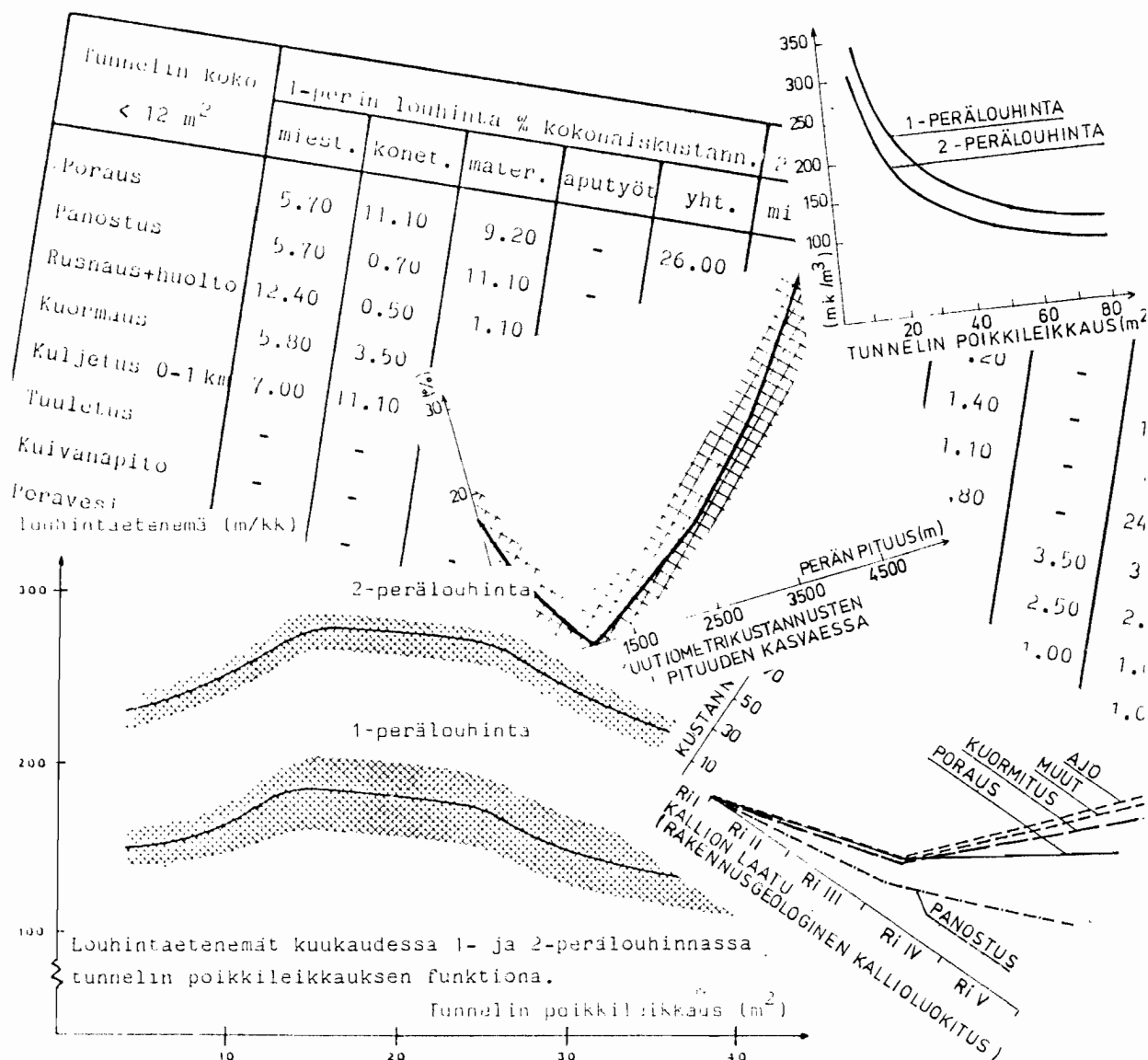


HELSINGIN KAUPUNGIN KIINTEISTÖVIRASTO

GEOTEKNINEN OSASTO



Pertti Paavola

KUNNALLISTEKNISTEN TUNNELEIDEN

LOUHINTAKUSTANNUSSELVITYS

Geoteknisen osaston
tiedote 27 1. 8. 1982

Pertti Paavola

K U N N A L L I S T E K N I S T E N
T U N N E L E I D E N
L O U H I N T A K U S T A N N U S S E L V I T Y S

Geoteknisen osaston tiedote 27

Helsinki 1.8.1982

ALKUSANAT

Helsingin kaupunki on huomattava tunnelirakennuttaja. Vuonna 1982 suunnittelu- ja rakennusvaiheessa olevien tunneli- ja säiliörakennuskohteiden arvo on noin 170 Mmk. Näiden Helsingin kaupungin rakennuttamien kohteiden tutkimuksen ja kalliorakennussuunnittelun suorittaa Helsingin kaupungin geotekninen osasto. Koska kysymyksessä ovat suuret taloudelliset arvot, joihin suunnitteluvaiheessa voidaan merkittävästi vaikuttaa, on suunnittelijoilla oltava tiedot tunnelirakennuksen kustannusten muodostumisesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä.

Helsingin kaupungin kiinteistövirasto käynnisti vuonna 1981 kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannusselvityksen. Selvityksen on tehnyt dipl.ins. Pertti Paavola diplomityönään. Häntä on avustanut Lemminkäinen Oy:n, Vesto Oy:n ja Yleinen Insinööri-toimisto Oy:n henkilöstö, joiden antamiin kustannustietoihin selvitys perustuu.

Selvityksessä on kootusti esitetty tunnelirakentamisen kustannuksiin keskeisimmin vaikuttavat tekijät. Selvityksessä esitettyjen tietojen perusteella voidaan vertailla eri tunnelirakentamisvaihtoehtojen taloudellisuutta. Tämän työn pohjalta voidaan käynnistää yleisemmin tunnelirakentamisen kustannustiedoston koostaminen. Näitä tietoja tarvitaan erityisesti kaupungin maanalaisen rakentamisen suunnittelussa.

Helsingissä, elokuun 1. päivänä 1982



Usko Anttikoski
osastopäällikkö

TIIVISTELMÄ

Työn päätavoitteena oli kartoittaa tunnelirakentamiseen liittyvät kustannusmuuttujat. Jokaista kustannusmuuttujaa analysoitaessa pyrittiin selvittämään kyseisen muuttujan merkitys louhintatyöhön ja sen kustannuksiin. Erityisesti kiinnitettiin huomiota yksi- ja kaksiperälouhinnan kustannuserojen selvittämiseen.

Koska rakennuttajilla ja urakoitsijoilla on mielipide-eroja urakkasopimukseen kuuluvien lisätöiden maksuperusteista, pyrittiin ko. töistä laatimaan luettelo, joka tyydyttäisi kumpaakin osapuolta.

Kustannusvertailussa päädyttiin siihen, että yksiperälouhinnan kuutiometrikustannukset ovat noin 30 % kaksiperälouhinnan kustannuksia kalliimmat. Kaksiperälouhinnan käyttöä puoltavat lisäksi suuremmat kuukausietenemät ja louhintatyössä esiintyvien häiriöiden pienempi vaikutus kustannuksiin.

Edullisin ajotunnelin sijainti on sellainen, että kummankin perän louhinta kestää yhtä kauan. Halvimpiin kuutiometrikustannuksiin päästään perän pituuden ollessa 700 - 1300 m.

Kallion laadulla on suuri vaikutus louhintatyön kustannuksiin ja rytmitykseen. Rytmityksessä on tärkeintä, että saadaan louhittua aiottu määrä katkoja työvuoron aikana.

:

A REPORT ON EXCAVATION COSTS OF MUNICIPAL TUNNELS

ABSTRACT

The main purpose of this study was to map out cost parameters involved in tunnel construction. The effect of each cost parameter on excavation and the consequent costs were analysed. Special attention was attached to figure out the differences between the costs of single and double drifting.

Due to the different views employers and contractors have about cost criteria of additional work in contracts it was tried to compile the criteria to satisfy both parties.

In comparison of cost per cubic meter single drifting was found to be about 30 % more expensive than double drifting. Also greater advances per month and less influence of disturbances on excavating costs favour double drifting.

The most favourable place for an access tunnel is where excavating takes the same time for both drifts. The optimum length for a drift was found to be about 700 - 1300 m. This gives the lowest costs per cubic meter.

Rock quality has a great influence on excavation costs and on sequence of excavation phases. The most important thing in the sequencing of excavation phases is the capability to excavate the intended amount of rounds during a shift.

KUNNALLISTEKNISTEN TUNNELEIDEN LOUHINTAKUSTANNUSSELVITYS

TIIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKULAUSE

SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
1. JOHDANTO.....	1
1.1 Tunnelit osana kunnallistekniikkaa.....	1
1.2 Selvityksen tavoitteet.....	1
1.3 Selvityksen toteutus.....	2
2. KUNNALLISTEKNISET TUNNELIT.....	3
2.1 Vesihuoltotunnelit.....	3
2.2 Johtotunnelit.....	5
3. TUNNELEIDEN LOUHINTA KAUPUNKIALUEELLA.....	7
3.1 Tunnelirakentamisen kasvu Helsingissä...	8
3.2 Pintavaihtoehdon ja tunnelivaihtoehdon kustannusvertailu.....	8
4. KUSTANNUSVERTAILU ERI TUNNELINAJOMENETELMIEN KESKEN.....	11
4.1 Hydraulisen ja pneumaattisen porauksen vertailu.....	12
5. LOUHINTAKUSTANNUSTEN JAOTTELU.....	15
5.1 Välittömät kustannukset.....	15
5.2 Yhteiskustannukset.....	16
6. TUNNELILOUHINNAN SUUNNITTELUSSA HUOMIOONOTET- TAVAT KUSTANNUSMUUTTUJAT.....	18
7. POIKKILEIKKAUKSEN KOON VALINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	19
7.1 Poikkipinta-alan vaikutus tunnelin lou- hintakustannuksiin.....	20
7.2 Louhinnan kuutiometrihintojen analysointi	22
7.3 Louhintakustannukset tunnelimetriä kohti	24
8. TUNNELIN POIKKILEIKKAUSMUODON VALINTAPERUSTEET	27

9.	TUNNELIN JA PERÄN PITUUDEN VAIKUTUS LOUHINTA-KUSTANNUKSIIN.....	30
9.1	Yksi- ja kaksiperälouhinnan kustannus- vertailu perän pituuden kasvaessa.....	33
10.	TUNNELIN KALTEVUUDEN MERKITYS LOUHINTATÖISSÄ.	37
11.	TUNNELIN KORKEUSASEMAN VAIKUTUS KUSTANNUKSIIN	42
12.	TUNNELIN LINJAUKSEN VALINTAPERUSTEET.....	43
13.	TUNNELILOUHINTAAN LIITTYVÄT TUTKIMUKSET JA NIIDEN MERKITYS.....	44
14.	KALLION LAADUN VAIKUTUS LOUHINTAKUSTANNUKSIIN	46
14.1	Kiven kovuuden vaikutus louhintatyöhön.	48
14.2	Lujitustöiden vaikutus louhinta-aikaan ja -kustannuksiin.....	49
14.3	Ruhjeisen kallion louhinnassa syntyvät lisäkustannukset.....	52
14.4	Kallion laadun vaikutus louhintatyön eri osavaiheiden kustannuksiin.....	53
15.	POHJAVESIOLOSUHTEIDEN VAIKUTUS LOUHINTAKUS- TANNUKSIIN.....	56
15.1	Tiivistystarpeen määrittämiseen liitty- vät tutkimukset.....	56
15.2	Esi-injektoinnin kustannukset ja vaiku- tus louhintatyöhön.....	57
15.3	Esi- ja jälki-injektoinnin kustannus- vertailu.....	59
15.4	Vuotovesien kustannusvaikutus.....	59
15.5	Esi-injektoinnin huomioiminen urakka- asiakirjoissa.....	61
15.6	Muutosehdotuksia urakka-asiakirjoihin..	62
16.	LOUHINTAMENETELMÄN VAIKUTUS LOUHINTAKUSTANNUK- SIIN.....	64
16.1	Louhintakustannusten jakaantuminen eri työvaiheiden ja louhintatapojen mukaan.	64

17.	Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto AJOTUNNELEIDEN VAIKUTUS TUNNELILOUHINNAN KOKONAISKUSTANNUKSIIN.....	69
18.	LOUHINTATYÖN RYTMITYKSEN VAIKUTUS KUSTANNUK- SIIN.....	71
19.	AIKATAULUN VAIKUTUS LOUHINTAKUSTANNUKSIIN....	74
19.1	Kustannusten riippuvuus ajasta.....	74
19.2	Ajankäytön optimointi.....	78
19.3	Louhintatehon merkitys rakennusajan suunnittelussa.....	80
20.	TYÖVOIMAN JA LOUHINTAKALUSTON VAIKUTUS KUS- TANNUKSIIN.....	83
21.	TYÖN LAATUVAATIMUSTEN VAIKUTUS LOUHINTAKUS- TANNUKSIIN.....	85
22.	CASE-TUNNELIN KUSTANNUSARVIOISTA.....	86
23.	EHDOTUS URAKKASOPIMUKSIIN KUULUVIEN LISÄTÖI- DEN MAKSUPERUSTEIKSI.....	88
24.	YHTEENVETO.....	93
	LÄHDELUETTELO.....	96

1. JOHDANTO

1.1 Tunnelit osana kunnallistekniikkaa

Monien kaupunkien rakenne ja teknisen huollon verkostot ovat muotoutuneet jo vuosikymmeniä sitten. Kaupunkien jatkuva laajeneminen aiheuttaa kuitenkin sen, että verkostoja joudutaan laajentamaan ja korjaamaan, jotta pystytään pitämään kunnallistekniset ja energiahuollon palvelut riittävällä tasolla. Tästä on seurauksena, että kaupunkien kadut ovat usein kaivettu auki. Tällöin liikenne, joka kaupunkialueella on muutenkin ruuhkautunutta, ruuhkautuu entisestään. Samanlaisten ongelmien eteen joudutaan myös silloin, kun rakennetaan suuria siirto- ja kokoojalinjoja, sillä yleistä on, että eri laitokset tuovat omat linjansa eri aikaan.

Edellä mainitut haitat voidaan välttää, mikäli kunnallistekniikan palvelut järjestetään siten, että sijoitetaan putket, kaapelit, johdot ym. kalliotunneliin. Etenkin Suomessa, jossa kalliooperä on lähellä maanpintaa, on hyvät edellytykset tällaiselle tunnelirakentamiselle.

1.2 Selvityksen tavoitteet

Kunnallistekniset tunnelit ovat tyypillisiä pientunneleita, joten esitetyt tulokset soveltuvat käytettäväksi sellaiseen, kun käsitellään pientunnelirakentamista yleensä. Tässä työssä on käsitelty soveltuvin kohdin myös suurempipoikkeileikkauksellisia tunneleita.

Kustannuksia käsiteltäessä on ko. kohtaan aina merkitty, minkä vuoden hintatasosta on kyse. Louhintakustannusten kehitys on noudattanut suunnilleen yleistä rakennuskustannusten kehitystä Suomessa.

Työn päätavoitteena voidaan pitää sitä, että löydetäisiin tekijät, jotka oikein huomioituna, mahdollistaisivat tunnelirakentamisen niin edullisesti kuin paikalliset olosuhteet huomioiden on mahdollista. Työssä on pyritty selvittämään

tärkeimmät muuttujat, jotka suunnittelijan on otettava huomioon tunnelia suunnitellessaan. Jokaista tällaista muuttujaa käsiteltäessä on arvioitu kyseisen muuttujan merkitystä louhintakustannuksiin. Näitä eri muuttujia käsiteltäessä pyritään selvittämään erityisesti se, mikä ero on sillä suoritetaanko työ 1- vai 2-perälouhintana. Tämä johtuu siitä, että kaupunkialueella ajotunneleiden sijoittaminen on vaikeaa ja näin ollen 1-perälouhintana olisi usein helpommin toteutettavissa oleva vaihtoehto. Suomessa ei aikaisemmin ole tehty selvitystä, jota voitaisiin hyödyntää analysoitaessa erilaisten tekijöiden merkitystä louhintakustannuksiin, kun työ tehdään 1- tai 2-perälouhintana.

Johtuen niistä mielipide-eroista, joita rakennuttajilla ja urakoitsijoilla on urakkasopimukseen kuuluvien lisätöiden maksuperusteista, on tässä selvityksessä pyritty laatimaan kyseisistä töistä luettelo, joka tyydyttäisi mahdollisimman hyvin kumpaakin osapuolta.

1.3 Selvityksen toteutus

Tämä selvitys on tehty Teknillisen korkeakoulun Vuoriteollisuusosaston louhintatekniikan laboratoriossa. Selvityksen tilaaja on Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekninen osasto, jonka lisäksi työssä ovat mukana olleet seuraavat urakoitsijat: Lemminkäinen Oy, Vesto Oy ja YIT Oy Yleinen Insinööritoimisto, joilta pyydettyyn kustannustietouteen työ pääosin perustuu. Kaiken urakoitsijoilta saadun materiaalin analysoinnin on suorittanut työn tekijä.

Selvityksen toteutusta valvomaan perustettiin työryhmä, johon kuului edustaja kustakin edellä mainitusta laitoksesta. Työn tekijä toimi kyseisen ryhmän sihteerinä. Kokouksia, joissa työn edistymistä seurattiin, järjestettiin neljä kertaa. Ryhmäkokousten välillä sihteerä kävi useita neuvotteluja kaikkien eri laitosten edustajien kanssa.

2. KUNNALLISTEKNISET TUNNELIT

Kunnallistekniset tunnelit voidaan jakaa käyttötarkoituksen mukaan vesihuoltotunneleihin ja johtotunneleihin.

2.1 Vesihuoltotunnelit

Kallioon sijoitetut vesihuoltotunnelit jaetaan kolmeen ryhmään seuraavasti /14/:

- a) Paineelliset tunnelit, joissa vesi täyttää koko poikkipinnan
 - b) Viettotunnelit, joissa vesi, tavallisesti jätevesi, johdetaan painovoimaisesti
 - c) Tunnelit, jotka toimivat putkien sijoitustilana, putkijohtotunnelit.
- a) Paineelliset tunnelit

Paineellisina tunneleina tulevat kysymykseen tavallisesti raakavesitunnelit tai puhdistettua jätevettä kuljettavat tunnelit. Puhdistettua käyttövettä, samoin kuin puhdistamatonta jätevettä, ei yleensä johdeta verhoamattomissa paineellisissa kalliotunneleissa. Ensinmainittua sen vaaran vuoksi, jonka mahdollisesti likainen pohjavesi sille aiheuttaa ja jälkimmäistä tukkeutumisvaaran ja pohjaveden saastumisvaaran vuoksi. Lisäksi jäteveden kyseessä olleen tapahtuu ilmattomassa tunnelissa puhdistusprosessin kannalta epäedullista mätänemistä /14/.

Raakaveden ja puhdistetun jäteveden johtamiseen käytettyjen tunnelien kooksi riittää yleensä niin pieni poikkileikkaus kuin louhintateknisesti on taloudellista tehdä. Yleisesti käytettyjä poikkileikkauksia ovat 6...8 m², mikäli louhinta on suoritettu kiskokalustolla tai käsiporauksella ja 12...14 m², kun on käytetty kumipyöräkalustoa.

Paineellisten tunnelien mitoitus tapahtuu periaatteessa yleisten hydrauliiikan sääntöjen pohjalta saatavien painehäviölaskeelmien avulla. Lisävaikeuden tuo kuitenkin louhinnassa syntyvän pintojen karkeuden huomioonottaminen. Tätä varten on kehitetty erilaisia kokemuspäisiä kaavoja /14/.

Mitoitettaessa tunneleita saadaan tunnelin ja ympäröivän pohjaveden välisten virtausten minimoiminen aikaan sijoittamalla tunnelissa virtaavan veden paineviiva mahdollisimman lähelle pohjaveden pintaa /14/.

Paineellisten tunnelien sijoittaminen kallioon on yleensä helppoa, koska tunnelin tasausviivaa voidaan suhteellisen vapaasti siirrellä sekä vaaka- että pystytasossa sen vaikuttamatta sanottavasti tunnelin toimintaan. Täten voidaan tunneli sijoittaa kallion heikkousvyöhykkeiden suhteen edullisesti ja tällöin louhintatyö voidaan suorittaa vaikeuksitta ja vähäisin kallion vahvistuskustannuksin. Paineelliset tunnelit jätetään yleensä sisältä kalliopintaisiksi, lukuunottamatta kohtia, joissa kallioteknisistä syistä tarvitaan vahvistusta tai tukiverhousta /14/.

b) Viettotunnelit

Viettotunnelit ovat yleensä jätevesitunneleita, tavallisesti puhdistamatonta jätevettä kuljettavia kokoojaviemäreitä. Yleisimmin tunnelin pohjaan on valettu betonikouru, joka on v-muotoinen. Viettotunneleihin kuuluvat myös ne tunnelit, joihin on sijoitettu painovoimaisesti toimiva viemäriputki tai jotka toimivat verhoamattomina, osittain täynnä olevina viettoviemäreinä /14/.

Viettotunneleissa johdettavat vesimäärät ovat yleensä pienempiä kuin paineellisissa tunneleissa. Tunnelin poikkeileikkaus on yleensä sama kuin pienin taloudellinen poikkeileikkaus /14/.

Viettoviemäritunneli on paineelliseen tunneliin verrattuna vaikeampi sijoittaa sen vertikaalisen jäykkyyden takia. Tämän vuoksi kallion heikkousvyöhykkeiden väistäminen on

vaikeampaa. Kallistuksen minimiarvo on 1 ‰. Virtausolosuhteet on pyrittävä saamaan sellaisiksi, että ainakin keran vuorokaudessa on vähintään 0.5 m/s virtausnopeus /14/.

c) Putkijohtotunnelit

Tunneleihin sijoitetut putkijohdot ovat vesihuollossa tavallisesti joko puhdistetun käyttöveden johtoja tai käsittelemättömän jäteveden kokoojaviemärijohtoja. Tunneliin sijoitetun putken läpimitan alarajana on yleensä ollut käyttövesijohdoissa 600...700 mm ja jätevesijohdoissa 300...400 mm /14/.

Tällaiset tunnelit tulevat taloudellisiksi yleensä vain tiheään asutuilla alueilla, jossa vastaava maanpäällinen johto jouduttaisiin rakentamaan ja huoltamaan ahtaiden liikenneväylien alueella tai vaikeissa pohjarakentamisolosuhteissa.

2.2 Johtotunnelit

Johtotunneleita ovat yhteiskäyttötunnelit, kaukolämpötunnelit ja erikseen rakennetut puhelinkaapeli-, sähkökaapeli- ja kaasujohtotunnelit /6/, joita tehdään hyvin harvoin ja joiden pituus on usein vain muutamia kymmeniä metrejä. Yhteiskäyttö- ja kaukolämpötunnelit sen sijaan ovat yleisempiä ja ne ovat pituudeltaan jopa useita kilometrejä. Poikkileikkauksen pinta-alat ovat yleensä 12...20 m²:n välillä, koon vaihdellessa lähinnä käytön aikaisten tilavaatimusten perusteella.

Yhteiskäyttötunnelit

Sijoittamalla johdot, putket ja kaapelit yhteiseen, kallioon louhittuun tunneliin, ns. yhteiskäyttötunneliin, saavutetaan sekä välitöntä että välillistä hyötyä. Katujen aukirepimiset jäävät suurimmaksi osaksi pois sekä rakennus- että käyttöaikana. Tunneleissa olevat verkostot ovat turvassa liikenteen ja kaivutöiden aiheuttamilta vaaroilta, joten korjaustöiden määrä vähenee. Toisaalta huolto helpottuu, koska verkostot ovat näkyvissä. Tunnelissa olevan verkoston kapasiteettia on lisäksi helpompi laajentaa, koska tunneli on

jatkuvasti "auki". Putkistojen ja kaapelien asentaminen tunneliin on myös usein halvempaa kuin asentaminen maakana-
viin /13/.

Parhaiten yhteiskäyttötunnelit soveltuvat kaupunginosien välisten siirtoverkkojen sijoittamiseen. Jakeluverkostossa useat yhteydet pintaan nostavat kustannuksia. Paras hyöty tunneleista saataisiin uusilla alueilla, jolloin jo suunnitteluvaiheessa on mahdollista luoda kokonaisvaltainen tunneliverkosto.

Kaukolämpötunnelit

Kaukolämpötunneleille on verrattuna pintavaihtoehtoon oleellista paitsi edulliset rakentamiskustannukset myös, että tunnelivaihtoehdon toimintavarmuus käytön aikana on parempi. Kokemusten mukaan 3/4 kaikista betonielementtirakenteissa kaukolämpökanavissa tapahtuneista putkistovaurioista johtuu ulkopuolisista tekijöistä, kuten maan painumista, ulkopuolisen veden ja kosteuden aiheuttamista syöpymistä ja vieraitten suorittamista kaivutöistä. Tunnelissa putkisto on suojassa näiltä vauriotekijöiltä. Myös suuret eristyspaksuudet ovat riittävästä tilasta johtuen helppo asentaa. Putkiston ja laitteiden tarkastus ja ennakkohuolto on helppoa. Lisäksi vaurion tapahtuessa se voidaan paikallistaa ja korjata nopeasti, mikä on erittäin tärkeää silloin, kun siirtolinjaa ei voida korvata toisella /8/.

3. TUNNELEIDEN LOUHINTA KAUPUNKIALUEELLA

Louhiminen kaupunkialueella tuo mukanaan omat ongelmansa. Tunnelilinjan päällä ja läheisyydessä olevat rakennukset saattavat vaurioitua räjäytysten yhteydessä, mikäli louhinnan aiheuttamat tärinät ovat liian suuria. Louhintatärinöitä voidaan kuitenkin pienentää käyttämällä tärinätekniillisesti oikeaa avausmenetelmää, lyhentämällä katkoa ja käyttämällä oikeaa sytytysjärjestelmää. Nämä edellä mainitut toimenpiteet nostavat miltei poikkeuksetta louhintakustannuksia. Lisäkustannuksia asutuskeskuslouhinnoissa aiheutuu lisäksi seuraavista tekijöistä /18/:

- ilmanpainevaaroista aiheutuvat
- vakuutuskustannukset
- talokatselmuksista aiheutuvat
- tärinämittauksen suorituksen aiheuttamat kustannukset.

Rakennettavan tunnelin tiiveyteen on kiinnitettävä erityistä huomiota asutuskeskuksissa. Pohjaveden pinnan alenemisen seuraukset ovat taloudellisesti merkittäviä rakennetuilla savikkoalueilla.

Pohjaveden pinnan alenemisen seuraukset ovat /6/:

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

Pitkiä tunneleita louhittaessa tarvitaan tunnelilinjalle ajotunneleita, joiden kautta louhe nostetaan tunnelista maan pinnalle. Ajotunneleita pitkin viedään tunneliin lisäksi tuuletusilmaa, sähkövirtaa ja porausvettä ja toisaalta vuotovesiä ja räjähdyskaasuja. Kaupunkialueella on tällaisten

ajotunnelien sijoittaminen hyvin vaikeaa. Mikäli ajotunneleita ei voida sijoittaa louhintatyön kannalta parhaaseen mahdolliseen kohtaan, on siitä seurauksena louhintakustannusten kasvaminen.

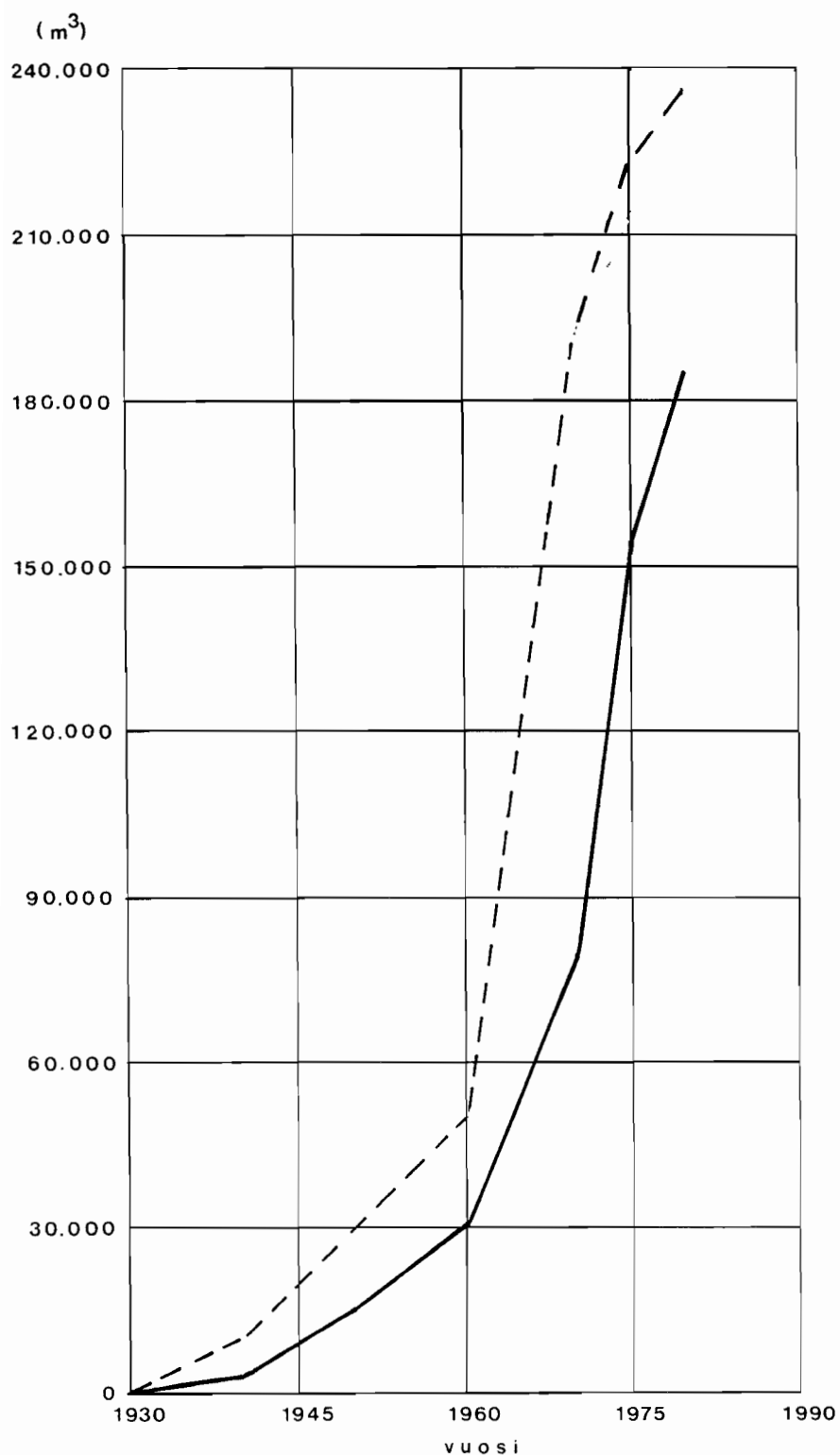
3.1 Tunnelirakentamisen kasvu Helsingissä

Helsinki on hyvä esimerkki kaupungista, jossa tunnelirakentaminen on jatkuvasti lisääntynyt. Rakentaminen alkoi lisääntyä varsin voimakkaasti 1960-luvulla. Kuvassa 1 sivulla 9 on esitetty tunnelirakentamisen kehitystä Helsingissä.

3.2 Pintavaihtoehdon ja tunnelivaihtoehdon kustannusvertailu

Helsingin rakennuspohja tuottaa kasvavia vaikeuksia rakentamiselle. Helsingin pinta-alasta on jopa 35 % savialuetta. Kun rakentaminen tällä hetkellä suuntautuu monesti näille alueille, muodostuu putkijohtojen rakentaminen vaikeaksi. Valtion Teknisen Tutkimuskeskuksen geotekniikan laboratorio on tehnyt kustannusselvityksen putkistojen kanava- ja perustuskustannuksista. Näissä selvityksissä on todettu, että putkijohdon kanavakustannus saattaa tulla esimerkiksi 15 metrin paksuisella savialueella tietyssä tapauksessa jopa 4000 mk/m (vuoden 1977 hintataso). Kun vastaavasti kallioon sijoitettavan pientunnelin rakennuskustannus jää usein alle 2000 mk/m (vuoden 1977 hintataso), on kalliotunneli varteenotettava vaihtoehto kunnallistekniikan rakentamisessa /2/.

Taulukossa 1 /15/ sivulla 10 on esitetty maanpintaan ja tunneliin asennettujen putkien ja kaapelien kustannusvertailu. Kustannukset koskevat suoraa linjaa, eikä niihin ole lisätty tunnelin louhintakustannuksia. Taulukossa viivalla merkittyjen putkien asentamisessa saavutetaan noin 4400 mk:n säästö metriä kohti (vuoden 1980 hintataso). Tällainen yhdistelmä vaatii noin 20 m² tunnelin, jonka hinta on noin 3000 mk/m. Tällöin kokonaissäästö on noin 1400 mk/m tällaisessa yhteiskäyttötunnelissa.



Kuva 1. - - - Helsingin kaupungin Vesilaitoksen tunnelirakentamisen kehitys vuodesta 1930 vuoteen 1980.
 — Helsingin kaupungin Rakennusviraston katurakennusosaston viemäritunnelien rakentamiskehitys vuodesta 1930 vuoteen 1980.

Taulukko 1. Yhteenveto eri johtojen rakentamiskustannuksista maanpinnassa ja tunnelissa, vuoden 1980 kustannustaso /15/.

Johto	Johto- koko mm	Kust. maan- pinn. mk/m	Kust. tunn. mk/m ¹⁾	Erotus mk/m
Vesi	600	1600	600	<u>1000</u>
Kaukolämpö	400	2250	1260	990
	500	2800	1500	1300
	600	3400	1740	<u>1660</u>
	700	4300	2140	2160
Viemäri	300	900	180	720
	600	1470	360	<u>1110</u>
	1200	2300	880	1420
110 kV sähkökaapeli- yhteys ja viesti- kaapelit	100	1434	944	<u>490</u>
Paikallispuhelin- kaapeli (1200 paria)		349 (kanavassa) 316	254	<u>95</u> (62)
Kaukopuhelinkaapeli (Ko-kaapeli)		255 (kanavassa) 240	175	<u>80</u> (65)
				4435 ²⁾

1) Tunnelin louhintakustannuksia ei ole laskettu mukaan.

2) Summaan on laskettu yhteen alleviivatut luvut.

4. KUSTANNUSVERTAILU ERI TUNNELINAJOMENETELMIEN KESKEN /3/

Seuraava karkea kustannusvertailu voidaan esittää tavanomaisen tunnelinajolaitteiden pneumaattinen/hydraulinen/täysprofiilitunnelikone välillä. Esimerkissä on otettu lähtökohdaksi tunneli, jonka poikkileikkaus on 20 m^2 ($\varnothing 5 \text{ m}$), pituus 10 km. Vertailussa on huomioitu vain kiven irrotuskustannukset. Esitetyt kustannukset ovat vuoden 1976 hintatasoa, jonka vuoksi vertailuun on syytä suhtautua varauksella, etenkin, kun laitteet ovat vuodesta 1976 kehittyneet olennaisesti, ja esimerkiksi energiakustannukset ovat kasvaneet muita kustannuksia selvästi enemmän.

Vertailtavat laitteet:

- Pneumaattinen 4-puominen kumipyöräalustainen jumbo, jonka hinta on noin 800 000 mk (vuonna 1982 noin 1 600 000 mk)
- Täyshydraulinen 3-puominen kumipyöräalustainen jumbo, jonka hinta on noin 1 400 000 mk (vuonna 1982 noin 2 000 000 mk)
- Kokoprofiilitunnelinajokone $\varnothing 5 \text{ m}$, jonka hinta on 6 500 000 mk (vuonna 1982 noin 13 000 000 mk)

Kuoletusaika laitteille 5 vuotta. Pääoman korko 12 %.

Irrotuskustannukset/tunnelimetri

	pneumaattinen	hydraulinen	täysprofiili
Kalustokust.	280 mk	238 mk	3250 mk
Varaosakust.	150 "	135 "	500 "
Käyttökust.	150 "	120 "	300 "
Energia	20 "	6 "	120 "
Räjäytyskust.	150 "	150 "	-
yht.	750 mk	650 mk	4170 mk
Invest.kust.	110 "	190 "	880 "
Irrotuskust./ metri yhteensä	860 mk	840 mk	5050 mk

Käytännössä ei tässä esimerkissä hydraulisella ja pneumaattisella ratkaisulla ole merkittävää eroa.

Lähtökohtana kustannusvertailulle on ollut mm.:

- kalustokustannukset hydraulisella jumbolla oletettu 15 % pienemmiksi kuin pneumaattisella ja varaosakulutus hydraulisella jumbolla oletettu 20 % pienemmäksi kuin pneumaattisella
- kWh-hinnaksi otettu 18 p (vuonna 1982 noin 30 p)
- räjähdysaineiden ja nallien sekä panostuksen hinta yhteensä 5 mk/kg (vuonna 1982 noin 10 mk/kg)
- palkkakustannukset 50 mk/h/mies (vuonna 1982 noin 65 mk/h/mies).

4.1 Hydraulisen ja pneumaattisen porauksen vertailu /5/

Verrattaessa keskenään pneumaattista ja hydraulista porausta kustannusten osalta on tilanne helpoin silloin, kun valinta on joko-tai-pohjalla, eli hydraulisessa porauksessa ei mikään työvaihe vaadi paineilmaverkostoa eikä pneumaattisessa versiossa tarvita kaapelointia lainkaan. Näin ei kuitenkaan lähes aina ole.

Mielenkiintoalueet kustannusvertailussa ovat hankittavat suuremmat komponentit (porausajoneuvot, kompressorit ja muuntajat), jatkuvasti hankittava materiaali ja vastaavasti kulut (putket, kaapelit, energia, porakalusto yms.) sekä palkkakulut.

Porauslaitteiden hintojen suhde on karkeasti sellainen, että kun esimerkiksi 2-puominen pneumaattinen Minimatic maksaa noin 600 000 mk (vuoden 1979 hintataso), on vastaavan sähköhydraulisen yksikön hinta noin 60 - 70 % korkeampi. Jälkimmäisen porausteho on kokemusten mukaan noin 50 % korkeampi. Jos ajatellaan samaa poraustehoa, on pneumaattiseksi vertauskohteeksi valittava Paramatic 3-puomisena. Nyt hintaero

supistuu 30 %:iin. Markkamääräisesti ero on luokkaa 350 000 mk (2/2-puomiset) tai 210 000 mk (2/3-puomiset).

Kompressorien hintoina maksaa kukin tuotettu $10 \text{ m}^3/\text{min}$ noin 65 000 mk. Näin ollen tavallinen pientunnelin paineilma-asema, $40 \text{ m}^3/\text{min}$, vaatisi 260 000 mk:n kompressoriotot. Vastaavasti muuntajien hinnat ovat suhteellisen alhaiset, 20 000 - 30 000 mk/kpl koosta riippuen.

Edellä olevasta voidaan todeta, että samaan poraustehoon pyrittäessä pneumaattinen porausajoneuvo kompressoreineen ja muuntajineen maksaa 50 000 - 60 000 mk enemmän kuin hydraulinen porauslaite muuntajineen.

Paineilmaputki- ja kaapelikustannuksissa asennustöineen ja muuntajan siirtoineen ei kovin suuria eroja synny. Monin paikoin on todettu, että jos 6 tuuman paineilmaputki riittää, ovat metrikustannukset samat, 60 - 70 mk. Jos tunnelin pituuden takia on valittava 8 tuuman putki, syntyy eroa noin 30 mk/metri hydraulisysteemin eduksi.

Energiasäästö esitetään tavallisesti yhtenä painavimmista argumenteista hydrauliiikan puolesta. On selvää, että energiaa säästyy - ero on noin 60 - 70 %. Kuitenkin tämän markkamääräinen osuus kustannuksista on suhteellisen alhainen. Pientunnelissa pneumaattisilla koneilla energiaa käytetään 10 - 20 mk/metri, hydraulisilla 3 - 7 mk/metri.

Varaosakulutus on suuressa määrin asiakas- ja tilannekohtainen eikä kertyneen tilaston pohjalta mitään selvää eroa ole syntynyt. Tapauksia kumpaankin suuntaa on ollut. Kokonaisero markkoina on yleensä jäänyt merkityksettömän alhaiseksi.

Porakaluston kestoikä on hydraulikoneilla todettu yleensä paremmaksi kuin pneumaattisilla koneilla. Säästöksi arvioidaan etukäteislaskelmissa tavallisesti 10 - 20 %. On kuitenkin muistettava, että kaikki riippuu siitä, millä teholla konetta ajetaan. Onhan jo edellä todettu, että jos tähdätään samaan kaluston elinikään porametreinä, voidaan tunkeutumisenopeutta hydraulikoneilla nostaa 50 - 100 %. Jos tyydytään

alempaan tehoon, kasvaa poran elinikä. Toisaalta on mahdollista myös nopeuttaa työtä enemmänkin kaluston kustannuksella.

Porarien palkkakulut tunnelimetriä kohti riippuvat ennen kaikkea työryhmän kokoonpanosta ja vertailukohdista. Jos porauslaitteet perustuvat samaan tehoon, esimerkiksi 3-puominen pneumaattinen ja 2-puominen hydraulinen ja yksi porari hoitaa kummankin, on lopputulos palkkojen osalta muuttumaton. Jos taas verrataan keskenään 2-puomisia laitteita tai oletetaan 3-puomisen paineilmalaitteen vaativan kaksi poraria, säästyy palkkoja porauksen osalta.

Huolto ja kunnossapito työllistävät miehiä suunnilleen saman verran kummassakin vaihtoehdossa.

Kustannusten osalta voidaan vertailusta sanoa, että useimmissa tapauksissa erot ovat pieniä ja ne saadaan ilman kovin väkivaltaista käsittelyä antamaan juuri haluttuun suuntaan olevan lopputuloksen. Työolosuhteiden parantamisessa hydrauliporauksella on edut puolellaan, samoin, jos poraus-tehoa on saatava mahdollisimman paljon pieneen tunneliin.

5. LOUHINTAKUSTANNUSTEN JAOTTELU

Tunnelirakennuskohteiden kustannustekijät voidaan jakaa välittömiin ja välillisiin kustannuksiin. Urakoitsijat käyttävät usein jaottelua, jossa kustannukset jaetaan erillis- eli työkustannuksiin ja yhteiskustannuksiin.

5.1 Välittömät kustannukset

Välittömät kustannukset ovat kokonaan tietyn suoritteen aiheuttamia. Näiden osuus kokonaiskustannuksista on yleensä 50 - 80 %, kun on kyse tunnelirakennuskohteesta. Työmaan välittömien kustannusten jaottelu voidaan suorittaa esimerkiksi seuraavasti:

- a) Paineilma 8 - 15 % välittömistä kustannuksista
 - kompressorit
 - paineilmalinjat
- b) Irrotuskalusto 5 - 10 % välittömistä kustannuksista
 - porauskalusto
 - panostus- ja laukaisukalusto
 - teline- ja erikoiskalusto
- c) Poraus ja panostus 15 - 20 % välittömistä kustannuksista
 - poraus ja panostus
 - porakalusto, terotus
 - porakoneiden varaosat ja voitelu
- d) Räjähdysaineet 8 - 15 % välittömistä kustannuksista
- e) Varustelu 10 - 20 % välittömistä kustannuksista
 - vesihuolto
 - ilmanvaihto
 - sähköistys, valaistus

- f) Louheen käsittely 15 - 40 % välittömistä kustannuksista
- kuormaus
 - kuljetus
 - rusnaus
 - kuljetustiet

5.2 Yhteiskustannukset

Yhteiskustannukset ovat kustannuksia, jotka ovat yhteisiä useille suoritteille (tai muille kustannuspaikoille) ja joita ei tietyssä loushintatilanteessa voida selvän syy-yhteyden perusteella kohdistaa millekään suoritteelle. Yhteiskustannusten osuus on yleensä 20 - 35 % tunnelirakennuskohteiden kokonaiskustannuksista.

Työmaan yhteiskustannukset muodostuvat mm. seuraavista tekijöistä:

- a) Työnjohto
- vastaava mestari
 - työnjohtajat
- b) Toimistokustannukset
- konttoristi
 - puhelin
 - toimistotarvikkeet
- c) Työmaarakennukset
- toimisto
 - sosiaalitilat
 - ruokala
 - korjaamo
 - varastot
- d) Työntekijöiden huolto
- työasut
 - majoitus
 - virkistystoiminta

- e) Koneet ja kalusteet
 - yleisten työkalujen hankinta ja vuokra
 - koneiden ja kaluston siirrot
 - koneiden ja kaluston huolto
- f) Työturvallisuus
- g) Kuljetukset
 - perustamis- ja purkukuljetukset
 - rahdit
- h) Mittaukset ja laadunvalvonta
 - mittaryhmä, mittakonsultti
 - värinämittaukset
 - maarakennustöiden laadunvalvonta
 - maaperätutkimukset
- i) Työmaan loppusiivoukset
- j) Muut yhteiskustannukset
 - asiantuntijat
 - katselmukset
 - vakuutukset
 - neuvottelut
 - vartiointi
 - aluevuokrat
 - vahingonkorvaukset
 - vakuudet

Kun näihin edellä esitettyihin välittömiin- eli työmaakustannuksiin ja yhteiskustannuksiin lisätään kate, yleinen kustannustason nousu, riski ja rahoitus, saadaan näiden kaikkien summana tunnelirakennuskohteen kokonaishinta.

6. TUNNELILOUHINNAN SUUNNITTELUSSA HUOMIOONOTETTAVAT KUSTANNUSMUUTTUJAT

Pyrittäessä suunnittelemaan tunneleista sellaisia, että niiden louhinta tulee mahdollisimman edulliseksi, on suunnittelijalla oltava tiedossa tarkkaan eri tekijöiden vaikutus louhintakustannuksiin. Tässä selvityksessä käytetään näistä kustannuksiin vaikuttavista tekijöistä nimeä kustannusmuuttajat. Tällaisia kustannusmuuttajia ovat mm.:

- tunnelin poikkileikkauksen pinta-ala
- tunnelin poikkileikkausmuoto
- tunnelin ja perän pituus
- tunnelin kaltevuus
- tunnelin korkeusasema
- tunnelin linjaus
- tutkimukset
- kallion laatu
- pohjavesiolosuhteet
- louhintamenetelmä (1- tai 2-perälouhinta)
- ajotunnelit
- louhintatyön rytmitys
- louhintatyön aikataulu
- käytettävissä oleva kalusto
- työvoima
- työn laatuvaatimukset

Edellä mainittujen kustannusmuuttajien vaikutus louhintakustannuksiin ei ole yksiselitteinen, sillä monet kustannusmuuttajat vaikuttavat toisiinsa, jolloin on vaikeaa saada tarkkaa selvyyttä siitä, mikä itseasiassa on syynä siihen, että kustannukset käyttäytyvät tietyllä tavalla. Kappaleissa 7 - 21 pyritään kuitenkin mahdollisimman yksityiskohtaisesti analysoimaan esitettyjen kustannusmuuttajien merkitystä louhintatyöhön ja sen kustannuksiin.

7. POIKKILEIKKAUKSEN KOON VALINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tunnelin poikkileikkauksen koon valintaan vaikuttavat mm. seuraavat tekijät:

- tunnelin käyttötarkoitus
- työtekniikka
- tunnelin pituus
- kuljetus- ja kuormauskalusto
- tuuletustarve
- kallion laatu

Poikkileikkauksen kokoa suunniteltaessa on lähtökohtana, että tunnelin on oltava vähintään niin suuri kuin sen käyttötarkoituksen kannalta on tarpeellista. Tämä käyttötarkoituksen vaatima tilakoko on kunnallisteknisissä tunneleissa usein niin pieni, että tällaisen tunnelin louhiminen ei olisi taloudellisesti kannattavaa eikä myöskään työteknisesti helppo toteuttaa. Tunnelikoon määrääväksi tekijäksi tulee usein, että tehdään niin pieni tunneli kuin on taloudellisesti kannattavaa louhia. Ratkaisevaksi tulee näin ollen työtekniikka, jolla tunneli aiotaan louhia. Jokaisessa rakennuskohteessa on harkittava erikseen mm., että suoritetaanko perän poraus kumipyöräalustaisilla porausjumboilla, kiskokalustolla vai käsiporakoneilla.

Käsiporakone on usein käytetty ja myös taloudellinen vaihtoehto, mikäli tunneli on hyvin lyhyt, esimerkiksi alle 500 m, ja poikkileikkaukseltaan pieni - rajana voidaan pitää 7 - 8 m² tai pienempi.

Kiskokalusto soveltuu parhaiten pitkiin, pienipoikkileikkauksellisiin tunneleihin. Mikäli tunnelin poikkileikkaus on 6 - 12 m² ja pituus vähintään 1500 m, on kiskokalusto usein taloudellisin vaihtoehto.

Kumipyöräkalusto on yleensä aina valittu vaihtoehto, mikäli tunnelin poikkileikkaus on suurempi kuin 12 m^2 .

Nämä edellä esitetyt porauskaluston valintaperusteena pidetyt tunnelin pituudet ja koot ovat käytännön kokemuksista saatuja ohjearvoja, joiden mukaan kaluston valinta usein tapahtuu, mutta jokaisessa rakennuskohteessa on kuitenkin aina erikseen laskettava, mikä vaihtoehto on taloudellisin.

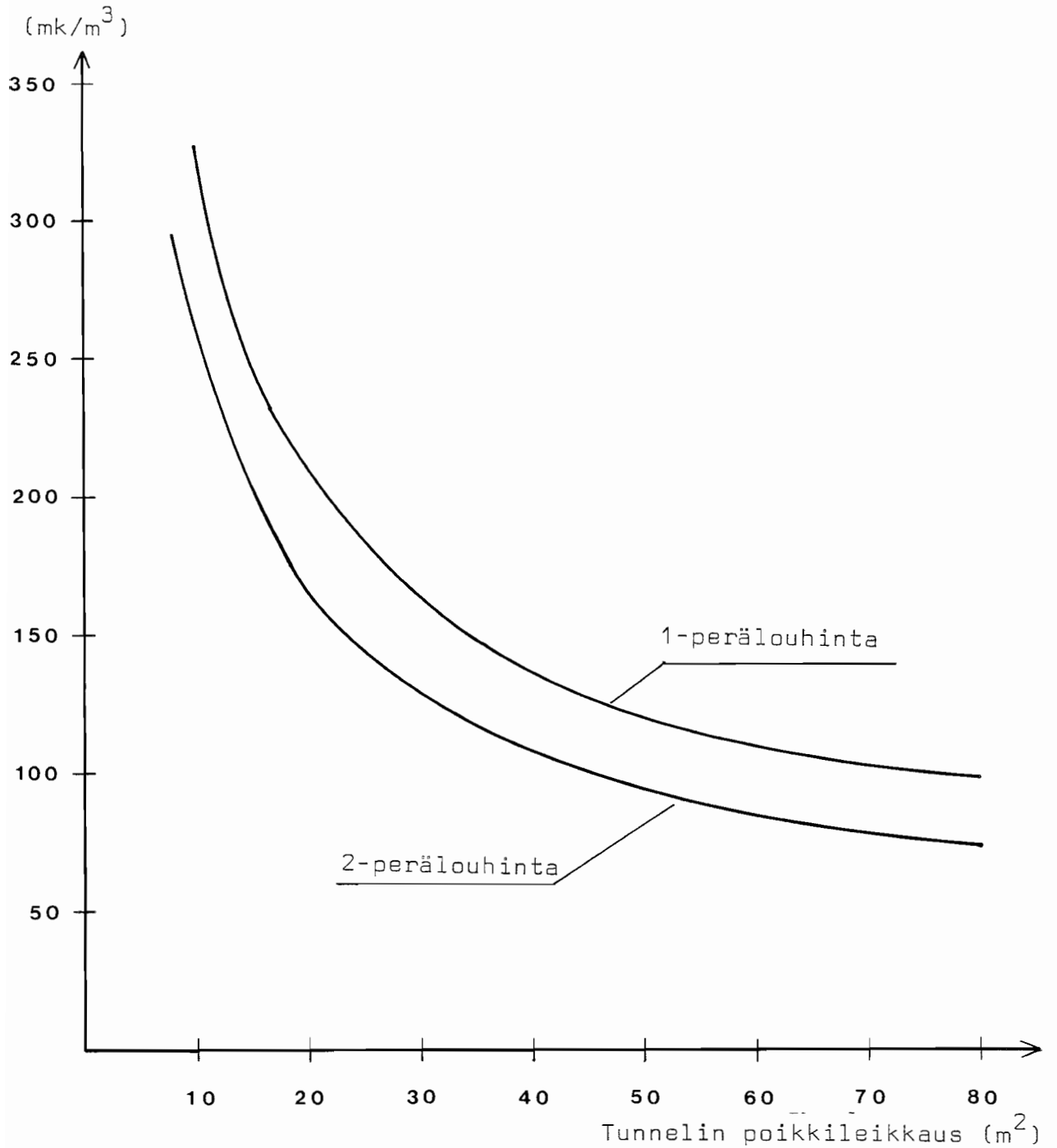
Kuormaus- ja kuljetuskaluston mitoitus tapahtuu yleensä sen periaatteen mukaan, että esimerkiksi 2-perälouhinnassa porauskalustolle ei tulisi odotusaikoja, vaan porausjumbo voisi toimia täystehoisesti jatkuvasti. Tämä merkitsee sitä, että valitaan niin suuri kuormauskone kuin tunneliin mahtuu ja mitoitetaan kuljetuskalusto lastauskapasiteetin mukaan. Yleensä juuri kuormaus- ja kuljetuskalusto määräävät pientunneleissa sen minimipoikkileikkauksen, jolla työ pystytään suorittamaan.

Kun on valittu kalusto, jolla tunneli louhitaan, on seuraava vaihe tuuletustarpeen mitoitus. Mitoitus perustuu yleensä ominaistuuletusarvoon eli siihen, kuinka monta kuutiometriä raitista ilmaa tarvitaan dieselmoottorin hevosvoimamäärää kohden minuutissa. Suomessa käytetään arvoa $2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ raitista ilmaa installoitua hevosvoimamäärää kohti. Tuuletusputken koon on oltava siis sellainen, että tämä ilmamäärä saadaan työpaikalle. Hyvin usein joudutaan tunnelin poikkileikkausta muuttamaan sen vuoksi, että tuuletusputkiston on mahduttava tunneliin siten, että työkonet eivät sitä työskennellessään riko.

Myös kallion laatu on huomioitava poikkileikkauksen kokoa valittaessa, sillä yleensä vahvistus- ja tukemistarve lisääntyvät, mikäli tunnelin koko kasvaa.

7.1 Poikkipinta-alan vaikutus tunnelin louhintakustannuksiin

Louhintakustannusten muuttumista poikkipinta-alan funktiona esittävät kuvat 2 sivulla 21 ja 3 sivulla 25. Esitetyt kustannukset ovat vuoden 1982 hintatasoa. Louhintakustannukset



Kuva 2. Louhinnan kuutiometrihinnat 1- ja 2-perälouhinnassa tunnelin poikkileikkauksen funktiona. Kyseessä on vuoden 1982 hintataso. Kustannusten vaihtelualuetta $\pm 10\%$ ei ole piirretty näkyviin.

on luonnollisesti laskettava kullekin kohteelle erikseen, mutta kuvien 2 ja 3 perusteella saadaan kuitenkin käsitys kustannusten muuttumisesta poikkipinta-alan funktiona.

7.2 Louhinnan kuutiometrihintojen analysointi

1-perälouhint

Kuvassa 2 esitetty ylempi käyrä esittää kuutiometrihinnan muutosta poikkileikkauksen koon kasvaessa, kun on kyse 1-perälouhinnasta. Kuvasta havaitaan, että kustannukset kuutiometriä kohti alenevat jatkuvasti, kun poikkileikkauksen koko kasvaa. Kuutiometrihintaa alenee aluksi hyvin jyrkästi, kun lähdetään aivan pienistä poikkileikkauksista suurempia poikkileikkauksia kohti. Esimerkiksi, kun verrataan keskenään 10 m²:n ja 15 m²:n tunneleita, havaitaan, että kuutiometrihintaa 15 m²:n tunnelissa on 20 - 30 % halvempi kuin 10 m²:n tunnelissa. Kuutiometrihinnan pudotus tunnelikoon kasvaessa 15 m²:stä 20 m²:iin on vielä 15 - 20 %, mutta välillä 20 - 25 m² enää 10 - 15 %.

2-perälouhint

Kuvassa 2 esitetty alempi käyrä esittää, kuinka kuutiometrihinnat muuttuvat 2-perälouhinnassa poikkileikkauksen koon kasvaessa. Käyrä on vastaavanlainen kuin 1-perälouhinnassa eli kustannukset kuutiometriä kohti alenevat jatkuvasti tunnelin koon kasvaessa. Esimerkiksi tunnelin koon kasvaessa 10 m²:stä 15 m²:iin alenevat kuutiometrikustannukset noin 20 - 25 %. Välillä 15 - 20 m² on kustannusmuutos vielä noin 20 %, mutta välillä 20 - 25 m² enää 10 - 15 %.

Tekijät, jotka vaikuttavat siihen, että kuutiometrihinnat sekä 1- että 2-perälouhinnassa alenevat jatkuvasti tunnelikoon kasvaessa, ovat mm. seuraavat:

- Resurssit eli työntekijöiden ja koneiden lukumäärä pysyvät likimain vakiona, vaikka tunnelikoko kasvaa.

- Yhdestä katkosta saatava kuutiometrimäärä kasvaa tunnelin koon kasvaessa, koska katkon pituus pysyy likimain vakiona. Esimerkiksi välillä 10 - 25 m² ovat käytetyt katkon pituudet yleensä aina noin 4 m.
- Tunnelikoon kasvaessa voidaan siirtyä aina suurempaan poraus-, lastaus- ja kuljetuskalustoon, jolloin päästään suurempiin kuutiometriteroihin työtuntia kohti.
- Investointikustannukset eivät kasva samassa suhteessa kuin tunnelikoko eli investointikustannukset kuutiometriä kohti alenevat tunnelin koon kasvaessa.
- Suurikokoisissa tunneleissa voidaan työtekniikkaa muuttaa eli osa poikkileikkauksesta louhitaan pengerlouhintana. Kaksiperälouhinnan kuutiokustannusten käyrästä kuvassa 2 havaitaan, että tunnelikoon kasvaessa kuutiometrihinta lähestyy vähitellen pengerlouhinnan kuutiometrihintoja.
- Suuri osa yhteiskustannuksista (vrt. kohta 5.2) ei muutu, vaikka tunnelikoko kasvaa eli yhteiskustannukset kuutiometriä kohti alenevat tunnelin koon kasvaessa.
- Tunnelin poikkipinta-ala vaikuttaa louhintakustannuksiin suunnilleen samassa suhteessa kuin porametrinen menekki/louhittu kuutiometri. Tästä syystä sillä, että ominaisporaus pienenee tunnelikoon kasvaessa on tärkeä merkitys kuutiohinnan alenemiseen.
- Ominaispanostus pienenee tunnelikoon kasvaessa, josta on seurauksena, että räjähdysainekustannukset kuutiometriä kohti alenevat.

1- ja 2-perälouhinnan vertailu

Kun verrataan keskenään kuvassa 2 esitettyjä 1- ja 2-perälouhinnan kustannuksia havaitaan, että 2-perälouhinta on jokaisella tunnelikoolla selvästi halvempaa. Markkamääräiset erot

kuutiohinnoissa ovat suurimmillaan pienillä poikkileikkauksilla. Esimerkiksi 10 m^2 :n tunnelin kuutiometrihinta on 2-perälouhinnassa noin 70 mk halvempi kuin 1-perälouhinnassa. Tunnelikoon kasvaessa pienenevät erot kuutiometrihinnoissa jatkuvasti ja esimerkiksi 50 m^2 :n tunnelin kuutiometrihinta on enää 30 mk halvempi 2-perälouhinnassa. Tämä markkamääräisen eron pieneminen johtuu siitä, että suurissa tunneleissa kuutiometrihinta on selvästi halvempi kuin pienissä tunneleissa. Kun verrataan hintaeroja prosentuaalisesti, havaitaan, että erot 1- ja 2-perälouhinnassa ovat samaa suuruusluokkaa kaikissa kokoluokissa. Esimerkiksi 10 m^2 :n tunnelissa on 1-perälouhintaa noin 25 %, 20 m^2 :n tunnelissa noin 30 %, 50 m^2 :n tunnelissa noin 30 % ja 70 m^2 :n tunnelissa noin 25 % kalliimpaa kuin 2-perälouhintaa.

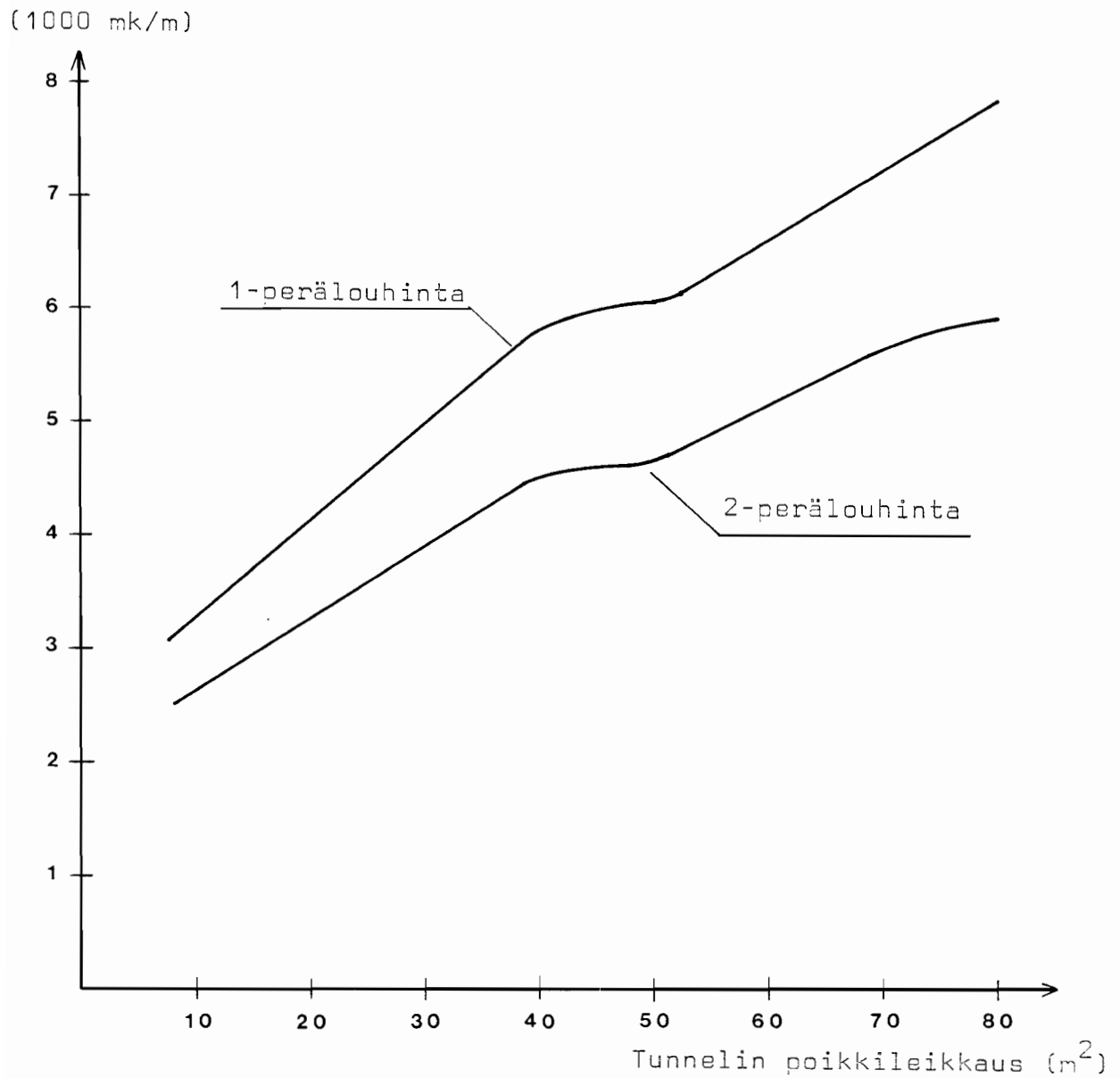
7.3 Louhintakustannukset tunnelimetriä kohti

1-perälouhintaa

Kuvan 3 sivulla 25 perusteella saadaan käsitys siitä, kuinka louhintakustannukset muuttuvat tunnelin juoksumetriä kohti 1-perälouhinnassa poikkileikkauksen koon kasvaessa. Kuvasta havaitaan, että metrihintaa kasvaa tasaisesti, kun tunnelikoko kasvaa 10 m^2 :stä noin 40 m^2 :iin. Välillä $40 - 50 \text{ m}^2$ on kasvu metrihinnoissa hyvin pieni, kunnes taas poikkileikkauksen kasvaessa suuremmaksi kuin 50 m^2 myös metrihintaa kasvaa tasaisesti. Yksi syy siihen, että louhintakustannukset metriä kohti välillä $40 - 50 \text{ m}^2$ eivät kasva yhtä voimakkaasti kuin muilla poikkileikkauksilla, on se, että työn luonne ja työtekniikka muuttuvat juuri näillä poikkileikkauksilla ja näin ollen tunnelikoon ollessa näin suuri, ei voida enää puhua varsinaisesta peränaajasta.

2-perälouhintaa

Kuvassa 3 sivulla 25 esitetty alempi käyrä esittää louhintakustannusten muuttumista tunnelin juoksumetriä kohti, kun louhintaa suoritetaan 2-perälouhintana. Kuvasta voidaan havaita, että louhintakustannukset tunnelin juoksumetriä kohti,



Kuva 3. Louhintakustannukset tunnelimetriä kohti 1- ja 2-perälouhinnassa tunnelin poikkileikkauksen funktiona. Kyseessä on vuoden 1982 hintataso. Kustannusten vaihtelualuetta $\pm 10\%$ ei ole piirretty näkyviin.

samoin kuin 1-perälouhinnassa, kasvavat välillä 10 - 40 m² tasaisesti, välillä 40 - 50 m² kasvu hidastuu ja taas suuremmilla poikkileikkauksilla kuin 50 m² on kasvu tasaista.

1- ja 2-perälouhinnan vertailu

Kuvasta 3 sivulla 25 voidaan havaita, että 2-perälouhinnan metrihintaa on kaikilla poikkileikkauksilla selvästi halvempi kuin 1-perälouhinnassa. Erot metrihinnoissa kasvavat markkamääräisesti jatkuvasti tunnelin koon kasvaessa, mikä johtuu siitä, että markkamääräinen ero 1- ja 2-perälouhinnan kuutiometrihinnoissa pienenee jatkuvasti tunnelin koon kasvaessa.

Taulukossa 2 on esitetty 1- ja 2-perälouhinnan kuutiometri- ja juoksumetrihinnat erikokoisille poikkileikkauksille. Esitetyt kustannukset ovat lähinnä suuntaa-antavia.

Taulukko 2. Yksi- ja kaksiperälouhinnan kustannukset
(vuoden 1982 hintataso)

Tunnelikoko m ²	Louhintakustannukset			
	1-perälouhinta		2-perälouhinta	
	mk/m ³ (±10 %)	mk/m	mk/m ³ (±10 %)	mk/m
10	330	3300	260	2600
20	210	4200	160	3200
30	170	5100	130	3900
40	145	5800	110	4400
50	120	6000	90	4500
60	110	6600	85	5100
70	100	7000	80	5600
80	95	7600	75	6000

Taulukosta käy ilmi, että 1-perälouhinta on kaikilla poikkileikkauksilla noin 30 % kalliimpaa kuin 2-perälouhinta.

8. TUNNELIN POIKKILEIKKAUSMUODON VALINTAPERUSTEET

Poikkileikkausmuotoa valittaessa saattaa tulla kysymykseen seuraavien tekijöiden huomioonottaminen:

- tunnelin käyttötarkoitus
- kallion laatu
- kuljetusmuoto ja työtekniikka
- tuuletusputkien sijoittaminen
- poikkileikkauspinta-alan koko
- kallion primäärijännitystila
- poikkileikkauspiirin erilaiset kustannukset
- suurin vaakasuora tai pystysuora jänneväli
- vesiolosuhteet
- porauksessa puomeilla oltava tasapainoinen käyttö

Esitettyjen lähtökohtien perusteella tulisi oikein painottamalla löytää kuhunkin kohteeseen tilamuoto, joka täyttää käytön aiheuttamat tavoitteet, on taloudellisin eikä aiheuta liikaa riskiä. Koska tavoitteiden täydellinen saavuttaminen ei useinkaan onnistu, muodostuu poikkileikkausmuodon valinnasta kompromissi, jossa eri tekijöitä oikein painottamalla pyritään tavoitteeseen.

Kunnalisteknisten tunneleiden poikkileikkausmuotoa valittaessa tulevat kysymykseen lähinnä tunnelin käyttötarkoituksen, kuljetusmuodon ja työtekniikan, tuuletusputkien sijoittamisen sekä kallion laadun huomioonottaminen.

Tunnelin poikkileikkausmuoto tulisi olla käyttötarkoituksen kannalta mahdollisimman edullinen. Esimerkiksi vesitunnelin poikkileikkauksen suunnittelulla on keskeinen vaikutus koko siirtojärjestelmän kustannuksiin.

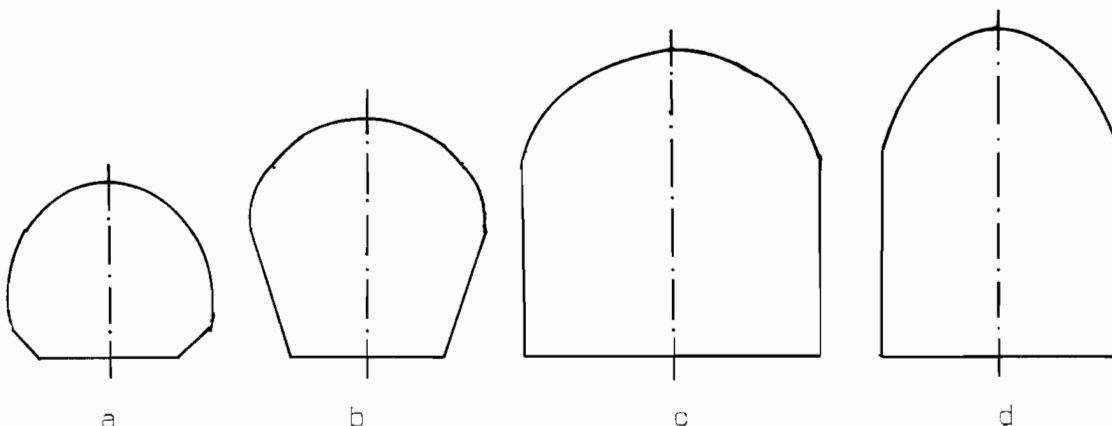
Painetunneleiden läpäisykykyyn vaikuttavat poikkileikkauksen koko, muoto ja seinämän karkeus. Läpäisykyky on poikkileikkauksen osalta suoraan verrannollinen pinta-alaan sekä

kääntäen verrannollinen märkäpiiriin ja seinämän karkeuteen. Sileäseinämäinen, ympyrän muotoinen poikkileikkaus on siis hydraulisesti edullisinta.

Kustannussyistä on poikkileikkaus kuitenkin valittava kompromissina tavallisten louhintamenetelmien ja hydraulikan vaatimusten väliltä. Katto-osan muodostaa yleensä ympyränkaari ja alaosan suorakulmio tai puolisuunnikas. Hydraulisesti edullisen alaosan, joko puolisuunnikkaan tai suorakulmion, sivut sivuavat puoliympyrää. Pohjan leveydellä ei ole ratkaisevaa merkitystä läpäisykyvylle, koska se voidaan tasata kattoa ja seinämiä sileämmäksi. Louheenkuljetuksen tapahtuessa kiskokalustolla on kapea pohja kuormauksen kannalta edullinen ja kuorma-autokuljetuksessa vastavasti suorakulmainen leveä pohja. Korkeus määräytyy ajoneuvojen ja tuuletusputkien vaatiman tilan perusteella.

Usein käytetty ratkaisu on, että tuuletusputket sijoitetaan tunnelin yläosaan keskelle tunnelia, jolloin tunneli muotoillaan sellaiseksi, että sen yläosa muistuttaa lähinnä kananmunanmuotoa. Tällaisella muodolla päästään tunnelin kokonaispoikkipinta-alaa muuttamatta siihen, että kuorma-autot ja lastauskoneet eivät liikkuessaan riko tuuletusputkia. Suunnitteluvaiheessa on aina huomioitava, että tuuletusputkien koko eli tuuletuksen vaatima tilantarve riippuu aina perän pituudesta.

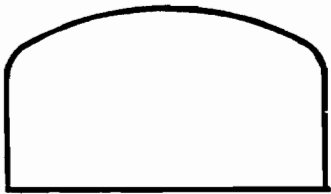
Kuvassa 4 on esitetty erilaisia painetunnelin poikkileikkauksia.



Kuva 4. Painedunnelin poikkileikkauksia. a) ja b) pienet tunnelit (raidekuljetus) c) ja d) keskikokoiset ja suuret tunnelit (kuorma-autokuljetus)

Kallion laatu on Suomessa melko harvoin tunnelin poikkileikkausmuodon määräävä tekijä. Pienissä tunneleissa saattaa kalliolaatu, lähinnä rakoilu, olla kuitenkin joskus se tekijä, jonka perusteella poikkileikkausmuoto valitaan.

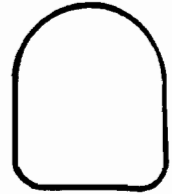
Kuvassa 5 on esitetty poikkileikkausmuodon valinta kallion rakenteellisen kiinteyden perusteella.



a)



b)



c)

Kuva 5. Poikkileikkausmuodon valinta kallion rakenteellisen kiinteyden perusteella /16/

- a) kiinteä kallio
- b) löyhä kallio
- c) rikkonainen kallio

9. TUNNELIN JA PERÄN PITUUDEN VAIKUTUS LOUHINTAKUSTANNUKSIIN

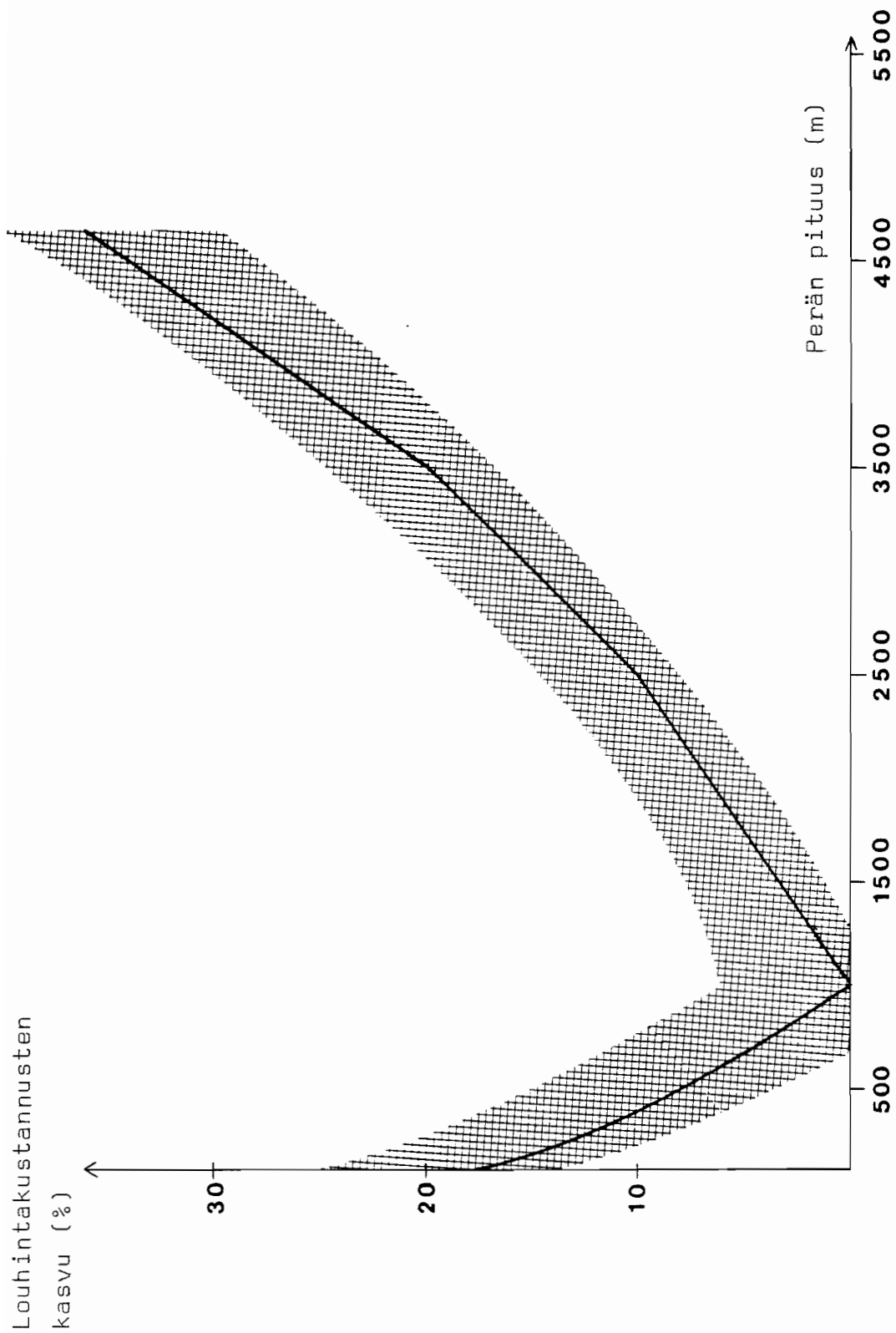
Tunnelin pituudella, jolla tässä yhteydessä tarkoitetaan lähinnä projektin kokoa, ei ole olennaista merkitystä louhinnan kokonaiskustannusten vertailussa, sillä louhintatyömaan perustavat kustannukset (rahtikustannukset työmaalle tulosta, katselmukset, vastuuvakuutukset, sosiaaliset tilat) ovat tietyn suuruiset työmaan koosta riippumatta.

Perän pituudella sen sijaan on merkitystä louhinnan kuutiometrikustannuksiin. Suunnitteluvaiheessa tulee usein verrattavaksi, että tehdäänkö pitkiä periä vai kannattaako louhia tunnelilinjalle ajotunneleita. Yksi valintakriteeri on luonnollisesti taloudellisuus, mutta kaupunkialueilla usein myös ympäristönäkökohdat.

Perän pituuden kasvaessa muuttuvat louhinnan suhteelliset kuutiometrikustannukset hieman eri tavalla eri kokoisilla poikkipinta-aloilla. Kuvassa 6 sivulla 31 on kuitenkin pyritty esittämään, kuinka pientunneleiden louhinnassa yleensä perän pituus vaikuttaa louhinnan kuutiometrikustannuksiin. Kuva 6 perustuu urakoitsijoiden käytännön kokemuksiin noin 2500 - 3500 metrin peräpituuksiin saakka ja siitä pidemmällä perillä lähinnä suoritettuihin laskelmiin.

Urakoitsijoiden mukaan louhintakustannukset muuttuvat suunnilleen samalla tavalla perän pituuden kasvaessa olkoonpa kyse 1- tai 2-perälouhinnasta. Tästä syystä ei kuvassa 6 ole 1- ja 2-perälouhintaa eroteltu, vaan on esitetty ainoastaan kustannusten vaihtelualue ja käyrä, jonka mukaan kustannukset useinmiten muuttuvat perän pituuden kasvaessa.

Halvimpiin kuutiometrikustannuksiin päästään urakoitsijoiden mukaan usein silloin, kun perän pituus on noin 1000 metriä. Tämä vaihtelee kuitenkin melko paljon eri kohteissa, jota kuvaa käyrän ympärille piirretty kustannusten vaihtelualue.



Kuva 6. Louhinnan kuutiometrikustannusten kasvu perän pituuden kasvaessa.

Käyrästä havaitaan, että louhinnan kuutiometrikustannukset alenevat jatkuvasti, kun lähdetään liikkeelle aivan lyhyistä peristä 1000 metrin pituista perää kohti. Esimerkiksi 500 metrin perässä ovat kuutiometrikustannukset noin 8 % kalliimmat kuin 1000 metrin perässä. Kustannukset kasvavat tasaisesti peräpituuksien 1000 - 2500 m välillä, kunnes 2500 metrin perän pituudella tapahtuu kustannuksissa pieni hyppäys. Tätä pidemmissä perissä kuutiometrikustannukset kasvavat taas tasaisesti, kunnes 3500 metrin kohdalla tapahtuu pieni hyppäys. Kun verrataan esimerkiksi 1000 ja 3500 metrin pituisten perien kustannuksia keskenään, havaitaan, että kuutiometrikustannukset ovat 3500 metrin perässä noin 20 % kalliimmat.

Esitettyjen tulosten analysointi

Perän pituuden kasvaessa lisääntyvät mm. tuuletuskustannukset, louheen kuljetuskustannukset sekä varustelinjojen huoltokustannukset. Kaksiperälouhinnassa aiheutuu lisäkustannuksia myös siitä, että perän pituuden kasvaessa lisääntyy se aika, joka kuluu koneiden ja miesten siirtymiseen perästä toiseen. Perän pituuden kasvaessa riittävästi aiheutuu lisäkustannuksia myös siitä, että joudutaan louhimaan tuuletuskuilu, jonka tekeminen on hyvin kallista. Perän pituuden kasvu aiheuttaa toisaalta sen, että investointikustannusten ja louhintatyömaan perustavien kustannusten osuus louhittua kuutiometriä kohti laskee.

Urakoitsijat ovat selvästi sitä mieltä, että investointikustannukset ja työmaan perustavat kustannukset vaikuttavat kuutiometrikustannuksiin korottavasti lyhyillä perän pituuksilla. Tunnelin pituuden ollessa noin 1000 m saavutetaan optimi, jolloin investointikustannukset ja työmaan perustavat kustannukset kuutiometriä kohti ovat jo melko pienet ja toisaalta tuuletus- ja kuljetuskustannukset eivät vielä ole kasvaneet kovin suuriksi. Tuuletuskuilun louhinta perän pituuden ollessa noin 2500 m aiheuttaa kuvassa 6 esitetyn pienen hyppäyksen kustannuksissa ko. kohdalla.

Urakoitsijoiden esittämästä käyrästä voidaan siis selvästi havaita, mikä on investointikustannusten, työmaan perustavien kustannusten, tuuletus- ja kuljetuskustannusten, kaluston ja miesten siirtokustannusten sekä kuilujen louhintakustannusten vaikutus kuutiometrikustannuksiin, kun perän pituus kasvaa.

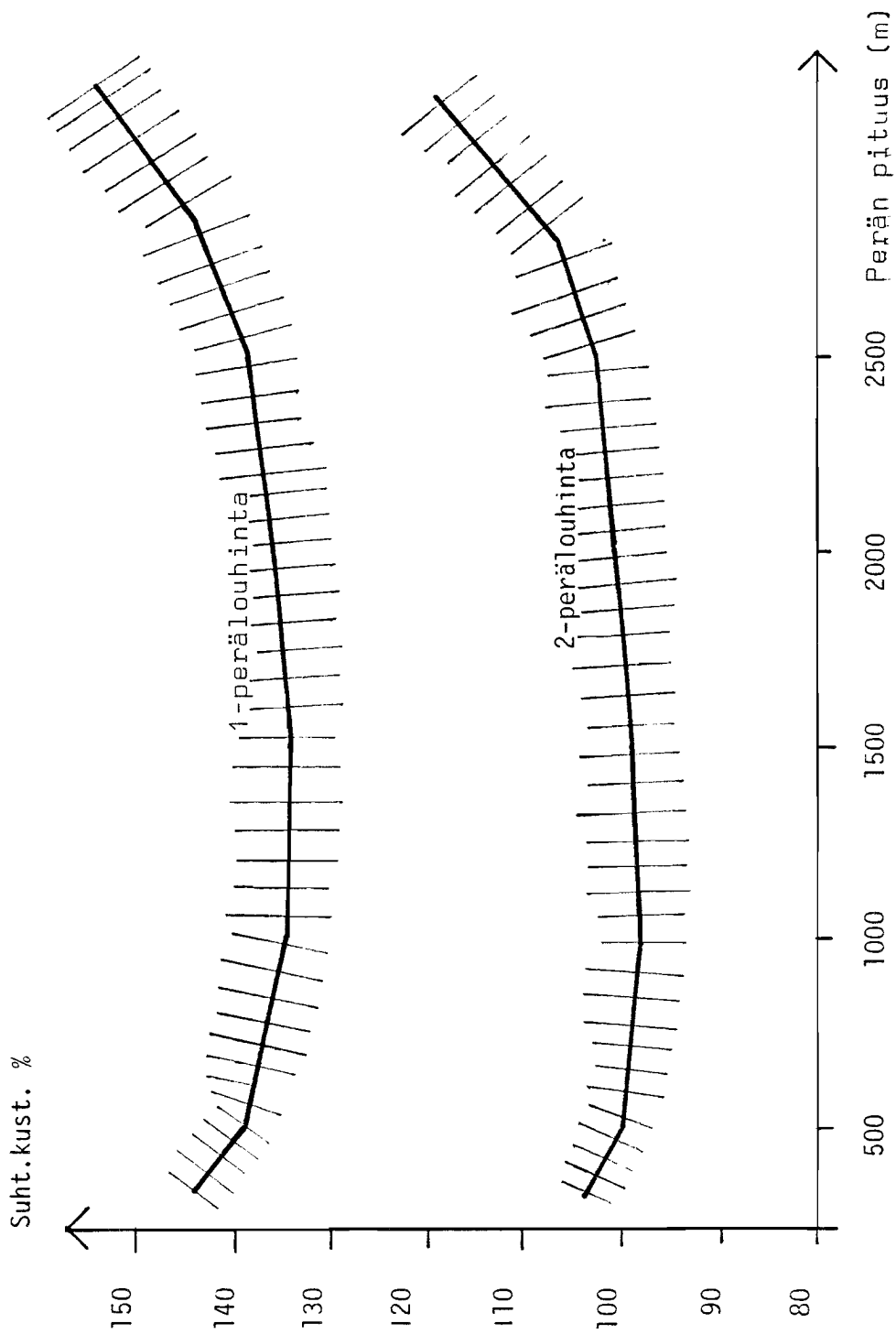
9.1 1- ja 2-perälouhinnan kustannusvertailu perän pituuden kasvaessa

Kuvassa 7 sivulla 34 on esitetty urakoitsijoiden näkemys siitä, kuinka suhteelliset kustannukset muuttuvat 1- ja 2-perälouhinnassa perän pituuden kasvaessa. Esitetyt käyrät eivät ole sidottuja tiettyyn peräkokoon, vaan niillä on pyritty kuvaamaan pientunneleiden louhintaa yleensä (vertailu suoritettu lähinnä kuutiometrihintoihin perustuen). Kuvasta havaitaan, että urakoitsijoiden mukaan ovat suhteelliset kustannukset 1-perälouhinnassa kaikilla perän pituuksilla noin 30 % kalliimmat kuin 2-perälouhinnassa. Yksi- ja kaksiperälouhinnan käyrien ympärille on piirretty kustannusten vaihtelun tarkoituksena osoittaa sitä, että kustannukset vaihtelevat eri kohteissa jonkin verran. Eroja eri kohteissa syntyy lähinnä kuljetuskustannusten melko suurista vaihteluista.

Kuvasta 7 havaitaan, että ero 1- ja 2-perälouhinnan kustannuksissa on suunnilleen sama kaikilla perän pituuksilla. Asetettava kysymys on kuitenkin se, että mikä on kustannusero tietyn pituisessa tunnelissa eli esimerkiksi, jos louhitaan 1 km:n tunneli on perän pituus 1 km 1-perälouhinnassa ja 500 m, jos työ tehdään 2-perälouhintana.

Edellä mainittua asiaa selventää seuraava esimerkki, joka osoittaa sen, että louhintakustannukset tunnelin juoksumetriä kohti tulevat 2-perälouhinnassa verrattuna 1-perälouhintaan sitä edullisemmaksi, mitä pidemmästä tunnelista on kyse. Käytettävät metrihinnat on saatu taulukosta 2 sivulta 26 ja perän pituuden vaikutus louhintakustannuksiin on otettu urakoitsijoiden antamista arvoista (kuvan 6 käyrä).

Esimerkki: On louhittava 2500 metrin pituinen tunneli, jonka poikkipinta-ala on 20 m^2 . Työ voidaan suorittaa kokonaan



Kuva 7. Perän pituuden vaikutus louhinnan suhteellisiin kustannuksiin
1- ja 2-perälouhinnassa.

1-perälouhintana tai sitten 2-perälouhintana, jolloin ajo-tunneli, jonka pituus on 300 m, sijoitetaan keskelle tunneli-linjaa, jolloin kummankin louhittavan perän pituus on 1250 m.

a) 1-perälouhintana

Oletetaan, että taulukosta 2 saatava metrihintana 4200 mk/jm on halvin metrihintana, johon 1-perälouhinnassa päästään. Tähän halvimpaan metrihintaan päästään kuvan 6 mukaan silloin, kun tunnelin (perän) pituus on 1000 m. Metrihintana välillä 1000 - 2500 metriä saadaan seuraavasti: kuvasta 6 havaitaan, että kyseisellä välillä tapahtuu louhintakustannuksissa 10 % kasvu, jolloin louhintana tällä välillä keskimäärin maksaa

$$\frac{4200 \text{ mk/jm} + 4200 \text{ mk/jm} \times 1.10}{2} = 4410 \text{ mk/jm}$$

Näin tunnelin louhintakustannukset 1-perälouhinnalla ovat:

$4200 \text{ mk/jm} \times 1000 \text{ m} + 4410 \text{ mk/jm} \times 1500 \text{ m} = 10\,815\,000 \text{ mk}$, joka on 4326 mk/jm.

b) 2-perälouhintana

Oletetaan vastaavasti, että taulukosta 2 saatava metrihintana, 3200 mk/jm, on halvin hinta, johon 2-perälouhinnalla päästään. Kuvan 6 mukaan päästään tähän halvimpaan metrihintaan silloin, kun perän pituus on 1000 m. Nyt on louhittava kaksi 1250 metrin pituista perää. Kuvasta 6 havaitaan, että peräpituuksien 1000 - 1250 m välillä kasvavat louhinnan kuutiometrikustannukset 2.0 %. Tällöin metrihinnaksi välillä 1000 - 1250 m saadaan:

$$\frac{3200 \text{ mk/jm} + 3200 \text{ mk/jm} \times 1.020}{2} = 3232 \text{ mk/jm}$$

eli 2-perälouhintana kyseisen tunnelin louhintana maksaa

$2 \times 3200 \text{ mk/jm} \times 1000 \text{ m} + 2 \times 3232 \text{ mk/jm} \times 250 \text{ m} = 8\,016\,000 \text{ mk}$, joka on 3206 mk/jm.

Kaksiperälouhinta olisi siis 2 799 000 mk halvempaa. Kun huomioidaan ajotunnelin louhintakustannukset, jotka ovat usein noin 3700 mk/jm eli nyt yhteensä $3700 \text{ mk/jm} \times 300 \text{ m} = 1\,110\,000 \text{ mk}$, on 2-perälouhinta vielä noin 1 689 000 mk halvempi vaihtoehto.

Jos esimerkissä ei olisi otettu huomioon sitä, että louhinta-kustannukset kasvavat perän pituuden kasvaessa eli olisi otettu metrihinnaksi 1-perälouhinnassa koko matkalle 4200 mk ja 2-perälouhinnassa 3200 mk, olisi ero kokonaiskustannuksissa 2-perälouhinnan eduksi vain 1 390 000 markkaa.

10. TUNNELIN KALTEVUUDEN MERKITYS LOUHINTATÖISSÄ

Suunniteltaessa louhittavan tunnelin kaltevuutta on otettava huomioon seuraavat tekijät:

- a) louhintakaluston asettamat rajoitukset
- b) tunnelin käyttötarkoitus
- c) vuotovedet
- d) kalliopinnan taso

a) Louhintakaluston asettamat rajoitukset

Nykyaikaisella louhintakalustolla voidaan tehdä tunneleita kaikilla kaltevuuksilla $0 - 90^{\circ}$:een. Käytettävän kaluston valintaperusteena on paitsi tunnelin kaltevuus myös sen poikkipinta-ala. Tietyissä tapauksissa myös tunnelin kaarresäteellä voi olla merkitystä kaluston valinnassa.

Tavallisella peränajokalustolla voidaan ajaa periä 16° :een kaltevuuteen asti. Tätä jyrkempiä periä kutsutaan yleensä vinokuiluiksi ja nousuiksi, joita käytetään lähinnä kaivoslouhinnassa.

Kaltevuuden ollessa 16° tai pienempi käytetään seuraavia menetelmiä /1/:

Peränajomenetelmä	Perän koko	Kaltevuus	Kaarresäde
	m^2	astetta	m
Raidekalusto	$> 6, < 12$	< 2	> 15
Raiteeton kalusto	> 13	< 16	> 5
Kokoprofiilipor.	> 4	< 2	> 50

Kunnallisteknisissä tunneleissa ei yleensä käytetä suurempia kaltevuuksia kuin $1:7$ (8.13°). Tämä on yleisin ajotunneleissa käytetty kaltevuus. Ajotunnelin louhintakustannusten kannalta olisi edullisinta, että ajotunneli olisi mahdollisimman lyhyt, mikä merkitsee sitä, että ajotunneli olisi mahdollisimman

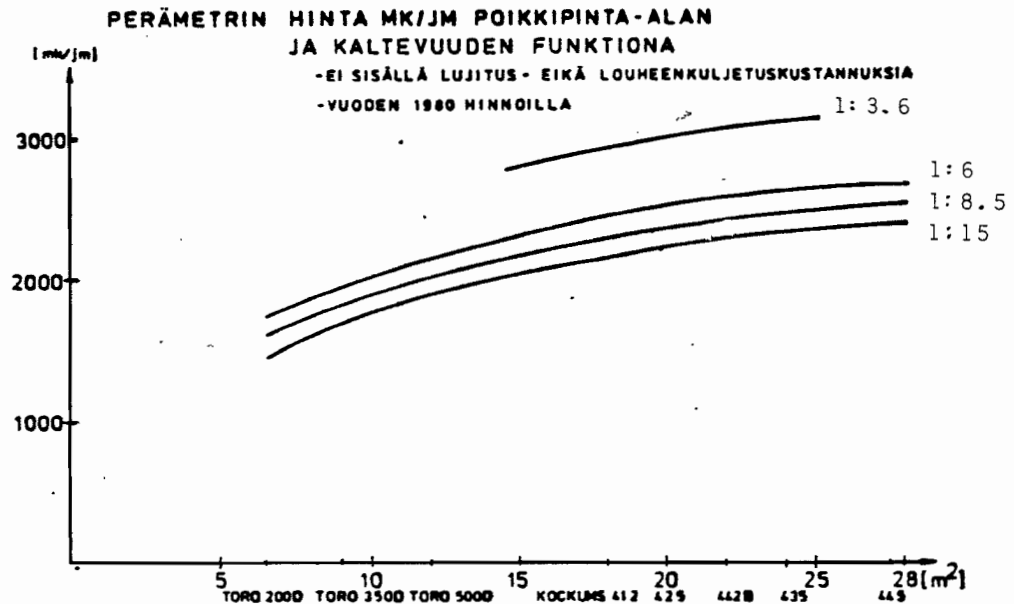
jyrkkä. Mikäli kaltevuus on suurempi kuin 1:7, alkavat louhintakustannukset tunnelimetriä kohti kasvaa voimakkaasti. Kaltevuuden kasvu merkitsee lisäkustannuksia paitsi ajotunnelin louhinnassa tunnelimetriä kohti myös varsinaisesta tunnelista saatavan louheen nostossa. Ajotunnelin kaltevuuden kasvun aiheuttamat lisäkustannukset ovat:

- Ajotunnelin louhinnassa irrotus hidastuu ja kuormauskone joutuu kovemmalle rasitukselle viedessään louheen maan pinnalle, mistä on seurauksena kuormauskoneen kunnossapitokustannusten kasvu.
- Renkaiden kuluminen lisääntyy.
- Kuljetettaessa louhetta ajotunnelin kautta kuljetuskalustolla maan pinnalle merkitsee kaltevuuden kasvu ajonopeuden putoamista täydellä kuormalla ajettaessa ja kuljetuskapasiteetti pienenee.
- Kuljetuskaluston kunnossapitokustannukset kasvavat kaltevuuden kasvaessa johtuen siitä, että moottorit joutuvat kovemmalle rasitukselle.

Koska ajotunnelit ovat hyvin lyhyitä (yl. 0 - 500 m) kunnallisteknisissä tunneleissa, ei kaltevuudella ole varsinaisen tunnelin louhintakustannuksiin suurtakaan vaikutusta, kunhan pysytään kaltevuudessa 1:7 tai sen alle.

Kaivosolosuhteissa on ajotunnelin kaltevuudella suuri merkitys louhintakustannuksiin, koska nostosyvyys voi olla useita satoja metrejä. Kuvassa 8 sivulla 39 on esitetty perämetrin hinta poikkipinta-alan ja kaltevuuden funktiona kaivosolosuhteissa eräille siirtokuormaimille (LHD) ja dumppereille.

Seuraavalla sivulla on esitetty taulukko erään kirjallisuus-esimerkin mukaisista vinoajotunnelikustannuksista tietylle poikkileikkaukselle /4/ (vuoden 1977 kustannustaso).



Kuva 8. Ajotunnelin hinta mk/jm poikkipinta-alan ja kaltevuuden funktiona /Mäkinen I. 1981/.

Kaltevuus	Kustannukset	Pituus
astetta	mk/jm	m
-5	4400	5600
-10	5100	2800
-15	5400	1885

Pohjasyvyys 490 m. Luvut eivät sisällä kalustokustannuksia.

Esimerkistä havaitaan, että kustannukset kasvavat välillä 5 - 10° 16 %/jm, kun taas välillä 10 - 15° on kustannusten kasvu vain 9 %/jm.

Kokoprofiiliporausta ei Suomessa ole toistaiseksi käytetty peränaajoon johtuen lähinnä siitä, että suomalaiset kivilajit ovat hyvin kovia. Näin ollen kokoprofiililaitteet eivät siis vielä ole teholtaan ja kustannuksiltaan kilpailukykyisiä perinteisen peränaajomenetelmän kanssa. Kokoprofiililaitteen käyttö on viime vuosina kuitenkin yleistynyt muualla maailmassa. Etenkin USA:ssa käytetään kokoprofiiliporausta usein

vaihtoehtona konventionaalisille peränaajomenetelmille. Pohjoismaista ainoastaan Norjassa on käytetty peränaajossa kokoprofiiliporausta. Suomessa käytetään kokoprofiilimenetelmää nousujen tekoon. Suurin Suomessa tällä menetelmällä tehdyn nousun halkaisija on 2.4 m.

Kaivoksilla tehdään usein tunneleita, joiden kaltevuus on suurempi kuin 16° . Kun vinokuilun kaltevuus on alle 26° ja poikkileikkaus suurempi tai yhtäsuuri kuin 2 m^2 , voidaan työ suorittaa käsiporauksella ja raappauksella.

Vinokuilun kaltevuuden ollessa 27 - 54 astetta käytetään seuraavia menetelmiä /Sundquist, P./:

- Kun vinokuilu ajetaan alhaalta ylöspäin, käytetään kattokiskoon tukeutuvaa porausjumboa, Alimak Groundhog tai nousuhissiä. Lastaus suoritetaan yleensä raapalla.
- Ajettaessa vinokuilua ylhäältä alaspäin voidaan poraustyöt tehdä kattokiskoon tai raiteisiin tukeutuvalla porausjumbolla. Lastaus joudutaan tällöin suorittamaan pienissä vinokuiluissa käsin. Poikkipinta-alaltaan suurissa kuiluissa voidaan käyttää erikoisrakenteista hydraulista kauhakaivuria.

Nousunajo on käytetään nykyään seuraavia menetelmiä:

Menetelmä	Soveltuvuusalue	
	Nousun pituus	Nousun kaltevuus
Nousunajo rakentamalla	- 20 m	100° :iin asti
Pitkäreikä nousunajo	- 60 m	$> 50^{\circ}$
Jora-menetelmä	20 - 100 m	Pysty tai hyvin jyrkkä
Alimak-menetelmä	50 - 200 m	$> 50^{\circ}$
Täysprofiilimenetelmä	50 - 300 m	$> 50^{\circ}$

Jora-menetelmää ei enää käytetä Suomessa. Nousunajo rakentamalla ja Alimak-menetelmä soveltuvat sokkonousujen ajoon. Pitkäreikämenetelmällä voidaan ajaa myös lyhyitä sokkonousuja. Jora-menetelmä, täysprofiilimenetelmä ja pitkäreikänousunajo yleensä edellyttävät kulkuyhteyttä nousun molempiin päihin.

b) Tunnelin käyttötarkoitus

Kunnallisteknisistä tunneleista gravitaatioperiaatteella toimivat viemäritunnelit ovat ainoita, joille on määritetty tietty tarvittava kaltevuus. Nämä tunnelit kallistetaan vähintään 1 % puhdistamolle päin. Muissa kunnallisteknisissä tunneleissa voidaan kaltevuus valita kussakin tapauksessa valmiin tunnelin käytön kannalta edullisimmaksi.

c) Vuotovedet

Vuotovesien pumppauksen kustannusvaikutus saattaa muodostua suureksi, jos tunneli joudutaan louhimaan laskuperänä. Edullisinta olisi aina, jos voidaan louhia loivaan nousuperään. Laskuperälouhinta aiheuttaa kasvavien vedenpoistokustannusten lisäksi myös vaikeuksia panostuksessa, sillä alareivät täyttyvät usein vedellä laskuperään louhittaessa. Tunnelin kaltevuuden suunnan määrää yleensä kuitenkin se, mihin pumppaamot valmiissa tunnelissa on edullisinta sijoittaa. Tämä johtaa siihen, että joskus joudutaan laskuperälouhintaan. Yleisimmät käytössä olevat kaltevuudet kunnallisteknisissä tunneleissa ovat 3 - 6 %..

d) Kalliopinnan taso

Tunnelin linjausta suunniteltaessa on huomioitava linjalla mahdollisesti esiintyvät ruhjealueet ja kalliopainauumat. Jos linjausta ei voida muuttaa, vaan joudutaan tekemään tunneli näiden ruhjeiden ja painaumien alitse, on tunnelin kaltevuutta näillä kohdin muutettava, jotta saataisiin riittävä kalliokaton paksuus.

11. TUNNELIN KORKEUSASEMAN VAIKUTUS KUSTANNUKSIIN

Kalliotunnelin korkeusaseman alentaminen aiheuttaa eräitä lisäkustannuksia. Niitä syntyy ajotunneleiden ja kuilujen pidentymisestä, veden pumppuamiskorkeuden kasvamisesta, mahdollisesta vuotovesien määrän kasvusta, tuuletusjärjestelyistä ja erittäin syvälle mentäessä myös vuoripaineen takia tarvittavista tukemistoimenpiteistä.

Aina on kuitenkin huomioitava, että korkeusaseman alentamisella kallion pintakerroksissa saavutetaan yleensä säästöä mm. siinä, että ympäristö ei aseta louhintatyölle rajoituksia:

- Mitä syvemmällä louhinta tapahtuu, sitä pienempi on tärinärajoitusten vaikutus louhintakustannuksiin. Mikäli tärinärajoitusten vuoksi joudutaan käyttämään lyhyempää katkon pituutta, nousevat louhintakustannukset selvästi. Eräässä kohteessa olivat tarjoushintojen suhdeluvut eri katkon pituuksilla seuraavat:

katkon pituus	tarjoushinnan suhdeluku
2.4 m	1
1.6 m	1.2
1.0 m	1.5

- Syvemmällä louhittaessa eivät louhintaräjähdytykset ja työkoneiden melu häiritse ympäristöä ja näin voidaan päästä siihen, että mitään työaikarajoituksia ei aseteta, jolloin esimerkiksi katkon räjäytys voidaan suorittaa haluttuna ajankohtana.

Myös rakoilun väheneminen syvemmällä louhittaessa aiheuttaa säästöä louhintakustannuksissa.

Tunnelin korkeusasemaa valittaessa on aina kustannusvertailulla haettava optimi sijainti, ottaen huomioon kallion laatu, kalliopinnan topografia, ajotunneleiden ja kuilujen pituudet, ns. pakkopisteet, rakennukset ja rakenteet.

12. TUNNELIN LINJAUKSEN VALINTAPERUSTEET

Kun tunnelin alkupiste A ja päätepiste B on annettu, on teoreettisesti ajateltuna halvin ratkaisu tehdä tunneli suoraa linjaa pitkin A:sta B:hen. Käytännössä linjaukseen vaikuttavat kuitenkin mm. seuraavat tekijät:

- Tunnelin on kuljettava tiettyjen pakkopisteiden kautta. Kunnallisteknisissä tunneleissa määrätään etukäteen esimerkiksi kuilujen paikat, josta putket tai johdot vedetään maan pinnalle.
- Ajotunneleita ei kaupunkialueella voida useinkaan sijoittaa parhaaseen mahdolliseen kohtaan, josta syystä varsinaisen tunnelin linjausta joudutaan usein muuttamaan.
- Linjausta valittaessa tulisi aina ottaa huomioon kallion laatu. Usein tulee edullisemmaksi kiertää paha ruhjealue kuin louhia suoraan sen läpi.

Tunnelin linjausta suunniteltaessa on aina verrattava useita eri linjausvaihtoehtoja ja huomioiden edellä mainitut tekijät haetaan kussakin tapauksessa optimiratkaisu kustannusvertailujen avulla.

13. TUNNELILOUHINTAAN LIITTYVÄT TUTKIMUKSET JA
NIIDEN MERKITYS

Tunnelisuunnittelua silmälläpitäen suoritetaan tunnelilinjalla yleensä seuraavia pohjatutkimuksia: seismisiä luotauksia, syväkairauksia ja kalliohavaintoja, joiden perusteella selvitetään kallion pinnan taso, kallion laatu ja tektoniikka /8/.

Kalliotutkimusten kanssa rinnakkain tehdään usein pohjavesi-, painuma-, perustamistapa- ja värinävaurioriskitutkimuksia. Topografisen kartta-aineiston perusteella muodostetaan tunnelinlinjan vaikutuspiirissä olevat pohjavesialtaat sekä tehdään arvio pohjaveden muodostumisesta. Pohjaveden tarkkailuverkosto muodostetaan tunnelinlinjan lähellä olevista kaivoista ja lisäksi asennetaan pohjavesiputkia (etenkin Helsingissä on pitkälle kehitetty pohjaveden tarkkailuverkosto). Tunnelinlinjan painumariskialueille rakennetaan painumatarkkailuverkosto. Painumahavaintopultteja asennetaan maanvaraan ja puupaaluille perustettuihin rakennuksiin /8/. Tunnelin vesitiiveyteen liittyvät tutkimukset ja niiden merkitys on esitetty kohdassa 15, Pohjavesiolosuhteiden vaikutus louhintakustannuksiin.

Louhintaa edeltävillä kalliooperätutkimuksilla on edullinen vaikutus sekä louhintatyön taloudellisuuteen että turvallisuuteen. Lisäksi urakoitsijan kannalta on tärkeää, että urakkatarjousta tehtäessä on käytettävissä mahdollisimman oikeat tiedot kalliooperästä. Näiden perusteella urakoitsija pystyy antamaan yksiselitteisen tarjouksen. Urakoitsijan kannalta tällaisia kalliooperätietoja ovat /11/:

- kalliopinnan korkeustaso
- kalliolaatu (kivilaatu, rakoilu)
- kallio-ominaisuudet (kallion homogeenisuus, lujuus, vedenläpäisevyys, porattavuus, räjäytettävyyys, louhittavuus)

- erillisselvitykset kallion heikkousvyöhykkeistä
- arviot tarvittavista lujitus- ja tiivistystoimenpiteistä.

Kallioperätutkimukset ovat kuitenkin hyvin kalliita. Kun otetaan huomioon, että kallionäytekairaus maksaa noin 300 mk/m (vuoden 1982 hintataso), ei voida edellyttää, että varsinkaan pitkien tunneleiden tutkimuksissa saataisiin täydellinen kuva rakoilusta ja vedenjohtokyvystä. Täysin paikkansa pitävää tietoa kallio-olosuhteista tunnelitasossa saadaan vasta tunnelin louhinnan yhteydessä. Jokaista tunnelia suunniteltaessa on aina erikseen harkittava, mitkä tutkimukset ovat välttämättömiä työn toteutuksen ja turvallisuuden kannalta ja mitkä tutkimukset voivat aiheuttaa säästöä louhintakustannuksissa.

Hyvin suoritettut tutkimukset saattavat vaikuttaa alentavasti urakoitsijan tekemään urakkatarjoukseen, koska riski pienenee tutkimusten laadun parantuessa. Näin ollen rakennuttaja voi saada suoranaista taloudellista hyötyä suorittamistaan tutkimuksista. Urakoitsijoiden mukaan voidaan tutkimusten vaikutusta tarjoushintaan kuvata esimerkiksi seuraavasti:

Tutkimusten laatu	kustannusten vertailuluku
Erittäin hyvät tutkimukset	95
Hyvät tutkimukset	97
Normaalit tutkimukset	100
Heikot tutkimukset	104
Erittäin heikot tutkimukset	115

14. KALLION LAADUN VAIKUTUS LOUHINTAKUSTANNUKSIIN

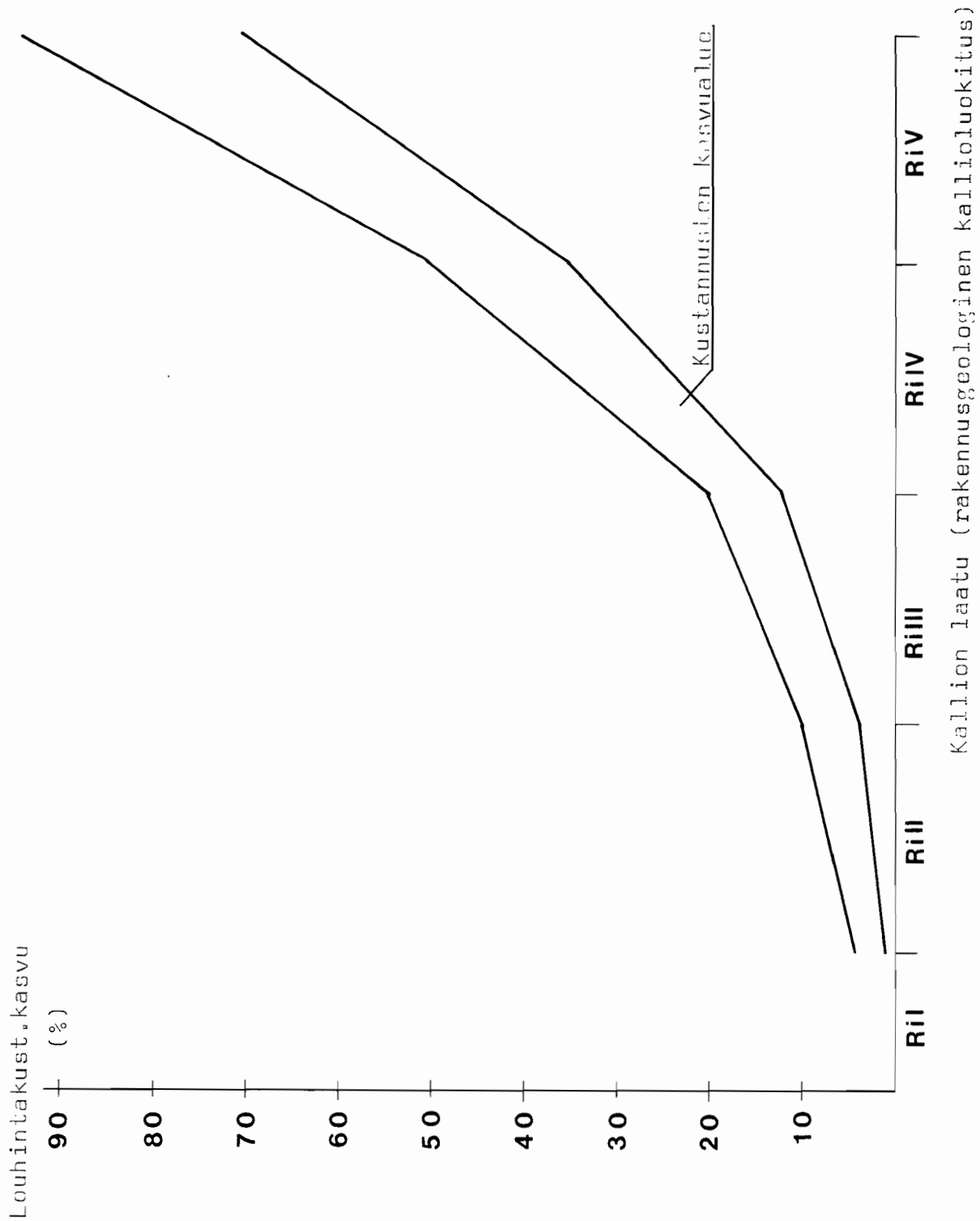
Kallion laadulla on keskeinen vaikutus louhintatyöhön ja sen kustannuksiin. Kallion laatu on kalliorakentamisessa niin tärkeä asia, ettei louhintaan pitäisi lainkaan ryhtyä, elleivät kallio-olosuhteet ole rakennuskelpoiset. Välttämättömissä tapauksissa voidaan rakentamista suorittaa hyvin heikoissakin olosuhteissa, mutta kustannukset muodostuvat luonnollisesti moninkertaisiksi.

Käytännön louhintatyössä koetaan tällä hetkellä suurena puutteena se, ettei käytettävissä ole käyttökelpoista louhittavuusluokitusta, jonka perusteella rakennuttaja ja urakoitsija pystyisivät yksimielisesti selvittämään kallion laadun vaikutuksesta louhintakustannuksiin syntyvät erimielisyydet. Nykyään käytetään luokitusperusteena usein rakennusgeologista kallioluokitusta, joka on kuitenkin lähinnä geologinen luokitus eikä näin ollen palvele riittävän hyvin varsinaisena louhittavuusluokituksena.

Kuvassa 9 sivulla 47 on esitetty urakoitsijoiden näkemys siitä, kuinka louhintakustannukset muuttuvat kallion laadun vaihdellessa. Luokitusperusteena on käytetty rakennusgeologista kallioluokitusta ja kuvassa esitetty kustannusten vaihtelualue perustuu käytännön kokemuksiin luokissa Ri I - Ri III ja luokissa Ri IV ja Ri V lähinnä suoritettuihin laskelmiin. Kuvasta voidaan todeta, että kallion laadun heiketessä louhintakustannukset kasvavat selvästi. Luokissa Ri IV ja Ri V saattavat kustannukset vaihdella vielä huomattavasti suuremmissa rajoissa, mitä kuvassa on esitetty.

Syyt siihen, että kallion laatu vaikuttaa louhintakustannuksiin niin voimakkaasti, ovat seuraavat:

- Kova kivi pidentää porausaikaa ja saattaa sekoittaa työn rytmityksen.



Kuva 9. Louhintakustannusten kasvu kallion laadun funktiona.
Ri I on ehjin kallio, Ri V on rikkinäisin kallio.

- Ruhjeisessa kivessä louhittaessa joudutaan suorittamaan lujitustöitä, jotka voivat sekoittaa työn rytmityksen.
- Ruhjeisen kallion louhinnassa syntyy lujitustöiden lisäksi useita lisäkustannuksia.
- Louhintatyön eri osavaiheiden kustannukset kasvavat kallion laadun heiketessä.
- Voimakkaasti rakoilleessa kalliossa voidaan joutua suorittamaan kalliita tiivistystöitä, lähinnä esi- ja jälki-injektointia.

Näiden edellä esitettyjen tekijöiden vaikutusta louhintatyöhön ja sen kustannuksiin selvitetään tarkemmin kohdissa 14.1 - 14.4. Injektointityön merkitystä ja sen vaikutusta louhintakustannuksiin käsitellään kohdassa 15, Pohjavesiolosuhteiden vaikutus louhintakustannuksiin.

14.1 Kiven kovuuden vaikutus louhintatyöhön

Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus on suorittanut tutkimuksen kivilajien porattavuudesta, jossa on todettu, että porattavuus vaihtelee hyvin suurissa rajoissa eri kivilajeilla. Kyseinen tutkimus on tehty paineilmaporausta käyttäen. Vastaava tutkimus olisi aiheellista suorittaa myös hydraulikalustolle, sillä käytännössä on todettu, että hydrauliporauksella päästään selvästi suurempiin tunkeutumismenoihin.

Tunkeutumismenon ollessa pienempi kuin etukäteen suoritetuissa laskelmissa on arvioitu, on seurauksena katkon porausajan pidentyminen, joka saattaa aiheuttaa louhintatyön rytmityksen häiriintymisen. Mikäli työn rytmitys häiriintyy niin pahoin, että työvuorossa ei saada irrotettua aiottua katkomäärää, lisääntyvät louhintakustannukset olennaisesti johtuen joko vaadituista erityisjärjestelyistä (esimerkiksi otetaan käyttöön 3. työvuoro) tai pidentyneestä projektin suoritusajasta.

Kovan kiven louhinnassa syntyy yleensä myös seuraavia lisäkustannuksia:

- porakruunujen ja poratankojen kuluminen lisääntyvät (porateräksen kulumisesta aiheutuneet kustannukset ovat tietyissä tapauksissa moninkertaistuneet verrattuna normaalin kiven louhintaan)
- porausyksikön varaosa- ja huoltokustannukset lisääntyvät.

Käytännössä saatujen kokemusten perusteella saattaa kiven kovuuden hidastava vaikutus louhinta-aikaan olla jopa 1.5-kertainen ja vaikutus louhintakustannuksiin likimäärin samaa suuruusluokkaa.

14.2 Lujitustöiden vaikutus louhinta-aikaan ja -kustannuksiin

Lujitustöiden, jolla tässä yhteydessä tarkoitetaan lähinnä pulttitusta ja ruiskubetonointia, vaikutus louhintakustannuksiin on merkittävä. Pientunnelihankkeissa on lujitus-, tiivistys- ja tukemiskustannusten osuus kokonaiskustannuksista yleensä noin 5 - 15 %. Suuri vaikutus kustannusten suuruuteen on sillä, missä vaiheessa lujitustyöt joudutaan suorittamaan. Lujitustyöt voidaan toteuttaa joko /9/

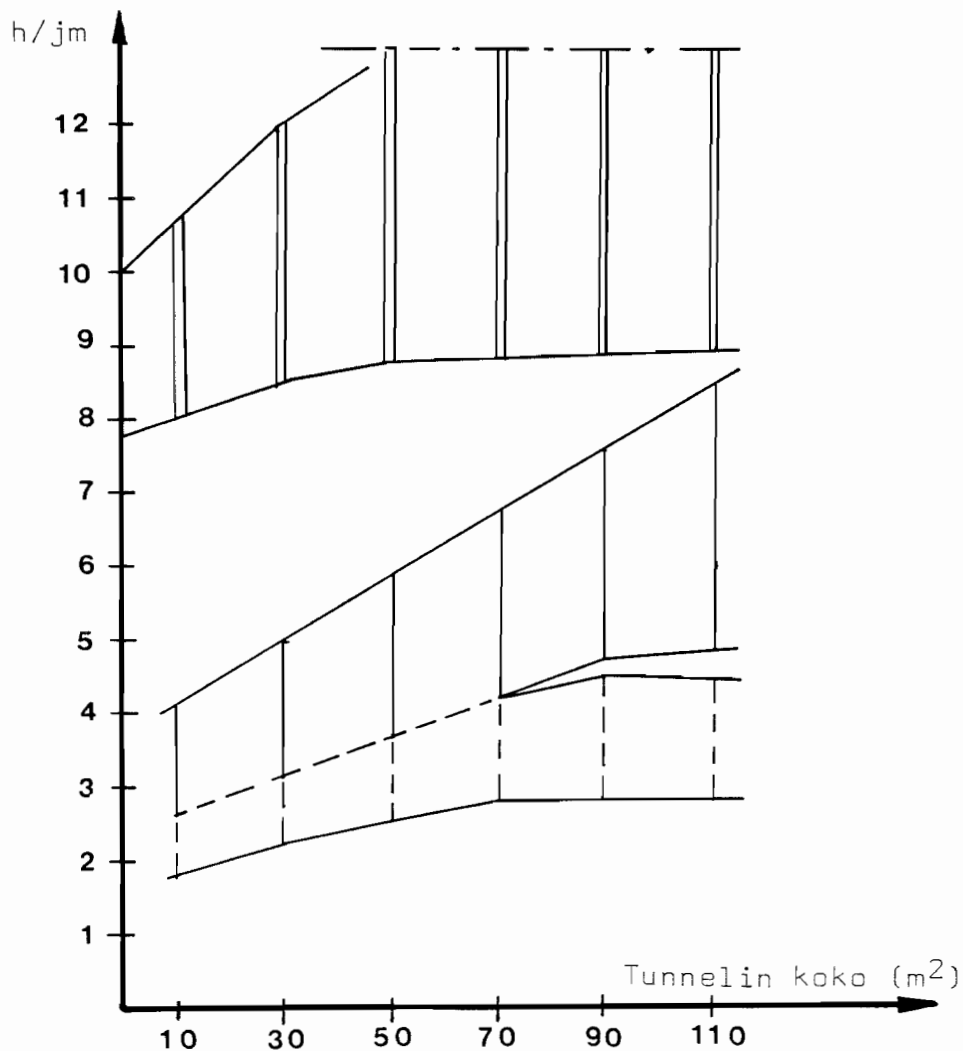
- a) louhintatyön aikana
- b) tarvittavassa laajuudessa louhintatyön aikana ja muilta osin valmiiksi louhittuun tilaan
- c) kaikilta osin valmiiksi louhittuun tilaan.

Pyrittäessä ajallistaloudellisesti parhaaseen mahdolliseen lopputulokseen tulee suunnitteluvaiheessa asettaa tavoitteeksi, että työturvallisuuden edellyttämä lujitustyö tulisi tehdä louhintatyön aikana ja louhintatyön keskeyttävä lujitustyö tulisi rajoittaa mahdollisimman pieneksi /9/. Koska lujitustöiden suoritusajankohdalla on olennainen vaikutus louhintakustannuksiin, tulisi urakkatarjouspyynnöissä aina määrittää

eri yksikköhinnat louhintatyön kokonaan tai osittain keskeyttävälle lujitustöille ja ko. töille varsinaisen louhintatyön jälkeen.

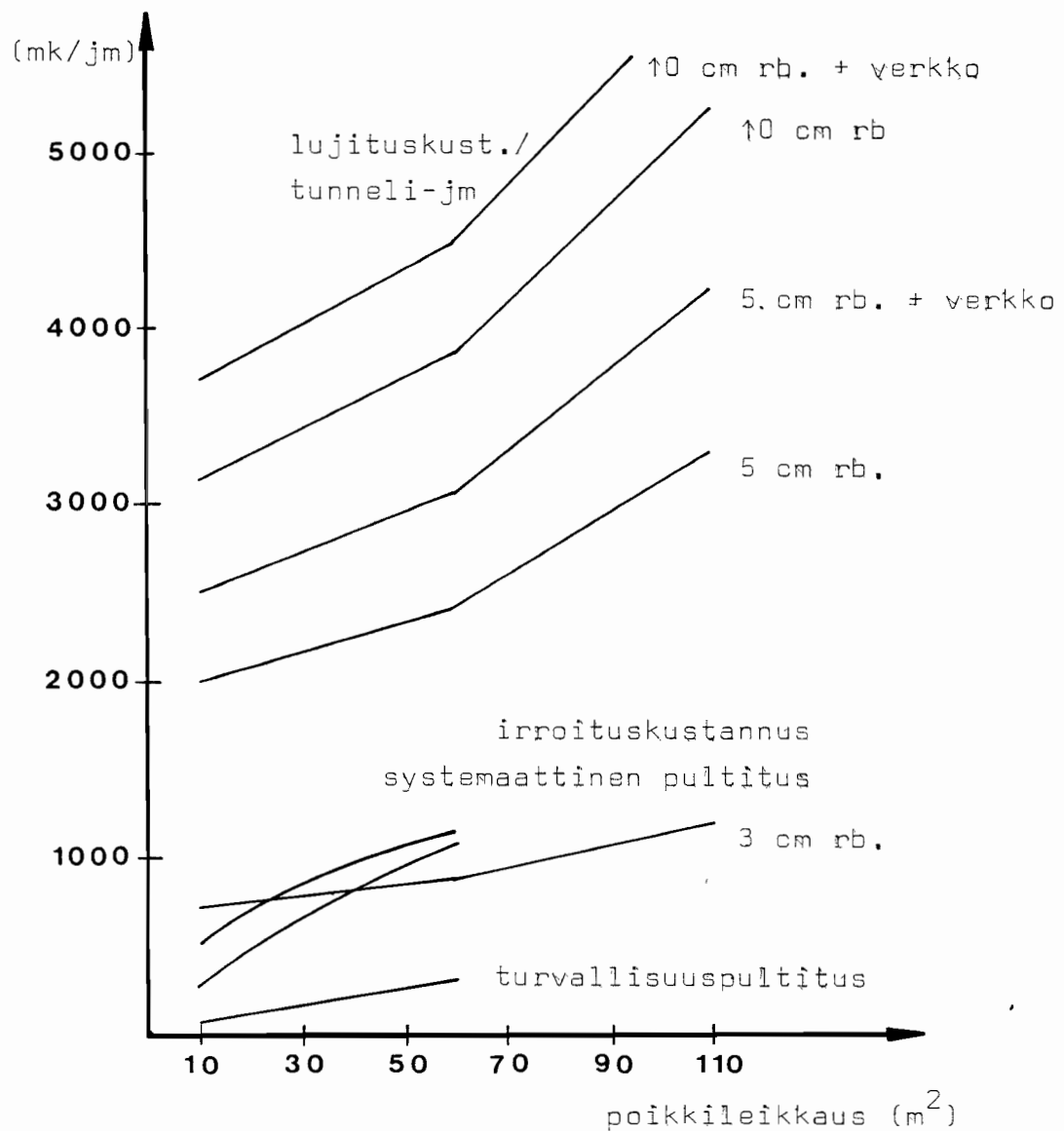
Kuvassa 10 /10/ on esitetty louhinta-aikaa ja sen muutoksia esittävä kuva, joka osoittaa, että kallion laadun vaatimat lujitustyöt voivat viivästyttää poraus- ja räjäytystyötä jopa 2...3-kertaiseksi.

- Hyvä kivi: Ei lujitusta
 _____ Huono kivi: Rusnausta, turv.pulttitusta, mahdollisesti betonointia
 ===== Heikko kivi: Ruiskubetonointi + verkotus heti irrotuksen jälkeen



Kuva 10. Katkon kesto kallion laadun vaihdellessa /10/.

Varsinaiset lujitustyökustannukset ovat kuvan 11 perusteella erittäin huomattava kustannuserä pelkkiin irrotuskustannuksiin verrattuna. Esitetyt kustannukset ovat vuoden 1974 hintatasoa /10/.



Kuva 11. Lujituksen vaikutus louhintakustannuksiin (vuoden 1974 hintataso) /10/.

Lujituskustannukset syntyvät ennen kaikkea kallion laadun vaikutuksesta, mutta myös rakenteen käyttötarkoituksen perusteella.

14.3 Ruhjeisen kallion louhinnassa syntyvät lisäkustannukset

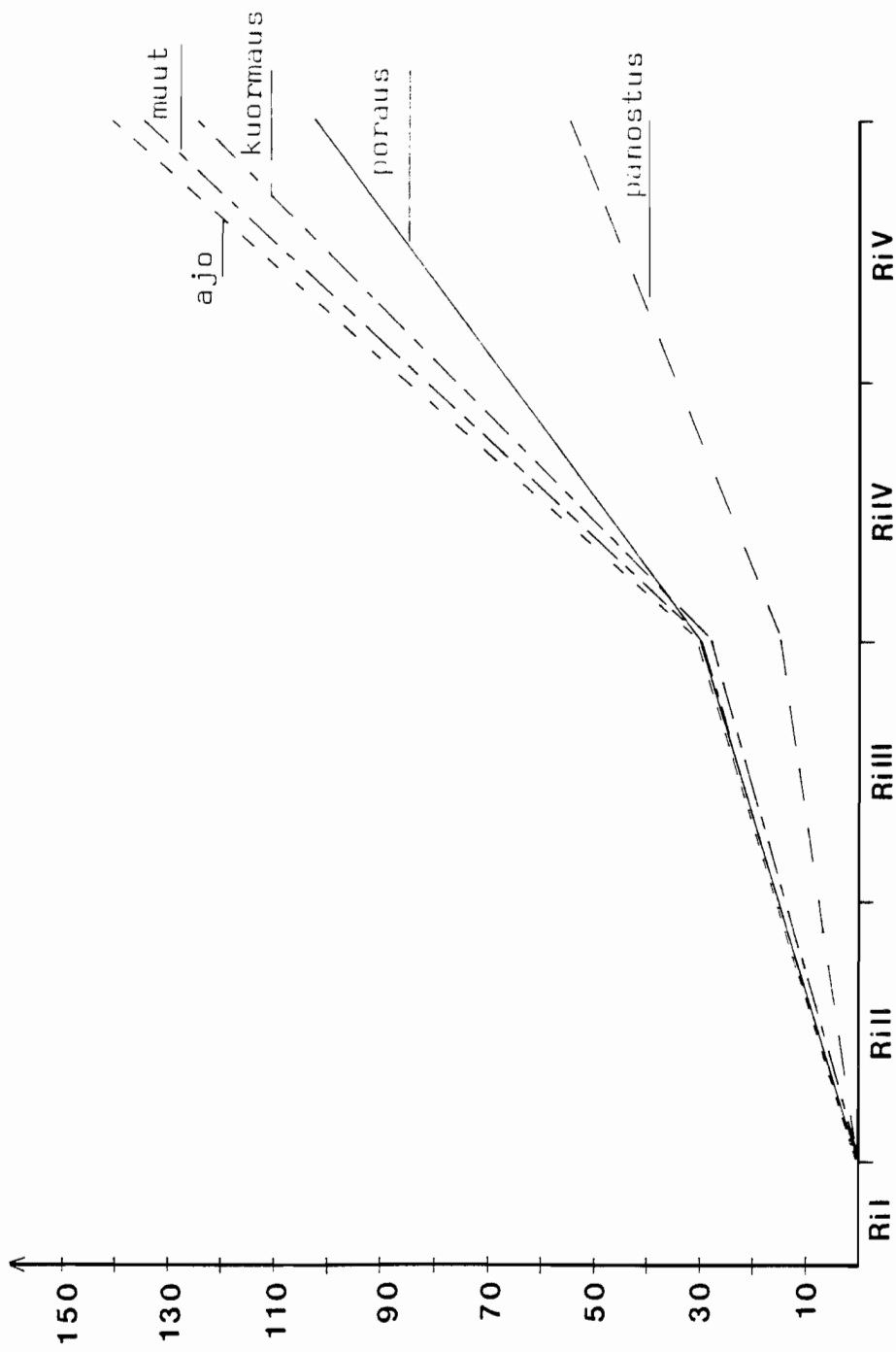
Pyrittäessä mahdollisimman oikeaan kustannusarvioon olisi jo ennalta tiedettävä, millaista kallio koko tunnelilinjalla on. Käytännössä ei koskaan voida aivan tarkkaan tietää, kuinka louhintaolosuhteet saattavat tunnelissa muuttua. Mikäli louhinnan edetessä törmätään ruhje-esiintymiin, joita ei ennalta ollut tiedossa, on seurauksena, että alkuperäinen kustannusarvio ei enää pidä paikkaansa. Ruhjealueiden louhinnassa syntyvät lisäkustannukset johtuvat kokemusten perusteella mm. seuraavista syistä:

- a) Tunnelin louhinta hidastuu ja voi osittain jopa pysähtyä, jolloin louhinta-aika pitenee.
- b) Poraustyö joudutaan osittain tekemään käsiporakoneilla, koska kallion pehmeiden vuoksi ei porausjumbossa olevilla raskailla poravasaroilla voida porausta suorittaa.
- c) Työn rytmitys häiriintyy: usein joudutaan työn rytmityksen vuoksi, kun on kyse 2-perälouhinnasta, tekemään toisessa perässä lisäkustannuksia aiheuttavia ylityöitä.
- d) Lisääntyneet ja kalliimmat räjähdysaineet: kallion pehmeiden ja rikkonaisuuden vuoksi joudutaan joskus käyttämään patruunaräjähdysaineita. Tästä syystä sekä porauspituus että lähtevyys on normaalia lyhyempi ja näin ollen räjähdysaineita kuluu enemmän. Räjähdysaineiden määriä lisäävät myös ns. lähtemättömät katkot, jotka joudutaan panostamaan ja räjäyttämään uudelleen.
- e) Lisääntyneet porakalusto- ja varaosakustannukset.
 - ruhjeiden alueella tapahtuu pehmeän kallion vuoksi usein porakaluston kiinnijäämistä

- pehmeän kallion vuoksi ei koneiden syöttö-painetta voida pitää normaalina, vaan ko-neita joudutaan käyttämään alipaineella ja niiden voitelu jää vajaaksi. Varaosa-kustannukset kasvavat tästä johtuen selvästi
 - f) Ylimääräisten kalliomassojen kuormaus ja kuljetus
 - ruhjealueella louhittaessa saattaa tapah-tua ryöstymiä, jotka aiheuttavat lisäkus-tannuksia kuormaukseen ja kuljetukseen
 - g) Lisääntyvä rusnaustarve
 - ruhjealueella joudutaan rusnaustyötä li-säämään huomattavasti
 - h) Pohjamassanvaihto ruhjeiden kohdalla
 - kallion pehmeiden vuoksi voidaan joutua ruhjeiden kohdalla vaihtamaan tunnelin poh-jalle kestävämpi ja puhtaampi louhe
 - i) Lisääntyneet varustelutyöt
 - j) Kustannustason nousun lisääntyminen pidentyneen työajan vuoksi.
- 14.4 Kallion laadun vaikutus louhintatyön eri osavai-heiden kustannuksiin

Kallion laadun vaihtelu vaikuttaa olennaisesti louhintatyön eri osavaiheiden kustannuksiin ja niiden suorittamiseen ku-luvaan aikaan. Kuvassa 12 sivulla 54 on urakoitsijoiden näkemys siitä, kuinka nämä eri osavaiheiden kustannukset saattavat muuttua kallion laadun vaihdellessa. Kallion laa-dun luokitusperusteena on käytetty rakennusgeologista kallio-luokitusta ja esitetyt käyrät perustuvat osin käytännön ko-kemuksiin sekä osin arvioihin.

Kuvasta 12 voidaan havaita, että kunkin osavaiheen kustannuk-set saattavat selvästi nousta kallion laadun heiketessä. Käy-tännössä ei koskaan tilanne ole sellainen, että kaikkien osa-vaiheiden kustannukset nousisivat samassa louhintakohteessa



Kallion laatu (rakennusgeologinen kallioluokitus)

Kuva 12. Louhintatyön osavaiheiden kustannusten muutos kallion laadun vaihdellessa. Ri I on ehjin kallio, Ri V on rikkinäisin kallio.

niin suuriksi kuin kuvassa 12 on esitetty, vaan kustannukset vaihtelevat aina tapauskohtaisesti. Joskus käy jopa niin, että tietyn osavaiheen kustannukset ovat esimerkiksi luokassa Ri III pienemmät kuin ne normaalisti ovat luokassa Ri I.

Luokissa Ri I - Ri III esitetyt kustannusten kasvuprosentit perustuvat käytännön kokemuksiin ja niitä voidaan sikäli pitää melko luotettavina. Sen sijaan luokissa Ri IV - Ri V louhitaan harvemmin ja tällä alueella on kustannusten vaihtelualue hyvin suuri, joten kuvassa 12 esitetyt käyrät ovat tällä alueella lähinnä suuntaa antavia.

Kun verrataan keskenään eri osavaiheiden kustannusten kasvuprosentteja, havaitaan, että kallion laadun heiketessä kasvavat panostuksen kustannukset selvästi vähemmän kuin muiden osavaiheiden kustannukset. Tämä perustuu seuraavaan: syy siihen, että louhinnan osavaiheet tulevat kalliimmiksi kallion laadun heiketessä on lähinnä se, että työ vaikeutuu ja näin työn suorittaminen vaatii enemmän aikaa. Panostuskustannukset ovat kuitenkin pääosin, noin 70-prosenttisesti, materiaalikustannuksia, jotka eivät lisäänty, vaikka työhön kuluva aika lisääntyykin. Räjähdysaineiden kulutus saattaa tosin hieman lisääntyä, kun kallion laatu heikkenee, mutta tämän kustannuksia korottava vaikutus on melko pieni. Sen sijaan osavaiheet, joiden kustannukset muodostuvat pääosin miestyön ja konetyön osuudesta, tulevat suhteellisesti paljon kalliimmiksi, kun työhön kuluva aika pitenee.

Kallion laadun vaikutusta esimerkiksi porauskustannuksiin on aina vaikea etukäteen arvioida, sillä ruhjeisen kiven vaikutus porausnopeuteen voi olla aivan vastakkainen. Tietyissä tapauksissa poraus nopeutuu selvästi, kun poraustyö suoritetaan ruhjeisessa kivessä, mutta usein tilanne on päinvastainen eli poraustyö hidastuu ja lisäkustannuksia aiheutuu myös poratankojen kiinnijuuttumisista.

15. POHJAVESIOLOSUHTEIDEN VAIKUTUS LOUHINTAKUSTANNUKSIIN

Pohjavesiolosuhteet vaikuttavat vedenpoisto- ja injektointikustannuksiin ja välillisesti myös irrotuskustannuksiin. Useissa yhteyksissä onkin todettu, että tunnelirakentamisen suurin ja vaikeimmin hallittavissa oleva riskitekijä on pohjavedenpinnan aleneminen ja sen aiheuttamat vauriot maanvaraisissa ja puupaaluille perustettavissa rakenteissa.

Pohjavedenpinnan aleneminen pyritään estämään tunnelilouhinnassa kallion tiivistämisellä. Tiivistysmenetelminä käytetään lähinnä kallion esi- ja jälki-injektointia. Tiivistysmenetelmien käyttöä louhintatöissä puoltavat usein myös seuraavat tekijät /12/:

- tunnelin käyttö vaatii tiiveyttä
- vesivuodot vaikeuttavat louhintaa
- vesivuodot saattavat kasvaa ja aiheuttaa sortuman tai tulvan.

Kalliotunnelille esitettävä tiiveysvaatimus esitetään suurimpana sallittuna vuotovesimääränä, joka kalliotilaan saa tiettyssä aikayksikössä tulla. Suurimman sallitun vuotovesimäärän tulisi perustua aina realistisiin arvioihin, eikä sitä tulisi valita liian pieneksi vain "varmuuden vuoksi", sillä tiiveysvaatimusten nostaminen lisää yleensä selvästi kustannuksia /12/.

15.1 Tiivistystarpeen määrittämiseen liittyvät tutkimukset

Mikäli kalliotilalle asetetaan tiiveysvaatimuksia, tulisi tutkimukset tehdä niin tarkasti, että olisi mahdollista sanoa, millä alueella tiivistystä tarvitaan ja millä tavalla se olisi tehtävä. Tähän ei käytännössä ole useinkaan mahdollisuuksia, sillä tarvittavat tutkimukset ovat kalliita ja tutkimustulosten tulkinta vaikeaa. Yleisesti ottaen kalliotutkimusten

yhteydessä saatavat tiedot injektointitarpeesta ja kallion injektoitavuudesta jäävät vähäisiksi, joten suunnitteluvaiheessa voidaan vain paikallistaa alueet, joilla esi-injektointia tullaan mahdollisesti käyttämään. Todelliset olosuhteet paljastuvat vasta työn aikana, joten tutkimusten painopiste siirtyy työn aikana tehtäviin tutkimuksiin /12/.

Yleisin työn aikana tehtävistä tutkimuksista on tunnusteluporaus, jonka yhteydessä saadaan jonkinlaista tietoa kallion rakenteesta. Varsinainen esi-injektointitarve selvitetään tunnustelurei'issä tehtävien vesimenekkikokeiden avulla. Injektointiin ryhdytään, mikäli vesimenekkikokeen tulos ylittää tietyn arvon. Tällaisena arvona pidetään yleensä 1 - 3 l/(min. m MPa) riippuen sallitusta vuotovesimäärästä /12/.

Esi-injektointityön onnistumista on seurattava tutkimuksilla, jotta voitaisiin varmistua käytettyjen menetelmien ja kriteerioiden oikeellisuudesta. Tavallisimmin tulee kysymykseen vesimenekkikokeiden suorittaminen injektoinnin jälkeen sekä vuotovesimittaukset /12/.

15.2 Esi-injektoinnin kustannukset ja vaikutus louhintatyöhön

Esi-injektoinnin merkittävin haittapuoli on louhinnan keskeytyminen injektoitavassa perässä. Suoritettaessa vain sementti-injektointia tarvitaan vielä 5 - 6 h:n odotusaika injektoinnin jälkeen, ennen kuin seuraavan katkon poraus voidaan aloittaa. Tästä ei aiheudu lisäkustannuksia, mikäli louhintaa voidaan täysitehoisesti suorittaa muissa perissä. Tunnelilouhinnassa se ei kuitenkaan ole aina mahdollista. Monesti on yht'aikaa käynnissä vain kahden tai yhden perän louhinta, jolloin esi-injektointi aiheuttaa joko tehon vähenemisen puoleen tai louhinnan keskeytymisen kokonaan injektoinnin ajaksi /17/.

Louhinnan viivästymisestä aiheutuu mm. seuraavia lisäkustannustekijöitä /17/:

- kiinteät kustannukset

- louhintamiehistön palkat (siltä osin, kun eivät osallistu injektointityöhön)
- louhintakaluston seisontakustannukset
- alaurakoiden odotusajan lisääntyminen
- indeksin korottava vaikutus kustannuksiin.

Esi-injektoinnilla on toisaalta myös louhintatyötä halventava ja nopeuttava vaikutus, kun panostus voidaan suorittaa kuivemmissä olosuhteissa sekä pumpattavat vesimäärät jäävät pienemmiksi /17/.

Esi-injektoinnin suorat yksikkökustannukset tunnelin seinäneliötä kohti ovat eräässä tunnelirakennuskohteessa olleet 90 - 130 mk/m² (vuoden 1980 hintataso). Mikäli louhintatyö keskeytyy täysin esi-injektoinnin ajaksi, ovat vastaavat yksikkökustannukset suuruusluokaltaan 120 - 200 mk/m² /17/.

Taulukkoon 3 on merkitty esi-injektoinnin eri työvaiheiden prosentuaaliset osuudet, kun louhinnalle ei aiheudu häiriötä ja kun louhinta pysähtyy täysin injektoinnin ajaksi /17/.

Taulukko 3 /17/:

Kustannustekijä	kustannusosuus %	
	ei häiriötä louhinnalle	louhinnan täydellinen pysähtyminen
Poraus	40 - 60	30 - 50
Vesimenekkekokeet	10	7
Injektointityö (1 - 3 työvuoroa)	20 - 40	15 - 30
Injektointiaineet (sementti+kemialinen)	8 - 11	5 - 9
Louhinnan keskeytyminen	-	20 - 35

15.3 Esi- ja jälki-injektoinnin kustannusvertailu

Samalla pientunnelityömaalla, jonka esi-injektointikustannuksia käsiteltiin kohdassa 15.2, ovat jälki-injektointikustannukset olleet tunnelin seinämäneliölle keskimäärin 250 mk/m^2 (vuoden 1980 hintataso). Helsingin metrotunnelien injektointikustannukset ovat olleet systemaattista jälki-injektointia sovellettaessa noin 300 mk/m^2 /17/.

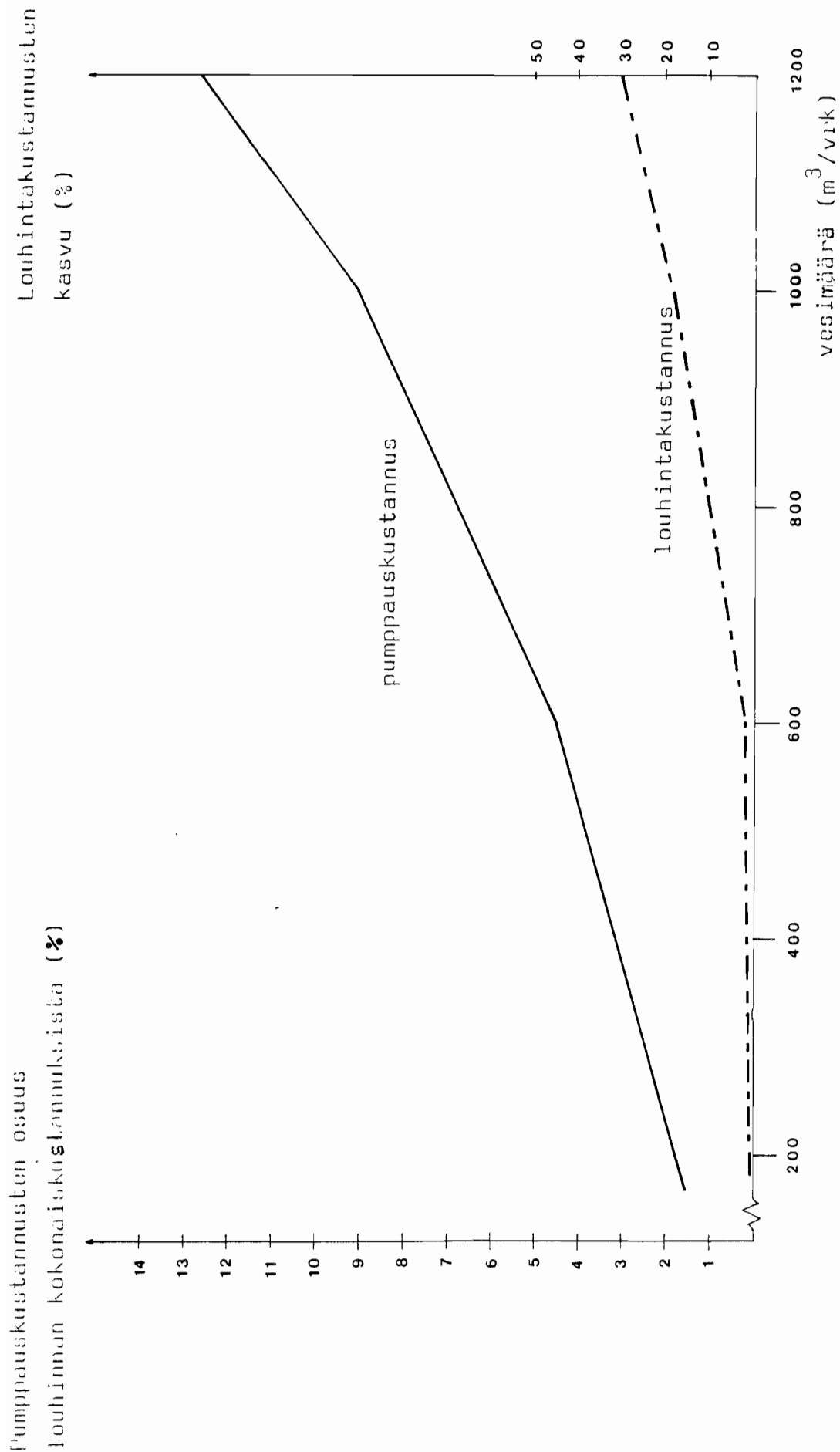
Oheisten kustannusten valossa näyttää esi-injektointi olevan kustannuksiltaan selvästi halvempi jälki-injektointiin verrattuna, vaikka louhintatyö keskeytyykin esi-injektoinnin ajaksi. Käytännössä tilanne on kuitenkin sellainen, että huolellakaan tehty esi-injektointi ei täysin poista jälki-injektointitarvetta /17/.

Jälki-injektoinnin välillisinä kustannuksina on huomioitava pohjavedenpinnan väliaikaisesta alenemisesta sekä työnaikaisesta vuotovesien lisäpumppaustarpeesta aiheutuvat kustannukset /17/.

15.4 Vuotovesien kustannusvaikutus

Tunneliin virtaavien vuotovesimäärien lisääntyminen nostaa selvästi pumppauskustannuksia ja vaikuttaa välillisesti louhintakustannusten kasvuun vaikeuttamalla louhintatyön eri osavaiheiden suoritusta. Etenkin panostuskustannukset nousevat selvästi vuotovesimäärien kasvaessa.

Vuotovesien vaikutus louhintakustannuksiin on aivan eri suuruusluokkaa riippuen siitä, suoritetaanko louhintatyö laskuvai nousuperään. Laskuperälouhintaa tulisi välttää, sillä vuotovedet nostavat laskuperälouhinnan kustannuksia selvästi enemmän kuin nousuperälouhinnan kustannuksia. Kuvassa 13 sivulla 60 on yhtenäisellä viivalla esitetty urakoitsijoiden näkemys siitä, kuinka pumppauskustannusten osuus louhinnan kokonaiskustannuksista kasvaa, kun tunneliin tuleva vuotovesimäärä kasvaa. Kyseessä on nousuperään tapahtuva pientunnelilouhintaa. Tunnelin pituus vaikuttaa luonnollisesti



Kuva 13. _____ Pumppauskustannusten osuus louhinnan kokonaiskustannuksista
tunneliin tulevien vuotovesimäärien funktiona.
----- Louhintakustannusten kasvu tunneliin tulevien vuotovesimäärien funktiona.

siihen, mikä on pumppauskustannusten osuus kokonaiskustannuksista. Kuvassa 13 esitetty käyrä perustuu laskelmiin, joissa tunnelin pituus on ollut 3 - 4 km.

Kuvasta voidaan todeta, että vuotovesimäärän ollessa noin $600 \text{ m}^3/\text{vrk}$, on pumppauskustannusten osuus louhinnan kokonaiskustannuksista noin 4 - 5 %, mutta vuotovesimäärällä $1200 \text{ m}^3/\text{vrk}$ saattaa pumppauksen osuus kokonaiskustannuksista olla jopa 12 - 14 %.

Kuvassa 13 esitetty alempi, katkoviivalla piirretty käyrä, esittää, kuinka louhintakustannukset kasvavat tunneliin tulevien vuotovesimäärien lisääntyessä. Kyseessä ovat vastaavat olosuhteet kuin edellä esitettiin pumppauskustannuksia käsiteltäessä.

Kuvan perusteella alkavat louhintakustannukset kasvaa selvästi, kun tunneliin tuleva vuotovesimäärä on suurempi kuin $600 \text{ m}^3/\text{vrk}$. Tätä pienemmät vuotovesimäärät eivät yleensä aiheuta merkittävää haittaa louhintatyön suoritukselle vaan kustannusten lisääntyminen johtuu lähinnä pumppauskustannusten lisääntymisestä. Vuotovesimäärän ylittäessä arvon $600 \text{ m}^3/\text{vrk}$ alkavat vuotovedet yleensä häiritä louhintatyötä ja näin lisäkustannuksia aiheutuu pumppauskustannusten lisäksi myös hidastuneesta louhintatyön suorituksesta. Vuotovesimäärän ollessa $1200 \text{ m}^3/\text{vrk}$ saattavat louhintakustannukset kasvaa jopa 30 %.

Kuvasta 13 havaitaan, että molemmilla esitetyillä käyrillä on selvä taitepiste vuotovesimäärän $600 \text{ m}^3/\text{vrk}$ kohdalla. Tämä johtuu siitä, että pienemmät vuotovesimäärät kuin $600 \text{ m}^3/\text{vrk}$ pystytään poistamaan yhdellä pumppausasemalla, mutta tätä suuremmat vuotovesimäärät vaativat toisen pumppausaseman perustamisen, joka aiheuttaa huomattavia lisäkustannuksia.

15.5 Esi-injektoinnin huomioiminen urakka-asiakirjoissa

Esi-injektointi keskeyttää louhinnan yleensä joko kokonaan tai osittain, mistä aiheutuu injektoinnin välittömien kustannusten lisäksi myös erikseen välillisiä kustannuksia,

kuten louhintaryhmän ja -kaluston seisontakustannukset. Lisäksi aikataulussa pysyminen vaikeutuu ja on jopa mahdotonta, jos työmäärät kasvavat ennakoituja huomattavasti suuremmiksi /12/.

Käytännössä koetaan vaikeutena usein se, että ei ole helppoa löytää oikeaa sopimusmuotoa ja maksuperusteita, joissa huomioitaisiin esi-injektointityön asema louhintaprosessissa. Nykyään sopimusmuotona käytetään yleisimmin jotakin seuraavista /12/:

- a) Kokonaishintaurakka, johon sisältyy tietty määrä injektointityötä.
- b) Yksikköurakka, joka sisältää myös tietyn määrän injektointityötä.
- c) Kokonaishintaurakka louhinnan osalta, injektointityöt yksikköhinnoilla ja työmäärät sitoumuksesta.

Käytännössä on kohdan a mukainen sopimusmuoto osoittautunut toimivimmaksi. Injektointityö voitaisiin ajatella suoritettavaksi myös laskutustyönä. Tämä ei käytännössä ole hyvä ratkaisu, koska kilpailu tältä osin eliminoituu ja louhinnan luotettava hinnoittelu on mahdotonta. Tiivistystöiden osuus kokonaislaskutuksesta saattaa tietyissä tapauksissa olla huomattava, jopa 30 - 40 % /12/.

15.6 Muutosehdotuksia urakka-asiakirjoihin

Seuraavassa esitetään urakka-asiakirjoihin joitakin muutosehdotuksia, jotka mahdollisesti selventäisivät injektointityöhön liittyviä ongelmia /17/:

- Pyydetään eri hinnat injektointityövuoroille, kun laajuus muuttuu oleellisesti (rajana voi olla esimerkiksi 50 - 100 % kasvu etukäteisarvioista).
- Tarkastetaan injektointikalustolle asetettavia vaatimuksia, tai pyydetään hinnat eritehoiselle kalustolle.

- Injektoinnin vaihteellaisuudesta on syytä päästä eroon.
- Harkittava injektointi- ja porauskalustojen siirron erottamista omaksi kustannuslajikseen.
- Lopullinen tiiveysvaatimus annettava kyselyssä.
- Injektointiporaus on syytä jaotella tarkemmin pituuden mukaan (esimerkiksi alle 5 m, 5 - 10 m ja yli 10 m).
- Vesipainekokeen sijoittaminen injektointityöhön sisältyväksi on parempi ratkaisu, koska se ei aina ole tarpeen.
- Reikäkohtainen kemiallinen injektointi tulisi ottaa nykyistä useammin mukaan.

16. LOUHINTAMENETELMÄN VAIKUTUS LOUHINTAKUSTANNUKSIIN

Yksi- ja kaksiperälouhinnan vertailua käsitellään tässä selvityksessä mm. seuraavissa kohdissa: 19.3 Louhintatehon merkitys rakennusajan suunnittelussa, 7.1 Poikkipinta-alan vaikutus tunnelin louhintakustannuksiin ja 9. Tunnelin ja perän pituuden vaikutus louhintakustannuksiin. Näissä kaikissa kohdissa on päädytty siihen tulokseen, että 2-perälouhinta on kustannuksiltaan selvästi edullisempi vaihtoehto kuin 1-perälouhinta. Kuvan 2 sivulla 21 perusteella havaitaan, että 1-perälouhinta on noin 30 % kalliimpaa kuin 2-perälouhinta.

16.1 Louhintakustannusten jakaantuminen eri työvaiheiden ja louhintatapojen kesken

Pyrittäessä selvittämään, kuinka louhintakustannukset jakaantuvat eri työvaiheiden kesken yhden-, kahden- ja usean perän louhinnassa eri kokoisilla tunnelin poikkileikkauksilla, pyydettiin urakoitsijoita käytännön kokemuksiin perustuen täyttämään vastaavat taulukot, jotka on esitetty sivuilla 65 - 67. Taulukoissa esitetyt arvot on saatu urakoitsijoiden antamien tietojen perusteella. Taulukoita analysoitaessa on huomioitava, että esitetyt arvot vaihtelevat melko paljon eri kohteissa. Kokonaiskustannuksia laskettaessa ei ole huomioitu lujitus-, tiivistys- ja tukemistöiden kustannuksia, joten esitetyt arvot on laskettu prosentteina irrotuskustannuksista. Kuten sivulla 49 todettiin, on lujitus-, tiivistys- ja tukemiskustannusten osuus pientunnelihankkeiden kokonaiskustannuksista yleensä noin 5 - 15 %.

Taulukko 4, jossa on esitetty kustannusten jakaantuminen alle 12 m²:n perissä perustuu siihen, että louhinta suoritetaan kiskokalustolla. Taulukoissa 5 ja 6 esitetyt arvot perustuvat sen sijaan kumipyöräkaluston käyttöön.

Taulukko 4. Louhintakustannusten jakaantuminen eri työvaiheiden ja louhintatapojen kesken.
Taulukoita analysoitaessa on huomattava, että kustannukset vaihtelevat melko paljon eri kohteissa.

Tunnelin koko < 12 m ²	1-perän louhinta % kokonaiskustann.				2-perän louhinta % kokonaiskustann.				Usean perän louhinta % kokonaiskustann.			
	miest.	konet.	mater.	aputyöt	miest.	konet.	mater.	aputyöt	miest.	konet.	mater.	aputyöt
Poraus	5.70	11.10	9.20	-	5.10	9.50	12.10	-	4.00	8.00	13.00	-
Panostus	5.70	0.70	11.10	-	5.00	0.80	14.20	-	4.00	0.50	13.50	-
Rusnaus+huolto	12.40	0.50	1.10	-	10.60	0.50	1.40	-	4.00	1.00	3.00	-
Kuormaus	5.80	3.50	0.70	-	4.80	2.90	1.10	-	4.00	2.50	1.50	-
Kuljetus 0-1 km	7.00	11.10	5.90	-	6.20	11.00	6.80	-	6.50	12.00	11.50	-
Tuuletus	-	-	-	4.00	-	-	-	3.50	-	-	-	4.50
Kuivanapito	-	-	-	2.50	-	-	-	2.50	-	-	-	4.50
Poravesi	-	-	-	1.00	-	-	-	1.00	-	-	-	1.00
Valaistus	-	-	-	1.00	-	-	-	1.00	-	-	-	1.00
Yhteensä	36.60	26.90	28.00	8.50	31.70	24.70	35.60	8.00	22.50	24.00	42.50	11.00
Kustannusten vertailuluku	261				195				177			

Taulukko 5. Louhintakustannusten jakaantuminen eri työvaiheiden ja louhintatapojen kesken. Taulukoita analysoitaessa on huomattava, että kustannukset vaihtelevat melko paljon eri kohteissa.

Tunnelin koko 12 - 25 m ²	1-perän louhinta % kokonaiskustann.					2-perän louhinta % kokonaiskustann.					Usean perän louhinta % kokonaiskustann.				
	miest.	konet.	mater.	aputyöt	yht.	miest.	konet.	mater.	aputyöt	yht.	miest.	konet.	mater.	aputyöt	yht.
Poraus	5.70	13.80	8.50	-	28.00	4.70	12.30	11.00	-	28.00	4.50	11.60	11.90	-	28.00
Panostus	4.90	1.30	13.10	-	19.30	3.90	1.20	16.20	-	21.30	3.70	1.00	18.00	-	22.70
Rusnaus+huolto	7.80	1.20	0.30	-	9.30	8.10	1.60	0.50	-	10.20	7.90	1.80	0.60	-	10.30
Kuormaus	4.30	6.20	4.90	-	15.40	3.70	5.60	5.40	-	14.70	3.50	5.40	5.30	-	14.20
Kuljetus 0-1 km	7.50	7.90	4.90	-	20.30	6.60	7.20	5.90	-	19.70	6.30	6.80	5.60	-	18.70
Tuuletus	-	-	-	4.20	4.20	-	-	-	3.40	3.40	-	-	-	3.40	3.40
Kuivanapito	-	-	-	1.60	1.60	-	-	-	1.30	1.30	-	-	-	1.30	1.30
Poravesi	-	-	-	1.00	1.00	-	-	-	0.70	0.70	-	-	-	0.70	0.70
Valaistus	-	-	-	0.90	0.90	-	-	-	0.70	0.70	-	-	-	0.70	0.70
Yhteensä	30.20	30.40	31.70	7.70	100.00	27.00	27.90	39.00	6.10	100.00	25.90	26.60	41.40	6.10	100.00
Kustannusten vertailuluku	147					114					100				

Taulukko 6. Louhintakustannusten jakaantuminen eri työvaiheiden ja louhintatapojen kesken. Taulukoita analysoitaessa on huomattava, että kustannukset vaihtelevat melko paljon eri kohteissa.

Tunnelin koko 26 - 40 m ²	1-perän louhinta % kokonaiskustann.					2-perän louhinta % kokonaiskustann.					Usean perän louhinta % kokonaiskustann.				
	miest.	konet.	mater.	aputyöt	yht.	miest.	konet.	mater.	aputyöt	yht.	miest.	konet.	mater.	aputyöt	yht.
Poraus	8.20	13.60	5.40	-	27.20	7.00	12.60	8.40	-	28.00	7.00	11.30	9.90	-	28.20
-Panostus	5.10	1.00	14.40	-	20.50	4.30	1.10	16.10	-	21.50	4.50	1.10	16.90	-	22.50
Rusnaus+huolto	8.40	1.60	0.50	-	10.50	8.00	1.50	0.50	-	10.00	7.80	1.50	0.50	-	9.80
Kuormaus	4.50	6.00	4.50	-	15.00	3.50	5.00	5.70	-	14.20	3.50	4.90	5.60	-	14.00
Kuljetus 0-1 km	5.40	7.20	5.40	-	18.00	4.30	5.90	6.80	-	17.00	4.20	5.80	6.70	-	16.70
Tuuletus	-	-	-	5.00	5.00	-	-	-	5.30	5.30	-	-	-	5.00	5.00
Kuivanapito	-	-	-	2.00	2.00	-	-	-	2.00	2.00	-	-	-	2.00	2.00
Poravesi	-	-	-	1.10	1.10	-	-	-	1.30	1.30	-	-	-	1.10	1.10
Valaistus	-	-	-	0.70	0.70	-	-	-	0.70	0.70	-	-	-	0.70	0.70
Yhteensä	31.60	29.40	30.20	8.80	100.00	27.10	26.10	37.50	9.30	100.00	27.00	24.60	39.60	8.80	100.00
Kustannusten vertailuluku	127					88					79				

Kun verrataan näissä kolmessa taulukossa esitetyjä arvoja keskenään, havaitaan, että niissä kaikissa on selvästi yksi samanlainen piirre: kun verrataan miestyö-, konetyö- ja materiaalikustannusten osuutta kokonaiskustannuksista yhden, kahden ja usean perän louhinnassa havaitaan, että miestyö- ja konetyökustannusten osuus laskee ja materiaalikustannusten osuus kasvaa, kun siirrytään yhden perän louhinnasta kahden perän louhintaan ja edelleen usean perän louhintaan.

Jokaisen taulukon alalaitaan on laitettu kustannusten vertailuluku. Vertailukohtana on pidetty tunnelikoon 12 - 25 m² usean perän louhinnan kuutiometrikustannuksia, joille taulukossa on annettu vertailuarvo 100. Vertailuluvuista havaitaan, että usean perän louhinta on edullisin vaihtoehto. Verrattuna 1-perälouhintaan on usean perän louhinta tunnelin koosta riippuen 47 - 60 % edullisempaa. Usean perän louhinta on verrattuna kaksiperälouhinnan kustannuksiin vielä noin 10 % halvempaa. Verrattaessa keskenään usean perän louhinnan kustannuksia tunnelikoon ollessa 26 - 40 m² kiskokalustolla suoritettavan yhden perän louhinnan kustannuksiin voidaan todeta, että louhinta kiskokalustolla voi olla jopa 230 % kalliimpaa.

17. AJOTUNNELEIDEN VAIKUTUS TUNNELILOUHINNAN
KOKONAISKUSTANNUKSIIN

Päätettäessä siitä, louhitaanko tunnelilinjalle ajotunneleita, joudutaan vertailemaan yhden- ja kahden perän louhinnan kustannuksia. Kuten kuvasta 2 sivulla 21 käy ilmi, on kahden perän louhinta selvästi yhden perän louhintaa edullisempaa ja sikäli olisi louhintatyö edullisempaa suorittaa 2-perälouhintana. Mikäli louhittava tunneli kuitenkin on lyhyt, saattavat ajotunnelin louhintakustannukset nostaa 2-perälouhinnan kokonaiskustannuksia niin paljon, että se tulee kallimmaksi vaihtoehdoksi kuin 1-perälouhinta. Jokaisessa tunnelirakennuskohteessa on siis tarkkaan laskettava, mikä vaihtoehto on edullisin. Mitään yleispätevää sääntöä sille, kuinka pitkä tunnelin on oltava, että se kannattaisi louhia 2-perälouhintana, ei ole olemassa. Tämä johtuu mm. siitä, että ajotunnelit ovat eri paikoissa eri pituisia ja näin ollen myös hinnaltaan erilaisia.

Kuvassa 6 sivulla 31 on esitetty louhintakustannusten (yksikkökustannusten) muuttuminen perän pituuden kasvaessa. Tämän kuvan perusteella saadaan urakoitsijoiden käsitys siitä, minkä pituisessa perässä louhinnan yksikkökustannukset ovat halvimmat 1- ja 2-perälouhinnassa. Näiden tietojen perusteella, mikäli ajotunnelin louhintakustannukset pystytään arvioimaan luotettavasti, voidaan laskea 1- ja 2-perälouhinnan kokonaiskustannusten vertailu. Sivulla 35 esitetyssä esimerkissä on laskettu tietyn tunnelin louhintakustannukset, kun työ tehdään 1-perälouhintana tai 2-perälouhintana.

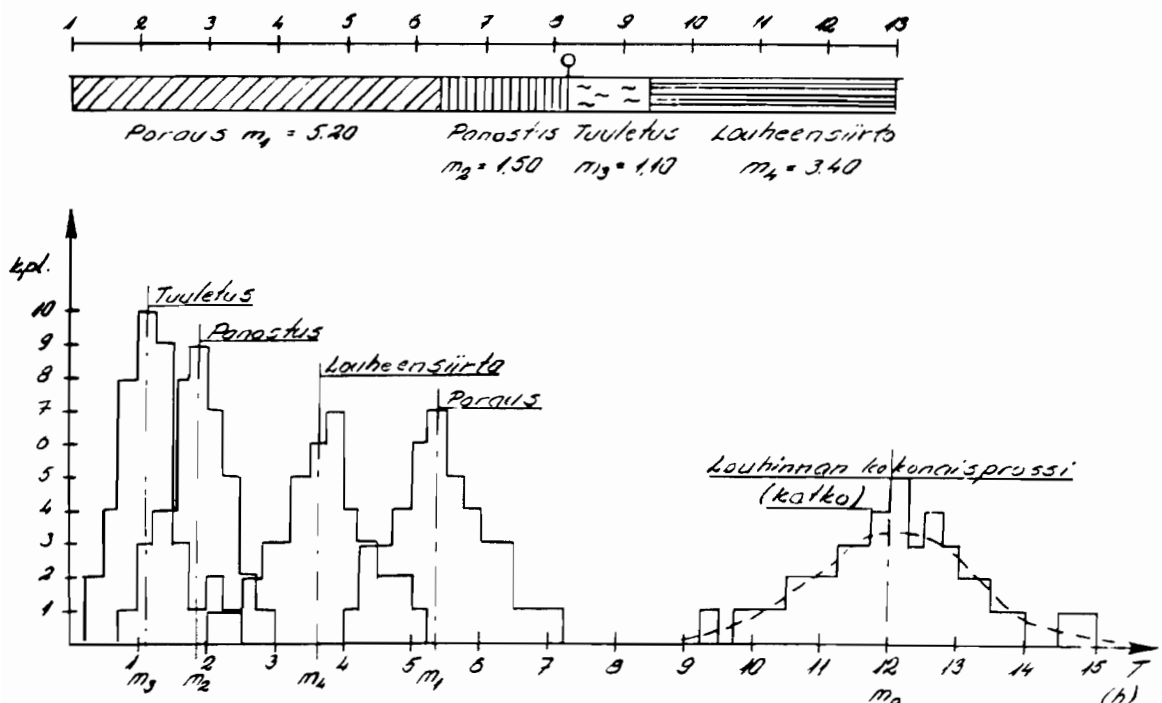
Suomessa ei toistaiseksi ole louhittu pidempiä kuin hieman yli 3 km:n periä (Päijännetunneli), joten käytettävissä ei ole kokemukseen perustuvaa tietoa siitä, kuinka louhinnan yksikkökustannukset muuttuvat suomalaisissa olosuhteissa tätä pidemmissä perissä. Nykyisen käytännön mukaan pyritään ajotunnelit sijoittamaan siten, että ne jakavat päätunnelin yhtä pitkiin periin, joiden pituus olisi enintään 1500 - 2500 m.

Louhintakustannusten kannalta on edullisinta juuri se, että kummankin perän louhinta veisi yhtä paljon aikaa eli työ voitaisiin suorittaa kokonaan vaihtoperälouhintana. Ajo-tunnelit pyritään lisäksi sijoittamaan siten, että varsinaisen tunnelin louhinta voitaisiin suorittaa nousuperälouhintana, joka on kustannuksiltaan laskuperälouhintaa edullisempaa. Ajo-tunneleiden louhintakustannukset mk/jm poikkipinta-alan ja kaltevuuden funktiona kaivosolosuhteissa on esitetty kuvassa 8 sivulla 39 (vuoden 1980 kustannustaso).

Kaupunkialueella ei ympäristötekijöistä johtuen voida ajo-tunneleita useinkaan sijoittaa haluttuun kohtaan, mikä aiheuttaa yleensä louhintakustannusten kasvua. Usein myös kal-lioperäolosuhteet aiheuttavat sen, että ajo-tunneleita ei voida sijoittaa louhintakustannusten kannalta optimikohtaan.

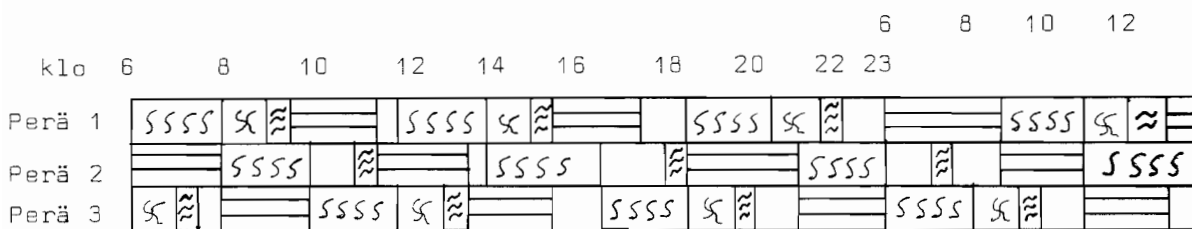
18. LOUHINTATYÖN RYTMITYKSEN VAIKUTUS KUSTANNUKSIIN

Louhintatyö on prosessityötä, jossa tietyt samankaltaiset työvaiheet toistuvat samassa järjestyksessä. Tavoiteaika-
taulun toteutuminen riippuu suuresta määrin siitä, miten onnistutaan turvaamaan louhintaprosessin jatkuva eteneminen siten, että kuhunkin yksittäiseen työvaiheeseen sisältyvät häiriöajat eivät kohtuuttomasti pidennä koko prosessin kiertoaikaa. Kun otetaan lisäksi huomioon normaaleihin työvaiheisiin sisältyvä työrytmi, muodostuu työtä haittaavien häiriöiden eliminoiminen aikataulusuunnittelun keskeisimmäksi kysymykseksi. Kuvasta 14 voidaan todeta, että eri työvaiheisiin sisältyvät suhteellisen pienet hajonnat aiheuttavat louhinnan kokonaisprosessin viivästymistä. Näin ollen on tärkeämpi saavuttaa työvaiheisiin riittävä varmuus eri osatöiden toteutumisessa kuin yksityisten työsaavutusten huipputehoja, joita ei tehokkaasti kokonaisprosessissa voida käyttää hyväksi /10/. Tässä edellä esitetty asia on yksi peruste sille, että esimerkiksi hydrauliporauksella saavutettavaa tehon li-
säystä ei pystytä riittävästi hyödyntämään.



Kuva 14. Tunnelilouhintaprosessin työvaiheiden aikajakautumat /10/.

Louhintakustannusten kannalta olisi edullisinta tietysti, että koneille ja työvoimalle ei tulisi missään louhintatyön vaiheessa odotusaikoja. Tällaiseen tilanteeseen ei käytännössä koskaan päästä. Lähelle tätä ihannetilannetta päästään silloin, kun louhittavana on samanaikaisesti mahdollisimman monta perää, joiden pituudet ovat lyhyitä ja louhittava kalio on ehjää eikä vaadi lujitus- ja injektointitoita. Kuvassa 15 a on esimerkki siitä, kuinka työ rytmitetään kolmen perän louhinnassa.

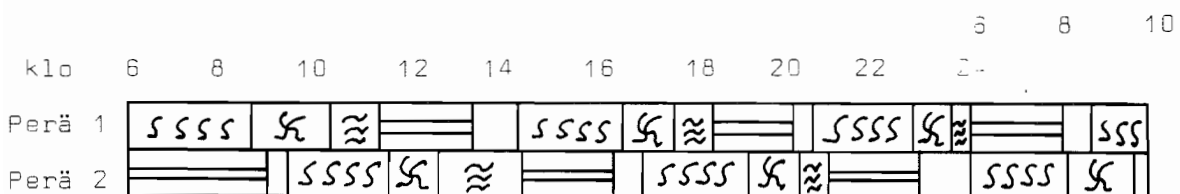


SSSS = poraus K = panostus ja räjäytys
 ≈ = tuuletus ≡ = kuormaus ja ajo
 = odotusaika

Kuva 15 a. Työn rytmitys kolmen perän louhinnassa.

Tahdin määräävä resurssi on tässä tapauksessa ollut kuormaus ja ajo. Samoin havaitaan, että jo 0.5 h lisäaikaa esimerkiksi porauksessa aiheuttaa rytmin sekoamisen. Mikäli kyseessä olisi ollut 2-perälouhinta, olisi näillä tehoilla kuvan perusteella syntynyt odotusaikoja. Tarvittaisiin neljä perää, jotta rytmitys saataisiin ihanteelliseksi.

Kuvassa 15 b on esimerkki työn rytmityksestä kahden perän louhinnassa.



SSSS = poraus K = panostus ja räjäytys
 ≈ = tuuletus ≡ = kuormaus ja ajo
 = odotusaika

Kuva 15 b. Työn rytmitys kahden perän louhinnassa.

Työn rytmitys saattaa häiriintyä mm. seuraavista syistä:

- katkon poraus vie liikaa aikaa (kova kivi, ruhjeinen kivi)
- joudutaan tekemään louhintatyön keskeyttäviä lujitus- ja tiivistystöitä
- louhintakalustossa esiintyy vikoja.

Näiden edellä mainittujen tekijöiden vaikutusta louhintakustannuksiin käsitellään tässä työssä kohdassa 14, Kallion laadun vaikutus louhintakustannuksiin.

Louhintatyössä esiintyvät häiriöt nostavat louhintakustannuksia sitä enemmän, mitä vähemmän louhittavia periä on käytössä. Esimerkiksi 1-perälouhinnassa keskeyttävät lujitus- ja tiivistystyöt usein koko perän ajon ja aiheuttavat näin kalustolle ja osin miehistölle seisontakustannuksia.

19. AIKATAULUN VAIKUTUS LOUHINTAKUSTANNUKSIIN

19.1 Kustannusten riippuvuus ajasta

Työmaalla syntyvät kustannukset voidaan jakaa ajasta riippuviin ja ajasta riippumattomiin kustannuksiin /7/.

Ajasta riippuvista kustannuksista ovat tärkeimmät:

- palkat
- sosiaalikulut
- kalustovuokrat
- sähköenergia (osittain)

Ajasta riippumattomista kustannuksista ovat tärkeimmät:

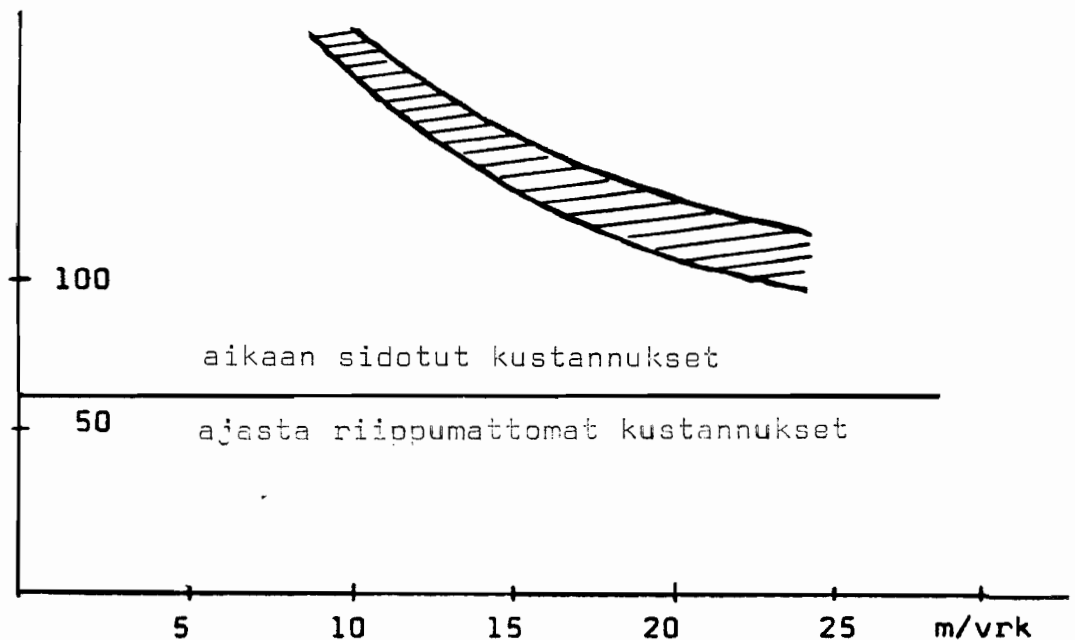
- irrotusmateriaalit (räjähdysaineet, poramateriaalit ja porakalusto)
- muut materiaalit (sähköistys, paineilma-, poistovesi- ja painevesimateriaalit)
- asennustyöt
- kalustokuljetukset

Näiden ajasta riippuvien ja riippumattomien kustannusten jakautuminen on noin 50/50. Mikäli louhinnassa syntyy jostakin syystä tehonvaihteluita muuttuvat aikaan sidotut kustannukset hyvin jyrkästi.

Kuvassa 16 sivulla 75 on esitetty tapaus, missä louhitaan kahta perää vaihtoperälouhintana käyttäen 3-vuorotyötä.

Kuvasta käy ilmi esimerkiksi se, että jos perästä lähtee 6 katkon (= 20 m) sijasta 5 katkoa/vrk (= 16 m) suurenevat suhteelliset kustannukset noin 14 - 18 %.

suhteelliset kustannukset/
pituusyksikkö



Kuva 16. Louhintatehon vaikutus suhteellisiin kustannuksiin /7/.

Seuraavassa esitetään eräs aikakustannuksiin vaikuttava työmaatilanne, joka osoittaa erilaisten vaihtoehtojen aikamerkityksen (käytetyt kustannukset ovat vuoden 1974 hintatasoa) /10/.

Esimerkkitarjastelu

Kohde:

- kalliotunneli: pituus 1200 m, ala 12 m²
- ajotunneli tunnelin keskellä
- louhinta vaihtoperämenetelmällä
- sallittu rakennusaika 10.5 kk ~ 210 työ-vrk
- ylimenevältä osalta vrk-sakkona maksettava 2000 mk/vrk

Suunnitteluarvot:

- työn edellyttämä tahdistus yksi katko/vuoro
- tuotantonopeus kaksivuorotyössä $v_0V = 6.0$ jm/vrk
- suunniteltu rakennusaika $T = 1200/6.0 = 200$ vrk
- vapaa pelivara $\Delta T = 10$ vrk
- suunniteltu kustannusnopeus $v_0K = 2400$ mk/vrk

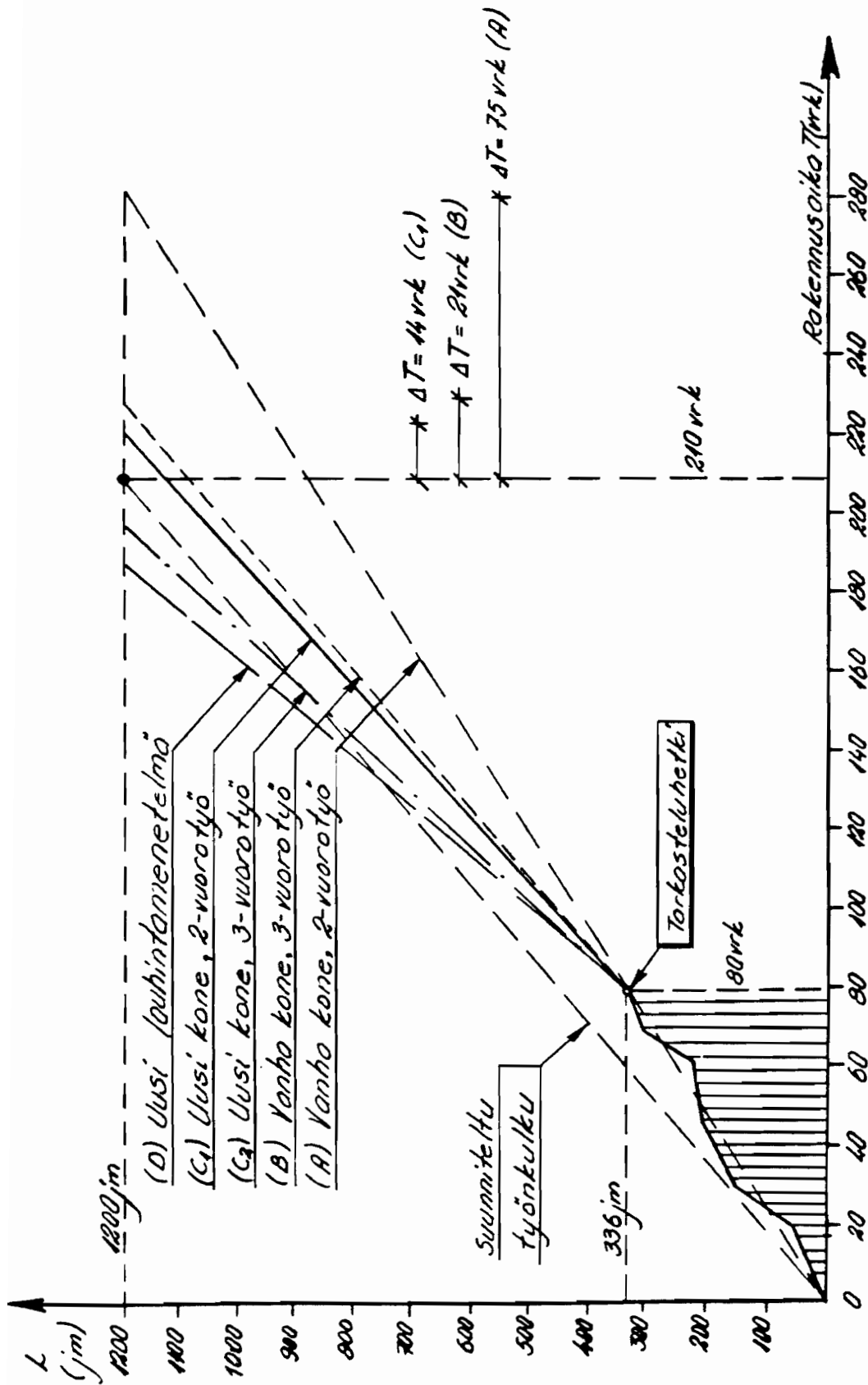
Tarkasteluhetki: (80 vrk aloituksesta)

- saavutettu keskimääräinen tuotantonopeus $v_1V = 4.2$ jm/vrk
- todettu keskimääräinen kustannusnopeus $v_1K = 2520$ mk/vrk (= 600 mk/jm)
- työntutkimusmittausten avulla on osoitettu, että tuotantohäiriöt ovat johtuneet pelkästään louheen-siirron riittämättömästä kapasiteetista sekä lukuisista konerikoista

Toimenpidemahdollisuudet:

- A. Tilanne jatkuu ennallaan työn loppuun asti, jolloin kustannus- ja tuotantonopeuksien oletetaan pysyvän tarkkailuhetken tasolla.
- B. Prosessi ja kalusto muuten samat, paitsi että otetaan käyttöön kolmas työvuoro. Tällöin oletetaan seuraavaa:
- arvioidaan tuotantonopeuden nousu 35 %:ksi
 $vV = 1.35 \times 4.2 = 5.7$ jm/vrk
 - arvioidaan kustannusnopeuden nousu 40 %:ksi
 $vK = 1.40 \times 2520 = 3530$ mk/vrk
 - välittömät lisäkustannukset 3-vuoroon siirtymisestä 20 000 mk
- C. Hankitaan tehokkaampi ja käyttövarmempi kalusto:
- | | 2-vuorotyö | 3-vuorotyö |
|-----------------------------|------------|------------|
| - tuotantonopeus (jm/vrk) | 6.0 | 8.0 |
| - kustannusnopeus (mk/vrk) | 2700 | 3680 |
| - välittömät lisäkust. (mk) | 40000 | 40000 |
- D. Siirrytään kokonaan uuteen louheensiirtojärjestelmään, joka mahdollistaa kolme katkoa kahdessa vuorossa:
- tuotantoporaus 8.4 jm/vrk
 - arvioitu kustannusnopeus 2900 mk/vrk
 - välittömät lisäkustannukset 180 000 mk

Sivulla 77 kuvassa 17 on esitetty yhteenveto näiden eri vaihtoehtojen vertailusta.



Kuva 17. Yhteenveto vaihtoehtojen vertailusta /10/.

Kuvan 17 perusteella saadaan seuraavat tulokset:

	Vaihtoehdot				
	A	B	C ₁	C ₂	D
			2-vuoro- työ	3-vuoro- työ	
Lähtötilanne (80 vrk)					
tunnelia jäljellä (jm)	864	864	864	864	864
rakennusaikaa jäljellä (vrk)	120	120	120	120	120
tuotantonopeus (jm/vrk)	4.2	5.7	6.0	8.0	8.4
kustannusnopeus (mk/vrk)	2520	3530	2700	3680	2900
rakennusaika (vrk)	205	151	144	108	103
sakkoaika (vrk)	75	21	14	-	-
Kustannusvertailu					
tuotantokustannukset	517000	532000	389000	398000	298000
sakkokustannukset	75000	21000	14000	-	-
välitt. lisäkustannukset	-	20000	40000	40000	150000
yhteensä (mk)	592000	573000	443000	438000	448000

Johtopäätökset:

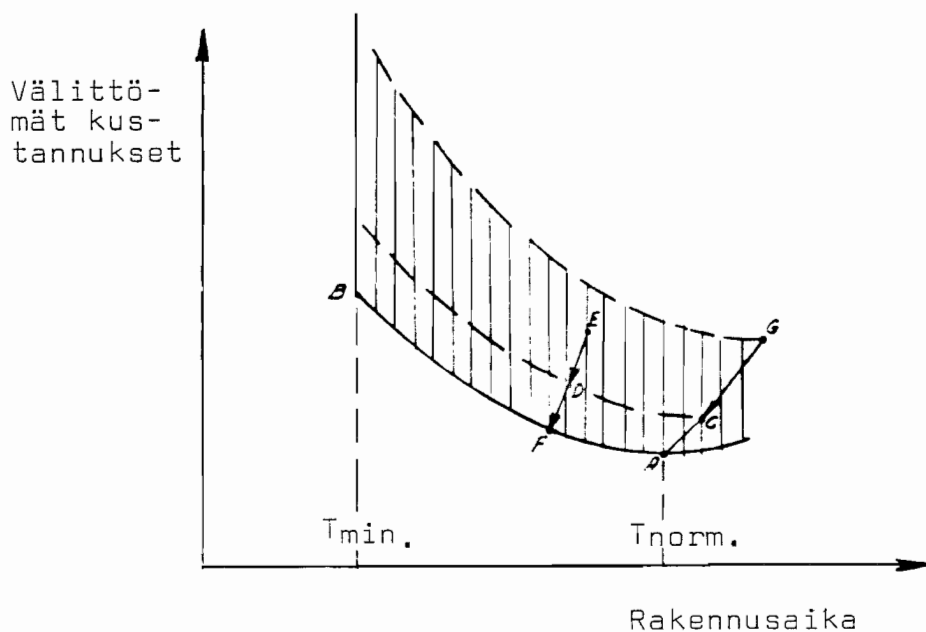
- Alkuperäinen suoritusmenetelmä on selvästi epätaloudellinen vaihtoehto
- Uuden louheensiirtokaluston hankinta joko kaksi- tai kolmivuorotyöhön sekä uuteen louhintamenetelmään siirtyminen ovat taloudellisesti likimain samanvertaisia vaihtoehtoja
- Todennäköinen ratkaisu: hankitaan uusi kalusto ja työskennellään kaksivuorotyössä. Menetelmä aiheuttaa tosin hieman myöhästymistä (14 vrk), mutta on vaihtoehtoihin C₂ ja D verrattuna selvästi vaivattomin.

19.2 Ajankäytön optimointi

Tunnelirakennuskohteen optimikustannusten saavuttaminen merkitsee työhön käytettävän panoksen minimointia. Tämä vastaa hyvin pitkälle työn ajallista optimointia. Ajallinen optimointi tapahtuu kuvan 18 (sivulla 79) mukaisesti kahdessa vaiheessa. Aluksi selvitetään vaihtoehtoisia suunnitelmia

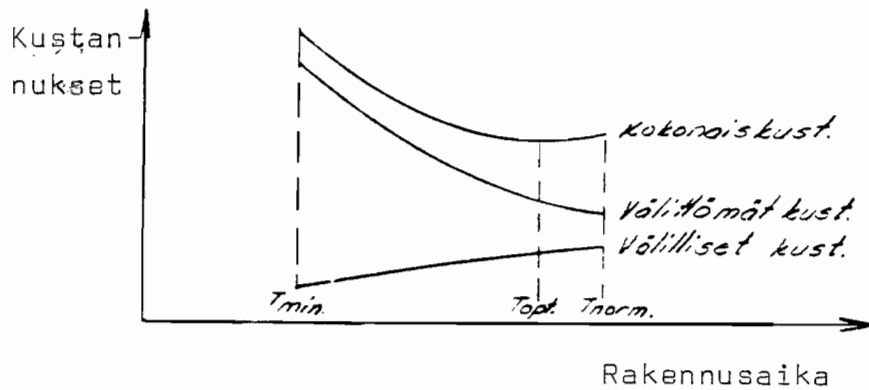
laatimalla välittömien kustannusten kustannus-aika -käyrä. Kustannus-aika -käyrän laatiminen edellyttää useiden vaihtoehtojen vertailua, jotta jokaiselle rakennusajalle voitaisiin laskea teoreettiset minimikustannukset, jolloin hanke on suunniteltu parhaalla mahdollisella tavalla käytettävissä olleen ajan puitteissa. Samoin on määritettävissä hankkeen lyhin mahdollinen toteutusaika, jolloin työ minimiajan puitteissa on suunniteltu parhaalla mahdollisella tavalla. /10/

Välittömien kustannusten kustannus-aika-funktioon voivat edellä esitettyjen lisäksi vaikuttaa muutkin kustannustekijät. Niiden vaikutuksen tutkiminen on monimutkainen tehtäväketju, jossa edellistä suunnitelmaa jatkuvasti parantamalla saavutetaan paras tulos. Tätä kuvaa kuvion 18 pisteiden siirtyminen linjalla E...D...F sekä G...C...A. /10/



Kuva 18. Hankkeen välittömät kustannukset rakennusaajan funktiona /10/.

Välittömien kustannusten lisäksi vaikuttaa kokonaistulokseen joukko välillisiä kustannuksia. Laskemalla yhteen välilliset ja välittömät kustannukset saadaan kokonaiskustannusten aika-kustannus-funktio, jonka perusteella määritetään optimirakennusaika (kuva 19 sivulla 80) /10/.



Kuva 19. Rakennusajan optimointi /10/.

19.3 Louhintatehon merkitys rakennusajan suunnittelussa

Kun tunnelia suunnitellaan, on tärkeää tietää, missä ajassa louhintatyö pystytään suorittamaan. Tarkoituksenmukaista ei ole laskea rakennusaikaa sen mukaan, että louhinta etenisi jatkuvasti ihannevuuhdilla, sillä tähän ei yleensä louhintatöissä päästä. Aikataulu tulisi aina suunnitella realistisin perustein ja huomioiden aikaisemmat kokemukset. Seuraus siitä, että pyritään liian tiukkaan aikatauluun, on yleensä se, että louhintakustannukset kasvavat. Onhan tunnelilouhinnan yksi erityispiirre mm. se, että työvoiman lisääminen tietyn rajan jälkeen ei nopeuta louhinnan etenemistä, vaan on lähinnä kustannuksia lisäävä tekijä.

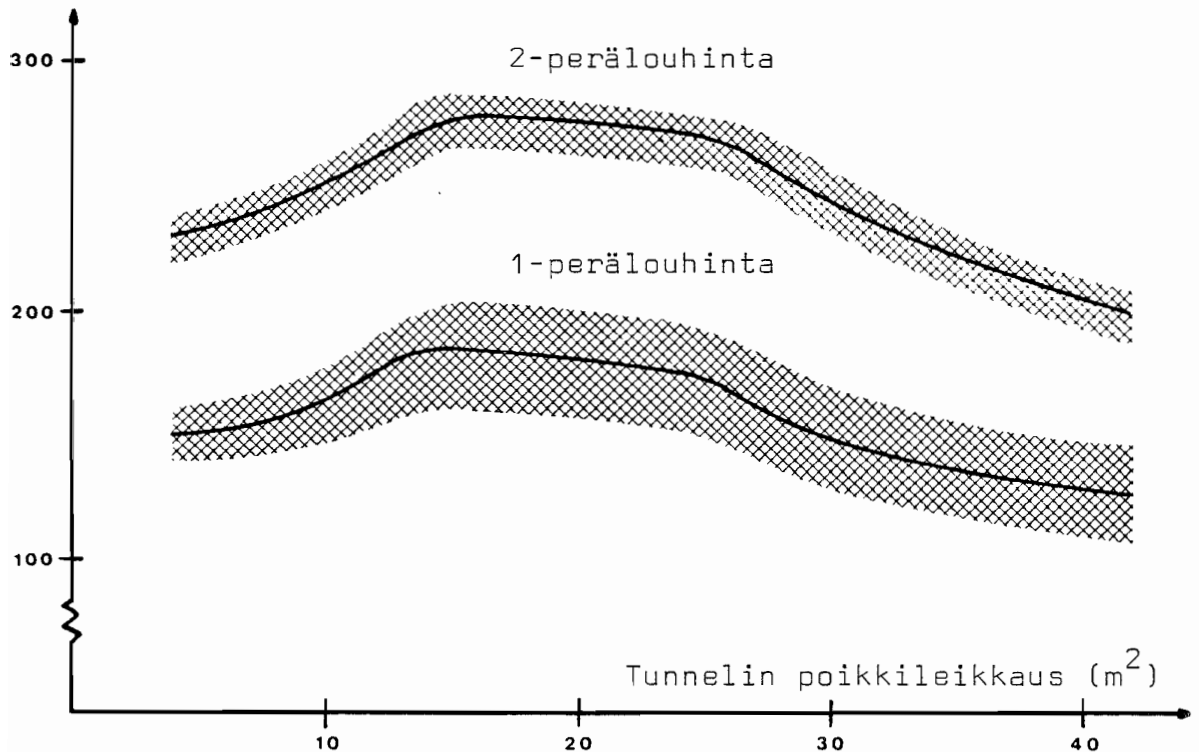
Se, millaisiin louhintaetenemiin tietyssä ajassa päästään, riippuu mm. seuraavista tekijöistä:

- tunnelin poikkileikkaus
- katkon pituus
- perän pituus
- työvoiman ammattitaito
- käytettävissä oleva kalusto
- kallion laatu.

Kuvassa 20 sivulla 81 on esitetty urakoitsijoiden näkemys siitä, millaiseen louhintaetenemään kuukaudessa tunnelin eri poikkileikkauksilla päästään, kun louhintatyö suoritetaan 1-perä- tai 2-perälouhintana. Kyseessä on kahdessa vuorossa, viitenä päivänä viikossa tapahtuva "normaali" louhinta, jolloin

ympäristötekijät, kuten tärinärajoitukset eivät vaikuta etenemään. Etenemät on annettu sen mukaan, että aikataulutekijä ei vaikuta louhintakustannuksiin kohottavasti eikä pienentävästi eli kyseessä ovat sellaiset etenemät, joihin päästään, kun huomioidaan edellä esitetyt reunaehdot.

louhintaetenemä (m/kk)



Kuva 20. Louhintaetenemät kuukaudessa 1- ja 2-perälouhinnassa tunnelin poikkileikkauksen funktiona.

Kuvassa 20 esitetyistä kuukausietenemien vaihtelualueista havaitaan, että etenemä tietyllä poikkileikkauksella vaihtelee 1-perälouhinnassa enemmän kuin 2-perälouhinnassa. Tämä johtuu siitä, että louhintatyössä esiintyvien häiriöiden merkitys on 1-perälouhinnassa suurempi. Esimerkiksi perässä suoritettavat injektointi- ja lujitustyöt saattavat keskeyttää 1-perälouhinnan kokonaan, kun taas 2-perälouhinnassa voidaan louhintaa jatkaa toisessa perässä normaaliin tapaan.

Etenemät kuukaudessa kasvavat sekä 1- että 2-perälouhinnassa jatkuvasti poikkileikkauksesta 6 m² lähtien poikkileikkaukseen 15 m² saakka. Poikkileikkauksilla 15 - 24 m² pienenevät etenemät hyvin vähän, jonka jälkeen poikkileikkauksen edelleen

kasvaessa alkavat etenemät pienetä enemmän. Poikkileikkauksen ollessa noin 30 m^2 ovat kuukausietenemät enää samaa suuruusluokkaa kuin ne ovat noin 6 m^2 :n tunnelissa.

Kun verrataan keskenään kuvassa 20 esitettyjä 1- ja 2-perälouhinnan kuukausietenemiä, havaitaan, että etenemät ovat 2-perälouhinnassa eri poikkipinta-aloilla noin 80 - 100 metriä suuremmat kuin vastaavat etenemät 1-perälouhinnassa. Näin ollen 2-perälouhinnan käyttöä puoltaa edullisempien louhintakustannusten lisäksi myös se, että työ pystytään suorittamaan huomattavasti nopeammin kuin 1-perälouhinnassa.

Suunnittelun kannalta olisi tärkeää, että pystyttäisiin ennalta arvioimaan mahdollisimman tarkkaan louhintatyöhön kuluva aika. Tämä on kuitenkin hyvin vaikeaa johtuen lähinnä siitä, että kallion laadulla ja louhintatyössä esiintyvillä häiriöillä voi olla suurikin vaikutus saavutettaviin louhintaetenemiin. Louhintaetenemän pieneneminen suunnitelmasta voi vaikuttaa merkittävästi louhintakustannuksiin - kuukausietenemän pieneneminen noin 13 % saattaa nostaa louhintakustannuksia jopa 15 %.

20. TYÖVOIMAN JA LOUHINTAKALUSTON VAIKUTUS KUSTANNUKSIIN

Tunnelilouhinnan erikoispiirrehän on, että työntekijämäärän lisääminen tietyn rajan jälkeen ei nopeuta louhintatyötä, vaan aiheuttaa lähinnä lisäkustannuksia palkkakustannusten muodossa. Yleensä pientunnelityömailla on varsinaiseen irrotustyöhön osallistuvien työntekijöiden määrä 1-perälouhinnassa 3 - 4 miestä ja 2-perälouhinnassa 4 - 5 miestä. Näiden lisäksi kuuluvat miehitykseen lastauskoneen kuljettaja ja kuorma-auton kuljettajat (2 - 3 miestä).

Työntekijöiden ammattitaito vaikuttaa luonnollisesti työtulokseen ja kustannuksiin. Mikäli louhintatöitä on käynnissä samanaikaisesti hyvin runsaasti, ei ammattimiehiä riitä joihinkin louhintakohteeseen, mikä saattaa aiheuttaa mm. aikataulusta viivästymistä ja nostaa näin louhintakustannuksia. Tähän louhintakustannusten kasvuun korkeasuhdanteen aikana vaikuttaa ammattitaidottomien työntekijöiden huonomman tehon vuoksi myös, että ammattimiehet vaativat tällöin korkeampaa palkkaa.

Tässä työssä käsitellään useissa eri kohdissa kaluston valintaan liittyviä kysymyksiä ja eri vaihtoehtojen kustannuksia. Merkittävin ratkaisu tehdään aina siinä vaiheessa, kun valitaan tunnelinajomenetelmä eli käytetäänkö kisko-, kumipyörä- vai täysprofiilikalustoa. Suomessa käytetään vain kahta edellä mainittua ja näistäkin kiskokalustoa melko harvoin.

Louhintakustannuksia nostaa usein se, että urakoitsijoilla ei ole käytettävissään tiettyyn kohteeseen soveltuvaa parasta mahdollista kalustoa. Periaatteena pientunneliajossa on usein, että työ tehdään suurimmalla mahdollisella kalustolla, mikä tunneliin mahtuu. Tämä teknillisesti mahdollinen suurin koneiden käyttöalue ei kuitenkaan aina ole taloudellisin käyttöalue. Konevalmistajat antavat koneilleen suositeltavat käyttöalueet tunnelin poikkileikkauksen lisäksi myös tunnelin pituuden ja kaltevuuden funktiona. Näitä käyttöalueita soveltamalla

tulisivat louhintakustannukset yleensä edullisemmiksi, mutta käytännössä on kuitenkin niin, että urakoitsijan ei kannata yhtä louhintakohdetta varten investoida kalliiseen koneeseen, vaan työ kannattaa tehdä käytettävissä olevalla kalustolla.

21. TYÖN LAATUVAATIMUSTEN VAIKUTUS LOUHINTAKUSTANNUKSIIN

Louhintatyölle asetetut laatuvaatimukset nostavat yleensä louhintakustannuksia. Tällaisia laatuvaatimuksia ovat esimerkiksi toleranssirajoitukset ja vaatimukset sallitulle lohkokarekoolle. Mikäli työn suorittaminen vaatii tarkkuuslouhinnan käyttöä, nousevat kustannukset selvästi johtuen siitä, että tarkkuuslouhinta edellyttää louhittavan tunnelin reunareioissa tiheämpää ja huolellisemmin suoritettua porausta sekä erityisratkaisuja panostuksessa.

Toisaalta kallion lujuus säilyy paremmin tarkkuuslouhinnassa ja näin tarvitaan vähemmän lujitustöitä. Lopullista tulosta tarkasteltaessa pidetään tarkkuuslouhintaa yleensä kannattavana.

22. CASE-TUNNELIN KUSTANNUSARVIOISTA

Tähän selvitykseen liittyen laskivat työssä avustaneet urakoitsijat ja geotekninen osasto kustannusarvion eräälle, tulevaisuudessa mahdollisesti toteutettavalle, ns. case-tunnelille. Tunnelin nimeksi annettiin Pihlajamäki - Ylä-Malmi -vesijohtotunneli. Näiden kustannusarvioiden tarkoituksena oli lähinnä selvittää 1- ja 2-perälouhinnan kustannuseroja. Toisaalta selvitettiin sitä, minkä kokoinen tunneli on edullisinta louhia, kun reunaehdot rajoittavat mahdollisimman vähän poikkileikkauskoon valintaa.

Kustannusarvioita laadittaessa ei ole laskettu mukaan lujitus- ja tiivistyskustannuksia. Tämä johtuu siitä, ettei käytettävissä ollut riittävästi tutkimustuloksia alueen kalliooperästä. Yleensä lujitus- ja tiivistyskustannusten osuus on 5 - 15 % pientunnelihankkeen kokonaiskustannuksista.

Kun kustannusarviot laskettiin, oli käytettävissä kartta, johon oli merkitty seuraavat tiedot:

- tunnelin pakkopisteet, eli ne paikat, joista vesijohto yhdistetään olemassaolevaan verkostoon
- mahdollisen ajotunnelin suuaukon paikka
- arviot kallion rikkonaisuudesta
- alueelle tuleva viemäritunneli ja sen korkeustaso
- tutkimuspistetiedot
- väestönsuoja
- saven alapinnan korkeuskäyrästä maanpinnasta lukien
- kivilajitiedot

Lisäksi oli tiedossa, että maanpinnassa olevat rakennukset asettavat louhinatärinöille rajoituksen $v = 50 \text{ mm/s}$. Suunnittelussa tuli pyrkiä siihen, että koko linjalla tarvitaan veden poistoa varten vain yksi pumppaamo. Tunnelin poikkileikkauksen koko voitiin valita vapaasti, kunhan vain vaaditut putket ja huoltotraktori mahtuivat tunneliin.

Sekä urakoitsijat että geotekninen osasto päätyivät tunnelin linjauksessa suunnilleen samanlaiseen ratkaisuun, joten tunnelin pituus oli samaa suuruusluokkaa (noin 1470 m) kaikkien osapuolten kustannusarvioissa. Varsinaisen tunnelilouhinnan lisäksi sisältävät kustannusarviot kuilulouhintaa noin 60 m ja avolouhintaa noin 900 m³.

Valitut poikkileikkauskoot vaihtelivat urakoitsijoilla 13.5 - 15 m²:n välillä. Geotekninen osasto valitsi tunnelin kooksi 12.5 m².

Kustannusarviot laadittiin erikseen 1-perä- ja 2-perävaihtoehdolle. Kaksiperävaihtoehdossa tuli louhittavan ajotunnelin pituudeksi noin 230 m.

Mikäli louhinta suoritetaan 1-perälouhintana, on tunnelin kustannusarvio urakoitsijoiden mukaan 5.8 - 6.0 milj. mk ja geoteknisen osaston mukaan noin 4.7 milj. mk. Kaksiperälouhinnassa ovat kustannukset urakoitsijoiden mukaan 5.3 - 5.5 milj. mk ja geoteknisen osaston mukaan noin 4.7 milj. mk.

Kustannusarvioista havaitaan, että urakoitsijoiden esittämät laskelmat poikkeavat hyvin vähän toisistaan, mutta ero geoteknisen osaston laskemaan kustannusarvioon on melko suuri. Yksiperälouhinnan kuutiometrihintaa oli urakoitsijoiden mukaan noin 30 % ja geoteknisen osaston mukaan noin 20 % kalliimpi kuin 2-perälouhinnan kuutiometrihintaa. Kokonaiskustannuksiltaan tuli 2-perälouhinta urakoitsijoiden mukaan tässä tapauksessa noin 10 % edullisemmaksi kuin 1-perälouhinta. Geoteknisen osaston mukaan ei tässä tunnelissa synny merkittäviä eroja kustannusarvioissa suoritettiinpa työ 1- tai 2-perälouhintana.

23. EHDOTUS URAKKASOPIMUKSIIN KUULUVIEN LISÄTÖIDEN
MAKSUPERUSTEIKSI

Rakennuttajilla ja urakoitsijoilla on usein mielipide-eroja urakkasopimukseen kuuluvien lisätöiden maksuperusteista. Tämän selvityksen yhteydessä on pyritty laatimaan sellainen yksikköhintaluettelo, joka olisi mahdollisimman oikeudenmukainen sekä urakoitsijaa että rakennuttajaa kohtaan ja olisi riittävän yksiselitteinen. Lähtökohtana luettelon laadinnassa on ollut Helsinkiin rakennettavan jätevesien poistotunnelijärjestelmän erään urakkaosuuden yksikköhintaluettelo, jota on kehitetty siten, että se olisi mahdollisimman yleispätevä ja soveltuisi erilaisiin tunnelirakennuskohteisiin ja -olosuhteisiin. Kukin tämän selvityksen teossa avustaneista urakoitsijoista on saanut esittää oman mielipiteensä yksikköhintaluettelon jakoperusteiksi ja sovittamalla yhteen nämä eri ehdotukset on pyritty kaikkia osapuolia tyydyttävään tulokseen.

Malliyksikköhintaluettelo

Yksikköhinnat:

1.	KAIVU- JA LOUHINTATYÖT KUORMAUKSINEEN, KULJETUKSINEEN 0 - 500 m JA VASTAANOTTOINEEN	
1.1	Maankaivu (kaivettava paikka yksiselitteisesti)	... mk/m ³ ktr
1.2	Avolouhinta (tietyissä tapauksissa on syytä antaa erikseen hinta neliömetrilouhinnalle)	... mk/m ³ ktr
1.3	Ajotunnelin I hintaluokan louhinta	... mk/m
1.4	Ajotunnelin II " "	... mk/m
	(mikäli ajotunnelin otsan paikkaa siirretään aloituksen jälkeen, on siitä maksettava eri korvaus)	
1.51	Varsinaisen tunnelin I hintaluokan louhinta/1-perälouhinta	... mk/m

1.52	Varsinaisen tunnelin I hintaluokan louhinta/2-perälouhinta	... mk/m
1.61	Varsinaisen tunnelin II hintaluokan louhinta/1-perälouhinta	... mk/m
1.62	Varsinaisen tunnelin II hintaluokan louhinta/2-perälouhinta	... mk/m
1.7	Pystykuilujen louhinta (eri hinta sen mukaan, mikä on kuilun poikkileikkaus)	... $\text{mk/m}^3_{\text{ktr}}$
1.8	Kalliopinnan rusnaus betoniperustuksien kohdilla	... mk/m^2
2.	KULJETUS	
2.1	Kaivumaan kuljetuksen lisähinta kilometrille, jos kuljetusmatka on > 500 m (kuljetukselle eri hinta yksityisalueella ja yleisellä tiellä)	... $\text{mk/m}^3_{\text{ktr}} \times \text{km}$
2.2	Louheen kuljetus 500 - 1000 m	... $\text{mk/m}^3_{\text{ktr}}$
2.3	Kuljetuksen lisähinta 1 - 2 km:iin, 2 - 3 km:iin...jne (kaupunkiolosuhteissa pitäisi määrätä eri hinta eri ajosuunnille, sillä samanpituinen matka kahteen eri suuntaan voi vaatia aivan eri kuljetusajan)	... $\text{mk/m}^3_{\text{ktr}}$
3.	LUJITUSTYÖT TUNNELISSA	
3.1	Louhintatyön aikana tehtävät lujitukset	
3.111	Juotettu pultti (pulttipaksuus)/1-perälouhinta 0 - 30 m tunnelin perästä - L = 3200 - L = 2400	... mk/kpl ... mk/kpl
3.112	Juotettu pultti (pulttipaksuus)/1-perälouhinta > 30 m tunnelin perästä - L = 3200 - L = 2400	... mk/kpl ... mk/kpl
3.113	2-perälouhinnalle vastaava kuin 3.111	... mk/kpl
3.114	2-perälouhinnalle vastaava kuin 3.112	... mk/kpl
3.111 -	Jaottelua pulttipituuksien mukaan on	
3.114	syytä tarkistaa, kun jumboporaus pulttustöissä yleistyy	

3.12	Hintamuutos, jos pulttipituudet muuttuvat louhintatyöselityksen määrittelemistä pituuksista. Ks 3.111 - 3.114	... mk/0.8 m
3.131	Vahvistamaton ruiskubetonointi (paksuus)/1-perälouhintaa (0 - 30 m tunnelin perästä)	... mk/m ²
3.132	Vahvistamaton ruiskubetonointi (paksuus)/1-perälouhintaa (> 30 m tunnelin perästä)	... mk/m ²
3.133	2-perälouhinnalle vastaava kuin 3.131	... mk/m ²
3.134	2-perälouhinnalle vastaava kuin 3.132	... mk/m ²
3.131 - 3.134	Eri louhittavuusluokille voidaan antaa eri hinnat johtuen ruiskubetonin menekki- vaihteluista. Vahvistetulle ruiskubetonille vastaava jaottelu kuin vahvistamattomalle.	
3.2	Louhintatyön jälkeen tehtävät lujitukset	
3.21	Juotettu pultti (pulttikoko)	
	- L = 3200	... mk/kpl
	- L = 2400	... mk/kpl
3.22	Hintamuutos, jos pulttipituudet muuttuvat louhintatyöselityksen määrittelemistä pituuksista	... mk/0.8 m
3.23	Vahvistamaton ruiskubetonointi (paksuus)	... mk/m ²
3.24	Vahvistettu ruiskubetonointi (paksuus)	... mk/m ²
3.3	Muut lujitustyöt	
3.31	Hintamuutos, jos juotetun pultin asemasta käytetään jännitettyjä pultteja	... mk/kpl
3.32	Salaojat	
	1- ja 2-perälouhinnalle eri hinnat huomioiden lisäksi etäisyys perään (0 - 30 m tai > 30 m)	... mk/m
3.33	Täyttö ruiskubetonilla	
	Kuten 3.32	... mk/m ³ ktd
3.4	Kuiluissa suoritettaville lujitustöille voidaan antaa oma hinta soveltaen kohtia 3.1 - 3.3	
4.	TUNNUSTELUPORAUS	
4.1	Tunnustelureiän poraus	

	- L > 20 m, kaltevuus 1:20 (yläkätinen)	... mk/m
	- L > 20 m, kaltevuus 1:3 (yläkätinen)	... mk/m
	(tietyissä tapauksissa parempi määrätä hinta markkaa/tunnelimetri)	
4.2	Vesimenekkipoke tunnustelureiässä	... mk/kpl
5.	INJEKTOINTI JA VEDEN POISTO	
5.1	Esi-injektointireiän poraus tunnelissa (louhinnan keskeyttävä)	
	- L = 0 - 8 m	... mk/m
	- L = 8 - 20 m	... mk/m
5.2	Jälki-injektointireiän poraus tunnelissa (ei keskeytä louhintaa)	
	- L = 0 - 8 m	... mk/m
	- L = 8 - 20 m	... mk/m
5.31	Vesimenekkipoke injektointireiässä/ 1-perälouhinta	... mk/kpl
5.32	Vesimenekkipoke injektointireiässä/ 2-perälouhinta	... mk/kpl
5.41	Injektointityö, joka keskeyttää louhinnan/1-perälouhinta	... mk/h
5.42	Injektointityö, joka keskeyttää louhinnan/2-perälouhinta	... mk/h
5.5	Injektointityö, joka ei keskeytä louhintaa, työryhmä 1 + 2 ja injektointikalusto (jälki-injektointi)	... mk/h
5.6	Sementti injektoituna	... mk/40 kg
5.7	Vuotoveden poisto puhdistettuna	... mk/m ³
5.8	Vuotoveden mittauspato	... mk/kpl
6.	BETONIRAKENTEET	
6.1	Betonilaudoitus	... mk/m ²
	1-puolinen ja 2-puolinen muotti erikseen	
6.2	Betoniteräs (laatu) asennettuna	... mk/kg
6.3	Betoni (laatu) valettuna	... mk/m ³ ktr
7.	TASAUS- JA TÄYTTÖTYÖT	
7.1	Täyttö murskeella tai sepelillä tiivistyksineen	... mk/m ³ ktr
7.2	Täyttö soralla tiivistystöineen	... mk/m ³ ktr

8. TELINEET

8.1 Saksilava-auto ... mk/h

9. ULKOPUOLISET ASIANTUNTIJAT

- veloitus hinta ... mk/h

24. YHTEENVETO

Kaupunkialueilla on viime vuosina yleistynyt kunnallistekniikan palvelujen järjestäminen siten, että sijoitetaan johdot, kaapelit, putket ym. kallioon louhittavaan tunneliin, ns. kunnallistekniseen tunneliin.

Sijoittamalla kunnallistekniset verkostot kalliotunneliin maakanavan sijasta, saavutetaan monia etuja; esimerkiksi liikennettä häiritsevät katujen aukirepimiset vähenevät, verkostot ovat tunnelissa suojassa liikenteen ja kaivutöiden aiheuttamilta vaaroilta, verkostojen huolto helpottuu, verkostoja on helpompi laajentaa ja niiden asentaminen tunneliin on usein halvempaa kuin maakanavaan.

Tässä selvityksessä on pyritty kartoittamaan tunnelirakentamiseen liittyvät kustannusmuuttujat. Jokaista kustannusmuuttujaa analysoitaessa on arvioitu kyseisen muuttujan merkitystä louhintakustannuksiin. Tavoitteena on ollut samalla selvittää 1- ja 2-perälouhinnan kustannuserot. Käsiteltyjen kustannusmuuttujien vaikutus louhintakustannuksiin ei ole yksiselitteinen, koska ne vaikuttavat toisiinsa.

Louhintamenetelmällä on olennainen vaikutus louhintakustannuksiin. Kuutiometrikustannukset ovat 1-perälouhinnassa yleensä noin 30 % kalliimmat kuin 2-perälouhinnassa. Ajo-tunnelin louhintakustannukset saattavat kuitenkin tehdä 2-perälouhinnasta kokonaiskustannuksiltaan kalliimman vaihtoehdon. Kaksiperälouhinta on edullista etenkin silloin, kun ajotunneli sijoitetaan siten, että kummankin perän louhinta kestää yhtä kauan.

Kustannusarvioiden ollessa keskenään samaa suuruusluokkaa kannattaa työ suorittaa 2-perälouhintana, sillä mahdolliset häiriöt eivät vaikuta 2-perälouhintaan yhtä paljon kuin 1-perälouhintaan.

Halvimpiin kuutiometrikustannuksiin päästään 700 - 1300 metrin pituisessa perässä. Tämä johtuu siitä, että tällöin ovat investointi- ja työmaan perustamiskustannukset louhittua yksikköä kohti melko pienet. Toisaalta tuuletus- ja kuljetuskustannukset eivät vielä ole kasvaneet kovin suuriksi.

Laskuperälouhintaa tulee välttää, sillä korkeat vedenpoisto- ja panostuskustannukset tekevät siitä kalliin vaihtoehdon.

Louhinnan kuutiometrikustannukset nousevat ajotunnelin kaltevuuden kasvaessa. Mikäli ajotunneli on lyhyt ja sen kaltevuus 1:7 tai loivempi ei ajotunnelilla ole merkittävää vaikutusta varsinaisen tunnelin louhintakustannuksiin.

Tunnelin poikkileikkauskoon kasvaessa alenevat louhinnan kuutiometrikustannukset ja kustannukset tunnelimetriä kohti kasvavat. Poikkileikkauskoolla ei ole merkittävää vaikutusta 1- ja 2-perälouhinnan keskinäisiin kustannuseroihin. Yksi-perälouhintaa on kaikilla poikkileikkauksilla noin 30 % kalliimpaa.

Tunnelin korkeusaseman alentaminen aiheuttaa lisäkustannuksia, joita syntyy mm. ajotunneleiden ja kuilujen pidentymisestä. Toisaalta saavutetaan säästöä siinä, että ympäristö ei aseta louhintatyölle rajoituksia. Korkeusasema valitaan kustannusvertailun avulla, jolloin huomioidaan mm. kallion laatu, kalliopinnan topografia, ajotunnelit, kuilut ja rakennukset.

Tunnelin linjauksen valinta tapahtuu pääosin samojen tekijöiden perusteella kuin korkeusaseman valinta. Mahdollisuuksien mukaan verrataan eri linjausvaihtoehtoja ja haetaan optimiratkaisu kustannusvertailujen avulla.

Hyvin suoritettut kallioperätutkimukset alentavat yleensä urakkatarjoushintaa, koska riski pienenee tutkimusten laadun parantuessa. Tapauskohtaisesti tulee kuitenkin harkita, mitkä tutkimukset ovat välttämättömiä työn toteutuksen ja turvallisuuden kannalta ja millä saadaan säästöä louhintakustannuksissa.

Kallion laadulla on suuri vaikutus louhintakustannuksiin ja työn rytmitykseen mm. seuraavista syistä:

- kova tai rikkonainen kallio pidentää porausaikaa
- louhintatyön eri osavaiheiden kustannukset kasvavat kallion laadun heiketessä
- ruhjeisessa kalliossa joudutaan tekemään usein kalliita lujitus- ja tiivistystöitä

Louhintatyön rytmityksessä on tärkeintä, että saadaan louhittua suunniteltu määrä katkoja työvuoron aikana. Koneiden ja miehistön odotusajat on pyrittävä minimoimaan. Lähelle ihannetilannetta päästään silloin, kun louhittavana on monta perästä, joiden pituudet ovat lyhyitä ja louhittava kallio on ehjää. Louhintatyössä esiintyvät häiriöt nostavat louhintakustannuksia sitä enemmän, mitä vähemmän louhittavia periä on käytössä. Yksiperälouhinnassa keskeyttävät lujitus- ja tiivistystyöt usein koko louhinnan.

Pohjavesiolosuhteet vaikuttavat vedenpoisto- ja injektointikustannuksiin ja välillisesti myös irrotuskustannuksiin. Tunnelirakentamisen yksi suurimmista ja vaikeimmin hallittavista riskitekijöistä on pohjavedenpinnan aleneminen ja sen aiheuttamat vauriot maanpäällisille rakenteille.

Liian kireä aikataulu nostaa yleensä louhintakustannuksia. Louhinnan kuukausietenemän pieneneminen esimerkiksi 13 % saattaa nostaa kustannuksia jopa 15 %.

Kaluston valinnassa tehdään tärkein ratkaisu silloin, kun valitaan tunnelinajomenetelmä. Kiskokalusto on usein taloudellisin vaihtoehto, kun tunnelin poikkileikkaus on 6 - 12 m² ja pituus vähintään 1500 m. Kumipyöräkalustoa käytetään yleensä, mikäli tunnelin poikkileikkaus on suurempi kuin 12 m².

Louhintatyölle asetettavat laatuvaatimukset, kuten toleranssirajoitukset ja vaatimukset lohkarekoolle, nostavat yleensä louhintakustannuksia.

Tässä selvityksessä laadittiin lisäksi malliysikköhintaluettelo, jossa on esitetty ehdotus urakkasopimukseen kuuluvien lisätöiden maksuperusteiksi.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Heiskanen, R., Pientunneleiden optimikoko ja kaltevuuden vaikutus. Vuorimiesyhdistyksen pientunneli-symposium, Helsinki 1979.
- /2/ Helsingin kaupungin kiinteistövirasto geotekninen osasto, Tunnelirakentajien neuvottelupäivät, 1977.
- /3/ Hintikka, P., Pukkila, J., Uusin porauskalusto. Helsinki 1976. INSKO, julkaisu 46 - 76. Tunnelit ja kalliovarastot.
- /4/ Hoskins, J.R., Green, W.R., Mineral Industry Costs. Northwest Mining Association, September 1977.
- /5/ Hörkkö, P., Hydraulinen ja pneumaattinen poraus, Tampere 1979, julkaisematon.
- /6/ Hytti, P., Tutkintotehtävä, Esi-injektointi ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa, Teknillinen korkeakoulu, 1981.
- /7/ Kantanen, E., Kallioluokituksen käyttö louhintatöissä, Helsinki 1976. INSKO, julkaisu 46 - 76. Tunnelit ja kalliovarastot.
- /8/ Kianne, I., Oksman, P., Kaukolämpötunneli välillä Naantali - Raisio - Turku, Rakennustekniikka 4/80.
- /9/ Liisanantti, P., Tukemis-, lujitus- ja tiivistystöiden suunnittelun toteuttamisen taloudellinen merkitys, Helsinki 1981. INSKO, julkaisu 49 - 81. Kalliorakenteiden ja -tilojen lujittaminen ja tiivistäminen.
- /10/ Puskala, R., Kalliorakennushankkeen kustannukset ja niiden optimointi, Helsinki 1974. INSKO, julkaisu 19 - 74. Kalliorakenteiden suunnittelu ja toteuttaminen.

- /11/ Puskala, R., Tunnelisortumat urakoitsijan kannalta. Kalliomekaniikan päivät, 1974.
- /12/ Pöllä, J., Esi-injektoinnin vaikutus kallion louhinta-työn taloudellisuuteen, Helsinki 1981. INSKO, julkaisu 49 - 81. Kalliorakenteiden ja -tilojen lujittaminen ja tiivistäminen.
- /13/ Pöllä, J., Kallioperän käyttömahdollisuudet, Kunnallistekniikka 5/80.
- /14/ RIL, Maa- ja kalliorakennus, Helsinki 1976.
- /15/ Roinisto, J., Tutkintotehtävä, Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys, Teknillinen korkeakoulu, 1981.
- /16/ Saanio, P., Kalliomekaniikan luentomoniste, Teknillinen korkeakoulu, 1978.
- /17/ Tervilä, K., Esi-injektoinnin suorittaminen, kustannukset ja huomioiminen urakka-asiakirjoissa, Helsinki 1981. INSKO, julkaisu 49 - 81. Kalliorakenteiden ja -tilojen lujittaminen ja tiivistäminen.
- /18/ Vuolio, R., Lisensiaattityö, Varovainen räjäytys asutuskeskuksissa, Teknillinen korkeakoulu, 1978.

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

1. Anttikoski, U., Geoteknilliset kartat ja niiden käyttöminen. 1973. 30,-
2. Anttikoski, U., Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1973. 50,-
3. Anttikoski, U., Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1974. 50,-
4. Mäkinen, R., Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella. 1974. 50,-
5. Saarelma, M., Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys. 1974. 30,-
6. Saarelma, M., Kitkapaalujen kantavuus. 1976. 30,-
7. Petäjä, J., Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen. 1977. 50,-
8. Raudasmaa, P., Metrotunneleiden injektointi. 1977. 120,-
9. Anttikoski, U., Kalliotunnelien käyttö varastointiin. 1977. 50,-
10. Tikkanen, H., Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa. 1978. 70,-
11. Arkima, O., Kluuvin ruhjeen jäädytys. 1978. 120,-
12. Raudasmaa, P., Puiset perustusrakenteet. 1979. 50,-
13. Havukainen, J., Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa. 1979. 50,-
14. Vähäaho, I., Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen. 1979. 50,-
15. Raudasmaa, P., Pohjavesitarkkailu -80. 1980. 50,-
16. Anttikoski, U., Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunneli-konferenssin kokemusten perusteella. 1979.
17. Roinisto, J., Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin. 1981. 50,-
18. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa. 1981. 50,-
19. Roinisto, J., Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys. 1981. 50,-
20. Vuola, P., Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta. 1981. 50,-
21. Havukainen, J., Korhonen, O., Tonttialueiden maarakenteet. 1981. 30,-
22. Havukainen, J., Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä. 1981.
23. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa. 1982. 50,-
24. Latvala, A., Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys. 1982. 30,-
25. Havukainen, J., Hämäläinen, A., Sulamäki, A., Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttö-mahdollisuuksista maarakentamisessa. 1982. 30,-
26. Halkola, H., Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä. 1982.
27. Paavola, P., Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannusselvitys. 1982. 50,-
28. Vähäaho, I., Maarakennusta koskeva mallityöselitys. 1982. 30,-
29. Gulin, K., Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa. 1982. 50,-
30. Halkola, H., Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät. 1982. 50,-

