laskemisessa on huomioitu poikkileikkauksen muuttuminen paalulla 2535.

Taulukko 38. Esi-injektoinnin osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu-luokka	Tunnust. poraus tehty luokassa	Esi-injektointi		Tehty luokassa yhteensä			Menekki		
		tehty luokassa	osuus luokan pituudesta	tunnust. ja esi-inj. poraus	massa	työ	poraus	massa	työ
	Tunnelim.	Tunnelim.	%	poram.	kg	vuoroa	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.	vuoroa / tunnelim.
Ma 1-2	0	53	4	472	16138	8.1	0.39	13.34	0.007
Li 1-2	0	13	2	81	3849	3.5	0.14	6.48	0.006
Se 1-2	11	71	3	709	14748	10.0	0.31	6.38	0.004
Se 3	38	0	0	352	0	0.0	0.54	0.00	0.000
Ri III	12	21	9	309	5512	4.1	1.30	23.26	0.017
Ri IV-V	8	18	3	243	6154	2.2	0.44	11.11	0.004
yht/ keskia.	69	176	3	2166	46401	27.8	0.37	7.90	0.005

Taulukko 39. Jälki-injektoinnin osuus kalliolaatuluokasta sekä siinä esiintynyt menekki.

Kalliolaatu-luokka	Tehty luokassa	Osuus luokan pituudesta	Tehty luokassa yhteensä			Menekki		
			poraus	massa	työ	poraus	massa	työ
	tunnelim.	%	poram.	kg	vuoroa	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.	vuoroa / tunnelim.
Ri III	34	14	244	11450	0.0	1.03	48.31	0.000

Taulukko 40. Pultituksen osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu-luokka	Pultitettu luokasta			Määrä			Osuus luokan pituudesta		Menekki	
	työnaik.	työnjälk.	yht.	työnaik.	työnjälk.	yht.	työnaik.	työnjälk.	työnaik.	työnjälk.
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	pulttim.	pulttim.	pulttim.	%	%	pulttim. / tunnelim.	pulttim. / tunnelim.
Ma 1-2	6	152	158	71	259	330	0	13	0,06	0,21
Ma 3	0	14	14	0	45	45	0	14	0,00	0,46
Li 1-2	0	39	39	0	72	72	0	7	0,00	0,12
Se 1-2	13	186	199	154	389	543	1	8	0,07	0,17
Se 3	7	49	56	83	106	189	1	8	0,13	0,16
Ri I-II	0	18	18	0	36	36	0	17	0,00	0,33
Ri III	0	53	53	0	280	280	0	22	0,00	1,18
Ri IV-V	8	55	63	175	115	290	1	10	0,32	0,21
yht./ keskia.	34	566	600	483	1302	1785	1	10	0,08	0,22

Taulukko 41. Louhintatyönaikaisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa yhteensä				Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa				Osuus pinta- alasta	
	RB 40		RB 70+V		RB 40		RB 70+V		RB 40	RB 70
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät		+V
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	m2	m2	%	%
Ma 1-2	10	19	1	2	71	35	6	4	1	0
Se 1-2	28	36	0	0	192	69	0	0	1	0
Se 3	25	22	0	0	142	51	0	0	4	0
Ri III	43	44	0	0	303	83	0	0	17	0
Ri IV-V	70	70	30	27	485	135	170	63	13	5
yht./ keskia.	176	189	31	29	1192	373	176	67	3	0

Taulukko 42. Louhintatyönjälkeisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa yhteensä				Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa				Osuus pinta- alasta	
	RB 40		RB 70+V		RB 40		RB 70+V		RB 40	RB 70
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät		+V
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	m2	m2	%	%
Ma 1-2	51	49	0	0	345	97	0	0	4	0
Ma 3	44	44	0	0	313	83	0	0	45	0
Li 1-2	12	17	0	0	68	35	0	0	2	0
Li 3	48	49	0	0	341	92	0	0	45	0
Se 1-2	258	248	18	18	1682	512	114	38	11	1
Se 3	223	209	7	4	1420	441	39	8	34	1
Ri I-II	58	53	18	14	365	112	111	29	51	15
Ri III	118	108	9	9	725	235	58	19	43	3
Ri IV-V	278	277	39	30	1808	610	233	68	51	6
yht./ keskia.	1090	1054	91	74	7067	2217	553	162	18	1

6.7.4 Tiivistys- ja lujitusmäärät osuudella Hakaniemenranta-Eteläesplanadi (plv 6000-7400)

Tunnelista on tarkasteltu yhteensä 1145 tunnelimetriä paaluvälillä 6000-7400. Injektointi- ja tunnustelureikien porausta on tehty 2465 porametriä, sementtiä on käytetty 57030 kg ja työvuoroja 34. Pulttitusta on tehty 344 pulttimetriä. Ruiskubetonointia on tehty 3561 m².

Injektointi

Tunnelin pituudesta on injektointia 11 %. Pohjaveden riskialueella Metsätalon kohdalla (plv 6600-6800) on tehty tunnusteluporausta, muttei injektointia. Pitkäsillan kohdalla (pl 6150, 6230) on injektointia kahta 12 m ja 20 m pitkää osuutta. Pisin injektointi osuus on Aleksanterinkadun ja Eteläesplanadin välillä (plv 7000-7214) sijaitseva Kluuvien ruuhje. Esi-injektointin osuudet ja menokit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 43 ja jälki-injektointin osuudet ja menokit taulukossa 44.

Taulukko 43. Esi-injektoinnin osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Tunnust. poraus tehty luokassa Tunnelim.	Esi-injektointi		Tehty luokassa yhteensä			Menekki		
		tehty luokassa Tunnelim.	osuus luokan pituudesta %	tunnust. ja esi-inj. poraus poram.	massa kg	työ vuoraa	poraus poram. / tunnelim.	massa kg / tunnelim.	työ vuoraa / tunnelim.
Se 1-2	20	17	2	256	12583	6.2	0.35	17.17	0.008
Ri I-II	0	5	23	48	6600	2.7	2.18	300.00	0.120
Ri III	22	13	19	239	15068	6.1	3.42	215.25	0.088
Ri IV-V	86	51	25	1097	13968	7.7	5.30	67.48	0.037
yht./ keskia.	128	86	8	1640	48219	22.6	1.43	42.11	0.020

Taulukko 44. Jälki-injektoinnin osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa tunnelim.	Osuus luokan pituudesta %	Tehty luokassa yhteensä			Menekki		
			poraus poram.	massa kg	työ vuoraa	poraus poram. / tunnelim.	massa kg / tunnelim.	työ vuoraa / tunnelim.
Ri III	5	7	125	1335	1.7	1.79	19.07	0.024
Ri IV-V	28	14	700	7476	9.3	3.38	36.12	0.045
yht./ keskia.	33	3	825	8811	11.0	0.72	7.70	0.010

Pultitus

Louhintatyönjälkeinen pultitus on hajapultitusta, eikä erityisen tiheästi pultitettuja osuuksia ole. Pultituksen osuus tunnelin pituudesta on 15 % ja menekki 0,30 pulttim./tunnelim. Pultituksen osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 45.

Taulukko 45. Pultituksen osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Pultitettu luokasta			Määrä			Osuus luokan pituudesta		Menekki	
	työnaik.	työnjälk.	yht.	työnaik.	työnjälk.	yht.	työnaik.	työnjälk.	työnaik.	työnjälk.
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	pulttim.	pulttim.	pulttim.	%	%	pulttim./ tunnelim.	pulttim./ tunnelim.
LI 1-2	0	16	16	0	8	8	0	27	0,00	0,13
Se 1-2	0	99	99	0	166	166	0	14	0,00	0,23
Ri I-II	0	8	8	0	19	19	0	36	0,00	0,86
Ri III	0	31	31	0	108	108	0	44	0,00	1,55
Ri IV-V	6	2	8	38	5	43	3	1	0,19	0,02
yht./ keskia.	6	156	162	38	306	344	1	14	0,03	0,27

Ruiskubetonointi

Louhintatyön aikana on ruiskubetonoitu heikkousvyöhykettä Metsätalon kohdalla (plv 6830-6870). Kluuvien ruhje (plv 7000-7214) on ruiskubetonoitu sekä louhintatyön aikana että

jälkeen. Fabianinkadun kohdalla (pl 7320) on työn aikana ruiskubetonoitu neljän metrin pituinen osuus heikkousvyöhykkeen (Ri IV-V) kohdalla. Louhintatyönjälkeistä ruiskubetonointia on tehty koko tunneliosuudella 2...200 m:n pituisin osuuksin. Seinien ja katon yhteenlasketusta pinta-alasta on ruiskubetonoitu 34 %. Alasta on 40 mm:n ruiskubetonointia 15 % ja 70 mm:n verkolla vahvistettua 19 %. Ruiskubetonoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukoissa 46 ja 47.

Taulukko 46. Louhintatyönaikaisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa yhteensä				Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa				Osuus pinta- alasta	
	RB 40		RB 70+V		RB 40		RB 70+V		RB 40	RB 70
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät		+V
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	m2	m2	%	%
Se 1-2	0	0	3	3	0	0	21	6	0	0
Se 3	3	2	0	2	21	3	0	3	30	4
Ri III	0	17	24	7	0	32	171	13	5	29
Ri IV-V	15	28	93	101	107	53	661	190	9	46
yht./ keskia.	18	47	120	112	128	88	853	212	2	10

Taulukko 47. Louhintatyönjälkeisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa yhteensä				Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa				Osuus pinta- alasta	
	RB 40		RB 70+V		RB 40		RB 70+V		RB 40	RB 70
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät		+V
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	m2	m2	%	%
Ma 3	42	19	0	0	299	36	0	0	89	0
Li 1-2	0	0	15	16	0	0	107	29	0	26
Li 3	2	2	0	0	14	4	0	0	67	0
Se 1-2	60	45	19	19	427	84	135	35	8	3
Se 3	6	3	0	0	43	6	0	0	60	0
Ri I-II	20	17	2	2	142	31	14	4	88	9
Ri III	8	2	26	26	57	3	185	49	9	37
Ri IV-V	24	7	44	43	171	12	313	81	10	21
yht./ keskia.	162	93	106	105	1152	176	754	198	13	9

6.7.5 Tiivistys- ja lujitusmäärät osuudella Eteläesplanadi-Munkkisaari (plv 7400-8600)

Tunnelista on tarkasteltu yhteensä 707 tunnelimetriä paaluvälillä 7400-8600. Injektointi- ja tunnustelureikien porausta on tehty 29 porametriä, sementtiä on käytetty 3098 kg ja työvuoroja 2. Pultitusta on tehty 341 pulttimetriä. Ruiskubetonointia on tehty 686 m².

Injektointi

Tunnelin pituudesta on injektoitu 1 %. Esi-injektointi on tehty kuuden metrin matkalle Kankurinkadun kohdalla (pl 8269). Esi-injektoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on

esitetty taulukossa 48. Tunnelia ei ole jälki-injektoitu.

Taulukko 48. Esi-injektoinnin osuus kalliolaatuluokasta sekä siinä esiintynyt menekki.

Kalliolaatu- luokka	Esi-injektointi		Tehty luokassa yhteensä			Menekki		
	tehty luokassa	osuus luokan pituudesta	tunnust. ja esi-inj. poraus	massa	työ	poraus	massa	työ
	Tunnelim.	%	poram.	kg	vuoraa	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.	vuoraa / tunnelim.
Ri IV-V	6	16	29	3098	2.0	0.76	81.53	0.052

Pultitus

Louhintatyönaikaista pultitusta ei ole tehty. Louhintatyön jälkeen tehty pultitus on haja-pultitusta, eikä erityisiä osuuksia ole. Pultituksen osuus tunnelin pituudesta on 25 % ja menekki 0,48 pulttim./tunnelim. Pultituksen osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 49.

Taulukko 49. Pultituksen osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Pultitettu luokasta	Määrä	Osuus luokan pituudesta	Menekki
	tunnelim.	pulttim.	%	pulttim. / tunnelim.
Ma 1-2	61	117	34	0,65
Ma 3	2	2	3	0,04
Se 1-2	43	84	16	0,31
Se 3	26	48	35	0,65
Ri I-II	24	55	77	1,78
Ri III	14	28	26	0,52
Ri IV-V	6	7	16	0,18
yht/ keskia.	176	341	25	0,48

Ruiskubetonointi

Louhintatyön aikana on ruiskubetonoitu Korkeavuorenkadun (pl 7675) kohdalla 16 m pitkä osuus heikkousvyöhykkeessä (Ri III). Louhintatyönjälkeistä ruiskubetonointia on tehty 5...32 m:n pituisin osuuksin koko tunneliosuudelle, ruiskubetonointomattomien osuuksien ollessa pituudeltaan 3...200 m. Tunnelin katon ja seinien yhteenlasketusta pinta-alasta on ruiskubetonoitu 43 %, josta kaikki on 40 mm:n paksuista. Ruiskubetonoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukoissa 50 ja 51.

Taulukko 50. Louhintatyönaikaisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokasta.

Kalliolaatu-luokka	Tehty luokassa yhteensä		Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa		Osuus pinta-alasta
	katto	seinät	katto	seinät	
	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	%
Ri III	16	2	114	3	34

Taulukko 51. Louhintatyönjälkeisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu-luokka	Tehty luokassa yhteensä		Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa		Osuus pinta-alasta
	katto	seinät	katto	seinät	
	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	%
Ma 1-2	3	2	21	3	1
Ma 3	7	0	50	0	10
Se 1-2	27	23	192	43	10
Ri III	32	10	228	18	51
Ri IV-V	2	0	14	0	4
yht./ keskia.	71	34	505	64	9

6.7.6 Tiivistys- ja lujitusmäärät osuudella Munkkisaari-Pihlajasaari (plv 8600-10700)

Tunnelista on tarkasteltu yhteensä 2079 tunnelimetriä paaluvälillä 8600-10700. Injektointi- ja tunnustelureikien porausta on tehty 2592 porametriä, sementtiä on käytetty 371666 kg ja työvuoroja 84. Pultitusta on tehty 2656 pulttimetriä. Ruiskubetonointia on tehty 7019 m².

Injektointi

Tunnelin pituudesta on injektoitu 34 %. Esi-injektointi on tehty 17-75 metrin pituisina osuuksina paaluväliä 10420-10560 lukuunottamatta, jossa pisin injektoitu osuus on 150 m. Jälki-injektointi on tehty Munkkisaaren kuilun jälkeen meren läheisyydessä ja alla (plv 8940-9810) 40...210 m:n pituisina osuuksina. Injektoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukoissa 52 ja 53.

Pultitus

Louhintatyönaikaista pultitusta on tehty ainoastaan meren alla (pl 10120) sijaitsevassa heikkousvyöhykkeessä. Louhintatyönjälkeinen pultitus on hajapultitusta. Pultituksen osuus tunnelin pituudesta on 48 % ja menekki 1,28 pulttim./tunnelim. Pultituksen osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukoissa 54.

Taulukko 52. Esi-injektoinnin osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Esi-injektointi		Tehty luokassa yhteensä			Menekki		
	tehty luokassa	osuus luokan pituudesta	tunnust. ja esi-inj. poraus	massa	työ	poraus	massa	työ
	Tunnelim.	%	poram.	kg	vuoroa	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.	vuoroa / tunnelim.
Ma 1-2	13	5	69	34223	7.4	0.29	142.00	0.031
Ma 3	101	54	82	115726	4.8	0.44	618.85	0.026
Se 1-2	32	8	273	21295	5.5	0.65	50.82	0.013
Se 3	67	15	533	36309	15.1	1.21	82.15	0.034
Ri I-II	46	18	70	36244	1.8	0.28	144.40	0.007
Ri III	83	20	302	44975	6.1	0.74	109.96	0.015
Ri IV-V	36	28	226	47183	8.2	1.74	362.94	0.063
yht./ keskia.	378	18	1556	335953	48.9	0.75	161.59	0.024

Taulukko 53. Jälki-injektoinnin osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa	Osuus luokan pituudesta	Tehty luokassa yhteensä			Menekki		
			poraus	massa	työ	poraus	massa	työ
	tunnelim.	%	poram.	kg	vuoroa	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.	vuoroa / tunnelim.
Ma 1-2	11	5	11	1540	1.3	0.05	6.39	0.005
Ma 3	19	10	19	2660	2.3	0.10	14.22	0.012
Se 1-2	201	48	693	22881	21.1	1.65	54.61	0.050
Se 3	61	14	163	6674	7.8	0.37	15.10	0.018
Ri I-II	13	5	48	247	0.4	0.19	0.98	0.002
Ri III	25	6	102	1711	2.0	0.25	4.18	0.005
yht./ keskia.	330	16	1036	35713	34.9	0.50	17.18	0.017

Taulukko 54. Pultituksen osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Pultitettu luokasta			Määrä			Osuus luokan pituudesta		Menekki	
	työnaik.	työnjälk.	yht.	työnaik.	työnjälk.	yht.	työnaik.	työnjälk.	työnaik.	työnjälk.
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	pulttim.	pulttim.	pulttim.	%	%	pulttim./ tunnelim.	pulttim./ tunnelim.
Ma 1-2	0	121	121	0	345	345	0	50	0,00	1,43
Ma 3	1	26	27	10	89	98	1	14	0,05	0,47
Se 1-2	0	139	139	0	455	455	0	33	0,00	1,09
Se 3	0	279	279	0	621	621	0	63	0,00	1,41
Ri I-II	10	137	147	13	225	238	4	55	0,05	0,90
Ri III	0	203	203	0	527	527	0	50	0,00	1,29
Ri IV-V	0	63	63	0	370	370	0	48	0,00	2,85
yht./ keskia.	11	968	979	22	2633	2656	1	47	0,01	1,27

Ruiskubetonointi

Työnaikaista ruiskubetonointia ei ole tehty. Työnjälkeinen ruiskubetonointi on tehty 3...106 m:n pituisin osuiksi ja ruiskubetonoinnattomat osuudet ovat 2-250 m:n pituisia.

Seinien ja katon yhteenlasketusta pinta-alasta on ruiskubetonoitu 38 %. Alasta on 40 mm:n ruiskubetonointia 35 % ja 70 mm:n verkolla vahvistettua 3 %. Ruiskubetonoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 55.

Taulukko 55. Louhintatyönjälkeisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu-luokka	Tehty luokassa yhteensä				Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa				Osuus pinta-alasta	
	RB 40		RB 70+V		RB 40		RB 70+V		RB 40	RB 70
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät		+V
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	m2	m2	%	%
Ma 1-2	41	34	0	0	292	64	0	0	16	0
Ma 3	54	83	0	0	384	157	0	0	32	0
Se 1-2	172	169	0	0	1223	319	0	0	41	0
Se 3	167	150	8	8	1187	283	57	15	37	2
Ri I-II	45	14	0	0	320	26	0	0	15	0
Ri III	140	145	45	19	995	274	320	36	34	10
Ri IV-V	112	102	9	8	796	193	64	15	85	7
yht./ keskia.	731	696	62	35	5197	1315	441	66	35	3

6.7.7 Tiivistys- ja lujitusmäärät osuudella Pihlajasaari-Katajaluoto (plv 10700-16775)

Tunnelista on tarkasteltu yhteensä 5985 tunnelimetriä paaluvälillä 10700-16775. Injektointi- ja tunnustelureikien porausta on tehty 1956 porametriä, sementtiä on käytetty 130437 kg ja työvuoroja 53. Pultitusta on tehty 5755 pulttimetriä. Ruiskubetonointia on tehty 10019 m².

Injektointi

Tunnelin pituudesta on injektoitu 11 %. Injektoidut osuudet vaihtelevat pituudeltaan välillä 20...190 m. Esi-injektoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 56. Tunneliosuutta ei ole jälki-injektoitu.

Taulukko 56. Esi-injektoinnin osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu-luokka	Esi-injektointi		Tehty luokassa yhteensä			Menekki		
	tehty luokassa	osuus luokan pituudesta	tunnust. ja esi-inj. poraus	massa	työ	poraus	massa	työ
	Tunnelim.	%	poram.	kg	vuoroa	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.	vuoroa / tunnelim.
Ma 1-2	56	15	123	6689	2.7	0.34	18.28	0.007
Ma 3	43	6	47	2703	0.9	0.06	3.71	0.001
Li 1-2	20	22	22	1257	0.4	0.24	13.52	0.004
Se 1-2	110	6	148	8509	3.1	0.07	4.27	0.002
Se 3	276	14	813	52258	19.9	0.42	26.69	0.010
Ri III	86	20	493	42051	15.8	1.16	98.94	0.037
Ri IV-V	76	28	309	16970	10.3	1.12	61.49	0.037
yht./ keskia.	667	11	1956	130437	53.0	0.33	21.79	0.009

Pultitus

Kaikki pultitus on hajapulttitusta. Tiheimmin pultitetut kohdat ovat ruiskubetonointien kohdalla. Pultituksen osuus tunnelin pituudesta on 39 % ja menekki 0,96 pulttim./tunnelim. Pultituksen osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukoissa 57.

Taulukko 57. Pultituksen osuudet kalliolaatuluokista sekä niissä esiintyneet menekit.

Kalliolaatu- luokka	Pultitettu luokasta			Määrä			Osuus luokan pituudesta		Menekki	
	työnaik.	työnjälk.	yht.	työnaik.	työnjälk.	yht.	työnaik.	työnjälk.	työnaik.	työnjälk.
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	pulttim.	pulttim.	pulttim.	%	%	pulttim./ tunnelim.	pulttim./ tunnelim.
Ma 1-2	17	101	118	52	143	194	5	28	0,14	0,39
Ma 3	81	386	467	369	822	1191	11	53	0,51	1,13
Li 1-2	0	20	20	0	78	78	0	22	0,00	0,84
Li 3	0	39	39	0	190	190	0	71	0,00	3,45
Se 1-2	49	318	367	78	643	722	2	16	0,04	0,32
Se 3	119	808	927	419	1710	2129	6	41	0,21	0,87
Ri I-II	0	2	2	0	10	10	0	2	0,00	0,10
Ri III	72	168	240	250	384	634	17	40	0,59	0,90
Ri IV-V	74	102	176	325	284	608	27	37	1,18	1,03
yht./ keskia.	412	1944	2356	1492	4263	5755	7	32	0,25	0,71

Ruiskubetonointi

Louhintatyön aikana ruiskubetonoitujen osuuksien pituudet vaihtelevat välillä 5...45 m. Louhintatyön jälkeen ruiskubetonoitujen osuuksien pituudet vaihtelevat välillä 5...300 m ja ruiskubetonoinnattomat osuudet välillä 10...300 m. Seinien ja katon yhteenlasketusta pinta-alasta on ruiskubetonoitu 19 %. Alasta on 40 mm:n ruiskubetonointia 15 % ja 70 mm:n verkolla vahvistettua 4 %. Ruiskubetonoinnin osuudet ja menekit kalliolaatuluokissa on esitetty taulukoissa 58 ja 59. Pinta-alan laskemisessa on huomioitu poikkileikkauksen muuttuminen paalulla 11430.

Taulukko 58. Louhintatyönaikaisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa yhteensä				Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa				Osuus pinta- alasta	
	RB 40		RB 70+V		RB 40		RB 70+V		RB 40	RB 70
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät		+V
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	m2	m2	%	%
Ma 3	8	0	0	0	44	0	0	0	1	0
Se 3	22	9	0	0	121	25	0	0	1	0
Ri III	62	54	21	21	340	151	115	59	14	5
yht./ keskia.	92	63	21	21	505	176	115	59	1	0

Taulukko 59. Louhintatyönjälkeisen ruiskubetonoinnin osuudet kalliolaatuluokista.

Kalliolaatu- luokka	Tehty luokassa yhteensä				Ruiskubetonoitu pinta-ala luokassa				Osuus pinta- alasta	
	RB 40		RB 70+V		RB 40		RB 70+V		RB 40	RB 70
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät		+V
	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	tunnelim.	m2	m2	m2	m2	%	%
Ma 1-2	8	3	0	0	44	7	0	0	2	0
Ma 3	140	86	0	0	769	240	0	0	17	0
Se 1-2	72	51	7	0	476	126	38	0	4	0
Se 3	347	213	103	46	1905	593	565	127	15	4
Ri I-II	11	7	0	0	78	13	0	0	11	0
Ri III	190	229	123	60	1048	639	675	166	48	24
Ri IV-V	146	142	61	33	840	388	335	91	53	18
yht./ keskia.	914	730	294	138	5160	2006	1614	384	14	4

7 TIIVISTYS- JA LUJITUSMÄÄRIEN VERTAILU TUNNELEITTAIN JA YHTEYS KALLIOLAATUUN

7.1 Kallio-olosuhteet tunneleissa

Kalliolaatujen suhteelliset osuudet vaihtelevat paljon sekä tunneleittain että kussakin tunnelissa. Kalliolaatu vaihtuu usein jo muutaman kymmenen metrin matkalla. Heikkousvyöhykkeitä esiintyy kaikissa tunneleissa ja niiden suhteellinen osuus tunnelin pituudesta vaihtelee suuresti, 9...41 %. Tunneleiden kalliolaatuluokkien osuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella on esitetty taulukossa 60. Yhdistämällä rakoluokat 1-2 ja 3 sekä kaikki Ri-luokat on saatu rakoilun ja rikkonaisuuden suhteelliset osuudet. Ne on esitetty taulukossa 61.

Taulukko 60. Kalliolaatuluokkien suhteelliset osuudet tarkastelluissa tunneleissa rakennetyypin ja rikkonaisuuden perusteella luokiteltuna.

Tunneli	Kalliolaatuluokan osuus tunnelin pituudesta prosentteina								
	Ma 1-2	Ma 3	Li 1-2	Li 3	Se 1-2	Se 3	Ri I-II	Ri III	Ri IV-V
Kivikko-Malmi, L, PLV 180-577	15	44	0	0	0	0	0	13	29
Roihuvuori, J, PLV 0-1200	1	0	34	42	4	11	0	4	5
Munkkisaari-Mäntymäki, J, PLV 0-3425	23	7	6	0	20	19	9	16	1
Tali-Lassila, J, PLV 0-2550	10	1	7	3	19	34	6	10	12
Pihlajam. tunnelin siirto, J, PLV 35-340	8	0	0	0	44	20	0	7	22
Jätev. poistot. PLV 0-6000	21	2	10	2	39	11	2	4	9
Jätev. poistot. PLV 6000-7400	0	4	5	0	64	1	2	6	18
Jätev. poistot. PLV 7400-8600	26	8	0	0	38	10	4	7	5
Jätev. poistot. PLV 8600-10700	12	9	0	0	20	21	12	20	6
Jätev. poistot. PLV 10700-16775	6	12	2	1	33	33	2	7	5
keskiarvo	12	9	6	5	28	16	4	9	11
hajonta	8	12	10	12	18	11	4	5	9

Taulukko 61. Kalliolaatuluokkien suhteelliset osuudet tarkastelluissa tunneleissa rakotihyden ja rikkonaisuuden perusteella luokiteltuna.

Tunneli	Kalliolaatuluokan osuus tunnelin pituudesta prosentteina		
	Ma, Li, Se 1-2	Ma, Li, Se 3	Ri I-V
Kivikko-Malmi, L, PLV 180-577	15	44	41
Roihuvuori, J, PLV 0-1200	39	53	9
Munkkisaari-Mäntymäki, J, PLV 0-3425	50	26	25
Tali-Lassila, J, PLV 0-2550	35	37	28
Pihlajam. tunnelin siirto, J, PLV 35-340	52	20	29
Jätev. poistot. PLV 0-6000	70	15	15
Jätev. poistot. PLV 6000-7400	69	5	26
Jätev. poistot. PLV 7400-8600	64	19	17
Jätev. poistot. PLV 8600-10700	32	30	38
Jätev. poistot. PLV 10700-16775	41	46	13
keskiarvo	47	29	24
hajonta	17	15	10

Rapautumisen vähäisyys (Rp 0-1) on yhteistä kaikkien tunneleiden kivilajeille.

Eniten rikkonaista (Ri) kalliota on Kivikko-Malmi kaukolämpötunnelissa, 41 % sekä jätevesien poistotunnelin Munkkisaaren ja Pihlajasaaren välisellä osuudella (plv 8600-10700). Vähärakoisinta (0-3 rakoa/metri) kallio on jätevesien poistotunnelin kolmessa ensimmäisessä osuudessa välillä Viikki-Munkkisaari (plv 0-8600), joissa vähärakoisen kalliolaadun osuudet vaihtelevat välillä 64...70 %.

7.2 Tiivistyksen ja lujitusten osuudet ja menekit tunneleissa

7.2.1 Yleistä

Tunneleiden vertaamiseksi toisiinsa injektoinnin ja lujituksen perusteella on laskettu prosenttiosuudet pituuksista, joissa töitä on tehty. Menekit tunnelimetriä kohti on laskettu jakamalla kokonaismäärät tarkastellun tunneliosan pituudella. Ruiskubetonoinnin vertaamiseksi eri tunneleissa on laskettu osuus tunnelin pinta-alasta, koska seinien korkeudet ja kattoholvien piirit ovat erilaisia eri tunneleissa.

7.2.2 Injektointi

Injektoituja osuuksia on eniten jätevesien poistotunnelin Munkkisaaren ja Pihlajasaaren välisessä osuudessa (plv 10700-16775), jonka pituudesta 34 % on injektoituja osuuksia. Jälki-injektoinnin osuus kaikesta injektoinnista tässä tunnelissa on 16 %. Syynä suureen injektointimäärään on alueen kallioperässä esiintyvä mereen avoin vaakarakoilu. Toiseksi eniten on injektoitu Tali-Lassila viemäritunnelia, jossa injektointi on tehty pääosin Porintien kohdalla sijaitsevaan pohjavesiriskialueeseen. Keskimäärin tunneleiden pituudesta on injektoitu 8 %. Kivikko-Malmi kaukolämpötunnelissa ja Pihlajamäen viemäritunnelin siirto-osuudessa injektointia ei ole tehty tarkastelluilla osuuksilla. Injektoinnin osuudet ja menekit on esitetty taulukossa 62.

Pelkkää jälki-injektointia on tehty Roihuvuoren viemäritunnelissa, jossa injektointiin hyvin lyhyitä osuuksia. Jälki-injektoidut osuudet ovat lyhyitä myös Munkkisaari-Mäntymäki viemäritunnelissa sekä jätevesien poistotunnelissa Viikin ja Hakaniemenrannan välisissä osuuksissa (plv 0-6000).

Suurin sementtimenekki, 178,77 kg/tunnelimetri, on ollut jätevesien poistotunnelin Munkkisaaren ja Pihlajasaaren välisessä osuudessa. Saman tunnelin työvuorojen menekki on suurin, 0,040 vuoroa/tunnelim. Porauksen menekki oli tässä tunnelissa kolmanneksi suurin, 1,25 poram./tunnelim. Keskimäärin sementtiä on mennyt 37,35 kg/tunnelim., työvuoroja 0,013 tunnelimetriä kohti sekä porausta 0,60 poram./tunnelim.

Tunnusteluporausta on tehty Pihlajamäen viemäritunnelin siirto-osuudessa, injektointia ei kuitenkaan ole tehty tarkastellulla osuudella. Roihuvuoren viemäritunnelissa on tehty jälki-injektointi porauksen lisäksi tunnusteluporausta, jolloin ensinmainitun osuus koko injektointiporauksesta jää alle 100 %:n.

Hajonnan vähentämiseksi keskiarvot ja hajonnat laskettu uudelleen jättämällä pois eniten ja

vähiten injektoidut tunnelit. Pois on jätetty jätevesien poistotunnelin Munkkisaaren ja Tammakarin välinen osuus (plv 8600-10700), Pihlajamäen viemäritunnelin siirto, Roihuvuoren viemäritunneli sekä Kivikko-Malmi kaukolämpötunneli. Injektoinnin osuus tunnelin pituudesta pysyi edelleen kahdeksassa prosentissa, mutta hajonta pieneni kymmenestä viiteen prosenttiin. Menekkien hajonnat eivät kuitenkaan muuttuneet merkittävästi. Tästä voidaan päätellä, että menekit vaihtelevat tunneleittain erittäin paljon, eikä yleispäteviä menekkejä voi tässä työssä käytetyn aineiston perusteella päätellä.

Taulukko 62. Injektoinnin osuudet ja menekit tunneleissa.

Tunneli	Injektoitu tunnelin pituudesta		Menekki			Jälki-injektoinnin osuus menekistä		
	Kalkkiaa	Jälki-injekt. osuus	poraus	massa	vuorot	poraus	massa	vuorot
	%	%	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.	vuoroa / tunnelim.	%	%	%
Kivikko-Malmi, L, PLV 180-577	0	0	0.00	0.00	0.000	0	0	0
Roihuvuori, J, PLV 0-1200	<1	100	0.05	12.15	0.009	74	100	100
Munkkisaari-Mäntymäki, J, PLV 0-3425	6	<1	0.41	18.49	0.015	7	<1	6
Tali-Lassila, J, PLV 0-2550	14	0	1.31	78.26	0.024	0	0	0
Pihlajam. tunnelin siirto, J, PLV 35-340	0	0	0.07	0.00	0.000	0	0	0
Jätev. poistot. PLV 0-6000	4	33	0.41	9.85	0.005	10	20	0
Jätev. poistot. PLV 6000-7400	10	20	2.15	49.81	0.029	33	15	33
Jätev. poistot. PLV 7400-8600	1	0	0.04	4.38	0.003	0	0	0
Jätev. poistot. PLV 8600-10700	34	46	1.25	178.77	0.040	40	10	42
Jätev. poistot. PLV 10700-16775	11	0	0.33	21.79	0.009	0	0	0
keskiarvo	8	12	0.60	37.35	0.013	16	15	18
hajonta	10	30	0.69	52.63	0.013	24	29	31

Keskimääräinen sementtimenekki on laskettu myös porametriä kohti, jotta voitaisiin verrata kirjallisuudessa esitettyihin menekkeihin. Esi-injektointille laskettu keskimääräinen menekki on 69 kg/poram. ja Naantali-Turku kaukolämpötunnelissa 44,8 kg/poram. /16/ ja Helsingin metrotunnelissa 39 kg/poram /19/. Jälki-injektointin menekki on 31 kg/poram. ja Naantali-Turku kaukolämpötunnelissa 35,6 kg/poram ja metrotunnelissa 20 kg/tunnelim. Esi-injektointin menekki on kirjallisuusarvoja suurempi, mutta jälki-injektointin menekki niiden välissä.

7.2.3 Pultitus

Pultitettuja osuuksia on eniten jätevesien poistotunnelin Munkkisaaren ja Pihlajasaaren välisessä osuudessa (plv 8600-10700), josta 47 % on pultitettu. Tässä tunnelissa on pultitettu rikkonaisuusvyöhykkeitä, jotka on sen jälkeen ruiskubetonoitu. Toiseksi eniten on pultitettuja osuuksia Kivikko-Malmi kaukolämpötunnelissa, jonka pituudesta on pultitettu 45 %. Keskimäärin tunneleiden pituudesta on pultitettu 21 %. Munkkisaari-Mäntymäki viemäritunnelissa ei tarkasteltuja osuuksia ole pultitettu. Siinä on toisaalta suuri määrä ruiskubetonointia, joten pultitusta ei ole tarvittu lujitukseksi. Toiseksi vähiten on pultitettu Roihuvuoren ja Tali-Lassilan viemäritunneleissa, kummassakin 5 % pituudesta. Louhintatyönaikaisen pultituksen osuus pultituksen pituudesta on suurin jätevesien poistotunnelin Pihlajasaaren ja purkukuilun välisellä osuudella. Tällä osuudella on 17 % pultitettujen osuuksien pituudesta louhintatyönaikaista. Ainoastaan saman tunnelin muilla osuuksilla on tehty louhintatyönaikaista pultitusta enemmän tai yhden prosentin verran, lukuunottamatta Eteläesplanadin ja Munkkisaaren välistä osuutta (plv 7400-8600). Muissa tunneleissa osuus on alle prosentti tunnelin pituudesta. Pultituksen osuudet tunneleiden pituudesta ja menekit on esitetty taulukossa 63.

Taulukko 63. Pultituksen osuudet ja menekit tunneleissa.

Tunneli	Osuus tunnelin pituudesta		Menekki	
	Yhteensä	Louh. työn- aik. osuus	Yhteensä	Louh. työn- aik. osuus
	%	%	pulttim/ tunnelim.	%
Kivikko-Malmi, L, PLV 180-577	45	0	1.10	0
Roihuvuori, J, PLV 0-1200	5	0	0.11	0
Munkkisaari-Mäntymäki, J, PLV 0-3425	0	0	0.00	0
Tali-Lassila, J, PLV 0-2550	5	0	0.11	0
Pihlajam. tunnelin siirto, J, PLV 35-340	19	0	0.58	0
Jätev. poistot. PLV 0-6000	10	6	0.30	27
Jätev. poistot. PLV 6000-7400	14	4	0.30	11
Jätev. poistot. PLV 7400-8600	25	0	0.48	0
Jätev. poistot. PLV 8600-10700	47	1	1.28	1
Jätev. poistot. PLV 10700-16775	39	17	0.96	26
keskiarvo	21	3	0.52	6
hajonta	16	5	0.43	11

Suurin pulttimenekki on jätevesien poistotunnelin Munkkisaaren ja Pihlajasaaren välisessä osuudessa (1,28 pulttim./tunnelim.). Tällä osuudella myös pultituksen osuus tunnelin pituudesta on suurin. Keskimäärin menekki on 0,52 pulttim./tunnelim., joten voidaan laskea, että suurimmaksi osaksi käytettyjä 2,4 m pultteja on mennyt yksi viittä tunnelimetriä kohti. Munkkisaari-Mäntymäen viemäritunnelin jälkeen pienin menekki on Roihuvuoren ja Tali-Lassilan viemäritunneleissa, 0,11 pulttim./tunnelim. Näissä kahdessa tunnelissa myös pultituksen osuudet tunneleiden pituudesta ovat pienimmät.

Keskiarvot on laskettu myös jättämällä eniten ja vähiten pultitetut tunnelit huomiotta, jolloin hajonnat on saatu pienemmiksi. Menekit ja hajonnat eivät kuitenkaan olennaisesti muuttuneet.

7.2.4 Ruiskubetonointi

Ruiskubetonoinnin osuus tunnelin pituudesta on suurin Kivikko-Malmi kaukolämpötunnelissa, josta kattoa on ruiskubetonoitu 85 % ja seiniä 37 %. Syynä suureen määrään on rikkonaisen ja runsasrakoisen kalliolaadun suuri osuus. Keskimäärin tunneleiden katosta on ruiskubetonoitu 37 % ja seinistä 25 %. Vähiten on ruiskubetonoitu jätevesien poistotunnelin Eteläesplanadin ja Munkkisaaren välistä osuutta (plv 7400-8600). Tämän osuuden katosta on ruiskubetonoitu 12 % ja seinistä 5 %. Syynä on hyvä kalliolaatu.

Verkolla vahvistetusta 70 mm:n ruiskubetonoinnista suurin osuus on Kivikko-Malmi kaukolämpötunnelissa, jonka katon osuus on 28 % ja seinien osuus 13 %. Keskimäärin tunneleiden katosta on ruiskubetonoitu 7 % ja seinistä 5%. Suurin louhintatyönaikaisen 70 mm:n ruiskubetonoinnin osuus (53 %) on jätevesien poistotunnelin Hakaniemenrannan ja Eteläesplanadin välisessä osuudessa (plv 6000-7400). Keskimäärin louhintatyön aikana on tehty 9 % 70 mm:n ruiskubetonista. Vahvistettua ruiskubetonointia ei ole tehty Tali-Lassilan viemäritunnelissa eikä jätevesien poistotunnelin Eteläesplanadin ja Munkkisaaren välisessä osuudessa (plv 7400-8600). Ruiskubetonoinnin osuudet tunneleiden pituuksista on esitetty taulukossa 64.

Taulukko 64. Ruiskubetonoinnin osuudet tunneleiden pituuksista.

Tunneli	RB 40				RB 70+V				Kaikki ruiskubet. yhteensä	
	kaikki		josta louh. työnaik.		kaikki		josta louh. työnaik.			
	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät	katto	seinät
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Kivikko-Malmi, L, PLV 180-577	57	23	0	0	28	13	0	0	85	37
Roihuvuori, J, PLV 0-1200	38	22	19	7	8	3	0	0	46	25
Munkkisaari-Mäntymäki, J, PLV 0-3425	44	35	0	0	4	4	0	0	47	38
Tali-Lassila, J, PLV 0-2550	34	27	0	0	0	0	0	0	34	27
Pihlajam. tunnelin siirto, J, PLV 35-340	19	13	0	0	4	4	0	0	23	17
Jätev. poistot. PLV 0-6000	22	21	14	15	2	2	25	28	24	23
Jätev. poistot. PLV 6000-7400	16	12	10	33	20	19	53	52	35	31
Jätev. poistot. PLV 7400-8600	12	5	18	4	0	0	0	0	12	5
Jätev. poistot. PLV 8600-10700	35	33	0	0	3	2	0	0	38	35
Jätev. poistot. PLV 10700-16775	17	13	9	8	5	3	7	13	22	16
keskiarvo	29	20	7	7	7	5	9	9	37	25
hajonta	14	9	8	10	9	6	17	17	19	10

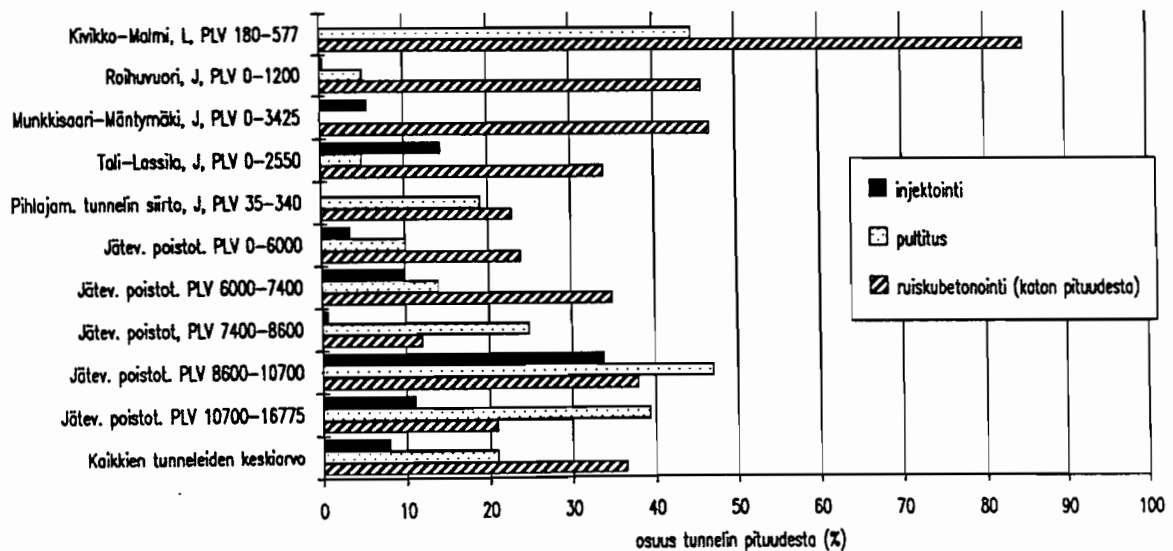
Taulukko 65. Ruiskubetonoinnin osuudet tunneleiden pinta-aloista.

Tunneli	Kaikki. ruisku- betonointi yhteensä	RB 40		RB 70 +V	
		kaikki	josta louh. työnaik.	kaikki	josta louh. työnaik.
		%	%	%	%
Kivikko-Malmi, L, PLV 180-577	62	48	0	14	0
Roihuvuori, J, PLV 0-1200	40	34	17	7	0
Munkkisaari-Mäntymäki, J, PLV 0-3425	45	41	0	4	0
Tali-Lassila, J, PLV 0-2550	32	32	0	0	0
Pihlajam. tunnelin siirto, J, PLV 35-340	22	17	0	4	0
Jätev. poistot. PLV 0-6000	23	21	14	2	0
Jätev. poistot. PLV 6000-7400	35	15	14	20	1
Jätev. poistot. PLV 7400-8600	11	11	17	0	0
Jätev. poistot. PLV 8600-10700	38	35	0	3	0
Jätev. poistot. PLV 10700-16775	20	16	9	4	0
keskiarvo	33	27	7	6	0
hajonta	14	12	7	6	0

Pinta-alojen osuuksien perusteella laskettuna eniten ja vähiten on ruiskubetonointia tehty samassa tunnelleissa kuin pituuden perusteella laskettuna. Pinta-alojen osuudet on esitetty taulukossa 65.

7.2.5 Yhteenveto tiivistyksen ja lujitusten osuuksista ja menekeistä

Tiivistyksen ja lujituksen osuudet ja menekit vaihtelevat laajalti eri tunnelleissa (kuva). Lujitusten osalta syynä on kallion laatu. Tiivistyksen osalta pohjavesiriskialueet ovat merkittävä syy. Tunnelin sijoittuminen meren alle johtaa myös suureen tiivistystarpeeseen. Tunnelleiden menekit urakka-asiakirjojen mukaisin yksiköin on koottu taulukoihin 66 ja 67.

**Kuva 7. Tiivistyksen ja lujituksen osuudet tunnelleiden pituudesta.**

Taulukko 66. Tiivistysmenekit tunneleissa.

Tunneli	Esi-injektointi			Jälki-injektointi		
	Tunnust.- ja esi- esi-injekt. poraus	massa	vuorot	poraus	massa	vuorot
	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.	vuoroa / tunnelim.	poram. / tunnelim.	kg / tunnelim.	vuoroa / tunnelim.
Kivikko-Malmi, L, PLV 180-577	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000
Roihuvuori, J, PLV 0-1200	0.01	0.00	0.000	0.04	12.15	0.009
Munkkisaari-Mäntymäki, J, PLV 0-3425	0.39	18.45	0.014	0.03	0.04	0.001
Tali-Lassila, J, PLV 0-2550	1.31	78.26	0.024	0.00	0.00	0.000
Pihlajam. tunnelin siirto, J, PLV 35-340	0.07	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000
Jätev. poistot. PLV 0-6000	0.37	7.90	0.005	0.04	1.95	0.000
Jätev. poistot. PLV 6000-7400	1.43	42.11	0.020	0.72	7.70	0.010
Jätev. poistot. PLV 7400-8600	0.04	4.38	0.003	0.00	0.00	0.000
Jätev. poistot. PLV 8600-10700	0.75	161.59	0.024	0.50	17.18	0.017
Jätev. poistot. PLV 10700-16775	0.33	21.79	0.009	0.00	0.00	0.000
keskiarvo	0.47	33.45	0.010	0.13	3.90	0.004
hajonta	0.50	48.70	0.009	0.24	5.95	0.006

7.3 Tiivistyksen ja lujitusten osuudet ja menekit kalliolaaduissa

7.3.1 Menetelmäkuvaus

Kalliolaatukohtaiset osuudet ja menekit on laskettu keskiarvona tunnelikohtaisissa taulukoissa esitetyistä menekeistä. Keskiarvon lisäksi on laskettu keskihajonta, joka ilmoittaa kuinka paljon tunnelikohtaiset menekit poikkeavat keskiarvosta. Sen avulla voidaan arvioida vaihteluväliä jossa menekit todennäköisimmin ovat.

Keskimäärin tunneleissa tehdyt osuudet on otettu kappaleesta 7.2 jossa ne on laskettu kaikista tunneleista. Menekkien keskiarvot kalliolaatuluokien perusteella laskettuna antaisivat väärät keskiarvot koska todellisen keskiarvon saamiseksi luokkia tulisi olla yhtä monta tunneli-metriä.

Keskihajonnan pienentämiseksi on tunnelit, joissa menekki on suurin ja pienin jätetty pois ja verrattu näin saatua keskiarvoa ja hajontaa edellisellä tavalla laskettuun. Hajonnan oltua edelleen liian suurta, on kalliolaatuluokat yhdistetty rakennetyypin ja rikkonaisuuden perusteella kolmeksi luokaksi. Hajontaa aiheuttaa tunnelikohtaisten erojen lisäksi rakoilusuunnat. Rakoilusuuntien vaikutusta ei ole tarkasteltu työmäärän vähentämiseksi. Seurantapiirustuksessa esitetyt rakoilun pääsuunnat on esitetty vain havaintokohdissa, joissa rako on ollut näkyvissä. Rakoilun yleistäminen kahden havainnon välille vaatisi tarkempaa analysointia esimerkiksi alapalloprojektiolla /14/. Tässä olisi lisäksi otettava huomioon maanpinnalta tehdyt rakohavainnot. Epäedulliset rakosuunnat aiheuttavat suurimman hajonnan samassa kalliolaadussa tehtävien lujitusten määriin. Injektointimääriin rakosuunnilla ei ole vaikutusta.

Taulukko 67. Lujitusmenekit tunneleissa.

Tunneli	Pultitus			Ruiskubetonointi				
	louhintatyön aikainen	louhintatyön jälkeinen	yhteensä	louhintatyön aikainen		louhintatyön jälkeinen		yhteensä
				RB 40	RB 70+V	RB 40	RB 70+V	
	pulttim. / tunnelim.	pulttim. / tunnelim.	pulttim. / tunnelim.	% pinta- alasta	% pinta- alasta	% pinta- alasta	% pinta- alasta	% pinta- alasta
Kivikko-Malmi, L, PLV 180-577	0.00	1.10	1.10	0	0	48	14	62
Rolhuvuori, J, PLV 0-1200	0.00	0.11	0.11	6	0	28	7	40
Munkkisaari-Mäntymäki, J, PLV 0-3425	0.00	0.00	0.00	0	0	41	4	45
Täli-Lassila, J, PLV 0-2550	0.00	0.11	0.11	0	0	32	0	32
Pihlajam. tunnelin siirto, J, PLV 35-340	0.00	0.58	0.58	0	0	17	4	22
Jätev. poistot. PLV 0-6000	0.08	0.22	0.30	3	0	18	1	23
Jätev. poistot. PLV 6000-7400	0.03	0.27	0.30	2	10	13	9	35
Jätev. poistot. PLV 7400-8600	0.00	0.48	0.48	2	0	9	0	11
Jätev. poistot. PLV 8600-10700	0.01	1.27	1.28	0	0	35	3	38
Jätev. poistot. PLV 10700-16775	0.25	0.71	0.96	1	0	14	4	20
keskiarvo	0.04	0.48	0.52	1	1	26	5	33
hajonta	0.07	0.41	0.43	2	3	12	4	14

7.3.2 Injektointi

Rakennetyypin ja rakoilun perusteella

Suurin injektoinnin osuus kalliolaatuluokan pituudesta on luokassa Ri III, josta 16 % on injektoitu. Pienin osuus on Ma 1-2 ja Li 1-2 luokissa, joissa se on 3 %. Suurin jälki-injektoinnin osuus on Ri III luokassa, jossa 20 % injektoinnista on tehty louhintatyön jälkeen. Pienin osuus 5 % on luokassa Ma 3. Jälki-injektoinnin suuri hajonta johtuu siitä, että sitä on tehty vain muutamissa tunneleissa. Keskimäärin tunneleissa on injektoitu 8 % pituudesta. Massan suuri menekki Ma 3 kalliolaadussa johtuu jätevesien poistotunnelin Munkkisaaren ja Pihlajasaaren välisellä osuudella injektoidusta suuresta määrästä. Muissa tunneleissa ei ollut merkittävää menekkiä kyseisessä kalliolaadussa.

Keskihajontojen suuruus ilmaisee että eri tunneleissa osuudet ja menekit ovat vaihdelleet huomattavasti. Hajonnan pienentämiseksi on menekit laskettu uudelleen jättäen eniten ja vähiten injektoidut tunnelit pois. Hajonnat eivät kuitenkaan merkittävästi pienentyneet.

Injektoinnin osuudet ja menekit rakennetyypin ja rakoilun perusteella yhdistetyissä kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 68.

Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella

Suurin injektoinnin osuus kalliolaatuluokan pituudesta on luokassa Ri I-V, josta 14 % on injektoitu. Luokkia Ma, Li, Se 1-2 ja 3 on injektoitu lähes yhtä paljon, 6 % ja 7 %. Jälki-injektoinnin osuus on suurin luokassa Ri I-V, jossa 20 % injektoinnista on tehty louhintatyön jälkeen. Pienin osuus 14 % on luokassa Ma, Li, Se 3.

Keskihajonnat ovat suuret ilmaisten erittäin suurta vaihtelua tunneleiden välillä.

Injektoinnin osuudet ja menekit rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella yhdistetyissä kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 69.

Tulos

Suuret keskihajonnat ilmaisevat että kaikissa luokissa sekä osuuksien että menekkien vaihtelut ovat erittäin suuria. Kalliolaatuluokkien yhdistäminen ei pienentänyt hajontoja. Keskiarvojen perusteella voidaan päätellä, että Ri III-luokkaa on injektoitu selvästi eniten ja toiseksi eniten luokkaa Ri IV-V. Muiden luokkien osuudet ja menekit ovat keskenään samaa luokkaa. Osuus tunnelin pituudesta antaa paremman kuvan injektoinnista kuin menekit, sillä porauksen, massan ja vuorojen suuruusjärjestykset luokissa poikkeavat toisistaan.

7.3.3 Pultitus

Rakennetyypin ja rakoilun perusteella

Suurin pultituksen osuus kalliolaatuluokan pituudesta on Ri IV-V luokassa, josta 13 % on pultitettu. Pienin osuus on Li 1-2 ja 3 luokissa, joissa se on alle prosentti. Suurin louhintatyönaikaisen pultituksen osuus on Ri IV-V luokassa, jossa 28 % pultitetuista osuuksista on pultitettu työn aikana. Pienin osuus 7 % on luokassa Li 1-2. Keskimäärin tunneleissa on pultitettu 21 % pituudesta.

Suurin menekki 0,91 pulttim./tunnelim. on luokassa Ri IV-V. Pienin menekki 0,14 pulttim./tunnelim. on luokassa Li 1-2. Suurin louhintatyönaikaisen pultituksen osuus on Ri IV-V luokassa, jossa 20 % pulteista on asennettu työn aikana. Pienin osuus on Li 1-2 ja Li 3 luokissa, joissa louhintatyönaikaisista pulteista on asennettu työn aikana alle prosentti. Ma 1-2 luokan suuri menekki ja hajonta johtuu jätevesien poistotunnelin kolmen viimeisen osuuden suurista menekeistä. Muissa tunneleissa kyseisen luokan menekit ovat pieniä.

Suurin menekki 0,91 pulttim./tunnelim. on luokassa Ri IV-V. Pienin menekki 0,14 pulttim./tunnelim. on luokassa Li 1-2. Suurin louhintatyönaikaisen pultituksen osuus on

Taulukko 68. Injektoinnin osuudet ja menekit rakennetyypin ja rakoilun perusteella yhdistetyissä kalliolaatuluokissa.

Kalliolaatu-luokka	Esi- ja jälki-injektoinnin yhteenlaskettu osuus				Esi- ja jälki-injektoinnin yhteenlaskettu menekki luokassa											
	luokan pituudesta		josta jälki-injektointia		poraus				massa				vuorot			
							josta jälki-injektointia				josta jälki-injektointia				josta jälki-injektointia	
	%	s	%	s	poram /m.	s	%	s	kg/ m.	s	%	s	vuor. /m.	s	%	s
Ma 1-2	3	5	5	14	0.15	0.18	1	4	20.07	43.51	0	1	0.006	0.011	2	5
Ma 3	7	19	2	5	0.06	0.16	2	6	63.68	189.80	0	1	0.004	0.011	3	10
Li 1-2	3	7	11	30	0.09	0.15	12	30	2.77	4.24	11	30	0.002	0.003	16	33
Li 3	4	12	10	30	0.34	1.01	8	24	14.61	39.58	10	30	0.002	0.003	10	30
Se 1-2	7	16	9	26	0.35	0.67	7	22	14.93	30.82	5	16	0.010	0.019	8	24
Se 3	6	10	6	14	0.43	0.60	6	11	23.03	38.27	2	5	0.009	0.016	6	11
Ri I-II	8	10	2	7	0.47	0.70	4	12	58.66	93.11	0	0	0.019	0.037	2	5
Ri III	17	17	22	32	1.60	1.96	22	30	87.57	98.21	18	34	0.037	0.047	16	29
Ri IV-V	12	13	14	31	1.35	2.50	14	31	74.60	102.60	13	31	0.033	0.033	15	33

Taulukko 69. Injektoinnin osuudet ja menekit rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella yhdistetyissä kalliolaatuluokissa.

Kalliolaatu-luokka	Esi- ja jälki-injektoinnin yhteenlaskettu osuus				Esi- ja jälki-injektoinnin yhteenlaskettu menekki luokassa											
	luokan pituudesta		josta jälki-injektointia		poraus				massa				vuorot			
							josta jälki-injektointia				josta jälki-injektointia				josta jälki-injektointia	
	%	s	%	s	poram /m.	s	%	s	kg/ m.	s	%	s	vuor. /m.	s	%	s
Ma, Li, Se 1-2	6	11	18	37	0.29	0.45	17	34	17.31	35.12	13	30	0.008	0.016	17	33
Ma, Li, Se 3	7	12	14	30	0.38	0.57	11	18	39.20	77.99	11	30	0.009	0.014	15	30
Ri I-V	14	12	20	31	1.40	2.12	20	30	68.23	60.65	17	32	0.031	0.031	16	31

Ri IV-V luokassa, jossa 20 % pulteista on asennettu työn aikana. Pienin osuus on Li 1-2 ja Li 3 luokissa, joissa louhintatyönaikaisista pulteista on asennettu työn aikana alle prosentti. Ma 1-2 luokan suuri menekki ja hajonta johtuu jätevesien poistotunnelin kolmen viimeisen osuuden suurista menekeistä. Muissa tunneleissa kyseisen luokan menekit ovat pieniä.

Pultituksen osuudet ja menekit rakennetyypin ja rakoilun perusteella luokitelluissa kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 70.

Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella

Eniten pulttitettuja osuuksia on luokassa Ri I-V, josta 27 % on pulttitettu. Vähiten on pulttitettu luokkaa Ma, Li, Se 1-2, jossa pulttitettuja osuuksia on 14 %. Suurin louhintatyönaikaisen pultituksen osuus on luokassa Ri I-V, jossa 6 % pulttetuista osuuksista on pulttitettu työn aikana. Kummassakin muussa luokassa osuus on 2 %.

Suurin menekki 0,79 pulttim./tunnelim. on luokassa Ri I-V ja pienin 0,34 pulttim./tunnelim. luokassa Ma, Li, Se 1-2. Suurin louhintatyönaikaisen pultituksen osuus on luokassa Ri I-V, jossa 10 % pulteista on asennettu työn aikana. Pienin osuus on luokassa Ma, Li, Se 1-2, jossa louhintatyönaikaisista pulteista on asennettu työn aikana 4%.

Pultituksen osuudet ja menekit rikkonaisuuden ja rakotihyden perusteella luokitelluissa kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 71.

Tulos

Kiinteässä kalliossa sekä osuudet, menekit että louhintatyönaikaisen pultituksen osuus kasvavat rakotihyden myötä ja rikkonaisuudessa kalliossa rikkonaisuuden myötä. Ri I-II luokkaa on pulttitettu vähemmän kuin tiheärakoista kiinteää kalliota, mutta jo luokkaa Ri III on pulttitettu enemmän.

Keskihajonnan vähentämiseksi on laskenta suoritettu uudelleen jättäen pois eniten ja vähiten pulttitettu tunneli. Hajonnat eivät kuitenkaan merkittävästi pienentyneet. Kalliolaatuluokat yhdistämällä hajonta saatiin pienemmäksi.

Taulukko 70. Pultituksen osuudet ja menekit rakennetyypin ja rakoilun perusteella yhdistetyissä kalliolaatuluokissa.

Kalliolaatu-luokka	Louhintatyönaikaisen ja -jälkeisen yhteenlaskettu osuus luokan pituudesta				Louhintatyönaikaisen ja -jälkeisen yhteenlaskettu menekki luokassa			
			louhintatyönaik. osuus yhteenlasketusta osuudesta				louhintatyönaik. osuus yhteenlasketusta menekistä	
	%	s	%	s	pulttim./tunnelim.	s	%	s
Ma 1-2	14	17	2	4	0.33	0.43	5	10
Ma 3	15	20	2	5	0.37	0.49	4	9
Li 1-2	7	9	0	0	0.14	0.24	0	0
Li 3	8	21	0	0	0.36	1.03	0	0
Se 1-2	11	10	2	4	0.28	0.31	4	9
Se 3	19	22	3	5	0.44	0.49	6	14
Ri I-II	19	27	1	2	0.40	0.58	1	2
Ri III	25	19	3	9	0.80	0.57	4	12
Ri IV-V	26	28	13	24	0.91	1.03	20	32

Taulukko 71. Pultituksen osuudet ja menekit rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella yhdistetyissä kalliolaatuluokissa.

Kalliolaatu- luokka	Louhintatyönaikaisen ja -jälkeisen yhteenlaskettu osuus luokan pituudesta				Louhintatyönaikaisen ja -jälkeisen yhteenlaskettu menekki luokassa			
			louhintatyönaik. osuus yhteenlaske- tusta osuudesta				louhintatyönaik. osuus yhteenlaske- tusta menekistä	
	%	s	%	s	pulttim./ tunnelim.	s	%	s
Ma, Li, Se 1-2	14	11	2	4	0.34	0.32	4	8
Ma, Li, Se 3	21	19	2	5	0.48	0.45	6	12
Ri I-V	27	22	6	11	0.79	0.61	10	16

7.3.4 Ruiskubetonointi

Rakennetyypin ja rakoilun perusteella

Suurin 40 mm:n ruiskubetonoinnin osuus pinta-alasta on kalliolaatuluokassa Ri IV-V, josta on ruiskubetonoitu 54 %. Pienin osuus 8 % on luokassa Li 1-2. Eniten louhintatyönaikaista ruiskubetonointia on tehty luokissa Ri IV-V, jossa 40 mm:n ruiskubetonoinnista 17 % on louhintatyönaikaista. Luokkia Ma 3 ja Li 1-2 ei ole ruiskubetonoitu työn aikana. Keskimäärin tunneleissa on tehty 40 mm:n ruiskubetonointia 27 % pinta-alasta.

Suurin 70 mm:n verkotetun ruiskubetonoinnin osuus pinta-alasta on kalliolaatuluokassa Ri IV-V, josta on ruiskubetonoitu 21 %. Pienimmät osuudet ovat luokissa Ma 3 ja Se 1-2 joissa se on alle prosentti. Keskimäärin tunneleissa on tehty 70 mm:n verkotettua ruiskubetonointia 6 % pinta-alasta.

Eniten louhintatyönaikaista 70 mm:n verkotettua ruiskubetonointia on tehty luokissa Ri IV-V, jossa ruiskubetonoinnista 11 % on louhintatyönaikaista. Lähes yhtä paljon, 10 %, sitä on tehty luokissa Ma 1-2 ja Se 3. Muissa luokissa osuus on pieni, alle yhdestä kuuteen prosenttiin.

Koska hajonnat ovat suuria, voidaan yhteyttä kalliolaatuun pitää varmimpana vain Ri III ja Ri IV-V luokissa, joissa hajonnat ovat alle puolet pinta-alaprosentista.

Ruiskubetonoinnin osuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella luokitelluissa kalliolaatu-luokissa on esitetty taulukossa 72.

Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella

Suurin 40 mm:n ruiskubetonoinnin osuus pinta-alasta on kalliolaatuluokassa Ri I-V, josta on ruiskubetonoitu 68 %. Pienin osuus 14 % on luokassa Ma, Li Se 1-2. Louhintatyönaikaisen 40 mm:n ruiskubetonoinnin osuus on suurin, 50 %, luokassa Ri 1-5. Pienin louhintatyönaikainen osuus, 1 % on luokassa Ma, Li, Se 1-2.

Suurin 70 mm:n verkotetun ruiskubetonoinnin osuus pinta-alasta on luokassa Ri I-V, josta sillä on ruiskubetonoitu 13 %. Muita luokkia on ruiskubetonoitu yksi prosentti, mutta niiden hajonnat ovat 2 %, joten voidaan päätellä todellisen määrän olevan välillä 0-3 %.

Louhintatyönaikaisen 70 mm:n ruiskubetonoinnin osuudet ovat suurimmat, 10 %, luokissa Ri I-V ja Ma, Li, Se 3, mutta hajontojen ollessa suuret keskiarvoon liittyy suuri vaihteluväli. Pienin osuus, 1 %, on luokassa Ma, Li, Se 1-2. Tässä luokassa hajonta on 3 %, joten verrattuna muihin luokkiin keskiarvoa voidaan päätellä olevan välillä 0-3 %, eli huomattavasti muita luokkia vähemmän.

Ruiskubetonoinnin osuudet rikkonaisuuden ja rakotiheyden perusteella luokitelluissa kalliolaatuluokissa on esitetty taulukossa 73.

Tulos

Kiinteässä kalliassa rakotiheys on vaikuttanut rakennetyypiä enemmän ruiskubetonointitarpeeseen. Myös louhintatyönaikaisen ja 70 mm:n ruiskubetonoinnin osuus on suurempi tiheärakoisissa kalliassa. Rikkonaisuudessa kalliassa rikkonaisuuden määrä on vaikuttanut samalla tavalla. Luokkaa Ri I-II on kuitenkin ruiskubetonoitu tiheärakoista kiinteää kalliota vähemmän.

Taulukko 72. Ruiskubetonoinnin pinta-alaosuudet rakennetyypin ja rakoilun perusteella yhdistetyissä kalliolaatuluokissa.

Kalliolaatu-luokka	RB 40 ja RB 70 +V yhteenlaskettu osuus luokan pinta-alasta		RB 40 osuus luokan pinta-alasta louhintatyön aik. +jälkeen				RB 70 osuus luokan pinta-alasta louhintatyön aik. +jälkeen			
			%	s	%	s	%	s	%	s
Ma 1-2	12	17	10	16	2	6	2	3	10	30
Ma 3	36	32	36	31	0	1	0	1	0	0
Li 1-2	11	13	8	12	0	0	3	8	0	0
Li 3	20	25	19	25	2	7	1	2	0	0
Se 1-2	9	11	9	12	1	3	0	1	1	4
Se 3	31	27	30	26	5	10	1	1	10	30
Ri I-II	32	36	29	33	0	0	3	5	0	0
Ri III	62	28	44	21	15	20	17	20	6	14
Ri IV-V	75	20	54	23	17	28	21	19	11	23

Taulukko 73. Ruiskubetonoinnin pinta-alaosuudet rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella yhdistetyissä kalliolaatuluokissa.

Kalliolaatu-luokka	RB 40 ja RB 70 +V yhteenlaskettu osuus luokan pinta-alasta		RB 40 osuus luokan pinta-alasta louhintatyön aik. +jälkeen				RB 70 osuus luokan pinta-alasta louhintatyön aik. +jälkeen			
			%	s	%	s	%	s	%	s
Ma, Li, Se 1-2	14	11	13	11	1	4	1	2	1	3
Ma, Li, Se 3	38	24	37	24	3	5	1	2	10	30
Ri I-V	68	19	50	50	13	14	18	8	10	19

7.3.5 Määrien ja osuuksien yhteenveto

Edellisissä kappaleissa esitettyjen kalliolaatukohtaisten osuuksien ja menekkien perusteella on saatu keskiarvot ja keskihajonnan perusteella on voitu arvioida vaihteluväliä jossa osuudet ja menekit ovat. Keskihajontaa ei ole saatu merkittävästi pienemmäksi vähentämällä tunneleiden määrä eikä luokkia yhdistämällä. Koska keskihajonta johtuu pääosin rakosuunnista, voidaan olettaa ettei tunneleiden menekkiä voida arvioida täsmällisesti, vaan tietyllä vaihteluvälillä. Arvioinnissa voidaan käyttää tässä työssä laskettuja keskiarvoja, kun varaudutaan myös kalliolaatuluokassa olleisiin ääriarvoihin.

Lujituksen osuudet ja menekit ovat useissa kalliolaatuluokissa niin samankaltaiset, että luokat voidaan yhdistää. Kiinteässä kalliossa rakotiheys vaikuttaa rakennetyyppiä enemmän, joten sen luokat voidaan yhdistää kahdeksi, alle ja yli kolme rakoa/metri. Rikkonaisen kallion luokissa menekit poikkeavat kuitenkin niin paljon toisistaan, ettei yhdistämistä kannata tehdä. Erityisesti louhintatyönaikaisen lujituksen osuudet ovat merkittävästi erilaiset.

Uusien tunnelihankkeiden määrääarviointia varten on yhdistettyjen luokkien perusteella laadittu taulukot 74 ja 75, joissa menekit on esitetty urakka-asiakirjoissa käytetyn jaotuksen mukaisesti. Koska menekit ovat eri tunneleissa vaihdelleet suuresti, on taulukoissa esitetty myös suurin menekki. Pienin tunneleissa ollut menekki on kaikissa tapauksissa nolla.

Taulukko 74. Tiivistyksen menekit kalliolaaduissa keskimäärin ja suurimmillaan.

Kalliolaatu	Esi- injektointi						Jälki-injektointi					
	poraush		massa		työ		poraush		massa		työ	
	poram / tunnelim.		kg / tunnelim.		vuorok / tunnelim.		poram / tunnelim.		kg / tunnelim.		vuorok / tunnelim.	
	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max
Ma, Li, Se 1-2	0.18	0.52	13.17	84.12	0.005	0.020	0.11	1.07	4.14	37.00	0.004	0.034
Ma, Li, Se 3	0.34	1.66	36.66	241.71	0.006	0.032	0.03	0.29	2.54	14.84	0.002	0.016
Ri I-II	0.45	2.18	58.56	300.00	0.019	0.120	0.02	0.19	0.10	0.98	0.000	0.002
Ri III	1.26	5.34	76.02	296.83	0.031	0.144	0.34	1.79	11.54	48.31	0.006	0.025
Ri IV-V	1.00	5.30	64.18	362.94	0.020	0.063	0.35	3.38	10.41	68.00	0.012	0.080

Taulukko 75. Lujituksen menekit kalliolaaduissa keskimäärin ja suurimmillaan.

Kalliolaatu	Pultitus				Louhintatyön aik. ruiskubeton.				Louhintatyön jälk. ruiskubeton.			
	Louhintatyön aik.		Louhintatyön jälk.		RB 40 *		RB 70+V *		RB 40 *		RB 70+V *	
	pulttim./tunnelim.		pulttim./tunnelim.		% pinta-alasta		% pinta-alasta		% pinta-alasta		% pinta-alasta	
	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max
Ma, Li, Se 1-2	0.01	0.05	0.33	1.21	0	1	0	0	13	33	1	4
Ma, Li, Se 3	0.04	0.29	0.44	1.13	2	7	0	1	35	82	1	6
Ri I-II	0.01	0.05	0.40	1.78	0	0	0	0	29	88	3	15
Ri III	0.06	0.59	0.74	1.55	8	41	3	29	37	58	14	37
Ri IV-V	0.17	1.18	0.74	2.85	7	34	5	46	47	85	16	38

*) katon ja seinien yhteenlasketusta pinta-alasta

Louhinnan keskeytyminen tiivistyksen tai lujituksen takia on tärkeä tieto sekä kustannusten

arvioinnin että louhintatyön suunnittelun kannalta. Tiivistyksen ja lujituksen suhteelliset osuudet kalliolaatuluokkien pituudesta on esitetty taulukossa 76. Ruiskubetonointi on laskettu katon perusteella, koska pelkästään seiniin tehdyn ruiskubetonoinnin osuus on kattoon tehtyyn verrattuna hyvin pieni.

Taulukko 76. Tiivistyksen ja lujitusten osuudet kalliolaatuluokkien pituudesta.

Kalliolaatu- luokka	Louhintatyönaik.			Louhintatyönjälk.		
	injek- tointi	pulti- tus	ruisku- beton.	injek- tointi	pulti- tus	ruisku- beton.
	%	%	%	%	%	%
Ma, Li, Se 1-2	2	0	0	3	13	15
Ma, Li, Se 3	6	1	2	1	20	40
Ri I-II	7	0	0	1	19	33
Ri III	14	2	12	3	24	56
Ri IV-V	11	3	13	2	22	64

7.3.6 Kustannukset kalliolaatuluokissa

Kalliolaatuluokkakokohtaisia menekkejä voidaan vertailla toisiinsa parhaiten kustannusten perusteella. Kustannusten vertaamiseksi eri kalliolaatuluokissa on yksikköhintojen ja keskimääräisten menekkien perusteella laadittu taulukot 77 ja 78. Niissä on lisäksi esitetty suurin kustannus, joka tässä työssä lasketun aineiston perusteella on mahdollinen. Tiivistyksen yksikköhintoina on käytetty Geoteknisen kustannustiedoston GEOKUTI:n /24/ hintoja pohjarakennuskustannusindeksillä vuoteen 1990 korjattuna. Tiivistyksen yksikköhinnat ovat:

tunnustelu ja esi-injektointireikien poraus:	96 mk/poram.
sementti:	1 mk/kg
esi-injektointityö:	5637 mk/vuoro
jälki-injektointireikien poraus:	51 mk/poram.
jälki-injektointityö:	4100 mk/vuoro

Työn yksikköhinta on esi-injektoinnissa hieman suurempi kuin jälki-injektoinnissa. Porauksen yksikköhinta on lähes kaksinkertainen.

Lujitusten yksikköhinnat perustuvat suunnittelijan antamaan arvioon vuoden 1990 hinnoista:

louhintatyönaikainen pultitus:	95 mk/pulttim.
louhintatyönjälkeinen pultitus:	65 mk/pulttim.
louhintatyönaikainen ruiskubetonointi 40 mm:	140 mk/m ²
louhintatyönaikainen ruiskubetonointi 70 mm +V:	280 mk/m ²
louhintatyönjälkeinen ruiskubetonointi 40 mm:	75 mk/m ²
louhintatyönjälkeinen ruiskubetonointi 70 mm +V:	180 mk/m ²

Louhintatyönjälkeiset yksikköhinnat ovat hieman yli puolet louhintatyönaikaisista.

Tiivistyskustannuksiltaan suurin kalliolaatuluokka, 426 mk/tunnelim. on Ri III ja pienin, 82 mk/tunnelim., Ma, Li, Se 1-2. Jälki-injektoinnin osuus kustannuksesta, 1 %, on pienin luokassa Ri I-II. Suurin osuus on luokassa Ma, Li, Se 1-2, jossa se on 30 %. Työ on kaikissa luokissa suurin kustannustekijä.

Suurin lujituskustannus, 1026 mk/tunnelim., on luokassa Ri IV-V ja pienin, 154 mk/tunnelim. luokassa Ma, Li, Se 1-2. Louhintatyönaikaisen lujituksen pienin osuus kustannuksesta, alle prosentti on luokassa Ri I-II. Suurin osuus on luokissa Ri III ja IV, joissa se on 27 %. Keskimääräiset lujituskustannukset ovat eniten lujitetussa kalliolaadussa lähes seitsenkertaiset vähiten lujitettuun verrattuna. Ruiskubetonoinnin osuus kustannuksista kasvaa kalliolaadun huonontuessa 86 %:sta 93 %:iin. Pultituksen osuus vastaavasti pienenee 14 %:sta 6 %:iin.

Taulukko 77. Tiivistyksen kustannukset kalliolaaduissa.

Kalliolaatu- luokka	Poraus				Massa				Työvuorot				Yhteensä			
	Jälki-injekt.				Jälki-injekt.				Jälki-injekt.				Jälki-injekt.			
	mk/ tunnelim.		%		mk/ tunnelim.		%		mk/ tunnelim.		%		mk/ tunnelim.		%	
	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max
Ma, Li, Se 1-2	23	104	25	52	17	121	24	31	42	250	36	56	82	475	30	49
Ma, Li, Se 3	35	174	5	8	39	257	6	6	45	244	21	27	119	675	11	14
Ri I-II	45	219	2	4	59	301	0	0	105	685	1	1	209	1206	1	1
Ri III	138	604	12	15	88	345	13	14	200	911	12	11	426	1861	12	13
Ri IV-V	114	681	16	25	75	431	14	16	165	682	31	48	354	1794	23	32

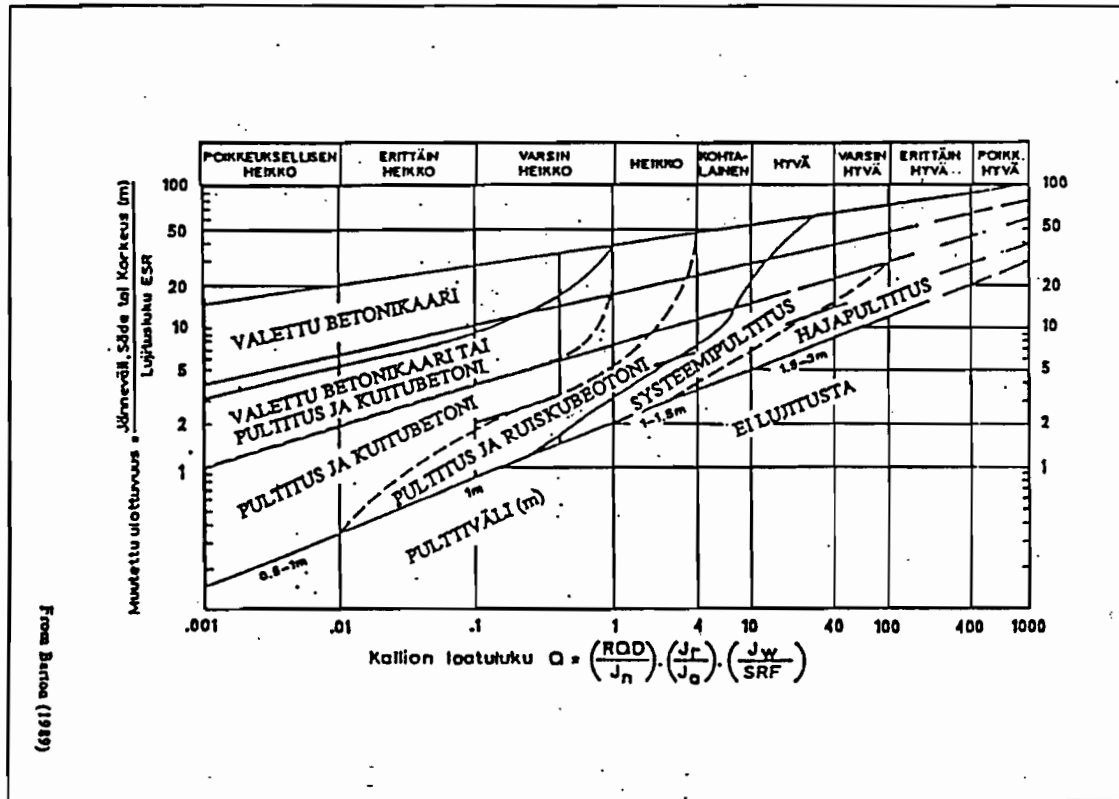
Taulukko 78. Lujituksen kustannukset kalliolaaduissa.

Kalliolaatu- luokka	Pultitus				RB 40 *)				RB 70 *)				Yhteensä			
	Louh. työn aik. osuus				Louh. työn aik. osuus				Louh. työn aik. osuus				Louh. työn aik. osuus			
	mk/ tunnelim.		%		mk/ tunnelim.		%		mk/ tunnelim.		%		mk/ tunnelim.		%	
	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max	K.A.	max
Ma, Li, Se 1-2	22	84	5	6	107	285	1	6	25	97	5	12	154	466	3	7
Ma, Li, Se 3	32	101	12	27	313	783	7	13	30	144	6	12	375	1027	8	14
Ri I-II	26	121	2	4	242	722	0	0	60	297	0	0	329	1140	<1	<1
Ri III	54	157	10	36	421	1113	28	57	379	1634	28	55	854	2904	27	55
Ri IV-V	64	297	25	38	491	1222	21	43	470	2156	33	65	1026	3675	27	56

*) laskettu katon ja seinien pinta-alan ollessa yhteensä 11 m² / tunnelim.

7.4 Q-luvun ja lujitusten välinen yhteys

Tunneleiden lujitusta on verrattu NGI:ssä laadittuun lujitussuositukseen /4/. RG-luokituksen ja Q-luvun yhteys on esitetty kappaleessa 2.4. Q-lukuun perustuva lujitussuositus on esitetty kuvassa 8. Tunnelin jännevälinä on käytetty neljää metriä.



Kuva 8. NGI-luokituksen mukainen lujitussuositus eri Q-luvun arvoilla /4/.

Luokassa Ma, Li, Se 1-2 Q-luku on välillä 4,7...1000. Välin pienimmille Q-luvun arvoille on suositeltu hajapulttitusta, suuremmille ei suositella mitään lujitusta. Tarkasteltuja tunneleita on pulttitettu, lisäksi niissä on tehty 40 mm:n ja 70 mm:n verkolla vahvistettua ruiskubetonointia, jälkimmäistä tosin hyvin vähän.

Luokassa Ma, Li, Se 3 Q-luku on välillä 0,83...265. Välin pienimmille Q-luvun arvoille on suositeltu ruiskubetonointia ja pulttitusta, suuremmille systeemi- ja hajapulttitusta. Suurimmille arvoille ei ole suositeltu mitään lujitusta. Tarkastelluissa tunneleissa on luokassa tehty hajapulttitusta, 40 mm:n ja 70 mm:n verkolla vahvistettua ruiskubetonointia.

Luokassa Ri I-II Q-luku on välillä 0,25...10. Välin pienimmille Q-luvun arvoille on suositeltu kuidutettua ja tavallista ruiskubetonointia sekä pulttitusta, suuremmille systeempulttitusta ja suurimmille arvoille hajapulttitusta. Tarkastelluissa tunneleissa on luokassa tehty sekä hajapulttitusta että 40 mm:n ja 70 mm:n verkolla vahvistettua ruiskubetonointia.

Luokassa Ri III Q-luku on välillä 0,03...6. Välin pienimmille Q-luvun arvoille on suositeltu kuidutettua ja tavallista ruiskubetonointia, suuremmille ruiskubetonointia ja pulttitusta ja suurimmille systeemi- ja hajapulttitusta. Tarkastelluissa tunneleissa on luokassa tehty sekä hajapulttitusta että 40 mm:n ja 70 mm:n verkolla vahvistettua ruiskubetonointia.

Luokassa Ri IV-V Q-luku on välillä 0,008...0,2. Välin pienimmille Q-luvun arvoille on suositeltu kuidutettua sekä tavallista ruiskubetonointia ja suurimmille ruiskubetonointia ja pulttitusta. Tarkastelluissa tunneleissa on luokassa tehty sekä hajapulttitusta että 40 mm:n ja 70 mm:n verkolla vahvistettua ruiskubetonointia.

Voidaan todeta, että luokissa Ma, Li, Se 1-2 ja 3 on tehty suosituksen vastaisesti 40 mm:n ja 70 mm:n verkolla vahvistettua ruiskubetonointia. Muissa luokissa voidaan pitää lujitusta muuten suosituksen mukaisena, mutta on tunneliosuuksia joissa ei ole tehty mitään lujitusta, vaikka koko Q-luvun välille on suositeltu jokin lujitustyyppi. Myöskään systeempultitusta ei ole tehty.

Tunneleita on siis lujitettu hyvässä kalliolaadussa NGI-suositusta raskaammin ja huonossa kevyemmin. Vastaava tulos on saatu vesivoimalaitostunneleita koskevan tutkimuksen yhteydessä /6/. Hyvän kallion lujittamiseen voi vaikuttaa varautuminen päälle tulevaan rakentamiseen.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Suomessa yleisesti käytössä oleva RG-luokitus ja ulkomailla yleisesti käytetty NGI-luokitus eivät ole täysin verrannollisia keskenään, koska Q-luvun perusteella lasketut RG-luokat osuvat toistensa kanssa osittain päällekkäin. Tällöin ei myöskään lujituksia voida suoraan verrata NGI-luokitukseen liittyvään suositukseen. NGI-luokituksen tekeminen on suuri-
töisempää, eikä siitä saada pientunneleiden lujitusten suunnittelussa lisääntyntä työmäärää vastaavaa hyötyä.

Tiivistyksen ja lujituksen mitoitustutkimuksia koskevan kirjallisuustutkimuksen johtopäätöksenä on, että pienten tunneleiden tiivistyksen määrittäminen sekä mitoitustutkimus on tehtävä paikan päällä kokemukseen perustuen. Tiivistystarpeen arvioinnissa on huomioitava ympäristö, sillä sen vaikutus on huomattava. Määrien arvioinnissa voidaan käyttää hyväksi aikaisempien tunneleiden rakentamisesta saatuja kokemuksia ja tilastoja. Julkaistua aineistoa on vähän.

Kuuden tarkastellun tunnelin kalliolaatujen suhteelliset osuudet vaihtelivat laajalti, eikä kahta kalliolaadultaan samankaltaista tunnelia ollut. Tunnelista laskettujen keskimääräisten menekkien suuresta hajonnasta johtuen niiden keskiarvot ovat suuntaa antavia. Kustakin tunnelista laskettuja menekkejä voidaan käyttää tarkeman arvion tekemiseen, kun valitaan suunniteltavaa tunnelia vastaavassa kalliolaadussa oleva tunneli.

Kalliolaaduista lasketut tiivistyksen menekit ovat kiinteässä kalliossa niin samankaltaiset, että tarkasteluun riittää kaksi luokkaa: Ma, Li, Se 1-2 ja Ma, Li, Se 3. Rikkonaisessa kalliossa luokkia tarvitaan kolme: Ri I-II, III ja IV-V. Massamenekin suhde porausmenekkiin on rikkonaisessa rakorakenteisessa (Ri I-II) ja kiinteässä runsasrakoisessa (Ma, Li, Se 1-2) kalliolaadussa yli 100 kg/porametri, kun taas muissa luokissa se on noin puolet tästä. Injektointivuorojen suhde poraukseen on rikkonaisessa rakorakenteisessa (Ri I-II) kalliolaadussa 0,04 vuoroa/poram. ja muissa luokissa puolet tästä. Injektointin eri työläjien menekkien suhteet toisiinsa siis poikkeavat tunnelimetriä kohti lasketuista menekeistä. Ratkaisevin menekin arviointitapa on kustannusten vertailu, jonka perusteella saadaan sama järjestys kuin tunnelimetriä kohti lasketulla. Suurin kustannus tunnelimetriä kohti on rikkonaisessa murrosrakenteisessa kalliolaadussa (Ri III) ja pienin harvarakoisessa kalliolaadussa (Ma, Li, Se 1-2).

Myös lujitusten tarkasteluun samat viisi kalliolaatuluokkaa on riittävä. Kiinteän kallion tiheärakoista luokkaa (Ma, Li, Se 3) on lujitettu enemmän kuin rikkonaisen rakorakenteista (Ri I-II). Suurimmillaan menekit ovat rikkonaisessa savirakenteisessa kalliossa (Ri IV-V), jossa myös louhintatyönaikaisen lujituksen ja 70 mm:n ruiskubetonoinnin osuus on suurin. Lujituskustannukset ovat eniten lujitetussa kalliolaadussa lähes seitsenkertaiset vähiten lujitetuun verrattuna. Ruiskubetonoinnin osuus kustannuksista kasvaa kalliolaadun huonontuessa 86 %:sta 93 %:iin. Pultituksen osuus vastaavasti pienenee 14 %:sta 6 %:iin.

Tutkimuksen perusteella voidaan päätellä, että kartoituksessa käytetty RG-luokituksen jako on tarpeettoman tarkka tiivistys- ja lujitusmäärien arviointiin. Sen sijaan voidaan pitää välttämättömänä kartoittaa rikkonainen kallio kolmen luokan tarkkuudella (luokat Ri I-II, III sekä IV-V) ja kiinteä kallio rakotihyden perusteella kahteen luokkaan (Ma, Li, Se 1-2 ja Ma, Li, Se 3).

Uuden tunnelin tiivistys- ja lujitusmääriä arvioitaessa selvitetään kalliolaatu suunnitellulla linjauksella. Suuntaa antava arvio saadaan samankaltaisessa kalliolaadussa olevan tunnelin

menekeistä. Arviota voidaan edelleen tarkentaa kalliolaatukohtaisten menekkien perusteella jakamalla tunneli osuuksiin kalliolaadun perusteella. Kalliolaatukohtaisia menekkejä käytettäessä on varauduttava myös niiden ääriarvoihin, sillä keskiarvot ovat suuntaa antavia.

NGI-luokituksen lujitussuositukseen verrattuna tutkimuksen kohteena olleita tunneleita on lujitettu hyvässä kalliolaadussa NGI-suositusta raskaammin ja huonossa kevyemmin.

9 YHTEENVETO

Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää Helsingissä 1980-luvulla rakennettujen tunneleiden tiivistys- ja lujitusmäärät sekä niiden yhteys kalliolaatuun. Kirjallisuustutkimuksen tarkoituksena oli selvittää kalliolaatuluokitusten, tiivistyksen ja lujitusten mitoituksen sekä menekkiarvioinnin periaatteita.

Tutkimuksen kohteeksi on valittu kuusi poikkileikkausaltaan samankaltaista (7-18 m²) tunnelia. Lähtöaineistona on käytetty seurantapiirustuksia, joissa on esitetty tunneleiden rakennusgeologinen (RG) kartoitusta sekä tehty tiivistys- ja lujitustoimenpiteet. Tunneleiden kalliolaadun selvittämiseksi on laskettu kalliolaatuluokkien prosenttiosuudet tunnelin pituudesta. Menekit on laskettu tunnelimetriä kohti sekä tunneleista että kalliolaaduista. Tilastollinen tarkastelu on tehty vertaamalla keskiarvoja hajontoihin.

RG-luokituksessa kiinteä kallio luokitetaan rakennetyypin perusteella massamaiseksi (Ma), liuskeiseksi (Li) tai seosrakenteiseksi (Se). Nämä kolme rakennetyypiä on edelleen jaettu kolmeen rakotiheysluokkaan. Rikkonainen kallio luokitetaan rakoilun tyyppin ja rakotäyteen perusteella viiteen luokkaan. Tässä tutkimuksessa kalliolaatuluokkia on yhdistetty kahdella tavalla: rakennetyypin ja rakoilun sekä rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella. Ensimmäisessä on yhdistetty kiinteä kallio rakotiheyden perusteella kahdeksi rakotiheysluokaksi, alle kolme (luokat Ma 1-2, Li 1-2, Se 1-2) ja yli kolme rakoa/metri (luokat Ma 3, Li 3 ja Se 3). Rikkonaisen kallion viisi luokkaa on yhdistetty kolmeksi luokaksi, jotka ovat Ri I-II, Ri III ja Ri IV-V. Toisessa yhdistämistavassa on kiinteä kallio yhdistetty rakotiheyden perusteella luokiksi alle kolme rakoa/metri (Ma, Li, Se 1-2) ja yli kolme rakoa metri (Ma, Li, Se 3). Rikkonainen kallio on yhdistetty yhdeksi luokaksi (Ri I-V).

Menekkien laskenta suoritettiin sekä yhdeksän että kolmen luokan perusteella. Koska eräissä luokissa menekit olivat lähes samankaltaiset, ne yhdistettiin. Näin saatiin viisiluokkainen jako, jossa kiinteä kallio luokitetaan rakotiheyden perusteella kahteen luokkaan (Ma, Li, Se 1-2 ja Ma, Li, Se 3) ja rikkonainen kallio kolmeen luokkaan (Ri I-II, Ri III ja Ri IV-V). Tätä jakoa voidaan pitää riittävänä pientunneleiden seurantapiirustusten laatimisessa.

Kalliolaatu vaihtelee niin suuresti tunneleittain, että rikkonaisuusvyöhykkeiden osuudet ovat huonoimmissa noin 40 prosenttia tunnelin pituudesta ja parhaimmissa noin 10 prosenttia.

Tiivistys- ja lujitusmenekit vaihtelevat tunneleiden välillä huomattavasti. Tunneleiden menekeistä lasketut keskiarvot ovat suuntaa antavia. Tarkempi arviointi on tehtävä vertaamalla tunneliin, jossa kallio-olosuhteet ovat suunniteltuun tunneliin nähden samankaltaisia. Arviota voidaan edelleen tarkentaa kalliolaatukohtaisten menekkien perusteella.

Tuloksena on saatu suuri määrä tiivistyksen ja lujituksen tunnuslukuja, joista tärkeimmät on koottu tämän kappaleen loppuun.

Rakennetyypin ja rakoilun perusteella laskettuna tunneleissa on luokkaa Ma 1-2 keskimäärin 12 %, Ma 3:ta 9 %, Li 1-2:ta 6 %, Li 3:ta 5 %, Se 1-2:ta 28 %, Se 3:ta 16 %, Ri I-II:ta 4 %, Ri III:ta 9 % ja Ri IV-V:tä 11 %. Rakoilun ja rikkonaisuuden perusteella laskettuna on luokkaa Ma, Li, Se 1-2 keskimäärin 47 %, luokkaa Ma, Li, Se 3 29 % ja luokkaa Ri I-V 24 % tunnelin pituudesta.

Injektointia on tehty keskimäärin 8 % tunneleiden pituudesta. Injektointiporauksen menekki

vaihtelee välillä 0...2,15 poram./tunnelim. keskiarvon ollessa 0,60 poram./tunnelim. Jälki-injektointiporauksen osuus siitä on 16 %. Injektointimassaa on käytetty 0,00...178,77 kg/tunnelim., keskiarvon ollessa 37,35 kg/tunnelim. Jälki-injektoinnin osuus siitä on 15 %. Injektointityötä on tehty 0,000...0,040 vuoroa/tunnelim., keskiarvon ollessa 0,013 vuoroa/tunnelim. Jälki-injektoinnin osuus siitä on 18 %.

Pultitusta on tehty keskimäärin 21 % tunneleiden pituudesta. Pultituksen menekki vaihtelee välillä 0,00...1,28 pulttim./tunnelim. Keskiarvo on 0,52 pulttim./tunnelim. Louhintatyönaikaisen pultituksen osuus siitä on 6 %.

40 mm:n ruiskubetonointia on tehty kattoon keskimäärin 29 % tunneleiden pituudesta ja sen osuus seinien ja katon yhteenlasketusta pinta-alasta on keskimäärin 27 %. Louhintatyönaikaista pinta-alasta on keskimäärin 7 %.

70 mm:n verkolla vahvistettua ruiskubetonointia on tehty kattoon keskimäärin 7 % tunneleiden pituudesta ja sen osuus seinien ja katon yhteenlasketusta pinta-alasta on keskimäärin 6 %. Louhintatyönaikaista alasta on keskimäärin alle 1 %.

Tunnustelu- ja injektointireikien porausta on tehty kalliolaadussa Ma, Li, Se 1-2 0,29 porametriä tunnelimetriä kohti, Ma, Li, Se 3:ssa 0,37 m, Ri I-II:ssa 0,47 m, Ri III:ssa 1,60 m ja Ri IV-V:ssa 1,35 poram./tunnelim. Suurin menekki on luokassa Ri III ja pienin luokassa Ma, Li, Se 1-2.

Injektointimassaa on käytetty kalliolaadussa Ma, Li, Se 1-2 13,28 kg tunnelimetriä kohti, Ma, Li, Se 3:ssa 39,20 kg, Ri I-II:ssa 58,66 kg, Ri III:ssa 87,57 kg ja Ri IV-V:ssa 74,60 kg/tunnelim. Suurin menekki on luokassa Ri III ja pienin luokassa Ma, Li, Se 1-2.

Injektointityövuoroja on tehty kalliolaadussa Ma, Li, Se 1-2 0,009 vuoroa tunnelimetriä kohti, Ma, Li, Se 3:ssa 0,008 vuoroa, Ri I-II:ssa 0,019 vuoroa, Ri III:ssa 0,037 vuoroa ja Ri IV-V:ssa 0,033 vuoroa/tunnelim. Suurin menekki on luokassa Ri III ja pienin luokassa Ma, Li, Se 3.

Pultitusta on tehty kalliolaatuluokassa Ma, Li, Se 1-2 0,34 pulttimetriä tunnelimetriä kohti, Ma, Li, Se 3:ssa 0,48 m, Ri I-II:ssa 0,41 m, Ri III:ssa 0,80 m ja Ri IV-V:ssa 0,91 pulttim./tunnelim. Suurin menekki on luokassa Ri IV-V ja pienin luokassa Ma, Li, Se 1-2.

40 mm:n ruiskubetonoinnin osuus katon ja seinien yhteenlasketusta pinta-alasta on luokassa Ma, Li, Se 1-2 13 %, Ma, Li, Se 3:ssa 37 %, Ri I-II:ssa 29 %, Ri III:ssa 44 % ja Ri IV-V:ssa 54 %. Suurin osuus on luokassa Ri IV-V ja pienin luokassa Li 1-2.

70 mm:n verkolla vahvistetun ruiskubetonoinnin osuus katon ja seinien yhteenlasketusta pinta-alasta on luokassa Ma, Li, Se 1-2 1 %, Ma, Li, Se 3:ssa 1 %, Ri I-II:ssa 3 %, Ri III:ssa 17 % ja Ri IV-V:ssa 21 %. Suurin osuus on luokassa Ri IV-V ja pienin luokassa Ma, Li, Se 1-2 ja 3.

Sekä tiivistys- että lujituskustannuksiin vaikuttaa työn ajoittuminen louhintatyönaikaiseksi tai -jälkeiseksi. Louhintatyön jälkeiset yksikköhinnat ovat hieman yli puolet louhintatyönaikaisista. Menekkien suurista keskihajonnoista johtuen on kustannuksille laskettu myös maksimiarvot. Tiivistyskustannuksiltaan suurin kalliolaatuluokka, 426 mk/tunnelim.

(max. 1861 mk), on Ri III ja pienin, 82 mk/tunnelim. (max. 475 mk), Ma, Li, Se 1-2. Jälki-injektoinnin osuus kustannuksesta, 1 %, on pienin luokassa Ri I-II. Suurin osuus on luokassa Ma, Li, Se 1-2, jossa se on 30 % ja maksimi 49 %. Suurin lujituskustannus, 1026 mk/tunnelim. (max 3675 mk), on luokassa Ri IV-V ja pienin, 154 mk/tunnelim. (max. 466 mk) luokassa Ma, Li, Se 1-2. Louhintatyönaikaisen lujituksen pienin osuus kustannuksesta, alle prosentti on luokassa Ri I-II. Suurin osuus on luokissa Ri III ja IV, joissa se on 27 %, maksimin ollessa 56 %.

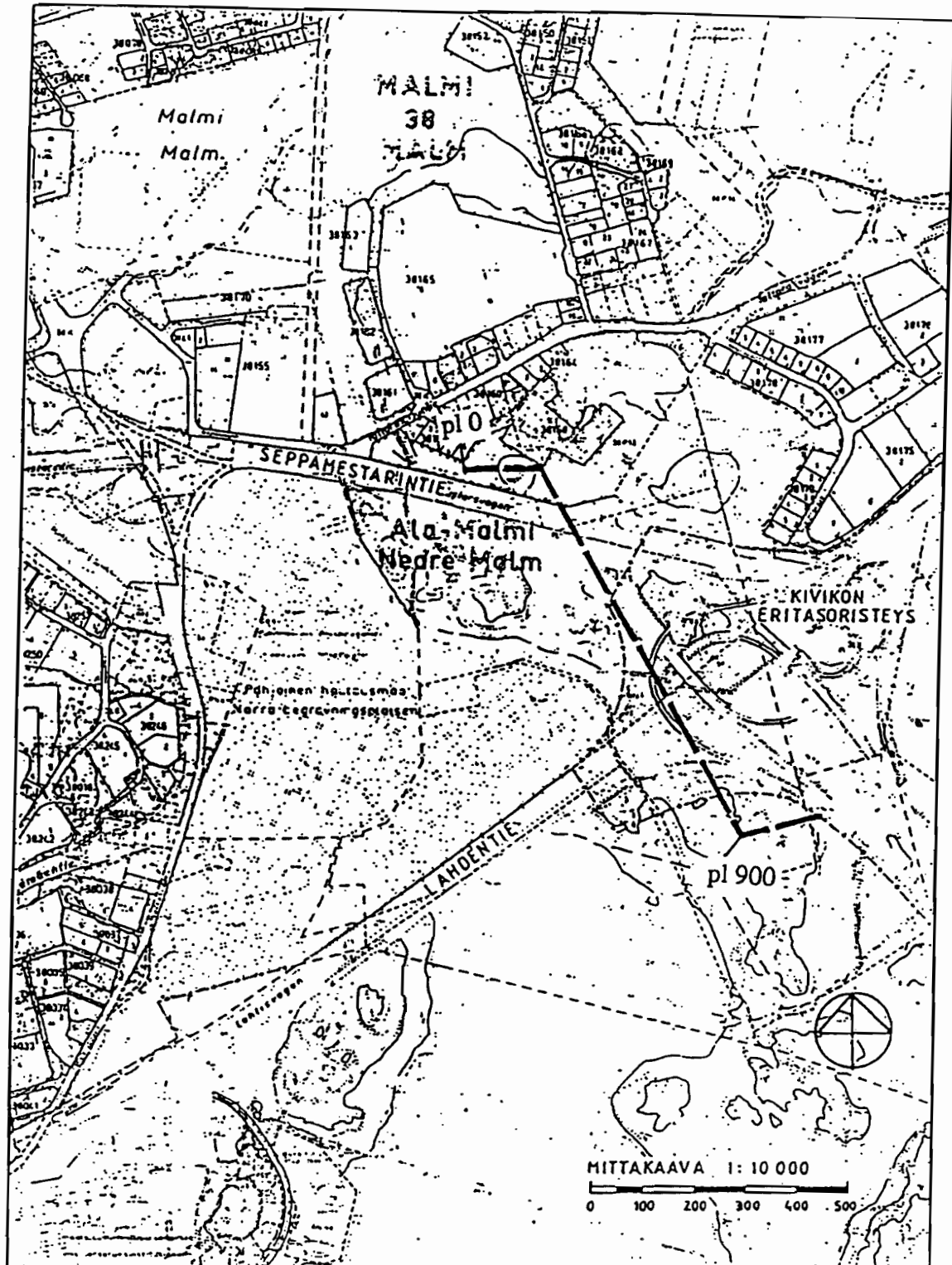
1. Paavola Pertti. Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannusselvitys. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. tiedote 27. Helsinki 1982.
2. Korhonen, K.-H., Gardemeister R., Jääskeläinen H., Niini H., Vähäsarja P. 1974. Rakennusgeologinen kallioluokitus. VTT, Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 12, Espoo. 78 s.
3. Korhonen, K.-H., Gardemeister R., Jääskeläinen H., Niini H., Vähäsarja P. 1974. Rakennusgeologisen kallioluokituksen soveltaminen. VTT, Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 12, Espoo. 78 s.
4. Barton N., Lien. R., Lunde L.. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Norwegian geotechnical institute, publication nr. 106. Oslo 1974.
5. Bieniawski Z.T. (1978). Rock mass classification in rock engineering. Proc. Symp. on Expl. for rock engineering. 1, 97-106, SAIMM, Johannesburg.
6. Riekkola Reijo. Suomalaisten vesitunnelien lujitustarpeen määrittäminen erään norjalaisen kallioluokituksen perusteella. Diplomityö. TKK, Rakennustekniikan osasto. Helsinki 1975.
7. Salmelainen Juha. Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. tiedote 34. 1983.
8. Laitala Matti. Helsingin kartta-alueen kallioperä. Geologian tutkimuskeskus. Espoo 1991.
9. Kallioluokitus ja kalliotekninen osajako, Helsingin Kaupungin vesi- ja viemärilaitos, Viikinmäen keskuspuhdistamo, Eteläisen vesiaseman louhintaurakka. Suunnitteluryhmä Viikinmäki, 1988.
10. Hyyppä Esa. Helsingin seudun geologiaa. Geologian tutkimuslaitos. Helsingin kaupungin julkaisuja no: 9. Helsingin yleiskaavaehdotus. Helsinki 1960. 7 s.
11. Vähäsarja P. Rakennusgeologisen kallioluokituksen käyttö. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus ry. julkaisu 74-19. Kalliorakenteiden suunnittelu ja toteuttaminen. Helsinki 1974.
12. Kähönen Yrjö. Helsingin kalliotunneleiden lujitus- ja vuotovesimäärät sekä tarkemittauskäytäntö. Kalliomekaniikan päivä. Rakennusgeologinen yhdistys - Byggnadsgeologiska föreningen 13. Helsinki, 1979. n. 120 s.
13. Anttikoski Usko. Pohjarakentamisen ympäristövaikutukset. Maankäyttö 1 (1980).
14. Hytti Pekka. Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa, Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. tiedote 36. Helsinki 1984.
15. Raudasmaa Pekka. Louhinta asutuskeskuksissa. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus Ry. 29-30.1. 1980.
16. Bergtekniska anvisningar vid utsprängning av tunnlar och bergrum med hänsyn till främst bergtäckning och täthetskrav. Stockholm 1077. Stockholms Gatukontor Ritning 21013.

17. ^{Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto}
Gardemeister Reijo, Koskiahde Arto. Turun seudun kaukolämpö Oy, Kaukolämpötunnelin rakentamisen rakennusgeologiset kokemukset, IVO R-tutkimukset, R-84-1. Imatran Voima Oy. Helsinki 1984.
18. Hartikainen Jorma. Pohjaveden korkeudentarkkailu. Kalliomekaniikan päivä. Rakennusgeologinen yhdistys ry. 1973.
19. Anttikoski Usko, Raudasmaa Pekka. Kokemuksia Helsingin metrotunnelien injektoinneista. Rakennustekniikka 4/77. 1977. s.293-300.
20. Geoguide 4. Guide to Cavern Engineering. Geotechnical Control Office. Civil Engineering Services department. Hong Kong. Draft for public comment, March 1991.
21. Matikainen Raimo. Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja, s.533, Vuorimiesyhdistys. Helsinki 1982. 800 s.
22. Särkkä Pekka. Pultituspäivät 19.-20. 1. 1983. Vuorimiesyhdistys Ry. Teknillinen Korkeakoulu, Vuoriosasto, Otaniemi. Espoo 1983, n. 150 s. Seminaarimoniste.
23. Saanio V. Kallion lujitus, pultitus. Käytännön kalliomekaniikkaseminaari. Vuorimiesyhdistys, Helsinki 1981.
24. Latvala Ahti. Geotekninen kustannustiedosto geo-kuti. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. tiedote 39. Helsinki 1984.
25. Pöllä Jukka. Ruiskubetoni ja sen käyttäminen kallion lujittamisessa. VTT Geotekniikan laboratorio. tiedonanto 915. Espoo 1988.
26. Niinimäki Risto. Viikinmäen geologian analysointiprojekti. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. Helsinki 1991.
27. Pitkänen Antti J., Kohonen, Viljo. Johdatus kvantitatiiviseen kielentutkimukseen ja alan atk-sovelluksiin. Oy Gaudeamus Ab. Helsinki 1984. s. 158.
28. Arjas, J. Roihuvuoren Viemäritunneli. Rakennusgeologinen kartoitus. Suunnittelukeskus Oy. 1986.
29. Terrihauta Martti. Kallioperäkartoitus sekä lujitus ja tiivistystyöt. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. Raportti 1988.

Liite 1. Seurantapiirustus

[illegible]

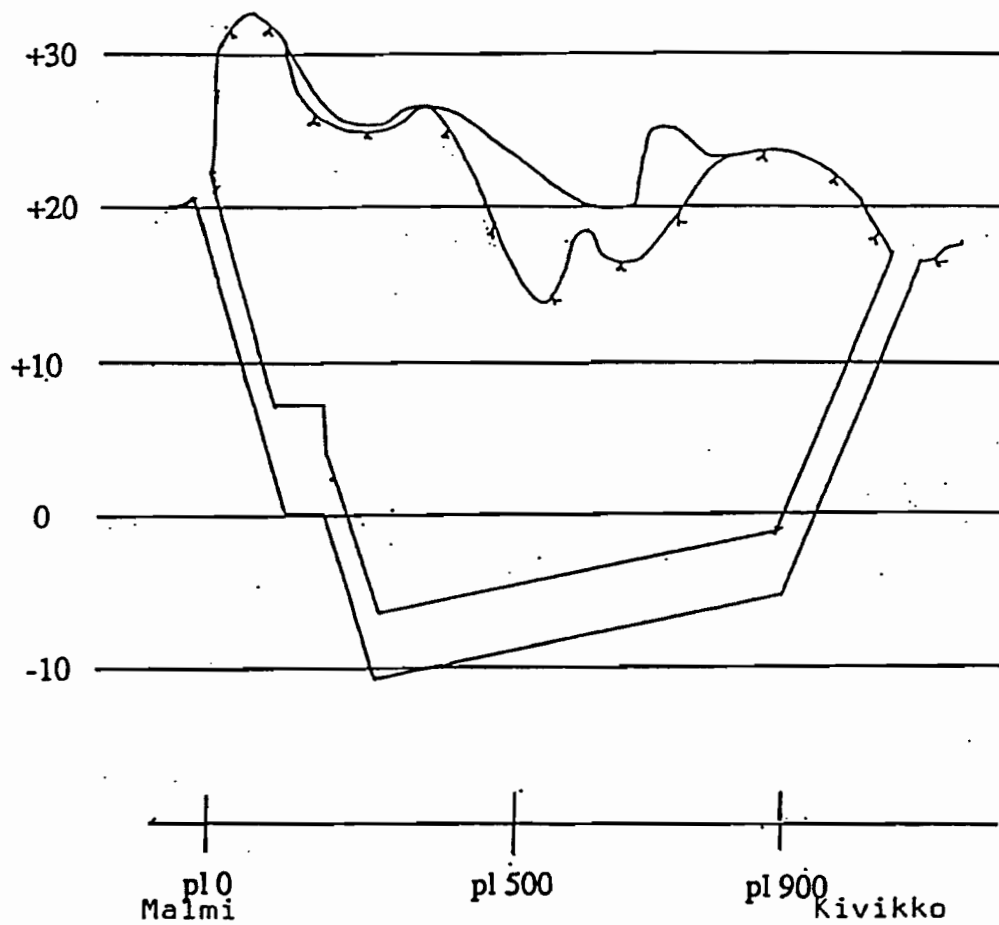
Liite 2. 1/2 Kivikko-Malmi yhteiskäyttötunneli. Sijaintikartta.



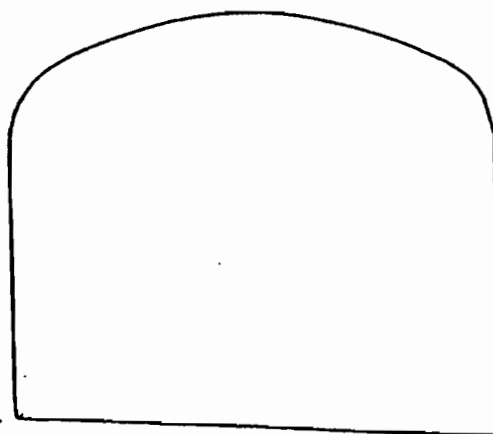
	HELSINGIN KAUPUNGIN KIIENTEISTÖVIRASTO GEOTEKNINEN OSASTO YRJÖNKATU 21, 00100 HKI 10, P 60981	TYÖN NIMI KIVIKKO- MALMI KAUKOLÄMPÖ- JOHTOTUNNELI		
PVM. 05.12.1989 TARK. 	TILAAJA HKE kaukolämpöosasto	TYÖNUMERO GEO 4052	PIIR. NO 201	

Liite 2. 2/2 Kivikko-Malmi yhteiskäyttötunneli.
Pituus- ja poikkileikkaus.

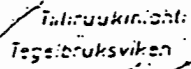
PITUUSLEIKKAUS



POIKKILEIKKAUS



leveys	4,5 m
korkeus	3,8 m
poikkileikkausala	17,0 m ²
seinäkorkeus	3,0 m
katon püri	5,7 m

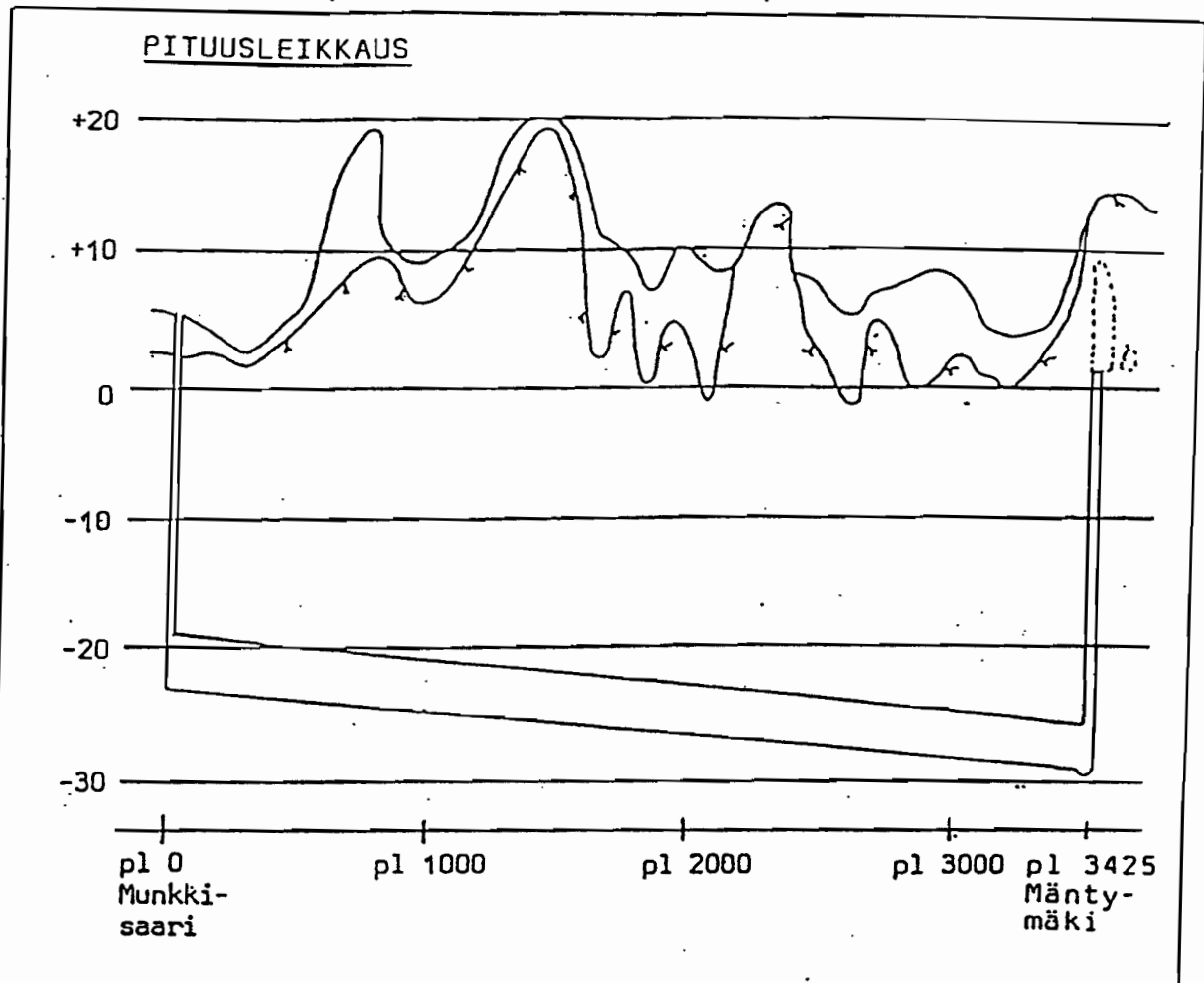


Liite 4. Munkkisaari-Mäntymäki viemäritunneli. Sijaintikartta.

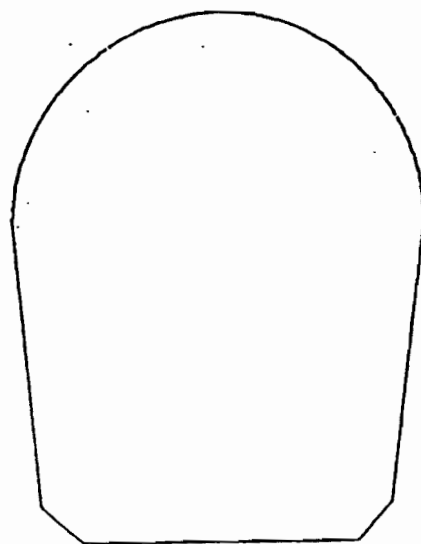
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto



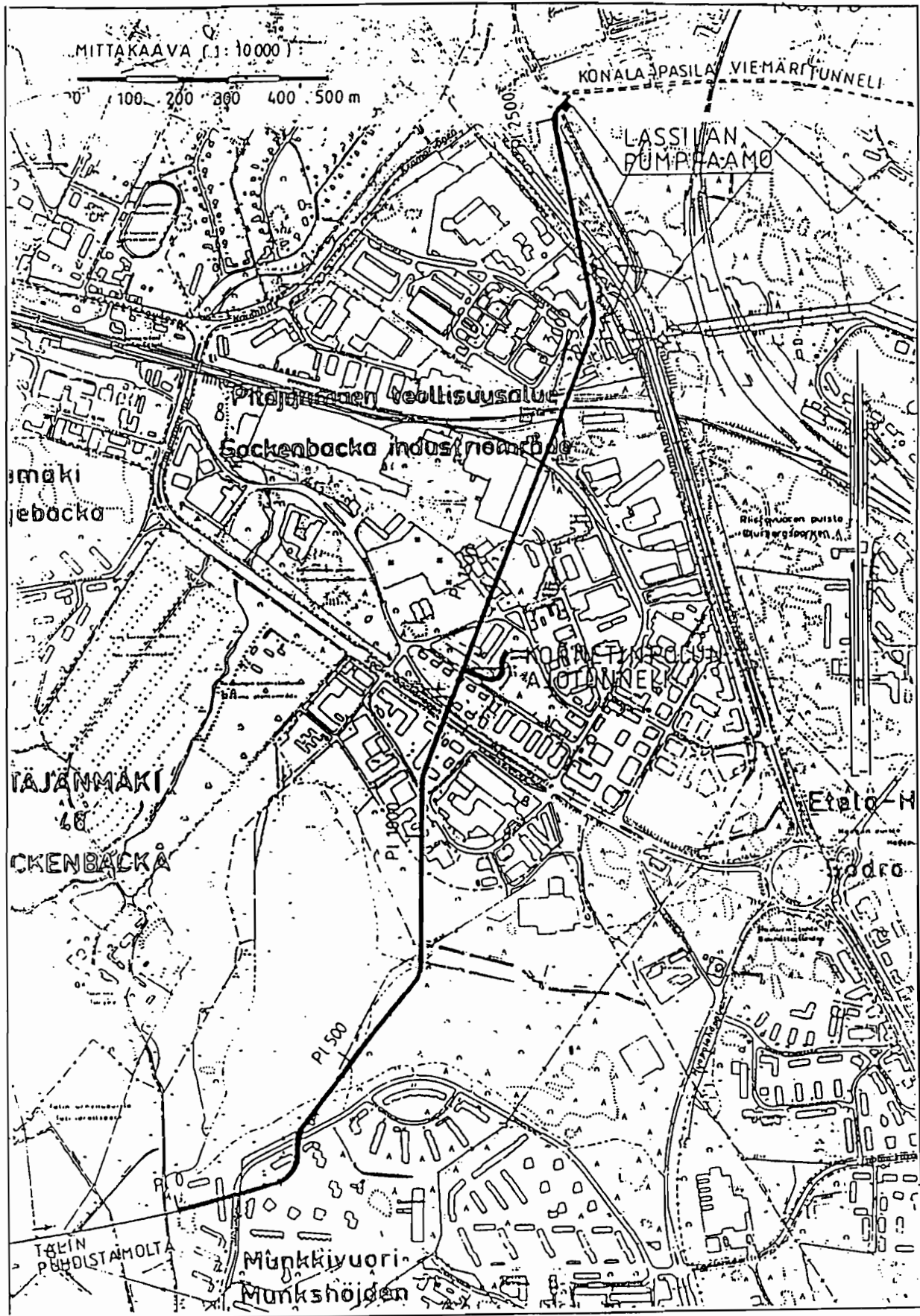
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto
 Liite 5. Munkkisaari-Mäntymäki viemäritunneli. Pituus- ja poikkileikkaus.

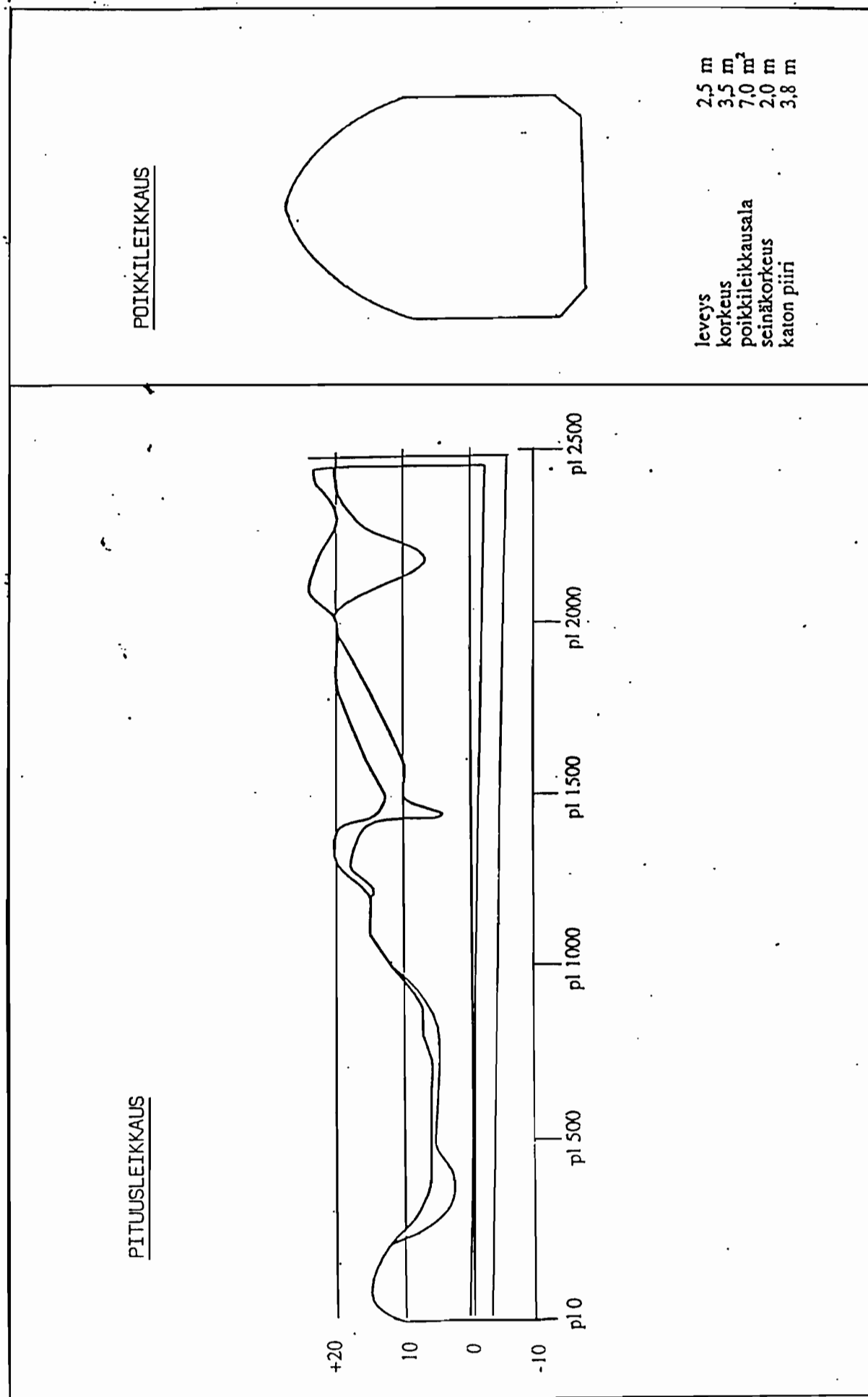


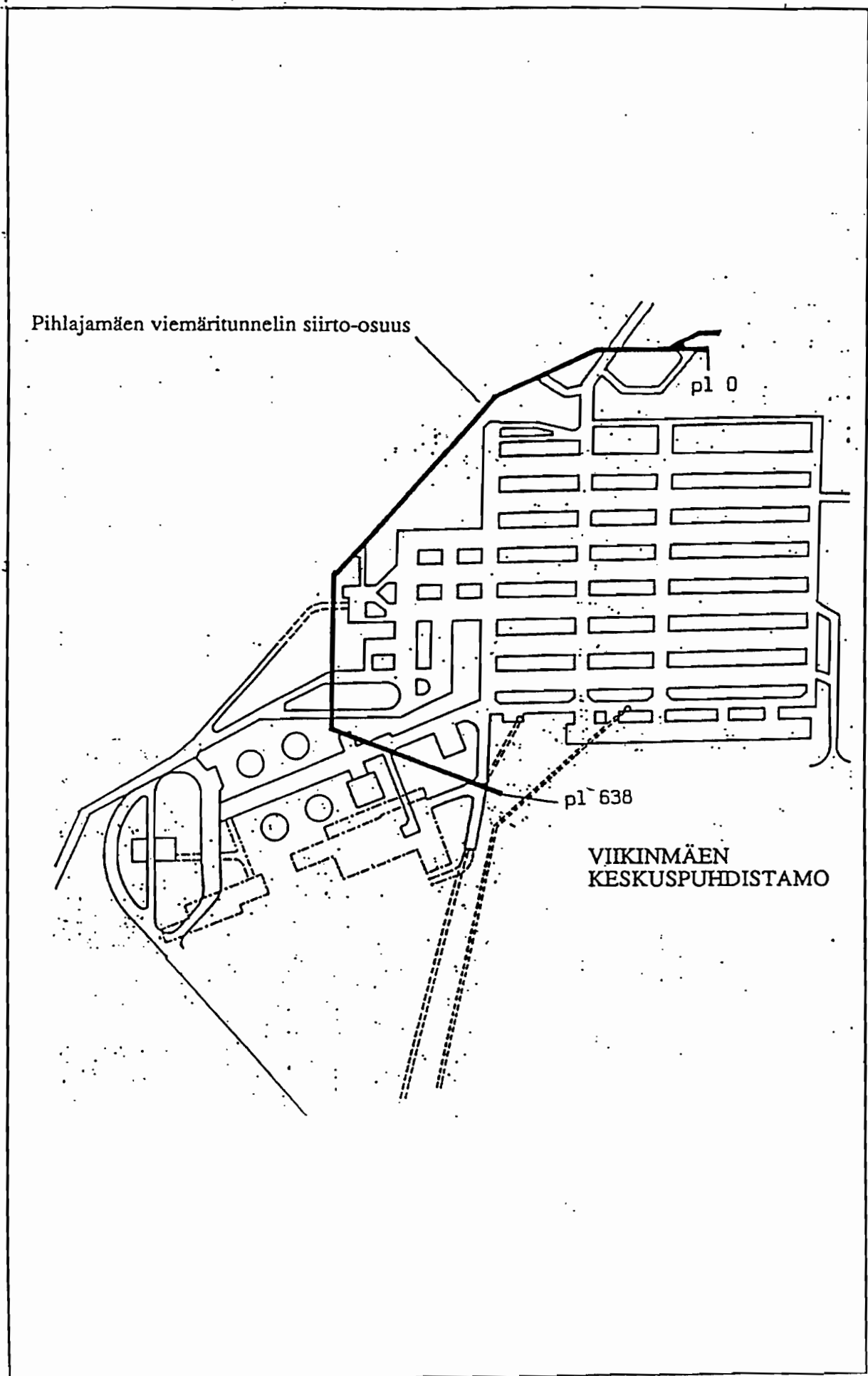
POIKKILEIKKAUS

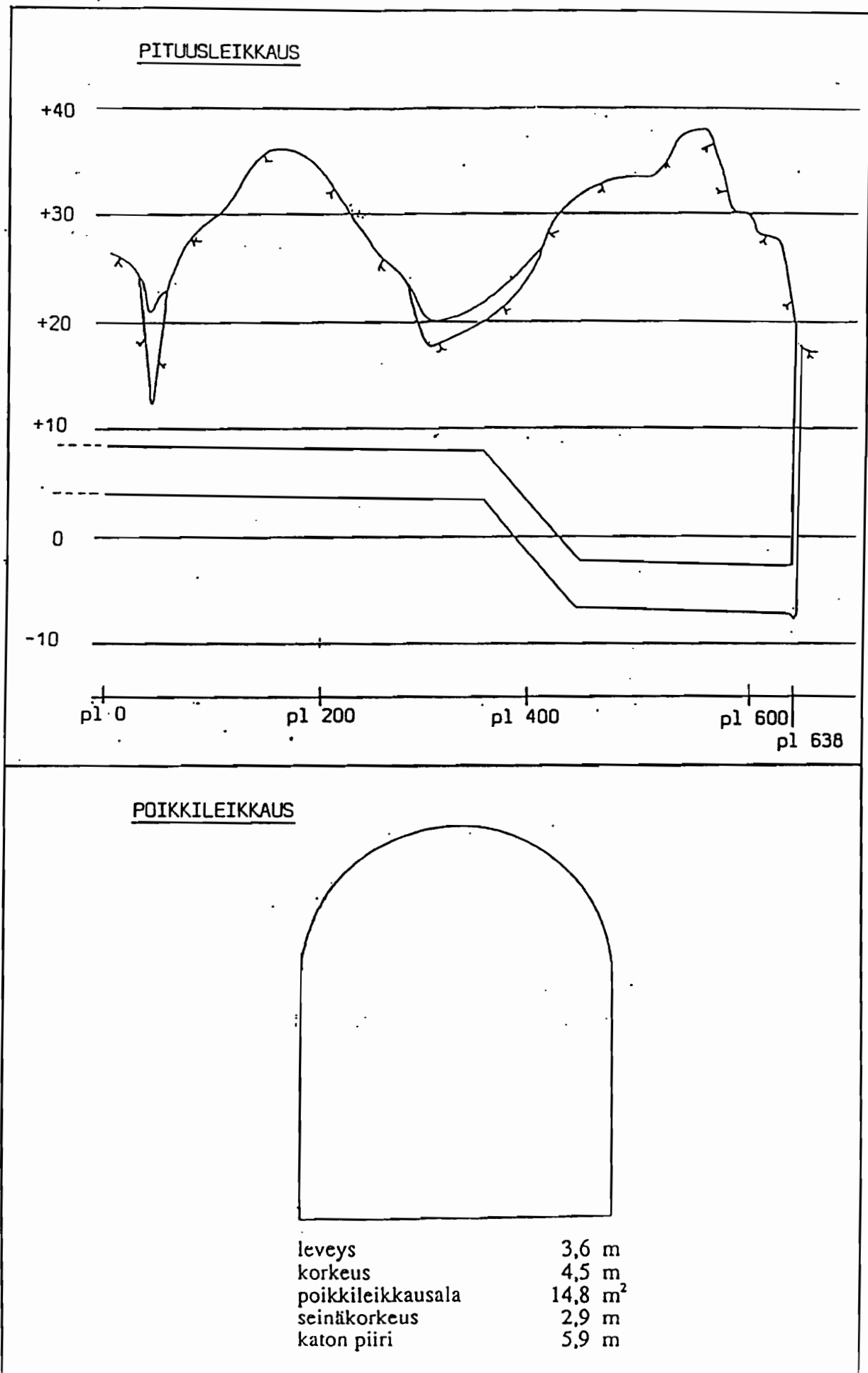


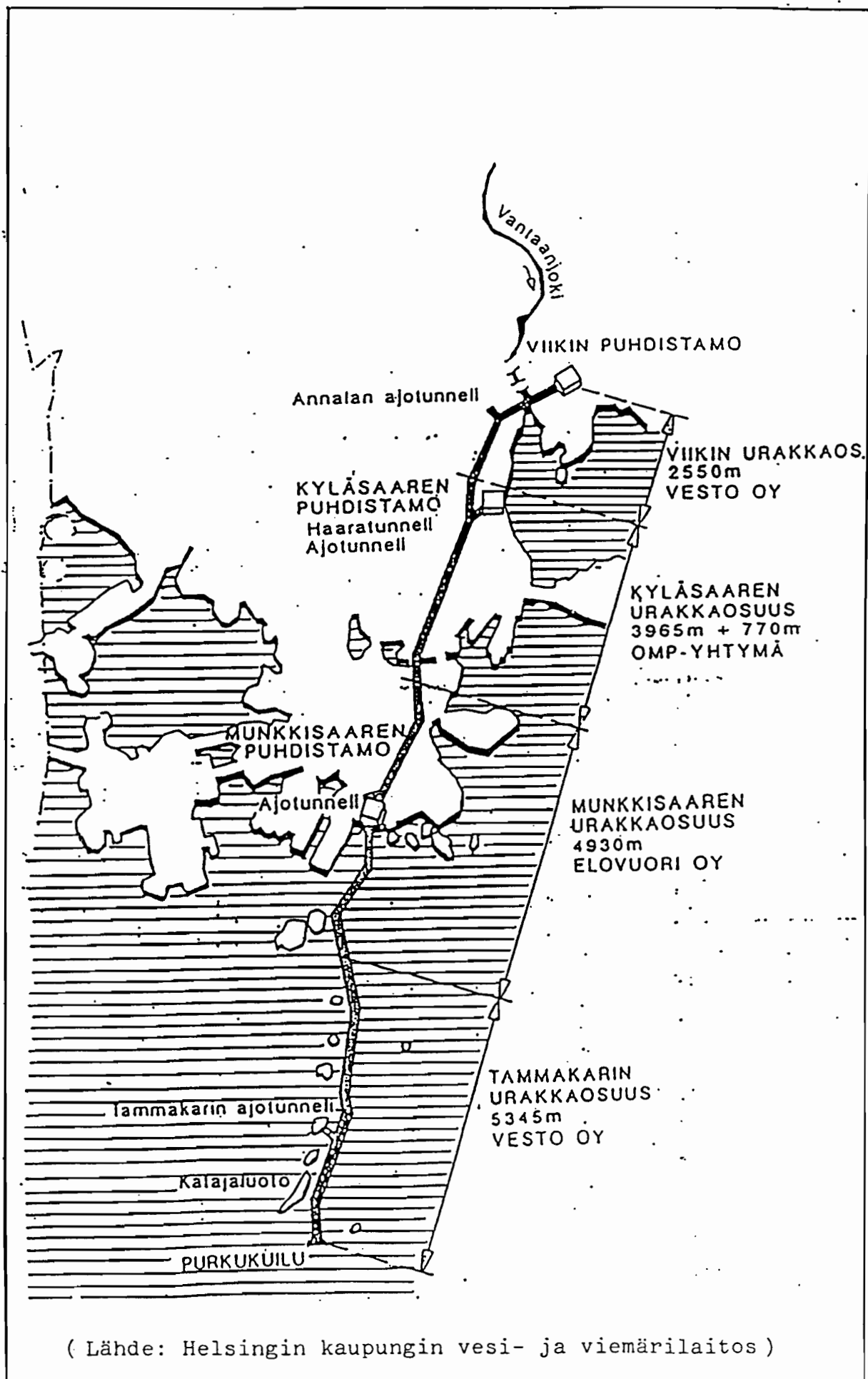
leveys	3,0 m
korkeus	3,9 m
poikkileikkausala	10,0 m ²
seinäkorkeus	2,6 m
katon püri	4,7 m

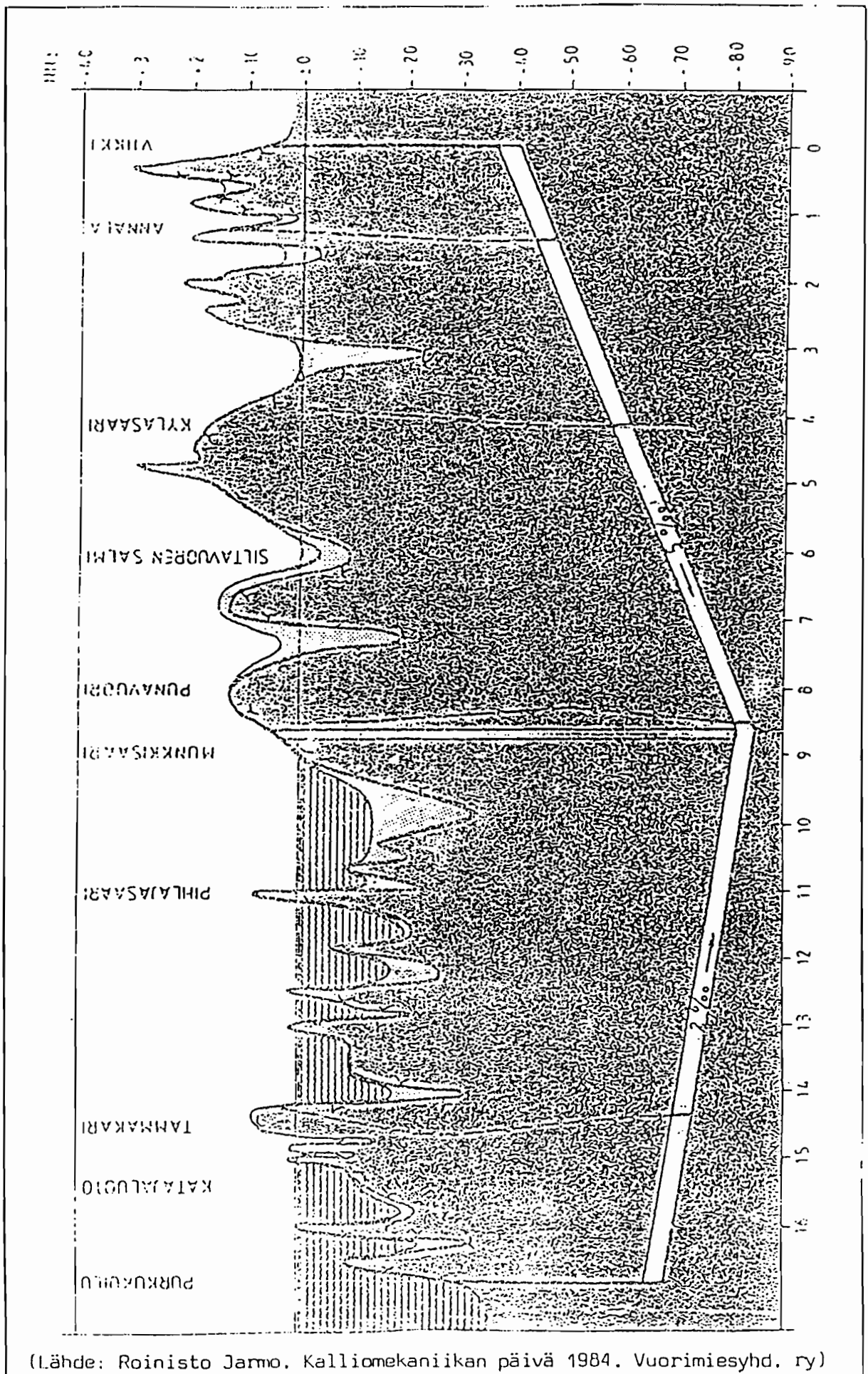




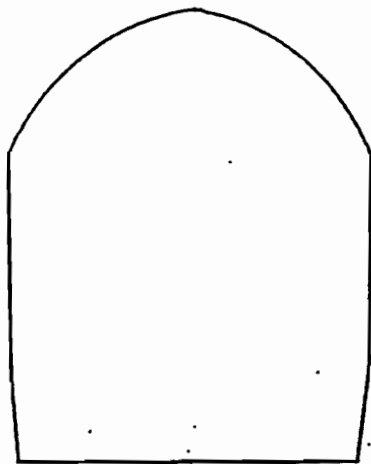






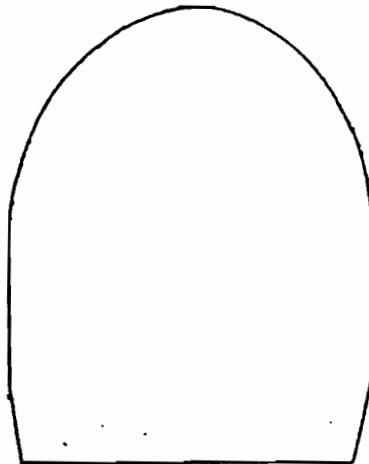


Viikin urakkaosuus (plv 0-2535)



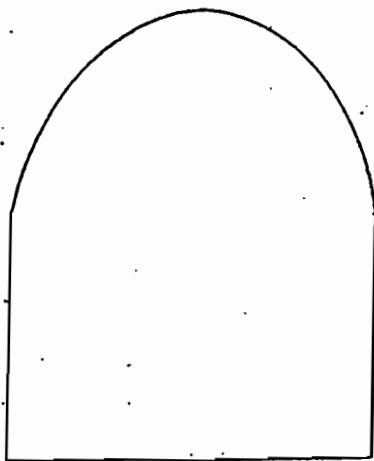
leveys	3,6 m
korkeus	4,5 m
poikkileikkausala	14,5 m ²
seinäkorkeus	3,0 m
katon piiri	4,5 m

Kyläsaaren urakkaosuus (plv 2535-6500)



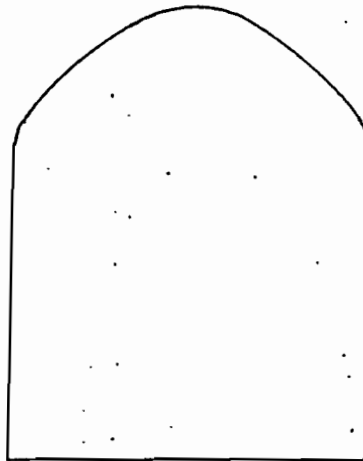
leveys	4,1 m
korkeus	5,0 m
poikkileikkausala	18,0 m ²
seinäkorkeus	2,5 m
katon piiri	7,1 m

Munkkisaaren urakkaosuus (plv 6500-11430)



leveys	4,1 m
korkeus	5,0 m
poikkileikkausala	18,0 m ²
seinäkorkeus	2,5 m
katon piiri	7,1 m

Tammakarin urakkaosuus
(plv 11430-16775)



leveys	4,0 m
korkeus	4,5 m
poikkileikkausala	18,0 m ²
seinäkorkeus	3,5 m
katon piiri	5,3 m

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

13.4.92

1	Anttikoski, U.	Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen	Suomi	1973
2	Anttikoski, U.	Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	Suomi	1973 *
3	Anttikoski, U.	Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	Suomi	1974 *
4	Mäkinen, R.	Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella	Suomi	1974 *
5	Saarela, M.	Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys	Suomi	1974 *
6	Saarela, M.	Kitkapaalujen kantavuus	Suomi	1976
7	Petäjä, J.	Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen	Suomi	1977
8	Raudasmaa, P.	Metrotunneleiden injektointi	Suomi	1977 *
9	Anttikoski, U.	Kalliotunneleiden käyttö varastointiin	Suomi	1977 *
10	Tikkanen, H.	Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa	Suomi	1978
11	Arkima, O.	Kluuvien ruuhkan jäädytys	Suomi	1978 *
12	Raudasmaa, P.	Puiset perustusrakenteet	Suomi	1979
13	Havukainen, J.	Voimalalaitostuhtien ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa	Suomi	1979
14	Vähäaho, I.	Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen	Suomi	1979 *
15	Raudasmaa, P.	Pohjavesitarkkailu -80	Suomi	1980
16	Anttikoski, U.	Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunnelikonferenssin kokemusten perusteella	Suomi	1979 *
17	Roinisto, J.	Matkakertomus tutkimismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin	Suomi	1981
18	Havukainen, J.	Kivihiilivoimalan tuhtien käyttö maarakenteissa	Suomi	1981 *
19	Roinisto, J.	Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys	Suomi	1981
20	Vuola, P.	Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta	Suomi	1981
21	Havukainen, J. & Korhonen, O.	Tonttialueiden maarakenteet	Suomi	1981
22	Havukainen, J.	Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä	Suomi	1981
23	Havukainen, J.	Kivihiilivoimalan tuhtien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa	Suomi	1982
24	Latvala, A.	Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys	Suomi	1982
25	Havukainen, J. & Hämäläinen, A. & Sulamäki, A.	Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttömahdollisuuksista maarakentamisessa	Suomi	1982
26	Halkola, H.	Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä	Suomi	1982 *
27	Paavola, P.	Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannus selvitys	Suomi	1982
28	Vähäaho, I.	Maarakennusta koskeva mallityöselitys	Suomi	1982 *
29	Gulin, K.	Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa	Suomi	1982
30	Halkola, H.	Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät	Suomi	1982
31	Havukainen, J.	Kivihiilituhtien käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet	Suomi	1983
32	Havukainen, J.	Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar	Svenska	1983
33	Havukainen, J.	The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines	English	1983
34	Salmelainen, J.	Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta	Suomi	1983
35	Havukainen, J.	Matkakertomus kivihiilituhtien ympäristövaikutuskonferenssista	Suomi	1983
36	Hytti, P.	Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa	Suomi	1984
37	Leinonen, J.	Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa	Suomi	1984
38	Pirinen, J.	Kelluvan rantapenkereen rakentaminen	Suomi	1984 *
39	Latvala, A.	Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti	Suomi	1984
40	Korpela, J. & Schuller, M.	Jäykkien liitosjohtojen pohjarakennus selvitys (Jäli-selvitys)	Suomi	1984
41	Lahtinen, E-R.	Maanalaistilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti)	Suomi	1985
42	Korpi, J.	In Situ-kuormituskoe painumien määrittämiseksi	Suomi	1985
43	Havukainen, J.	Estrakentamisen kehittäminen	Suomi	1985
44	Vähäaho, I.	Jäähdytysmenetelmän käyttö	Suomi	1987
45	Havukainen, J. & Hämäläinen, A. & Latvala, A.	Kivihiilituhtien käyttökokeukset kunnallistekniikan maarakenteissa	Suomi	1987
46	Julkunen, A.	Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa	Suomi	1987
47	Hutri, K-L.	Vuosaaren kivilajien soveltuvuus asfalttipäällysteisiin	Suomi	1988
48	Melander, K.	Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä	Suomi	1989
49	Leppänen, M.	Vahvisinkankaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa	Suomi	1989
50	Vähäaho, I. & Ryhänen, H.	Sulamiskondolaation vaikutukset savessa	Suomi	1989
51	Vähäaho, I.	Effects of Thaw Consolidation on Geotechnical Properties of Clay	English	1989
52	Koskela, P.	Routastabiloinnin vaikutus ruoppausmassaan	Suomi	1989
53	Saari, M. & Korhonen, O.	Paalujen dynaaminen koestus PDA-laitteistolla	Suomi	1990
54	Saari, M. & Volanen, N.	Ruoholahden koepaalutus	Suomi	1990
55	Yrjänä, J. & Korhonen, O.	Pystyjoitus Pikku-Huopalahdessa	Suomi	1991
56	Niinimäki, R. & Raudasmaa, P.	Viikkinmäen keskuspuhdistamon rakennusgeologiset kalliotutkimukset	Suomi	1992