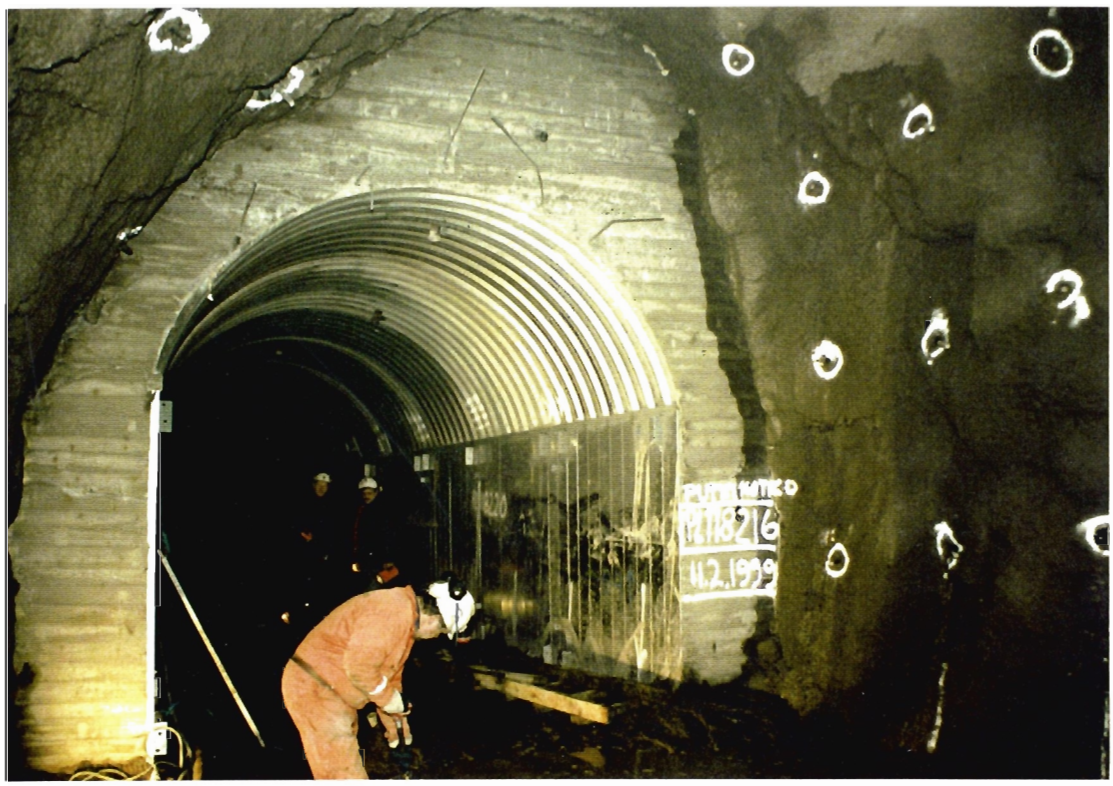
geotekniikka
KIINTEISTÖVIRASTO
HELSINGIN KAUPUNKI
Fastighetskontoret
Helsingfors stad

# PITKIEN VESITUNNELEIDEN SORTUMAT JA LUJITUS

Jannis Mikkola
Raimo Viitala



Helsingin kaupungin
kiinteistöviraston
geoteknisen osaston
tiedote 80/1999

# PITKIEN VESITUNNELEIDEN SORTUMAT JA LUJITUS

**Jannis Mikkola**
**Raimo Viitala**

# TIIVISTELMÄ

Suomessa on viimeisten vuosien aikana sattunut kolme merkittävää sortumaa vesitunneleissa. Vesitunneleissa sattuneet vauriot ovat herättäneet keskustelua sortumien syistä, niiden korjaustavoista sekä tunnelien lujitusmääristä.

Tutkimuksen päätavoitteena on dokumentoida sortumat ja niiden korjausmenetelmät sekä selvittää tunnelien sortumien syitä. Toisena tavoitteena on selvittää vesitunneleissa käytettyjä lujitusmääriä.

Tutkimuksen yhteydessä seurattiin tiiviisti Päijänne-tunnelin korjauksia sekä tehtiin runsaasti laboratoriotutkimuksia ja geologien haastatteluja sortumien syiden selvittämiseksi. Lisäksi kerättiin materiaalia myös Helsingin puhdistettujen jätevesien poistotunnelin, sekä ruotsalaisen Bolmen-tunnelin sortumista ja lujitusmääristä.

Tämän tutkimuksen perusteella paineellisten vesitunneleiden sortumat ovat jaettavissa kolmeen ryhmään: paisuvan saven aiheuttamat sortumat, veden virtauksesta johtuvan eroosion aiheuttamat sortumat ja kemiallisen rapautumisen aiheuttamat sortumat. Kaikki sortumat eivät esiinny puhtaasti edellä esitettyinä tyyppeinä, vaan ne voivat olla myös kahden tai useamman sortumatyypin sekoituksina.

Paisuvan saven ja kemiallisen rapautumisen aiheuttamia sortumia voidaan ehkäistä hyvällä rakentamisaikaisella suunnittelulla, jolla pyritään selvittämään paisuvan saven esiintyminen sekä kemialliselle rapautumiselle alttiit kohdat. Työnaikaisessa suunnittelussa tulisikin olla mukana riittävästi geologista tietotaitoa.

Pienten (alle 400 mm) kivien runsaan putoamisen johdosta ruiskubetonimäärää tulisi lisätä vesitunneleissa. Ruiskubetoni estää rakotäytteiden huuhtoutumisen ja näin avainlohkojen putoamisen. Suuria pultin vaativia lohkareita oli pudonnut hyvin vähän, joten pultituksen radikaaliin lisäämiseen ei ole perusteita.

Tunnelien pitkäaikaiskäyttäytymisen seurannassa ja korjausten suunnittelussa suurena apuna on tunnelin hyvä tekninen ja geologinen dokumentointi. Näiden tietojen käyttö tulevien tunnelien suunnittelussa auttaa nostamaan tunneleiden laatua ja pitkäaikaiskestävyyttä.

## ABSTRACT

During the last few years, three major cave-ins have occurred in Finnish water tunnels. The damage to these tunnels has raised discussion about the causes, and also about methods of repairing cave-ins and the amount of reinforcement necessary in long water tunnels.

The main object of this study is to document the cave-ins and the process of their repair, and to find out the reasons for the cave-ins. The other object of the study is to find out the amount of reinforcement used in water tunnels.

The repair work on the Päijänne Tunnel was observed closely. Extensive of laboratory testing and interviews of experienced geologists were carried out to find the reasons for the cave-ins. Additionally, material from Helsinki waste-water outlet tunnels and from the Bolmen raw water tunnel in Sweden was collected for this study.

According to this study, the cave-ins in pressurised water tunnels can be divided into three categories: cave-ins caused by swelling clay, erosion caused by waterflow in the tunnel, and chemical weathering. Cave-ins are not always caused by only one factor, but may be caused by a combination of several factors.

Cave-ins caused by swelling clay and chemical weathering can be prevented by proper planning during construction, which helps to identify the occurrence of swelling clay and areas that can be sensitive to chemical weathering. This is why there must be enough geological know-how even during the construction phase.

The amount of shotcrete should be increased due to the great number of fallings of small rocks (under 400 mm). Shotcrete prevents flushing of the joint fillings, which can lead to the fall of keyblocks. There were only a few falls of large boulders which need bolting, and thus there is no need for a radical increase in bolting.

In monitoring the long-term behaviour of tunnels and in planning repair work, good technical and geological documentation would be of great assistance. This documentation would also be useful when planning new tunnels as an aid to achieving improved quality and long-term stability.

# ALKUSANAT

Tämä tutkimus perustuu DI Jannis Mikkolan diplomityöhön, joka on tehty Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen osaston tutkimustyönä. Tutkimuksen rahoitukseen osallistuivat geoteknisen osaston lisäksi, Pääkaupunkiseudun Vesi Oy ja Helsingin vesi. Tutkimukseen osallistui panoksellaan myös Maa ja Vesi Oy. Tutkimuksen kohteina olivat Päijänne-tunneli, Helsingin puhdistettujen jätevesien poistotunneli ja ruotsalainen Bolmen-tunneli.

Tutkimuksen ohjausryhmän muodostivat professori Pekka Särkkä Teknillisestä korkeakoulusta, toimialapäällikkö Pekka Holopainen ja projektipäällikkö Raimo Viitala geotekniseltä osastolta, suunnittelupalveluiden päällikkö Armas Kämppi Helsingin Vedestä ja toimitusjohtaja Ilkka Hirsto Pääkaupunkiseudun Vesi Oy:stä. Lisäksi mukana olivat Päijänne-tunnelin korjauksen suunnitelleet insinööri Reino Pöyhönen ja DI Arto Wegelius Maa ja Vesi Oy:stä.

Professori Heikki Niini Teknillisestä korkeakoulusta ja dosentti Veli Suominen Geologian tutkimuskeskuksesta ovat antaneet arvokkaita lausuntoja ja kommentteja tutkittavien tunneleiden sortumiin liittyvistä geologisista asioista. Sortumien korjaukseen liittyviä käytännön toimenpiteiden selvittämisessä on apuna ollut mm. Jorma Hiltunen Kalliorakennus Oy:stä.

Parhaimmat kiitokset kaikille tutkimukseen osallistuneille ja etenkin sen tekijälle Jannis Mikkolalle.

Helsingissä 22.12.1999

Ilkka Vähäaho
Osastopäällikkö

# SISÄLLYSLUETTELO

**TIIVISTELMÄ** ..... **1**

**ABSTRACT** ..... **2**

**ALKUSANAT** ..... **3**

**SISÄLLYSLUETTELO** ..... **5**

**1 JOHDANTO** ..... **9**

**2 PITKÄT VESITUNNELIT** ..... **10**

2.1 PÄIJÄNNE-TUNNELI ..... 10
*2.1.1 Yleistä* ..... *10*
*2.1.2 Tausta* ..... *11*
*2.1.3 Suunnittelu* ..... *11*
*2.1.4 Rakentaminen* ..... *13*
*2.1.5 Toiminta* ..... *15*
*2.1.6 Varajärjestelmät* ..... *16*
*2.1.7 Kustannukset* ..... *17*
2.2 PUHDISTETTUJEN JÄTEVESIEN POISTOTUNNELI ..... 18
*2.2.1 Yleistä* ..... *18*
*2.2.2 Tausta* ..... *19*
*2.2.3 Suunnittelu* ..... *19*
*2.2.4 Rakentaminen* ..... *20*
*2.2.5 Toiminta* ..... *20*
*2.2.6 Varajärjestelmät* ..... *21*
*2.2.7 Kustannukset* ..... *21*
2.3 BOLMEN-TUNNELI ..... 24
*2.3.1 Yleistä* ..... *24*
*2.3.2 Tausta* ..... *24*
*2.3.3 Suunnittelu* ..... *25*
*2.3.4 Rakentaminen* ..... *25*
*2.3.5 Varajärjestelmät* ..... *26*
*2.3.6 Kustannukset* ..... *26*
2.4 VERTAILU ..... 27

**3 TUNNELEISSA TAPAHTUNEET SORTUMAT** ..... **28**

3.1 PÄIJÄNNE-TUNNELIN HÄMEENKOSKEN SORTUMA ..... 28
*3.1.1 Sortuman havaitseminen* ..... *28*
*3.1.2 Sortuman tutkiminen* ..... *28*
*3.1.3 Sortuma-alueen geologia* ..... *30*
*3.1.4 Sortuman kuvaus* ..... *31*
*3.1.5 Laboratoriotutkimukset* ..... *33*
*3.1.6 Sortuman syyt* ..... *36*
*3.1.7 Tunnelin tarkastus ja yleiskunto* ..... *36*
3.2 PÄIJÄNNE-TUNNELIN PULKKILAN SORTUMA ..... 38
*3.2.1 Sortuman havaitseminen* ..... *38*
*3.2.2 Sortuma-alueen geologia* ..... *39*
*3.2.3 Sortuman kuvaus* ..... *39*
*3.2.4 Laboratoriotutkimukset* ..... *43*
*3.2.5 Sortuman syyt* ..... *44*
*3.2.6 Tunnelin tarkastus ja yleiskunto* ..... *44*

3.3 PUHDISTETTUJEN JÄTEVESIEN POISTOTUNNELIN SORTUMA ..... 45
*3.3.1 Sortuman havaitseminen ..... 45*
*3.3.2 Tunnelin tyhjennys ..... 45*
*3.3.3 Sortuman tutkiminen ..... 46*
*3.3.4 Sortuma-alueen geologia ..... 47*
*3.3.5 Sortuman kuvaus ..... 48*
*3.3.6 Laboratoriotutkimukset ..... 49*
*3.3.7 Sortuman syyt ..... 49*
*3.3.8 Tunnelin tarkastus ja yleiskunto ..... 50*
3.4 BOLMEN-TUNNELIN SORTUMA 1995 ..... 51
*3.4.1 Sortuman havaitseminen ..... 51*
*3.4.2 Tunnelin tyhjennys vedestä ..... 51*
*3.4.3 Sortuma-alueen geologia ..... 51*
*3.4.4 Sortumien alkuperäinen lujitus ..... 52*
*3.4.5 Sortumien kuvaus ..... 52*
*3.4.6 Sortumien syy ..... 56*
*3.4.7 Tunnelin tarkastus ja yleiskunto ..... 57*
3.5 BOLMEN-TUNNELIN SORTUMA 1986 ..... 58
*3.5.1 Sortuman havaitseminen ..... 58*
*3.5.2 Sortuma-alueen geologia ..... 58*
*3.5.3 Sortumien kuvaus ..... 58*
*3.5.4 Sortuman syy ..... 58*
*3.5.5 Tunnelin tarkastus ja yleiskunto ..... 59*

**4 SORTUMIEN KORJAUS ..... 60**

4.1 PÄIJÄNNE-TUNNELIN HÄMEENKOSKEN SORTUMAN KORJAUS ..... 60
*4.1.1 Korjauksen suunnittelu ..... 60*
*4.1.2 Korjauksen toteutus ..... 62*
*4.1.3 Korjauksessa käytetyt materiaalit ja määrät ..... 65*
*4.1.4 Aikataulu ja kustannukset ..... 66*
4.2 PÄIJÄNNE-TUNNELIN PULKKILAN SORTUMAN KORJAUS ..... 67
*4.2.1 Korjauksen suunnittelu ja toteutus ..... 67*
*4.2.2 Korjauksessa käytetyt materiaalit ja määrät ..... 72*
*4.2.3 Aikataulu ja kustannukset ..... 73*
4.3 PUHDISTETTUJEN JÄTEVESIEN POISTOTUNNELIN SORTUMAN KORJAUS ..... 74
*4.3.1 Korjauksen suunnittelu ja toteutus ..... 74*
*4.3.2 Aikataulu ja kustannukset ..... 77*
4.4 BOLMEN-TUNNELIN 1995 SORTUMAN KORJAUS ..... 78
*4.4.1 Kalusto ..... 78*
*4.4.2 Turvallisuuslujitus ..... 78*
*4.4.3 Pääsortuman korjaus ..... 79*
*4.4.4 Pikkusortumien korjaus ..... 81*
*4.4.5 Muut korjaukset ..... 82*
*4.4.6 Korjauksissa käytetyt materiaalit ja määrät ..... 82*
*4.4.7 Aikataulu ja kustannukset ..... 82*
4.5 BOLMEN-TUNNELIN 1986 SORTUMAN KORJAUS ..... 83

**5 TUNNELIEN LUJITUS JA LOUHINTA ..... 85**

5.1 PÄIJÄNNE-TUNNELIN ALKUPERÄINEN LUJITUS JA LOUHINTA ..... 85
*5.1.1 Lujitusperusteet ..... 85*
*5.1.2 Louhintatapa ..... 85*
*5.1.3 Lujitusmäärät ja –tapa ..... 85*
5.2 PUHDISTETTUJEN JÄTEVESIEN POISTOTUNNELIN ALKUPERÄINEN LUJITUS JA LOUHINTA ..... 90
*5.2.1 Lujitusperusteet ..... 90*
*5.2.2 Louhintatapa ..... 90*
*5.2.3 Lujitusmäärät ja –tapa ..... 90*

5.3 BOLMEN-TUNNELIN ALKUPERÄINEN LUJITUS JA LOUHINTA ..... 92
*5.3.1 Lujitusperusteet* ..... *92*
*5.3.2 Louhintatapa* ..... *92*
*5.3.3 Lujitustapa ja -määrät* ..... *92*
5.4 LUJITUS- JA LOUHINTAKUSTANNUSTEN KEHITTYMINEN ..... 93
5.5 LUJITUSTASON NOUSU ..... 94

**6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO ..... 97**

**LÄHDELUETTELO ..... 100**

**LIITTEET ..... 103**

# 1 JOHDANTO

## Tutkimuksen tausta

Suomessa on lyhyessä ajassa tapahtunut kolme merkittävää sortumaa pitkissä vesitunneleissa. Ensimmäinen sattui vuonna 1995 puhdistettujen jätevesien poistotunnelissa ja toinen sekä kolmas Päijänne-tunnelissa vuonna 1997. Vesitunneleissa viimeaikoina ilmenneet vauriot ovat herättäneet keskustelua sortumien syistä, niiden korjaustavoista sekä tunnelien lujitusmääristä.

## Tutkimusongelma

Vesitunnelien sortumia käsiteltäessä tulee usein esille paisuva savi. Tätä termiä käytetään lähes joka sortumasta ja sortuman todellinen luonne jääkin yleensä selvittämättä. Korjauskustannuksia pidetään yleisesti hyvinkin korkeina. Vertailukohtana käytetään usein tunnelin vuosientakaista hintaa, joka vääristää vertailua. Suomessa pitkien vesitunneleiden pitkäaikaiskäyttäytymisestä on hyvin vähän tietoa. Tunnelien huoltaminenkin on aivan uutta, eikä korjauksiin ole syntynyt vielä mitään yleisesti sovellettavaa käytäntöä.

## Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen päätavoitteena on dokumentoida sortumat ja niiden korjausmenetelmät sekä selvittää sortumien syitä. Tutkimuksen toisena tavoitteena on selvittää pitkien vesitunneleiden lujitusmääriä sekä lujitushintojen kehittymistä. Näiden tietojen pohjalta on tarkoitus selvittää pitkissä vesitunneleissa suositeltava lujituksen taso.

## Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa käsitellään pitkiä paineellisia vesitunneleita. Suomesta tutkimukseen on otettu mukaan maailman pisin yhtenäinen kalliotunneli eli Päijänne-tunneli (120 km). Toiseksi kohteeksi Suomesta valittiin Helsingin puhdistettujen jätevesien poistotunneli (17 km). Vertailun vuoksi tutkimukseen haluttiin liittää myös ulkomainen tunneli. Tällaiseksi valittiin Etelä-Ruotsissa sijaitseva Bolmen-raakavesitunneli (80,4 km).

Tunnelit sijaitsevat kovassa peruskalliossa ja niissä kaikissa on tapahtunut ainakin yksikäytönaikainen sortuma.

# 2 PITKÄT VESITUNNELIT

## 2.1 Päijänne-tunneli

### 2.1.1 Yleistä

Päijänne-tunneli on rakennettu tyydyttämään yli miljoonan pääkaupunkiseudulla asuvan ihmisen sekä pääkaupunkiseudun teollisuuden puhtaan veden tarve. Päijänne-tunneli on maailman pisin yhtäjaksoinen kalliotunneli. Sen pituus on noin 120 km ja poikkipinta-ala on pääasiallisesti 15,5 $m^2$ vaihdellen 13,5 ja 18 $m^2$ välillä. Tunneli alkaa Päijänteen rannalta Asikkalan vedenottamolta ja päättyy Vantaan ja Helsingin rajalle Silvolan teko-altaaseen (kuva 2.1). Tunneli on paineellinen verhoamaton kalliotunneli. Tällä hetkellä tunnelissa virtaava vesimäärä on noin 2,7 $m^3/s$. Virtaamalla 0-10 $m^3/s$ se toimii gravitaatiotunnelina ja virtaamalla 10-20 $m^3/s$ tarvitaan vedenpumppausasemia. Pumppuasemista Kalliomäki on valmiiksi varustettu, mutta Teuronjoen pumppaamo, jota tarvitaan virtaamalla 15-20 $m^3/s$, on ainoastaan valmiiksi louhittu. (Heiniö 1986 ja Palmu 1982)

Kuva 2.1. Päijänne-tunnelin linjaus (Talke 1982)

### 2.1.2 Tausta

Alkuna Päijänne-hankkeelle oli 1963 valtioneuvostolle jätetty kirjelmä Etelä-Suomen käyttöveden hankinnan suunnittelemiseksi. Kirjeen olivat allekirjoittaneet Helsingin seudun kunnat, alueen seutukaavaliitot, Suomen kaupunkiliitto ja Turun kaupunki. Kirjeessä todettiin puhtaan raakaveden saannin olevan ongelmallista, ja kasvavan vedenkulutuksen vain pahentavan ongelmia. Helsingin kaupunki oli jo laatinut uhkaavan ongelman ehkäisemiseksi Hiidenvesi-suunnitelman, jonka toteuttaminen ei kuitenkaan ratkaisisi Helsingin alueen vedensaantiongelmia. (Tiainen 1982)

Pääkaupunkiseudun raakavesiongelman ratkaisemiseksi kehitettiin kaksi perusvaihtoehtoa: vedenotto merestä suolanpoiston avulla tai vedenotto sisämaan järvistä. Vaihtoehtoisina järvinä olivat Vanajavesi, Kuohijärvi ja Päijänne. Alustavien selvitysten jälkeen Päijänne-vaihtoehto valittiin pohjaksi jatkoselvityksille, joissa pitkä kalliotunneli todettiin parhaaksi toteutusvaihtoehdoksi. (Tiainen 1982)

### 2.1.3 Suunnittelu

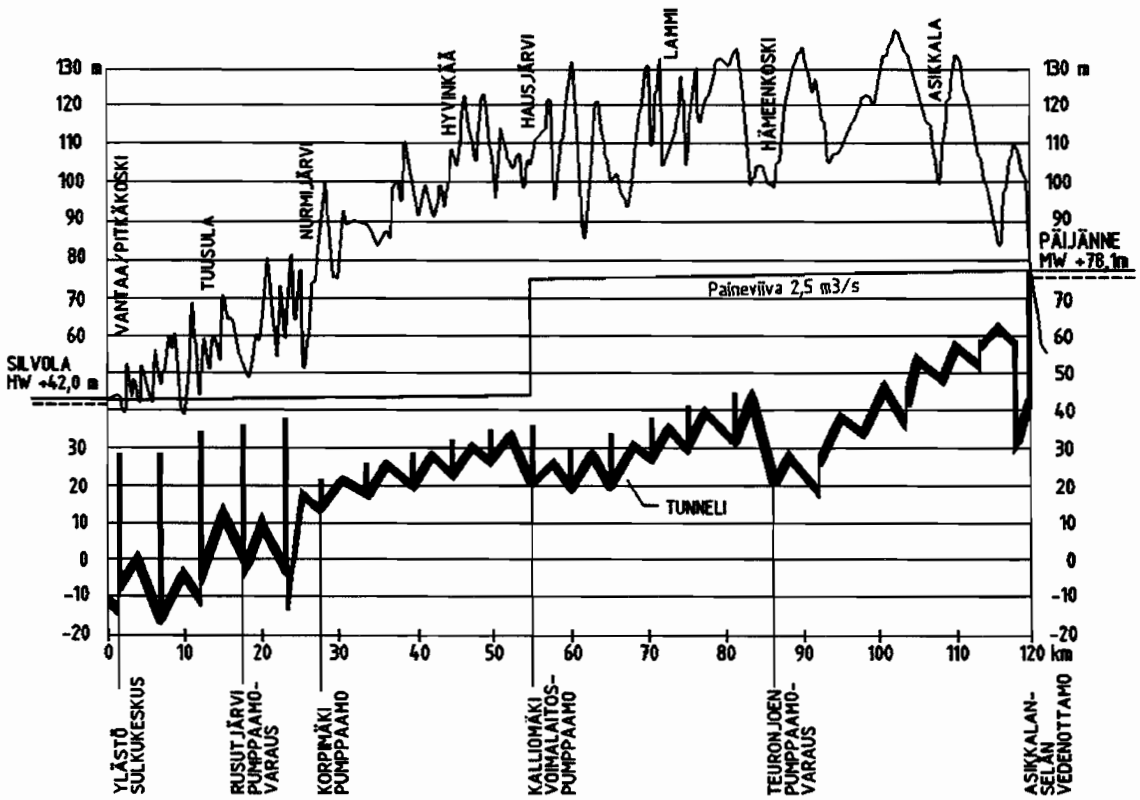
Suunnittelun alkuvaiheessa ehdotettiin rakennettavaksi avouomajärjestelmä, jossa Asikkalanselän vettä pumpattaisiin Vesijärveen. Vesijärvestä vesi pumpattaisiin edelleen Pääjärveen, josta se Teuronjokea/Puujokea pitkin virtaisi etelään. Puujoen eteläisimmässä osassa vesi pumpattaisiin Vantaanjokeen jossa se virtaisi Silvolaan asti. Avouomajärjestelmä olisi voitu toteuttaa nopeasti ja sitä olisi vähitellen voitu täydentää tunnelijärjestelmäksi. Tunnelin valmistuttua avouomajärjestelmä pumppaamoineen olisi jäänyt palvelemaan varajärjestelmänä. Tämä vaihtoehto ei kuitenkaan saanut rakentajakuntien kannatusta.(Tiainen 1982)

Vaihtoehdoista veden siirtäminen tunnelissa Päijänteeltä Silvolaan oli teknillistaloudellisesti edullisinta. Ennustetut vesimäärät olisivat vaatineet huomattavan suuren putkilinjan ja putkilinja olisikin ollut kallis ja teknisesti hankala ratkaisu. Lisäksi kalliossa kulkeva tunneli ei ole läheskään yhtä altis ympäristössä tapahtuville häiriöille, kuin putkilinja.

Kun oli päädytty tunnelivaihtoehtoon, suunnittelun päätavoitteena oli löytää mahdollisimman edullinen tunnelilinjaus Päijänteen ja Silvolan välille. Ensiksi valittiin karkeita linjavaihtoehtoja ilmakuva- ja karttaselvitysten perusteella. Näitä linjavaihtoehtoja oli yleensä 3-10 rinnakkain (kuva 2.2). Linjojen suuren yhteispituuden vuoksi tutkimukset rajoitettiin alkuvaiheessa paljastumakartoituksiin, porakonekairauksiin ja seismisiin tutkimuksiin. Ainoastaan kriittisissä kallion ruhjelaaksoissa käytettiin kallionäytekairausta. Näiden tutkimusten jälkeen valittiin nykyinen linjaus, jota tutkittiin vielä tarkemmin. Seismistä luotausta tehtiin 184 km ja kallionäytekairausreikiä 184 kpl, yhteensä yli 8,7 km, josta kalliokairausta oli 4,5 km. (Niini 1983 ja Pokki 1982)

Kuva 2.2. Päijänne-tunnelilinjauksen eteläosan alustavat linjausvaihtoehdot (Niini & Uusinoka 1971)

Suunnittelun tuloksena 60-luvun lopussa saatiin 120 km pitkä tunnelilinjaus, jonka teoreettinen poikkipinta ala on n. 15,5 $m^2$. Ajotunneliväliksi valittiin noin 5 km aikaisempien kokemusten ja kaluston kehittymisennusteiden perusteella.




Kuva 2.3. Päijänne-tunnelin pituusleikkaus (Tiainen 1982)

Tunnelilinjauksen jälkeen suunnitelmia tarkennettiin vielä tunnelin käytön kannalta välttämättömien osien suunnittelulla. Näitä olivat Asikkalanselän vedenottamo, Kalliomäen voimalaitospumppaamo, Korpimäen pumppaamo ja Ylästön sulkukeskus. Lisäksi määriteltiin myös ajokuilujen paikat, jolloin tunnelin pituusleikkausprofiili ja korkeusasema vielä tarkentui (kuva 2.3).

Tarkan esitutkimuksen johdosta saatu taloudellinen hyöty oli merkittävän suuri. Verrattuna suoraan linjaan Päijänteen ja Silvolan välille säästettiin rakentamiskuluissa nyt noin 20 %, mikä vastaa nykyrahassa (1998) noin 160 milj. markkaa. (Niini 1983)

### 2.1.4 Rakentaminen

Päijänne-tunneli rakennettiin vuosien 1973 ja 1982 välillä. Rakennustyöt oli jaettu kolmeen rakennusjaksoon ja nämä edelleen yhteensä 13 kokonaishintaurakkaan (taulukko 2.1). I rakennusjakso louhittiin vuosina 1973-76, II rakennusjakso 1975-79 ja III rakennusjakso 1979-1982. (Uimonen 1982)

Päijänne-tunneli jakautuu 23 tunneliosuuteen. Tunneliosuuksien keskimääräinen pituus on 5,2 kilometriä. Ajotunnelit tehtiin osuuksien keskelle, joista jatkettiin vaihtoperälouhinnalla yläkätisiin periin. Yläkätiset perät valittiin helpomman louhittavuuden takia. Tunneli on louhittu kumipyöräkalustoa käyttäen lukuunottamatta lyhyttä raidekalustolla tehtyä osuutta I rakennusjaksolla. (Uimonen 1982)

Tunnelin rakentamisen aiheuttamien pohjavesihaittojen kartoittamiseksi muodostettiin tunnelilinjan ympärille 400-2000 metriä leveä havaintoalue. Tällä alueella oli noin 850 kaivoa. Kaivojen lisäksi pohjaveden pinnan käyttäytymistä seurattiin 100 pohjaveden havaintoputkella. (Harjula 1982)

Rakentamisen aikana noin 250 kaivoa kuivui. Kaikissa tapauksissa rakennettiin joko uusi porakaivo tai ajettiin vettä kiinteistölle. Porakaivoja rakennettiin yhteensä 65 kappaletta (Alaranta 1999). Kaiken kaikkiaan korvaavan veden järjestämiseen kului tunnelin rakennusaikana noin kaksi miljoonaa markkaa (hintataso rakennusaikainen). (Harjula 1982)

Päijänne-tunnelin rakentamisen aikana pohjavesi laski eniten Hyvinkään Ahdenkallion alueella (noin 10 metriä), Tuusulan Rusutjärven alueella ja Vantaan Voutilan alueella. Pohjavesihaitat olivat lähinnä rakennusaikaisia. Asikkalanselän vedenottamon ja Kalliomäen voimalaitospumppaamon välillä pohjaveden pinta palautui normaaliin tasoonsa tunnelin käyttöönoton jälkeen (Harjula 1982). Kalliomäen ja Korpimäen pumppaamon välillä (noin 30 km) ei pohjavedenpinta ole palautunut normaalille tasolleen Kalliomäen voimalaitoksen aiheuttaman vesipaineen laskun vuoksi. Voimalaitoksen kohdalla tunnelin vesipaine laskee 34 metriä (kts. kuva 2.3) Tunnelin loppuosalla Korpimäestä etelään pohjaveden pinta on palautunut ennalleen. Tunneliin nykyisin (1998) tulevien vuotovesien suuruus on keskimäärin koko tunnelipituudella 6,0 litraa/min/100m (PSV 1999). Pitkille savikkoja alittaville tunneleille yleiseksi tiiviystavoitteeksi on asetettu 2 – 10 litraa/min/100m (Pöllä & Ritola 1989). Esimerkiksi Keski-Uudenmaan meriviemä-

rissä välille Ali-Kerava – Koivuhaka tiiviystavoite oli 6 litraa/min/100m. Päijännetunnelin rakentamisen aikana tiiviysvaatimuksia ei määritetty.

Taulukko 2.1. Päijänne-tunnelin rakennusurakat (urakkahinnat sopimusten solmimishetkellä, nykyarvo 1998)

| | TUNNELI-OSUUDEN NRO (NIMI) | URAKOITSIJA | URAKAN PITUUS (km) | | URAKKA-SUMMA (milj. mk) | URAKKA-SUMMA (mk/m) | NYKY-ARVO (milj.mk) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Ajo-tunneli | Pää-tunneli | | | Elinkust. indeksi |
| I Rakennusjakso | 22 (Pulkkila)<br>21 (Orimäki) | YIT | 0,7 | 7,9 | 12,5 | 1453 | 61 |
| | 20 (Pyssymäki) | Vesto Oy + Skånska Ab | 0,5 | 6 | 9,1 | 1400 | 44 |
| | 19 (Multasuo)<br>18 (Lahdenpohja) | Perusyhtymä Oy + A/S Ingeniörbygg/Norja | 0,9 | 10 | 15,9 | 1459 | 77 |
| | 17 (Palomaa)<br>16 (Teuronjoki) | Oy Tiefundamentti Ab + John Mattson Byggnads Ab/Ruotsi | 1,2 | 11,4 | 18,5 | 1468 | 90 |
| II Rakennusjakso | 15 (Alitirisevä)<br>14 (Kalliojärvi)<br>13 (Possinvuori)<br>12 (Haminankylä) | YIT | 1,9 | | 5,6 | 2947 | 22 |
| | 11 (Puujoki)<br>10 (Kalliomäki)<br>9 (Mustasuo)<br>8 (Ronkokallio)<br>7 (Punakalllio) | Vesi-Pekka Oy | 2,1 | | 6,4 | 3048 | 25 |
| | 6 (Jokela)<br>5 (Korpimäki) | Lemminkäinen Oy | 0,7 | | 2,3 | 3286 | 9 |
| | 15 (Alitirisevä)<br>14 (Kalliojärvi)<br>13 (Possinvuori) | Elovuori Oy + (Oy Lohja Ab) | | 15,3 | 29,2 | 1908 | 96 |
| | 12 (Haminankylä)<br>11 (Puujoki) | Lemminkäinen Oy | | 10,6 | 19,6 | 1849 | 65 |
| | 10 (Kalliomäki) | Maansiirto Heinonen Oy | | 5,6 | 12,9 | 2304 | 42 |
| | 9 (Mustasuo)<br>8 (Ronkokallio) | Pohjansepot Oy | | 10,2 | 17,4 | 1706 | 57 |
| | 7 (Punakalllio)<br>6 (Jokela)<br>5 (Korpimäki) | Oy Lohja Ab + (Elovuori Oy) | | 17 | 33,1 | 1947 | 109 |
| III Rakennusjakso | 4 (Orikorpi)<br>3 ( Rusutjärvi)<br>2 (Vähäsuo)<br>1 (Viinikkala)<br>0 (Ylästö) | Elovuori Oy | 0,8 | 25,6 | 45,3 | 1716 | 117 |
| | | YHTEENSÄ | 8,8 | 119,6 | 227,8 | 1774 | 815 |

### 2.1.5 Toiminta

Veden matka Päijänteestä pääkaupunkiseudulle alkaa Asikkalan vedenottamolta, josta johtaa Asikkalanselälle 355 metrinen putki (∅ 2 metriä), jonka kautta vesi johdetaan järvestä 26 metrin syvyydestä vedenottamoon (Varmo 1996). Sitten vesi johdetaan välpän kautta 0,57 mm siivilän läpi ja johdetaan Päijänne-tunneliin. Päijänne-tunnelissa vesi virtaa omalla paineellaan. Nykyisellä virtaamamäärällä veden potentiaalienergiaa voidaan hyödyntää. Hyödyntäminen tapahtuu Kalliomäen voimalaitospumppaamossa, jonka teho on noin 1 MW. Jos vedentarve nousee yli 10 $m^3/s$, niin voimalaitoksen turbiinin tilalle voidaan asentaa pumppu, jota voidaan käyttää virtausnopeuden lisäämiseksi. Aivan tunnelin eteläpäässä sijaitsee Ylästön sulkukeskus. Sulkukeskuksesta vesi ohjataan joko Helsingin Veden puhdistuslaitoksille tai Silvolan tekoaltaaseen. Veden virtauksen kannalta tunnelin tärkeimpiä rakenteita ovat ilmareiät ∅ 100 mm, joita on aina ajokuiluosuuksien keskellä, "sahalaitakuvion" yläosassa (kuva 2.3). Nämä ilmareiät estävät virtausta heikentävien ilmataskujen muodostumista (Palmu 1982). Tunnelia tyhjennettäessä ilmarei'istä virtaa tunneliin korvausilmaa. Nykyisellä vedenvirtaamalla (2,7 $m^3/s$) on korvausilman määrä tyhjennystilanteessa yhdestä ilmareiästä enimmillään 2 $m^3/s$. Tämä ilmamäärä voi aiheuttaa nykyisten (∅100 mm) ilmareikien umpeenjäätymisen ja alipainetilan tunneliin. Päijänne-tunnelin korjaustöiden yhteydessä (1999) viisi ilmareikää suurennettiin ∅ 300 mm kokoon.

Tunnelin osakkaina on useita kuntia, joista osa saa raakavetensä Päijänne-tunnelista (taulukko 2.2). Hyvinkään kaupungille menevä vesi pumpataan Hikiän tekopohjavesilaitokselle Kalliomäen voimalaitospumppaamosta. Porvooseen vesi johdetaan avouomia pitkin myös Kalliomäestä. Porvooseen ei kuitenkaan ole johdettu vettä kuin satunnaisesti. Tuusulaan vesi toimitetaan Korpimäen pumppaamolta Jäniksenlinnan tekopohjavesilaitokselle sekä Rusutjärven pumppaamolta Rusutjärven tekopohjavesilaitokselle. Nurmijärvelle ja Primalco Oy:n Rajamäen tehtaille vesi johdettaisiin myös Korpimäen kautta, mutta jakelujärjestelmiä ei ole vielä rakennettu. Helsinki, Espoo ja Vantaa, saavat vetensä Helsingin Veden puhdistuslaitoksista, jotka sijaitsevat Pitkäkoskella ja Vanhassa kaupungissa. Espoo tuottaa myös osan vedestään itse ja Päijänne-tunnelista saatavan veden osuus on noin 60 %. Kauniainen ja osa Kirkkonummesta saa vetensä Espoon verkon kautta. Kauniaisen ja Kirkkonummen osalta taulukossa 2.2 on otettu huomioon nykykäytön osalta vain 60 % Espoon niille myymästä vesimäärästä, jotta vesimäärä kuvaisi niiden osuutta Päijänne-tunnelissa kulkevasta vesimäärästä. Hyvinkää käyttää Päijänne-tunnelin vettä pääosin kesäisin, samoin kuin Keski-Uudenmaan vesiensuojelun kuntayhtymä, joka käyttää vettä Ridas- ja Rusutjärven vedenlaadun parantamiseen. Vuonna 1998 Keski-Uudenmaan vesiensuojelun kuntayhtymä käytti sateisen kesän johdosta huomattavan vähän Päijänteen vettä. Aikaisempina vuosina sen keskimääräinen käyttö on ollut noin 0,28 $m^3/s$.

Taulukko 2.2. Päijänne-tunnelin nykyiset osakkaat ja vesiosuudet

| Osakas | **Vesivaraus $m^3/s$** | **Vesivaraus %** | **Käyttö 1998 $m^3/s$** | **Käyttö 1998 %** |
|---|---|---|---|---|
| Helsinki | 6,12 | 47,08 % | 1,68 | 62 % |
| Espoo | 2,12 | 16,31 % | 0,33 | 12 % |
| Vantaa | 2,12 | 16,31 % | 0,42 | 16 % |
| Porvoo | 1,11 | 8,53 % | - | - |
| Tuusulan seudun vesilaitos kuntayhtymä | 0,56 | 4,31 % | 0,15 | 6 % |
| Hyvinkää | 0,28 | 2,15 % | 0,02 | 1 % |
| Primalco Oy | 0,25 | 1,92 % | - | - |
| Kirkkonummi | 0,22 | 1,69 % | 0,005 | 0,2 % |
| Kauniainen | 0,11 | 1,85 % | 0,01 | 0,5 % |
| Nurmijärvi | 0,11 | 1,85 % | - | - |
| Keski-Uudenmaan vesiensuojelun kuntayhtymä (ei osakas) | - | - | 0,07 | 3 % |
| **Yhteensä** | **13 $m^3/s$** | **100 %** | **2,7 $m^3/s$** | **100 %** |

### 2.1.6 Varajärjestelmät

Päijänne-tunnelin päävarajärjestelmänä toimii Vantaanjoki, jonka vettä käytettiin raakavesilähteenä ennen Päijänne-tunnelin valmistumista. Vantaanjoen veden laatu on selvästi Päijänteen vettä huonompaa. Nykyisillä puhdistusmenetelmillä veden laatu voidaan pitää kuitenkin korkeana, vaikka raakavesilähteenä olisi Vantaanjoki.

Vantaanjoen veden laatua ja määrää voidaan nostaa juoksuttamalla Hiidenvedestä Hiidenvesitunnelia pitkin vettä Vantaanjokeen. Näin toimittiin ennen Päijänne-tunnelin valmistumista vuosina 1969-79. (Nevalainen 1995)

Jos Päijänne-tunnelin eteläosa (III rakennusjakso n. 26 km) tukkeutuu tai joutuu muuten käyttökelvottomaksi, voidaan vettä juoksuttaa Korpimäen pumppaamosta Vantaanjokeen (kuva 2.1). II rakennusjakson valmistuttua Päijänteen vettä juoksutettiin Vantaanjokeen Korpimäestä vuosina 1979-1982.

Päijänne-tunneliin on suunniteltu muitakin varajärjestelmiä. Näistä varajärjestelmistä mikään ei ole kuitenkaan otettavissa käyttöön ilman rakennustöitä. Suurin varajärjestelmistä on jo kohdassa 2.1.3 mainittu avouomajärjestelmä, jolla koko tunneli voitaisiin ohittaa. Avouomajärjestelmää voitaisiin käyttää myös vain osittain. Vettä voitaisiin juoksuttaa Päijänne-tunnelia pitkin Teuronjoen ajokuilulle saakka, josta vesi johdettaisiin Teuronjokeen (kuva 2.1). Myös mahdollisuutta syöttää Puujoen vettä tunneliin Puujoen ajotunnelin kautta on tutkittu (kuva 2.1).

### 2.1.7 Kustannukset

Päijänne-tunnelin kustannukset on selvitetty louhinnan osalta urakkasopimushinnoista ja lujituksen osalta toteutuneista yksikköhinnoista (Uimonen 1982). Esitetyt hinnat ovat urakkasopimuksen allekirjoittamisajankohdan hintatasoa. Hintatasot ovat seuraavat: I rakennusjakso IX/73, II rakennusjakso ajotunnelit I/75 päätunneli III/76 ja III rakennusjakso XII/78. Rakentamiskustannukset on muutettu nykyarvoon (1998) elinkustannusindeksillä. Rakennuskustannusindeksiä ei käytetty, koska se ei kuvaa tunnelin rakentamisen kustannusten muuttumista (kts. luku 5.4).

Tunnelin louhintakustannukset ilman lujitusta urakkaosuuksittain on esitetty taulukossa 2.1, jossa kokonaishinnat ovat sopimusten aikaisessa hintatasossa sekä nykyarvossaan. Tunnelin metrihinnat on ilmoitettu ainoastaan sopimusten aikaisessa hintatasossa. Ajotunneleissa metrihinta on selvästi päätunnelin hintoja korkeampi. Tämä johtuu alakätisestä perästä ja 1-perälouhinnasta. Kalliomäen osuudella on myös korkeampi metrihinta, joka johtuu urakkaan sisältyneestä pumppaamohallin louhinnasta liitäntäjärjestelyineen.

Taulukossa 2.3 on eritelty rakennuskustannukset rakennusjaksoittain. III rakennusjakson halvemman metrihinnan selittää osittain ajotunneleiden lyhyys. III rakennusjaksolla päätunnelimetriä kohden louhittiin vain 0,03 metriä ajotunnelia, kun suhde I ja II rakennusjaksolla oli noin kolminkertainen. Lisäksi hintoja alensi urakan suuruudesta saatu volyymietu sekä se että urakoitsijan kalusto oli jo osittain kuoletettu II rakennusjakson aikana.

Tässä esitetyissä kustannuksissa on otettu huomioon ainoastaan tunnelin louhinnasta ja lujituksesta aiheutuneet kustannukset. Lisäksi kustannuksia on aiheutunut erikoisrakenteista (vedenottamo, pumppaamo ym.) yhteensä 25 milj. mk (hintataso rakennusaikainen) sekä tunnelin rakennuttaminen. Rakennuttajan ilmoittamat tunnelin kokonaiskustannukset vuoden 1981 hintatasossa (rakennuskustannusindeksi) olivat 525 milj.mk. Louhinta ja lujitustyöt ovat siitä noin 460 milj.mk. Tässä kokonaissummassa ei ole otettu huomioon TVH:n tekemästä Päijänne-tunneli -suunnitelmasta aiheutuneita kustannuksia.

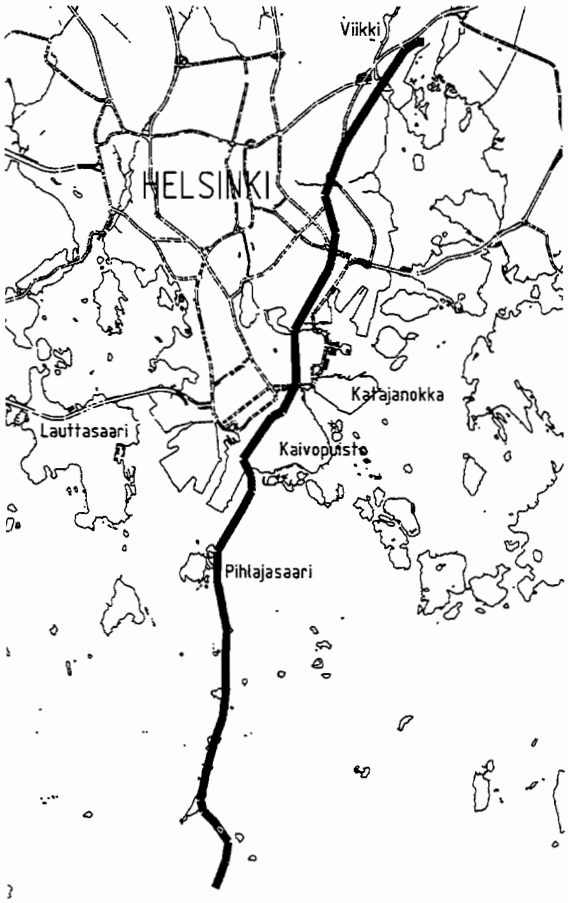
Taulukko 2.3. Päijänne-tunnelin rakennuskustannukset rakennusjaksoittain (hintataso urakkasopimuksen ajankohta, nykyarvo 1998)

| | I Rakennusjakso | | II Rakennusjakso | | III Rakennusjakso | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Louhinta milj.mk** | 56,0 | 89 % | 126,5 | 92 % | 45,3 | 82 % |
| **Lujitus milj.mk** | 6,7 | 11 % | 10,8 | 8 % | 10,0 | 18 % |
| **Yhteensä milj mk** | 63 | 100 % | 137,3 | 100 % | 55 | 100 % |
| | | **nykyarvo** | | **nykyarvo** | | **nykyarvo** |
| **Louhinta mk/m** | 1 451 | 7 057 | 1 995 | 6 714 | 1 716 | 4 429 |
| **Lujitus mk/m** | 174 | 844 | 170 | 561 | 379 | 978 |
| **Yhteensä mk/m** | 1 624 | 7 902 | 2 166 | 7 128 | 2 095 | 5 406 |

## 2.2 Puhdistettujen jätevesien poistotunneli

### 2.2.1 Yleistä

Puhdistettujen jätevesien poistotunneli on rakennettu johtamaan puhdistetut jätevedet avomerelle tarkoituksena vähentää Helsingin rantojen kuormitusta. Tunneli on pituudeltaan 16,8 km. Sen poikkipinta-ala on 18 $m^2$ lukuunottamatta 2,5 km jaksoa tunnelin alussa, jossa poikkipinta-ala on 14,5 $m^2$. Tunneli alkaa Viikin vanhalta puhdistamolta ja loppuu Katajaluodon eteläpuolelle (kuva 2.4). Tunneli toimii paineellisena verhoamattomana vesitunnelina. Tunnelissa virtaa puhdistettuja jätevesiä noin 3 $m^3/s$, ja sen kautta kulkevat tällä hetkellä sekä 700 000 ihmisen että alueen teollisuuden puhdistetut jätevedet. Tunnelin käyttöönoton jälkeen Helsingin rantavesien kunto on parantunut huomattavasti. (Ahola & Viitala 1992 ja Tiainen & Kähönen 1996)




Kuva 2.4. Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin linjaus

### 2.2.2 Tausta

Helsingin kaupungilla oli enimmillään 1970-luvun alkupuolella käytössä 11 jätevedenpuhdistamoa. Puhdistamoilta puhdistetut jätevedet johdettiin suoraan läheisille rantaalueille. Purkualueet olivat useasti lahdissa, saarien takana, tai muissa paikoissa, joissa veden vaihtuvuus on hidasta. Helsingin rantavesien kunto oli 70-luvulle tultaessa muuttunut huonoksi. Helsingin omien päästöjen lisäksi Helsingin edustan vesistöjä kuormittivat Vantaan, Tuusulan, Keravan ja Järvenpään puhdistetut jätevedet. (Roinisto 1984)

Ensimmäiset ajatukset puhdistettujen jätevesien johtamisesta kalliotunnelissa avomerelle esitettiin 1960-luvun alussa, jolloin purkupaikaksi ehdotettiin Isosaaren edustaa. Vuonna 1970 hyväksyttiin jatkosuunnittelun pohjaksi ehdotus puhdistettujen jätevesien johtamiseksi Katajaluodon edustalle (Roinisto 1984). Tunnelin yleissuunnitelma hyväksyttiin vuonna 1973 ja sitä tarkistettiin vielä vuonna 1980 (HKR 1980). Tunnelin rakentaminen aloitettiin vuonna 1982 ja tunneli saatiin kokonaisuudessaan käyttöön loppuvuodesta 1986. Tunnelin meriosa valmistui vuonna 1985 ja se otettiin käyttöön ennen mannerosaa. Meriosan kautta johdettiin kesäkuun 1985 ja joulukuun 1986 välisenä aikana vain Munkkisaaren jätevedenpuhdistamolla puhdistetut jätevedet. Samanaikaisesti poistotunnelihankkeen kanssa rakennettiin Keski-Uudenmaan meriviemäri. Meriviemäri-tunnelia pitkin johdettiin Vantaan, Tuusulan, Keravan ja Järvenpään jätevedet Viikin vanhalle puhdistamolle ja myöhemmin vuodesta 1994 lähtien Viikinmäen jätevedenpuhdistamolle. Poistotunneli yhdessä Keski-Uudenmaan meriviemärin kanssa pienentää merkittävästi Vantaanjoen ja Helsingin rantojen kuormitusta.

### 2.2.3 Suunnittelu

Taulukko 2.4. Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin tutkimusmäärät

| Tutkimukset | Meriosuus (8 km) | Mannersosuus (9 km) |
|---|---|---|
| Seisminen luotaus | 79,3 km | 1 km |
| Akustinen luotaus | 80 km | |
| Kallionäytekairaus | 2 km | 1,8 km * |
| Porakonekairaus | 143 pist. 5,5 km | 244 pist ** |
| Painokairaus | 72 pist. 0,2 km | |
| Ilmakuvakartoitus | X | |
| Rakennusgeologinen kartoitus | X | X |
| Merenpohjan luotaus | X | |
| Sukellustutkimuksia | X | |
| | * 0,6 km metron yhteydessä<br>** 72 pist. muiden kohteiden yhteydessä | |

Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin suunnittelu oli pitkä prosessi. Hankesuunnittelu aloitettiin jo vuonna 1963 ja varsinainen rakentaminen päästiin aloittamaan 1982. Tunneli jaettiin toiminnallisesti kahteen erilliseen osuuteen, Viikistä Munkkisaareen johtavaan mannerosuuteen ja Munkkisaaresta Katajaluotoon ulottuvaan meriosuuteen. Man-

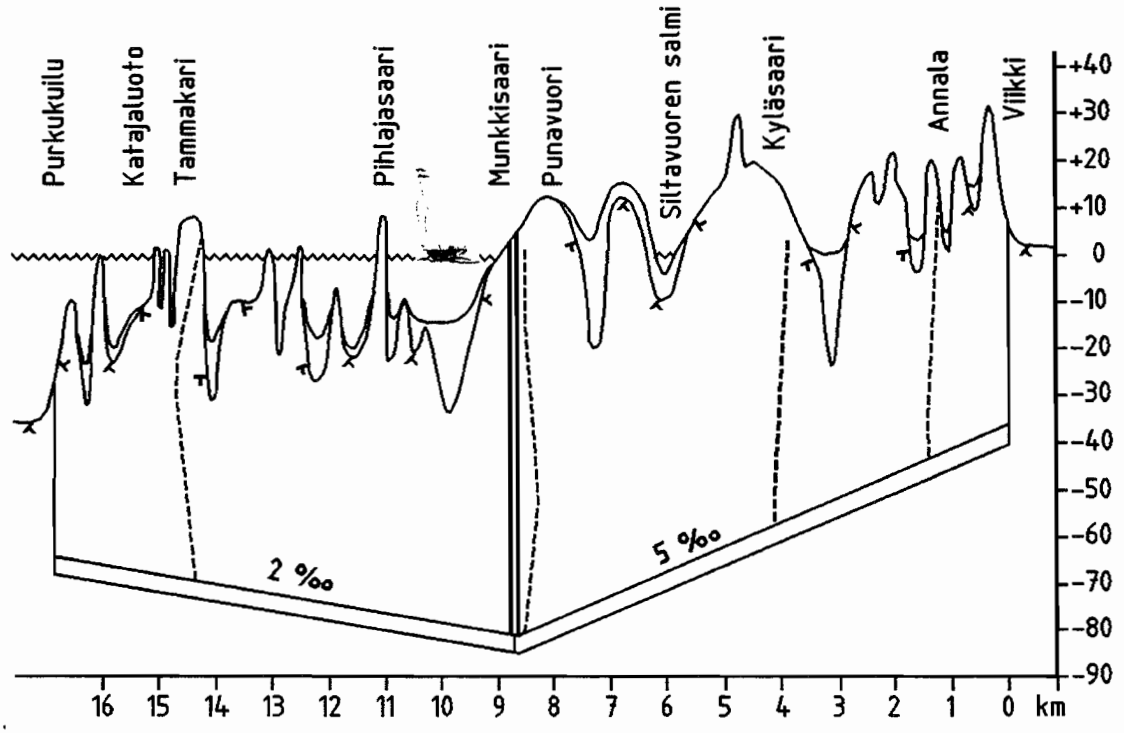
nerosuuden suunnittelussa olivat suurena apuna Helsingin kaupungin arkistoidut tutkimustiedot. Meriosuudella jouduttiin tekemään huomattavan paljon tutkimuksia tunnelin linjauksen optimoimiseksi. Tehdyt tutkimukset on esitetty taulukossa 2.4. (Roinisto 1984)

### 2.2.4 Rakentaminen

Rakennustyöt oli jaettu neljään urakkaosuuteen. Viikin urakkaosuus (PL 0 – 2 535) on rakennettu vuosina 1985-87, Kyläsaaren urakkaosuus (PL 2 535 – 6 500) vuosina 1985-86, Munkkisaaren urakkaosuus (PL 6 500 – 11 430) vuosina 1982-85 ja Tammakarin urakkaosuus (PL 11 430 – 16 775) vuosina 1982-84. (Ahola & Viitala 1992)

Jokainen urakkaosuus louhittiin käyttäen pyöräkalustoa ja yhtä ajotunnelia. Varsinaisen poistotunnelin louhinta suoritettiin vaihtoperälouhintana. Vaihtoperistä toinen tehtiin yläkätisenä ja toinen alakätisenä. Vain Munkkisaaren urakkaosuudessa molemmat perät louhittiin yläkätisinä.

### 2.2.5 Toiminta




Kuva 2.5. Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin pituusleikkaus

Tunnelin mannerosuus ja meriosuus viettävät kohti Munkkisaarta. Munkkisaaressa osuudet on yhdistetty toisiinsa kahdella pystykuilulla (kuva 2.5). Pystykuilut voidaan erottaa yläpäässä (maanpinnalla) toisistaan settiseinän avulla (kuva 3.18). Näin manner-

osuus voidaan erikseen tyhjentää vedestä. Tähän ratkaisuun päädyttiin alunperin, koska purkutunnelin pohjalle oletettiin vuosien mittaan kertyvän lietettä. Kun tunneli on jaettu osiin, voidaan tunnelin mannerosa helpommin tyhjentää lietteestä.

### 2.2.6 Varajärjestelmät

Tunnelin varajärjestelmänä toimii Vanhankaupunginlahteen johtava vanha purkuoja. Purkuoja kunnostettiin mahdollisten tulevien häiriöiden varalta. Häiriötilanteessa vesi nousee purkutunneliin johtavassa kuilussa, kunnes vesi lopulta nousee ylivuotoreunan yli ja virtaa lumenkaatopaikan kautta vanhaa purkuojaa pitkin Vanhankaupunginlahteen. Varajärjestelmän käyttö aiheuttaa Vanhankaupunginlahden rehevöitymistä, joten sitä ei voida käyttää kuin pakkotilanteissa.

Jos tunnelin mannerosuus on käyttökunnossa, voidaan Kyläsaaren puhdistamon vanhaa purkuojaa käyttää noin viikon varoitusajalla. Vesi johdetaan ylös vanhalle puhdistamolle louhitusta pystykuilusta, josta se valuu vanhaa purkuojaa pitkin Vanhankaupunginlahteen. Vesi voidaan johtaa myös Munkkisaaren pystykuilulta mereen, mutta tämä yhteys vaatii suurempia rakennustöitä.

### 2.2.7 Kustannukset

Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin kustannukset on selvitetty taloudellisista loppuselvityksistä sekä tarjousasiakirjoista. Taloudellisesta loppuselvityksestä ilmenee vain urakoiden toteutunut kokonaishinta. Kustannusten erottelemiseksi (louhinta, lujitus, injektointi ja muut) on käytetty urakoitsijoiden tarjouksia. Näin ollen lujituksen ja injektoinnin osalta kustannukset eivät ole aivan tarkkoja, koska lujitusmäärät ovat voineet hieman muuttua työn aikana. Esimerkiksi Tammakarin urakkaosuudella tarjouksen ja lopullisen kustannuksen ero oli hieman alle 5 % (kun indeksihyvityksiä ei ole laskettu mukaan).

Kustannukset on jaettu neljään ryhmään louhinta, lujitus, injektointi ja muut kustannukset. Louhinta sisältää kiven irrotuksen, kuljetuksen ja vedenpoiston. Lujitukseen sisältyvät työnaikaiset sekä lopulliset pultitukset ja ruiskubetonoinnit. Injektointiin kuuluvat kaikki injektointiin liittyvät työt (tunnustelureiät, vesimenekkimittaus, injektointireikien poraus, itse injektointi ja sementti). Ryhmään muut kustannukset lasketaan kaivu- ja täyttötyöt, kuilujen louhinta, avolouhinta sekä betonirakenteet. Taulukoissa 2.5 ja 2.6 olevat hinnat ovat urakkasopimuksen allekirjoittamisajankohdan hintatasoa. Munkkisaari ja Tammakari II/82, Kyläsaari VI/84 ja Viikki I/85.

Rakentamisen kustannukset on eritelty seuraavissa taulukoissa. Taloudellisesta loppuselvityksestä saadut hinnat on lisäksi muutettu nykyarvoon elinkustannusindeksillä. Rakennuskustannusindeksiä ei käytetty, koska se ei kuvaa tunnelin rakentamisen kustannusten muuttumista (kts. luku 5.4). Hinnoissa näkyvät selvästi meren alla louhimisen korkeat kustannukset (Munkkisaaren ja Tammakarin urakkaosuudet). Taloudellisen loppuselvityksen hintoihin ei sisälly rakennuttajan valvontakustannuksia.

Taulukko 2.5. Poistotunnelin tunnelinrakennuskustannukset (tarjouksista)

| | Viikin urakkaosuus | | Kyläsaaren urakkaosuus | | Munkkisaaren urakkaosuus | | Tammakarin urakkaosuus | | Yhteensä | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Louhinta** | 8 824 000 | 76 % | 12 473 000 | 75 % | 20 731 000 | 77 % | 27 255 000 | 79 % | 69 283 000 | 77 % |
| **Lujitus** | 1 125 000 | 10 % | 1 605 000 | 10 % | 2 300 000 | 9 % | 2 621 000 | 8 % | 7 651 000 | 9 % |
| **Injektointi** | 626 000 | 5 % | 1 813 000 | 11 % | 2 629 000 | 10 % | 2 119 000 | 6 % | 7 187 000 | 8 % |
| **Muu** | 984 000 | 9 % | 849 000 | 5 % | 1 300 000 | 5 % | 2 536 000 | 7 % | 5 669 000 | 6 % |
| **YHTEENSÄ** | 11 559 000 | 100 % | 16 740 000 | 100 % | 26 960 000 | 100 % | 34 532 000 | 100 % | 89 791 000 | 100 % |

Taulukko 2.6. Poistotunnelin rakentamiskustannukset per tunnelimetri (tarjouksista)

| | Viikin urakkaosuus | Kyläsaaren urakkaosuus | Munkkisaaren urakkaosuus | Tammakarin urakkaosuus | Yhteensä |
|---|---|---|---|---|---|
| **Louhinta** | 2 964 | 2 407 | 3 837 | 4 660 | 3 569 |
| **Lujitus** | 378 | 310 | 426 | 448 | 394 |
| **Injektointi** | 210 | 350 | 487 | 362 | 370 |
| **Muu** | 330 | 164 | 241 | 434 | 292 |
| **YHTEENSÄ** | 3 883 | 3 231 | 4 990 | 5 904 | 4 626 |

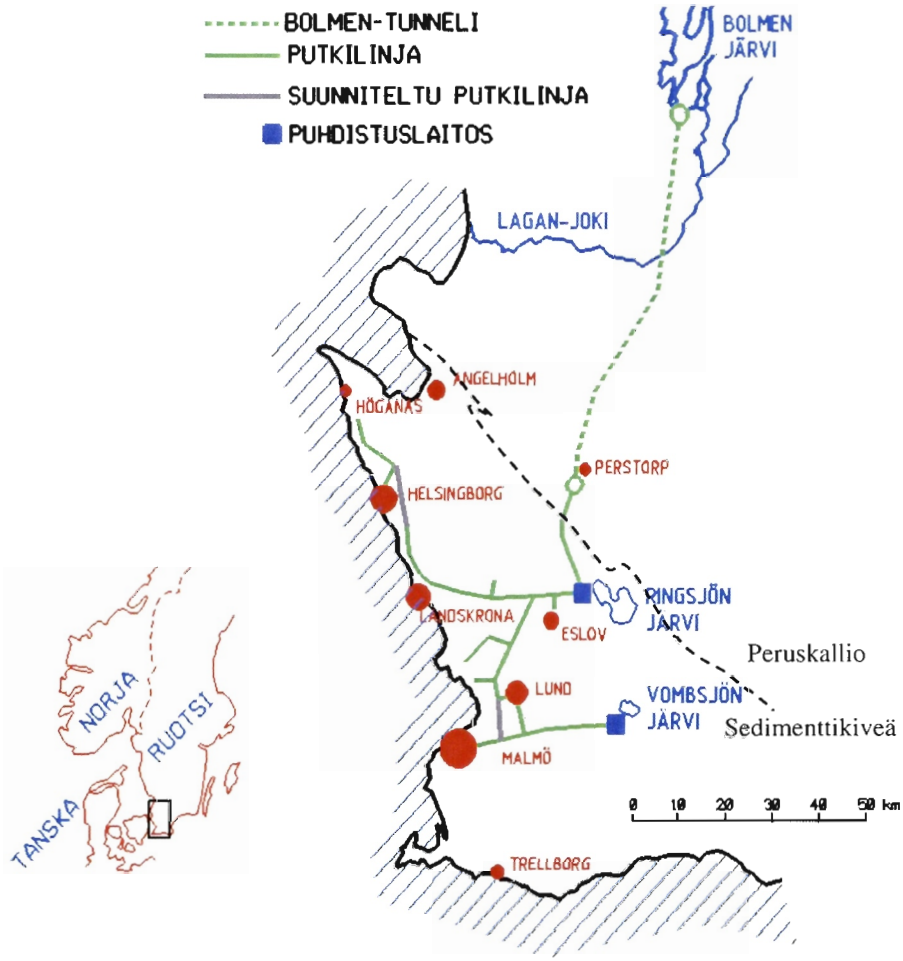
Taulukko 2.7. Poistotunnelin kokonaiskustannukset (taloudellinen loppuselvitys)

| | | Hankintahinta | Nykyarvo (1998) |
|---|---|---|---|
| SUUNNITTELU JA TUTKIMUS | Tutkimus- ja suunnittelukustannukset 1970-1975 | 1 573 847 | 7 952 000 |
| | Tutkimus- ja suunnittelukustannukset 1976-1979 | 674 851 | 1 914 000 |
| | Yleissuunnitelman tarkistus | 92 423 | 204 000 |
| | Geotekniset tutkimukset, suunnittelu ja valvonta | 3 098 612 | 5 140 000 |
| | Puhdistamojen liitosjärjestelyiden suunnittelu | 719 558 | 1 194 000 |
| | **Suunnittelu ja tutkimus yhteensä** | **6 159 291** | **16 404 000** |
| RAKENTAMINEN | Tammakarin urakkaosuus | 34 564 762 | 57 342 000 |
| | Munkkisaaren urakkaosuus | 28 459 069 | 47 212 000 |
| | Kyläsaaren urakkaosuus | 15 901 193 | 23 284 000 |
| | Viikin urakkaosuus | 11 278 100 | 15 945 000 |
| | Munkkisaaren liitostyöt | 1 243 711 | 1 758 000 |
| | Kyläsaaren liitostyöt | 3 462 076 | 4 895 000 |
| | Viikin liitostyöt | 3 737 472 | 5 284 000 |
| | Munkkisaaren vuotovesipumppaus | 1 187 036 | 1 678 000 |
| | Munkkisaaren viimeistelytyöt | 688 376 | 973 000 |
| | **Rakentaminen yhteensä** | **100 521 795** | **158 371 000** |
| | **KAIKKI YHTEENSÄ** | **106 681 086** | **174 775 000** |

## 2.3 Bolmen-tunneli

### 2.3.1 Yleistä

Bolmen-tunneli on rakennettu tyydyttämään Ruotsin tiheästi asutun eteläosan (lounais-Skåne) puhtaan veden tarve. Tunneli alkaa Bolmen-järvestä ja jatkuu siitä 80,4 km etelään Perstorpiin asti. Siitä vedenjakelu jatkuu putkilinjoja pitkin etelän kaupunkeihin. Tunnelin poikkipinta-ala on 8 $m^2$. Tällä hetkellä tunnelissa virtaa vettä 1,5 $m^2/s$, mutta sen kapasiteetti on 6,5 $m^2/s$. (Sylvan 1978 ja Alestam 1999)




Kuva 2.6. Bolmen-tunnelin linjaus ja veden jakeluverkosto Skånessa

### 2.3.2 Tausta

Vaikka Ruotsinkin vesivarat ovat teollistumisen aikana selvästi pilaantuneet, on puhtaita vesistöjä vielä runsaasti. Ongelmana Ruotsissa on kuitenkin se, että vesistöt ovat jakautuneet epätasaisesti. Skånessa on varsin vähän vesistöjä, ja nekin alkoivat rehevöityä

maatalouden seurauksena. 1960-luvun lopulla havahduttiin Skånea uhkaavaan vesipulaan, kun alueen väestö ja vedenkulutus kasvoivat huomattavasti. Ratkaisuksi vedensaantiongelmiin ehdotettiin Bolmen-järveä, joka sijaitsee noin 140 km Malmösta pohjoiseen. Vedenhankinnan suunnittelemiseksi Skånen kunnat perustivat yhteisyrityksen, Sydvatten AB. (Sylvan 1978)

### 2.3.3 Suunnittelu

Alustavissa selvityksissä todettiin, että veden siirtäminen on halvempaa kovassa kallioperässä sijaitsevassa tunnelissa kuin putkilinjassa. Skånen eteläosa sijaitsee kuitenkin pehmeiden sedimenttikivilajien alueella, jossa tunnelin rakentaminen on melko kallista. Tästä johtuen suunniteltavan tunnelin päätepisteeksi valittiin Perstorp, joka sijaitsi peruskallio- ja sedimenttikivilajialueiden rajalla (kuva 2.6). Perstorpista etelään veden siirto hoidettaisiin putkilinjoja pitkin, joista suurin osa oli jo olemassa. (Sylvan 1978)

Ensiksi tehtiin geologisia esitutkimuksia yhteensä 1 600 $km^2$ alueella, minkä jälkeen päätettiin tunnelin linjaus. Jatkotutkimuksia tehtiin valitulla linjauksella. Jatkotutkimuksilla haluttiin varmistaa heikkousvyöhykkeiden sijainti ja tarkentaa vielä tunnelin linjausta siten, että tunnelit leikkaisivat heikkousvyöhykkeet mahdollisimman lyhyellä matkalla. (Sylvan 1978)

Tutkimuksissa luodattiin seismisiä mittauslinjoja noin 200 km, kallionäytekairauksella kairattiin yhteensä 2 900 m kallionäytettä ja lisäksi magneettisilla mittauksilla paikannettiin diabaasijuonia. (Sylvan 1978)

### 2.3.4 Rakentaminen

Bolmen-tunnelia rakennettiin vuosina 1975-85. Eteläinen 56 km pitkä rakennusosuus tehtiin vuosina 75-84 ja pohjoinen 24 km pitkä rakennusosuus vuosina 81-85. Tunneli rakennettiin raidekalustolla, mistä johtuu sen pieni poikkipinta-ala (8 $m^2$). (Alestam 1986)

Bolmen-tunneli jakautuu yhteensä 13 tunneliosuuteen. Tunneliosuuksien keskimääräinen pituus on 6,7 km. Ajotunnelit tehtiin osuuksien keskelle, joista jatkettiin vaihteperälouhinnalla yläkätisiin periin. Alkuperäisenä suunnitelmana oli rakentaa alajuoksulle jatkuvasti laskeva tunneli, mutta työn aikana ilmenneet suuret vesivuoto-ongelmat pakottivat siirtymään "sahanlaitatunneliin". Ensimmäisellä tunneliosuudella vuotovesien määrä oli pahimmillaan 5 500 l/min ajotunnelista ylöspumpattuna. Tämän vesimäärän pumppaaminen alaspäin viettävästä tunnelista oli erittäin hankalaa, ja sen takia siirryttiin yläkätisten perien louhintaan (sahanlaitakuvio). Bolmen-tunnelissa on ∅ 300 mm ilmareiät jokaisen "sahanlaidan" korkeimmassa kohdassa. (Alestam 1986 ja Alestam 1999)

Louhinnan aikana tunnelin eteläosassa pohjavedenpinta laski 20 m, eikä ole vieläkään täysin palautunut rakentamista edeltäneeseen tasoon. Tunnelin pohjoisosassa ei ongel-

mia pohjaveden kanssa ollut. Eteläosassa n. 60 kaivoa jouduttiin uusimaan. Kustannukset olivat kaivoa kohti noin 52 000 SEK (1983) eli yhteensä n. 3 milj. SEK. Uusissa kaivoissa oli ongelmana suuri rauta- ja mangaani-pitoisuus, minkä vuoksi kaivoihin jouduttiin asentamaan erityiset suodatinjärjestelmät, mikä lisäsi kaivojen hintaa. (Alestam 1999)

### 2.3.5 Varajärjestelmät

Bolmen-tunnelin varajärjestelmänä toimii ennen tunnelin valmistumista vesilähteenä toiminut Ringsjö-järvi. Talvella Ringsjö-järveä voidaan käyttää varajärjestelmänä kuuden kuukauden ajan, mutta kesällä veden laatu huononee ja käyttöaika veden varalähteenä lyhenee. (Alestam 1999)

### 2.3.6 Kustannukset

Bolmen-tunnelin rakentamisen kokonaiskustannukset olivat 530 milj. SEK. Kustannukset jakautuivat eri osa-alueitten kesken taulukossa 2.8 esitetyllä tavalla. Merkittävin ero budjetoituneiden ja toteutuneiden kustannusten välillä oli injektointikustannusten huomattava nousu suurien vuotovesiongelmien takia (Alestam 1986). Kustannukset on muutettu Suomen markoiksi vuoden 1986 Ruotsin kruunun keskikurssin mukaan. Nykyarvoon (1998) kustannukset on muutettu elinkustannusindeksin avulla.

Taulukko 2.8. Bolmen-tunnelin rakentamiskustannukset (kustannustaso 1986)

| | **Osuus %** | **Hinta milj. SEK** | **Hinta milj. FIM** | **Hinta FIM/m** | **Nykyarvo milj.FIM** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Louhinta** | 68 | 360 | 257 | 3189 | 363 |
| **Injektointi** | 14 | 74 | 53 | 658 | 75 |
| **Lujitus** | 10 | 53 | 38 | 471 | 54 |
| **-ruiskubetoni** | 8 | 42 | 30 | 372 | 42 |
| **-pultitus** | 2 | 11 | 8 | 99 | 11 |
| **Kiinteät kustannukset** | 5 | 27 | 19 | 236 | 27 |
| **Odotus** | 3 | 16 | 11 | 136 | 16 |
| **YHTEENSÄ** | **100** | **530** | **378** | **4690** | **534** |

## 2.4 Vertailu

Seuraavissa taulukoissa on vertailtu tunneleiden yleisiä ominaisuuksia sekä tunneleiden rakennuskustannuksia. Rakennuskustannukset on muutettu nykyarvoon elinkustannusindeksillä ja hinnat on esitetty markkoina tunnelimetriä kohden. Kustannusvertailussa huomataan Bolmen-tunnelin olevan halvin. Tämä johtuu sen pienestä poikkileikkausalasta sekä Päijänne-tunneliin verrattuna hieman myöhäisemmästä rakennusajankohdasta eli tehokkaammista menetelmistä. Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin louhintahinta ei ole halventunut Päijänne-tunneliin verrattuna, vaikka se onkin rakennuttu myöhemmin. Tämän selittää merenalaisen louhinnan kalleus (taulukko 2.6) sekä ajotunneleiden suhteellisesti suurempi osuus tunnelipituudesta. Päijänne-tunnelin lujitushintoihin on laskettu mukaan myös injektoinnin osuus. Injektointia käytettiin suuremmissa määrin ainoastaan III rakennusjaksolla, jossa sen osuus lujituskustannuksista oli noin 30 %.

Taulukko 2.9. Pitkien vesitunneleiden vertailu

| | **Päijänne-tunneli** | **Puhdistettujen jätevesien poistotunneli** | **Bolmen-tunneli** |
|---|---|---|---|
| Pituus | 120 km | 16,7 km | 80,4 km |
| Poikkileikkausala | n. 16 $m^2$ | n. 18 $m^2$ | n. 8 $m^2$ |
| Rakennusvuodet | 1973-1982 | 1982-1986 | 1975-1985 |
| Käyttötarkoitus | raakavesitunneli | puhdistettujen jätevesien poistotunneli | raakavesitunneli |

Taulukko 2.9. Pitkien vesitunneleiden kustannusvertailu (nykyarvo, 1998)

| | **Päijänne-tunneli** mk/metri | **Puhdistettujen jätevesien poistotunneli** mk/metri | **Bolmen-tunneli** mk/metri |
|---|---|---|---|
| Louhinta | 6347 | 6280 | 5037 |
| Lujitus | 732 | 687 | 670 |
| Injektointi | * | 648 | 931 |
| **YHTEENSÄ** | **7079** | **7616** | **6638** |

* injektointi sisältyy lujitukseen

# 3 TUNNELEISSA TAPAHTUNEET SORTUMAT

## 3.1 Päijänne-tunnelin Hämeenkosken sortuma

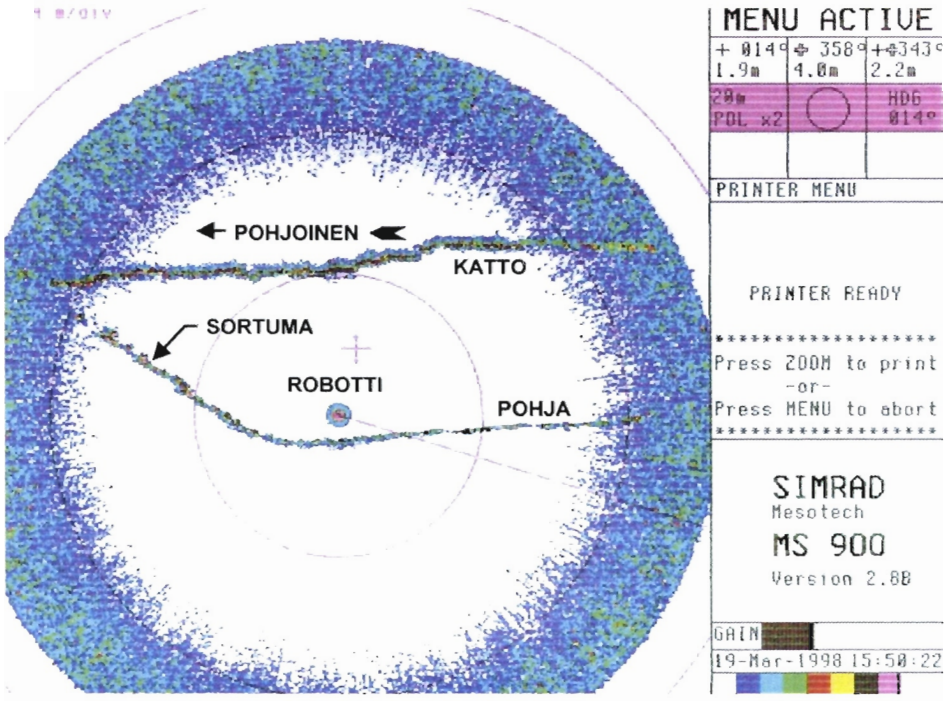
### 3.1.1 Sortuman havaitseminen

Lokakuussa 1997 Kalliomäen voimalaitospumppaamossa havaittiin tehonalenema. Kun oli selvitetty, että tehohäviö ei johtunut voimalaitoksessa olevasta viasta, alettiin epäillä ongelmia Päijänne-tunnelissa. Pääkaupunkiseudun Vesi Oy suoritti tunnelin vedenkorkeuden mittauksia maanpinnalta olevista ilmarei'istä. Tällöin havaittiin Ali-Tirisevän ja Teuronjoen välillä yli metrin ero vedenpinnan korkeudessa teoreettiseen arvoon verrattuna. Lisäksi havaittiin, että Hämeenkosken kohdalla oleva ilmareikä oli tukossa. Tästä pääteltiin, että tunnelissa on ilmatasku, joka estää veden virtausta. Tunneliin porattiin tutkimusmielessä muutamia porareikiä, joista saatu informaatio kuitenkin varmisti, että kyseessä onkin jonkin asteinen kalliosortuma.

### 3.1.2 Sortuman tutkiminen

Tunnelin tukkeumaa selvitettiin aluksi poraamalla tunneliin reikiä, joista mitattiin vedenkorkeuksia ja siten haarukoitiin tukkeumakohtaa. Tällä menetelmällä tukos paikallistettiin noin 150 metrin tarkkuudella Hämeenkoskella sijaitsevan ilmareiän lähettyville. Tässä vaiheessa poraukset keskeytettiin, koska ei haluttu porata reikää sortuma-alueelle. Seuraavaksi ryhdyttiin etsimään vaihtoehtoisia tutkimusmenetelmiä tunnelin tutkimiseksi. Tutkimusmenetelmän valinnassa päädyttiin kauko-ohjattavaan sukellusrobottiin (ROV) ja tarjouskilpailun voitti kanadalaisen Aquatic Science Inc –yhtiö (ASI). ASI:n sukellusrobotissa oli 10 km pitkä kaapeli. Tällä robotilla päästiin kuvaamaan sortumaa sekä pohjoisesta että etelästä. Tutkimuksessa selvisi, että tunnelin pohjalle oli sortunut pohjalta 20 m pitkä kivikasa, joka tukki tunnelin kokonaan. Kuvassa 3.1 on pysäytyskuva tutkimusrobotin ottamasta videokuvasta. Robotin sortumasta ottama kaikuluotauskuva on kuvassa 3.2.

Kuva 3.1. Robotin ottama videokuva Hämeenkosken sortumasta




Kuva 3.2. Robotin ottama pituusleikkaus kaikuluotauskuva Hämeenkosken sortumasta

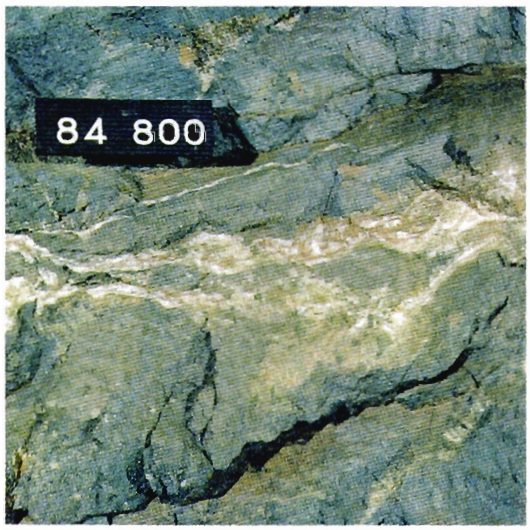
Sortuman tutkimisen jälkeen päätettiin jatkaa sukellusrobottitutkimuksia koko Päijänne-tunnelin matkalla. Hämeenkosken sortuma-alueen tutkimukset jatkuivat tarkemmalla tutkimusohjelmalla, johon kuului porakonekairauksia, kallionäytekairauksia ja seismisiä luotauksia. Kaikkiaan porakonekairauksia tehtiin 53 reikää, joista kolme porattiin Päijänne-tunnelin pohjatasolle asti noin 65 metrin syvyyteen. Kallionäytekairauksilla tehtiin

viisi reikää (70m, 70m, 100m, 60m ja 90m) ja seismistä luotausta tehtiin 1585 linjametrillä. Lisäksi kymmentä kairareikää kuvattiin reikävideokameralla.

Kallionäytekairauksia tehtiin, jotta saataisiin selville heikkousvyöhykkeen sijainti, koko ja laatu. Porakonekairauksilla pyrittiin löytämään optimaalinen ohitustunnelin ajotunnelin paikka. Porakonekairauksilla selvitettiin lähinnä kalliopinnan sijaintia. Muutamia porakonekairausreikiä porattiin myös heikkousvyöhykkeen lähistölle. Näissä rei'issä tehtiin reikävideokuvaus. Seismisiä luotauksia tehtiin vaihtoehtoisilla ajotunnelilinjoilla. Seismisillä luotauslinjoilla selvitettiin kallion laatua ja heikkousvyöhykkeiden sijaintia.

### 3.1.3 Sortuma-alueen geologia

Sortuma-alueella tunneli on noin 60 metrin syvyydessä. Pääkivilajina on amfiboliitti, jossa on pilsteisiä, keskirakeisia, lähes syväkivimäisiä osueita. Hieman sortumasta pohjoiseen on runsaasti breksioivia graniittijuonia. Graniitti on suurimmaksi osaksi punertavaa ja ruhjeista. Sekä amfiboliitissä että graniitissa on karbonaattimineraalien täyttämiä rakoja (kuva 3.3) (Laitakari & Pokki 1979). Alue on moreenin peittämä, eikä kalliopaljastumia ole näkyvissä.

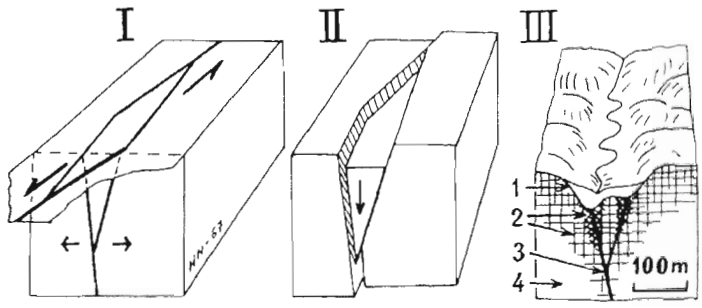



Kuva 3.3. Karbonaattimineraalien täyttämiä rakoja amfiboliitissä PL 84 800 (Laitakari & Pokki 1979)

Sortuma-alueella oli tunnelin rakentamisen aikana havaittu pieniä savitäytteisiä kvartsikiteitä sisältäviä onkaloita.

Sortuma sijaitsee Teuronjoen ruhjevyöhykkeen alueella. Varsinainen Teuronjoen ruhje sijaitsee noin kolme kilometriä sortumasta pohjoiseen. Koko Teuronjoen laakso on tulkittu niin, että kallion siirroksien yhteydessä on alueella tapahtunut lohkovajoama, joka on synnyttänyt laakson (kuva 3.4) (Niini 1999). Lohkon pohjoisreuna on Teuronjoen ruhjeen kohdalla noin kilometrin Teuronjoesta pohjoiseen. Lohkon eteläreuna on noin kolme kilometriä pohjoisreunaa etelämpänä. Sortuma sijaitsee lohkon eteläreunassa ja

on näin ollen hyvin häiriintyneessä kallioperässä. Lohkon sisällä on myös ehjemmän kiven alueita.




Kuva 3.4. Kaaviokuva lohkovajoaman syntymisestä. (Niini 1967)

Sortuman jälkeen tehtyjen kenttätutkimusten perusteella sortuma-alueen geologiasta saatiin runsaasti lisäinformaatiota. Sortumakohta on lähes pohjois – eteläsuuntaisessa siirrosvyöhykkeessä. Kivilaatu vyöhykkeessä vaihtelee lievästä voimakkaasti muuttuneeseen ja siinä on sekä massamaisia että liuskeisia osueita. Kivilajeina ovat graniitti, amfiboliitti ja kiille-sarvivälkegneissi. Rapautumisaste alueella vaihtelee vähän rapautuneesta täysin rapautuneeseen. Rakenne on paikoin murumaista, paikoin savimaista, ja leveimmät savitäytteet ovat n. 0,2 metriä leveitä. Vyöhykkeen murros-savirakenteinen osuus on leveimmillään noin 20 metriä. Ohitustunnelia louhittaessa kohdattiin ennen varsinaista heikkousvyöhykettä aikaisemmin havaitsematta jäänyt loivasti kaatuva heikkousvyöhyke. Tämä vyöhyke leikkaa ohitustunnelin paaluvälillä 460-505. Päijännetunnelia heikkousvyöhyke ei leikkaa lainkaan vaan ”kaatuu” sen alitse.

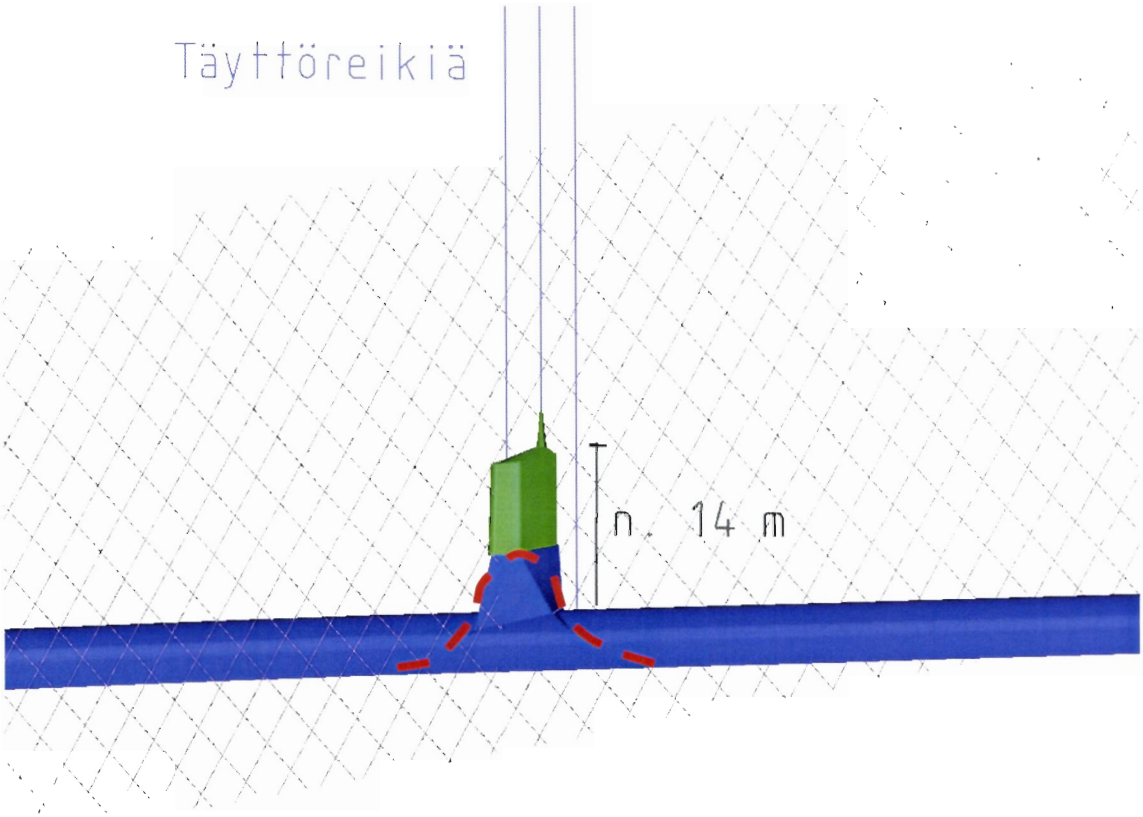
### 3.1.4 Sortuman kuvaus

Hämeenkosken sortuma sijaitsi aivan I rakennusjakson eteläpäässä Teuronjoen ajokuiluosuudella 11 m urakkarajasta. Sortuma tukki tunnelin kokonaan ja sortunut kiviaines muodosti pohjalta 20 metriä pitkän kasan paaluvälillä 84 806 – 84 826. Vesi pääsi kuitenkin vielä virtaamaan kivikasan läpi painehäviön mukaan arvioituna noin 0,5 $m^2$ teoreettisen poikkileikkausalan läpi. Kiviaines sortumassa oli hematiittiutunutta ja rapautunutta. Veden virtaus oli kuljettanut hienoaineksen kivikasasta.

Sortuma oli sattunut alueella, jossa tunneli oli lujitettu 60 mm:n ruiskubetonilla, joka oli vahvistettu verkolla. Ruiskubetoni ei ollut kestänyt höltyneen kivimassan painoa, vaan oli murtunut. Tunnelin yläpuolella oleva sortunut tyhjä tila oli kooltaan noin 4*5*8 = 160 $m^3$, ja kaiken kaikkiaan sortuneen kiven tilavuus oli noin 300 $m^3$. Tyhjään tilaan tehdyistä betonointirei'istä videokuvattaessa huomattiin, että sortuma oli koko ajan laajenemassa, ja sortuma olisi todennäköisesti ajan myötä edennyt maanpinnalle asti (kuva 3.7). Sortuman havaitsemisen ja sen korjaamisen välillä kuluneen vuoden aikana painehäviö tunnelissa ei kuitenkaan kasvanut. Kuvassa 3.5 näkyy sortuma ja murtunut verkotettu ruiskubetoni. Piirretty malli sortumasta on esitetty kuvassa 3.7.

Kuva 3.5. Hämeenkosken sortuma kuvattuna pohjoisesta

Kuva 3.6. Sortuma kuvattuna etelästä (Kuva: Arto Wegelius)




Kuva 3.7. Malli Hämeenkosken sortumasta idästä katsottuna. Tyhjä tila, – sortunut aines. (muokattu Maa ja Vesi Oy:n aineistosta)

### 3.1.5 Laboratoriotutkimukset

Laboratoriotutkimuksia tehtiin heti kenttätutkimusten jälkeen keväällä 1998. Lisäksi tutkimuksia tehtiin myös tätä työtä varten keväällä 1999 tunnelin sortumasta otetuista näytteistä. Näytteistä tehtiin röntgendiffraktioanalyyseja rakotäytteiden ja savien mineraalikoostumuksen selvittämiseksi, paisuntapainekokeita saven paisumisvoiman selvittämiseksi ja ohuthietutkimuksia kivilajien sekä kiven rakenteen selvittämiseksi. Paisuntapainekokeet tehtiin norjalaisten ohjeiden mukaisesti. Ohjeet on käännetty suomeksi julkaisussa: Paisuvat kalliosavet (Wegelius & Holopainen 1997, s. 30-32). Myöhemmin tehtiin vielä kiven hajoamiskoe, jossa kivinäytteet upotettiin veteen neljäksi kuukaudeksi ja sen jälkeen laskettiin, kuinka suuri osa kivestä on muuttunut hienoaineeksi. Röntgendifraktioanalyysit ja ohuthietutkimukset tehtiin Geologian tutkimuskeskuksessa.

Alkuperäisenä kivilajina sortuma-alueella on todennäköisesti ollut kvartsimaasälpägneissi. Kivi on kuitenkin voimakkaasti muuttunutta, hematiittiutunutta, rakoillutta ja breksioitunutta, mikä on heikentänyt huomattavasti kiven teknisiä ominaisuuksia (kuva 3.8). Rakotäytteiden tutkimuksissa selvisi, että rakotäyte koostuu hematiitista, kloriitista ja paisuvista sekä paisumattomista savimineraaleista. Paisuntapainekokeissa saadut paisuntapaineet vaihtelevat 51 ja 120 kPa:n välillä eli rakotäytteet ovat kirjallisuudesta (Broms & Heiner 1979) saadun luokituksen perusteella paisumat-

tomia tai hieman paisuvia. Paisuntapainemittauksien tulokset ovat maksimipaisuntapaineita. Laboratoriotutkimusten tulosten yhteenveto on esitetty taulukossa 3.2. Paisuntapaineen tutkimuslomakkeet on liitteenä 1.

Vertailumielessä tämän tutkimuksen yhteydessä tehtiin paisuntapainekokeita myös "tavalliselle" jääkauden jälkeen syntyneelle savelle, jota esiintyy runsaasti Helsingin alueella. Savinäytteet on valittu sattuman varaisesti neljästä eri kohteesta. Savien paisuntapaineeksi saatiin 44 kPa, 51 kPa, 43 kPa ja 61 kPa. Tarkemmat tulokset ja näytteiden sijainnit on esitetty liitteessä 2. Näiden tulosten pohjalta voidaan sanoa, että Hämeenkosken sortumassa esiintyneet paisuntapaineet olivat enimmillään kaksi kertaa "tavallisen saven" arvoja suurempia ja keskimääräisesti vain hieman suurempia. Vaikka "tavallisen saven" mineraalikoostumus ei olekaan selvillä, voidaan kuitenkin päätellä, että Hämeenkosken sortumaa ei voida selittää pelkästään saven korkealla paisuntapaineella.

Kiven hajoamiskokeen tulokset on esitetty taulukossa 3.1. Vertailun vuoksi kokeessa oli mukana myös Päijänne-tunnelin Pulkkilan sortumasta otettuja kivinäytteitä. Pulkkilan kivinäytteiden osalta vedessä liotus ei vaikuttanut kiviin millään lailla. Ne eivät hajonneet hienoainekseksi, eivätkä niiden ulkonäkö tai lujuus muuttuneet mitenkään. Hämeenkosken kivinäytteissä sensijaan hajoamista ja muuttumista oli selvästi havaittavissa. Osa näytteistä oli muuttunut lähes kokonaan hienoainekseksi. Näytteet, joissa ainoastaan pieni osa oli muuttunut hienoainekseksi, olivat kuitenkin haurastuneet selvästi ja ne murenivatkin helposti lisää. Kuvia näytteistä ennen ja jälkeen kokeen on liitteessä 3. Hajoamiskokeessa eniten hajonneelle näytteelle (HÄM F) tehtiin paisuntapainekoe, jonka tuloksena paisuntapaineeksi saatiin 82 kPa.

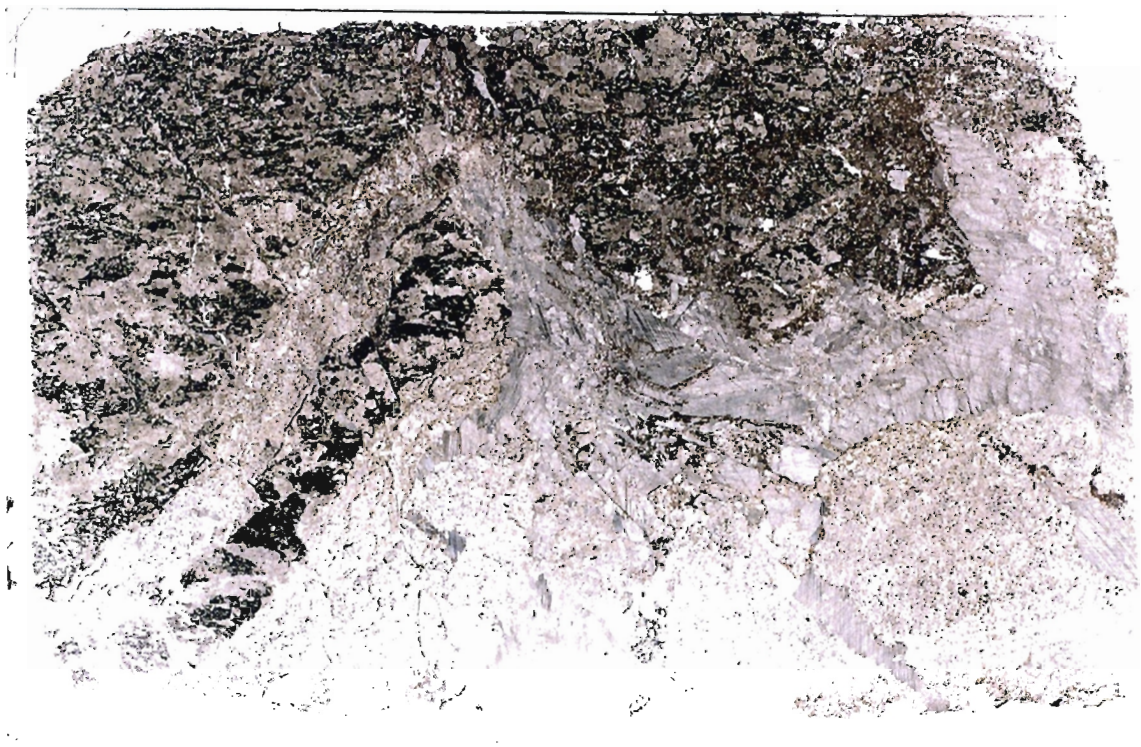
Taulukko 3.1. Kiven hajoamiskokeen tulokset

| NÄYTE | Kivinäytteen paino [g] ennen koetta 20.5.1999 | Kivinäytteen paino [g] kokeen jälkeen 29.9.1999 | Hienoainekseksi muuttuneen kiven osuus [%] | Huom! |
|---|---|---|---|---|
| HÄM F | 222,5 | 47,4* | 78,7 | *kahdessa osassa |
| HÄM H | 70,8 | 65,9 | 6,9 | |
| HÄM G | 190,0 | 188,8 | 0,6 | |
| HÄM I | 568,9 | 561,5 | 1,3 | |
| HÄM B | 239,8 | 238,6 | 0,5 | |
| HÄM E | 115,7 | 71,16 | 38,5 | |
| PLK A | 1081,2 | 1080,4 | 0,1 | |
| PLK F | 108,8 | 108,7 | 0,1 | |
| PLK D | 49,6 | 49,5 | 0,2 | |

Taulukko 3.2. Laboratoriotutkimusten yhteenveto

| | |
|---|---|
| Kivilaji | Alunperin luultavasti kvartsi-maasälpagneissi, nyttemmin jo voimakkaasti muuttunutta ja breksioitunutta |
| Päämineraalit | I Kvartsi, plagioklaasi, kalimaasälpä, hematiitti<br>II Kalsiitti, kvartsi, plagioklaasi, muskoviitti, hematiitti |
| Rakotäytteet | I Hematiitti (75 %), vermikuliitti (15 %) kloriitti (5 %) + kvartsi, plagioklaasi ja illiitti (kutakin < 5 %)<br>II Kalsiitti (70 %), vermikuliitti (15 %), kvartsi (10 %), kali-maasälpä (5 %)<br>III Corrensiitti (50 %), hematiitti (30 %), kvartsi (10 %), kiille+ plagioklaasi (10 %) |
| Paisuntapaineet | 120, 105, 103, 82, 76, 72, 70, 65, 64, 61, 55, 51 kPa |

Vermikuliitti ja corrensiitti ovat aktiivisia savimineraaleja. Ne kykenevät sitomaan vettä itseensä ja näin aiheuttamaan laajentuessaan paisuntapaineen. Paisuntapaine on kuitenkin pieni verrattuna yleisemmin paisuvana savena tunnettuihin smektiitti-ryhmän saviin. Tämä pienempi paisuntapaine näkyy selvästi myös laboratoriotuloksissa. Tässä tapauksessa vermikuliitin ja corrensiitin vaikutus sortuman syntyyn selittyykin lähinnä rapautuneen kiven hajoamisen aiheuttajana (vrt. kiven hajoamiskoe).



Kuva 3.8. Hämeenkosken sortumasta otetusta näytteestä tehty kokohiekuva ilman nikoleita. Kuvan leveys 3,9 cm (Kuva: Geologian tutkimuskeskus)

### 3.1.6 Sortuman syyt

Sortuman syiden selvittämiseksi on tehty lukuisia laboratoriotutkimuksia, sekä haastateltu asiaan perehtyneitä geologeja (Niini 1999 ja Suominen 1999). Näiden tietojen perusteella sortuman syyn todennäköisenä aiheuttajana on esitetty seuraavaa hypoteesia sortuman kehittymisestä. Tämä hypoteesi on sopusoinnussa sen kanssa, mihin tunnelin esitutkimuksissa jo 1960-luvulla päädyttiin, nimittäin että tunnelin rakentaminen tulee aktivoimaan veden kiertoa kalliossa lisäten aikaa myöten rapautumiseen liittyvää deformaatioriskiä juuri ruhjevyöhykkeissä (Niini 1968b, s. 47 ja s. 52).

Heikkousvyöhykkeessä oli jo ennen tunnelin rakentamista käynnissä kiviaineksen hematiittiutuminen, joka on geologisessa ajanlaskussa hyvin nopea, vain satoja vuosia kestävä tapahtuma. Hematiittiutuminen tarkoittaa käytännössä ruostumista, jolloin kivessä oleva rauta hapettuu ja näin kivi rapautuu. Hematiittiutuminen tarvitsee edetäkseen happea.

Tunnelia rakennettaessa alueen pohjavesiolosuhteet muuttuivat ja pohjaveden virtaus alueella nopeutui. Ruhjevyöhykkeen läpi virtasi huomattavasti enemmän happirikasta vettä kuin ennen tunnelin louhintaa. Lisäksi ruhjeeseen oli rakennusvaiheessa porattu ilmareikä veden virtausteknillisistä syistä. Tunnelissa olevan vedenpaineen vuoksi pääsi Päijänteen hapekasta pintavettä nousemaan ilmareiästä ruhjeeseen. Ruhjeeseen päässyt happi nopeutti hematiittiutumisprosessia merkittävästi. Ilmareiät sijaitsevat tunnelissa tapahtuvan veden virtauksen muutosten kannalta painekriittisissä kohdissa, mikä on voinut myös edistää sortuman syntyä, jos tunnelissa on tapahtunut vedenpaineen muutoksia.

Rapautumisen nopeutuessa kiven tekniset ominaisuudet heikkenivät ja kivessä alkoi erikoinen reaktio. Rapautunut kivi alkoi hajota, kun se joutui kosketuksiin veden kanssa. Hajoaminen johtui rapautuneessa kivessä olevasta paisuvasta savesta. Paisuva savihiukkanen koostuu löyhästi toisiinsa kiinnittyneistä pii-happi-tetraedriverkoista, joiden välissä on muita atomeja tai ioneja. Kun paisuva savi joutuu tekemisiin veden kanssa vesi imeytyy kerrosten väliin ja aiheuttaa paisumisen ja samalla kiven hajoamisen.

Paisuvan saven paisuntapaineet olivat kuitenkin kohtuullisen pienet, eivätkä aiheuttaneet suoranaisesti lujitusrakenteen murtumista. Lujitusrakenteet murtuivat, kun verkotettu ruiskubetonointi ei enää kestänyt löyhtyneen kiven painoa vaan murtui. Lujituksen pettämisen jälkeen sortuminen kiihtyi, koska ruhjeeseen pääsi runsaasti vettä ja veden virtaus nopeutti sortuman etenemistä.

### 3.1.7 Tunnelin tarkastus ja yleiskunto

Päijänne-tunneli on tutkittu kokonaisuudessaan kauko-ohjattavalla sukellusrobotilla. Tutkimukset tehtiin kahdessa osassa. Paaluvälit 30 364 – 119 969 tutkittiin keväällä ja kesällä 1998. Paalulta 30 364 etelään tutkimukset tehtiin keväällä 1999. Vuoden 1998 tutkimuksissa ASI raportoi kiviä (alle 400 mm korkuisia) pudonneen yhteensä noin 270 kohdasta. Käytännössä kivet olivat irronneet täysin lujittamattomilta osuuksilta. Näiden

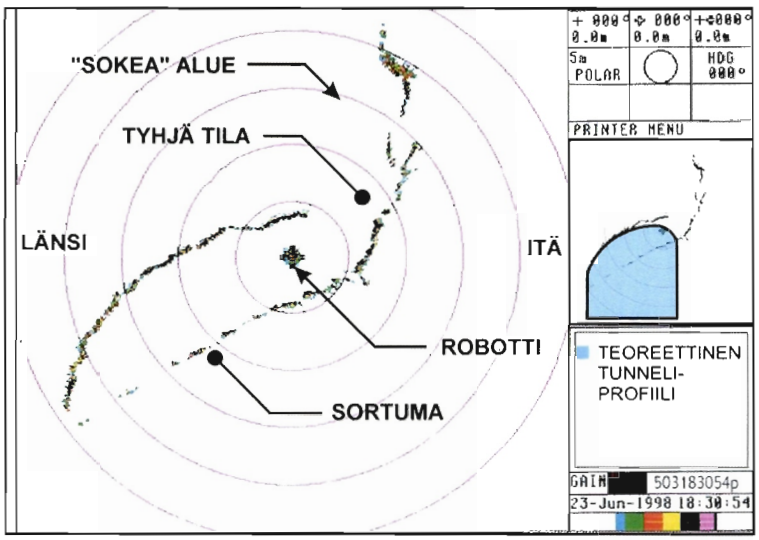
kivien putoamisen olisi todennäköisesti estänyt ohutkin ruiskubetonointikerros. Tunnelin pohjalle pudonneet kivet eivät haittaa tunnelin toimintaa, mutta osa niistä voi olla ns. avainlohkoja. Jatkoselvityksissä keskityttäneen selvittämään avainlohkoja ja muuten kriittisiä alueita, jotka voivat olla alkuna sortumille. Näiden kohteiden korjaukset tulevat harkittaviksi lähitulevaisuudessa. Vauriokohtia lukuunottamatta tunneli on hyvässä kunnossa (PSV 1999).

## 3.2 Päijänne-tunnelin Pulkkilan sortuma

### 3.2.1 Sortuman havaitseminen

Päijänne-tunnelin robottikuvauksissa havaittiin kesäkuussa 1998 Pulkkilan ajotunneliosuudella tunnelin katosta sortuneen kiviä, jotka täyttivät tunnelin noin 1,5-3,5 metrin korkeudelta. Vesi pääsi kuitenkin vielä vapaasti virtaamaan sortumakohdassa. Sortuma oli tapahtunut paaluluvulla 118 220. Robotin ottama videokuva on kuvassa 3.9 ja kaikuluotauskuva kuvassa 3.10.

Kuva 3.9. Robotin ottama videokuva Pulkkilan sortumasta




Kuva 3.10. Robotin ottama poikkileikkaus kaikuluotauskuva Pulkkilan sortumasta

Hämeenkosken tukoksen tutkimusten yhteydessä marraskuussa 1997 Pääkaupunkiseudun Vesi Oy mittasi vedenpinnat kaikista Päijänne-tunnelin ilmarei'istä. Tällöin Pulkkilan alueella havaittiin 2 cm vedenpintojen ero teoreettisiin arvoihin verrattuna. Tämä ero tulkittiin kuitenkin mittaepätarkkuudeksi ja sortuma havaittiin vasta robottikuvausten yhteydessä. (Alaranta 1999)

### 3.2.2 Sortuma-alueen geologia

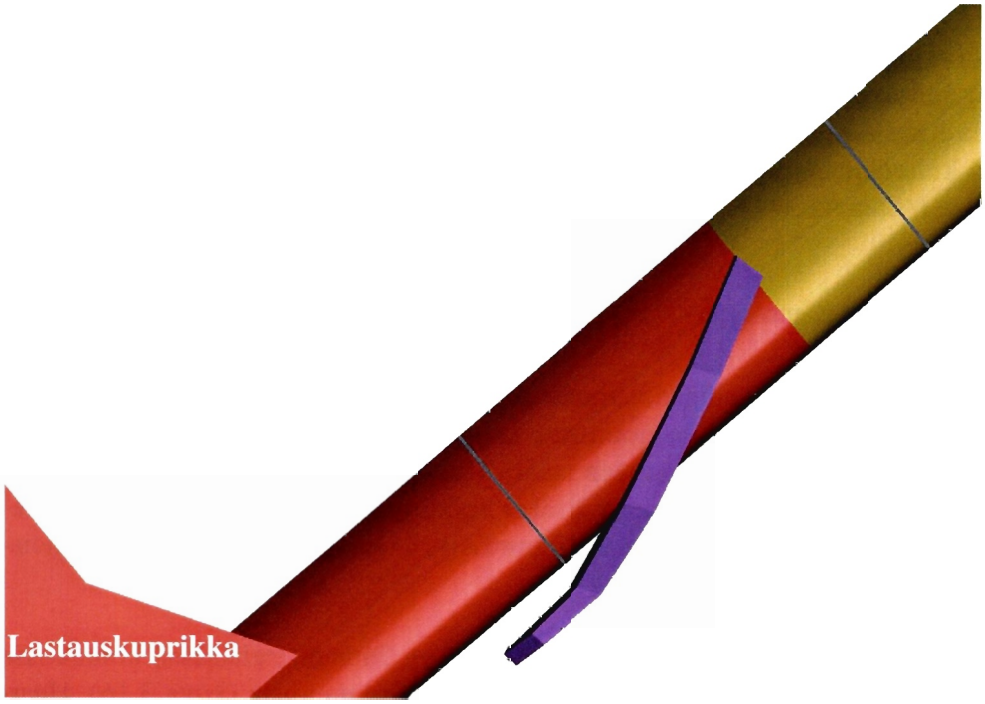
Alueen geologia on poikkeuksellisen vaihtelevaa. Graniitin ja suonigneissin vuorottelun lisäksi on kummassakin kivilajissa huomattavia tyyppivaihteluita. Suonigneississä on amfiboliittivälikerroksia ja graniittijuonten määrä vaihtelee 0:sta 50 %:iin. Suonigneissirakennetta muodostavien graniittijuonten lisäksi esiintyy runsaasti useiden metrien levyisiä osin pegmatiittisia graniittijuonia. Graniittisissa osissa on yleisesti kiillegneissisulkeumia. (Laitakari & Pokki 1979)

Varsinainen sortuma tapahtui kiillegneissijuonta pitkin. Juonen eteläisessä kontaktissa on voimakas haarniskapinta, joka on peräisin vanhoista liikunnoista (kuva 3.16). Haarniskapinnasta pohjoiseen kivi jatkuu heikkona. Kiven heikkous aiheutuu samasta siirroksesta kuin haarniskapintakin, mutta siirroksen liike-energia on vaimentunut pohjoista kohden jolloin kivilaatu vähitellen paranee. Tutkimusten yhteydessä sortuman yläpuolelta kallionäytekairattiin reikä (65 m), jota jatkettiin 15 metriä sortumakohdan ohi koilliseen. Kairareiässä kivi huononee huomattavasti juuri haarniskaraon kohdalla ja jatkuu siitä eteenpäin huonona. Tunneliin pääsyn yhteydessä ei päästy tämän tarkemmin selvittämään alueen geologiaa, koska sortuman pohjoispuolelta alkoi vanha ruiskubetonointi, eikä aikataulusyistä johtuen tunnelin laajempi tyhjentäminen ollut mahdollista.

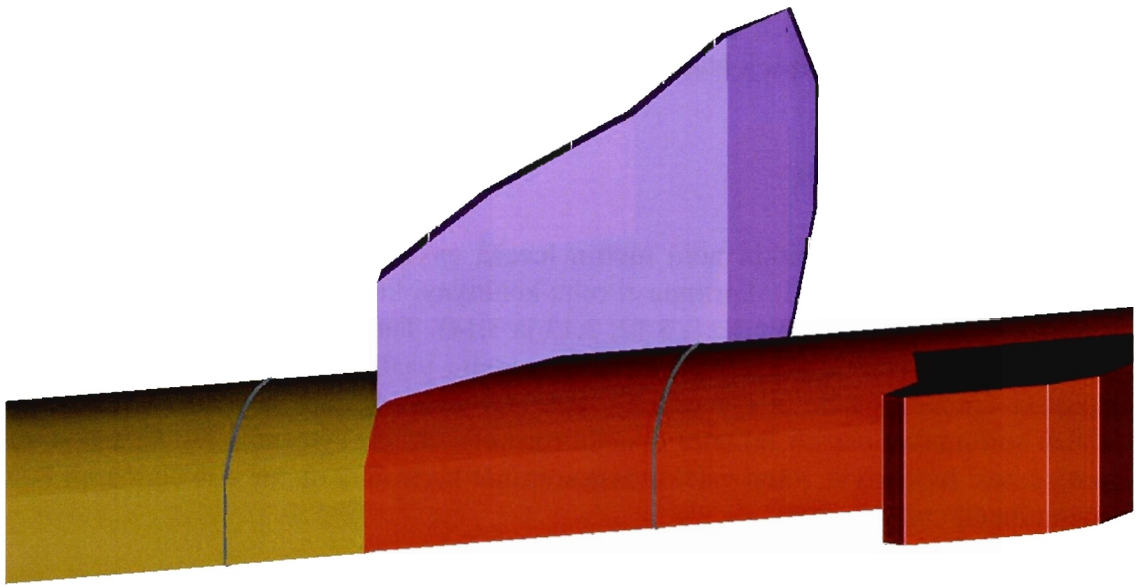
### 3.2.3 Sortuman kuvaus

Sortuma oli tapahtunut pitkin noin metrin leveää pystyä juonta, joka leikkaa loivasti tunnelia (kuva 3.11 ja 3.12). Sortuma ei ollut kehittynyt koko tunnelin läpi, vaan päättyi lähes tunnelin keskelle (kuva 3.11, 3.12, 3.13 ja 3.14). Tunnelin itäpuolella juoni taipuu tunnelin suuntaiseksi ja yläosaltaan lievästi tunnelin päälle. Kuvassa 3.11 tätä yläosan taipumaa tunnelin päälle ei ole esitetty, jotta sortuman sijainti ja koko ei vääristyisi. Juonen sortumaton osa oli lujitettu ohuella ruiskubetonilla. Tyhjennyksen aikana sortumasta putosi lisää kiviä, joten valokuvissa sortunut kivimäärä on hieman suurempi kuin ennen tunnelin tyhjennystä.

Kuvassa 3.14 näkyy hyvin sortuman takana alkava vanha ruiskubetonointi. Sortuman korkeus on arviolta noin 10 metriä ja sen tilavuus noin 80 $m^3$. Sortuman alapuolelta on otettu kuvat 3.15 ja 3.16, jossa näkyy hyvin juonen eteläisessä kontaktissa oleva haarniskarako.




Kuva 3.11. Kolmiulotteinen malli Pulkkilan sortumasta ylhäältä katsottuna. Ruiskubetonoimaton tunneli Sortuma Ruiskubetonoitu tunneli. Harmaat poikkiviivat kuvaavat korjauksessa käytetyn muotin rajoja. (muokattu Maa ja Vesi Oy:n aineistosta)



Kuva 3.12. Kolmiulotteinen malli Pulkkilan sortumasta lännestä katsottuna. Ruiskubetonoimaton tunneli Sortuma Ruiskubetonoitu tunneli. Harmaat poikkiviivat kuvaavat korjauksessa käytetyn muotin rajoja. (muokattu Maa ja Vesi Oy:n aineistosta)

Kuva 3.13. Pulkkilan sortuma välittömästi tyhjennyspumppauksen jälkeen.

Kuva 3.14. Pulkkilan sortuma välittömästi tyhjennyspumppauksen jälkeen

Kuva 3.15. Pulkkilan sortuman tyhjä tila kuvattuna pohjoisesta yläviistoon

Kuva 3.16. Pulkkilan sortuman tyhjä tila kuvattuna alhaalta ylöspäin

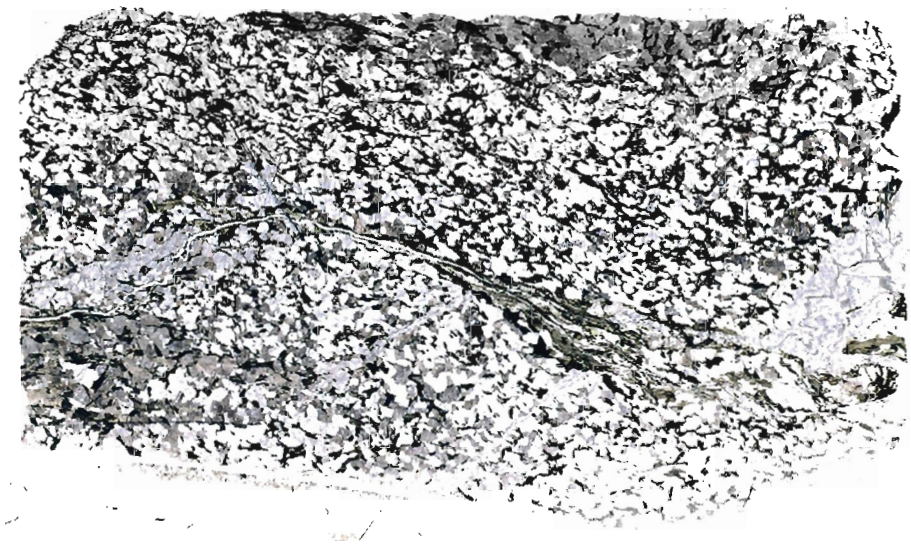
### 3.2.4 Laboratoriotutkimukset

Sortuman korjauksen yhteydessä otetuille näytteille tehtiin tätä tutkimusta varten erilaisia laboratoriokokeita. Röntgendifraktioanalyyseja tehtiin rakotäytteiden ja savien mineraalikoostumuksen selvittämiseksi, paisuntapainekokeita saven paisumisvoiman selvittämiseksi ja ohuthietutkimuksia kivilajien sekä kiven rakenteen selvittämiseksi. Paisuntapainekokeet tehtiin norjalaisten ohjeiden mukaisesti. Ohjeet on käännetty suomeksi julkaisussa: Paisuvat kalliosavet (Wegelius & Holopainen 1997, s. 30-32). Röntgendifraktioanalyysit ja ohuthietutkimukset tehtiin Geologian tutkimuskeskuksessa. Tutkimusten yhteenveto on esitetty taulukossa 3.3 ja tarkemmat tiedot paisuntapainekokeista on esitetty liitteessä 4.

Taulukko 3.3. Laboratoriotutkimusten yhteenveto

| Kivilaji | Kiillegneissi |
|---|---|
| Päämineraalit | Kvartsi, plagioklaasi, kloriitti, biotiitti, muskoviitti, kalimaasälpä |
| Rakotäytteet | **Päärakotäyte (> 95%):** Kaoliniitti (85%), kvartsi (10%), plagioklaasi (<5%) ja kloriitti smektiitti (<5%)<br>Aksessorinen rakotäyte (< 5%): Kvartsi (40%), plagioklaasi (20%), kalimaasälpä (20%), illiitti-smektiitti (10%) ja kalsiitti (5%) |
| Paisuntapaineet | 34 kPa, 30 kPa, 37 kPa |

Kivilajina Pulkkilan sortumassa oli keskirakeinen kiillegneissi, jonka kiillepitoisuus on noin 30 %. Kiilteistä puolet on muuttunut kloriitiksi. Kivi on melko hyvin säilynyttä (kuva 3.17). Pulkkilan sortuman rakotäytteistä tehdyt kokeet osoittivat, että pääasiallinen rakotäyte oli kaoliinia sekä hienontunutta kiviainesta. Paisuvia savia rakotäytteissä oli merkityksettömän pieniä määriä. Rakotäytteenä olleelle savelle tehtyjen paisuntapainemittausten mukaan paisuntapaine on hyvin vähäistä ja luokitusten mukaan savi oli paisumatonta.



Kuva 3.17. Pulkkilan sortumasta otetusta näytteestä tehty kokohiekuva ilman nikoleita. Kuvan leveys 3,9 cm. Kuva: Geologian tutkimuskeskus

### 3.2.5 Sortuman syyt

Sortunut kiviaines oli kiillegneissiä, jonka kiilteet olivat suureksi osaksi muuttuneet kloriitiksi. Kloriitti on hyvin liukas saippuamainen mineraali. Rakotäytteenä sortuneessa juonessa esiintyi kaoliinisavea. Koska aluetta ei oltu ruiskubetonoitu, veden virtaus huuhteli savea raoista. Tällöin rakojen kitka pieneni huomattavasti ja rakojen liukkaat kloriittipinnat eivät enää pystyneet pitämään avainlohkoja paikallaan. Avainlohkojen putoamisen jälkeen sortuma eteni hitaasti ja olisi luultavasti lopulta tukkinut koko tunnelin. Tätä sortuman syntyteoriaa tukee se, että sortuma ei ole edennyt koko tunnelin leveydelle, vaan loppuu juuri siihen, mistä vanha ruiskubetonointi alkaa (kuva 3.11, 3.12 ja 3.14).

### 3.2.6 Tunnelin tarkastus ja yleiskunto

Päijänne-tunnelin tarkastus ja yleiskunto on käsitelty Hämeenkosken sortuman yhteydessä kappaleessa 3.1.7.

## 3.3 Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin sortuma

### 3.3.1 Sortuman havaitseminen

Keskiviikkona 4.10.1995 alkoi vedenpinta nousta Viikin vanhalta jätevedenpuhdistamolta purkutunneliin johtavassa yhdyskanavassa, vaikka poistovirtaama pysyi normaalitasolla. Tilanne jatkui seuraavana päivänä, ja 6.10.1995 virtaus loppui käytännössä kokonaan. Tämän johdosta vedenpinta nousi poistotunnelin pystykuilussa niin ylös, että puhdistettu jätevesi alkoi virrata varareitiksi tarkoitetun ylivuotoreunan yli lumensulatusaltaaseen. Sieltä vesi virtasi edelleen vanhaa purkuojaa pitkin Vanhankaupungin lahteen. (Tiainen & Kähönen 1996)

Tukkeuman syyksi arveltiin aluksi joko tunnelin sortumaa tai lumensulatuksesta kertynyttä hiekkaa. Tukos paikallistettiin heti alkuvaiheessa Viikin ja Kyläsaaren väliselle noin 4 km pitkälle osuudelle. Veden pinta oli Kyläsaaren pystykuilussa lähes merenpinnan tasolla, mutta Viikissä se oli yli kaksi metriä korkeammalla. (Tiainen & Kähönen 1996)

### 3.3.2 Tunnelin tyhjennys

Ennen sortuman tutkimista oli tunneli tyhjennettävä vedestä ja sinne kertyneestä liejusta. Ennen pumppauksen aloittamista oli Munkkisaaren pystykuilut erotettava toisistaan settipadoilla (kuva 3.18). Näin estettiin meriveden pääsy tunneliin. Pumppaus alkoi Helsingin Veden omana työnä Viikin pystykuilusta. Työtä jatkettiin, kunnes pumppujen nostokorkeus ei enää riittänyt (Saarinen 1995). Pumppausta Munkkisaaren pystykuilulla hoiti alan urakoitsija. Pyöreään ∅ 5 metrin kuiluun laitettiin vapaasti kelluva lautta, jonka päälle asennettiin diesel-käyttöinen pumppu. Vedenpinnan laskiessa pystykuilussa lautta laskeutui samaa tahtia. Vaikka ilmaa puhallettiin pystykuiluun isolla kaivospuhaltimella, nousi lämpötila kuilussa lähelle saunan lämpötilaa. Kaiken kaikkiaan vettä pumpattiin yhteensä noin 200 000 $m^3$, nostokorkeuden ollessa 40 – 85 metriä. (Tiainen & Kähönen 1996)

Liete pumpattiin hydraulisilla pumpuilla Annalan ajotunnelin kautta läheiseen viemäritunneliin, josta se päätyi takaisin Viikinmäen jätevedenpuhdistamolle. Puhdistamo ei voinut ottaa lietettä vastaan samaan tahtiin kuin sitä pumpattiin, joten osa lietteestä välivarastoitiin tunneliin tehdyn työpadon taakse (Tiainen & Kähönen 1996). Aluksi puhdistamolle pumpattiin lietettä noin 800 $m^3$/vrk, mutta puhdistustuloksen heikentyessä pumppausmäärä putosi vähitellen noin 300 $m^3$/vrk. Lietettä pumpattiin kaikkiaan yli 60 000 $m^3$.

Kuva 3.18. Settipatojen asennus Munkkisaaren pystykuiluilla. (Kuva: Mikko Kivistö)

### 3.3.3 Sortuman tutkiminen

Tunnelin tarkastukset alkoivat heti, kun tunnelin vaakasuora osuus alkoi tyhjentyä. Tällöin laskeuduttiin Viikin pystykuilusta alas selvittämään tukoksen syytä. Jotta varmistuttaisiin, ettei lumensulatuksesta tullut katuhiekka ollut tukkinut tunnelia, otettiin tunnelin pohjalta muutamia näytteitä. Kuilun alapuolelta otettu näyte olikin katuhiekkaa, mutta vain 10 metriä etelämpänä otettu näyte sisälsi jo 1/3 orgaanista ainesta. Sadan metrin päässä näyte oli jo lähes täysin orgaanista materiaalia. Tästä voitiin melko varmasti päätellä, että tukoksen oli aiheuttanut kalliosortuma.

Seuraavan kerran tunnelia päästiin tarkastamaan, kun pumppaus oli niin pitkällä, että tunneliin voitiin laskeutua Kyläsaaren pystykuilusta. Tällä tarkastuskerralla sortuma löytyi pystykuilusta noin 400 metriä pohjoiseen, 3,6 km purkutunnelin alusta etelään. Sortuma oli Hämeentien ja Sturenkadun risteyksessä ja se oli täyttänyt tunnelin kokonaan kiviaineksella. (Tiainen & Kähönen 1996)

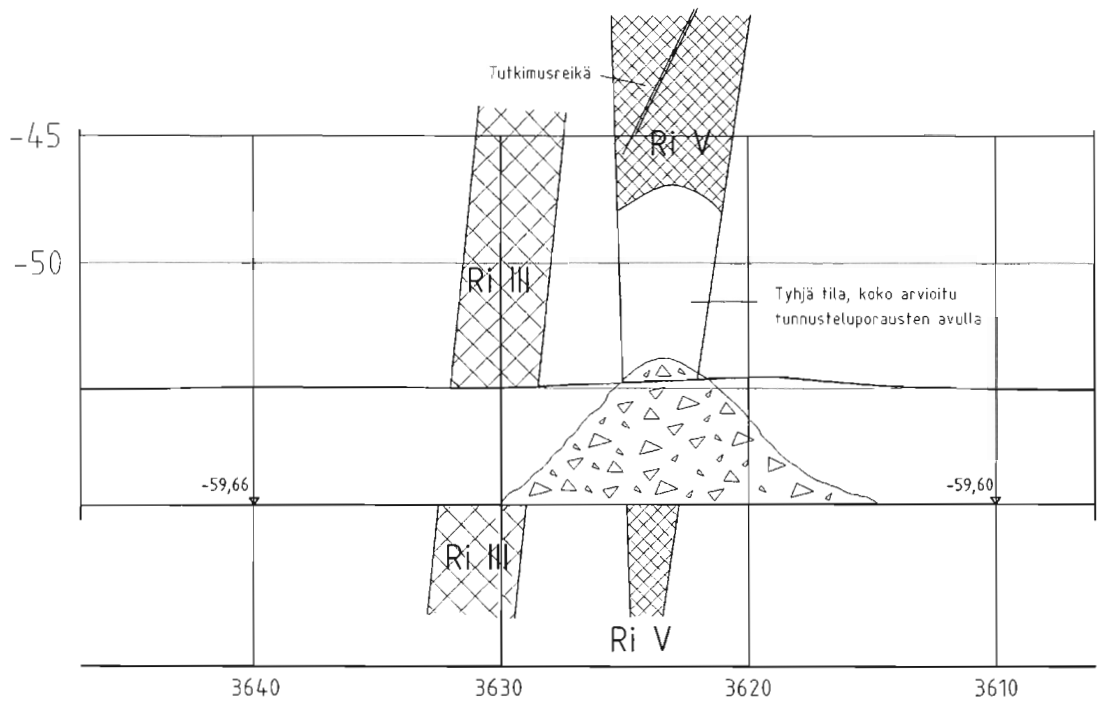
Sortumakohdan paikallistamisen jälkeen sortuma-alueelle tehtiin yksi tutkimusreikä (kuva 3.19), jolla haluttiin varmistaa sortuman laajuus ja heikkousvyöhykkeen kulku (Tiainen & Kähönen 1996). Tutkimusreikä tehtiin uppoporakoneella 60° kulmassa 15 metriä tunnelin katon yli. Reikä kuvattiin reikävideokameralla. Porarin tekemä pöytäkirja sekä videokuvaus osittivat, että kivi oli reiän alkuosassa hyvää punaista graniittia, joka muuttui noin 30 metriä tunnelin kattotason yläpuolella mustaksi savensekaiseksi pehmeäksi massaksi. Reiän loppuosa oli taas hyvää punaista graniittia. Tutkimusreiästä

ei löytynyt tyhjiä tiloja, joten sortuma ei ollut edennyt vielä reiän korkeudelle (kuva 3.19).

Tutkimusreiästä saadun informaation ja tunnelin rakennusvaiheessa tehdyn geologisen kartoituksen avulla sortuman aiheuttaneesta heikkousvyöhykkeestä voitiin tehdä hyvä kolmiulotteinen malli, josta oli runsaasti apua itse korjauksen suunnittelussa.

### 3.3.4 Sortuma-alueen geologia

Kallioperäkartan (Geo, 1978) mukaan sortuma-alue sijaitsee graniitti- ja granodioriittivyöhykkeiden rajalla. Tunnelissa tehdyn kartoituksen perusteella sortuma-alue on graniittisessa kallioperässä, jossa kulkee amfiboliittijuonia. Sortuma-alueen kohdalla kulkee kaksi heikkousvyöhykettä, jotka ovat noin neljän metrin levyisiä. Heikkousvyöhykkeiden välillä on neljä metriä terveempää kalliota. Molemmat heikkousvyöhykkeet ovat pystyjä. Itse sortuma oli kehittynyt runsaammin rapautunutta heikkousvyöhykettä (RiV) pitkin. Tämä heikkousvyöhyke on savirakenteinen, ja se leikkaa tunnelin melkein kohtisuorassa (noin 86°). Toinen heikkousvyöhyke on murrosrakenteinen (RiIII), ja se leikkaa tunnelin noin 64° kulmassa. Sortuma ja heikkousvyöhykkeet on esitetty kuvassa 3.19.




Kuva 3.19. Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin pituusleikkaus sortuma-alueella

### 3.3.5 Sortuman kuvaus

Sortuma sijaitsi poistotunnelin mannerosuudella paaluluvulla 3 615 – 3 630. Sortuma tukki tunnelin kokonaan noin 15 metrin matkalta ja esti puhdistetun jäteveden virtauksen täysin. Sortunut kiviaines oli silmämääräisesti tarkasteltuna amfiboliittia. Sortuneessa kivikasassa oli runsaasti hienoainesta, josta osa oli kalliosavea ja osa veden mukanaan tuomaa lietettä. Sortuma kuvattuna etelästä on esitettynä kuvassa 3.20. (Tiainen & Kähönen 1996)

Kuva 3.20. Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin sortuma etelästä kuvattuna (Kuva: Tuomas Valli)

Myöhemmissä tutkimuksissa selvisi, että sortuneen juonen kivilaji on lamprofyyria. Lamprofyyri juoni oli hyvin rapautunutta ja juonessa oli myös smektiittiä (Suominen 1997). Sama lamprofyriittijuoni on todennäköisesti aiheuttanut myös noin 300 metrin päässä tapahtuneen viemäritunnelin työnaikaisen (1993) sortuman.

Sortuma-alue oli alunperin lujitettu 70 mm ruiskubetonilla, joka oli vahvistettu verkotuksella. Lujitus oli kuitenkin murtunut heikkousvyöhykkeen kohdalta, ja sortuma oli

kehittynyt heikkousvyöhykettä pitkin ja muistutti tukkeutunutta hiekkasiiloa. Sortuman pohjoispuolella sortuman rajalla kivi vaihtui nopeasti terveestä graniitista lamprofyyriksi, joka oli sortunut. Korjauksen aikaisissa tunnusteluporauksissa todettiin sortuman olevan noin 4,5 metriä pitkän ja yltävän noin seitsemän metrin korkeuteen tunnelin kattotasosta. Kalliota oli sortunut kaikkiaan yli 100 $m^3$. Pituusleikkaus sortuma-alueelta on kuvassa 3.19. (Tiainen & Kähönen 1996 ja Kandolin 1996)

### 3.3.6 Laboratoriotutkimukset

Sortumasta otetuille näytteille tehtiin useita laboratoriokokeita: paisuntapainekoe, röntgendifraktioanalyysi ja kiven hajoamiskoe.

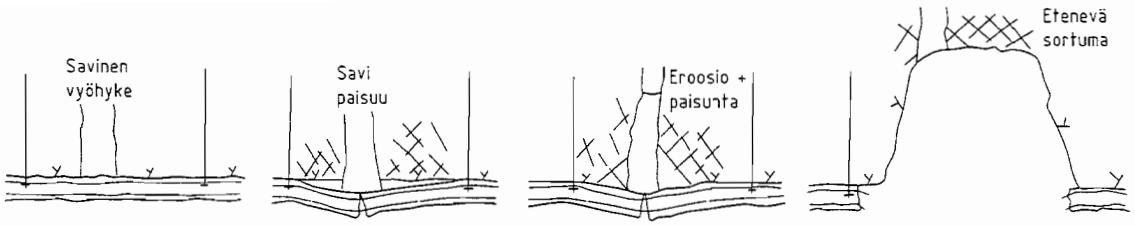
Paisuntapainekokeessa Na-smektiittiä sisältävälle savelle saatiin paisuntapaineeksi n. 550 kPa, joka kirjallisuuden (Broms & Heimer 1979) perustella luokitellaan korkeaaktiiviseksi. Röntgendifraktioanalyyseissa tutkittiin kolmea eri näytettä. Kaikista näytteistä löytyi pääkomponentteina paisuvahilaista smektiittiä ja hienorakeista kiillettä. Lisäksi näytteestä löydettiin vähäisempiä määriä kalsiittia, amfibolia, kaoliniittia ja kloriittia. Kiven hajoamiskokeessa kuivattujen kivien annettiin maata vedessä viisi kuukautta. Kokeen aikana kivet osittain hajosivat ja hienoaineksen osuus näytteissä nousi kokeen aikana nollasta noin neljännekseen. (Tiainen & Kähönen 1996)

Sortumasta otettuja kivinäytteitä tutkittiin korjauksen jälkeen Geologian tutkimuskeskuksessa. Tällöin sortuman kivilajiksi todettiin lamprofyyri. Tutkimustulokset on esitetty julkaisussa (Suominen 1997)

### 3.3.7 Sortuman syyt

Sortuman kohdalla ollut ruhjevyöhyke sisältää runsaasti savista materiaalia. Tämä savi sisältää pääkomponenttina paisuvahilaisia savimineraaleja, kuten erittäin agressiivista natrium-smektiittiä.

Poistotunnelin käyttöönoton jälkeen on tunnelissa virrannut paineellinen vesi pikkuhiljaa tunkeutunut rakojen kautta paisuvia savia sisältäneeseen ruhjevyöhykkeeseen. Siellä vesi reagoi paisuvien savien kanssa ja paine savessa kasvoi hitaasti. Lopulta kohonnut paine ylitti ruiskubetonin kantokyvyn ja ruiskubetoni murtui. Tämän jälkeen vettä pääsi yhä enemmän ruhjevyöhykkeeseen, ja sortuma kiihtyi eroosion ja saven paisumispaineen vaikutuksesta. Sortumaprosessi ensimmäisistä halkeamista ruiskubetonissa tunnelin täydelliseen tukkeutumiseen on ilmeisesti kestänyt vuosia. Kuvassa 3.21 on esitetty vastaavanlaisen sortuman kehittyminen eräässä norjalaisessa tunnelikohteessa.




Kuva 3.21. Paisuvan saven aiheuttaman sortuman kehittyminen (Heiner & Stille 1990)

### 3.3.8 Tunnelin tarkastus ja yleiskunto

Samalla kun sortumaa korjattiin, jatkettiin tunnelin tyhjennystä vedestä Munkkisaaresta. Kun vedenpinta oli Munkkisaaressa vielä kolmen metrin korkeudessa, tehtiin tunnelin mannerosan kuntotarkastus. Ensimmäiset 500 metriä Munkkisaaresta päin jouduttiin kulkemaan veneellä ja loput 4,7 kilometriä Kyläsaareen kuljettiin jalan. Annalan ajotunnelista pohjoiseen olevaa noin 1,2 kilometriä pitkää osuutta ei tarkastettu, koska Annalan ajotunnelin pohjoispuolelle oli rakennettu liejunpumppausta varten väliaikainen liejunsäilytysallas. Tarkastetulla noin 7,5 kilometriä pitkällä osuudella ei löydetty muutamia yksittäisiä kiviä lukuunottamatta mitään erityistä. Tunneli olikin tarkastetulla osuudella hyvässä kunnossa sortuma-aluetta lukuunottamatta.

## 3.4 Bolmen-tunnelin sortuma 1995

Bolmen-tunnelin sortuman tarkastelu perustuu tunnelin omistavan Sydvatten AB:n teettämän sortumaa ja sen korjausta käsittelevään loppuraporttiin (Stanfors et al. 1996). Lisäksi tietoja sortumasta on saatu sekä tunnelin että sen korjauksen suunnitteluun osallistuneelta Mats Alestamilta (1999).

### 3.4.1 Sortuman havaitseminen

Rinsjö-vesiverkon valvontahuoneessa havaittiin 14.6.1995 vedentulon Bolmen-tunnelista loppuneen. Skeenin vedenottamolla venttiilit suljettiin, ja vedentulon loppumisen syytä ruvettiin selvittämään. Lopulta paikallistettiin tukos Åsan ajotunnelista etelään, noin 30 km tunnelin alusta etelään. Välittömästi tämän jälkeen tunnelin omistaja Sydvatten AB päätti aloittaa tunnelin tyhjennyspumppauksen ilman suurempia lisätutkimuksia.

### 3.4.2 Tunnelin tyhjennys vedestä

Åsan ajotunnelialueelle perustettiin pumppausasema. Pumppuasema sähköistettiin, ja tyhjennysputkina käytettiin kahta 8'' putkea. Pumppaus aloitettiin 15.8.1995 yhdellä pumppausvaunulla ja kahdella 90 kW vesipumpulla. Ahtaista tiloista johtuen ei voitu käyttää kahta pumppausvaunua.

Tunnelin tyhjentämisen nopeuttamiseksi aloitettiin pumppaus 1.9.1995 myös Balkön ajotunnelista, joka sijaitsee noin 21 kilometriä Åsasta pohjoiseen. Balkössä oli yksi 90 kW vesipumppu.

Vedenpinta oli 13.9.1995 laskenut niin alas, että Åsaan voitiin sijoittaa toinenkin pumppausvaunu. 28.9.1995 tunnelin pohjoisosa saatiin kokonaan tyhjennettyä vedestä, ja varsinaiset korjaustoimet voitiin aloittaa.

### 3.4.3 Sortuma-alueen geologia

Kivilajina sortuma-alueella, eli paaluvälillä 30 320 – 30 620, on hienorakeinen gneissi. Sen väri vaihtelee harmaasta punaiseen. Itse kivi on suurimmaksi osaksi tervettä lukuunottamatta sortumakohdilla olevia rapautumisvyöhykkeitä. Raoissa on kalsiittia ja savea. Osassa rakopinnoista on havaittavissa hematiittiutumista eli rakopinnat ovat ruosteisia.

Sortuma-alue sijaitsee lähellä Lagan-laaksoa. Lagan-laakso, joka sijaitsee paaluvälillä 28 500 – 29 500, on suurimpia ruhjealueita koko tunnelin matkalla. Ruhjealueella on yhteensä noin 300 metrin matkalla useita ruhjevyöhykkeitä, joissa kivi on rapautunutta gneissiä sekä graniittigneissiä. Noin N 25° E rakosuunta on vallitseva, ja kallio on usein breksioitunutta. Alueella on havaittavissa ainakin kolmena eri aikakautena syntyneitä rakoja, mikä kertoo toistuvasta tektonisesta toiminnasta Lagan-laaksossa miljoonien vuosien aikana. Monissa ruhjevyöhykkeissä on tapahtunut voimakasta mineralogista muuttumista, jonka tuloksena on syntynyt runsaasti savimineraaleja.

### 3.4.4 Sortumien alkuperäinen lujitus

Kaikki sortumakohdat oli tunnelin rakennusvaiheessa lujitettu ruiskubetonilla ja pultituksella. Pääsortuman kohdalla oli jopa käytetty jonkin verran verkotusta ruiskubetonoinnin alla, koska jo rakennusvaiheessa oli huomattu sillä kohdin paisuvia savia. Alueella oli ollut tunnelin rakentamisen aikoihin kuivat olosuhteet, eikä injektointia siten oltu käytetty.

### 3.4.5 Sortumien kuvaus

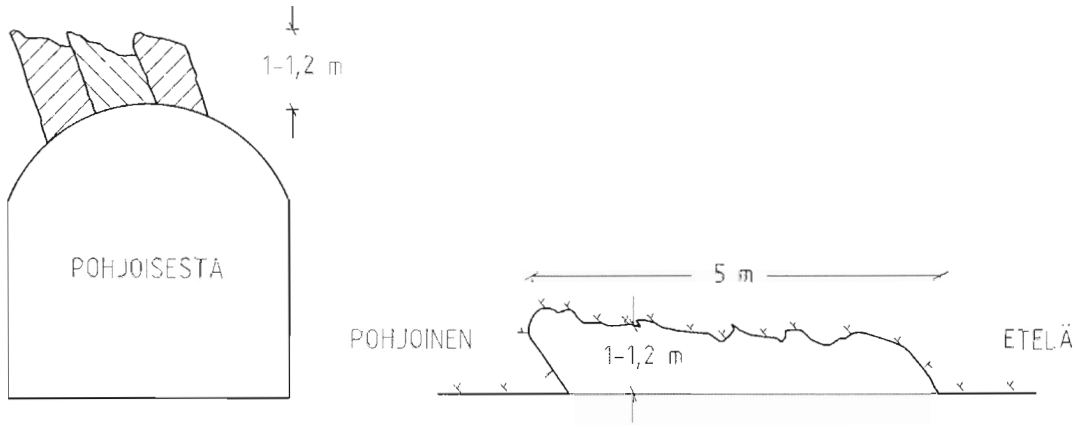
Sortumien todellinen luonne paljastui vasta tyhjennyspumppauksen jälkeisissä tarkastuskäynneissä. 300 metrin matkalla paaluvälillä 30 320 – 30 620 oli yhteensä kolme sortumaa, joista kaksi (sortumat 1 ja 2) olivat vähäisempiä ja kolmas (pääsortuma) oli tukkinut tunnelin kokonaan.

Tunnelin rakentamisen aikana tällä alueella kallion laatu oli kohtalaisen hyvä. Savitäytteisiä rakoja oli ainoastaan pieniä määriä. 10-vuotisen käytön aikana alueen kallioperä on kuitenkin rapautunut runsaasti koko alueella ja raoissa on paljon savitäytettä. Alueet, joissa oli käytetty ruiskubetonia, olivat enimmäkseen kestäneet hyvin.

Sortuma 1 sijaitsi paaluvälillä 30 343 – 30 348. Alueella oli katosta sortunut noin 5 $m^2$:n alueelta yhteensä 4 $m^3$ kiveä. Sortumasta otetut valokuvat ovat kuvissa 3.22 sekä 3.23 ja kaavakuva sortumasta kuvassa 3.24.

Kuva 3.22. Bolmen-tunnelin sortuman 1 katto

Kuva 3.23. Sortuneet kalliomassat Bolmen-tunnelin sortumassa 1

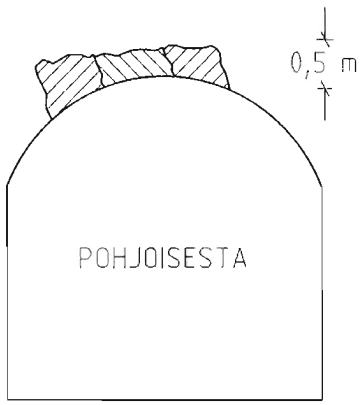



Kuva 3.24. Kaaviokuva Bolmen-tunnelin sortumasta 1

Sortuma 2 sijaitsi paaluvälillä 30 536 – 30 543. Tällä kohdin katosta on sortunut noin 3 $m^3$ kiveä. Valokuvat sortumasta on esitetty kuvissa 3.25 sekä 3.26 ja kaaviokuva kuvassa 3.27.

Kuva 3.25. Bolmen-tunnelin sortuman 2 katto

Kuva 3.26. Sortuneet kalliomassat Bolmen-tunnelin sortumassa 2



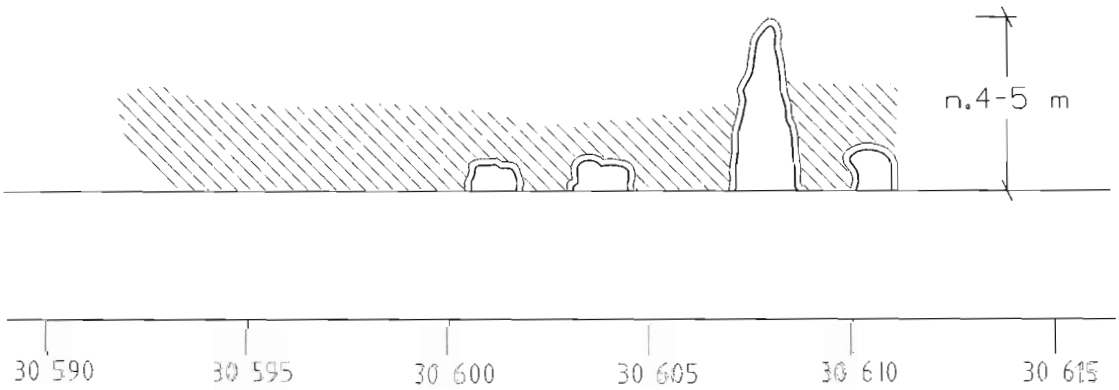

Kuva 3.27. Kaaviokuva Bolmen-tunnelin sortumasta 2

Pääsortuma sijaitsi välillä 30 593 – 30 611. Tunneli oli täyttynyt sortuneella kivellä 18 metrin matkalla. Tukos pysäytti veden virtauksen kokonaan. Sortuma oli kehittynyt pitkin kolme metriä leveää ruhjevyöhykettä, jossa savisen osan leveys oli noin metrin luokkaa. Ruhje leikkaa tunnelin hyvin loivasti länsiseinästä itäseinään noin 20 metrin matkalla.

Sortumassa oli neljä erillistä ”kirkkoa”, joista kolme oli noin metrin korkuisia ja neljäs noin 4-5 metrin korkuinen (kuva 3.29). Sortuman pohjoispuolella PL 30 591 noin 1 $m^3$

savea on kasautunut tunnelin pohjalle (kuva 3.28). Savi on peräisin seinässä olevasta 300 mm leveästä saviraosta.

Kuva 3.28. Bolmen-tunnelin pääsortuma. Etualalla seinästä pudonnutta savea.




Kuva 3.29. Kaaviokuva Bolmen-tunnelin pääsortumasta

### 3.4.6 Sortumien syy

Pääasiallinen kaikkien kolmen sortuman syntymiseen oli paisuvahilainen savi epäedullisissa rakosuunnissa. Kun tunneli täytettiin vedellä, alkoi hidas paisuntaprosessi. Paisunta on edennyt pitkin rakoja ja lopulta paine on rikkonut ruiskubetonoinnin. Tämän jälkeen veden kuluttava vaikutus on kiihdyttänyt sortuman syntyä.

Paisuvalle savelle tehtiin useita laboratoriokokeita. Kokeissa saven paisuntapaineeksi saatiin 160 kPa ja 240 kPa. Röntgendifraktiokokeissa smektiitin määräksi saatiin noin 30-50 % ja kaoliinia oli 10-20 %. Savinäytteen karkeampi aines koostui kvartsista, maasälvistä ja kiilteistä.

### 3.4.7 Tunnelin tarkastus ja yleiskunto

Korjausten aikana koko tunnelin pohjoinen osa (0-45 km) tarkastettiin. Tarkastus tehtiin pääosin silmämääräisesti kävelemällä tyhjennetyssä tunnelissa. Tunnelin eteläosa 45-80 km oli tarkastettu jo koekäyttövaiheessa tapahtuneen sortuman korjauksen yhteydessä. Jotta tarkistus voitiin tehdä, jouduttiin vettä pumppaamaan pelkästään tarkastuksen vuoksi. Tarkastukset nähtiin tarpeellisiksi tehdä, koska dokumentoiduista geologisista tiedoista selvisi, että muuallakin tunnelissa oli vastaavia geologisia olosuhteita kuin sortumapaikoilla. Lisäksi haluttiin tutkia vahvasti lujitettuja alueita, jotta voitaisiin arvioida, miten tällaiset kohdat käyttäytyvät ajan kuluessa ja käyttää näitä analogioina muissa tunnelin kohdissa.

Tutkimuksissa havaittiin kivien putoamistiheyden olevan noin yksi kivi per kaksi tunnelikilometriä. Pieniä toimenpiteitä vaativia kohteita tarkastetulta matkalta löytyi yhteensä 20 kappaletta. Kokonaisarvio tunnelin kunnosta 10 käyttövuoden jälkeen oli, että tunneli oli säilynyt hyvässä kunnossa.

## 3.5 Bolmen-tunnelin sortuma 1986

Bolmen tunnelissa vuonna 1986 tapahtuneesta sortumasta on varsin vähän kirjallista aineistoa. Sortuman käsittely perustuu Ruotsin louhintapäivillä (Mared 1988) pidettyyn esitelmään ja korjauksen suunnitelleen henkilön haastatteluun (Alestam 1999).

### 3.5.1 Sortuman havaitseminen

Bolmen-tunnelin koekäyttövaiheessa havaittiin, että vesi nousee ylös yhdestä ajotunnelista. Syynä oli kalliosortuma, joka paikallistettiin tunnelin eteläosaan 60 ja 65 kilometrin välille. Välittömästi sortuman paikallistamisen jälkeen aloitettiin tunnelin tyhjennyspumppaukset.

### 3.5.2 Sortuma-alueen geologia

Sortumia oli yhteensä 10 kappaletta, joista muutama tukki koko tunnelin ja loput olivat pienempiä. Sortumat sijaitsivat 3,5 kilometrin matkalla. Kaksi suurinta sortumaa oli sattunut diabaasijuonien ja gneissin kontaktivyöhykkeessä, missä kiviaines oli hyvin rapautunutta. Tunnelin rakentamisen aikana tehdyssä geologisessa kartoituksessa diabaasijuonet oli havaittu noin 4-8 metriä leveiksi.

### 3.5.3 Sortumien kuvaus

Kaikissa sortumakohdissa kallio oli lujitettu ruiskubetonilla. Isoimmissa sortumissa sortumamassat olivat hienorakeista materiaalia, jossa oli seassa suurehkoja lohkareita. Hienoaines oli hyvin savipitoista.

### 3.5.4 Sortuman syy

Tehtyjen laboratoriokokeiden perusteella voidaan sanoa, että Bolmen-tunnelin jokaisen sortuman pääasiallinen aiheuttaja oli paisuva savi. Tunnelia rakennettaessa alue oli hyvin kuivaa, eikä savi päässyt kosketuksiin veden kanssa, näin saven paisuntaominaisuuksia ei havaittu. Tunnelin täytyttyä vedellä pääsi vesi rakojen kautta kosketuksiin saven kanssa, jolloin paisunta alkoi. Vähitellen paine mursi lujituksena olleen ruiskubetonin ja sortuman kehittyminen nopeutui. Tunneli ehti olla veden täyttämä noin neljä vuotta ennen sortumien havaitsemista.

### 3.5.5 Tunnelin tarkastus ja yleiskunto

Koko tunnelin eteläosa 38-80 km tarkistettiin sortuman korjauksen yhteydessä. Suurin osa siitä tarkastettiin silmämääräisesti kävelemällä tyhjennetyssä tunnelissa. Eräällä osuudella tunnelia ei kuitenkaan uskallettu tyhjentää. Tämä johtui siitä, että tunneli kulki syvällä ruhjevyöhykkeen alla, jossa se oli lujitettu kauttaaltaan paksulla betonilla 600 metrin pituudelta. Tällöin pelättiin, että tyhjennettäessä lujituksen päälle jäävä vedenpaine ei pääsisi purkautumaan ja tämä aiheuttaisi alueella sortumia. Osuus, jota ei tyhjennetty, tarkistettiin kauko-ohjatulla robotilla noin viiden kilometrin matkalla. Robotilla kuvattiin tavallista videokuvaa sekä tehtiin kaikuluotausta. Tarkastuksissa ei havaittu uusia laajoja sortumia.

# 4 SORTUMIEN KORJAUS

## 4.1 Päijänne-tunnelin Hämeenkosken sortuman korjaus

### 4.1.1 Korjauksen suunnittelu

Tukoksen syyn varmistuttua kalliosortumaksi aloitettiin ripeästi tunnelin korjauksen suunnittelu. Aluksi selvitettiin eri korjausvaihtoehtoja, joista kokonaisedullisin tultaisiin valitsemaan.

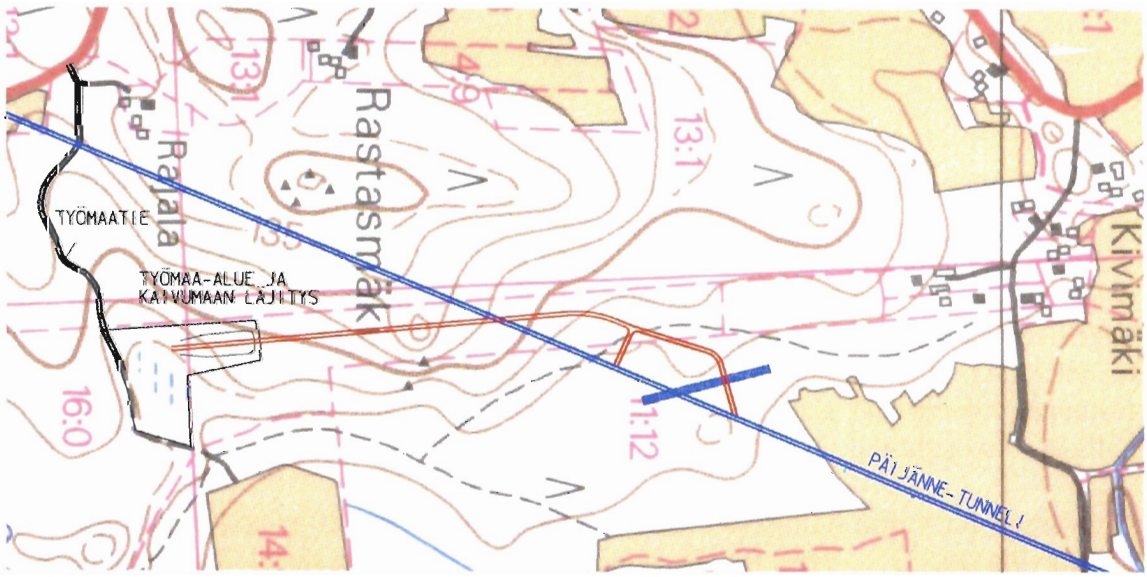
Sortuman korjauksen suunnittelun lähtökohtana oli mahdollisimman lyhyt keskeytys vedenjakelussa Päijänteestä pääkaupunkiseudulle ja korjauksen turvallinen toteutus. Korjausvaihtoehtoja luotaessa käytettiin hyväksi ulkomaisista kohteista saatuja kokemuksia sekä selvitettiin erilaisia rohkeitakin korjausvaihtoehtoja. Taulukossa 4.1 on lyhyesti esitetty eri korjausvaihtoehdot hyvine ja huonoine puolineen (muokattu Maa ja Vesi Oy:n muistioista). Kriittisiä kohtia korjauksen suunnittelussa olivat pumpattavan veden määrä, koska pumppaus on kallista, sekä vedenjakelukatkoksen pituus, joka vaikuttaa veden tuotantokustannuksiin ja yleiseen mielipiteeseen. Vedenjakelussa ei periaatteessa ole suuria ongelmia, koska Helsinkiin saadaan varajärjestelmänä korvaava vesi Vantaanjoesta ja pohjoisille osakaskunnille on mahdollista toimittaa vettä Päijännetunnelia pitkin Silvolasta "väärään suuntaan", jos tunnelista tulevat vuotovedet eivät riittäisi.

Sortuma sijaitsi juuri ajokuilujen puolessavälissä ja näin ajokuilujen suuaukoilta on noin kolme kilometriä sortumapaikalle. Tunnelissa suoritetuissa tutkimuksissa havaittiin varsinkin Teuronjoen tunneliosuudella pudonneita lohkareita. Jos korjaustyöt olisi tehty ajokuilujen kautta, olisi nämä kohteet pitänyt lujittaa ennen kuin varsinaisen pääsortuman korjausta olisi päästy tekemään.

Suunnittelussa mukana olleista vaihtoehdoista valittiin urakkatarjousten perusteella edullisimpana ja riskittömimpänä ohitustunnelivaihtoehto. Lisäksi valintaan vaikutti merkittävästi lyhyempi vedenjakelukatkos ohitustunnelivaihtoehdossa. Kuvassa 4.1 on esitetty ohitustunneliratkaisun lay-out.

Taulukko 4.1. Hämeenkosken sortuman korjausvaihtoehdot

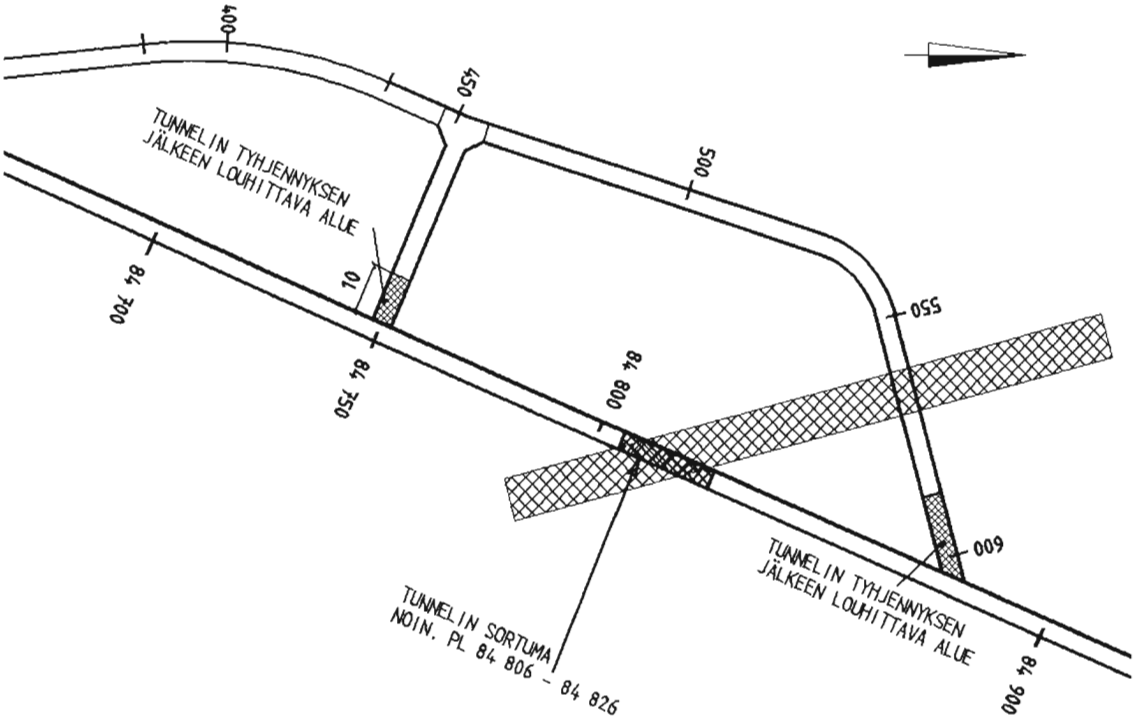
| Vaihtoehto | Pumppausmäärä [$m^3$] | Vedenjakelukatkos | Edut | Haitat |
|---|---|---|---|---|
| Korjaus Teuronjoen ajokuilun kautta | 250 000 | koko korjauksen ajan | + Työnaikaisten vesien hallinta | - Pitkä katkos vedenjakelussa<br>- Pohjaveden hallinta (kaivojen kuivumisriski)<br>- Korjaus yhdestä suunnasta<br>- Työturvallisuus |
| Korjaus sekä Teuronjoen että Ali-Tirisevän ajokuilujen kautta | 267 000 | koko korjauksen ajan | + Korjaus kahdesta suunnasta<br>+ Lyhempi kesto verrattuna vaihtoehtoon A | - Pitkä katkos vedenjakelussa<br>- Pohjaveden hallinta<br>- Työturvallisuus |
| Ohitustunneli | 30 000 | lyhyt katkos liitostyön ajaksi | + Vedenjakelun katkos lyhyt<br>+ Muutokset pohjavesitilanteessa lyhytaikaisia<br>+ Työturvallisuus | - Louhintatärinät sortuman kannalta<br>(- Pohjaveden hallinta) |
| Sortuman läpäisy putkilla | 267 000 | koko korjauksen ajan | + Työturvallisuus | - Pitkä katkos vedenjakelussa<br>- Toteutus vaikeaa/mahdotonta<br>- Pohjaveden hallinta |
| Työkuilun louhinta ja sukeltajatyö | mahdollisesti 0 | mahdollisesti ei ollenkaan | + Ei välttämättä vedenjakelukatkosta | - Työturvallisuus<br>- Arvaamattomat riskit<br>- Toteuttamiskelpoisuus |
| Kuilujen porausratkaisut | 267 000 | koko korjauksen ajan | + Työturvallisuus | - Pitkä katkos vedenjakelussa<br>- Teknisesti hankala toteuttaa |




Kuva 4.1. Ohitustunnelin lay-out (muokattu Maa ja Vesi Oy:n materiaalista)

### 4.1.2 Korjauksen toteutus

Tunnelin korjaus aloitettiin heinäkuun 1998 lopussa raivauksella ja työmaan perustamisella. Varsinaisiin louhintatöihin päästiin elokuun puolessavälissä, kun aloitettiin ajotunnelin suuaukon avolouhintatyöt. Ajotunnelin louhinta päästiin aloittamaan syyskuun alussa. Marraskuuhun mennessä ajotunnelin louhinta oli saatu valmiiksi ja siirryttiin varsinaisen ohituksen louhintaan. Ohitustunnelin louhinta, lukuunottamatta liitoksiin jätettyjä kalliotulppia (kuva 4.2), saatiin valmiiksi tammikuun loppuun mennessä. Liitokseen jätetyt tulpat louhittiin pois helmikuun alussa kahden viikon vedenjakelukatkoksen aikana.




Kuva 4.2. Varsinaisen ohituksen osuus (muokattu Maa ja Vesi Oy:n materiaalista)

Tunnelin louhinnan edistyessä tehtiin samanaikaisesti lopullisia lujituksia. Ajotunnelin osuudella ei tarvinnut tehdä paljoakaan lujituksia, mutta ohitustunnelia jouduttiin vahvistamaan melkoisesti. Alkuperäisessä suunnitelmassa merkittäviä lujituksia oli tarkoitus tehdä ainoastaan kohtaan, jossa sortuman aiheuttanut heikkousvyöhyke leikkaa ohitustunnelin (kuva 4.2). Kallion laatu oli kuitenkin huono lähes koko ohitustunnelin matkalla ja vahvoja lujituksia jouduttiin käyttämään oletettua enemmän.

Ohitustunnelin suurin lujitustyö tehtiin lujittamalla pääruhje 20 metriä pitkällä teräsbetoniholvilla (PL 555 – 575). Rakenne on mitoitettu kestämään mahdollisten jatkossa tapahtuvien tyhjennysten synnyttämä ulkopuolinen vesipaine. Ennen ruhjeen läpäisyä ohitustunnelissa tunnelin kattoon asennettiin 12 metrisiä Titan-Ischebeck –pultteja kah-

teen riviin yhteensä 16 kappaletta. Pääruhje oli saviselta osuudeltaan noin 2 metriä leveä, mutta sen ympäristössäkin kivi oli erittäin huonolaatuista (kuva 4.3). Teräsbetoniholvin paksuus seinissä ja katossa on 600 mm ja pohjalaatan paksuus on 600 mm (kuva 4.4 ja 4.5). Holvi ankkuroitiin tunnelin kattoon harjateräspultein (kuva 4.3 ja 4.4).

Lujitusmäärät koko ohitustunnelissa on esitetty taulukossa 4.2 ja kallion laatu taulukossa 4.3.

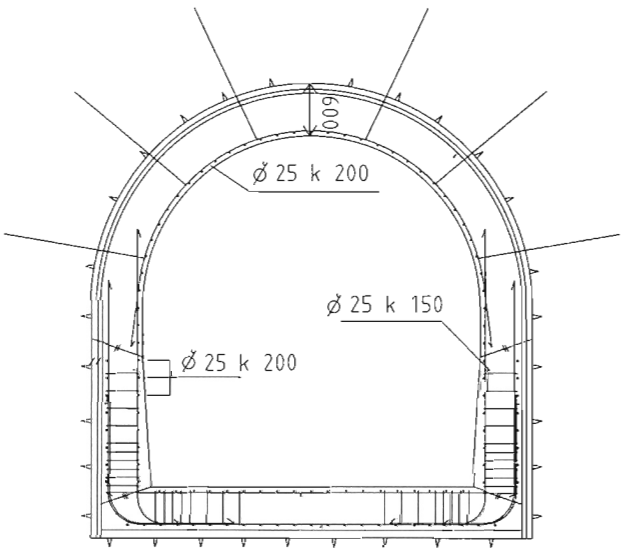
Taulukko 4.2. Ohitustunnelin lujitusmäärät

| | **Pultitus** | | | **Ruiskubetonointi** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Paaluväli | k/k väli [m] | Pulttim. / tunnelim. | Pulttia / tunnelim. | Paksuus [mm] | kuitu | Huom! |
| 116 - 125 | | | | 70 | | ositt. verkotettu |
| 288 - 302 | | | | 70 | | ositt. verkotettu |
| 375 - 385 | | | | 40 | | |
| 400 - 415 | | | | 40 | | |
| 415 - 435 | | | | 40 | | katto+vas. seinä |
| 435 - 442 | | | | 40 | | |
| 442 - 460 | | | | 70 | | |
| 460 - 505 | 1 | 31 | 12 | 250 | x | |
| 505 - 545 | 1,7 | 5 | 2 | 70 | | |
| 545 - 555 | 1,7 | 5 | 2 | 70 | x | |
| 555 - 575 | 1,2 | 22 | 6 | Teräsbetoniholvi | | |
| 575 - 581 | 1,2 | 10 | 3 | 70 | x | |
| 581 - 600 | 1,1 | 17 | 6 | 150 | x | |
| 600 - 605 | 1,2 | 16 | 6 | 100 | x | |
| Yhdystunneli | 1,7 | 5 | 2 | 70 | | |
| Keskimäärin koko ohitus-tunnelissa | | 4,3 | 1,5 | 44 % | | |

Taulukko 4.3. Ohitustunnelin kalliolaatu (luokituksen tehnyt Arto Wegelius)

| **Paaluväli** | **Q-luku** |
|---|---|
| 440 - 450 | 0,375 |
| 450 - 460 | 0,208 |
| 460 - 480 | 0,004 |
| 480 - 490 | 0,003 |
| 490 - 503 | 0,004 |
| 503 - 530 | 0,250 |
| 530 - 545 | 0,208 |
| 545 - 555 | 0,333 |
| 555 - 562 | 0,004 |
| 562 - 568 | 0,002 |
| 568 - 575 | 0,003 |
| 575 - 584 | 0,041 |
| 584 - 600 | 0,011 |
| Yhdystunneli | |
| 0 - 10 | 0,375 |
| 10 - 30 | 0,111 |
| 30 - 37 | 0,333 |

Kuva 4.3. Raudoituksen asentaminen pääruhjeen alueelle. Savinen osuus sijaitsee taustalla näkyvän ruiskubetonoinnin alla. (Kuva: Sirpa Räihä/HS)




Kuva 4.4. Teräsbetoniholvin poikkileikkaus (muokattu Maa ja Vesi Oy:n materiaalista)

Kuva 4.5. Teräsbetoniholvi valmiina

Sortuman korjauksen kiireisimmät hetket ajoittuivat helmikuun 1999 alkuun, jolloin Päijänne-tunnelissa oli 12 päivän mittainen vedenjakelukatkos. Sortumassa olleeseen tyhjään tilaan oli jo etukäteen porattu kolme täyttöreikää maanpinnalta. Rei'istä yksi ei osunut onkaloon vaan vesitunneliin onkalon pohjoispuolelle (kuva 3.7). Teuronjoen ajokuilulle oli rakennettu valmiiksi vesilinjat tyhjennyspumppausta varten. Kun vedentulo tunneliin suljettiin 1.2.1999 klo 7.00, alkoi tunnelin painovoimainen tyhjentyminen. Liitoskohtiin jätettyjen kalliotulppien poraus aloitettiin samana päivänä klo 12.00. Kun tulpat saatiin puhkaistua, kuormattiin sortuman eteen molemmille puolille noin 20 metriä louhetta estämään sortuman leviämisen. Louhekasan päädyt peitettiin 400 mm:n ruiskubetonikerroksella. Lopuksi sortuman onkalo täytettiin maanpinnalta betonilla. Tukilouhekasan ja kalliokaton väliin jäänyt vajaan metrin korkuinen tyhjä tila täytettiin betonilla onkaloon porattujen reikien kautta.

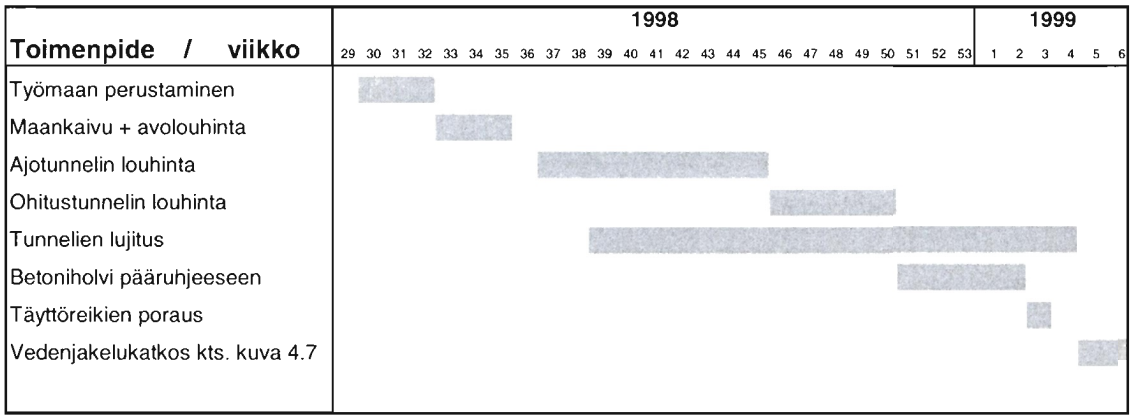
### 4.1.3 Korjauksessa käytetyt materiaalit ja määrät

- Ohitustunneli
  - Harjateräs-/ CT-pultit noin 1000 kpl
  - Titan-Ischebeck –pultteja 16 kpl
  - Betonia 295 $m^3$ teräsbetoniholviin
  - Ruiskubetonia noin 350 $m^3$ + hukka

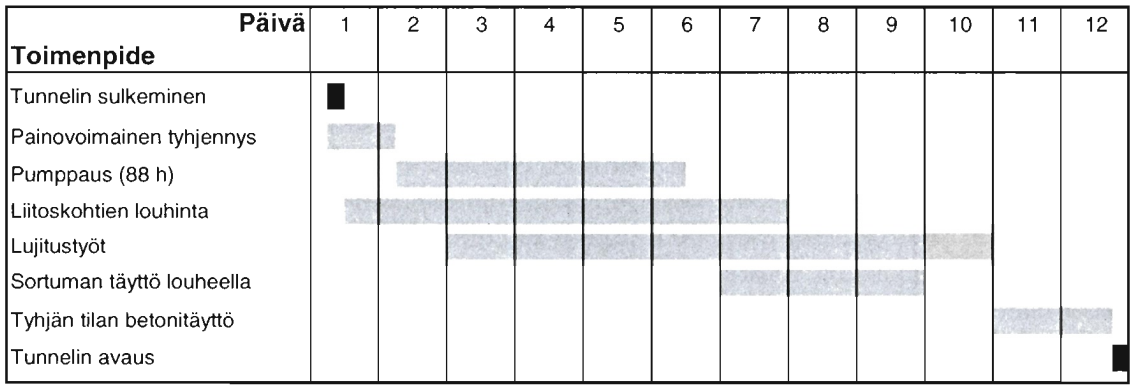
- Sortuman vahvistus
  - Louhe noin 700 $m^3$
  - Onkalon täyttöön betonia 185 $m^3$
  - Ruiskubetonia louhetäytön päihin noin 15 $m^3$

### 4.1.4 Aikataulu ja kustannukset

Korjaukseen kului aikaa yhteensä noin seitsemän kuukautta. Korjauksen yleisaikataulu on esitetty kuvassa 4.6 ja tarkempi aikataulu vedenjakelukatkoksen ajalta kuvassa 4.7.




Kuva 4.6. Korjauksen aikataulu




Kuva 4.7. Korjauksen aikataulu vedenjakelukatkoksen aikana

Korjauksen kustannukset on esitetty Pulkkilan sortuman korjauksen yhteydessä kappaleessa 4.2.3.

## 4.2 Päijänne-tunnelin Pulkkilan sortuman korjaus

### 4.2.1 Korjauksen suunnittelu ja toteutus

Pulkkilan sortuman korjaus suunniteltiin robottitutkimuksista sekä sortumakohdan yläpuolelta läpäisseestä kallionäytekairauksesta saadun tutkimustiedon perusteella. Korjaus tehtiin vaihtoehtosuunnitelmaa noudattavan urakoitsijan ratkaisun mukaisesti. Siinä sortuma tyhjennettiin ensin kiviaineksesta, jonka jälkeen tunneliin asennettiin peltinen muotti. Muotin ja kallion välinen alue täytettiin kuitubetonilla, ja lopuksi sortumaan jäänyt tyhjä tila täytettiin betonilla.

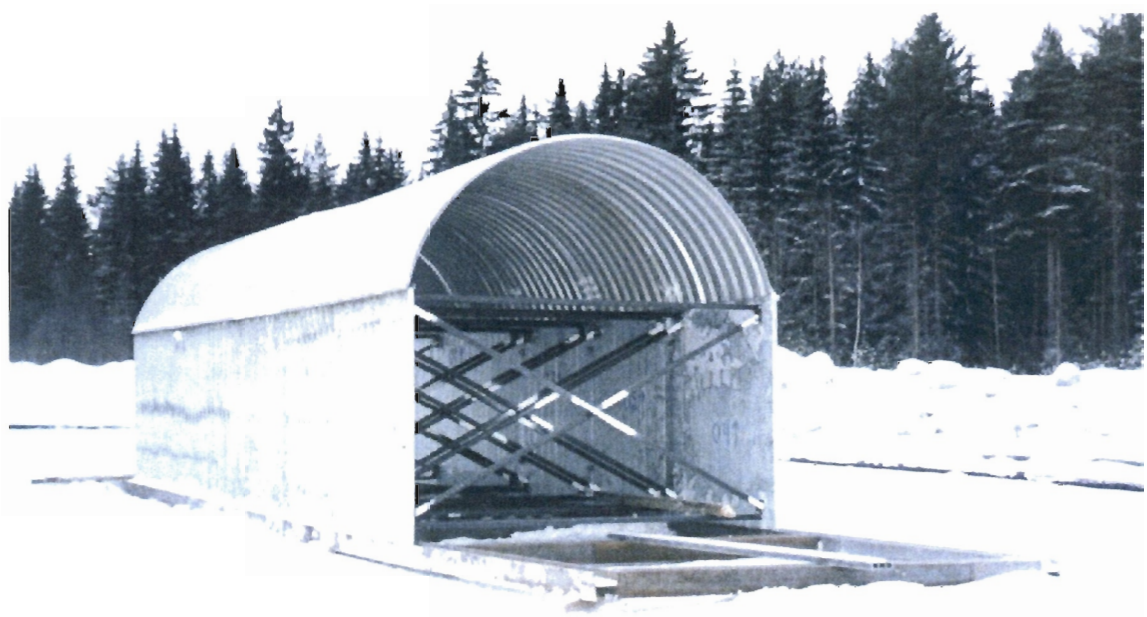
Sortuman korjauksen aikataulu oli erittäin kireä. Lisäksi työn aikana pakkasta oli pahimmillaan -32°C. Kaikista korjaustoimenpiteistä tyhjennyspumppauksineen piti suoriutua 11 päivässä. Urakoitsija aloitti työmaan perustamisen suunnitelmien mukaan jo hyvissä ajoin kiireen pienentämiseksi. Ensin rakennettiin Pulkkilan ajotunnelilta noin 430 metrin pituinen putkilinja läheiseen ojaan. Ojasta vesi virtasi edelleen takaisin Päijänteeseen. Tyhjennykseen varauduttiin myös rakentamalla lämmitysteltat avarrettujen ilmareikien päälle. Viisi ilmareikää oli tyhjennystä varten avarrettu 300 mm, jotta reiät eivät jäätyisi umpeen tyhjennystilanteessa. Lisäksi reikien avartamista vaati se, että 100 mm:n reiät olisivat aiheuttaneet alipaineen tunnelin tyhjennystilanteessa. Ilmareiät oli alunperin mitoitettu toimimaan tunnelin käytön aikana, mutta mitoituksessa ei oltu huomioitu ilmavirtauksen suuruutta tyhjennystilanteessa.

Veden syöttäminen Päijänne-tunneliin Asikkalan vedenottamosta lopetettiin 1.2.1999. Samanaikaisesti alkoi tunnelin painovoimainen tyhjentyminen. Painovoimaisen tyhjennyksen aikana ilmareikien päälle rakennetuissa lämpöteltoissa ilmaa lämmitettiin rakennuslämmittimin. Huolimatta ulkona olleesta pakkasesta ilmareikiin mennyt ilma saatiin pysymään miltei +20°C:ssa. Pulkkilan ajotunnelissa vedenpinta laski painovoimaisesti 13 tunnissa noin 17 metriä. Tämän jälkeen aloitettiin pumppaus, jossa noin 90 tunnissa pumpattiin neljällä sarjassa olevalla Bibo 6-pumpulla yhteensä noin 40 000 $m^3$ vettä. Sortumapaikan tultua näkyviin jouduttiin pumppausta jatkamaan pienillä pumpuilla tunneliin tulevien vuotovesien poistamiseksi. Vuotovesien määrä pieneni huomattavasti korjauksen loppua kohden ja oli viimeisinä päivinä urakoitsijan mittausten mukaan ainoastaan 30 l/min. Tästä määrästä noin 10 l/min tuli Orikorven suunnasta ja 20 l/min Päijänteen suunnasta. Vuotovesimäärät ovat siis Orikorven suunnasta 0,5 l/min/100m ja Päijänteen suunnasta 1,1 l/min/100m.

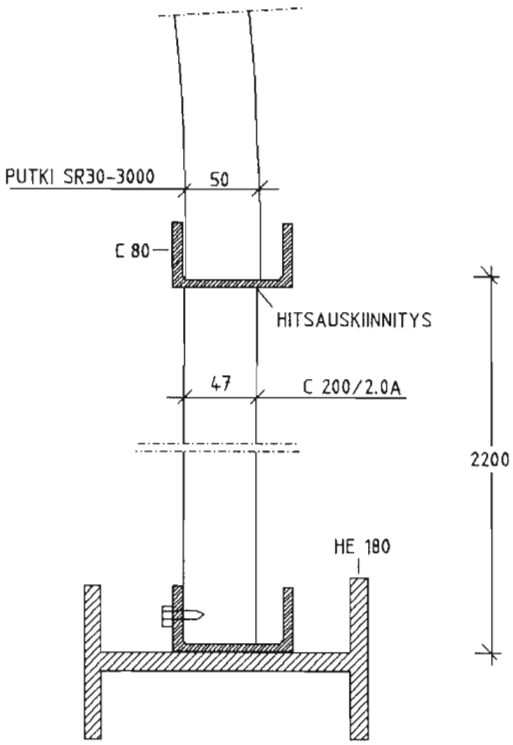
Tyhjennyspumppauksen loppuvaiheessa huomattiin, että sortumasta tippui tyhjennyksen aikana lisää kiviä ja pumppauksen loputtua sortunut kiviaines täytti jo ¾ tunnelin poikkileikkausalasta. Ensimmäinen toimenpide oli sortuneen kiviaineksen poistaminen. Se tehtiin Toro 500-lastauskoneella. Sortuneen kiviaineksen määrä oli odotettua suurempi, noin 140 $m^3$itd kauhatilavuuden mukaan laskettuna. Tämän lisäksi osa sortuneesta kivestä tasattiin tunnelin pohjalle. Tyhjennyksen jälkeen havaittiin lisäksi, että sortuma oli noin kaksi kertaa pidempi kuin käytössä olleiden robottikuvausten luotauksista oli päätelty.

Sortuman tyhjennyksen jälkeen tehtiin turvallisuuslujitus, jossa sortumaan ja sen eteläpuolelle ruiskutettiin noin 20 mm betonikerros ilman kuituja. Ruiskubetonoinnin jälkeen tunnelin pohjalle asennettiin kiskot, joiden päälle elementti asennetaan (kuva 4.8). Kun kiskot oli hitsattu yhteen, työnnettiin ne kurottajalla sortuman alle. Kiskot olivat yhteensä 18 metriä pitkät. Kiskojen yläpäässä, sortuman eteläpuolella, koottiin kerrallaan kahden metrin pituinen osa elementtiä, ja työnnettiin se sitten kiskoja pitkin sortuman alle. Näitä kahden metrin elementtejä oli yhteensä kuusi kappaletta, jolloin valmiin elementtimuotin kokonaispituus oli 12 metriä (kuva 4.9). Elementin rakennepiirros on kuvassa 4.10. Muottia ei ankkuroitu kallioon.

Kuva 4.8. Kiskojen asennus sortuman alle



Kuva 4.9. Elementtimuotti koottuna maanpinnalla (Kuva: Reino Pöyhönen)




Kuva 4.10. Elementtimuotin rakennepiirros

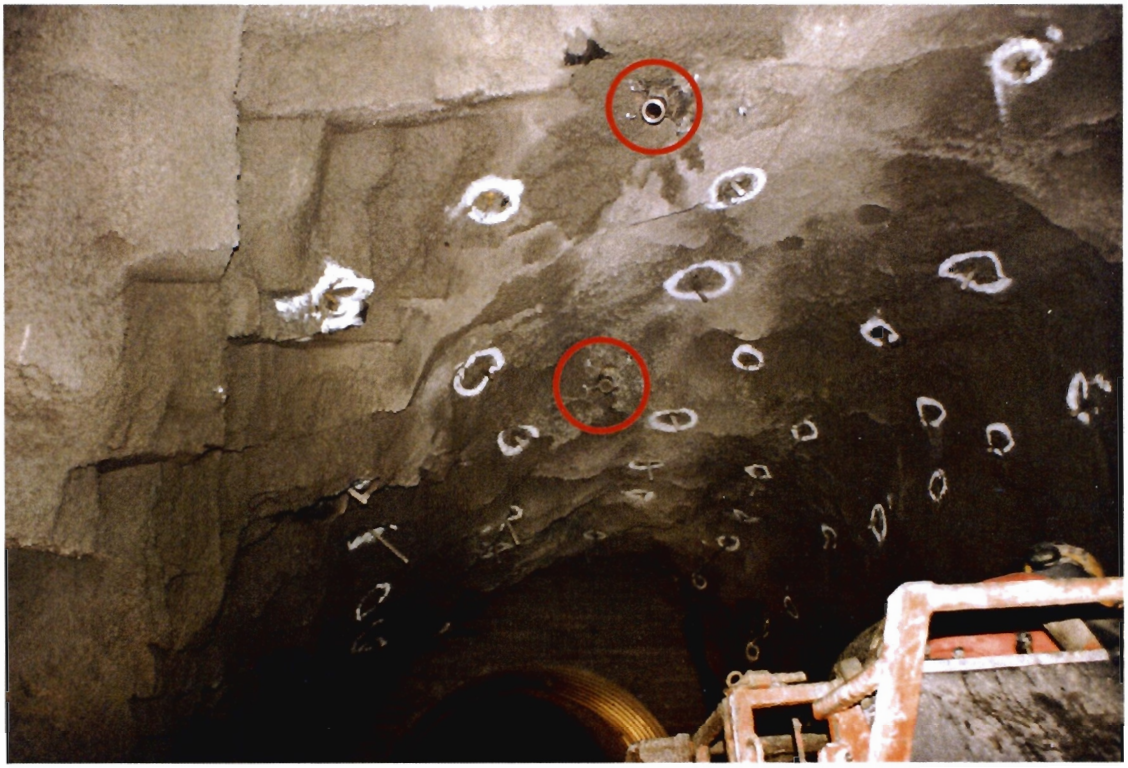
Robottitutkimusten kuva- ja luotausaineiston perusteella sortuman pituudeksi oli arvioitu noin 3,5 metriä. Todellisuudessa sortuman pituus oli lähempänä kahdeksaa metriä. Juoni, jota pitkin sortuma oli kehittynyt, leikkasi tunnelin yli 10 metrin matkalla. Niinpä elementeillä saatiin juuri ja juuri peitetyksi sortuma-alue. Muotin eteläpuolelle asennettiin 60 harjateräspulttia ennen sortuman yläosan täyttämistä tukemaan holvia (kuva 4.14).

Elementtimuotin kokoamisen jälkeen se tuettiin teräksillä ja puutuilla. Lisäksi muotin päädyt laudoitettiin betonivalua varten (kuva 4.11). Muotin ja kallion väli valettiin kuitubetonimassalla. Seinien valu tehtiin siten, että kerrallaan valettiin alle metrin korkuinen kerros, jonka jälkeen pidettiin muutaman tunnin mittainen tauko. Holvin valu aloitettiin välittömästi, kun seinille valettu betoni kantoi miehen (kuva 4.12). Kaiken kaikkiaan betonivaluun kului noin 35 tuntia. Betonin annettiin kovettua noin vuorokauden, jonka jälkeen muotin tuet ja laudoitukset purettiin (kuva 4.13). Tämän jälkeen tunnelin pohjalle valettiin pohjalaatta. Odoteltaessa holvin valun kovettumista pultitettiin sortuman eteläpuolinen osuus, koska sortunut juoni kääntyi sortuman eteläosassa tunnelin suuntaiseksi. Kattoon ja seinille juotetut harjateräspultit olivat 3000 mm pitkiä. Pulttiväli oli k/k 1,2 m. Kovettumisen jälkeen ryhdyttiin täyttämään sortumassa olevaa tyhjää tilaa alhaalta poratuista rei'istä (kuva 4.14). Betonointi tapahtui kahdesta ∅ 89 mm reiästä kolmannen ∅ 45 mm reiän toimiessa ilmareikänä. Tyhjään tilaan saatiin pumpattua noin 80 $m^3$ betonia, ja tila saatiin täyteen.

Kuva 4.11. Tuettu muotti ja päätylaudoituksen teko

Kuva 4.12. Holvin täyttö betonilla

Kuva 4.13. Betoniholvi valmiina



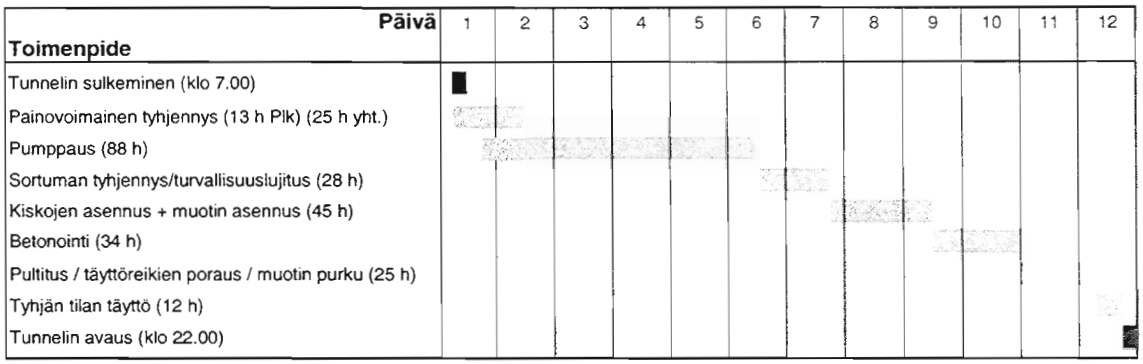
Kuva 4.14. Tyhjän tilan täyttöreiät

### 4.2.2 Korjauksessa käytetyt materiaalit ja määrät

- Turvallisuuslujitus
  - Ruiskubetoni 20 $m^3$
- Muotti
  - Kiskot: HE 180
  - Katto: Rumtec Oy, Putki SR30-3000, sinkitys
  - Seinät: Rannila C200/2.0A
- Muotin ympärystäyttö
  - Kuitubetoni 138 $m^3$
  - ME-kuituja 50 mm 30 $kg/m^3$
  - Betonissa ei kiihdyttimiä
  - Sementtinä pikasementti
  - Betonin notkeus 1-2 svB
  - Kiviaineksen koko 0-8 mm
- Tyhjän tilan täyttö
  - Betoni 78 $m^3$, ei kuituja, muuten saman laatuista kuin ympärystäytössä
- Muu lujitus
  - Harjateräspultteja ∅ 25 mm 60 kappaletta á 3 metriä

### 4.2.3 Aikataulu ja kustannukset

Pulkkilan sortuman varsinainen korjaus ilman alustavia töitä tehtiin 12 päivässä (24 tuntia päivässä). Korjaustöiden aikataulu on kuvassa 4.15.




Kuva 4.15. Pulkkilan sortuman korjauksen aikataulu

Sortumien korjauskustannukset on esitetty taulukossa 4.4. Korjauskustannuksissa ei ole otettu huomioon Pääkaupunkiseudun Vesi Oy:n omaa työtä. Ilmareikien suurennusurakka tehtiin tunnelin tyhjentämisen vuoksi, eikä näitä kuluja voida erikseen jyvittää sortumien korjaukseen. Myös koko tunnelin tutkiminen robottikameralla on kirjattu taulukkoon 4.4.

Taulukko 4.4. Sortumien korjauskustannukset (ilman alv%)

| **Hämeenkosken sortuman korjaus** | |
|---|---|
| Korjaustyöt | 8 598 000 mk |
| Suunnittelu- ja tutkimuskustannukset | 1 346 000 mk |
| | |
| **Pulkkilan sortuman korjaus** | |
| Korjaustyöt | 2 082 000 mk |
| Suunnittelu- ja tutkimuskustannukset | 200 000 mk |
| | |
| **Ilmareikien suurentaminen** | 712 000 mk |
| | |
| **Rakennuttaminen + valvonta** | 300 000 mk |
| | |
| **Koko tunnelin tarkastus robotilla** | 7 200 000 mk |

## 4.3 Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin sortuman korjaus

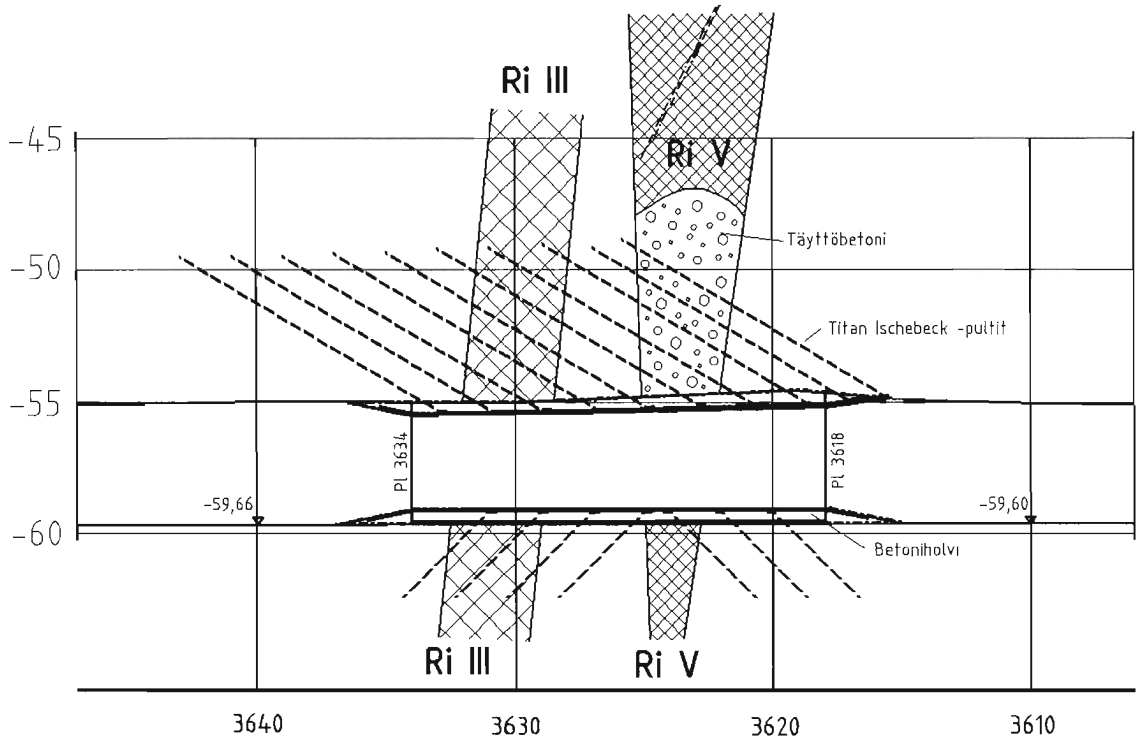
### 4.3.1 Korjauksen suunnittelu ja toteutus

Tunnelin korjauksen suunnittelu aloitettiin välittömästi tukoksen varmistuttua kallio-sortumaksi. Alussa suunnittelun pohjana oli kaksi vaihtoehtoa: sortuman läpäiseminen tai ohitustunnelin rakentaminen. Jatkosuunnittelun pohjaksi valittiin jo alkuvaiheessa sortuman läpäiseminen. Ohitustunnelivaihtoehto hylättiin, koska tunnelin louhiminen olisi hitaampaa kuin sortuman läpäiseminen ja kustannuksetkin olisivat olleet läpäisyvaihtoehtoa korkeammat.

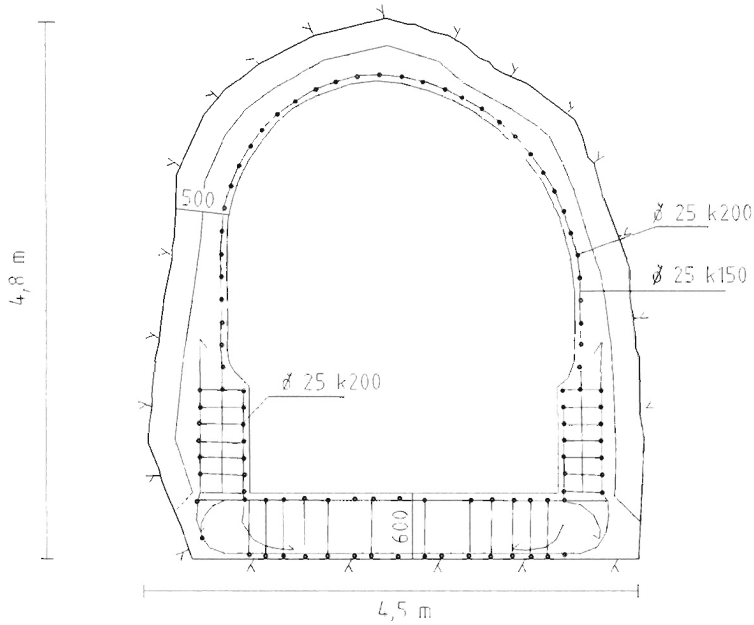
Korjaus aloitettiin mahdollisimman nopeasti, jotta tunneli saataisiin käyttökuntoon ennen jäitten lähtöä. Näin bakteeritoiminta Vanhankaupunginlahdessa ei pääsisi kukoistamaan, ja Vantaanjoen kevättulvat huuhtoisivat lahden puhtaaksi. (Tiainen & Kähönen 1996)

Korjaus aloitettiin poraamalla maan pinnalta kaksi reikää sortumasta aiheutuneeseen onkaloon. Tätä kautta tyhjään tilaan pumpattiin betonia 35 $m^3$. Lisäksi tunnelista tehdyistä täyttörei'istä pumpattiin 11 $m^3$ betonia tyhjään tilaan. Tämän jälkeen sortuman ympäristö injektoitiin tunnelista käsin. Injektointisementtiä kului kaikkiaan yli 100 tonnia. Seuraavaksi aloitettiin sortuman pultitus harjateräs- ja Titan-Ischebeck -pulteilla. Pultteja asennettiin kahden metrin välein riveihin, kuhunkin riviin 21 pulttia, pulttipituuden ollessa 12 metriä. Pulttirivejä asennettiin yhteensä 10 kappaletta (kuva 4.16) (Tiainen & Kähönen 1996). Rakennusvaiheessa pulttien määrää vähennettiin suunnitellusta varsinkin viimeisten pulttirivien osalta. Titan-Ischebeck –pultteja käytettiin 86 kpl, joista 53 kpl oli 12 metrin pituisia. Harjateräspultteja käytettiin 86 kpl, joista 38 kpl oli 12 metrin pituisia.

Ensimmäisten pulttirivien asennuksen jälkeen sortunutta kiviainesta kuormattiin pois ja samalla jatkettiin pulttirivien asennusta eteenpäin. Seuraavaksi sortuma-alueen seinät ja katto ruiskutettiin 300 mm:n ruiskubetonikerroksella. Ruiskubetonin pintaan asennettiin harjateräsverkko, joka tehtiin 25 mm:n harjateräksestä 150-200 mm:n "silmäkoolla" (kuva 4.17 ja 4.18). Pohjalaatan ja seinien alaosien kohdalle näitä raudoituskerroksia tehtiin kaksi, ja ne sidottiin toisiinsa hakasilla. Raudoitus peitettiin ruiskubetonikerroksella. Koko rakenteen paksuudeksi tuli vähintään 500 mm ja se on mitoitettu kestämään koko yläpuolella olevan noin 70 metriä paksun kallion massa (Tiainen & Kähönen 1996).




Kuva 4.16. Pituusleikkaus Viikin purkutunnelin korjauksesta



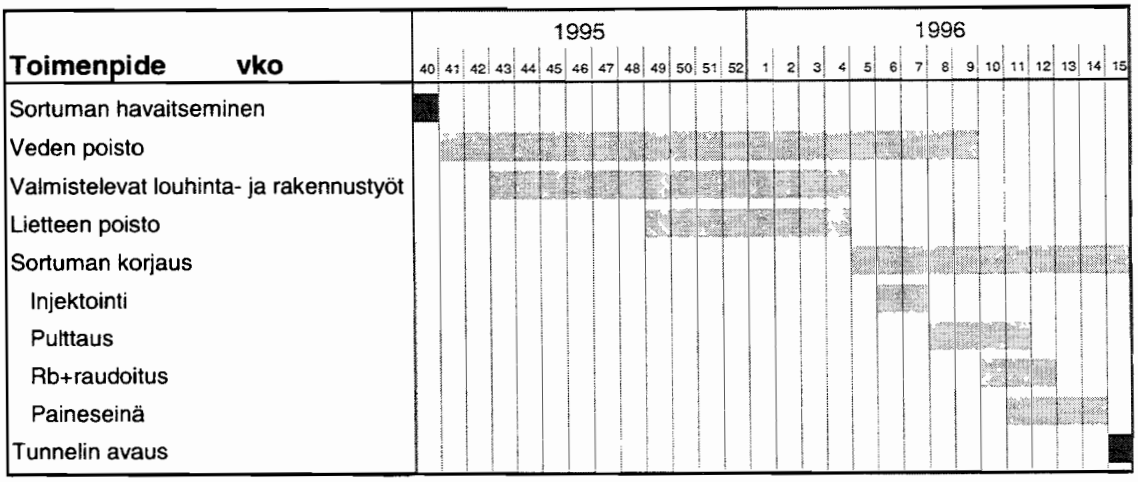

Kuva 4.17. Leikkaus sortuma-alueelle tehdystä teräsbetoniholvista (Tiainen & Kähönen 1996)

Kuva 4.18. Teräsbetoniholvin rakentaminen (Kuva: Raili Varmo)

Sortuma korjattiin käyttämällä hyväksi louhintatyönaikaista Annalan ajotunnelia, joka on noin 2,4 km sortumasta pohjoiseen. Annalan ajokuilua käytettiin, vaikka noin 400 metriä sortuman eteläpuolella on Kyläsaaren ajotunneli. Tämä johtui siitä, että kaikkiin ajotunneleihin oli tunnelin louhimisen jälkeen asennettu paksu teräsbetoninen paineseinä. Annalan ajotunnelista tämä paineseinä oli jouduttu jo aikaisemmin räjäyttämään lietteenpumppauksen takia, eikä haluttu turhaan rikkoa kahta paineseinää. Lisäksi Kyläsaaren ajotunnelia käytettäessä olisi lumenkaatoaltaan rakenteita jouduttu purkamaan. Korjaustyön päätyttyä rakennettiin Annalaan uusi paineseinä.

### 4.3.2 Aikataulu ja kustannukset

Sortuman korjauksen aikataulu ja korjauskustannukset on esitetty kuvassa 4.19 ja taulukossa 4.5.




Kuva 4.19. Viikin poistotunnelin sortuman korjauksen aikataulu

Taulukko 4.5. Viikin poistotunnelin sortuman korjauskustannukset

| | |
|---|---|
| Suunnittelu, rakennuttaminen | 904 840 mk |
| Kalliotutkimukset | 20 592 mk |
| Valmistelevat työt | 1 015 662 mk |
| Tunnelin tyhjennys vedestä | 2 327 949 mk |
| Tunnelin tyhjennys lietteestä | 2 600 808 mk |
| Verkkopiirin työt | 857 079 mk |
| Sortuman korjaus | 2 272 948 mk |
| Kalliorakennussuunnittelu | 233 205 mk |
| Korjauksen valvonta + ym. | 358 304 mk |
| Muut kustannukset | 189 877 mk |
| **YHTEENSÄ** | **10 781 264 mk** |

## 4.4 Bolmen-tunnelin 1995 sortuman korjaus

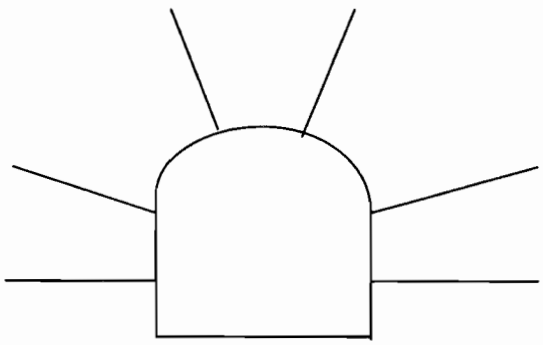
Bolmen-tunnelin vuonna 1995 tapahtuneen sortuman korjauksen käsittely perustuu Bolmen-tunnelin omistavan Sydvatten AB:n teettämään sortumaa ja sen korjausta käsittelevään loppuraportiin (Stanfors et al. 1996). Lisäksi tietoja sortuman korjauksesta on saatu sekä tunnelin että sen korjauksen suunnitteluun osallistuneelta Mats Alestamilta (1999).

### 4.4.1 Kalusto

Tunnelin pieni poikkipinta-ala (8 $m^2$) aiheutti korjaukselle ongelmia. Nykyinen standardikalusto ei mahtunut tunneliin, joten kalustona piti käyttää madallettuja koneita. Lastauskoneena toimi Toro 250D ja porausjumbona Atlas Copco Boomer H115. Tunnelin pienuuden lisäksi ongelmana oli pitkä matka ajotunnelilta sortumakohteeseen, noin 2,5 kilometriä. Pitkällä ajomatkallakaan ei ollut kuin muutamia kuprikoita 500 metrin välein. Esimerkiksi Torolla edestakainen matka ajotunnelille ja takaisin kesti 23 minuuttia.

### 4.4.2 Turvallisuuslujitus

Tarkastuskäynneillä havaittu runsasrakoinen osuus paaluvälillä 30 260 – 30 586 lujitettiin systemaattisesti ennen pääsortuman korjausta. Seinät pestiin ruiskubetonointia varten. Aluksi ruiskubetonoitiin heikko noin 300 metriä pitkä osuus 30 mm:n kuitubetonilla 20 metrin matkalla kerrallaan. Tämän jälkeen alue pultitettiin. Pultteina käytettiin 2,4 metriä pitkiä ∅ 25 mm juotettuja harjateräspultteja aluslevyillä. Kattoon ja molemmille seinille asennettiin kaksi pulttia eli kuusi pulttia yhteensä (kuva 4.20). Pituussuunnassa pulttiväli on noin kaksi metriä. Pultit asennettiin noin 15° etuviistoon tunnelin ahtaudesta johtuen. Varsinaisten sortumien korjausten jälkeen alue ruiskutettiin vielä kuiduttomalla betonilla noin 20 mm:n paksuisesti. Ruiskubetonin kokonaispaksuudeksi tuli näin 50 mm.

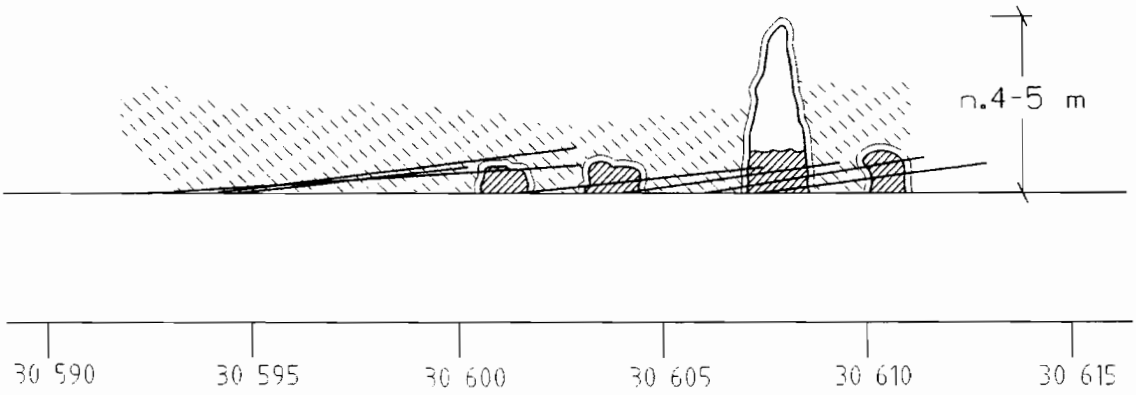


Kuva 4.20. Bolmen-tunnelin paaluvälin 30 260 – 30 586 turvallisuuslujituksen pultituskaavio

### 4.4.3 Pääsortuman korjaus

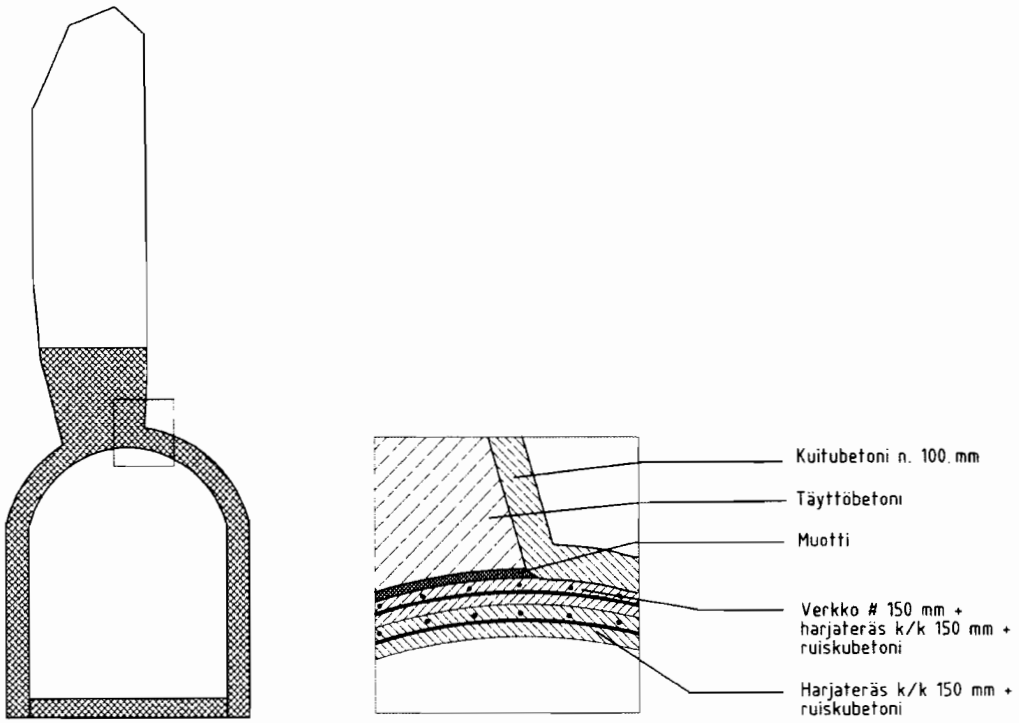
Pääsortuma paaluvälillä 30 593 – 30 611 oli varsinainen syy tunnelin korjaustoimenpiteiden aloittamiseen. Varsinainen sortuman korjaus aloitettiin veden poiston ja turvallisuuslujituksen jälkeen.

Aluksi sortuneiden massojen läpi porattiin vaakasuora reikä. Sillä haluttiin selvittää sortuman todellinen pituus ja varmistaa, että sortuman vastapuolella ei ole vettä. Sortuneiden massojen poiston yhteydessä sortuman katto esipultitettiin lisäsortumien estämiseksi (kuva 4.21). Pultteja asennettiin seitsemään eri riviin yhteensä 510 m (79 kpl.), pulttipituuden vaihdellessa 5,4 metristä 12,5 metriin. Pulteista 300 metriä oli vanhoja $1^1/_4$ poratankoja, 180 metriä Titan Ishebeck –pultteja ja 30 metriä tavallisia harjateräspultteja. Esipultituksen yhteydessä tehtiin tunnusteluporauksia. Porauksissa todettiin sortuman olevan arveltua pidempi ja että seinät olivat melko ehjää kalliota, mutta katto oli hyvin rikkonaista.




Kuva 4.21. Bolmen-tunnelin pääsortuma ja sen ennakkopultitus

Paaluväli 30 586 – 30 612 ruiskutettiin kuitubetonilla kiviaineksen tyhjennyksen ja pultituksen yhteydessä sekä osittain niiden jälkeen. Katossa ruiskubetonin paksuus oli 100 mm ja seinissä 50 mm. "Kirkkojen" kohdille asennettiin teoreettisen tunneliprofiilin muotoinen muotti, joka peitettiin ruiskubetonilla. Seuraavaksi ruiskubetonin päälle asennettiin # 150 mm ∅ 6 mm verkotus ja kattokaareen vielä ∅ 12 mm harjateräksistä raudoitus k/k 150 mm paaluvälille 30 586 – 30 612. Raudoitus peitettiin kuiduttomalla ruiskubetonilla ja sortuneet "kirkot" täytettiin suhteellisen löysällä (v/s 0,7) betonilla muottiin jätetyn putken kautta. Suurin "kirkko" täytettiin ensivaiheessa vain metrin paksuisella laatalla ja myöhemmin tyhjäksi jäänyt tila täytettiin kokonaan (kuva 4.22).




Kuva 4.22. Bolmen-tunnelin pääsortuman lujitus ja detalji

Kallio oli tunnelin katossa hyvin rapautunutta, eikä pulttien kantokykyyn voitu luottaa. Tämän takia ruiskubetonin päälle asennettiin uusi ∅ 10 mm harjateräksistä tehty k/k 150 mm raudoitus paaluvälille 30 590,5 – 30 616 (kuva 4.23). Tämäkin raudoitus peitettiin kuiduttomalla ruiskubetonilla, jolloin betonoinnin kokonaispaksuudeksi seinissä tuli 150 –200 mm ja katossa > 250 mm. Välille 30 606 – 30 612 valettiin lisäksi kuitubetoninen pohjalaatta. Lopuksi sortuma-alueen seinät pultitettiin ∅ 25 mm juotetuin harjateräspultein metrin ruutuun.

Kuva 4.23. Bolmen-tunnelin pääsortuman toisen raudoituskerroksen asennus ruiskubetonin päälle

### 4.4.4 Pikkusortumien korjaus

Ennen varsinaista pääsortuman korjausta korjattiin pääsortumasta noin 260 m ja 65 m pohjoiseen sijainneet pikkusortumat: sortuma 1 ja sortuma 2.

Paaluvälillä 30 344 – 30 348 sijainnut sortuma 1 korjattiin siten, että aluksi sortuneen ”kirkon” alue ruiskutettiin 200 mm paksulla ruiskubetonilla. Seuraavaksi verkotuksesta ja jänneteräksistä rakennettiin kaari tunnelin teoreettisen kattoprofiilin mukaisesti ja siihen ruiskutettiin 100 mm ruiskubetonikerros. Tämän jälkeen kaaren ja katon väliin jäänyt tyhjä tila täytettiin betonilla. Lopuksi tehty ”betonikakku” kiinnitettiin kattoon käyttäen juotettuja harjateräspultteja.

Paaluvälillä 30 538 – 30 542 sijainneessa sortumassa 2 käytettiin hieman kevyempää lujitusta. Sortunut katto ruiskutettiin 200 mm paksulla kuitubetonilla ja viimeisteltiin juotetuin harjateräspultein.

### 4.4.5 Muut korjaukset

Varsinaisten sortumien lisäksi tarkastuskäynneissä havaittiin 20 kohtaa, jotka vaativat pieniä huoltotoimenpiteitä. Kohteita korjattiin sitä mukaan, kun tarkastuksissa niitä havaittiin. Jokaiseen kohtaan käytettiin ruiskubetonointia yksi Toron kauhallinen eli 1,4 $m^3$. Lisäksi muutamissa kohteissa ruiskubetonin rakoja peitettiin käsin jäykällä sementtilaastilla. Muuta lujitusta ei käytetty.

### 4.4.6 Korjauksissa käytetyt materiaalit ja määrät

Ruiskubetonin kokonaiskulutus oli noin 400 $m^3$, joka Torolla kuljetettuna oli noin 260 kuljetuskertaa (á 23 min.). Ruiskubetonin koostumus oli sementtiä 25 % ja soraa 75 %. Teräskuidun annostelu oli n. 100 kg kuitua / 1,4 $m^3$ betonia. Yhteensä kuitua käytettiin noin 7500 kg. Vettä vuotavissa kohdissa käytettiin betonin lisäaineena kiihdytintä (Sika) noin 2-6 % vesimäärästä. Kiihdyttimen kokonaiskulutus oli noin 1000 kg.

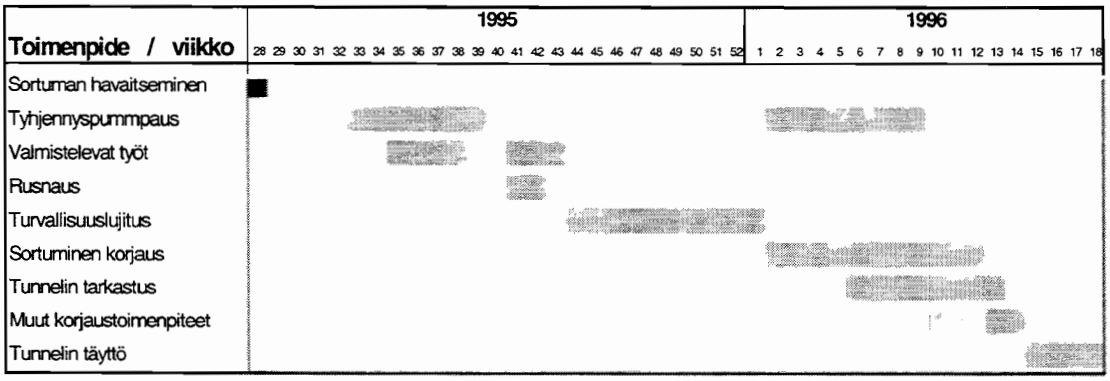
Ruiskubetonin hukkaprosentti oli 30-40 %, joka osittain johtui kerrallaan ruiskutettavan alueen pienuudesta ja raudoituksesta kimpoavasta ruiskubetonista. Keskimääräinen ruiskutusteho oli 2,5 Toron kauhallista vuorossa eli noin 3,5 $m^3$. Suurin saavutettu ruiskutusteho oli neljä Toron kauhallista.

Pääsortumassa käytettyjen pitkien (5,4-12,5 m) pulttien kokonaismäärä oli noin 80 pulttia yhteispituuden ollessa 510 m. Muualle sortuma-alueelle asennettiin juotettuja 2,4 metrin harjateräspultteja yhteensä 950 kappaletta. Tämä tekee 2,7 pulttia/tunnelimetri tai 6,5 pulttimetriä/tunnelimetri.

### 4.4.7 Aikataulu ja kustannukset

Bolmen-tunnelin korjauksen valmistelevat työt aloitettiin 30.8.1995. Työt jouduttiin keskeyttämään 27.10.1995, ja jäätiin odottamaan tunnelin tyhjenemistä. Keskeytys kesti kaksi viikkoa, ja tunnelin rusnaus päästiin aloittamaan 9.10.1995. Rusnaus saatiin valmiiksi 17.10.1996. Kaikki varustelut oli saatu valmiiksi 30.10.1995, ja varsinainen korjaus pääsi alkamaan. Turvallisuuslujitus saatiin valmiiksi 9.1.1996, ja sortumien lujitus oli valmis 20.3.1996. Tämän jälkeen suoritettiin korjaustoimenpiteitä muissa havaituissa kohteissa. Pääsortumaan valettiin vielä pohjalaatta 15-16.4.1996. Kaikki työt saatiin valmiiksi 9.5.1996, jolloin aloitettiin tunnelin täyttäminen pohjavedellä. Kuvassa 4.24 esitetyssä aikataulussa tunnelin tarkistusta varten tehdyn tyhjennyspumppauksen (vko 2-9) kesto on hieman epävarma.

Korjaustyöt tehtiin alussa normaalilla kaksivuorotyöllä, mutta myöhemmin siirryttiin järjestelmään, jossa vuorojen pituudet olivat yhdeksän tuntia ja yksi vuoro teki töitä viikonloppuisinkin. Koko työmaan miehitys oli 12- 13 miestä ja 3 työnjohtajaa.




Kuva 4.24. Bolmen-tunnelin sortuman korjauksen aikataulu

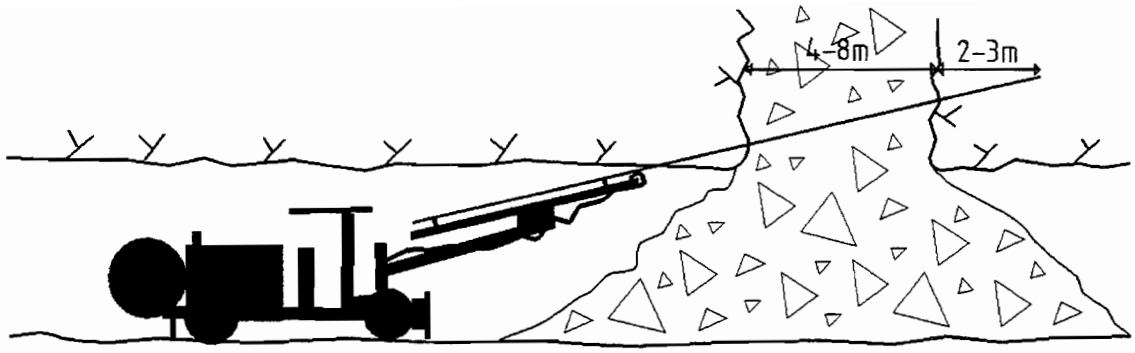
Tunnelin korjaus maksoi yhteensä noin 25 miljoonaa SEK, josta noin puolet olivat pumppauskustannuksia. Suomen rahassa tämä on vuoden 1996 kustannustasossa 17 miljoonaa markkaa. (Alestam 1999)

## 4.5 Bolmen-tunnelin 1986 sortuman korjaus

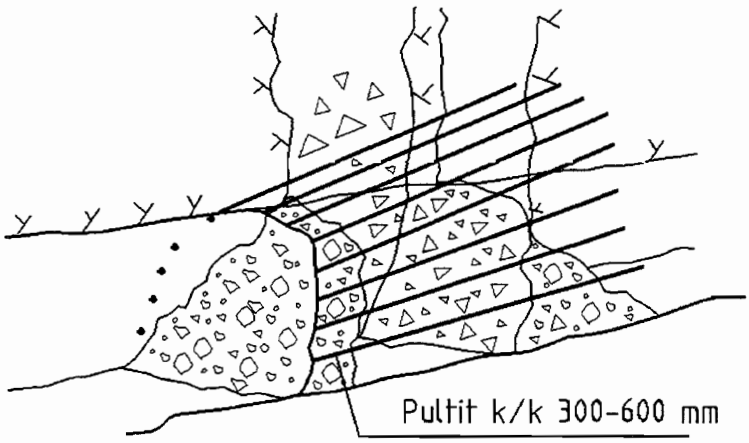
Kun sortuma-alue oli saatu tyhjennettyä vedestä, suunnitteluryhmä meni tutkimaan sortumia ja päätti sen jälkeen korjaustavasta. Korjaukset päätettiin tehdä läpäisemällä sortumat. (Mared 1988)

Suurimmissa sortumissa asennettiin aluksi ennakkopultit sortuman yläpuolelle (kuva 4.25). Pultit asennettiin noin 300 – 600 mm välein niin, että pulttien molemmista päistä oli ehjässä kalliossa noin 2-3 metriä (kuva 4.26). Pultit toimivat "häkkinä", joka esti sortuman laajenemisen sitä tyhjennettäessä. Sortuman tyhjennyksen jälkeen alue ruiskubetonoitiin työturvallisuuden parantamiseksi. Ruikutus suoritettiin kuivamenetelmällä (Alestam 1999). Lopullisena lujituksena suurimmissa sortumissa käytettiin harjateräksillä vahvistettua ruiskubetoniholvia ja systeemipultitusta. Teräsbetoniholvin paksuus seinissä ja katossa oli 200 mm, ja pohjalaatan paksuus oli 400 mm. Lujituksen yläpuolelle jääneet irtonaiset massat injektoitiin sementillä. (Mared 1988)

Sortuman korjauksen kannalta hankalinta oli tunnelin pieni koko. Työssä jouduttiin käyttämään pientä erikoiskalustoa, ja varsinkin sortuneen massan poiskuljetus oli hankalaa. Työtä tehtiin kahdessa vuorossa seitsemän päivää viikossa. Sortuman läpäisyyn kului keskimäärin kaksi viikkoa. Kaikkiaan sortumien korjaukseen kului neljä kuukautta. (Mared 1988). Korjauksen kokonaiskustannukset olivat noin 20 milj. SEK, josta veden pumppauksen osuus oli noin puolet (Alestam 1999). Suomen rahassa kustannukset olivat noin 14 milj. FIM (kustannustaso 1986).




Kuva 4.25. Ennakkopulttien asennus (Mared 1988)




Kuva 4.26. Valmis ”häkki” tukemassa sortumaa (Mared 1988)

# 5 TUNNELIEN LUJITUS JA LOUHINTA

## 5.1 Päijänne-tunnelin alkuperäinen lujitus ja louhinta

### 5.1.1 Lujitusperusteet

Tunnelin suunnittelun lähtökohtana oli, että tunnelia lujitetaan tarvittaessa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että lujituksia tehdään kallion heikkousvyöhykkeissä sekä kivilohkojen kiinnittämiseksi. Lujituksella pyrittiin samaan aikaan mahdollisimman huoltovapaa tunneli kohtuullisin kustannuksin. Valmistuneessa yleissuunnitelmassa kuitenkin mainittiin (Niini 1968a), että tulevaisuudessa on syytä varautua lujitusten ja ryöstymien tarkastukseen ja korjaukseen.

### 5.1.2 Louhintatapa

Louhintakalustona käytettiin pneumaattisia kolmipuomisia porausjumboja. Poraus tehtiin 1" tangoilla, joiden pituus oli 4 metriä I rakennusjaksolla ja II ja III rakennusosuudella 5 metriä. Katkojen pituus I urakkaosuudella oli 3,3 metriä ja 4,2 metriä II ja III rakennusjaksolla. Reunareikien väli oli noin 60 cm. Tiheällä porauksella vähennettiin rusnaustarvetta ja saavutettiin hyvä seinämän sileys. (Uimonen 1982)

Räjäytysaineena I rakennusjaksolla käytettiin työmaalla valmistettua ANOa. II ja III rakennusosuudella käytettiin tehdasvalmisteista ANOa. Reunareiät panostettiin silolouhinta-aineilla. Jos alueella oli runsaita vesivuotoja, korvattiin ANO aniitilla. (Uimonen 1982)

### 5.1.3 Lujitusmäärät ja –tapa

Päijänne-tunnelissa käytettiin lujituksena pultteja ja ruiskubetonia. Pultteina käytettiin ∅ 20 mm harjaterästankoa. Pulttipituus oli pääasiassa 3,2 m. I rakennusjaksolla käytettiin jonkin verran myös lyhyempiä 2,4 m pultteja. Joissakin nopeaa lujitusta vaativissa kohteissa käytettiin sinkittyjä kiila/paisuntakuoripultteja työnaikaisena lujituksena. Ruiskubetonina käytettiin K30-luokan betonia ja ruiskutus tehtiin kuivamenetelmällä. Käytetyn ruiskubetonin paksuus vaihteli 30 mm:n kerroksesta aina vahvasti raudoitettuihin 400 mm kerroksiin. I rakennusjaksolla yleisin ruiskubetonin kerrospaksuus oli 30 mm. II ja III rakennusjaksolla käytettiin useimmiten 40 mm kerrospaksuutta. Erittäin lujaa vahvistusta vaadittaessa lisättiin ruiskubetonin paksuutta sekä lisättiin raudoitusta ruiskubetonikerrosten väliin. Raudoituksia käytettiin kolmea eri tyyppiä: ∅3,4#100 verkkoa tai harjateräksiä ∅6#150 ja ∅10#200.

Lujituksia tehtiin työaikaisina parantamaan työturvallisuutta sekä mahdollistamaan louhinta vaikeissa ruhjekohdissa. Lopulliset lujitukset määriteltiin vasta, kun tunneliosuus oli kokonaan valmis ja kalliopinnat oli pesty. Lopullisten lujituksien määrittämisen apuna ruhjekohdilla käytettiin tietoa työaikaisen lujituksen käyttäytymisestä. Joillakin kohdilla työnaikaisen ja lopullisen lujituksen välillä saattoi kulua jopa kaksi vuotta.

Lujituksen suunnittelussa ja lujitusmäärien arvioinnissa käytettiin hyväksi tunnelinlinjauksen aikana tehtyjä seismisiä luotauksia. Tähän työhön on kerätty seismisten luotausten tuloksia tunnelin suunnittelunaikaisista suunnitelmapiirustuksista. Seismiset nopeudet on esitetty rakennusjaksoittain kuvassa 5.2. Toteutuneesta tunnelilinjauksesta on luodattu 47 %. Luodatuilla linjoilla seisminen nopeus alitti arvon 4 500 m/s 14 % osuudella seismisten linjojen pituudesta. Se, että seismisiä nopeuksia on mitattu vain osasta tunnelilinjaa on otettava huomioon tarkastellessa taulukkoa 5.2 sekä kuvia 5.2 ja 5.3. Taulukossa 5.2 seismisten nopeuksien osuudet on ilmoitettu luotauslinjaa kohti. Kuvissa 5.2 ja 5.3 alhaisen seismisen nopeuden osuudet on levitetty koskemaan koko tunnelin pituutta, eli alhaisten nopeuden osuuksien määrä on noin puolet verrattuna luotauslinjoihin. Tämä muutos on tehty olettaen, että seismiset luotauslinjat on asetettu tunnelilinjauksen kriittisimmille kohdille.

Päijänne-tunnelin I ja III rakennusjakson lujitusmäärät on koottu pultituksen osalta lujituksen tarkepiirustuksista. Tarkepiirustukset puuttuvat kuitenkin ensimmäisiltä kahdeksalta kilometriltä (PL 112 200- 120 000). Tältä väliltä pulttimäärä on selvitetty työmaakokouspöytäkirjoista. II Rakennusjakson pultitusmäärät on myös selvitetty työmaakokouspöytäkirjoista, koska osasta tarkepiirustuksia puuttuivat työn aikaiset lujitukset. Samasta syystä myös II rakennusjakson ruiskubetonimäärät on selvitetty työmaakokouspöytäkirjoista. I ja III rakennusjakson ruiskubetonointimäärät on saatu Viatek Oy:n tekemästä raportista, joka on tehty lujitusten tarkepiirustusten pohjalta. Siltä osalta, jolta tarkepiirustukset puuttuvat, on ruiskubetonimäärät saatu GTK:n raportista (Laitakari & Pokki 1979).

Tunnelin pituudesta noin 18 prosenttia on ruiskubetonoitu ja pultteja on asennettu keskimäärin noin joka viides tunnelimetri. Ruiskubetonityyppien jakautuminen on esitetty kuvassa 5.1. Ruiskubetoni ja pulttimäärät tunnelissa tunneliosuuksittain on liitteessä 5. Tunnelin lujitusmäärät rakennusjaksoittain on esitetty taulukossa 5.1.

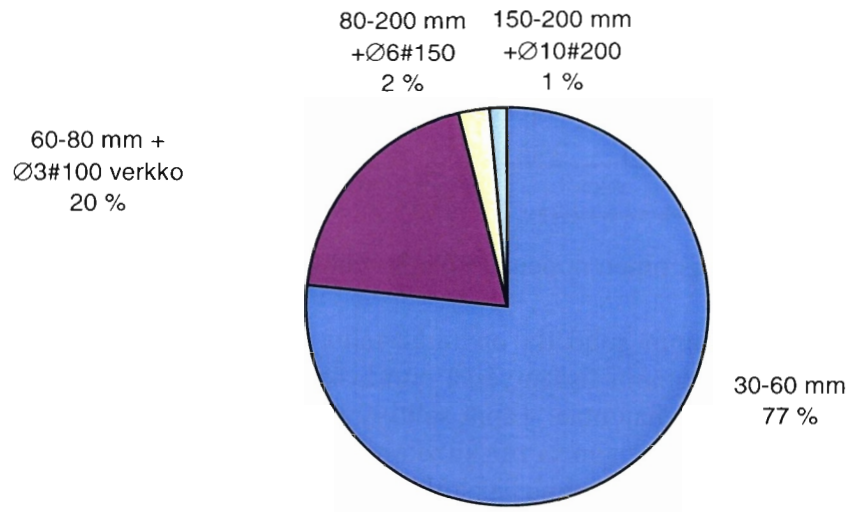
Taulukko 5.1. Päijänne-tunnelin lujitusmäärät rakennusjaksoittain

| RAKENNUSJAKSO | | PULTITUS | | | | RUISKUBETONOINTI | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | pulttimäärä | | | | Ruiskubetonipaksuus [mm] + raudoitus* | | | | | |
| | pituus | | | | | 30-60 | 60-80+v | 80-200+I | 150-200+II | yht. | yht. |
| | [m] | [kpl] | [m] | [pulttia/tm] | [pm/tm] | [m] | [m] | [m] | [m] | [m] | [%] |
| I Jakso | 35 200 | 5 932 | 17 705 | 0,17 | 0,50 | 7 286 | 976 | 0 | 38 | 8 300 | 24 |
| II Jakso | 58 700 | 12 544 | 39 935 | 0,21 | 0,68 | 5 815 | 2 211 | 316 | 147 | 8 489 | 14 |
| III Jakso | 25 634 | 6 809 | 21 789 | 0,27 | 0,85 | 3 661 | 1 079 | 206 | 126 | 5 072 | 20 |
| Yhteensä | 119 534 | 25 285 | 79 429 | 0,21 | 0,66 | 16 762 | 4 266 | 522 | 311 | 21 861 | 18 |

* v = verkotus ∅3#100, I = ∅6#150 ja II= ∅10#200

Taulukko 5.2. Päijänne-tunnelin seismisten luotausten yhteenveto

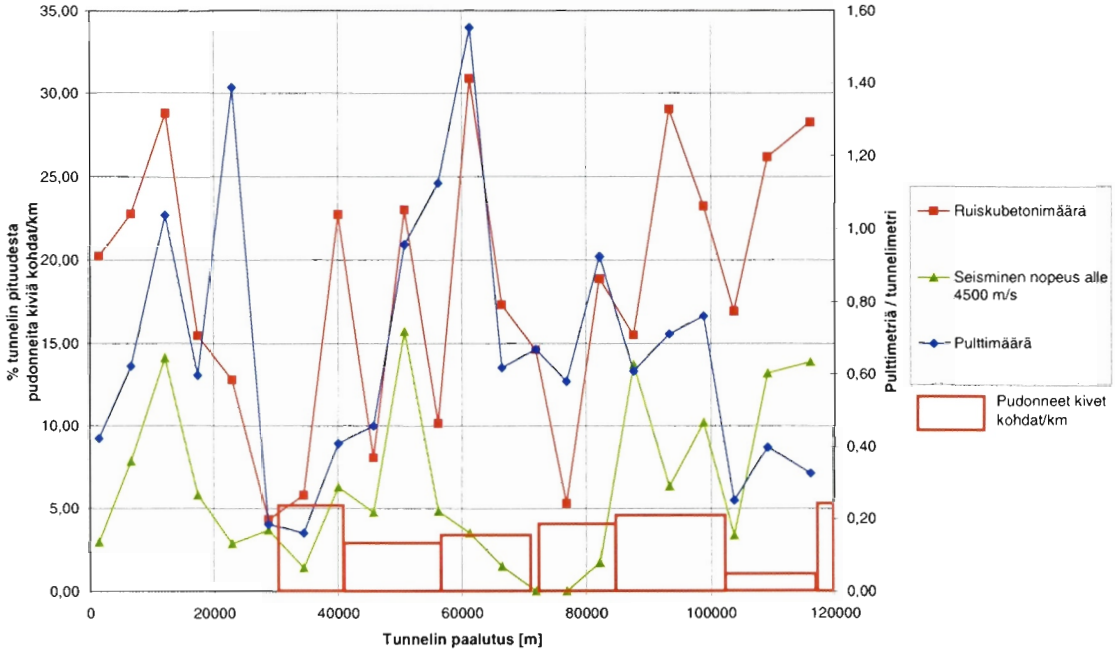
| | Tunneli-osuuden pituus [m] | Seismistä linjaa tunnelilinjalla [m ja %] | | Seismiset nopeudet [metriä/mittalinja ja % mittalinjasta] | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | nopeus > 5000 m/s | | nopeus 4500-5000 m/s | | nopeus 4000-4500 m/s | | nopeus < 4000 m/s | |
| I Rakennusjakso | 35 200 | 20 650 | 59 % | 8 650 | 42 % | 8 285 | 40 % | 2 895 | 14 % | 820 | 4 % |
| II Rakennusjakso | 58 700 | 24 750 | 42 % | 17 170 | 69 % | 5 290 | 21 % | 1 770 | 7 % | 520 | 2 % |
| III Rakennusjakso | 25 634 | 10 925 | 43 % | 7 245 | 66 % | 1 945 | 18 % | 1 005 | 9 % | 730 | 7 % |
| Yhteensä | 119 534 | 56 325 | 47 % | 33 065 | 59 % | 15 520 | 28 % | 5 670 | 10 % | 2 070 | 4 % |




Kuva 5.1. Ruiskubetonityyppien jakautuminen Päijänne-tunnelissa

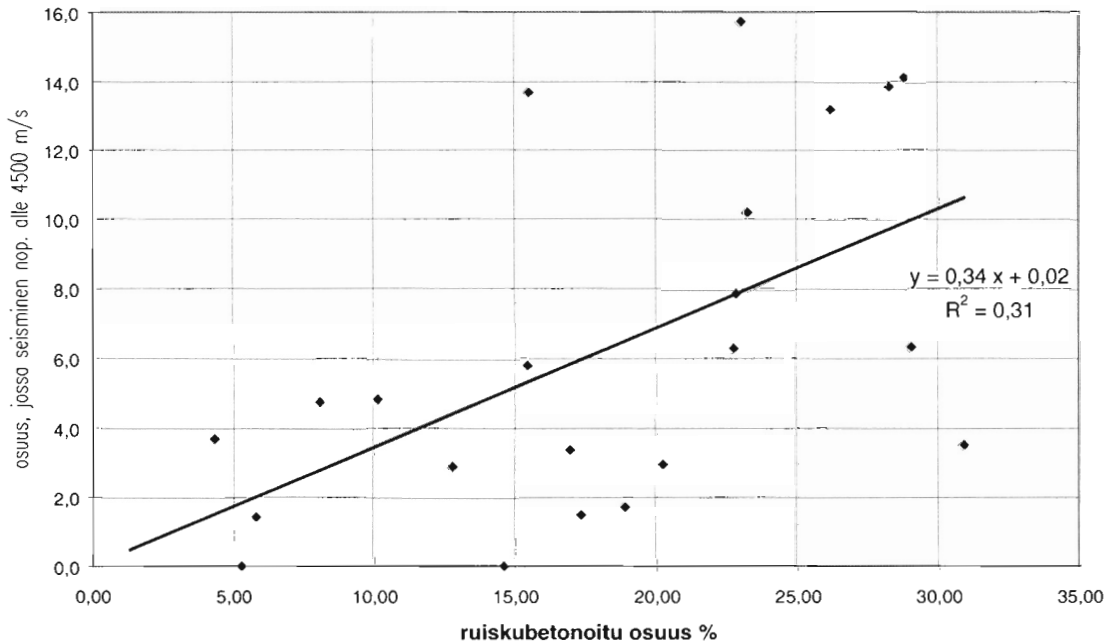
Tunnelissa käytetyt lujitusmäärät tunneliosuuksittain on esitetty graafisesti kuvassa 5.2. Kuvaan on piirretty myös kuvaaja, joka kuvaa huonon kiven osuutta tunnelissa (seisminen nopeus alle 4500 m/s). Kuvaajasta nähdään, että lujitusten määrä korreloi verrattain hyvin seismisiin nopeuksiin varsinkin ruiskubetonoinnin osalta. III rakennusjaksolla käytettiin enemmän pultteja kuin kahdella aikaisemmalla osuudella. Tämä selittyy tunnelin asemasta lähempänä pintaa, missä kallio on runsaammin rakoillutta ja näin lohkareisempaa kuin syvällä. Lisääntyneellä pultituksella on kiinnitetty näitä irtonaisia lohkoja.

Lujitusmäärän ja seismisen nopeuden yhteyttä on tarkasteltu kuvassa 5.3. Kuvassa on esitetty ruiskubetonoidun osuuden ja heikon kiven osuuden suhde tunneliosuuksittain. Ruiskubetonoinnin määrä ja kallion laatu korreloivat, vaikkakin hajonta on melko suurta. Hajonta johtuu siitä, että seismiset mittaukset eivät indikoi kaikkia kallion heikkousvyöhykkeitä. Varsinkin loivat heikkousvyöhykkeet jäävät usein huomaamatta. Kuvasta on selvästi havaittavissa, että heikkoa kalliota on ennustettua enemmän.

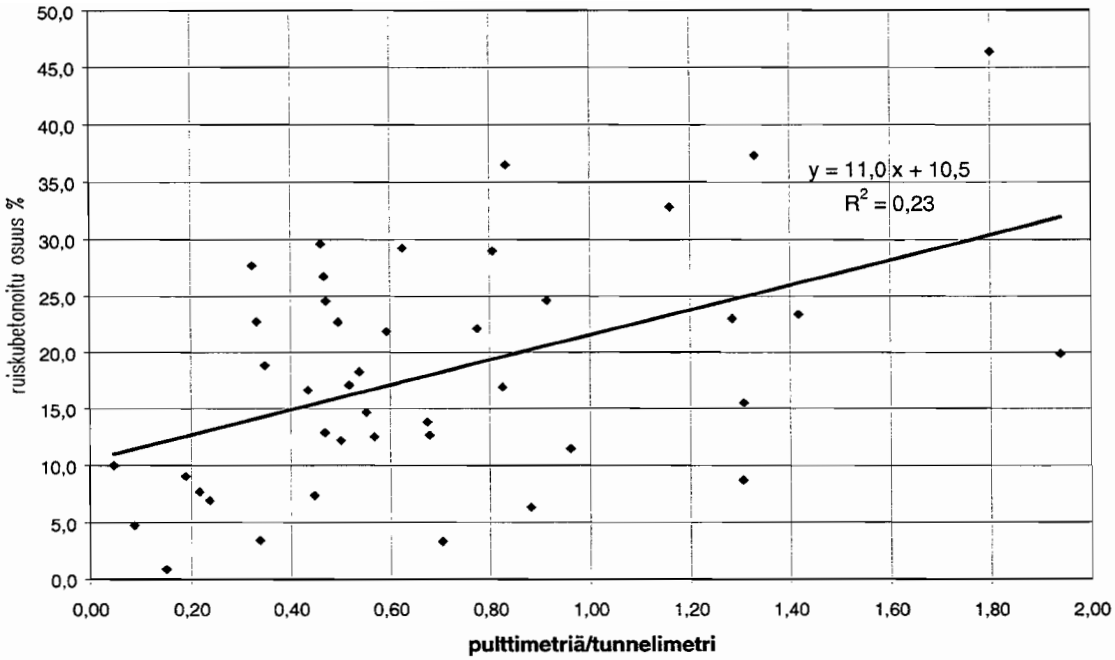



Kuva 5.2. Lujitusmäärät ja seismisen nopeus Päijänne-tunnelissa.

Pultituksen ja ruiskubetonoinnin suhdetta on tarkasteltu kuvassa 5.4. Pääpiirteissään näyttää siltä, että ruiskubetonoinnin lisääntyessä pultituskin lisääntyy. Kuvassa on kuitenkin nähtävissä huomattavaa hajontaa. Tämä selittyy pulttien ja ruiskubetonin erilaisesta käytöstä (pultteja irtolohkareisiin ja ruiskubetonia heikkousvyöhykkeisiin) ja pultituksen lisääntyneestä käytöstä III rakennusjaksolla.




Kuva 5.3. Ruiskubetonoinnin ja seismisen nopeuden korrelaatio Päijänne-tunnelissa (yksi piste kuvaa tilannetta noin 5,5 km:n tunneliosuudella)




Kuva 5.4. Ruiskubetonoinnin ja pultituksen korrelaatio Päijänne-tunnelissa (yksi piste kuvaa tilannetta noin 2,2 km:n tunneliosuudella)

## 5.2 Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin alkuperäinen lujitus ja louhinta

### 5.2.1 Lujitusperusteet

Puhdistettujen jätevesien poistotunnelia suunniteltaessa lähtökohtana oli, että ainoastaan lujitusta selvästi vaativat kohteet tullaan lujittamaan. Kuitenkin tarkoituksena oli myös kohottaa hieman lujitusstandardia aikaisempiin tunneleihin verrattuna. Näin pyrittiin saamaan kohtuullisilla kustannuksilla mahdollisimman huoltovapaa tunneli.

### 5.2.2 Louhintatapa

Louhintakalustona käytettiin kolmipuomisia porausjumboja. Katkojen pituus vaihteli urakoitsijasta riippuen 4,2:sta 4,9 metriin. Reikien halkaisija vaihteli 38 mm:stä 45 mm:iin. Yhteen katkoon reikiä porattiin noin 52 kpl. Reunareikien väli oli 600 mm ja ne panostettiin kevennetyllä räjähdysaineella (∅ 17 mm forsiittiputkilla).

### 5.2.3 Lujitusmäärät ja –tapa

Puhdistettujen jätevesien poistotunnelissa käytettiin lujituksena pultteja ja ruiskubetonia. Pultteina käytettiin lähinnä ∅ 20 mm harjaterästankoa. Pulttipituus oli pääasiassa 2,4 m. Pultit olivat lähinnä sementillä juotettuja, mutta paikoin työnaikaisessa pultituksessa käytettiin kiila- ja paisuntakuoripultteja. Ruiskubetonina käytettiin K35 betonia, ja ruiskutus tehtiin kuivamenetelmällä. Käytetyn ruiskubetonin paksuus vaihteli 40 mm:stä vahvasti raudoitettuun 200 mm betoniin. Käytetyin ruiskubetonipaksuus oli 40 mm. Lisäksi 70 mm ruiskubetonointia vahvistettuna ∅3,4#100 verkolla käytettiin varsin heikon kiven alueella. Vahvempia lujituksia käytettiin ainoastaan poikkeuksellisen heikoissa ruhjevyöhykkeissä. Louhintatyön aikana pyrittiin tekemään ainoastaan työturvallisuuden kannalta välttämättömiksi katsotut lujitukset. Varsinaiset lopulliset lujitukset tehtiin vasta louhinnan jälkeen.

Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin lujitusmäärät on koottu lujituksen tarkepiirustuksista. Ruiskubetonimäärät on laskettu ruiskutettuna määränä tunnelin pituudesta.

Tunnelin pituudesta noin 27 % on lujitettu ruiskubetonilla. Pultteja on asennettu keskimäärin joka kolmas metri (0,29 pulttia/tunnelimetri). Lujituksissa on havaittavissa selvä ero manner- ja meriosuuden välillä. Ruiskubetonia on käytetty molemmilla osuuksilla suunnilleen saman verran, mutta pultteja on käytetty meriosuudella kaksi kertaa enemmän. Lujitusmäärät on esitetty taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3. Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin lujitusmäärät

| Paaluväli | | PULTITUS | | | | RUISKUBETONOINTI | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | kpl | m | pulttia/tm. | p.m./tm. | m | % |
| 0 | 400 | 111 | 310 | 0,28 | 0,77 | 275 | 69 % |
| 400 | 900 | 175 | 420 | 0,35 | 0,84 | 58 | 12 % |
| 900 | 1550 | 114 | 278 | 0,18 | 0,43 | 245 | 38 % |
| 1550 | 2180 | 57 | 137 | 0,09 | 0,22 | 157 | 25 % |
| 2180 | 2535 | 84 | 202 | 0,24 | 0,57 | 44 | 12 % |
| 2535 | 2800 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 205 | 77 % |
| 2800 | 3350 | 216 | 518 | 0,39 | 0,94 | 95 | 17 % |
| 3350 | 3820 | 46 | 110 | 0,10 | 0,23 | 115 | 24 % |
| 3820 | 4300 | 18 | 46 | 0,04 | 0,10 | 108 | 23 % |
| 4300 | 4800 | 9 | 29 | 0,02 | 0,06 | 55 | 11 % |
| 4800 | 5100 | 49 | 141 | 0,16 | 0,47 | 55 | 18 % |
| 5100 | 5670 | 66 | 158 | 0,12 | 0,28 | 113 | 20 % |
| 5670 | 6300 | 81 | 194 | 0,13 | 0,31 | 352 | 56 % |
| 6300 | 6500 | 27 | 65 | 0,14 | 0,32 | 90 | 45 % |
| 6500 | 6900 | 48 | 115 | 0,12 | 0,29 | 145 | 36 % |
| 6900 | 7214 | 38 | 94 | 0,12 | 0,30 | 191 | 61 % |
| 7214 | 7569 | 117 | 342 | 0,33 | 0,96 | 86 | 24 % |
| 7569 | 7924 | 89 | 214 | 0,25 | 0,60 | 25 | 7 % |
| 7924 | 8225 | 60 | 144 | 0,20 | 0,48 | 25 | 8 % |
| 8225 | 8688 | 121 | 290 | 0,26 | 0,63 | 85 | 18 % |
| 8688 | 9197 | 278 | 674 | 0,55 | 1,32 | 25 | 5 % |
| 9197 | 9583 | 140 | 336 | 0,36 | 0,87 | 37 | 10 % |
| 9583 | 10133 | 327 | 876 | 0,59 | 1,59 | 217 | 39 % |
| 10133 | 10683 | 99 | 275 | 0,18 | 0,50 | 263 | 48 % |
| 10683 | 11128 | 50 | 120 | 0,11 | 0,27 | 47 | 11 % |
| 11128 | 11709 | 230 | 572 | 0,40 | 0,99 | 160 | 28 % |
| 11709 | 12290 | 396 | 954 | 0,68 | 1,64 | 261 | 45 % |
| 12290 | 12941 | 208 | 588 | 0,32 | 0,90 | 139 | 21 % |
| 12941 | 13372 | 424 | 1018 | 0,98 | 2,36 | 110 | 26 % |
| 13372 | 13772 | 55 | 132 | 0,14 | 0,33 | 100 | 25 % |
| 13772 | 14434 | 343 | 823 | 0,52 | 1,24 | 185 | 28 % |
| 14434 | 14800 | 222 | 589 | 0,61 | 1,61 | 110 | 30 % |
| 14800 | 15131 | 74 | 178 | 0,22 | 0,54 | 100 | 30 % |
| 15131 | 15641 | 163 | 391 | 0,32 | 0,77 | 24 | 5 % |
| 15641 | 16112 | 93 | 238 | 0,20 | 0,51 | 50 | 11 % |
| 16112 | 16775 | 224 | 550 | 0,34 | 0,83 | 115 | 17 % |
| **YHTEENSÄ** | | **4852** | **12125** | **0,29** | **0,72** | **4467** | **27 %** |
| mannerosuus | | 1804 | 4483 | 0,20 | 0,49 | 2549 | 28 % |
| meriosuus | | 3048 | 7642 | 0,40 | 1,01 | 1918 | 25 % |

## 5.3 Bolmen-tunnelin alkuperäinen lujitus ja louhinta

### 5.3.1 Lujitusperusteet

Tunnelin suunnittelun lähtökohtana oli, että tunnelia lujitetaan tarvittaessa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että lujituksia tehdään heikkousvyöhykkeissä sekä kivilohkojen kiinnittämiseksi. Lujituksella pyrittiin samaan aikaan mahdollisimman huoltovapaa tunneli kohtuullisin kustannuksin. Tunnelin rakentamisen loppuvaiheessa tehtiin päätös, että noin 200 milj. SEK (1983) maksavaa tunnelin vuorausta betonielementeillä (katto ja seinät) ei tehdä. Betonivuoraus olisi nostanut tunnelin kokonaiskustannuksia yli 30 %. Näin tunnelin omistajat tekivät siis periaatteellisen päätöksen, että sortumariski otetaan. (Alestam, 1999)

### 5.3.2 Louhintatapa

Louhinta tehtiin raidekalustolla. Louhintakalustona käytettiin pääasiassa sähköhydraulisia kolmipuomisia porausjumboja. Heikkojen kivien alueella käytettiin kuitenkin kaksipuomisia paineilmajumboja. Porareikien halkaisija vaihteli 38 mm ja 41 mm välillä, reikäpituuden ollessa 3,65 m. Katkojen keskimääräinen pituus oli 3,3-3,5 metriä. Reikiä katkoon porattiin 36 kappaletta. (Sylvan, 1978)

Käytetty räjähdysaine oli patrunoitua. Reunarei'issä käytettiin Gurit ∅ 17 mm * 410 mm silolouhinta-ainetta. Muissa rei'issä käytettiin Dynamex ∅ 29 mm * 1170 mm sekä Nabit ∅ 29 mm * 1000 mm patruunoita. Räjähdysaineiden kulutuksen jakautuma oli: Nabit 47 %, Dynamex 40 % ja Gurit 13 %. (Sylvan, 1978)

### 5.3.3 Lujitustapa ja -määrät

Bolmen-tunnelissa pääasiallisena lujituksena käytettiin ruiskubetonointia (Stanfors 1986 ja Sylvan 1978). Myös pultteja käytettiin runsaasti, mutta osa niistä oli hyvin lyhyitä, ainoastaan noin metrin mittaisia (Pokki 1999). Bolmen-tunnelissa tehtiin runsaasti työnaikaista ruiskubetonointia. Noin 17 % tunnelin pituudesta lujitettiin tällöin ruiskubetonoimalla. Vahvistetun ja yli 50 mm paksun ruiskubetonoinnin osuus oli alle 15 % (Stanfors, 1986). Lopullisen ja työnaikaisen ruiskubetonoinnin yhteismäärä on saatu lujitusten tarkepiirustuksista, joita oli käytettävissä paaluväleiltä 500 – 19 000 ja 32 000 – 45 500, eli noin 40 % tunnelipituudesta. Samoista tarkepiirustuksista on selvitetty myös kallion seismiset nopeudet. Bolmen-tunnelin ruiskubetonimäärät ja seismiset nopeudet on esitetty taulukossa 5.4.

Taulukko 5.4. Bolmen-tunnelin ruiskubetonointimäärät ja seismiset nopeudet

| Paaluväli | | Työnaikaisen ruiskubetonoinnin osuus [% tunnelin pituudesta] | Työnaikaisen+lopullisen ruiskubetonoinnin osuus [% tunnelin pituudesta] | Seisminen nopeus < 4500 m/s [% tunnelin pituudesta] |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 5 000 | 14 | 22 | 12 |
| 5 000 | 10 000 | 13 | 22 | 7 |
| 10 000 | 15 000 | 26 | 41 | 14 |
| 15 000 | 20 000 | 11 | 11 | 4 |
| 20 000 | 25 000 | 17 | | |
| 25 000 | 30 000 | 16 | | |
| 30 000 | 35 000 | 18 | 26 | 7 |
| 35 000 | 40 000 | 20 | 22 | 23 |
| 40 000 | 45 000 | 28 | 28 | 18 |
| 45 000 | 50 000 | 11 | | |
| 50 000 | 55 000 | 14 | | |
| 55 000 | 60 000 | 30 | | |
| 60 000 | 65 000 | 12 | | |
| 65 000 | 70 000 | 11 | | |
| 70 000 | 75 000 | 17 | | |
| 75 000 | 80 000 | 19 | | |
| keskiarvo | | **17** | **25** | **12** |

## 5.4 Lujitus- ja louhintakustannusten kehittyminen

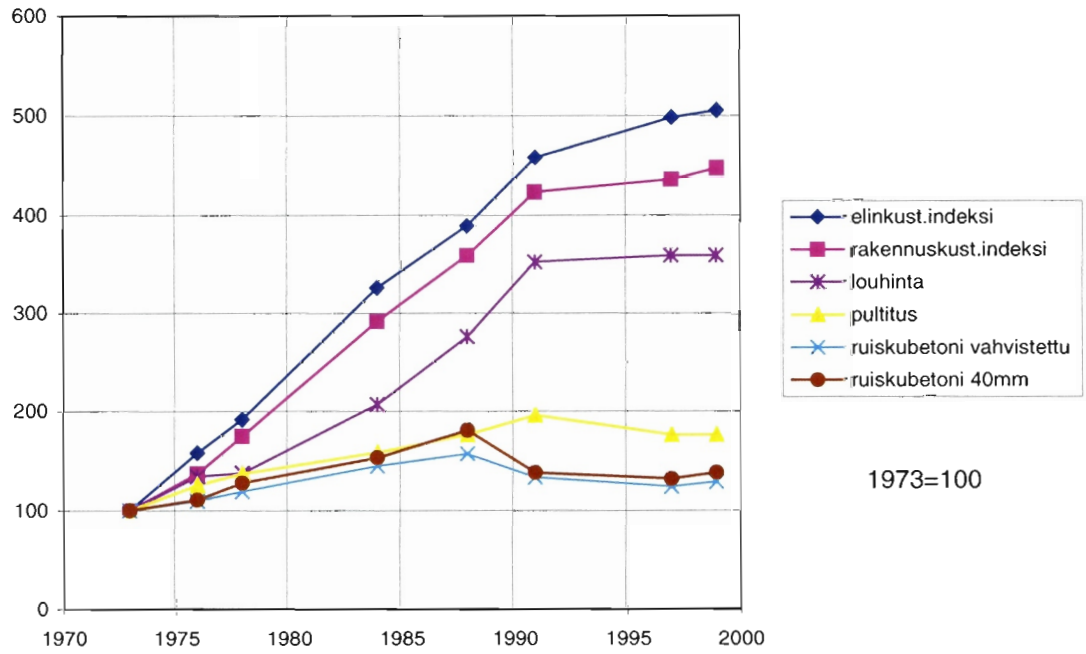
Viimeisen neljännesvuosisadan aikana on lujitus- ja louhintakustannuksissa tapahtunut merkittäviä muutoksia. Tässä työssä on vertailtu pientunnelin (n. 15 – 18 $m^2$) lujitus- ja louhintakustannusten kehitystä vuosien 1973 ja 1999 välillä. Vertailussa on käytetty rahanarvonmuutoksissa yleisesti käytettyä elinkustannusindeksiä sekä yleistä rakentamisen kustannuskehitystä kuvaavaa rakennuskustannusindeksiä. Erillistä louhintakustannusindeksiä (maarakennuskustannusindeksin alaindeksi) ei ole käytetty vertailukohtana, koska sitä on alettu pitämään vasta vuodesta 1990 alkaen. Lisäksi louhintakustannusindeksi on painottunut avolouhinnan kustannuksiin, eikä se näin ole suoraan vertailukelpoinen pientunneleiden rakennuskustannuksiin.

Lujitus- ja louhintakustannuksia on selvitetty useista pientunnelikohteista laskemalla urakoista annettujen tarjousten keskiarvoja. Lisäksi uusimpia hinta-arvioita on kysytty alan urakoitsijoilta. Louhintakustannukset on laskettu jakamalla koko tunnelin kokonaislouhintakustannukset tunnelin pituudella. Kokonaishintaurakoista on louhintakustannukset selvitetty vähentämällä lujitus- ja tiivistyskustannukset yksikköhintojen avulla. Lujituskustannusten määrittämisessä on käytetty yksikköhintoja. Yksikköhintojen käyttämisen ongelmana tällaisissa tarkasteluissa on niiden spekulatiivisuus. Ongelmaa on pyritty vähentämään laskemalla keskiarvoja jätetyistä tarjouksista.

Hintatarkastelun tulokset on esitetty kuvassa 5.5. Louhinnan kustannukset ovat nykypäivänä noin 3,5 kertaiset verrattuna 26 vuoden takaisiin hintoihin. Samalla aikavälillä rahanarvo on muuttunut viisinkertaiseksi. Louhintakustannukset ovat siis pudonneet reaa-

lisesti noin 30 % neljännesvuosisadassa. Merkittävin tekijä hinnan alentumiseen on ollut kalustokehitys. Vielä dramaattisempi on ollut reaalisten lujituskustannusten pudotus. Sekä pultituksen että ruiskubetonoinnin kustannukset ovat pudonneet noin 70 %. Pultituksen osalta merkittävämpinä syynä hintojen laskuun on ollut pultituksen mekanisointi. Tarkasteluajanjaksolla pultituksessa on siirrytty käsikoneista mekaaniseen poraukseen. Ruiskubetonoinnissa laitteiston mekanisoinnin lisäksi merkittävä hintaan vaikuttanut tekijä on ollut siirtyminen kuivaruiskutuksesta märkäruiskutukseen 1980/1990-lukujen taitteessa. Hintoja on laskenut myös siirtyminen kuitujen käyttöön verkotuksen sijasta.

Kuvassa 5.5 käytetyt oletukset ovat: Tunnelin poikkileikkausala on alle 20 $m^2$. Ruiskubetonina vuoteen 1990 asti 40 mm:n ruiskubetoni ja 60-70 mm ruiskubetoni verkotuksella. Vuodesta 1990 eteenpäin vahvistettuna ruiskubetonina on käytetty 70 mm kuitubetonia (30 mm kuiduilla + 40 mm ilman). Pultteina oli ennen vuotta 1990 ∅20 mm l=3000mm pultit ja vuoden 1990 jälkeen halkaisija on kasvanut 25 mm:iin. Kustannuksia tarkasteltaessa on otettava huomioon kulloinenkin markkinatilanne, joka vaikuttaa oleellisesti hintatasoon.




Kuva 5.5. Pitkien tunneleiden lujitus- ja louhintahintojen kehitys 1973-1999

## 5.5 Lujitustason nousu

Tunneleissa käytetyt lujitusmäärät ovat kasvaneet jatkuvasti. Tähän ovat johtaneet lujituskustannusten huomattava aleneminen sekä tarve rakentaa tunneleista mahdollisimman huoltovapaita. Lisäksi tietoa tunneleiden pitkäaikaiskäyttäytymisestä on saatu jatkuvasti lisää ja uusi tieto on muuttanut koko ajan käsitystä tunneleiden kestosta ja luji-

tustarpeesta. Aikaisemmin oli ammattipiireissäkin vallalla käsitys, että tunnelit kestävät ehjinä hyvin pienilläkin lujituksilla. Vanhat käsikoneilla tehdyt pienet tunnelit kestävätkin paremmin kuin nykyiset suuremmat tunnelit. Pienissä tunneleissa (poikkipinta-ala alle 6 $m^2$) tunneli holvautuu paremmin, jolloin se kestää hyvin pienilläkin lujitusmäärillä. Veden virtaus tunnelissa aiheuttaa lisäksi sekä mekaanista että kemiallista kulumista, jota ei aikaisemmin ei niin hyvin osattu ottaa huomioon.

Tunnelien lujitusmäärän kasvua havainnollistaa taulukko 5.5. Taulukkoon on kerätty tietoja Helsingin kaupungin rakennuttamista tunneleista 1960-luvun lopulta lähtien (Päijänne-tunneli Pääkaupunkiseudun Vesi Oy:n rakennuttama). Aineistoa on koottu eri lähteistä (Kähönen 1979 ja Ahola & Viitala 1992 ja Wegelius & Viitala 1995) sekä tätä työtä varten tehdyistä tarkasteluista. Taulukosta voi havaita lujitusmäärien kasvun. Kaikki tunnelikohteet eivät kuitenkaan ole keskenään vertailukelpoisia niiden erilaisen käyttötarkoituksen vuoksi. Uusimmat kaukolämpötunnelit ovat huomattavasti vanhempia tunneleita suurempia, mikä osaltaan selittää kasvaneen pulttimäärän. Lisäksi uusimpien kaukolämpötunneleiden osalta on tehty periaatepäätös, että ne lujitetaan ruiskubetonilla kauttaaltaan.

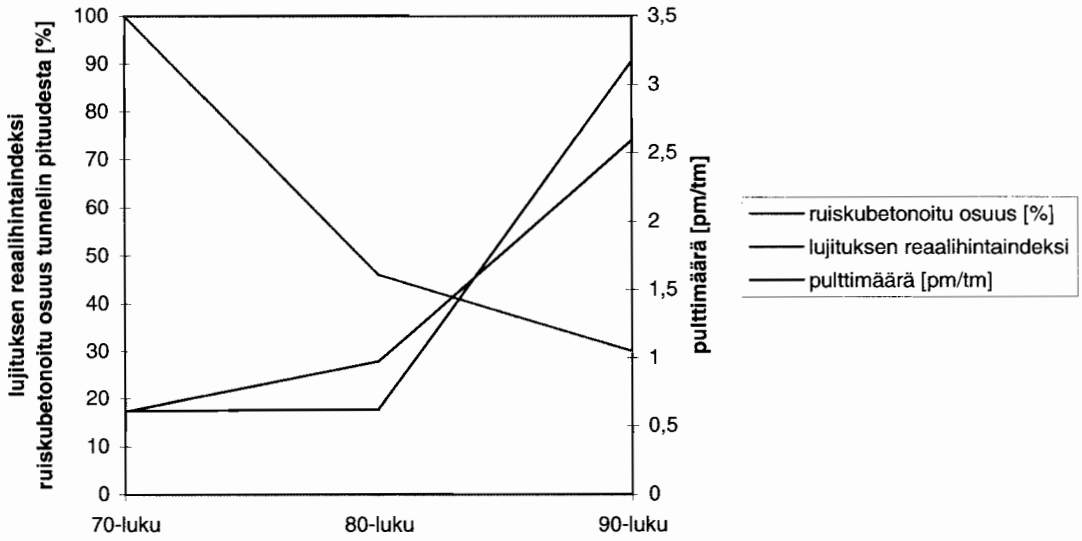
Taulukko 5.5. Lujitusmääriä eri tunneleissa

| Tunneli | Käyttötarkoitus | Pituus m | Valm. vuosi | Pl-ala $m^2$ | Pultitus pm/tm | Ruisku-betonoitu pituus % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Vanhak. - Pitkäkoski | raakavesi | 7 700 | 1965 | 6 | | 9 |
| Hiidenvesi-tunneli | raakavesi | 11 200 | 1966 | 6,5 | | 8 |
| Vanhak. - Myllypuro | vesijohto | 1 100 | 1971 | 11,2 | 0,06 | 2,7 |
| Vanhak. - Viikki | vesijohto | 1 700 | 1972 | 11 | 0,16 | 3,1 |
| Pasila - Hermanni | viemäri | 2 700 | 1972 | 6 - 8 | 0,13 | 7,8 |
| Konala - Pasila | viemäri | 5 600 | 1974 | 6,6 | 0,18 | 10,5 |
| Savila - Sturenkatu | viemäri | 400 | 1973 | 7 | 0,25 | 10,9 |
| Kruunuhaka | kaukolämpö | 500 | 1976 | 7 | 0,10 | 32,5 |
| Viikki - Pukinmäki | vesi + kaukol. | 1 000 | 1977 | 12 | 0,39 | 14,8 |
| Malminkartano | viemäri | 400 | 1979 | 7 | 0,14 | 42,2 |
| Länsi-Pasila | viemäri | 1 900 | 1979 | 12 | 0,36 | 16,8 |
| Päijänne-tunneli | raakavesi | 119 534 | 1982 | 16 | 0,66 | 18 |
| Roihuvuori | viemäri | 1 045 | 1985 | 12 | 0,11 | 35 |
| Tali - Lassila | viemäri | 2 173 | 1986 | 7 | 0,11 | 32 |
| Puhd. jätev. poistotun. | puhd. jätevesi | 16 775 | 1986 | 18 | 0,72 | 27 |
| mannerosuus | | | | | 0,49 | 28 |
| meriosuus | | | | | 1,01 | 25 |
| Pihlajam. tunnelin siirto | viemäri | 282 | 1988 | 14,8 | 0,58 | 21 |
| Kivikko - Malmi | kaukolämpö | 397 | 1990 | 17 | 1,10 | 62 |
| Munkkisaari - Mäntymäki | viemäri | 3 072 | 1991 | 10 | 0,00 | 45 |
| Vartiokylänlahti-Viikinmäki | viemäri | 12 433 | 1993 | 13 | 1,40 | 42 |
| Vuosaari-Pasila* | kaukolämpö | 17 583 | 1996 | 33,2 | 5,01 | 100 |
| Lauttasaari | kaukol. + vesi | 1 351 | 1999 | 22,5 | 5,25 | 100 |

* ei sisällä 6. urakkaosuutta

Vertailtaessa lujitusmääriä lujituksen reaalikustannuksiin on havaittavissa, että kustannusten ja lujitusmäärien suhde on pysynyt lähes vakiona. Toisin sanoen lujituksiin käy-

tetään reaalisesti saman verran rahaa, kuin parikymmentä vuotta sitten. Samalla rahalla vain saadaan nykyään enemmän lujituksia. Lujitusstandardin nousu vaikuttaa siis olevan selvästi sidottu lujituskustannuksiin. Lujitusmäärien kasvun ja lujitushinnan muutos on esitetty kuvassa 5.6. Kuvaan 5.6 on kuitenkin suhtauduttava erityisen varoen, koska siinä käytetyt lujitusmäärät on saatu käyttötarkoituksiltaan hyvin erilaisista tunneleista. Lisäksi on huomattava, että lujitusmääriä dominoivat määrätyt tunnelit; 70-lukua Päijänne-tunneli ja 80-lukua puhdistettujen jätevesien poistotunneli.




Kuva 5.6. Lujitusmäärien ja -hintojen muutos 1970-1990 -luvuilla

Jos Päijänne-tunneli olisi jo rakennusvaiheessa lujitettu kauttaaltaan ruiskubetonilla, olisivat tunnelin kustannukset nousseet valtavasti. Jos ruiskubetonoimattomat alueet olisi lujitettu 40 mm ruiskubetonoinnilla, olisivat kustannukset nousseet vuoden 1973 hinnoilla (I rakennusjakso) laskettuna (0,82*119 534m*12m* 47 mk/m$^2$) noin 55 milj. mk joka nykyrahaksi (1998) muutettuna on noin 270 milj. mk. Nykyisellä ruiskubetonin hinnalla vastaava lujitusstandardin nosto aiheuttaisi vajaan 80 milj. mk kustannukset (ruiskubetoni 65 mk/m$^2$). Ruiskubetonoinnin reaalihinta on siis laskenut noin 70 %. Näistä laskelmista voidaan hyvin päätellä, että Päijänne-tunnelin rakennusaikana ei olisi ollut taloudellisesti järkevää ruiskubetonoida koko tunnelia, vaikka se nykytietämyksen mukaan olisikin hyvin perusteltua. Nykykustannustasolla paineellisten vesitunneleiden kauttaaltaan ruiskubetonointi on myös taloudellisesti perusteltua.

# 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Paineellisten vesitunneleiden sortumat ovat tämän selvityksen perusteella jaettavissa kolmeen ryhmään:

- paisuvan saven aiheuttamat sortumat
- veden virtauksesta johtuvan eroosion aiheuttamat sortumat
- kemiallisesta rapautumisesta aiheutuvat sortumat (hapen reaktioita nopeuttavat vaikutus)

Sortumatyypit eivät välttämättä esiinny puhtaasti edellä esitettyinä tyyppeinä, vaan ne voivat olla myös kahden tai useamman sortumatyypin sekoituksina. Varsinkin kemiallinen rapautuminen on usein yhteydessä paisuviin saviin.

Paisuvan saven aiheuttamat sortumat ovat ennaltaehkäistävissä ainoastaan tunnelin suunnittelun ja varsinkin rakentamisenaikaisilla kokeilla, joissa pyritään selvittämään paisuvan saven esiintymistä heikkousvyöhykkeissä. Näiden kokeiden perusteella voidaan suunnitella heikkousvyöhykkeeseen lujitus, joka kestää saven aiheuttaman paisuntapaineen.

Veden virtauksen aiheuttamat sortumat johtuvat lähinnä rakotäytteen huuhtoutumisesta. Tällöin rakojen kitka pienenee ja avainlohkot pääsevät putoamaan ja näin sortuma pääsee alulle. Näitä sortumia voidaan ehkäistä lisäämällä ruiskubetonoinnin määrää. Ruiskubetonikerroksen paksuuden ei tarvitse olla erityisen paksu estääkseen rakotäytteiden huuhtoutumista. Tästä on esimerkki Pulkkilan sortumassa, jossa sortuma loppui juuri siihen, missä 30 mm ruiskubetonointi alkoi. Näissä tapauksissa ruiskubetoni toimii sokkanauhana, joka estää avainlohkon putoamisen.

Olosuhteita, joissa ruhjeiden aktivoituminen eli rapautumisen huomattava nopeutuminen hapen katalysoivasta vaikutuksesta voi alkaa, on erittäin vaikeata huomata tutkimus- ja rakennusvaiheessa. Tämän asian havainnoiminen vaatii vahvaa geologista tietotaitoa vielä rakennusaikaisessakin suunnittelussa. Kaikkien tämän tyyppisten vaurioiden perinpohjainen tutkiminen lisää tietoa ruhjeiden pitkäaikaiskäyttäytymisestä. Tätä kerättyä tietoa voidaan siirtää analogioina uusiin tunnelikohteisiin ja näin helpottaa niiden suunnittelua ja rakentamista.

Tunnelien pitkäaikaiskäyttäytymisen seurannassa ja korjausten suunnittelussa suurena apuna on tunneleiden hyvä tekninen dokumentointi. Dokumentoitavia asioita ovat ainakin kallion rakenne ja geologia, lujitusmäärät ja -kohdat sekä tunnelin tarkepiirustukset. Näiden tietojen säilyttäminen ja kokoaminen auttaa merkittävästi myös suunniteltaessa tulevia tunneleita.

Korjaustavat voidaan jakaa käytännössä kahteen ryhmään:

- sortuman läpäiseminen
- sortuman kiertäminen (ohitustunnelilla)

Sortuman läpäiseminen on yleensä halvempi vaihtoehto, mutta se keskeyttää tunnelin käytön. Tällä ei tietenkään ole merkitystä, jos tunneli on sortumasta johtuen muutenkin käyttökelvoton. Sortuman läpäisy on lisäksi työturvallisuuden kannalta riskialttiimpaa kuin sortuman kiertäminen. Sortuman läpäisyssä heikkousvyöhykkeen korjaus voi tapahtua joko muotin alla (Pulkkilan sortuma) tai pultitetun kalliomassan alla (puhdistettujen jätevesien poistotunneli ja Bolmen-tunneli).

Sortuman kiertämisessä voidaan vanhaa tunnelia mahdollisesti käyttää lähes koko korjauksen ajan. Lisäksi työturvallisuus on parempi, kun varsinaisen sortuman kohdalla ei tarvitse työskennellä. Sortumaa kierrettäessä sortuman aiheuttanut heikkousvyöhyke on lujitettavissa hallitusti ja helpommin kuin sortumaa läpäistäessä.

Sortuman korjaustavasta ei voi antaa mitään yleistä ohjetta, vaan jokaisen kohteen yhteydessä on erikseen mietittävä teknillistaloudellisesti edullisin vaihtoehto.

Korjausten toteuttamista helpottavat hyvin toimivat varajärjestelmät, jotka antavat vapausasteita korjauksen suunnitteluun ja toteuttamiseen. Näin korjauksissa voidaan säästää joskus huomattavasti kustannuksia.

Lujitusmäärien optimoinnissa tulee ottaa huomioon lujitusten kustannusten suhde mahdollisiin korjauskustannuksiin. Tulevien korjauskustannusten ennustaminen on lähes mahdotonta. Tunneli tulee lujittaa siten, että se on mahdollisimman huoltovapaa. Pitkissä vesitunneleissa kaikkia sortumia ei kuitenkaan voida pitkäaikaisessa käytössä välttää. Kaikkien sortumien estämiseen pyrkiminen aiheuttaa vain ylilujittamisen, joka ei ole kokonaistaloudellisesti edullista. Pitkien vesitunneleiden suunnittelussa tuleekin varmistaa tunneleiden mahdollisimman helppo huoltaminen. Tämä voidaan toteuttaa toimivilla varajärjestelmillä sekä tunnelien helpolla ja edullisella tyhjennysmahdollisuudella.

Tunnelien tarkistuksista tulisi tehdä säännönmukaisia, jotta vauriot huomattaisiin mahdollisimman aikaisin, jolloin tunnelin korjaaminen on helpompaa ja edullisempaa.

Periaatteessa lujituskustannukset määräytyvät siinä vaiheessa, kun tunnelin linjaus lyödään lukkoon. Linjauksen päättämisen jälkeen lujituskustannuksiin voidaan vaikuttaa enää lujitusstandardia muuttamalla.

Riittävästä lujitustasosta pitkissä vesitunneleissa ei voi antaa yksiselitteistä ohjetta, suuntaa-antavia päätelmiä kylläkin. Tunneleissa käytetyt ruiskubetonimäärät ovat pitkäaikaiskäytössä riittämätöntä, josta seurauksena on pudonneet kivet tunnelissa. Ohutkin ruiskubetonointikerros estää kallion löyhtymisen sekä rakotäytteen huuhtoutumisesta johtuvien sortumien synnyn. Nykyisellä ruiskubetonoinnin hintatasolla onkin todennäköisesti järkevää lujittaa tunnelit kauttaaltaan ruiskubetonilla. Suuria pultin vaativia lohkareita on tunneleissa tippunut vähän, joten pultituksen radikaaliin lisäämiseen ei ole perusteita.

Käytettäessä kokonaishintaurakkaa tunnelinrakentamisessa ovat lujituksen yksikköhinnat yksi suurimmista spekuloinnin kohteista. Lujituksen optimoinnin kannalta on tärke-

ää saada tarjouksissa mahdollisimman todenmukaiset lujitushinnat. Näin lujitusmääriä on helppo muuttaa vastaamaan todellista tilannetta, joka selviää tarkasti vasta louhinnan yhteydessä. Jos lujitushinnat ovat todellista tasoa alemmat, lujituksen määrittäjään kohdistuu paineita urakoitsijan suunnalta. Jos lujitushinnat ovat todellista tasoa suuremmat, lujituksen määrittäjään kohdistuu paineita rakennuttajan puolelta. Todenmukaisten lujitushintojen saamista edesauttaisi, jos lujitusmäärät jaoteltaisiin entistä tarkemmin. On selvää, että hajalujitus on yksikköhinnoiltaan selvästi kalliimpaa kuin säännöllinen lujitus. Nykytilanteessa urakoitsijalla ei kuitenkaan ole käsitystä säännöllisen lujituksen ja hajalujituksen suhteesta, mikä aiheuttaa ongelmia todellisen lujitushinnan määrittelyssä. Ruiskubetonoinnin osalta alueiden suuruus voitaisiin jakaa kolmeen osaan, < 10 m, 10 – 20 m ja > 20 m. Pultituksen osalta hinnat voitaisiin jakaa myös kolmeen ryhmään: säännöllinen pultitus (pultitusviuhkat), tiheä hajapultitus > 1 pultti/tunnelimetri ja hajapultitus < 1 pultti/ tunnelimetri. Lisäksi lujitushintoihin vaikuttaa lujitusten kokonaismäärä. Tarjouspyyntöasiakirjoihin lujituksen määrästä liitettävien arvioiden pitääkin perustua huolelliseen suunnitteluun, koska mahdollisimman todenmukaiset lujitusmäärät auttavat urakoitsijaa määrittämään lujituksen todellisen hintatason.

# LÄHDELUETTELO

Ahola, Jukka & Viitala, Raimo. 1992. Lujitus- ja tiivistysmäärät Helsingin pientunneleissa. Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto. Tiedote 58/1992.

Alaranta, Raimo. Huoltoteknikko. Pääkaupunkiseudun Vesi Oy. Ilmalankuja 2E, 00250 Helsinki. Keskustelut keväällä 1999.

Alestam, Mats. 1986. Projektet Bolmentunneln. BeFo Bergmekanikdag 1986. Stockholm, Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo. s. 93-99.

Alestam, Mats. 1999. Toim.joht.. Alestams Consulting Hb. Södertäljegatan 30 A, 25251 Helsingborg, Sverige. Haastattelu 8.3.1999.

Broms, B. & Heiner, A.. 1979. Förstärkningen av lerzoner i berganläggningar. Byggforskningens Rapport R130:1979, Stockholm.

Geo (Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto). 1978. Helsingin kaupungin alueen kallioperäkartta (Geo 10k). Myynti: kaupunginmittausosasto.

Harjula, Henrik. 1982. Ympäristökysymykset Päijänne-tunnelin rakentamisessa. Teoksessa: Erkola, Pentti (toim.). Päijänne-tunneli. Helsinki, Pääkaupunkiseudun Vesi Oy. s. 81-85.

Heiner, Anders & Stille, Håkan. 1990. Ras i kraftverkstunnel, Norränge. Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo 245:1/90. Stockholm

Heiniö, Matti. 1986. Päijänne-tunneli. Teoksessa: Roinisto, Jarmo (toim.) Kalliorakentaminen Suomessa. Helsinki, Maanalaisten tilojen rakentamisyhdistys r.y. s. 20-24

HKR (Helsingin kaupungin rakennusvirasto, katuosasto). 1980. Jätevesien poistotunnelijärjestelmä, tarkistettu yleissuunnitelma.

Kandolin, Raimo. 1996. Rakennus Oy Lemminkäinen korjasi Viikinmäen puhdistettujen jätevesien poistotunnelin kalliosortuman. Maansiirto, Vol 37 no. 3. s. 28.

Kähönen, Yrjö. 1979. Helsingin kalliotunneleiden lujitus- ja vuotovesimäärät sekä tarkemittauskäytäntö. Kalliomekaniikan päivä, 23.11.1979. Rakennusgeologinen yhdistys r.y..

Laitakari, Ilkka & Pokki, Eero. 1979. Geologisia havaintoja Päijänne-tunnelista 1. Rakennusjakso, Hl.Koski-Asikkala. Tutkimusraportti n:o 37. Geologinen tutkimuslaitos. Espoo. 23 s.

Mared, Per. 1988. Åtgärdande av tunnelras. Bergsprängningskomittén Diskussionmöte, BK-88. Stockholm, Bergsprängninskommittén. s. 239-247.

Nevalainen, Ari. 1995. Hiidenvesi - yksi Helsingin vedenhankinnan varalähteistä. Vesi-Viesti no. 4. s. 18-19.

Niini, Heikki. 1967. Kallioperän pinnanrakenteesta ja sen geologisesta kehityksestä. Geologi 19:3-4, s. 33-37.

Niini, Heikki. 1968a. Päijänne-Helsinki tunnelitutkimukset. Liite E teoksessa "Helsingin Alueen vedenhankinnan yleissuunnitelma". TVH. Eripainos: RGY julk. 2:20, 28 s.

Niini, Heikki. 1968b. A study of rock frackturing in valleys of Precambrian bedrock. [Väitöskirja geologiassa ja mineralogiassa]. Fennia 97:6, pp 1-60 (sama eripainoksena: RGY julk 3:26)

Niini, Heikki. 1983. Päijänne-tunnelin linjauksen ja louhinnan geologiset perusteet. Rakennustekniikka. Vol 38 no. 8. s. 499-503.

Niini, Heikki. 1999. Professori. Teknillinen korkeakoulu, insinöörigeologian ja geofysiikan laboratorio. 02015 TKK. Keskustelut vuonna 1999.

Niini, Heikki & Uusinoka, Raimo. 1971. Louhintateknilliset tekijät Päijänne-tunnelin reitin valinnassa. Maarakennus ja kuljetus 1971:4.

Palmu, Mauno. 1982. Tunnelin pääosat, niiden suunnittelu ja toiminta. Teoksessa: Erkola, Pentti (toim.). Päijänne-tunneli. Helsinki, Pääkaupunkiseudun Vesi Oy. s. 30-35.

Pokki, Eero. 1982. Geologiset tutkimukset. Teoksessa: Erkola, Pentti (toim.). Päijänne-tunneli. Helsinki, Pääkaupunkiseudun Vesi Oy. s. 75-80.

Pokki, Eero. 1999. FM. Viatek Oy, Pohjantie 3, 02100 Espoo. Keskustelut 1999.

PSV. 1999. Pääkaupunkiseudun Vesi Oy, Toimintakertomus 1998.

Pöllä, Jukka & Ritola, Jouko. 1989. Suuret kalliotilat. Kalliotilojen kuivanapito ja tiivistys. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 1000. 58 s.

Roinisto, Jarmo. 1984. Jätevesien poistotunnelijärjestelmän kalliotekninen suunnittelu. Kalliomekaniikan päivä 14.11.1984. Moniste B36, Vuorimiesyhdistys r.y.

Saarinen, Raimo K. 1995. Puhdistettujen jätevesien poistotunnelin sortuman korjaukseen valmistaudutaan. VesiViesti, no. 4. s. 10-11.

Stanfors, Roy. 1986. Bolmentunneln. Förundersökningar-prognos-verklighet. BeFo Bergmekanikdag 1986. Stockholm, Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo. s. 93-99.

Stanfors, Roy & Alestam, Mats & Stille, Håkan. 1996. Ras i Bolmentunnel 1995, Slutrapport från besiktningsgruppen. Sydvatten Ab, Sydkraft Konsult Ab.

Suominen, Veli. 1997. Smectite alteration in lamprophyre dyke; A case study. GFF (Geologiska föreningens i Stockholm förhandlingar), Vol 199 (Pt. 2, June). pp. 149-150.

Suominen, Veli. 1999. FT. Geologian tutkimuskeskus. Betonimiehenkuja 4, 02150 Espoo. Keskustelut vuonna 1999.

Sylvan, Carl. 1978. The Bolmen water tunnel. Tunnels & Tunneling, Vol 10, No 3. s. 23-26.

Talke, Tero. 1982. Pääkaupunkiseudun Vesi Oy:n hallinto. Teoksessa: Erkola, Pentti (toim.). Päijänne-tunneli. Helsinki, Pääkaupunkiseudun Vesi Oy. s. 48-49.

Tiainen, Esko & Kähönen, Yrjö. 1996. Jätevesien poistotunnelin korjaus. Louhinta- ja kalliotekniikan päivät, 14.-15.11.1996, Koulutuskeskus Dipoli. Suomen Maanrakentajien Keskusliitto r.y. ja Suomen Kalliomekaniikkatoimikunta.

Tiainen, Veli-Matti. 1982. Päijänne-hankkeen yleissuunnitelma. Teoksessa: Erkola, Pentti (toim.). Päijänne-tunneli. Helsinki, Pääkaupunkiseudun Vesi Oy. s. 18-29.

Uimonen, Martti. 1982. Rakentaminen. Teoksessa: Erkola, Pentti (toim.). Päijänne-tunneli. Helsinki, Pääkaupunkiseudun Vesi Oy. s. 50-63.

Varmo, Raili. 1996. Päijänne-tunnelin vesi otetaan kohta syvemmältä kuin aikaisemmin. VesiViesti, no. 1. s. 7.

Wegelius, Arto & Holopainen, Pekka. 1997. Paisuvat kalliosavet. Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto, Tiedote 75/1997.

Wegelius, Arto & Viitala, Raimo. 1995. Lujitusmenekit Helsingin teknisissä tunneleissa. Kalliomekaniikan päivä, 15.11.1995, VTT, Otaniemi, Espoo. Vuorimiesyhdistys r.y..

## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 31.3.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Päijänne-tunneli, Hämeenkosken sortuma |
| **Tilaaja:** | Geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 1 | **Paaluluku:** | PL 84 826 |
| **Sijainti:** | sortumakasasta otettua hienoainesta | | |

| **Näytteen pinta-ala:** | **Näytteen kuivamassa:** | *) normaali näytteen pinta-ala |
|---|---|---|
| 20 cm^2 | 20 grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | 0,074 mm | kuivaseulottu |

**ESIKUORMITUS:**

| **Esikonsolidaatiopaine:** | **Esikonsolidaatioaika:** | *) normaali esikonsolidaatiopaine |
|---|---|---|
| 2 MPa | 40 tuntia | on 2 MPa ja aika n. 24 tuntia |

**TULOKSET:**

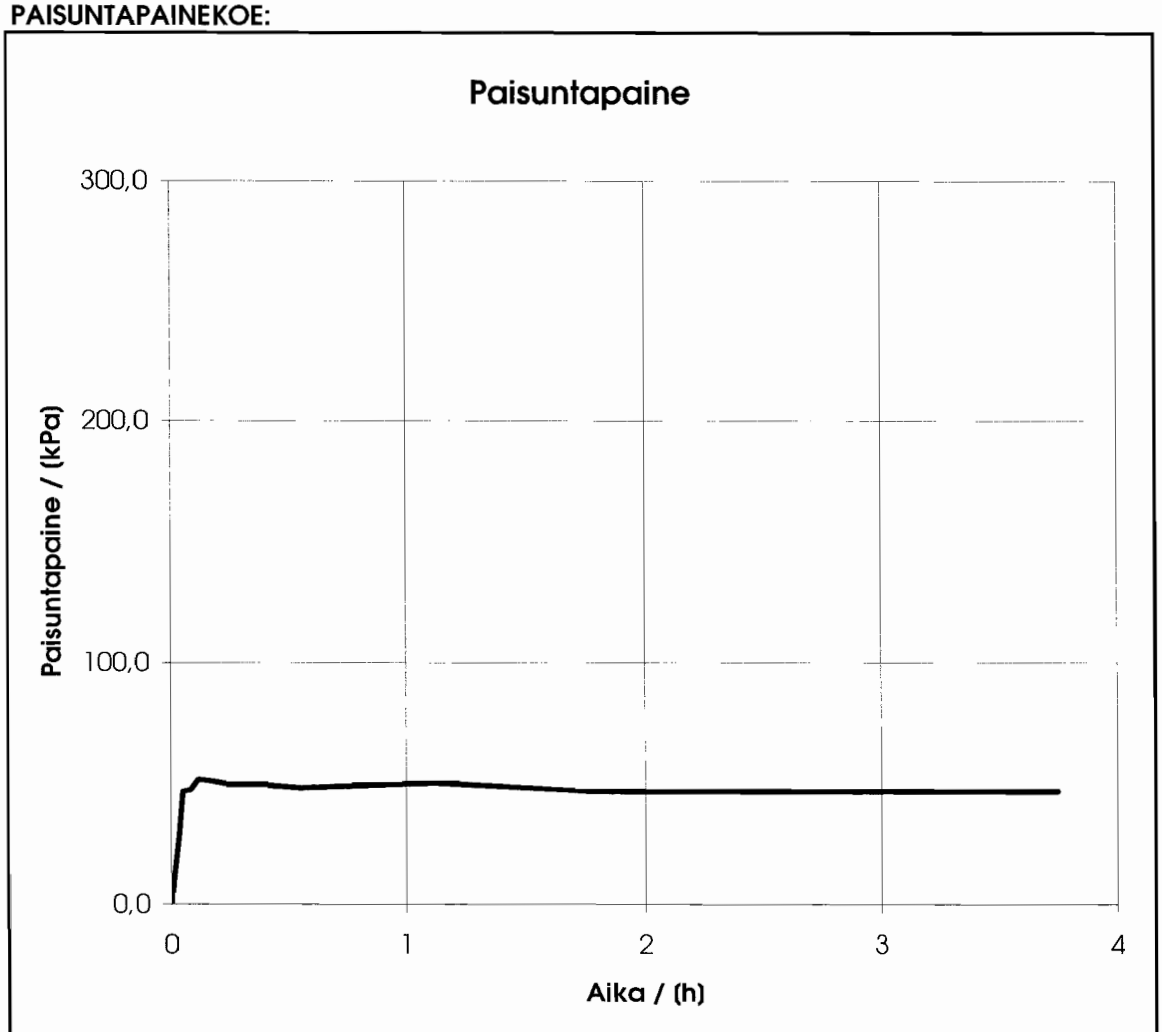
| | |
|---|---|
| **Maksimi paisuntapaine:** | **Loppupaine:** |
| 51,4 kPa | 46,4 kPa |
| **Maksimipaineen aika:** | **Loppupaineen aika:** |
| 0,07 h.min | 3,45 h.min |

**KOKONAISPAISUNTA:**

**Näytteen paksuus mm:** **Kokonaispaisunta:**

| alku / mm | loppu / mm | mm | % | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | kokonaispaisunta 1vrk |

**PAISUNTAPAINEKOE:**



**PAISUNTAPAINEKOE**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 31.3.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Päijänne-tunneli, Hämeenkosken sortuma |
| **Tilaaja:** | Geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 1 | **Paaluluku:** | PL 84 826 | |
| **Sijainti:** | sortumakasasta otettua hienoainesta | | | |
| **Näytteen pinta-ala:** | | **Näytteen kuivamassa:** | | *) normaali näytteen pinta-ala |
| 20 | cm^2 | 20 | grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | | 0,074 | mm | kuivaseulottu |

**MITTAUSTULOKSET:**

| **Mittaushetki (hh.mm)** | **Paisunta-paine (kPa)** | Aika (hh.mm) | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| **0,00** | **0,0** | 0 | 1000,00 |
| **0,01** | **17,9** | 0 | 997,50 |
| **0,02** | **27,9** | 0 | 996,10 |
| **0,03** | **46,4** | 0 | 993,50 |
| **0,05** | **47,1** | 0 | 993,40 |
| **0,07** | **51,4** | 0 | 992,80 |
| **0,10** | **50,7** | 0 | 992,90 |
| **0,13** | **50,0** | 0 | 993,00 |
| **0,15** | **49,3** | 0 | 993,10 |
| **0,22** | **49,3** | 0 | 993,10 |
| **0,33** | **47,9** | 1 | 993,30 |
| **1,07** | **50,0** | 1 | 993,00 |
| **1,47** | **46,4** | 2 | 993,50 |
| **2,54** | **46,4** | 3 | 993,50 |
| **3,45** | **46,4** | 4 | 993,50 |

## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 12.5.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Päijänne-tunneli, Hämeenkosken sortuma |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 2 | **Paaluluku:** | 84 750 |
| **Sijainti:** | sortuman eteläpuolelta (n. 50 m) tunnelin pohjalta otettu hienoainesnäyte | | |

| **Näytteen pinta-ala:** | **Näytteen kuivamassa:** | *) normaali näytteen pinta-ala |
|---|---|---|
| 20 cm^2 | 20 grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | 0,074 mm | kuivaseulottu |

**ESIKUORMITUS:**

| **Esikonsolidaatiopaine:** | **Esikonsolidaatioaika:** | *) normaali esikonsolidaatiopaine |
|---|---|---|
| 2 MPa | 20 tuntia | on 2 MPa ja aika n. 24 tuntia |

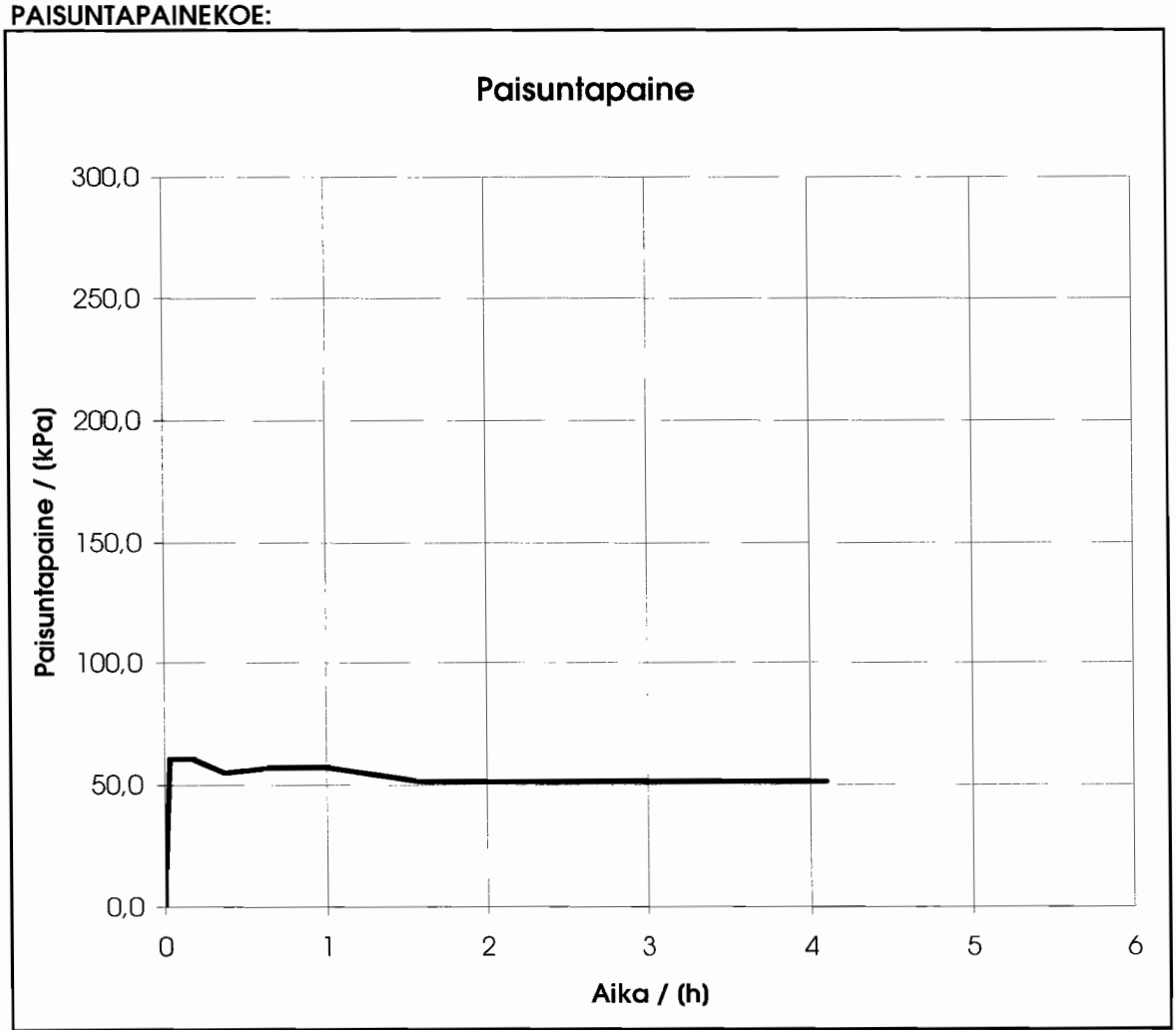
**TULOKSET:**

| **Maksimi paisuntapaine:** | **Loppupaine:** |
|---|---|
| 60,7 kPa | 24,3 kPa |
| **Maksimipaineen aika:** | **Loppupaineen aika:** |
| 0,07 h.min | 4,06 h.min |

**KOKONAISPAISUNTA:**

| **Näytteen paksuus mm:** | | **Kokonaispaisunta:** | | |
|---|---|---|---|---|
| **alku / mm** | **loppu / mm** | **mm** | **%** | |
| 6,52 | 7,20 | 0,68 | 10,43 | *) 1 vrk |

**PAISUNTAPAINEKOE:**



**PAISUNTAPAINEKOE**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 12.5.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Päijänne-tunneli, Hämeenkosken sortuma |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 2 | **Paaluluku:** | 84 750 |
| **Sijainti:** | sortuman eteläpuolelta (n. 50 m) tunnelin pohjalta otettu hienoainesnäyte | | |
| **Näytteen pinta-ala:** | | **Näytteen kuivamassa:** | *) normaali näytteen pinta-ala |
| **20** | cm^2 | **20** | grammaa on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | | **0,074** | mm kuivaseulottu |

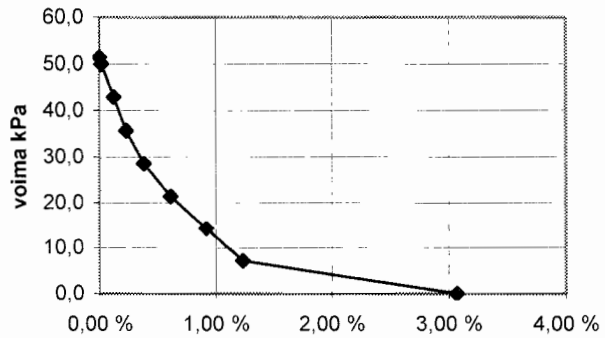
**MITTAUSTULOKSET:**

| Mittaushetki (hh.mm) | Paisunta-paine (kPa) | Aika (hh.mm) | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,0 | 0 | 1000,00 |
| 0,01 | 32,1 | 0 | 995,50 |
| 0,02 | 60,7 | 0 | 991,50 |
| 0,03 | 60,7 | 0 | 991,50 |
| 0,06 | 60,7 | 0 | 991,50 |
| 0,10 | 60,7 | 0 | 991,50 |
| 0,22 | 55,0 | 0 | 992,30 |
| 0,41 | 57,1 | 1 | 992,00 |
| 1,00 | 57,1 | 1 | 992,00 |
| 1,35 | 51,4 | 2 | 992,80 |
| 2,21 | 51,4 | 2 | 992,80 |
| 3,00 | 51,4 | 3 | 992,80 |
| 4,06 | 51,4 | 4 | 992,80 |

**PALAUTUS**

| | | Siirtymä | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 % | 51,4 | 0,000 | 992,80 |
| 0,02 % | 50,0 | 0,001 | 993,00 |
| 0,12 % | 42,9 | 0,008 | 994,00 |
| 0,23 % | 35,7 | 0,015 | 995,00 |
| 0,38 % | 28,6 | 0,025 | 996,00 |
| 0,61 % | 21,4 | 0,040 | 997,00 |
| 0,92 % | 14,3 | 0,060 | 998,00 |
| 1,23 % | 7,1 | 0,080 | 999,00 |
| 3,07 % | 0,0 | 0,200 | 1000,00 |

**Muodonmuutoskuvaaja palautuksessa**



## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päiv:** | 4.10.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn nro:** | 6579 | **Kohde:** | Päijänne-tunneli, Hämeenkosken sortuma |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Näyt. nro:** | HÄM F | **Paaluluku:** | PL 84 826 | |
| **Sijainti:** | Kivinäytteen HÄM F hajoamistulos | | | |
| **Näytteen pinta-ala:** | | **Näytteen kuivamassa:** | | *) normaali näyteen pinta-ala |
| 20 | cm^2 | 20 | g | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | | 0,074 | mm | kuivaseulottu |

**ESIKUORMITUS:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Esikonsolidaatiopaine:** | | **Esikonsolidaatioaika:** | *) normaali esikonsolidaatiopaine |
| 2 | MPa | 20 | tuntia | on 2 MPa ja aika n. 24 tuntia |

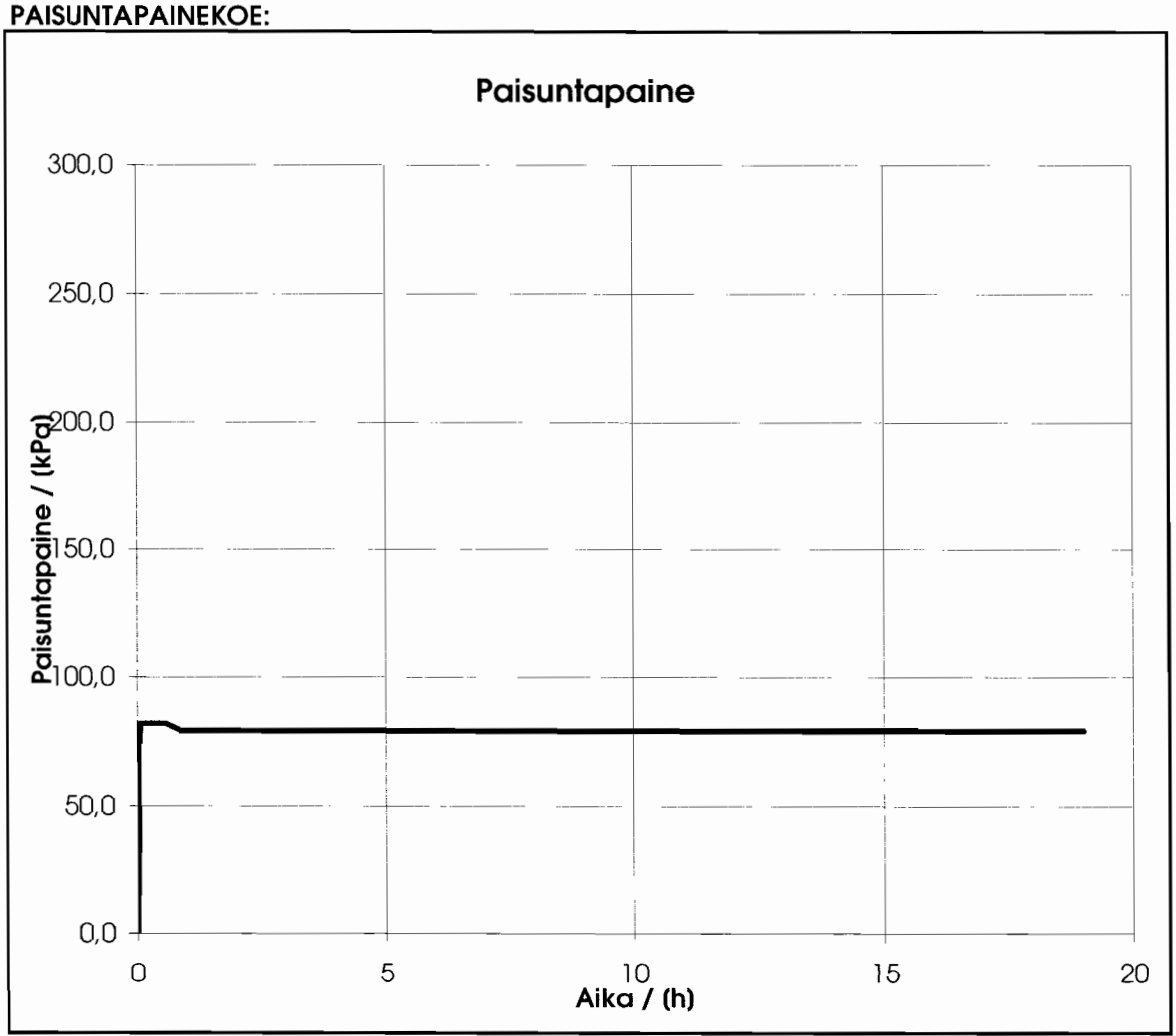
**TULOKSET:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Maksimi paisuntapaine:** | | **Loppupaine:** | |
| 82,1 | kPa | 79,3 | kPa |
| **Maksimipaineen aika:** | | **Loppupaineen aika:** | |
| 0,04 | h.min | 19,00 | h.min |

**KOKONAISPAISUNTA:**

| **Näytteen paksuus mm:** | | **Kokonaispaisunta:** | | |
|---|---|---|---|---|
| **alku / mm** | **loppu / mm** | **mm** | **%** | |
| 6,70 | 7,50 | 0,80 | 11,94 | *) 1 vrk |

**PAISUNTAPAINEKOE:**



## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päiv:** | 4.10.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn nro:** | 6579 | **Kohde:** | Päijänne-tunneli, Hämeenkosken sortuma |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

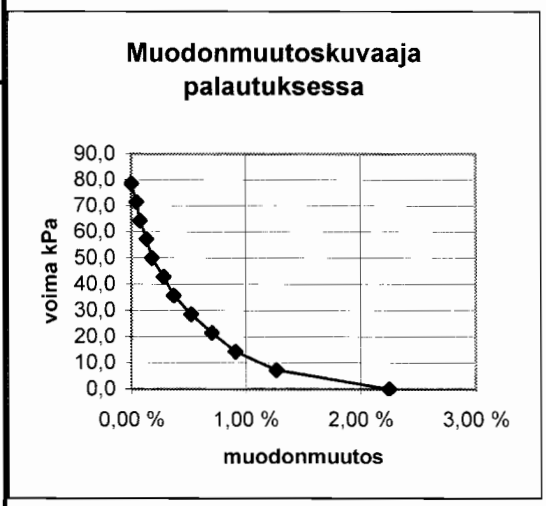
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Näyt. nro:** | HÄM F | **Paaluluku:** | PL 84 826 | |
| **Sijainti:** | Kivinäytteen HÄM F hajoamistulos | | | |
| **Näytteen pinta-ala:** | | **Näytteen kuivamassa:** | | *) normaali näyteen pinta-ala |
| 20 | cm^2 | 20 | g | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | | 0,074 | mm | kuivaseulottu |

**MITTAUSTULOKSET:**

| Mittaushetki (hh.mm) | Paisunta-paine (kPa) | Aika (hh.mm) | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,0 | 0 | 1000,00 |
| 0,01 | 7,1 | 0 | 999,00 |
| 0,02 | 71,4 | 0 | 990,00 |
| 0,04 | 82,1 | 0 | 988,50 |
| 0,06 | 82,1 | 0 | 988,50 |
| 0,13 | 82,1 | 0 | 988,50 |
| 0,20 | 82,1 | 0 | 988,50 |
| 0,33 | 82,1 | 1 | 988,50 |
| 0,52 | 79,3 | 1 | 988,90 |
| 1,42 | 79,3 | 2 | 988,90 |
| 2,35 | 79,3 | 3 | 988,90 |
| 3,05 | 79,3 | 3 | 988,90 |
| 19,00 | 79,3 | 19 | 988,90 |

**PALAUTUS**

| | | Siirtymä | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 % | 78,6 | 0,000 | 989,00 |
| 0,04 % | 71,4 | 0,003 | 990,00 |
| 0,07 % | 64,3 | 0,005 | 991,00 |
| 0,13 % | 57,1 | 0,009 | 992,00 |
| 0,18 % | 50,0 | 0,012 | 993,00 |
| 0,28 % | 42,9 | 0,019 | 994,00 |
| 0,37 % | 35,7 | 0,025 | 995,00 |
| 0,52 % | 28,6 | 0,035 | 996,00 |
| 0,70 % | 21,4 | 0,047 | 997,00 |
| 0,91 % | 14,3 | 0,061 | 998,00 |
| 1,27 % | 7,1 | 0,085 | 999,00 |
| 2,25 % | 0,0 | 0,151 | 1000,00 |



## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 28.4.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Tavallisen saven kokeet |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 1 | **Paaluluku:** | x:59476 y:25140 syv. n. 6-8 m |
| **Sijainti:** | Helsinki | | |

| **Näytteen pinta-ala:** | **Näytteen kuivamassa:** | |
|---|---|---|
| 20 cm^2 | 20 grammaa | *) normaali näytteen pinta-ala on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | 0,074 mm | kuivaseulottu |

**ESIKUORMITUS:**

| **Esikonsolidaatiopaine:** | **Esikonsolidaatioaika:** | |
|---|---|---|
| 2 MPa | 20 tuntia | *) normaali esikonsolidaatiopaine on 2 MPa ja aika n. 24 tuntia |

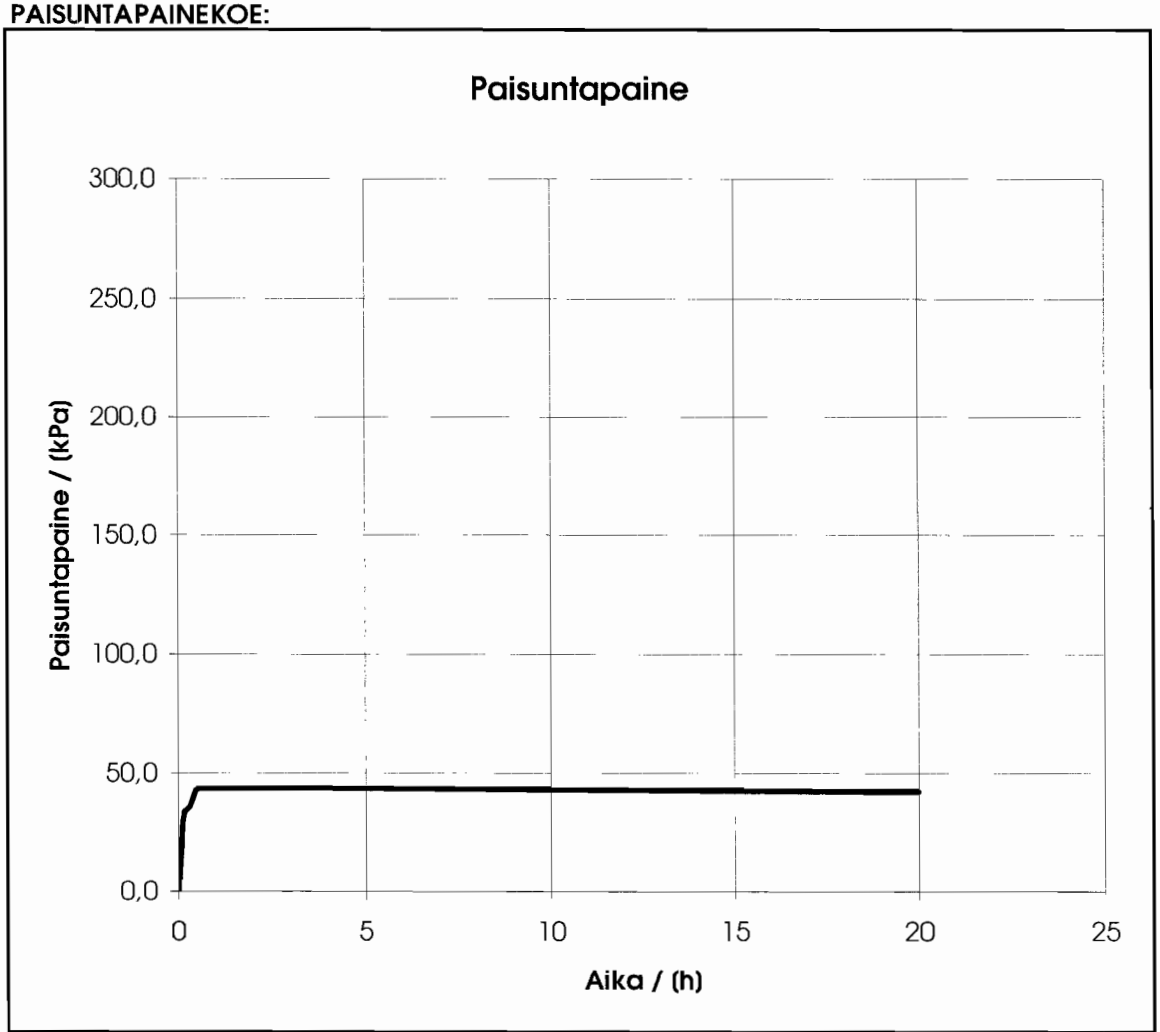
**TULOKSET:**

| **Maksimi paisuntapaine:** | **Loppupaine:** |
|---|---|
| 43,6 kPa | 42,1 kPa |
| **Maksimipaineen aika:** | **Loppupaineen aika:** |
| 0,36 h.min | 20,00 h.min |

**KOKONAISPAISUNTA:**

| **Näytteen paksuus mm:** | | **Kokonaispaisunta:** | | |
|---|---|---|---|---|
| **alku / mm** | **loppu / mm** | **mm** | **%** | |
| 7,50 | 9,20 | 1,70 | 22,67 | *) 1 vrk |

**PAISUNTAPAINEKOE:**



## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 28.4.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Tavallisen saven kokeet |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 1 | **Paaluluku:** | x:59476 y:25140 syv. n. 6-8 m |
| **Sijainti:** | Helsinki | | |

| **Näytteen pinta-ala:** | **Näytteen kuivamassa:** | *) normaali näytteen pinta-ala |
|---|---|---|
| **20** cm^2 | **20** grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | **0,074** mm | kuivaseulottu |

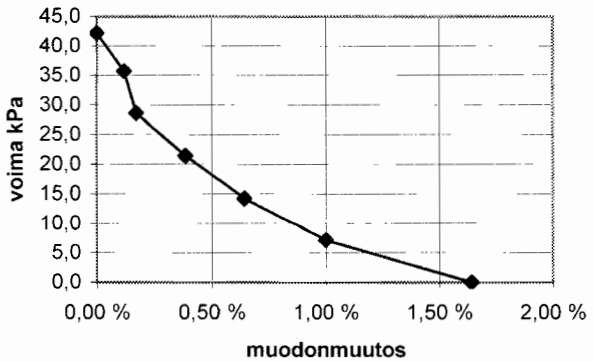
**MITTAUSTULOKSET:**

| Mittaushetki (hh.mm) | Paisunta-paine (kPa) | Aika (hh.mm) | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,0 | 0 | 1000,00 |
| 0,01 | 2,1 | 0 | 999,70 |
| 0,03 | 10,7 | 0 | 998,50 |
| 0,05 | 18,6 | 0 | 997,40 |
| 0,07 | 28,6 | 0 | 996,00 |
| 0,10 | 33,6 | 0 | 995,30 |
| 0,19 | 35,7 | 0 | 995,00 |
| 0,28 | 42,9 | 0 | 994,00 |
| 0,36 | 43,6 | 1 | 993,90 |
| 1,02 | 43,6 | 1 | 993,90 |
| 1,30 | 43,6 | 2 | 993,90 |
| 2,00 | 43,6 | 2 | 993,90 |
| 3,00 | 43,6 | 3 | 993,90 |
| 3,50 | 43,6 | 4 | 993,90 |
| 20,00 | 42,1 | 20 | 994,10 |

**PALAUTUS**

| | | Siirtymä | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 % | 42,1 | 0,000 | 994,10 |
| 0,12 % | 35,7 | 0,009 | 995,00 |
| 0,17 % | 28,6 | 0,013 | 996,00 |
| 0,39 % | 21,4 | 0,029 | 997,00 |
| 0,64 % | 14,3 | 0,048 | 998,00 |
| 1,00 % | 7,1 | 0,075 | 999,00 |
| 1,64 % | 0,0 | 0,123 | 1000,00 |

**Muodonmuutoskuvaaja palautuksessa**



## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 9.7.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Tavallisen saven kokeet |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 2 | **Paaluluku:** | x:26712 y:45767 syv. 9,6 m (Tno:5564) |
| **Sijainti:** | Helsinki | | |

| **Näytteen pinta-ala:** | **Näytteen kuivamassa:** | |
|---|---|---|
| 20 cm^2 | 20 grammaa | *) normaali näytteen pinta-ala on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | 0,074 mm | kuivaseulottu |

**ESIKUORMITUS:**

| **Esikonsolidaatiopaine:** | **Esikonsolidaatioaika:** | |
|---|---|---|
| 2 MPa | 20 tuntia | *) normaali esikonsolidaatiopaine on 2 MPa ja aika n. 24 tuntia |

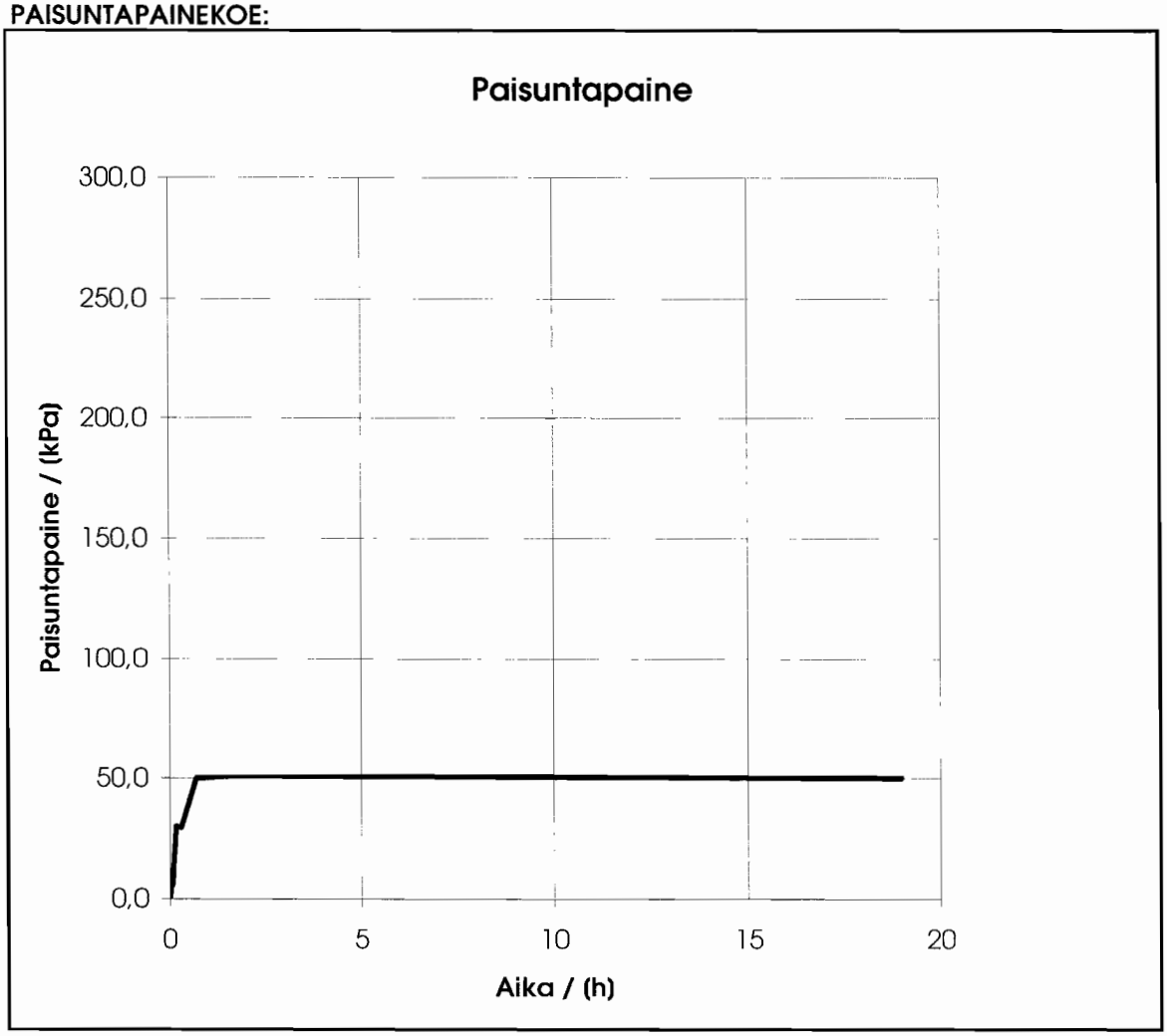
**TULOKSET:**

| | |
|---|---|
| **Maksimi paisuntapaine:** | **Loppupaine:** |
| 50,7 kPa | 50 kPa |
| **Maksimipaineen aika:** | **Loppupaineen aika:** |
| 1,37 h.min | 19,00 h.min |

**KOKONAISPAISUNTA:**

| **Näytteen paksuus mm:** | | **Kokonaispaisunta:** | | |
|---|---|---|---|---|
| **alku / mm** | **loppu / mm** | **mm** | **%** | |
| 8,00 | 9,50 | 1,50 | 18,75 | *) 1 vrk |

**PAISUNTAPAINEKOE:**



## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 9.7.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Tavallisen saven kokeet |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 2 | **Paaluluku:** | x:26712 y:45767 syv. 9,6 m (Tno:5564) |
| **Sijainti:** | Helsinki | | |

| **Näytteen pinta-ala:** | **Näytteen kuivamassa:** | *) normaali näytteen pinta-ala |
|---|---|---|
| **20** cm^2 | **20** grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | **0,074** mm | kuivaseulottu |

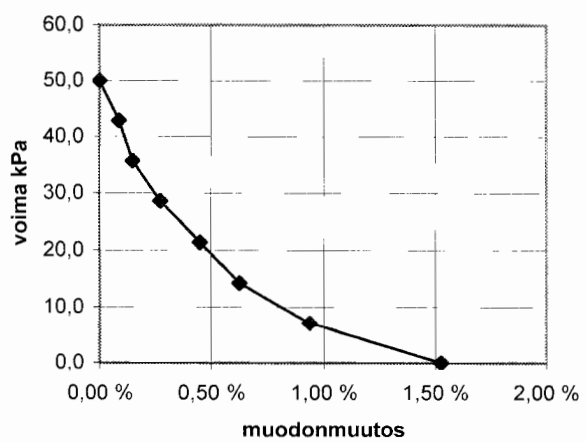
**MITTAUSTULOKSET:**

| Mittaushetki (hh.mm) | Paisunta-paine (kPa) | Aika (hh.mm) | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,0 | 0 | 1000,00 |
| 0,01 | 3,6 | 0 | 999,50 |
| 0,02 | 5,7 | 0 | 999,20 |
| 0,04 | 5,7 | 0 | 999,20 |
| 0,10 | 30,0 | 0 | 995,80 |
| 0,18 | 29,3 | 0 | 995,90 |
| 0,42 | 50,0 | 1 | 993,00 |
| 0,55 | 50,0 | 1 | 993,00 |
| 1,37 | 50,7 | 2 | 992,90 |
| 2,25 | 50,7 | 2 | 992,90 |
| 19,00 | 50,0 | 19 | 993,00 |

**PALAUTUS**

| | | Siirtymä | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 % | 50,0 | 0,000 | 993,00 |
| 0,09 % | 42,9 | 0,007 | 994,00 |
| 0,15 % | 35,7 | 0,012 | 995,00 |
| 0,28 % | 28,6 | 0,022 | 996,00 |
| 0,45 % | 21,4 | 0,036 | 997,00 |
| 0,63 % | 14,3 | 0,050 | 998,00 |
| 0,94 % | 7,1 | 0,075 | 999,00 |
| 1,53 % | 0,0 | 0 | 1000,00 |

**Muodonmuutoskuvaaja palautuksessa**



## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 30.7.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Tavallisen saven kokeet |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 3 | **Paaluluku:** | x:22778 y:58013 syv. 4,5-5 m (Tno:5685) | |
| **Sijainti:** | Helsinki | | | |
| **Näytteen pinta-ala:** | | **Näytteen kuivamassa:** | | *) normaali näytteen pinta-ala |
| 20 | cm^2 | 20 | grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | | 0,074 | mm | kuivaseulottu |

**ESIKUORMITUS:**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Esikonsolidaatiopaine:** | | **Esikonsolidaatioaika:** | | *) normaali esikonsolidaatiopaine |
| 2 | MPa | 20 | tuntia | on 2 MPa ja aika n. 24 tuntia |

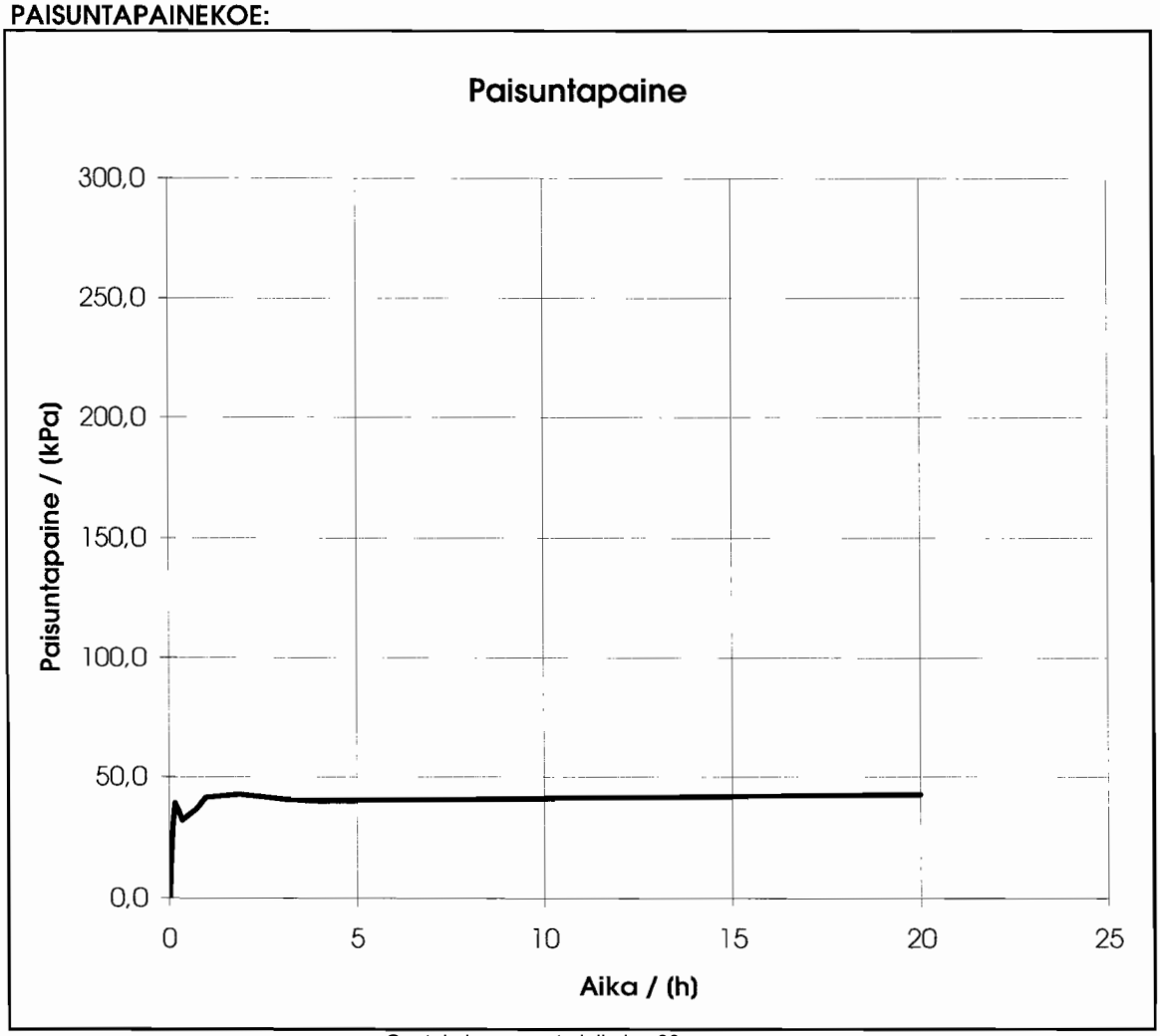
**TULOKSET:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Maksimi paisuntapaine:** | | **Loppupaine:** | |
| 42,9 | kPa | 42,9 | kPa |
| **Maksimipaineen aika:** | | **Loppupaineen aika:** | |
| 1,52 | h.min | 20,00 | h.min |

**KOKONAISPAISUNTA:**

| **Näytteen paksuus mm:** | | **Kokonaispaisunta:** | | |
|---|---|---|---|---|
| **alku / mm** | **loppu / mm** | **mm** | **%** | |
| 8,35 | 9,60 | 1,25 | 14,97 | *) 1 vrk |

**PAISUNTAPAINEKOE:**



## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 30.7.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Tavallisen saven kokeet |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 3 | **Paaluluku:** | x:22778 y:58013 syv. 4,5-5 m (Tno:5685) |
| **Sijainti:** | Helsinki | | |

| **Näytteen pinta-ala:** | | **Näytteen kuivamassa:** | | *) normaali näytteen pinta-ala |
|---|---|---|---|---|
| **20** | cm^2 | **20** | grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | | **0,074** | mm | kuivaseulottu |

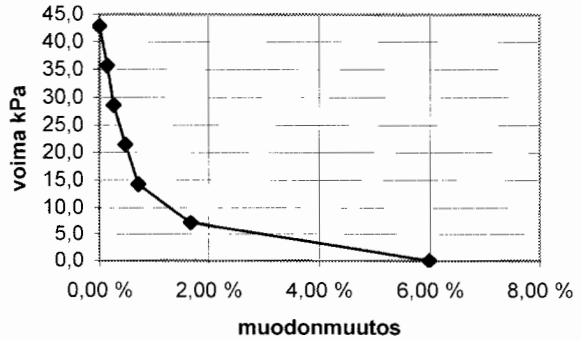
**MITTAUSTULOKSET:**

| **Mittaushetki (hh.mm)** | **Paisunta-paine (kPa)** | Aika (hh.mm) | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| **0,00** | **0,0** | 0 | 1000,00 |
| **0,01** | **0,7** | 0 | 999,90 |
| **0,02** | **7,1** | 0 | 999,00 |
| **0,03** | **14,3** | 0 | 998,00 |
| **0,06** | **30,0** | 0 | 995,80 |
| **0,10** | **39,3** | 0 | 994,50 |
| **0,15** | **36,4** | 0 | 994,90 |
| **0,21** | **32,1** | 0 | 995,50 |
| **0,43** | **36,4** | 1 | 994,90 |
| **0,59** | **41,4** | 1 | 994,20 |
| **1,52** | **42,9** | 2 | 994,00 |
| **3,05** | **40,7** | 3 | 994,30 |
| **4,00** | **40,0** | 4 | 994,40 |
| **20,00** | **42,9** | 20 | 994,00 |

**PALAUTUS**

| | | Siirtymä | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| **0,00 %** | **42,9** | 0,000 | 994,00 |
| **0,14 %** | **35,7** | 0,012 | 995,00 |
| **0,26 %** | **28,6** | 0,022 | 996,00 |
| **0,48 %** | **21,4** | 0,040 | 997,00 |
| **0,72 %** | **14,3** | 0,060 | 998,00 |
| **1,68 %** | **7,1** | 0,140 | 999,00 |
| **5,99 %** | **0,0** | 0,500 | 1000,00 |

**Muodonmuutoskuvaaja palautuksessa**



## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä** | 27.8.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Tavallisen saven kokeet |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 4 | **Paaluluku:** | x:25242 y:54637 syv. 4,8 m (Tno:5765) |
| **Sijainti:** | Helsinki | | |

| **Näytteen pinta-ala:** | **Näytteen kuivamassa:** | |
|---|---|---|
| 20 cm^2 | 20 g | *) normaali näytteen pinta-ala on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | 0,074 mm | kuivaseulottu |

**ESIKUORMITUS:**

| **Esikonsolidaatiopaine:** | **Esikonsolidaatioaika:** | |
|---|---|---|
| 2 MPa | 20 tuntia | *) normaali esikonsolidaatiopaine on 2 MPa ja aika n. 24 tuntia |

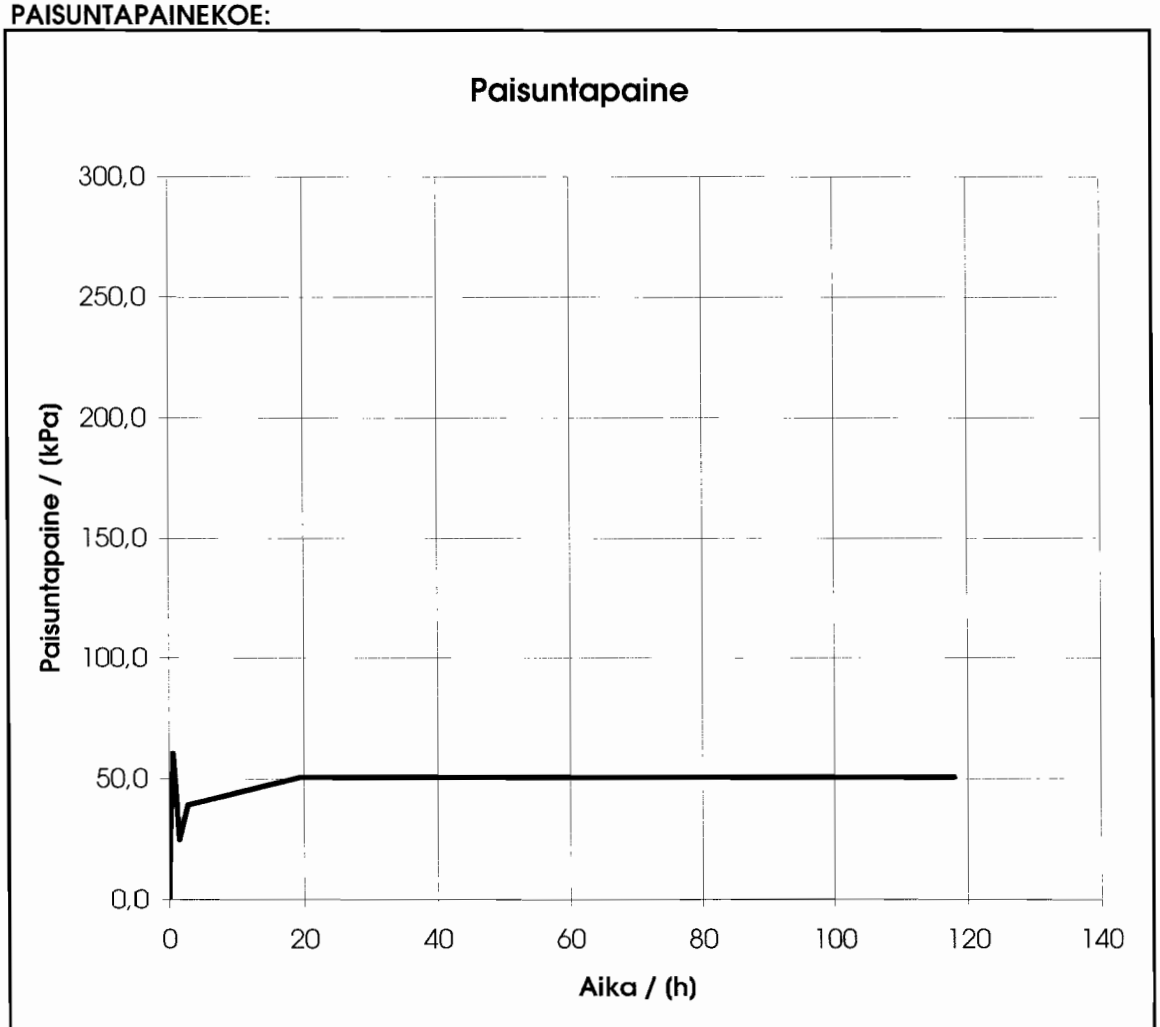
**TULOKSET:**

| | |
|---|---|
| **Maksimi paisuntapaine:** | **Loppupaine:** |
| 60,7 kPa | 57,7 kPa |
| **Maksimipaineen aika:** | **Loppupaineen aika:** |
| 0,38 h.min | 118,00 h.min |

**KOKONAISPAISUNTA:**

| **Näytteen paksuus mm:** | | **Kokonaispaisunta:** | | |
|---|---|---|---|---|
| **alku / mm** | **loppu / mm** | **mm** | **%** | |
| 8,57 | 9,00 | 0,43 | 5,02 | *) 1 vrk |

**PAISUNTAPAINEKOE:**



## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä** | 27.8.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Tavallisen saven kokeet |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 4 | **Paaluluku:** | x:25242 y:54637 syv. 4,8 m (Tno:5765) |
| **Sijainti:** | Helsinki | | |

| **Näytteen pinta-ala:** | | **Näytteen kuivamassa:** | | *) normaali näytteen pinta-ala |
|---|---|---|---|---|
| 20 | cm^2 | 20 | g | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | | 0,074 | mm | kuivaseulottu |

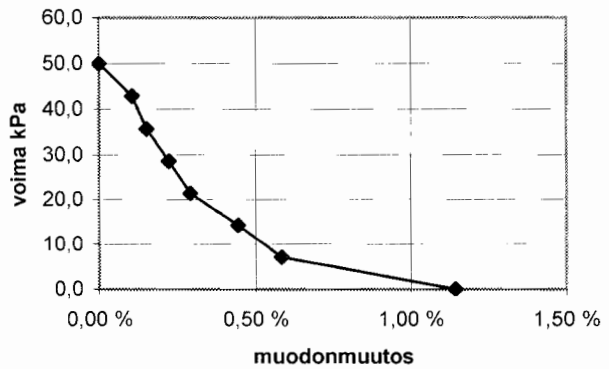
**MITTAUSTULOKSET:**

| Mittaushetki (hh.mm) | Paisunta-paine (kPa) | Aika (hh.mm) | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,0 | 0 | 1000,00 |
| 0,01 | 0,0 | 0 | 1000,00 |
| 0,02 | 14,3 | 0 | 998,00 |
| 0,04 | 22,9 | 0 | 996,80 |
| 0,07 | 28,6 | 0 | 996,00 |
| 0,10 | 28,6 | 0 | 996,00 |
| 0,17 | 40,7 | 0 | 994,30 |
| 0,25 | 42,9 | 0 | 994,00 |
| 0,38 | 60,7 | 1 | 991,50 |
| 1,30 | 25,0 | 2 | 996,50 |
| 2,45 | 39,3 | 3 | 994,50 |
| 19,30 | 50,7 | 20 | 992,90 |
| 25,00 | 50,7 | 25 | 992,90 |
| 118,00 | 50,7 | 118 | 992,90 |

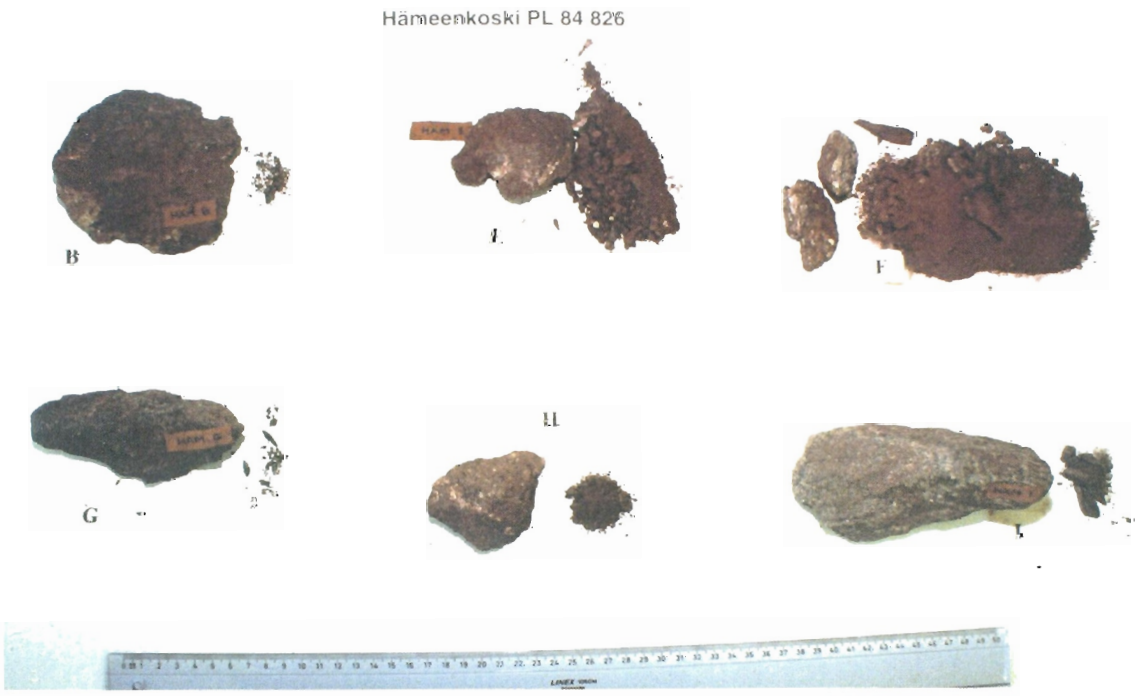
**PALAUTUS**

| | | Siirtymä | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 % | 50,0 | 0,000 | 993,00 |
| 0,11 % | 42,9 | 0,009 | 994,00 |
| 0,15 % | 35,7 | 0,013 | 995,00 |
| 0,22 % | 28,6 | 0,019 | 996,00 |
| 0,29 % | 21,4 | 0,025 | 997,00 |
| 0,44 % | 14,3 | 0,038 | 998,00 |
| 0,58 % | 7,1 | 0,050 | 999,00 |
| 1,14 % | 0,0 | 0,098 | 1000,00 |

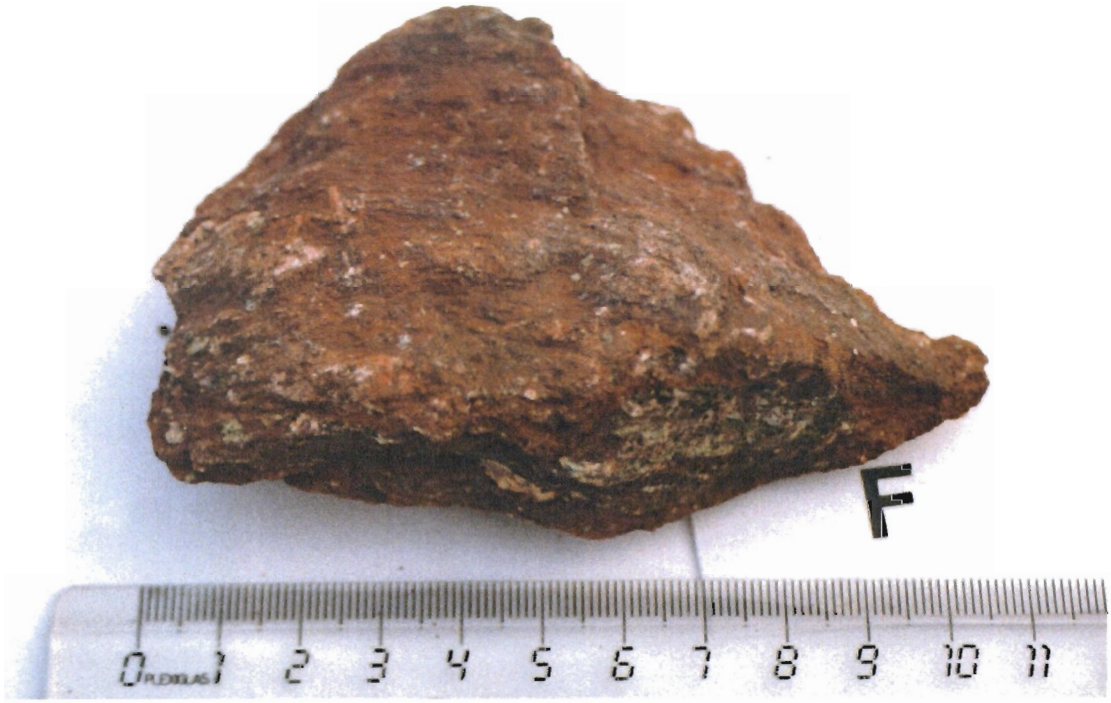
**Muodonmuutoskuvaaja palautuksessa**



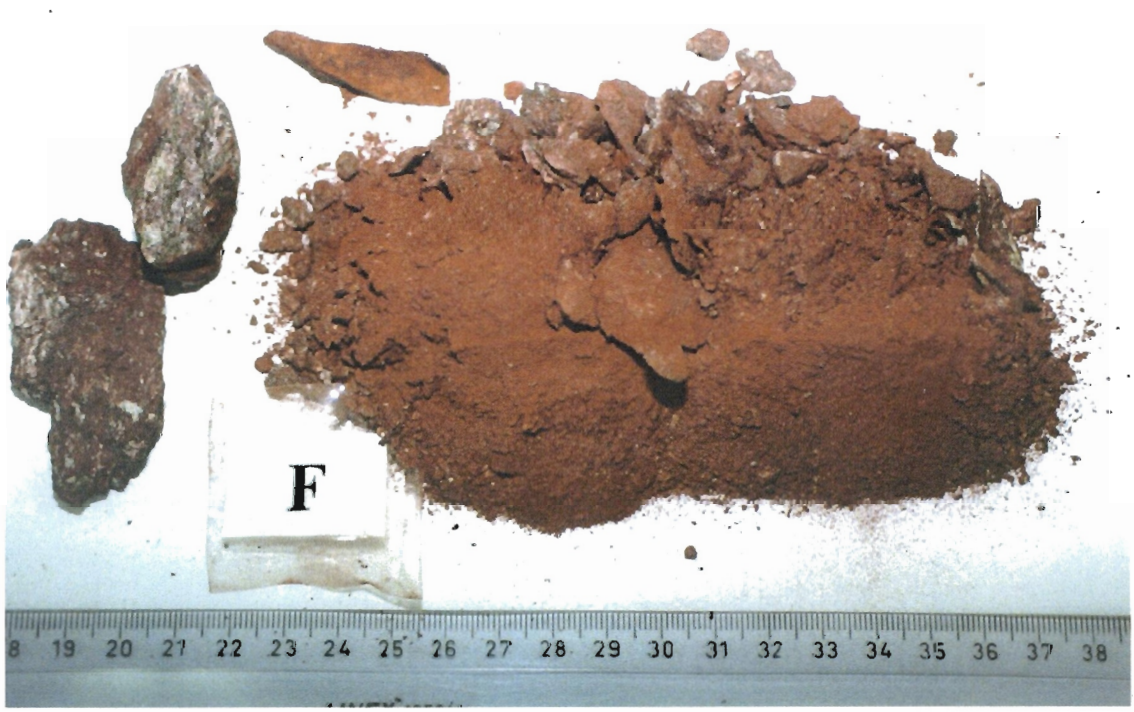
Päijänne-tunnelin Hämeenkosken sortumasta otettuja kivinäytteitä ennen laboratoriotutkimuksia.



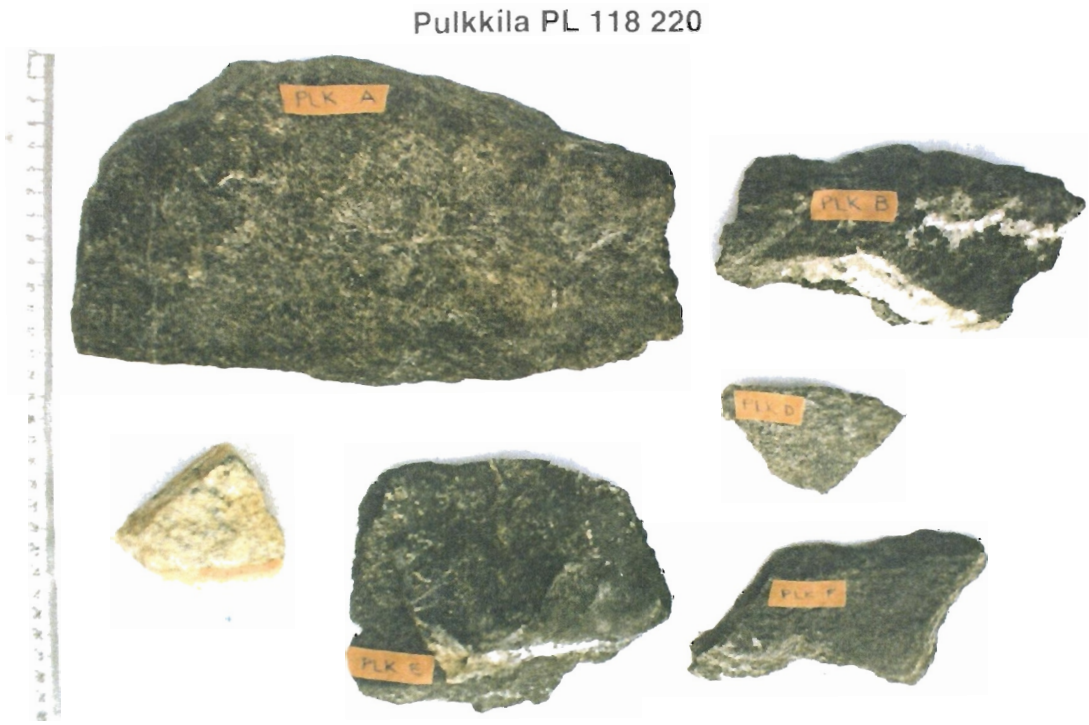

Päijänne-tunnelin Hämeenkosken sortumasta otettuja kivinäytteitä hajoamiskokeen jälkeen.



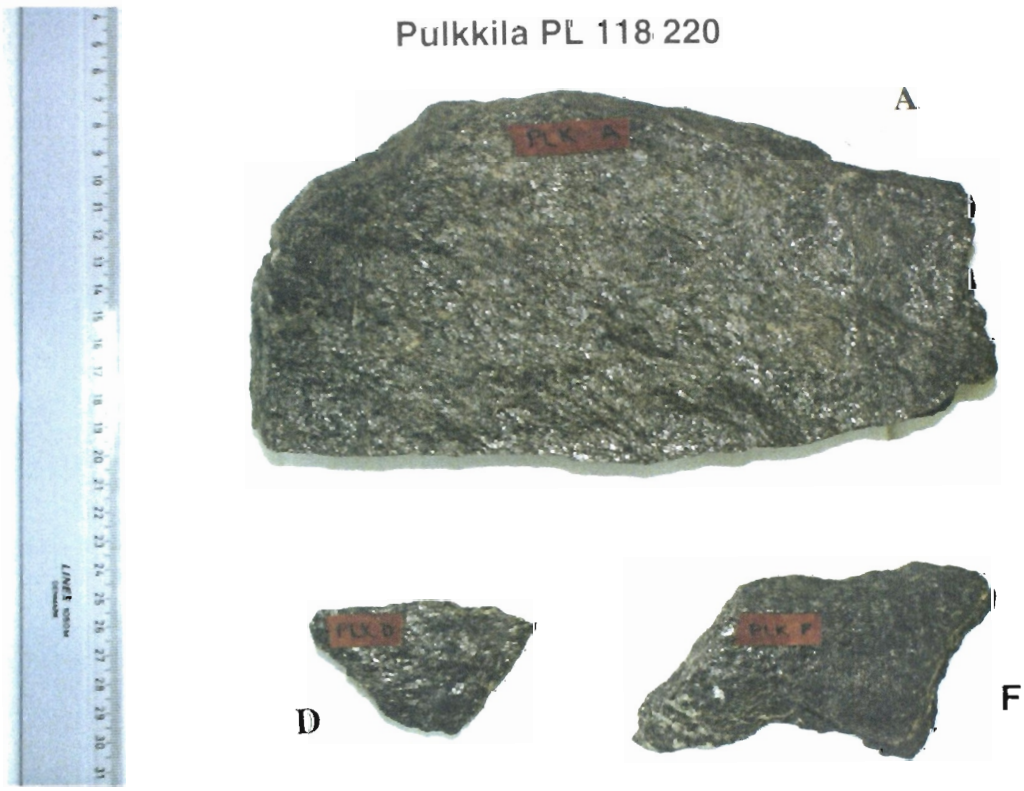

Päijänne-tunnelin Hämeenkosken sortumasta otettu kivinäyte HÄM F ennen laboratoriotutkimuksia.




Päijänne-tunnelin Hämeenkosken sortumasta otettu kivinäyte HÄM F hajoamiskokeen jälkeen.




Päijänne-tunnelin Pulkkilan sortumasta otettuja kivinäytteitä ennen laboratoriotutkimuksia.




Päijänne-tunnelin Pulkkilan sortumasta otettuja kivinäytteitä hajoamiskokeen jälkeen.

**PAISUNTAPAINEKOE**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 22.4.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Päijänne-tunneli, Pulkkilan sortuma |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 1 | **Paaluluku:** | PL 118220 | |
| **Sijainti:** | sortumakasasta otettu hienoainesnäyte | | | |
| **Näytteen pinta-ala:** | | **Näytteen kuivamassa:** | | *) normaali näytteen pinta-ala |
| 20 | cm^2 | 20 | grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | | 0,074 | mm | kuivaseulottu |

**ESIKUORMITUS:**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Esikonsolidaatiopaine:** | | **Esikonsolidaatioaika:** | | *) normaali esikonsolidaatiopaine |
| 2 | MPa | 24 | tuntia | on 2 MPa ja aika n. 24 tuntia |

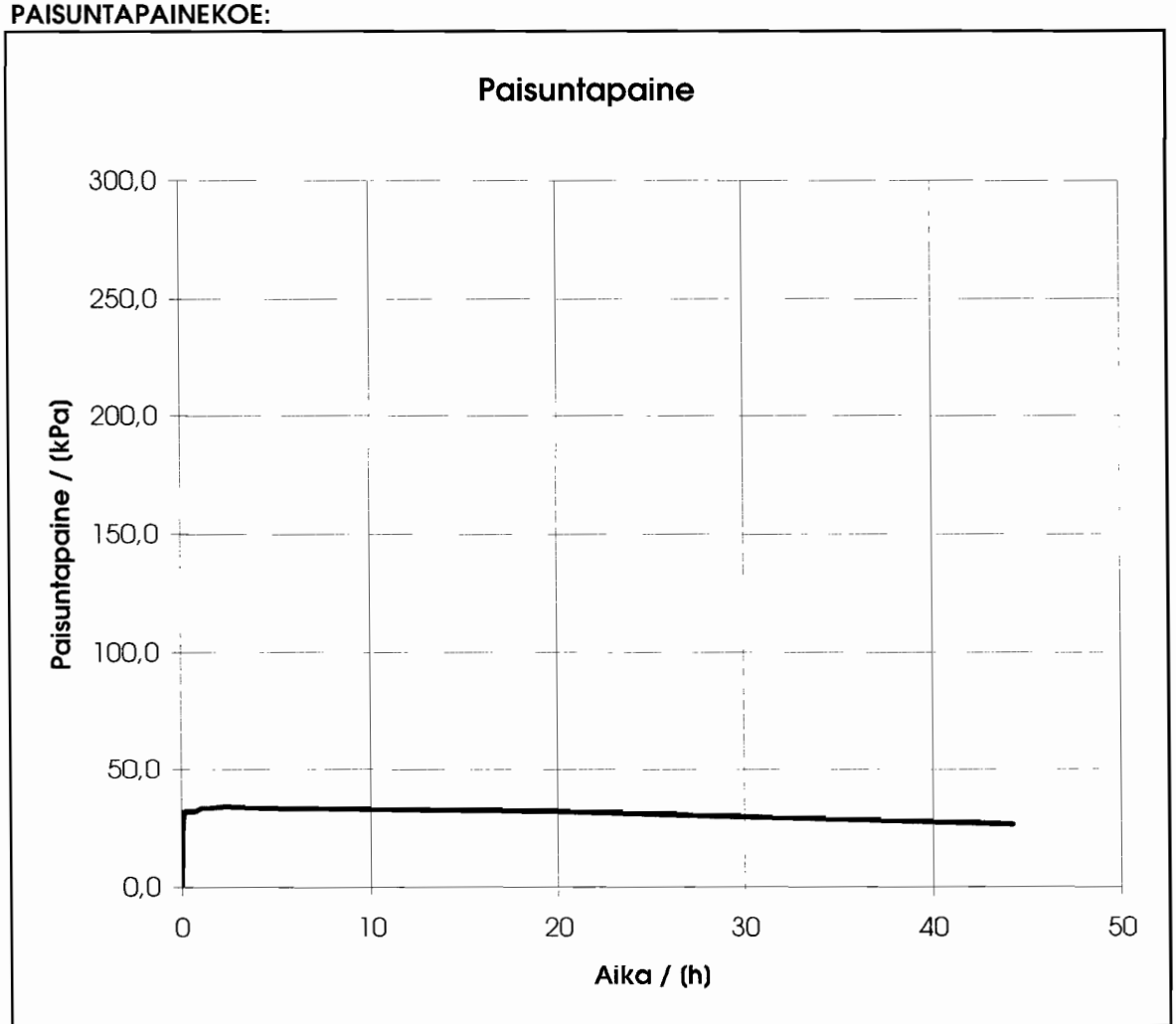
**TULOKSET:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Maksimi paisuntapaine:** | | **Loppupaine:** | |
| 34,3 | kPa | 26,4 | kPa |
| **Maksimipaineen aika:** | | **Loppupaineen aika:** | |
| 2,20 | h.min | 44,12 | h.min |

**KOKONAISPAISUNTA:**

| **Näytteen paksuus mm:** | | **Kokonaispaisunta:** | | |
|---|---|---|---|---|
| **alku / mm** | **loppu / mm** | **mm** | **%** | |
| 6,73 | 7,20 | 0,47 | 6,98 | kokonaispaisunta 1 vrk |

**PAISUNTAPAINEKOE:**



**PAISUNTAPAINEKOE**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 22.4.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Päijänne-tunneli, Pulkkilan sortuma |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 1 | **Paaluluku:** | PL 118220 |
| **Sijainti:** | sortumakasasta otettu hienoainesnäyte | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Näytteen pinta-ala:** | | **Näytteen kuivamassa:** | | *) normaali näytteen pinta-ala |
| **20** | cm^2 | **20** | grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | | **0,074** | mm | kuivaseulottu |

**MITTAUSTULOKSET:**

| **Mittaushetki (hh.mm)** | **Paisunta-paine (kPa)** | Aika (hh.mm) | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| **0,00** | **0,0** | 0 | 1000,00 |
| **0,01** | **12,1** | 0 | 998,30 |
| **0,02** | **20,0** | 0 | 997,20 |
| **0,04** | **27,1** | 0 | 996,20 |
| **0,06** | **30,0** | 0 | 995,80 |
| **0,08** | **31,4** | 0 | 995,60 |
| **0,10** | **32,1** | 0 | 995,50 |
| **0,17** | **32,1** | 0 | 995,50 |
| **0,43** | **32,1** | 1 | 995,50 |
| **1,04** | **33,6** | 1 | 995,30 |
| **1,28** | **33,6** | 1 | 995,30 |
| **2,20** | **34,3** | 2 | 995,20 |
| **4,10** | **33,6** | 4 | 995,30 |
| **20,12** | **32,1** | 20 | 995,50 |
| **44,12** | **26,4** | 44 | 996,30 |

## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 5.5.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Päijänne-tunneli, Pulkkilan sortuma |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 2 | **Paaluluku:** | PL 118220 | |
| **Sijainti:** | sortumakasasta otettu hienoainesnäyte | | | |
| **Näytteen pinta-ala:** | | **Näytteen kuivamassa:** | | *) normaali näytteen pinta-ala |
| 20 | cm^2 | 20 | grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | | 0,074 | mm | kuivaseulottu |

**ESIKUORMITUS:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Esikonsolidaatiopaine:** | | **Esikonsolidaatioaika:** | *) normaali esikonsolidaatiopaine |
| 2 | MPa | 20 | tuntia | on 2 MPa ja aika n. 24 tuntia |

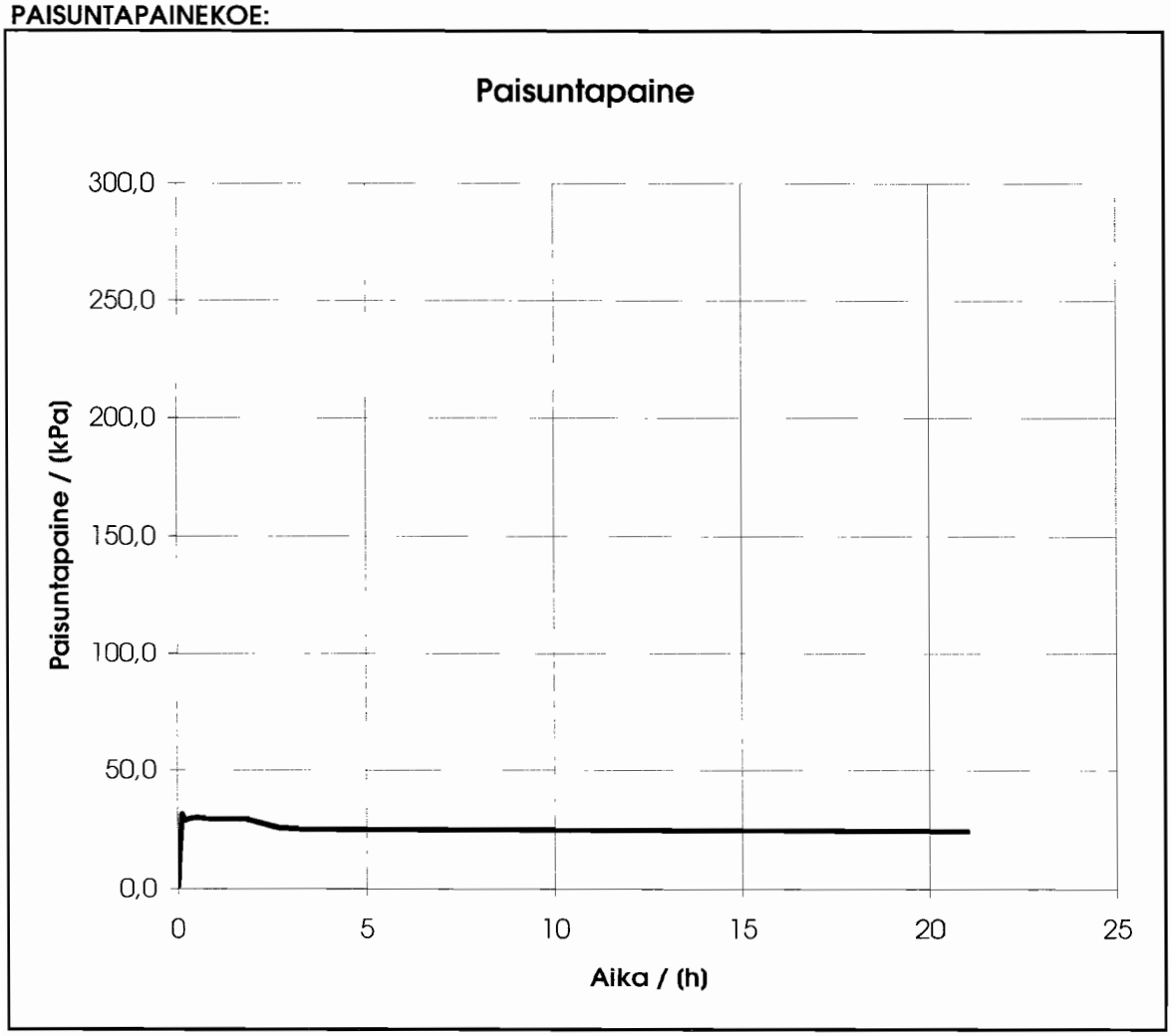
**TULOKSET:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Maksimi paisuntapaine:** | | **Loppupaine:** | |
| 31,4 | kPa | 24,3 | kPa |
| **Maksimipaineen aika:** | | **Loppupaineen aika:** | |
| 0,07 | h.min | 21,00 | h.min |

**KOKONAISPAISUNTA:**

| **Näytteen paksuus mm:** | | **Kokonaispaisunta:** | | |
|---|---|---|---|---|
| **alku / mm** | **loppu / mm** | **mm** | **%** | |
| 6,52 | 7,20 | 0,68 | 10,43 | *) 1 vrk |

**PAISUNTAPAINEKOE:**



## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 5.5.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Päijänne-tunneli, Pulkkilan sortuma |
| **Tilaaja:** | geo | | |

## NÄYTE:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 2 | **Paaluluku:** | PL 118220 | |
| **Sijainti:** | sortumakasasta otettu hienoainesnäyte | | | |
| **Näytteen pinta-ala:** | | **Näytteen kuivamassa:** | | *) normaali näytteen pinta-ala |
| **20** | cm^2 | **20** | grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | | **0,074** | mm | kuivaseulottu |

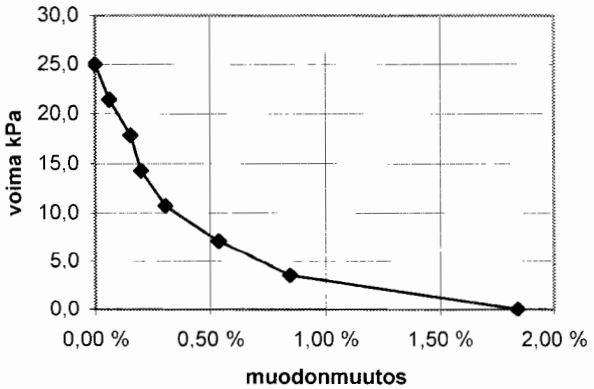
## MITTAUSTULOKSET:

| Mittaushetki (hh.mm) | Paisunta-paine (kPa) | Aika (hh.mm) | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,0 | 0 | 1000,00 |
| 0,01 | 1,4 | 0 | 999,80 |
| 0,02 | 8,6 | 0 | 998,80 |
| 0,07 | 31,4 | 0 | 995,60 |
| 0,12 | 28,6 | 0 | 996,00 |
| 0,18 | 29,3 | 0 | 995,90 |
| 0,31 | 30,0 | 1 | 995,80 |
| 0,55 | 29,3 | 1 | 995,90 |
| 1,12 | 29,3 | 1 | 995,90 |
| 1,47 | 29,3 | 2 | 995,90 |
| 2,40 | 25,7 | 3 | 996,40 |
| 3,25 | 25,0 | 3 | 996,50 |
| 21,00 | 24,3 | 21 | 996,60 |

## PALAUTUS

| | | Siirtymä | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 % | 25,0 | 0,000 | 996,50 |
| 0,06 % | 21,4 | 0,004 | 997,00 |
| 0,15 % | 17,9 | 0,010 | 997,50 |
| 0,20 % | 14,3 | 0,013 | 998,00 |
| 0,31 % | 10,7 | 0,020 | 998,50 |
| 0,54 % | 7,1 | 0,035 | 999,00 |
| 0,84 % | 3,6 | 0,055 | 999,50 |
| 1,84 % | 0,0 | 0 | 1000,00 |

**Muodonmuutoskuvaaja palautuksessa**



## PAISUNTAPAINEKOE

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 21.5.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Päijänne-tunneli, Pulkkilan sortuma |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 3 | **Paaluluku:** | PL 118 220 | |
| **Sijainti:** | sortumakasasta otettu hienoainesnäyte | | | |
| **Näytteen pinta-ala:** | | **Näytteen kuivamassa:** | | *) normaali näytteen pinta-ala |
| 20 | cm^2 | 20 | grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | | 0,074 | mm | kuivaseulottu |

**ESIKUORMITUS:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Esikonsolidaatiopaine:** | | **Esikonsolidaatioaika:** | *) normaali esikonsolidaatiopaine |
| 2 | MPa | 22 | tuntia | on 2 MPa ja aika n. 24 tuntia |

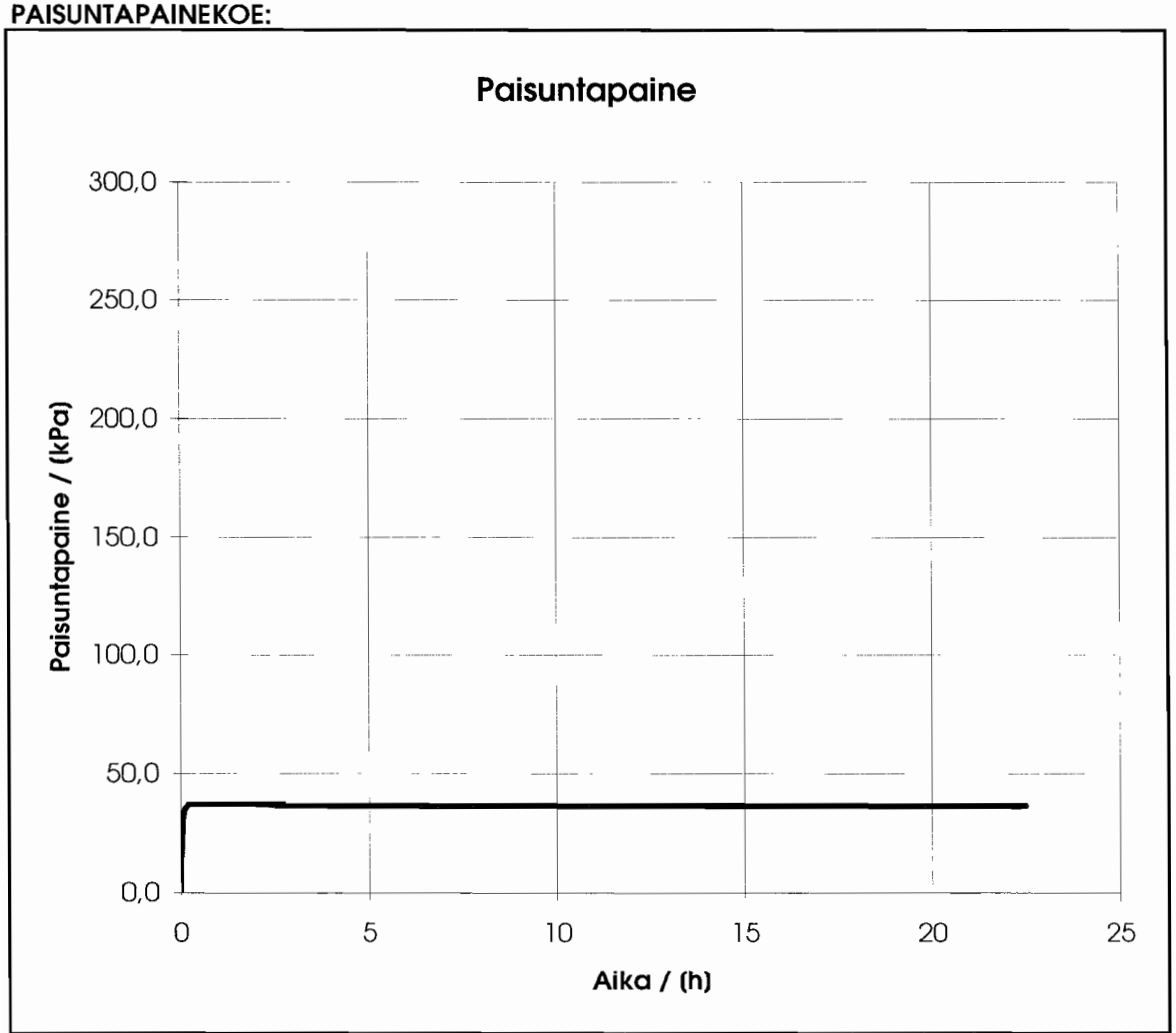
**TULOKSET:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Maksimi paisuntapaine:** | | **Loppupaine:** | |
| 37,1 | kPa | 36,4 | kPa |
| **Maksimipaineen aika:** | | **Loppupaineen aika:** | |
| 0,13 | h.min | 22,30 | h.min |

**KOKONAISPAISUNTA:**

| **Näytteen paksuus mm:** | | **Kokonaispaisunta:** | | |
|---|---|---|---|---|
| **alku / mm** | **loppu / mm** | **mm** | **%** | |
| 7,50 | 8,50 | 1,00 | 13,33 | *) 1 vrk |

**PAISUNTAPAINEKOE:**



**PAISUNTAPAINEKOE**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Päivämäärä:** | 21.5.1999 | **Tutki:** | Jannis Mikkola |
| **Työn numero:** | 6579 | **Kohde:** | Päijänne-tunneli, Pulkkilan sortuma |
| **Tilaaja:** | geo | | |

**NÄYTE:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Näytteen nro:** | 3 | **Paaluluku:** | PL 118 220 |
| **Sijainti:** | sortumakasasta otettu hienoainesnäyte | | |

| **Näytteen pinta-ala:** | **Näytteen kuivamassa:** | *) normaali näytteen pinta-ala |
|---|---|---|
| **20** cm^2 | **20** grammaa | on 20 cm^2 ja kuivamassa 20 g. |
| **Näytteen suurin raekoko:** | **0,074** mm | kuivaseulottu |

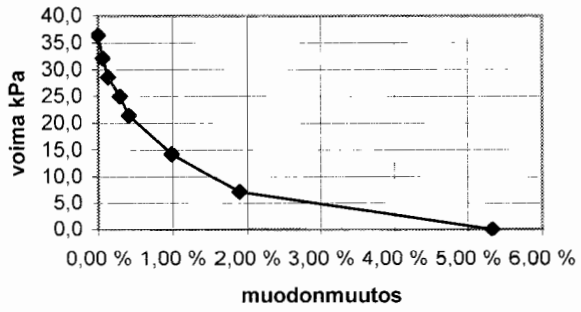
**MITTAUSTULOKSET:**

| Mittaushetki (hh.mm) | Paisunta-paine (kPa) | Aika (hh.mm) | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,0 | 0 | 1000,00 |
| 0,01 | 12,9 | 0 | 998,20 |
| 0,03 | 30,0 | 0 | 995,80 |
| 0,06 | 35,0 | 0 | 995,10 |
| 0,13 | 37,1 | 0 | 994,80 |
| 0,18 | 37,1 | 0 | 994,80 |
| 0,39 | 37,1 | 1 | 994,80 |
| 1,00 | 37,1 | 1 | 994,80 |
| 1,55 | 37,1 | 2 | 994,80 |
| 3,05 | 36,4 | 3 | 994,90 |
| 3,45 | 36,4 | 4 | 994,90 |
| 4,05 | 36,4 | 4 | 994,90 |
| 22,30 | 36,4 | 23 | 994,90 |

**PALAUTUS**

| | | Siirtymä | Kuormitus-mittarin lukema |
|---|---|---|---|
| 0,00 % | 36,4 | 0,000 | 994,90 |
| 0,07 % | 32,1 | 0,005 | 995,50 |
| 0,13 % | 28,6 | 0,010 | 996,00 |
| 0,29 % | 25,0 | 0,022 | 996,50 |
| 0,41 % | 21,4 | 0,031 | 997,00 |
| 0,99 % | 14,3 | 0,074 | 998,00 |
| 1,89 % | 7,1 | 0,142 | 999,00 |
| 5,33 % | 0,0 | 0 | 1000,00 |

**Muodonmuutoskuvaaja palautuksessa**



| Paaluväli | | Tunneliosuus | Perä | PULTITUS | | | | RUISKUBETONOINTI | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Pulttimäärä | | | | Ruiskubetonipaksuus [mm] + raudoitus | | | | | |
| | | | | [kpl] | [m] | [pulttia/tm] | [pm/tm] | 30-60 [m] | 60-80+v [m] | 80-200+I [m] | 150-200+II [m] | yht. [m] | yht. [%] |
| 466 | 1520 | Ylästö | et | | | | | 17 | 0 | 0 | 0 | 17 | 1,6 |
| 1520 | 3692 | Ylästö | po | 425 | 1 360 | 0,20 | 0,63 | 584 | 51 | 0 | 0 | 635 | 29,2 |
| 3692 | 6693 | Viinikkala | et | 757 | 2 422 | 0,25 | 0,81 | 858 | 12 | 0 | 0 | 870 | 29,0 |
| 6693 | 9690 | Viinikkala | po | 408 | 1 306 | 0,14 | 0,44 | 317 | 104 | 0 | 77 | 498 | 16,6 |
| 9690 | 12194 | Vähäsuo | et | 717 | 2 294 | 0,29 | 0,92 | 362 | 180 | 74 | 0 | 616 | 24,6 |
| 12194 | 14760 | Vähäsuo | po | 931 | 2 979 | 0,36 | 1,16 | 596 | 148 | 57 | 42 | 843 | 32,8 |
| 14760 | 17461 | Rusutjärvi | et | 570 | 1 824 | 0,21 | 0,68 | 133 | 231 | 9 | 0 | 373 | 13,8 |
| 17461 | 20200 | Rusutjärvi | po | 443 | 1 418 | 0,16 | 0,52 | 390 | 62 | 16 | 0 | 468 | 17,1 |
| 20200 | 23013 | Orikorpi | et | 1 706 | 5 459 | 0,61 | 1,94 | 355 | 159 | 38 | 7 | 559 | 19,9 |
| 23013 | 26100 | Orikorpi | po | 852 | 2 726 | 0,28 | 0,88 | 49 | 133 | 13 | 0 | 195 | 6,3 |
| 26100 | 28830 | Korpimäki | et | 128 | 410 | 0,05 | 0,15 | 11 | 12 | 0 | 0 | 23 | 0,8 |
| 28830 | 31660 | Korpimäki | po | 192 | 614 | 0,07 | 0,22 | 180 | 17 | 0 | 20 | 217 | 7,7 |
| 31660 | 34523 | Jokela | et | 78 | 250 | 0,03 | 0,09 | 85 | 50 | 0 | 0 | 135 | 4,7 |
| 34523 | 37270 | Jokela | po | 204 | 653 | 0,07 | 0,24 | 130 | 35 | 25 | 0 | 190 | 6,9 |
| 37270 | 40135 | Punakallio | et | 419 | 1 341 | 0,15 | 0,47 | 606 | 135 | 25 | 0 | 766 | 26,7 |
| 40135 | 43085 | Punakallio | po | 322 | 1 030 | 0,11 | 0,35 | 210 | 345 | 0 | 0 | 555 | 18,8 |
| 43085 | 45789 | Ronkonkallio | et | 480 | 1 536 | 0,18 | 0,57 | 290 | 48 | 0 | 0 | 338 | 12,5 |
| 45789 | 48360 | Ronkonkallio | po | 272 | 870 | 0,11 | 0,34 | 33 | 54 | 0 | 0 | 87 | 3,4 |
| 48360 | 50820 | Mustasuo | et | 1 090 | 3 488 | 0,44 | 1,42 | 280 | 270 | 0 | 24 | 574 | 23,3 |
| 50820 | 53290 | Mustasuo | po | 383 | 1 226 | 0,16 | 0,50 | 296 | 177 | 87 | 0 | 560 | 22,7 |
| 53290 | 56240 | Kalliomäki | et | 887 | 2 838 | 0,30 | 0,96 | 322 | 15 | 0 | 0 | 337 | 11,4 |
| 56240 | 58900 | Kalliomäki | po | 1 085 | 3 472 | 0,41 | 1,31 | 158 | 54 | 0 | 19 | 231 | 8,7 |
| 58900 | 61322 | Puujoki | et | 1 364 | 4 365 | 0,56 | 1,80 | 782 | 340 | 0 | 0 | 1 122 | 46,3 |
| 61322 | 63750 | Puujoki | po | 992 | 3 174 | 0,41 | 1,31 | 221 | 39 | 55 | 61 | 376 | 15,5 |
| 63750 | 66512 | Haminankylä | et | 669 | 2 141 | 0,24 | 0,78 | 358 | 185 | 44 | 23 | 610 | 22,1 |
| 66512 | 69460 | Haminankylä | po | 432 | 1 382 | 0,15 | 0,47 | 302 | 77 | 0 | 0 | 379 | 12,9 |
| 69460 | 72018 | Poissinvuori | et | 661 | 2 115 | 0,26 | 0,83 | 296 | 72 | 64 | 0 | 432 | 16,9 |
| 72018 | 74430 | Poissinvuori | po | 382 | 1 208 | 0,16 | 0,50 | 201 | 92 | 0 | 0 | 293 | 12,1 |

| Paaluväli | | Tunneliosuus | Perä | PULTITUS | | | | RUISKUBETONOINTI | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Pulttimäärä | | | | Ruiskubetonipaksuus [mm] + raudoitus | | | | |
| | | | | [kpl] | [m] | [pulttia/tm] | [pm/tm] | 30-60 [m] | 60-80+v [m] | 80-200+I [m] | 150-200+II [m] | yht. [m] | yht. [%] |
| 74430 | 76913 | Kalliojärvi | et | 356 | 1 111 | 0,14 | 0,45 | 163 | 5 | 14 | 0 | 182 | 7,3 |
| 76913 | 79520 | Kalliojärvi | po | 582 | 1 836 | 0,22 | 0,70 | 67 | 19 | 0 | 0 | 86 | 3,3 |
| 79520 | 82197 | Ali-Tirisevä | et | 1 100 | 3 439 | 0,41 | 1,28 | 570 | 45 | 0 | 0 | 615 | 23,0 |
| 82197 | 84800 | Ali-Tirisevä | po | 466 | 1 437 | 0,18 | 0,55 | 254 | 125 | 2 | 0 | 381 | 14,6 |
| 84800 | 87602 | Teuronjoki | et | 656 | 1 905 | 0,23 | 0,68 | 246 | 108 | 0 | 0 | 354 | 12,6 |
| 87602 | 90500 | Teuronjoki | po | 547 | 1 559 | 0,19 | 0,54 | 330 | 194 | 0 | 5 | 529 | 18,3 |
| 90500 | 93410 | Palomaa | et | 560 | 1 727 | 0,19 | 0,59 | 555 | 80 | 0 | 0 | 635 | 21,8 |
| 93410 | 96200 | Palomaa | po | 748 | 2 329 | 0,27 | 0,83 | 901 | 106 | 0 | 12 | 1 019 | 36,5 |
| 96200 | 98908 | Lahdenpohja | et | 1 341 | 3 602 | 0,50 | 1,33 | 899 | 104 | 0 | 8 | 1 011 | 37,3 |
| 98908 | 101600 | Lahdenpohja | po | 159 | 509 | 0,06 | 0,19 | 215 | 28 | 0 | 0 | 243 | 9,0 |
| 101600 | 103800 | Multasuo | et | 347 | 1 038 | 0,16 | 0,47 | 452 | 75 | 0 | 13 | 540 | 24,5 |
| 103800 | 106200 | Multasuo | po | 36 | 115 | 0,02 | 0,05 | 234 | 5 | 0 | 0 | 239 | 10,0 |
| 106200 | 109200 | Pyssymäki | et | 313 | 1 002 | 0,10 | 0,33 | 681 | 0 | 0 | 0 | 681 | 22,7 |
| 109200 | 112200 | Pyssymäki | po | 433 | 1 386 | 0,14 | 0,46 | 853 | 36 | 0 | 0 | 889 | 29,6 |
| 112200 | 120000 | Orimäki/Pulkkila | | 792 | 2 534 | 0,10 | 0,32 | 1 920 | 240 | * | | 2 160 | 27,7 |
| | 119534 | YHTEENSÄ | | 25 285 | 79 429 | | | 16 762 | 4 266 | 522 | 311 | 21 861 | |

*240 m sisältää kaikki 60+v tai vahvemmat lujitukset

Julkaisija
HELSINGIN KAUPUNGIN KIINTEISTÖVIRASTO
**GEOTEKNINEN OSASTO**
MALMIN ASEMATIE 3 A 00700 HELSINKI
PUHELIN (09) 1691, FAX (09) 169 4555
http://www.kv.hel.fi/geo

Julkaisusarja, numero ja julkaisuaika
Geoteknisen osaston tiedotteet 80/1999
Joulukuu 1999

Projektinumero(t)
6579

Tekijä(t)
Jannis Mikkola
Raimo Viitala

Julkaisija
HELSINGIN KAUPUNKI
KIINTEISTÖVIRASTO
**GEOTEKNINEN OSASTO**

Nimike
# PITKIEN VESITUNNELEIDEN SORTUMAT JA LUJITUS

Tiivistelmä

Suomessa on viimeisten vuosien aikana sattunut kolme merkittävää sortumaa vesitunneleissa. Vesitunneleissa sattuneet vauriot ovat herättäneet keskustelua sortumien syistä, niiden korjaustavoista sekä tunnelien lujitusmääristä.

Tutkimuksen päätavoitteena on dokumentoida sortumat ja niiden korjausmenetelmät sekä selvittää tunnelien sortumien syitä. Toisena tavoitteena on selvittää vesitunneleissa käytettyjä lujitusmääriä.

Tutkimuksen yhteydessä seurattiin tiiviisti Päijänne-tunnelin korjauksia sekä tehtiin runsaasti laboratoriotutkimuksia ja geologien haastatteluja sortumien syiden selvittämiseksi. Lisäksi kerättiin materiaalia myös Helsingin puhdistettujen jätevesien poistotunnelin, sekä ruotsalaisen Bolmen-tunnelin sortumista ja lujitusmääristä.

Tämän tutkimuksen perusteella paineellisten vesitunneleiden sortumat ovat jaettavissa kolmeen ryhmään: paisuvan saven aiheuttamat sortumat, veden virtauksesta johtuvan eroosion aiheuttamat sortumat ja kemiallisen rapautumisen aiheuttamat sortumat. Kaikki sortumat eivät esiinny puhtaasti edellä esitettyinä tyyppeinä, vaan ne voivat olla myös kahden tai useamman sortumatyypin sekoituksina.

Paisuvan saven ja kemiallisen rapautumisen aiheuttamia sortumia voidaan ehkäistä hyvällä rakentamisaikaisella suunnittelulla, jolla pyritään selvittämään paisuvan saven esiintyminen sekä kemialliselle rapautumiselle alttiit kohdat. Työnaikaisessa suunnittelussa tulisikin olla mukana riittävästi geologista tietotaitoa.

Pienten (alle 400 mm) kivien runsaan putoamisen johdosta ruiskubetonimäärää tulisi lisätä vesitunneleissa. Ruiskubetoni estää rakotäytteiden huuhtoutumisen ja näin avainlohkojen putoamisen. Suuria pultin vaativia lohkareita oli pudonnut hyvin vähän, joten pultituksen radikaaliin lisäämiseen ei ole perusteita.

Tunnelien pitkäaikaiskäyttäytymisen seurannassa ja korjausten suunnittelussa suurena apuna on tunnelin hyvä tekninen ja geologinen dokumentointi. Näiden tietojen käyttö tulevien tunnelien suunnittelussa auttaa nostamaan tunneleiden laatua ja pitkäaikaiskestävyyttä.

Avainsanat
tunneli, vesi, sortuma, korjaus, lujitus

| ISSN | ISBN | Luokitus (UDK) |
|---|---|---|
| 0788-6209 | 951-718-402-6 | 628 |

| Kieli | Sivuja |
|---|---|
| suomi, engl. tiivistelmä | 103 s. + liitt. |

Published by
HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT
**GEOTECHNICAL DIVISION**
MALMIN ASEMATIE 3 A FIN-00700 HELSINKI
PHONE +358-9-1691, FAX +358-9-169 4555
http://www.kv.hel.fi/geo

Series title, number and date
Geoteknisen osaston tiedotteet 80/1999
December 1999

Project number(s)
6579

Author(s)
Jannis Mikkola
Raimo Viitala

Commissioned by
HELSINKI CITY
REAL ESTATE DEPARTMENT
**GEOTECHNICAL DIVISION**

Title
# CAVE-INS AND REINFORCEMENT IN LONG WATER TUNNELS

Abstract

During the last few years, three major cave-ins have occurred in Finnish water tunnels. The damage to these tunnels has raised discussion about the causes, and also about methods of repairing cave-ins and the amount of reinforcement necessary in long water tunnels.

The main object of this study is to document the cave-ins and the process of their repair, and to find out the reasons for the cave-ins. The other object of the study is to find out the amount of reinforcement used in water tunnels.

The repair work on the Päijänne Tunnel was observed closely. Extensive of laboratory testing and interviews of experienced geologists were carried out to find the reasons for the cave-ins. Additionally, material from Helsinki waste-water outlet tunnels and from the Bolmen raw water tunnel in Sweden was collected for this study.

According to this study, the cave-ins in pressurised water tunnels can be divided into three categories: cave-ins caused by swelling clay, erosion caused by waterflow in the tunnel, and chemical weathering. Cave-ins are not always caused by only one factor, but may be caused by a combination of several factors.

Cave-ins caused by swelling clay and chemical weathering can be prevented by proper planning during construction, which helps to identify the occurrence of swelling clay and areas that can be sensitive to chemical weathering. This is why there must be enough geological know-how even during the construction phase.

The amount of shotcrete should be increased due to the great number of fallings of small rocks (under 400 mm). Shotcrete prevents flushing of the joint fillings, which can lead to the fall of keyblocks. There were only a few falls of large boulders which need bolting, and thus there is no need for a radical increase in bolting.

In monitoring the long-term behaviour of tunnels and in planning repair work, good technical and geological documentation would be of great assistance. This documentation would also be useful when planning new tunnels as an aid to achieving improved quality and long-term stability.

Keywords
tunnel, water, cave-in, repairing, reinforcement

| ISSN | ISBN | Class (UDC) |
|---|---|---|
| 0788-6209 | 951-718-402-6 | 628 |

| Language | Pages |
|---|---|
| Finnish, Engl. Abstr. | 103 p. + app. |

## GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET 1(2)

12.1.2000

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | *Anttikoski, Usko* | Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen | 1973 | * |
| 2 | *Anttikoski, Usko* | Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu | 1973 | * |
| 3 | *Anttikoski, Usko* | Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu | 1974 | * |
| 4 | *Makinen, Reino* | Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella | 1974 | * |
| 5 | *Saarelma, Matti* | Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys | 1974 | * |
| 6 | *Hartikainen, Jorma* | Kitkapaalujen kantavuus | 1976 | |
| 7 | *Petäjä, Jouko* | Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen | 1977 | |
| 8 | *Raudasmaa, Pekka* | Metrotunneleiden injektointi | 1977 | * |
| 9 | *Anttikoski, Usko* | Kalliotunneleiden käyttö varastointiin | 1977 | * |
| 10 | *Tikkanen, Heikki* | Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa | 1978 | |
| 11 | *Arkima, Olli* | Kluuvin ruhjeen jäädytys | 1978 | * |
| 12 | *Raudasmaa, Pekka* | Puiset perustusrakenteet | 1979 | |
| 13 | *Havukainen, Jorma* | Voimalalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa | 1979 | |
| 14 | *Vähaaho, Ilkka* | Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen | 1979 | * |
| 15 | *Raudasmaa, Pekka* | Pohjavesitarkkailu -80 | 1980 | * |
| 16 | *Anttikoski, Usko* | Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunnelikonferenssin kokemusten perusteella | 1979 | * |
| 17 | *Roinisto, Jarmo* | Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin | 1981 | |
| 18 | *Havukainen, Jorma* | Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa | 1981 | * |
| 19 | *Roinisto, Jarmo* | Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys | 1981 | |
| 20 | *Vuola, Pekka* | Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta | 1981 | |
| 21 | *Havukainen, Jorma & Korhonen, Osmo* | Tonttialueiden maarakenteet | 1981 | |
| 22 | *Havukainen, Jorma* | Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä | 1981 | |
| 23 | *Havukainen, Jorma* | Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa | 1982 | |
| 24 | *Latvala, Ahti* | Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys | 1982 | |
| 25 | *Havukainen, Jorma & Hämäläinen, Alpo & Sulamäki, Antti* | Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttömahdollisuuksista maarakentamisessa | 1982 | |
| 26 | *Halkola, Hannu* | Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä | 1982 | * |
| 27 | *Paavola , Pertti* | Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannusselvitys | 1982 | |
| 28 | *Vähäaho, Ilkka* | Maarakennusta koskeva mallityöselitys | 1982 | * |
| 29 | *Gulin, Kai* | Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa | 1982 | |
| 30 | *Halkola, Hannu* | Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät | 1982 | |
| 31 | *Havukainen, Jorma* | Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet | 1983 | |
| 32 | *Havukainen, Jorma* | Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar | 1983 | |
| 33 | *Havukainen, Jorma* | The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines | 1983 | |
| 34 | *Salmelainen , Juha* | Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta | 1983 | |
| 35 | *Havukainen, Jorma* | Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista | 1983 | |
| 36 | *Hytti, Pekka* | Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa | 1984 | |
| 37 | *Leinonen, Jukka* | Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa | 1984 | |
| 38 | *Pirinen, Jussi* | Kelluvan rantapenkereen rakentaminen | 1984 | * |
| 39 | *Latvala, Ahti* | Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti | 1984 | * |
| 40 | *Korpela, Jaakko & Schüller, Mikael* | Jäykkien liitosjohtojen pohjarakennusselvitys (Jäli-selvitys) | 1984 | |
| 41 | *Lahtinen, Eeva-Riitta* | Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti) | 1985 | |
| 42 | *Korpi, Juha* | In Situ -kuormituskoe painumien määrittämiseksi | 1985 | |
| 43 | *Havukainen, Jorma* | Esirakentamisen kehittäminen | 1985 | |
| 44 | *Vähäaho, Ilkka* | Jäähdytysmenetelmän käyttö | 1987 | |
| 45 | *Havukainen, Jorma & Hämäläinen, Alpo & Latvala, Ahti* | Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa | 1987 | * |
| 46 | *Julkunen, Arto* | Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa | 1987 | |
| 47 | *Hutri, Kaisa-Leena* | Vuosaaren kivilajien soveltuvuus asfalttipäällysteisiin | 1988 | |
| 48 | *Melander, Kari* | Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä | 1989 | |
| 49 | *Leppänen, Mikko* | Vahvisinkankaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa | 1989 | |
| 50 | *Vähäaho, Ilkka & Ryhänen, Hannu* | Sulamiskonsolidaation vaikutukset savessa | 1989 | |
| 51 | *Vahaaho, Ilkka* | Effects of Thaw Consolidation on Geotechnical Properties of Clay | 1989 | |
| 52 | *Koskela, Pekka* | Routastabiloinnin vaikutus ruoppausmassaan | 1989 | |
| 53 | *Saari, Mauri & Korhonen, Osmo* | Paalujen dynaaminen koestus PDA-laitteistolla | 1990 | |
| 54 | *Saari, Maun & Volanen, Niilo* | Ruoholahden koepaalutus | 1990 | |
| 55 | *Yrjänä, Jouni & Korhonen, Osmo* | Pystyojitus Pikku-Huopalahdessa | 1991 | |
| 56 | *Niinimäki, Risto & Raudasmaa, Pekka* | Viikinmäen keskuspuhdistamon rakennusgeologiset kalliotutkimukset | 1992 | |
| 57 | *Nieminen, Jarmo & Johansson, Erik & Holopainen, Pekka* | Viikinmäen keskuspuhdistamon louhinnan aikainen kalliomekaaninen seuranta | 1992 | |
| 58 | *Ahola, Jukka & Viitala, Raimo* | Lujitus- ja tiivistysmäärät Helsingin pientunneleissa | 1992 | |

## GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET 2(2)

| | | | |
|---|---|---|---|
| 59 | *Ravea, Timmo & Korhonen, Osmo* | Helsingin tulvapadon rakentamisen edellytykset | 1992 |
| 60 | *Taipale, Hannu & Korhonen, Osmo* | Paalutustärinän arviointi kirjallisuuden ja mittausten perusteella | 1992 |
| 61 | *Karlstedt, Paul & Halkola, Hannu* | Ylijäämäsavien massastabilointi | 1993 |
| 62 | *Leiskallio, Antti & Lehtonen, Jouko* | Maankäytön geotekninen suunnittelu | 1993 |
| 63 | *Anttikoski,Usko & Kumar, Seppo & Saarelainen, Seppo* | Kalliokaivanto jätehuollossa (esiraportti) | 1993 |
| 64 | *Rekonen, Rita & Halkola, Hannu* | Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla | 1994 |
| 65 | *Ulmala, Ola & Halkola, Hannu* | Puristin-porakonekairaus | 1994 |
| 66 | *Havukainen, Jorma* | Katsaus ympäristötekniikkaan kansainvälisen kongressin valossa (matkakertomus) | 1995 |
| 67 | *Korkeakoski, Pasi & Lehtonen, Jouko* | Asuinrakennusten tontti- ja pohjarakennuskustannukset | 1996 |
| 68 | *Puumalainen Niina & Havukainen Jorma* | Vakuumikonsolidointikoe Helsingin Torpparinmäessä | 1996 |
| 69 | *Mehtälä, Jani & Korhonen, Osmo* | Puotilan metroaseman pohjavesivaikutusten arviointi numeerisilla menetelmillä | 1998 |
| 70 | *Nieminen, Jarmo & Anttikoski, Usko* | EU:n rahoitustuki Helsingin kaupungin tutkimustoiminnassa | 1996 |
| 71 | *Junnila, Antti & Lehtonen, Jouko* | Geotekninen kustannustiedosto, Geokuti 96 | 1996 |
| 72 | *Wegelius, Arto & Viitala, Raimo* | Kallioluokitusmenetelmien käyttö tunnelien lujituksessa | 1996 |
| 73 | *Vähäaho, Ilkka* | Savien stabilointi eri sideaineilla, kenttäkokeiden tulokset | 1996 |
| 74 | *Rantala, Kalle & Halkola, Hannu* | Paalun kantavuuden arviointi puristin-heijarikairalla | 1997 |
| 75 | *Wegelius, Arto & Holopainen, Pekka* | Paisuvat kalliosavet | 1997 |
| 76 | *Leivo, Pekka & Halkola, Hannu* | Maa- ja kallioperätietojen tulkinta porakonekairauksen rekisteröintituloksista | 1998 |
| 77 | *Nauska, Jan & Havukainen, Jorma* | Esirakentaminen 1998 | 1998 |
| 78 | *Svanström, Terhi & Raudasmaa, Pekka* | Pohjavesi Helsingin kaupunkiympäristössä: esiintyminen, käyttö, suojelu ja vaikutus rakentamiseen | 1998 |
| 79 | *Pitkänen, Juha & Vähäaho, Ilkka & Raudasmaa, Pekka* | Puupaalujen rakenteellisen kantokyvyn tarkastaminen | 1999 |
| 80 | *Mikkola, Jannis & Viitala, Raimo* | Pitkien vesitunneleiden sortumat ja lujitus | 1999 |

| | | |
|---|---|---|
| GEO 10 K | Kallioperäkartta - Berggrundskarta 1:10.000, Helsinki - Helsingfors | 1978 |
| GEO 10 M | Maaperäkartta - Jordmånskarta - Geotechnical Atlas of Soil Deposits 1:10.000, Helsinki - Helsin | 1989 |

*) painos loppuunmyyty

Hinnat

| | |
|---|---|
| tiedotteet | 140 mk/kpl (sis. alv) |
| karttakirjat | 450 mk/kpl (sis. alv) |

Tilauslomake http://www.kv.hel.fi/geo/tilaus.html

Helsingin kaupunki
Kiinteistövirasto/geotekninen osasto
Malmin asematie 3 A 00700 Helsinki
puhelin 09-1691 fax 09-169 4555
Email geo@kv.hel.fi
http://www.kv hel.fi/geo