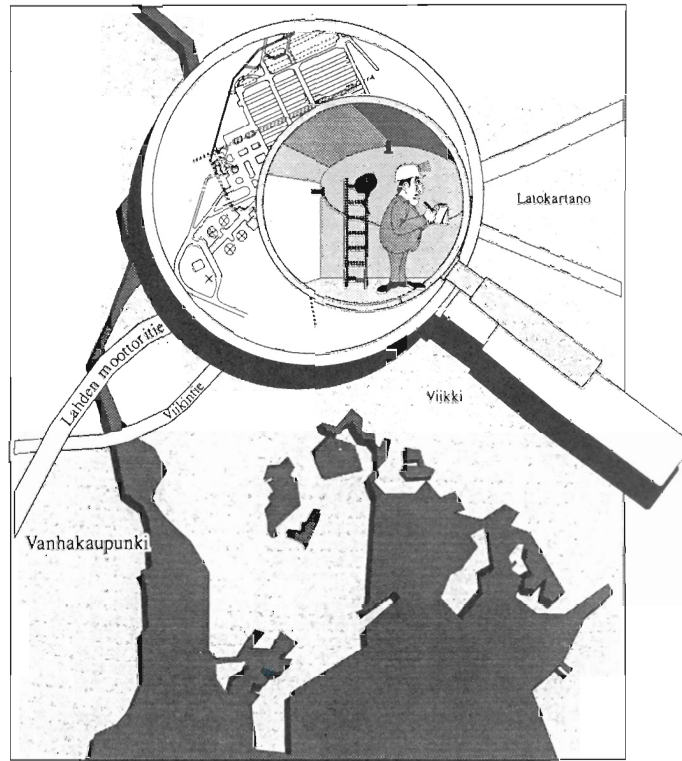




VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMON LOUHINNAN AIKAINEN KALLIOMEKAANINEN SEURANTA

Jarmo Nieminen • Erik Johansson • Pekka Holopainen



HELSINGIN KAUPUNKI
KIINTEISTÖVIRASTO

GEOTEKNINEN OSASTO

ALKULAUSE

Helsingin kaupunki vesi- ja viemärilaitos päätti sijoittaa tulevan keskuspuhdistamon Viikinmäen kallioon. Etukäteen louhintatyö arvioitiin kallioteknisesti vaativaksi mm. paikoitellen ohuen kalliokaton ja luolaston lävistävän heikkousvyöhykkeen vuoksi. Lisäksi osa hallien välisistä kalliopilareista oli perinteisiä ratkaisuja kapeampia.

Kallion mekaanista käyttäytymistä ennustettiin suunnitteluvaiheessa laskelmilla. Louhintatyön aikana kalliomassojen liikkeitä seurattiin laajahkoilla mittauksilla. Mittausten perusteella laskelmia tarkennettiin.

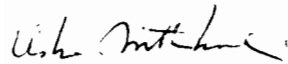
Tämä tiedote perustuu DI Jarmo Niemisen dipolmityöhön, joka sisältää myös yksityiskohtaisempaa tietoa mittaustuloksista.

Tiedotteen mittaukset kattavat ajan, jolloin pääosa louhinnoista on tehty. Mittauksia on jatkettu senkin jälkeen ja tullaan jatkamaan edelleen harvennetuilla aikaväleillä.

Tulevaisuudessa keskuspuhdistamon päälle tullaan rakentamaan asuntoalue, joten jatkomittauksia pidetään tarpeellisina.

Tämän julkaisun lisäksi on julkaistu raportti Viikinmäen keskuspuhdistamon rakennusgeologias-
ta. Se perustuu Risto Niinimäen pro-gradu työhön.

Helsingissä, maaliskuun 25. päivänä 1992



Usko Anttikoski
osastopäällikkö

TIIVISTELMÄ

Helsingin kaupunki teki vuonna 1986 periaatepäätöksen yhdestä suuresta kallion sisään rakennettavasta jätevesien keskuspuhdistamosta, johon tulisivat Helsingin kaupungin ja Keski-Uudenmaan vesiensuojelukuntainliiton jätevedet. Hankkeeseen kuuluu laaja kalliomekaaninen seurantaohjelma, johon tämä raportti liittyy. Tässä työssä on selvitetty keskuspuhdistamon vesiaseman louhinnanaikaista kalliomekaanista käyttäytymistä analysoimalla mittaustuloksia sekä tarkistettu ennakkolaskentoja vertaamalla niitä mittaustuloksiin.

Keskuspuhdistamon vesiasemalla tapahtuvia louhinnan aikaisia siirtymiä seurattiin maanpäältä 11 sondiekstensometrillä sekä kalliotilasta 5 tankoekstensometrillä ja 2 sondiekstensometrillä. Lisäksi vesiasemalla seurattiin louhinnan aikana jännitystilän muutoksia, lujitusrakenteiden kuormituksia sekä kalliotilojen jännevälien muutoksia konvergenssipulttien avulla. Kalliomekaanisen seurannan luotettavinta ja käyttökelpoisinta tietoa antoivat maanpäälliset sondiekstensometrit, joiden tulokset ovat olleet huomion pääkohteina tässä työssä. Muiden mittalaitteiden tulostustulokinta haittasivat häiriöt, jotka johtuivat joko itse mittalaitteiden teknisistä ongelmista, louhintatöiden aiheuttamista vaurioista tai kulkuvaikeuksista seurantapaikalle. Muiden mittalaitteiden tulokset ovat antaneet kuitenkin hyvää lisätietoa sondiekstensometrien siirtymätuloksille.

Ennen louhintoja vesiaseman kalliomekaanista käyttäytymistä oli mallinnettu sekä jatkuvalla (FLAC) että epäjatkevalla (UDEC) mitoitusohjelmilla. Tämän työn yhteydessä on osittaislouhintoja mallinnettu lähtöparametrien osalta tarkistetulla FLAC-mallilla. Ennustettujen ja mitattujen siirtymien suunnissa ja suuruuksissa oli ollut jonkin verran poikkeavuutta. Tämä selittyy sillä, että määritetyistä parametreista käytettiin varovaisia keskiarvoja. Käyttämällä määritetyistä parametreista vaakajännitystä ja vetolujuutta kohottavia arvoja saadaan tarkennettujen FLAC-mallien siirtymien suuruudet saatu vastaamaan mitattuja siirtymiä.

Vesiaseman kalliomekaanisessa käyttäytymisessä ei ole louhinnan aikana tapahtunut mitään suurempaa epästabiilisuuteen viittaavaa, lukuunottamatta joitakin rakoilun aiheuttamia sortumia seinissä ja katossa sekä muutamaa raon avautumista katto-osissa, jotka ovat näkyneet ruiskubetonin lohkeiluna.

ABSTRACT

In 1986 the Helsinki city council decided to build one large central wastewater treatment plant. The plant was to be located underground in the rock with total excavated volume of one million cubic metres. Upon completion the plant will treat domestic and industrial wastewater. The project includes a large rock monitoring program. This report describes the monitoring measurements made during excavation in 1988-90.

Rock displacements in the processing area of the treatment plant were measured from the surface with 11 incremental extensometers and also from the caverns with 5 rod extensometers and 2 incremental extensometers. Additional measurements in the processing area included also rock stress, bolt load, shotcrete pressure and convergence. The most reliable and usable measurements were obtained from the incremental extensometers. The results of these measurements form the primary data used in this thesis. Results of the other instrumentation indicated some inaccuracies due to technical problems or construction interference. Nevertheless the measurements from other instrumentation did provide useful information which supplemented the incremental extensometer measurements.

Prior to the excavations, rock mechanical behavior in the processing area was predicted using a two-dimensional numerical models FLAC and UDEC. FLAC represents the rock mass as a continuum, whereas UDEC represents the rock mass as a discontinuum. The directions and magnitudes of the predicted displacements were slightly different than measured values. Differences can be explained by noting that all rock mechanical testing was not completed at the time of the initial calculations and material properties were conservatively chosen. In this thesis, material properties were adjusted to reflect more realistic values and excavation stages were explicitly modeled. These adjustments resulted in reasonable agreement between measured and calculated displacements.

Nothing in the measured response of the rock behavior in the processing area indicated gross instability. Some minor collapses and joint opening were observed during the excavations. The joint openings were expressed as cracks in the shotcrete.

KÄYTETYT LYHENTEET

E1 - E7	= vesiaseman yhdyskäytävät
E13 - E32	= kolmipistetankoekstensometrit
F	= värehtelevää lanka-anturia jännittävä voima
FLAC	= Fast Lagrangian Analysis of Continua, jatkuva elementtimenetelmä
f _n	= värehtelevän lanka-anturin ominaistajuus
J1 - J2	= pystyjännitystilanmuutosanturit
K	= ruiskubetonin lujuusluokka
K1 - K13	= konvergenssimittausleikkaukset
L	= värehtelevän lanka-anturin pituus
M1 - M4	= mittaustyyppi poikkileikkaukset
MR1 -MR2	= maanpäälliset mittaustaapelireiät
P23 - P35	= kalliopultin kuormitusanturit
R311 - R332	= ruiskubetonin jännitystilanmuutosanturit
RMS - 2000	= Remote Measuring System, optinen konvergenssimittausmenetelmä
S1 - S3	= muodonmuutosanturit
SE1 - SE2	= maanalaiset sondiekstensometrit
TP1 - TP5	= tarkkavaaituspisteet
UDEC	= Universal Distinct Element Code, epäjatkuva elementtimenetelmä
VP1 - VP11	= maanpäälliset soniekstensometrit
δ	= värehtelevän lanka-anturin pituusmassa

LIITELUETTELO

1. Mitatut siirtymät ja toteutuneet louhintavaiheet VP1:n ja VP2:n kohdalla 15.8.90 mennessä
2. Mitatut siirtymät ja toteutuneet louhintavaiheet VP4:n ja VP10:n kohdalla 15.8.90 mennessä
3. Mitatut siirtymät ja toteutuneet louhintavaiheet VP6:n ja VP7:n kohdalla 15.8.90 mennessä
4. Mitatut siirtymät ja toteutuneet louhintavaiheet VP8:n ja VP9:n kohdalla 15.8.90 mennessä
5. Mitatut siirtymät ja toteutuneet louhintavaiheet SE1:n ja SE2:n kohdalla 14.12.90 mennessä
- 6a. Mitatut vaakasiirtymät VP11:n kohdalla 22.8.89 mennessä
- 6b. Mitatut vaakasiirtymät VP12:n kohdalla 1.10.90 mennessä
7. Vuoden 1989 vuorokausien keskilämpötilat Helsingissä
8. Mitatut siirtymät ja toteutuneet louhintavaiheet TE23:n ja TE24:n kohdalla 21.9.90 mennessä
9. Mitatut siirtymät ja toteutuneet louhintavaiheet TE31:n ja TE32:n kohdalla 21.9.90 mennessä
10. Sondiekstensometrien yläpäiden tarkkavaaitukset 19.6.89-28.11.90

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE
 TIIVISTELMÄ
 ABSTRACT
 KÄYTETYT LYHENTEET
 LIITELUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
1.1 Keskuspuhdistamohanke.....	1
1.2 Viikinmäen kalliomekaanisten valvontamittausten tarpeellisuus.....	3
2. VIIKINMÄEN GEOLOGIA JA KALLIOMEKAANISET OMINAISUUDET.....	4
2.1 Yleistä.....	4
2.2 Kivi- ja kalliolaatu.....	4
2.3 Rakoilu.....	5
2.4 Kalliomekaaniset laboratoriomääritykset.....	5
2.5 Jännitystila.....	6
3. KALLIOMEKAANISET VALVONTAMITTAUKSET.....	8
3.1 Laitteiden ja mittapisteiden sijoitus.....	8
3.2 Mittausohjelma.....	9
3.3 Käytettyjen mittalaitteiden toimintaperiaatteet.....	12
3.3.1 Sondiekstensometrit.....	12
3.3.2 Tankoekstensometrit.....	14
3.3.3 Konvergenssimittaukset.....	15
3.3.4 Ruiskubetonin jännitystila-anturit.....	15
3.3.5 Kalliopulttien kuormitusanturit.....	16
3.3.6 Kallion jännitystila-anturit.....	16
3.3.7 Kallion muodonmuutosanturit.....	17
3.3.8 Tiedonkeruulaitteisto ja tapahtuma.....	17
4. MALLINNETTU KALLIOMEKAANINEN KÄYTTÄYTYMINEN.....	18
4.1 Yleistä.....	18
4.2 Käytetyt laskenta-arvot.....	19
4.3 Laskennan tulokset.....	21
4.3.1 Mallinnus ennen louhintaa.....	21
4.3.2 Tarkennettu mallinnus.....	22

5. MITATTU KALLIOPERÄN KÄYTTÄYTYMINEN LOUHINNAN AIKANA.....	29
5.1 Yleistä.....	29
5.2 Sondiekstensometrimittausten tulkinta.....	33
5.3 Tankoekstensometrimittausten tulkinta.....	41
5.4 Konvergenssimittausten tulkinta.....	42
5.5 Jännitystilamittausten tulkinta.....	43
5.6 Lujitusrakenteiden kuormitusmittausten tulkinta.....	43
5.7 Tarkkavaaitusten tulkinta.....	48
6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	49

VIITTEET

LIITTEET

1. JOHDANTO

1.1 Keskuspuhdistamohanke

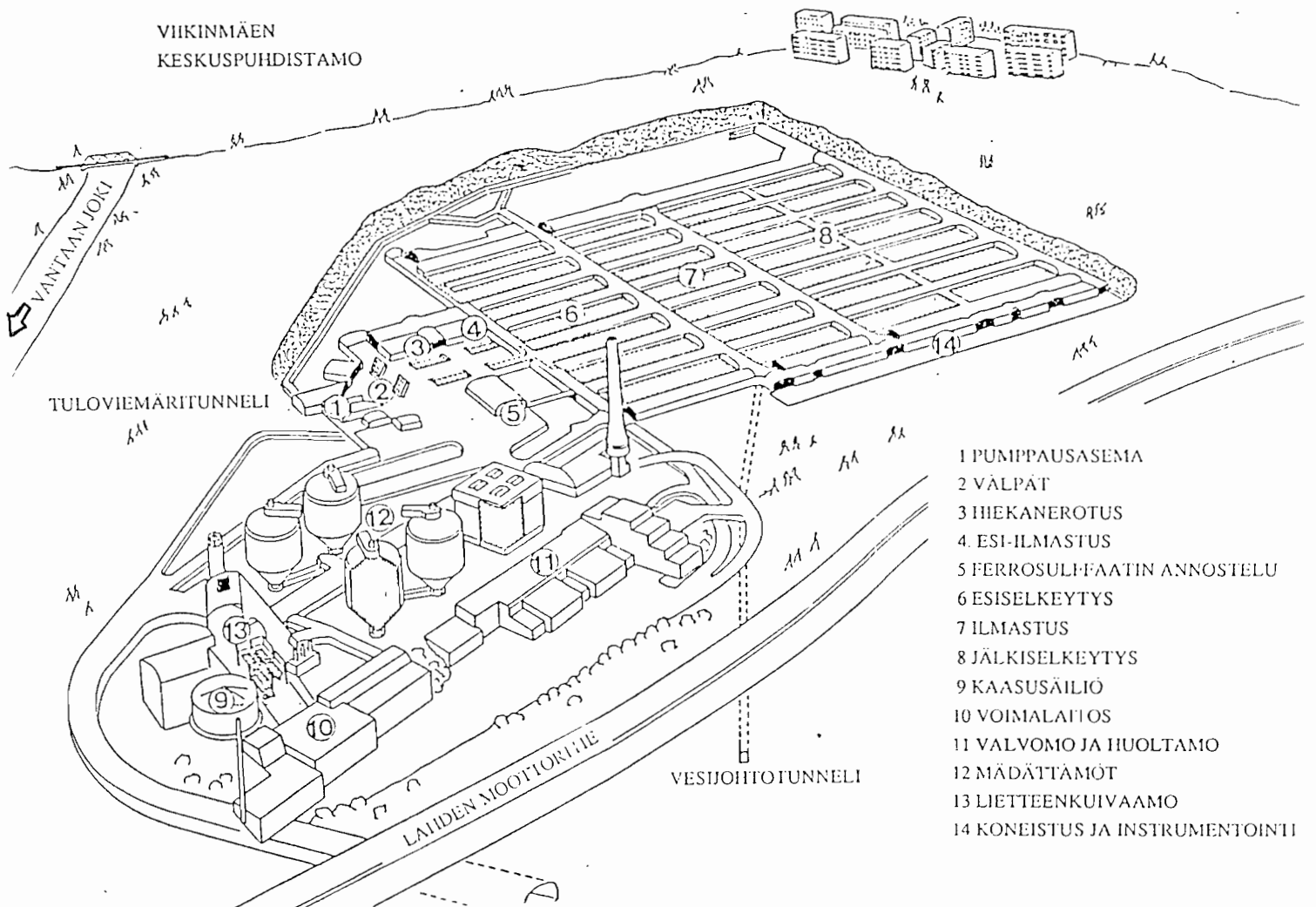
Helsingin alueella rakennettiin jätevesien viemärointi aikoinaan lähes yksinomaan vietto-viemäriperiaatteella, mikä johti useisiin viemärointialueisiin, pumppaamoihin ja puhdistamoihin. Enimmillään jätevedenpuhdistamoja oli käytössä 11. Tällä hetkellä toiminnassa on enää 5 puhdistamo.

Koska nykyisten puhdistamoiden kapasiteetti jäisi peruskorjauksen jälkeenkin alle tarpeiden, tehtiin vuonna -86 periaatepäätös yhden, kallion sisään rakennettavan, keskuspuhdistamon rakentamisesta. Keskuspuhdistamoon on tarkoitus suunnata koko Helsingin ja Keski-Uudenmaan vesiensuojelukuntainliiton jätevedet.

Lisäperusteina yhdelle suurelle keskuspuhdistamolle on esitetty mm. säästäminen sekä käyttökustannuksissa että pitkällä aikavälillä myös uusinvestoinneissa. Myös ympäristöhaitat vähenevät nykyisestä sekä puhdistamotontit saadaan parempaan käyttöön.

Keskuspuhdistamon sijainnissa päädyttiin Viikinmäkeen, joka sijaitsee Helsingissä, Vantaanjoen, Lahden moottoritien ja Herttoniemen teollisuusraiteen rajoittamalla alueella. Viikinmäellä on keskeisen sijainnin lisäksi myös muita ratkaisevia etuja muihin vaihtoehtoihin verrattuna, sillä se sijaitsee jo rakennetun puhdistettujen jätevesien poistotunnelin päässä. Lisäksi kallioresurssit ovat riittävät myös mahdollisia laajennus- ja täydennystöitä ajatellen. Viikinmäen vieressä sijaitse myös nykyinen Viikin puhdistamoalue (kuva 1).

Keskuspuhdistamossa tullaan käsittelemään noin 650 000 asukkaan sekä Helsingin seudun ja lähiympäristön teollisuuden jätevedet. Jäteveden määrän ennustetaan olevan vuonna 2020 Helsingin alueella 80 - 93 milj. m³/a ja muiden kuntien osalta 27 milj. m³/a. Täten puhdistamo on mitoitettu 120 milj. m³:lle jätevettä vuodessa. Puhdistamon maanalaisten tilojen kokonaistilavuus on noin 1 milj. m³, ollen suurimpia Suomessa toteutettuja kalliorakennushankkeita. Puhdistamo on tarkoitus ottaa käyttöön vuonna 1994.



Kuva 1. Viikinmäen keskuspuhdistamon toiminnot ja sijainti

1.2 Viikinmäen kalliomekaanisten valvontamittausten tarpeellisuus

Kalliomekaanisia valvontamittauksia suoritetaan Helsingin kaupungin alueella kalliomekaanisesti vaativien kalliorakennushankkeiden yhteydessä. Viikinmäen keskuspuhdistamon rakennushanke on kalliomekaanisesti hyvin vaativa; leveitä allastunneleita on monta vierekkäin ja niiden väliset pilarit ovat ohuita, kalliotilat sijaitsevat lähellä maanpintaa ja kalliokaton ohuin kohta, missä kalliokattoa on vain 4 - 5 m, osuu ruhjealueelle. Lisäksi allastunneleiden jänneväli 17 - 19 m on paikoin moninkertainen verrattuna kalliokaton paksuuteen. Kohteen eteläosassa on lisäksi voimakas vaakarakoilu, joka yhdistettynä pystyrakoiiluun saattaa aiheuttaa epästabiilisuutta kalliotiloissa ja -pilareissa. Myöskään näin laajan kalliorakenteen kalliomekaanisesta käyttäytymisestä ei Suomessa ole aikaisempaa kokemusta. Oleellisena seikkana on myös se, että puhdistamon päälle rakennetaan kokonaan uusi asuinalue, jonka rakentaminen alkaa mahdollisesti jo vuonna -93.

Koska hanke on kalliomekaanisesti vaativa, on koko kallion tutkimus- ja seurantaohjelma pyritty tekemään riittävän kattavaksi. Myös kalliorakenteen käyttäytymisen valvontamittausohjelma on pyritty tekemään laajaksi. Valvontamittausohjelmassa voidaan nähdä kolme eri tehtävää:

1. Stabiilisuuden valvonta

Valvontamittausohjelma pyrkii ennenkaikkea seuraamaan ongelmakohtia eli ruhjealueen kalliokaton sekä leveiden yksikkötunneleiden välisten pilareiden käyttäytymistä ja varmistamaan kalliorakenteiden riittävä stabiilisuus.

2. Käyttäytymisen ennustaminen

Valvontamittauksilla pyritään myös varmistamaan tilojen ennustettu kalliomekaaninen käyttäytyminen sekä tekemään tarvittaessa jälkianalyysyjä. Saatujen tulosten perusteella kalliomekaanisia ennusteita on tarkennettu ja mahdollisesti muutettu suunniteltuja lujitusrakenteita. Valvontamittausten avulla on voitu siis ennakoida louhintatyön kriittiset kohdat ja näin riittävän ajoissa tehdyillä lisäsuunnitelmilla on voitu estää louhintatyön mahdolliset keskeytykset.

3. Tuleva maanpäällinen rakentaminen

Valvontamittausohjelmassa on pyritty huomioimaan myös tuleva maanpäällinen rakentaminen, joten mittauksia jatketaan tietyssä laajuudessa ainakin maanpäällisen rakentamisen päättymiseen asti.

Valvontamittausohjelmasta tehtiin ensivaiheessa riittävän laaja, jotta varsinkin edellä mainitut tavoitteet saavutettaisiin mahdollisimman hyvin. Lisäksi ohjelmoinnissa otettiin huomioon mahdollisuus tarvittaessa supistaa tai laajentaa tarpeen mukaan ko. tutkimusohjelmaa.

2. VIIKINMÄEN GEOLOGIA JA KALLIOMEKAANISET OMINAISUUDET

2.1 Yleistä

Viikinmäen alueen kallioperä kuuluu Suomen etelärannikon svekofenniseen pinta-syntyiseen gneissialueeseen. Svekofenniset vuorijonot kuuluvat svekokarelideihin, kuten karelidiset vuorijonotkin, mutta ne eroavat toisistaan kivilajeiltaan, metamorfoosiltaan ja tektoniikaltaan. Svekokarelidit ovat syntyneet noin 1.9 - 1.8 miljardia vuotta sitten /1/.

Tutkimusalueen pohjoisen vesiaseman osa koostuu keski- ja lounaisosissa sijaitsevista peitteisistä maastopainanteista sekä muilta osin avokallioalueesta. Kallionpinta on korkeimmillaan kalliomäkien lakiosissa +38 - +40 ja alimmillaan painannealueen itäreunalla noin +13. Maakerroksen paksuus on suurimmillaan noin 10 m. Eteläisen vesiaseman osa koostuu keski- ja länsiosissa sijaitsevista peitteisistä ruhjepainanteista sekä muilta osin avokallioalueesta. Korkeimmillaan kallionpinta on itä- ja länsipuolisten kalliomäkien lakiosissa noin +38 ja alimmillaan keskimmäisen kalliomäen välisessä painanteessa noin +10. Maakerroksen paksuus on suurimmillaan noin 11 m. /2/,/3/

Suurin osa vesiaseman alueesta on seoksista gneissigraniittia. Alueen etelä-kaakkoisosassa on massamaista graniittia. Alueiden välissä on kapea vaihtumisyöhyke. /2/,/3/

2.2 Kivi- ja kalliolaatu

Kivilaatu on kiinteiltä osiltaan pääasiassa rapautumatonta (Rp 0) tai suppea-alaisesti vähän rapautunutta (Rp 1). Alueen etelä-kaakkoisosissa kivilaatu on osasten järjestyneisyyden suhteen massamaista, liuskeisuusasteeltaan suuntauksetonta (M0) tai heikosti suuntautunutta (M1). Pohjois-keskiosissa kivilaji on osasten järjestyneisyyden suhteen seoksista, liuskeisuusasteeltaan heikosti (S1) tai kohtalaisesti suuntautunutta (S2). Liuskeisuuden suunta vaihtelee välillä koillinen-lounas ja itä-länsi. Kaade vaihtelee pystyn molemmin puolin ollen 80 - 100^{gon}. /2/,/3/

Kalliolaatu on pääosiltaan kiinteää harvarakoista. Kiinteiltä osiltaan kalliolaatu on etelä- ja kaakkoisosissa massarakenteista (Ma 1 - 3) ja muissa osissa seosrakenteista (Se 1 - 3).

Rikkonaisen kalliolaadun kohdalla on kaikissa peitteisissä painanteissa pohjois-etelä suunnan molemmiin puolin vaihtelevia kallioperän rikkonaisuusvyöhykkeitä. Nämä esiselkeytys- ja ilmastustilojen kohdalla sijaitsevat rikkonaisuusvyöhykkeet vaihtelevat murrosrakenteisesta savirakenteiseen (Ri III - V). /2/,/3/

Heikkousvyöhykkeet ovat pääosin jyrkästi, noin 75 - 90^{gon} kaltevuudella länsi-lounais-suuntaan kaatuvia. Lisäksi jälkiselkeytystilojen kohdalla on todettu, peitteiseen maastopainanteeseen liittyvä, koillis-lounais suuntainen, halkeama-rakorakenteinen (Ri I-II) vyöhyke, jonka kaade on 60 - 80^{gon}. Myös kalliopaljastuma-alueilla esi- ja jälkiselkeytystilojen kohdalla on kallion pintaosissa todettu kapeita, halkeama-rakorakenteisia (Ri I-II), liuskeisuuden suuntaisia tai sitä vastaan kohtisuoria vyöhykkeitä /2/,/3/.

2.3 Rakoilu

Kallion päärakoilusuunnat ovat luode-kaakko sekä liuskeisuuden suuntaa noudatteleva koillinen-lounas ja itä-länsi suuntien välillä vaihteleva rakoilu. Kaade vaihtelee 70 - 100^{gon} pystyn molemmiin puolin. Kallion rakotiheys vaihtelee harvarakoisesta (Rk 1) runsasrakoiseen (Rk 3). Toinen merkittävä rakoilu on vaakasuuntainen ja sitä tavataan varsinkin eteläisten jälkiselkeytystilojen eli massiivisen graniittialueen alueella. Sen rakotiheys vaihtelee harvarakoisesta (Rk 1) vähärakoiseen (Rk 2). /2/,/3/

Tyypiltään rakoilu on kuutio- tai laattarakoilua. Kivilajien seoksisuuden kasvaessa rakoilu muuttuu tyypiltään epämääräiseksi. Raot ovat laadultaan tiiviitä ja täytteisiä. Avointa, vaaka-kalteva-asentoista rakoilua on todettu eteläisten jälkiselkeytysaltaiden kohdalla. Haarniskarakoja esiintyy ruhjevyyhykkeiden kohdalla, missä niiden suunta noudattaa ruhjeiden pituussuuntaa /2/,/3/. Haarniskarakoja on todettu sekä vesijohtotunnelista että kallionäyttekairauksilla. Pystyasentoista rakoilua on havaittu lisäksi kallionpinnalta ja suunnatuista kallionäytteistä ja vaaka-asentoista rakoilua maatulkuutuksella /4/.

Määritetyistä kalliomäkien seismisistä kallionopeuksista 80 % oli välillä 4600 - 5500 m/s, mikä osoittaa kallion olevan runsas-harvarakoista. Painannealueilla seismiset kallionopeudet olivat välillä 3300 - 5100 m/s, mikä osoittaa kallion olevan tiheä-vähärakoista /3/.

2.5 Kalliomekaaniset määritykset

Vesiaseman alueelta on kairasydännäytteistä määritetty seuraavia ominaisuuksia: kiven puristusmurtolujuus, vetomurtolujuus, pistekuormitusindeksi, koheesio, sisäinen kitkakulma, raon koheesio ja kitkakulma, normaalijäykkyys ja leikkausjäykkyys (Taulukko 1).

TAULUKKO 1. Vesiaseman kairasydännäytteiden lujuusominaisuudet /2/,/3/

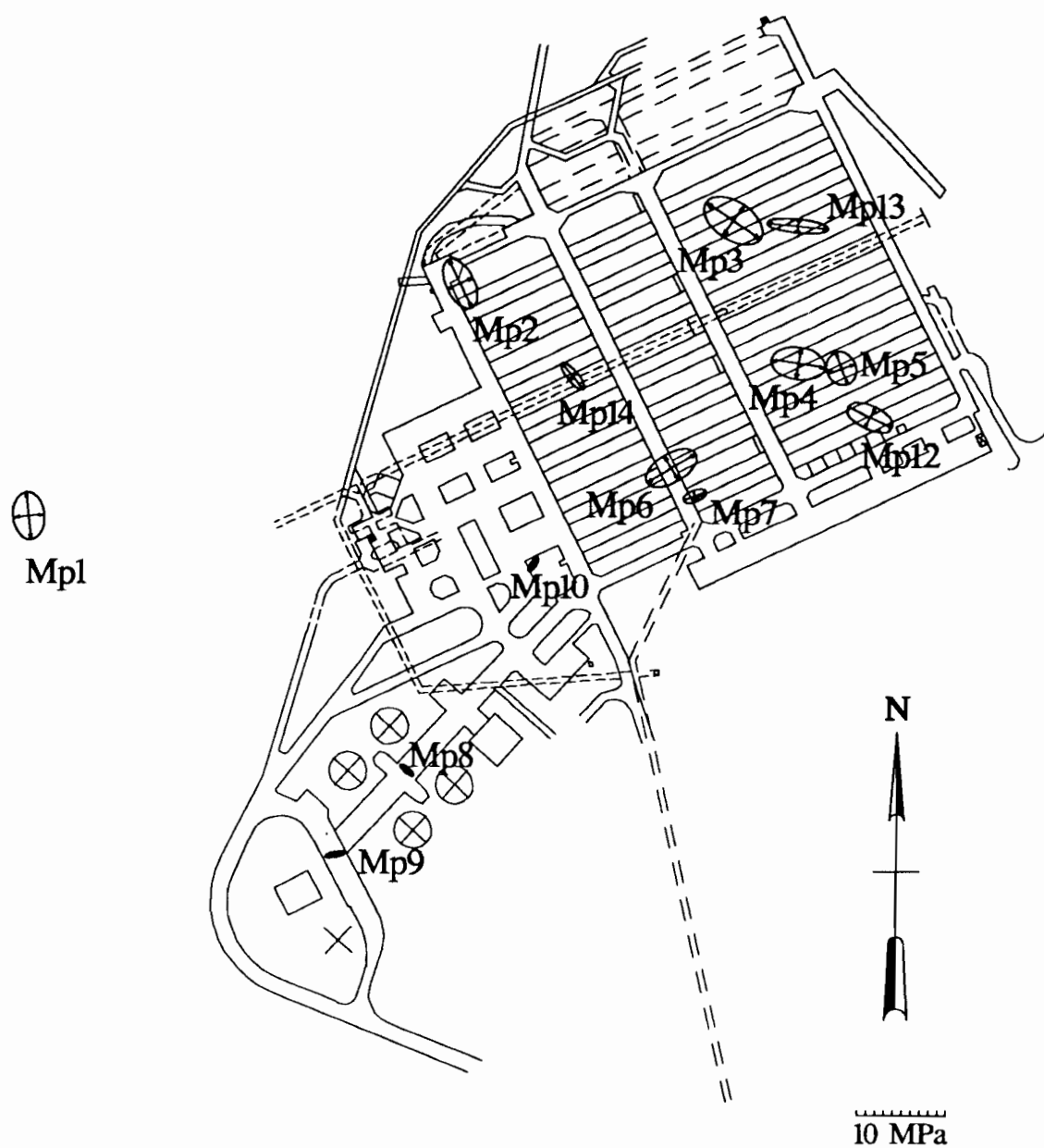
Parametri	Minimiarvo	Maksimiarvo	Keskiarvo
Puristuslujuus (MPa)	36	225	130
Vetolujuus (MPa)	3	16	7
Koheesio (MPa)	10	55	27
Kitkakulma (°)	14	56	47
Raonkoheesio (kPa)	0	570	123
Raonkitkakulma (°)	10	48	30
Normaalijäykk. (GPa/m)	5	55	23
Leikkausjäykk. (GPa/m)	0	56	6

Kiinteän kallion osalta taulukon 1 arvot ovat hyvin tyypillisiä graniittisille kivilajeille. Alhaisimmat lujuusarvot tavataan esiselkeytysaltaiden kohdalta, joissa kivi on rikkonaista. Koheesittomia rakoja on sekä esiselkeytysaltaiden että ilmastusaltaiden rikkonaisuusvyöhykkeen kohdalla. Kallion muodonmuutosominaisuuksien määrittämiseksi on tehty laboratoriokokeita ja in-situ mittauksia. Kiinteän ehjän kallion alueilla kimmokerroin on 60 - 70 GPa ja Poissonin luku on 0.20. Arvot vastaavat kirjallisuudessa graniittisille kivilajeille esitettyjä arvoja. Ruhjealueilla kimmo-ominaisuudet vaihtelevat voimakkaasti rakoilun määrästä johtuen. Ruhjealueilla kimmokerroin vaihtelee välillä 2 - 15 GPa. Savirakenteisen kalliolaadun alueella kimmokerroin on < 1 GPa. /2/,/3/

2.5 Jännitystila

Viikinmäessä tehtiin jännitystilamittauksia kolmeen eri otteeseen ennen rakennusvaiheen alkamista. Näistä ensimmäinen tehtiin Hastin menetelmällä kesällä 1985. Seuraava tehtiin Leeman-menetelmällä syksyllä 1986 ja viimeisin Leeman-Hiltscher-menetelmällä sekä modifioidulla Leeman-menetelmällä syksyllä 1987. Mittapisteitä oli kaiken kaikkiaan 14 ja näistä 5 sijaitsi eteläisen vesiaseman kohdalla ja 4 pohjoisen vesiaseman kohdalla. Loput mittapisteet sijaitsivat kolmannen urakkavaiheen alueella tai sen lähiympäristössä.

Vesiasemien kohdalla suurimman vaakajännityskentän suunta vaihtelee välillä luode-kaakko ja itä-länsi. Jännityksen suuruus vaihtelee välillä 4.2 - 7.9 MPa. Rikkonaisuusvyöhykkeiden kohdalla jännityskenttää ei ole voitu mitata. Pystyjännitykset vaihtelevat välillä 1.0 - 1.4, keski-arvon ollessa noin nolla (kuva 2). /2/,/3/



Kuva 2. Keskuspuhdistamon vaakajännitysmittauspisteet sekä mittaustulokset /2/,/3/

3. KALLIOMEKAANISET VALVONTAMITTAUKSET

3.1 Laitteiden ja mittapisteiden sijoitusperiaatteet

Kalliomekaanisilla valvontamittauksilla pyritään valvomaan ja seuraamaan kalliomassan käyttäytymistä louhinta- ja rakennustöiden aikana. Viikinmäessä valvontaohjelma voidaan jakaa kolmeen osaan seuraavasti:

1. Stabiilisuuden valvonta
 - ruhjealueen kalliokaton valvonta
 - pilareiden käyttäytymisen valvonta
 - poikkileikkausmittaukset
2. Käyttäytymisen ennustaminen ja laskentamallien tarkistus
3. Tulevan maanpäällisen rakentamisen vaikutus tiloihin

Suunniteltu valvontaohjelma perustui tietoihin kallion laadusta, tilojen lay-outista ja kallioteknisistä laskelmista. Kallioteknisten laskelmien perusteella on määritetty alueita, joissa saattaa esiintyä epästabiilisuutta.

Viikinmäessä tehtäviin valvontamittauksiin kuuluvat:

- kallion siirtymämittaukset tunnelista ja maanpinnalta
- konvergenssimittaukset (eli kalliotilan välimatkojen mittaukset) tunnelissa
- kallion sekundäärijännitystilamittaukset
- kalliopulttien ja ruiskubetonin kuormituksin mittaukset
- maanpäällisten ekstensometrien ja erillisten tarkkailupisteiden tarkkavaaitus /5/

Maanpäällisiä sondiektensometrien mittausreikiä on 14 kpl VP1-VP15 (kuvat 3a ja 3b). Mittausreiät ulottuivat tavallisesti metrin päähän kalliotilasta. Näiden lisäksi vesiasemalla on 2 maanalaista sondiektensometriä SE1-2 (leikkaus M1, kuva 3a).

Maanalaisia kolmipistetankoekstensometrejä on vesiasemalla 5 kappaletta TE13 - 32 (leikkaukset M2-4, kuva 3a). Kaikkia tankoekstensometrejä seurattiin louhintojen aikana automaattisesti. Louhintojen loppuvaiheissa niissäkin siirryttiin manuaaliseen seurantaan. Kolmannen vaiheen louhintaurakan alueella ei ollut tankoekstensometrejä.

Maanalaisia konvergenssimittauksia tehdään vesiaseman kalliotiloissa kaikkiaan 12 poikkileikkauksessa ja ne on nimetty K1 - K13 (kuva 3a). Kolmannen vaiheen louhintaurakan alueelle on lisäksi suunniteltu 10 poikkileikkausta K14 - K24 (kuva 3b). Mittausleikkaus käsittää kolme teräksistä mittapulttia, joista yksi on katossa ja kaksi

seinillä. Näiden keskinäisiä etäisyyksiä mitattiin aluksi käsin mittanauhalla, mutta myöhemmin siirryttiin optiseen mittausjärjestelmään, joka osoittautui liian epätarkaksi vaativiin tunneliolosuhteisiin, joten seurannassa palattiin takaisin mittanauhamittauksiin.

Edellä mainittujen mittalaitteiden lisäksi kalliotiloihin on vesiasemalla asennettu mittalaitteita, joilla mitataan muodonmuutoksia (S1 - 2) ja jännityksiä (J1 - 2) kalliossa sekä lujitusrakenteiden kuormituksia (P23 - 35, R31 - 33). Nämä mittausleikkaukset on nimetty M1 - M4 (kuva 3a). Kaikkia näitä mittalaitteita oli tarkoitus lukea automaattisesti dataloggerin avulla vanhasta vesijohtotunnelista, mutta dataloggerin häiriöidenalttiuden vuoksi osaa jouduttiin seuraamaan manuaalisin mittauksin. Kaikki ko. mittalaitteet ja mittauskaapelit on sijoitettu suojaan ruiskubetonin alle. Em. mittalaitteita oli aluksi ohjelmoitu enemmän, mutta louhintatyö ja johtojen rikkoutumattomuus osoittautuivat vaikeaksi kytkeä yhteen, joten mittausohjelmaa päätettiin näiden osalta supistaa oleellisesti.

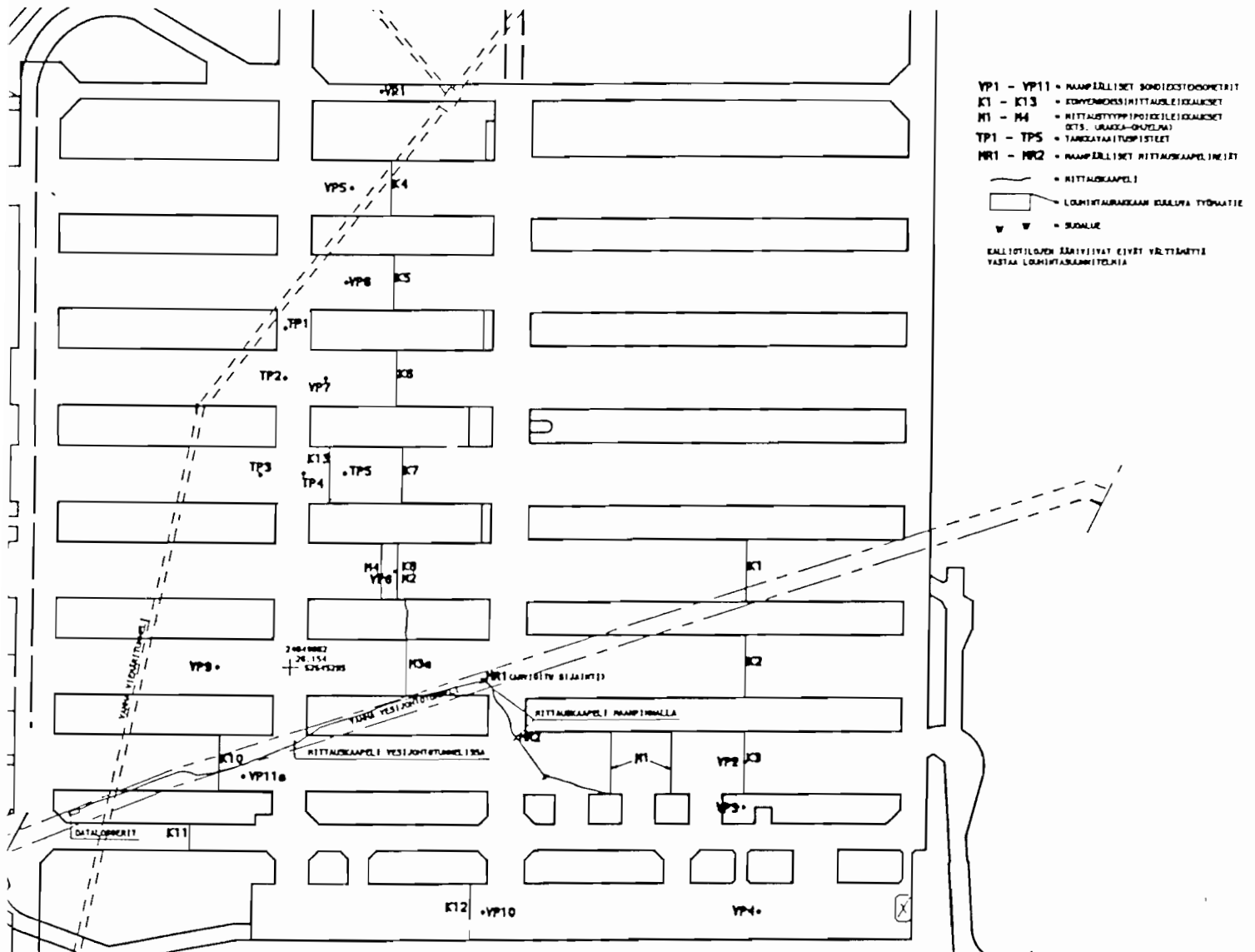
Maanpäällisten sondiekstensometrien lisäksi keskuspuhdistamon alueella on viisi tarkkavaahtuspistettä (TP1 - TP5), jotka on ohjelmoitu kriittisimmille ruhjealueille (kuva 3a). /5/

3.2 Mittausohjelma

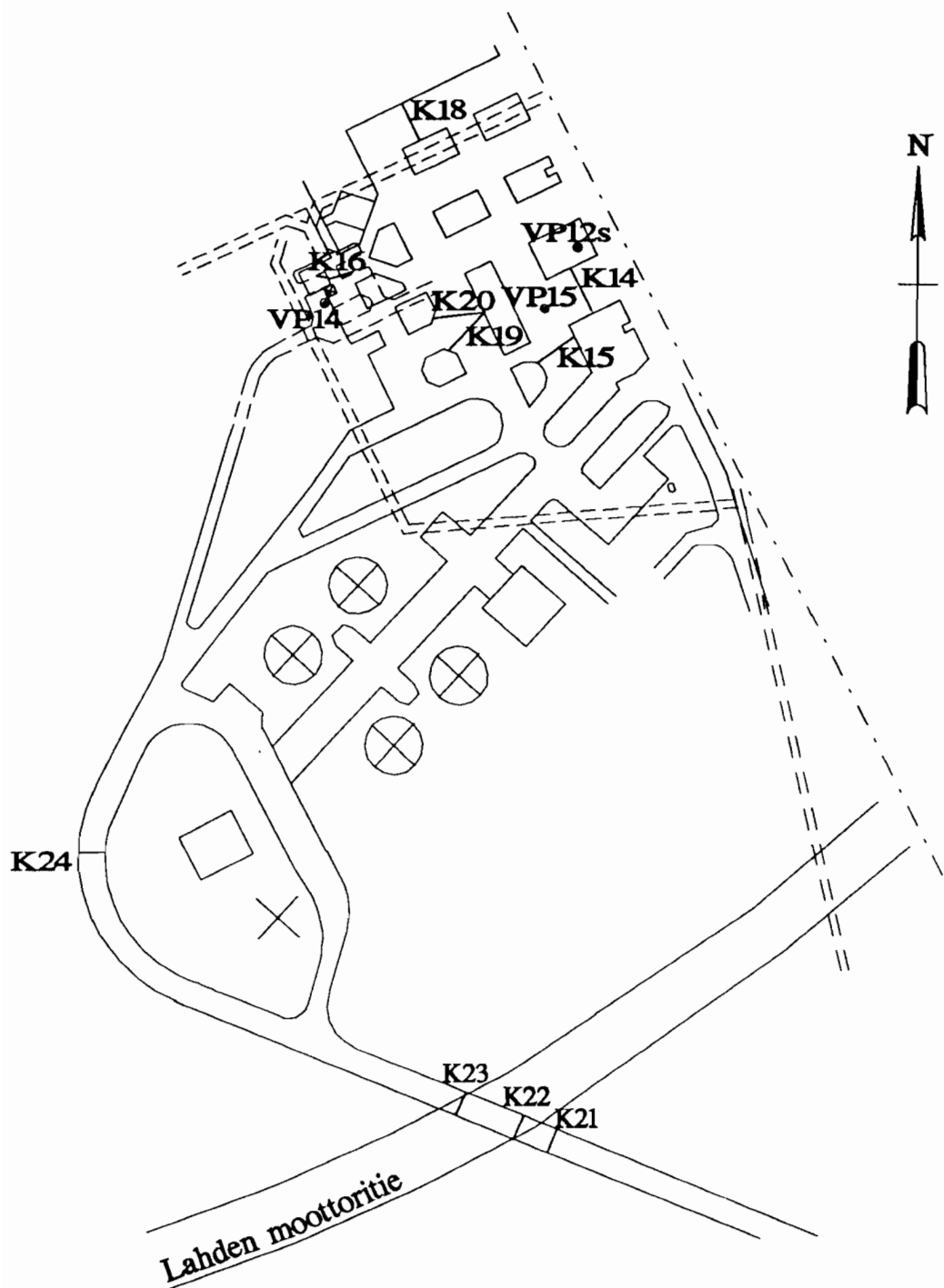
Mittausohjelma jaettiin kalliolaadun perusteella ruhjealueen ja kiinteän kallion mittausohjelmaan.

Ruhjealueilla seurattiin ruhjeiden vaikutusta kalliotiloihin ja pilareihin sondi- ja tankoekstensometrien, konvergenssimittausten ja lujitusrakenteiden kuormitusmittausten avulla. Sondiekstensometrit asennettiin maanpinnalta ennen louhintojen alkamista. Louhintojen aikana asennettiin tankoekstensometrit tunnelin kattoon ja tunneleiden välisiin pilareihin, kun kattoperävaihe oli louhittu. Louhintojen aikana asennettiin lisäksi konvergenssimittapultit, kun louhinta oli edennyt ko. kohdalle sekä ruiskubetonin ja kalliopulttien kuormitusanturit ko. lujitusrakenteen asentamisen yhteydessä.

Mittalaitteet asennettiin heti, kun se louhintojen ja lujitusten kannalta oli mahdollista. Mittalaitteiden seuranta oli tarkoitus aloittaa heti asennusten jälkeen, mutta toimintahäiriöiden vuoksi tästä jouduttiin osittain tinkimään. Mittalaitteita luettiin lähes jokaisen katkon räjäytyksen jälkeen, louhintojen ollessa laitteiden välittömässä läheisyydessä. Kauempana louhittaessa lukemisväli oli vastaavasti harvempi. Tarvittaessa lukemisväli ja vaikutus-etäisyys määritettiin tarkemmin työn aikana.



Kuva 3a. Kalliomekaanisten mittalaitteiden sijainti vesiaseman alueella /5/.



Kuva 3b. Kalliomekaanisten mittalaitteiden sijainti kolmannen urakkavaiheen alueella /5/.

Kiinteän kallion kohdalla seurattiin pääasiassa leveiden tunneleiden ja pilareiden välistä vuorovaikutusta konvergenssi- ja sondiekstensometrimittauksin. Vesiaseman ensimmäisen jälkiselkeytysaltaan ja yhdyskäytävä E7 välisen pilarin käyttäytymistä seurattiin lisäksi maanalaisten sondi- ja tankoekstensometrien sekä jännitystila-antureiden avulla. Mittalaitteiden asennus tapahtui heti, kun se louhintojen ja lujitustöiden kannalta oli mahdollista. Näiden mittausten tarkoituksena oli selvittää allastunneleiden ja ohuen pilarin vuorovaikutukset kiinteän kalliolaadun voimakkaan vaakajännityksen alueella. Mittalaitteiden lukeminen tapahtui saman periaatteen mukaisesti kuin ruhjealueella.

3.3 Käytettyjen mittalaitteiden toimintaperiaatteet

3.3.1 Sondiekstensometrit

Maanpinnalta asennettavina ekstensometreinä käytetään Interfelsin valmistamia Increx-sondiekstensometrejä. Laitteella mitataan kairareiän suuntaisia siirtymiä, eli tässä tapauksessa eri mittarenkaiden välisiä suhteellisia siirtymiä. Summaamalla näitä saadaan siirtymät laskettua esim. koko reiän pituudelta ensimmäiseen mittarenkaaseen nähden. Kun maanpinnan taso tarkkavaaitetaan vielä saman aikaisesti, saadaan selville vielä kunkin mittapisteen ja maanpinnan väliset todelliset etäisyyden muutokset. /5/

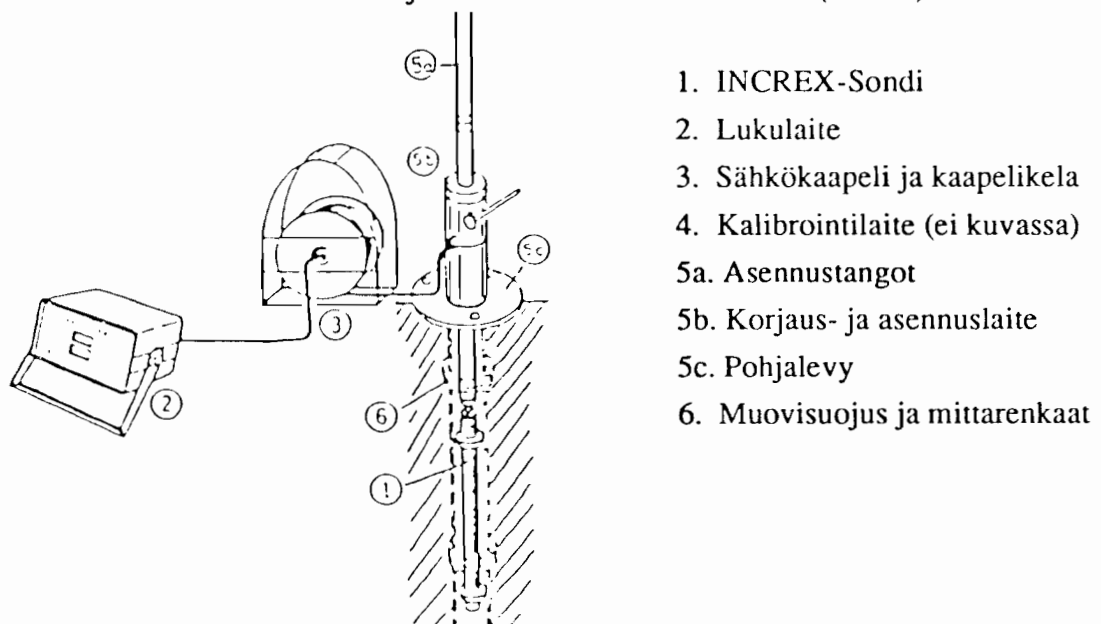
Incex-ekstensometrilaitteistoon kuuluu metrin välein olevat metalliset mittarenkaat, jotka ovat osa kairareiän seinämän tukirakenteita. Mittarenkaat asennetaan paikoilleen muovisen, sisähalkaisijaltaan 34 mm:n suojaputken kanssa esim. esi-injektoinnin yhteydessä. Muovisen suojaputken sisään asennetaan mittaushetkellä sondit, joiden sisällä on erittäin herkäät käämit. Itse mittatapahtuma perustuu käämien ja mittarenkaiden väliseen elektromagneettiseen induktioon. Mittaukset tehdään paloittain jokaiselta kairareiän mittaustuloksista vähennetään mittalaitteen käynnistä johtuva virhe. Kun mittauksia toistetaan saadaan selville renkaiden välimatkojen muutokset. Siirtymien suunta on alkuperäisissä tulostuksissa ollut siten, että kalliotilaan päin tapahtuva siirtymä on positiivista ja tilasta poispäin tapahtuva siirtymä on negatiivista. Tämä on kuitenkin tässä työssä muutettu selvyiden vuoksi päinvastaiseksi, sillä tällöin saadaan kalliokaton nousua ilmaiseva siirtymä positiiviseksi ja laskua ilmaiseva siirtymä negatiiviseksi. Ekstensometrin viimeinen mittapiste on noin 1-2 metrin päässä kalliotilasta.

Minimireikäkoko, johon sondiekstensometrin voi asentaa on 76 mm. Sondiekstensometrien mittauspituudet on Viiknämässä vaihdellut 7-30 m:n välillä, standardimaksimi-

pituuden ollessa 50 m. Sondiekstensometrin mitta-alue on suurimmillaan +/- 20 mm, tällöin laitteiston erotusterävyys on 0,001 mm ja mittatarkkuus 0.05 mm. Mittalaite kalibroidaan aina ennen mittausta. Kairareiän ja ulkoilman väliset lämpötilojen muutokset, jotka vaihtelevat välillä -5 - +50°C, eivät mittausrakojen mukaan vaikuta mittaus-tuloksiin. Sen sijaan reiän tukkeutuminen vaikuttaa siten, että jollei sondi pääse mittarenkaan läpi, jää mittaustulos saamatta ko. renkaan kohdalta.

Maanpinnalta asennettavia sondiekstesometrejä on kaiken kaikkiaan 14 kpl, joista kaksi (VP11 ja VP12) on lisäksi varustettu sivusuuntamittauksella, jolloin asennusreiän minimi-halkaisija on 89 mm. Sivusuuntamittauksissa käytetyn muovisen suojaputken sisähalkaisija on 60 mm, ja siinä on 2 raidetta, jotka ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan. Vaakasiirtymää mittaavassa sondissa on joustava pyörä, joka sopii putken raiteisiin. Vaakasiirtymämittaus tapahtuu saman periaatteen mukaisesti jokaisen mittarenkaan kohdalla kuin pystysiirtymämittauskin, mutta vaakasiirtymämittaus tehdään 2 kertaa, kummankin raiteen suunnassa. Näin voidaan määrittää 2 vaakakomponenttia, joiden avulla määritetään resultantti. Vaakasiirtymämittauksen tarkkuus on +/- 0.5 mm/m ja erotusterävyys 0.1 mm/m.

Maanpinnalta asennettavien sondiekstensometrien lisäksi käytössä on kaksi maanalaista sondiekstensometriä (SE1-SE2). Näiden toimintaperiaate on samanlainen kuin maanpäältä asennettavienkin, mutta siirtymien suunta on sovitettu päinvastaiseksi. Sekä maanpäällisiä että -alaisia sondiekstensometrejä seurataan vain manuaalisesti (kuva 4).

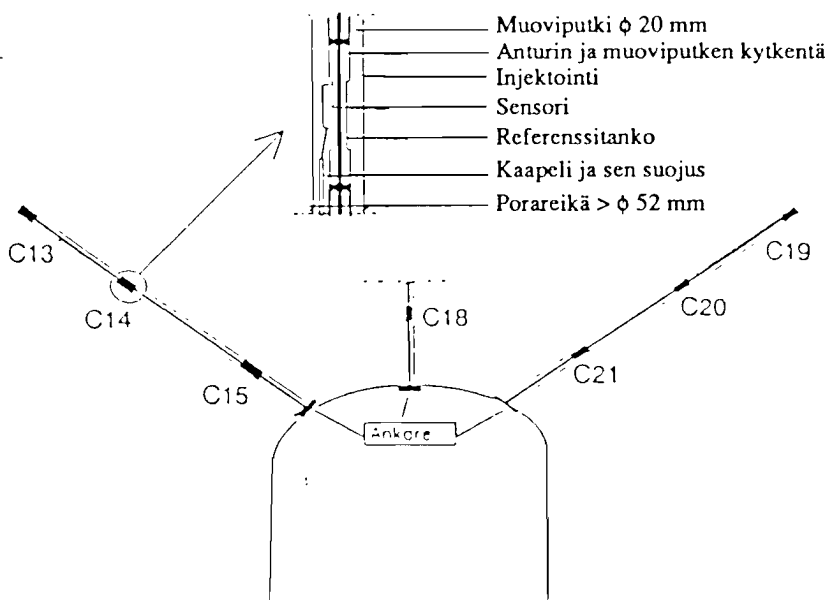


Kuva 4. Interfelsin sondiekstensometrin rakenne /6/

3.3.2 Tankoekstensometrit

Tankoekstensometrit ovat Geometrik Ab:n valmistamia monipistetankoekstensometrejä. Viikinmäessä laite koostuu kolmesta mitta-anturista, jotka on yhdistetty porareikään injektoitavilla muovisilla suojaputkilla. Mitta-antureiden läpi kulkee ruostumattomasta teräksestä valmistettu referenssitanko, joka yleensä ankkuroidaan porareiän ($\phi 64-76$ mm) pohjaan. Jokaisessa mitta-anturissa on magneetoresistiivinen sensori, joka tunnistaa magneettikentän vaihtelut, jotka aiheutuvat referenssitangossa olevista magneeteista mitta-anturin liikkeessä referenssitangon suhteen. Magneetteja on jokaisen mitta-anturin kohdalla. Mitta-anturit voidaan asentaa eri syvyyksille kallio-olosuhteista riippuen. Referenssitanko on reiän suussa kiinnitetty kallioon ankkuroituun kappaleeseen. /5/

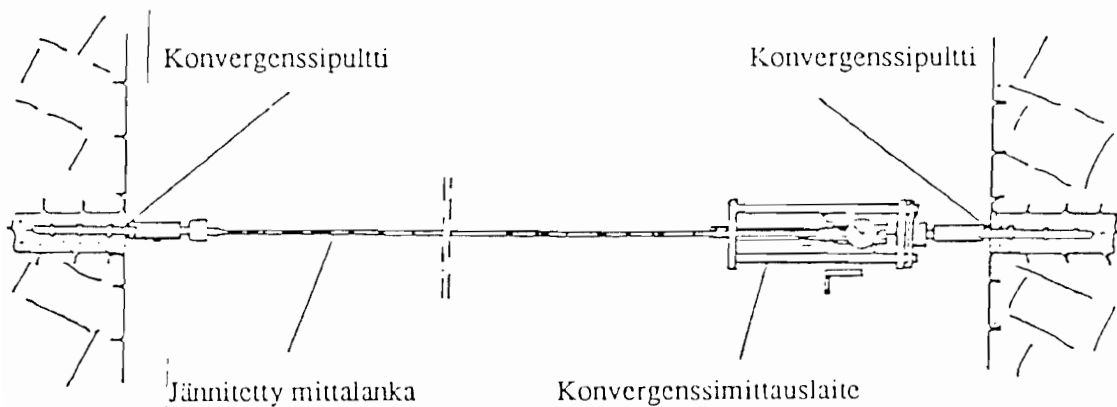
Siirtymien suunta on sovittu siten, että kalliotilaan päin tapahtuva siirtymä on negatiivista ja tilasta poispäin tapahtuva siirtymä positiivista. Tankoekstensometrejä on kaiken kaikkiaan kalliotiloissa 5 kpl ja ne on nimetty TE1x - TE3x. Tankoekstensometrejä luetaan automaattisesti: kaikki on yhdistetty tiedonkeruulaitteisiin kaapeleiden avulla. Myös manuaalinen seuranta on mahdollinen. Tankoekstensometrien mitta-alue on 40 mm ja mittaustarkkuus 0.05 mm ja erotusterävyys 0.01 mm (kuva 5).



Kuva 5. Geometrikin tankoekstensometrin rakenne /7/

3.3.3 Konvergenssimittaukset

Viikimäessä konvergenssimittauksia on tehty sekä mittanauhalla (lankaekstensometri-mittaus) että optisesti kahta elektronista teodoliittia eli ns. RMS-2000-järjestelmää käyttäen. Mittanauhamenetelmässä kolmen harjateräksisen mittapultin välisiä etäisyyksiä mitataan jännittämällä teräksinen mittanauha jokaiselle pulttivälille, minkä jälkeen pulttivälien etäisyyksien muutokset luetaan mittakelloon perustuvasta lukulaitteesta. Mittalankamenetelmän tarkkuus on 10^{-5} kertaa mitattavan välin pituus, eli Viikimäessä se on ollut luokkaa 0.1 - 0.2 mm. RMS-2000-järjestelmässä mittaus tapahtuu siten, että teodoliiteilla tähdätään prismaan ja rekisteröidään kulmahavainnot. Teodoliittiin kytketyn tietokoneen avulla lasketaan välittömästi kohdepisteen kolmiulotteiset koordinaatit. RMS-2000-järjestelmä on teoriassa tarkin tällä hetkellä käytössä oleva mittausjärjestelmä: lyhyillä etäisyyksillä päästään jopa 0,005 mm:n tarkkuuteen. Viikimäessä menetelmän tarkkuus on kuitenkin oleellisesti huonontunut, koska tähtäyksiä on jouduttu suorittamaan liian etäältä. Lisäksi tähtäinpisteiden huono näkyvyys on aiheuttanut ongelmia. Em. syiden takia on Viikimäessä siirrytty takaisin mittanauhamittaukseen (kuva 6).



Kuva 6. Interfelsin konvergenssimittauslaite /8/

3.3.4 Ruiskubetonin jännitystila-anturit

Ruiskubetonoinnista mitataan jännityksen muutosta muodonmuutoksen kautta Geokonin valmistamalla anturilla, jonka toiminta perustuu värähtelevän lanka-anturin taajuuden muutokseen. Lankaan johdettu vaihtovirta yhdessä anturissa olevan magneetin kanssa aiheuttaa langan värähtelyn taajuudella, joka on verrannollinen voimaan (kaava 1).

$$f_n = \frac{n \sqrt{T / \delta}}{2L}, \quad (1)$$

missä

f_n = ominaistaaajuus
 $n = 0,1,2...$
 L = langan pituus
 F = lankaa jännittävä voima
 δ = langan pituusmassa
(massa/pituusyksikkö)

Anturi mittaa värähtelyn taajuuden muutoksen, joka aiheutuu ruiskubetonin muodonmuutoksesta. Tämän jälkeen voidaan laskea ruiskubetoniin vaikuttavan jännityksen suuruus, kun ruiskubetonin kimmomoduli tiedetään.

Ruiskubetoniantureita on kaksi jokaista mittapistettä kohden. Tämä johtuu siitä, että tällöin saadaan yhdestä kohtaa kaksi jännityksen arvoa ja näin saadaan laskettua mm. vaikuttava momentti. Koska vaadittu kerrospaksuus on suuri, tapahtuu ruiskubetonointi kalliokaton osalta kahdessa tai useammassa vaiheessa. Tällöin myös anturit joudutaan asentamaan kahdessa vaiheessa. Ruiskubetonin jännitysanturit sijaitsevat Viikinmäessä kallionpinnan suuntaisesti ruiskubetonikerrosten sisällä noin 50 mm etäisyydellä kallionpinnasta sekä ruiskubetonikerroksen ulkoreunasta. Ruiskubetonin jännitysanturin mitta-alue +/- 1500 μ Strain (58 MPa) ja herkkyys 1 μ Strain (39 kPa)

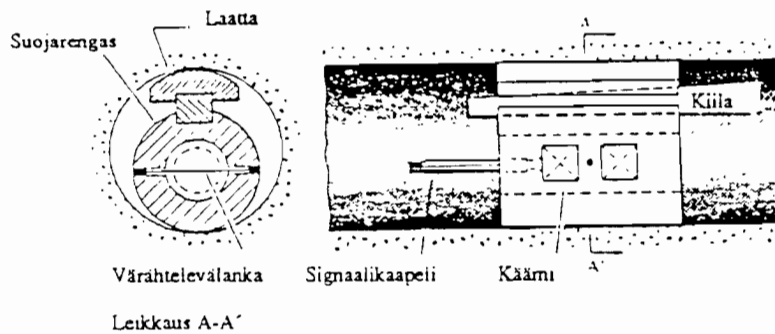
3.3.5 Kalliopulttien kuormitusanturit

Kalliopulttien kuormitusta mitataan myös Geokonin valmistamilla värähtelevän langan periaatteella toimivilla antureilla, jotka ovat varustettuja lämpötilakompensoinnilla. Pultti-anturit asennetaan tavallisesti pulttiin hitsaamalla siten, että ne ovat metrin syvyydellä kallion pinnasta. Tämän jälkeen pulttien ympärille asennetaan suoja, joka estää anturin ja anturikaapelin suoran kontaktin kallioon. Lisäksi jokaisen anturikaapelin ympärille asennetaan suojaletku, jotta kaapelit kestävät kalliossa tapahtuvat muodonmuutokset. Kalliopulttien kuormitusanturit oli yhdistetty dataloggeriin mittakaapelin avulla, mutta niitä luettiin lukulaitteen avulla, kuten kaikkia värähtelevän langan periaatteella toimivia antureita. Kalliopultin kuormitusanturin mitta-alue on +/- 300 MPa ja herkkyys 70 kPa.

3.3.6 Kallion jännitystila-anturit

Kalliossa tapahtuvia pystyjännitystilan muutoksia mitataan Geokonin valmistamilla jännitystila-antureilla, joiden toiminta perustuu myös värähtelevän langan taajuuden muutoksiin. Jännitysantureissa oleva kiinnityslaatta kiilataan kairareikään asennuslaitteen avulla siten, että syntyvä jännitys vastaa teoreettista alkujännitystä. Viikinmäessä

jännitysantureita on kaksi kappaletta I jälkiselkeytsaltaassa ja niillä seurataan pystyjännitysten muutoksia altaan ja E7-käytävän välisessä pilarissa. Mittausalue on 70 MPa puristukselle ja 3 MPa vedolle. Tarkkuus vaihtelee 14 - 70 kPa:in välillä, riippuen kallion kimmomodulista. Viikinmäen tapauksessa tarkkuus oli 0.06 MPa. (kuva 7)



Kuva 7. Geokonin jännitystila-anturin rakenne /9/

3.3.7 Kallion muodonmuutosanturit

Muodonmuutoksia mitataan Geokonin värahtelevän langan periaatteella toimivalla anturilla. Mitattavana suurena on vaakajännityskentän muutokset, jotka saadaan Hooken lain ($\sigma = E\epsilon$) mukaan laskettua μ Straineista. Anturit ovat varustettuja lämpötilakompensoinilla. Muodonmuutosanturit ovat samanlaisia antureita kuin ruiskubetonin jännitystila-anturit. Muodonmuutosanturit sijaitsevat kairareiän poikkileikkaussäteen suuntaisesti tankoekstensometri E13:n kanssa samassa kairareiässä, jonka halkaisija on 76 mm. Muodonmuutosantureiden mitta-alue on $\pm 1500 \mu$ Strain (90 MPa) ja herkkyys 1μ Strain (60 kPa).

3.3.8 Tiedonkeruulaitteisto ja tapahtuma

Dataloggerit eli tiedonkeruulaitteina Viikinmäessä käytettiin Dataelektronicsin DG100-loggereita, jotka sijaitsivat vanhassa vesijohtotunnelissa. Alunperin kahteen dataloggeriin oli kytketty 23 mittalaitetta. Edellä mainituista syistä johtuen (kts. kappale 3.1) niillä seurattiin loppujen lopuksi vain viittä tankoekstensometriä. Ekstensometrien anturit oli kytketty moninapaista datakaapelia käyttäen tiedonkeruulaitteisiin. Kaapelit oli suojattu louhittavissa tiloissa asentamalla ne ensin $\phi 25$ mm PE-putkiin, jotka peitettiin sen jälkeen ruiskubetonilla. Vesijohtotunnelissa kaapelit kulkivat aluksi suojaamattomina, mutta tällä hetkellä ne ovat osittain täytön ja suojaputken sisällä.

Tiedonkeruulaitteet ohjelmoitiin ottamaan lukemat määrävälein, esim. 5 minuutin välein, ja tallentamaan keskiarvot em. lukemista esim. aina yhden tunnin ajalta. Tällä tavalla poistetaan hetkellisten häiriöiden vaikutus. Tiedonkeruulaitteiden tallentaman tiedon raportointi tapahtui siirtämällä tieto kannettavan mikron tiedostoksi, jolloin samalla korjataan lukemat kalibrointi- ja tarkastusarvoilla. Graafinen esitys havainnoista voitiin tulostaa kuvaruutuun saman tien työmaalla sekä raportoida myöhemmin. Tiedonkeruulaitteisiin mahtuu kerrallaan tallennustiheydestä riippuen 1-4 viikon aineisto. /5/

4. MALLINNETTU KALLIOMEKAANINEN KÄYTTÄYTYMINEN

4.1 Yleistä

Vesiaseman eri louhintavaiheiden kalliomekaanista käyttäytymistä mallinnettiin ennustusvaiheessa sekä jatkuvalla elementtiohjelmalla (FLAC) että epäjatkuvalle elementtiohjelmalla (UDEC). Molemmilla ohjelmilla voidaan tarkastella aika-askeleen vaikutusta tilojen stabiilisuuteen, jännitys jakaumaan ja muodonmuutoksiin.

Laskentaleikkaukset on nimetty siten, että tulopumppaamo on 100-leikkaus, esiselkeytys 200-leikkaus, ilmastus 300-leikkaus, jälkiselkeytys 400-leikkaus ja murskaamon alue 500-leikkaus. Vesiasemasta on ensin laskettu FLAC-ohjelmalla yksi pitkä poikkileikkaus jokaisesta tarkasteluun valitusta laskentaleikkauksesta. Näiden tulosten perusteella on tehty tarkentavia laskentoja. Tarkentavissa laskennoissa on käytetty FLAC-ohjelmaa tapauksissa, joissa kriittisenä tekijänä on ruhevyöhyke ja UDEC-ohjelmaa kun kriittisenä tekijänä on ollut kallion rakoilu. 100- ja 500-leikkauksissa on käytetty vain UDEC-ohjelmaa.

Mallinnuksen tarkoituksena oli selvittää kohteen rakennuskelpoisuutta ja tarkistaa valittujen suunnitteluratkaisujen kallioteknistä toimivuutta. Tehtyä mallinnusta tarkistettiin koko rakennusvaiheen ajan ja tarvittaessa tehtiin lisälaskelmia kriittisiksi havaituista kohdista. Mitoitusperiaatteena on ollut tehdä ensimmäisen vaiheen laskennat ilman lujitusta stabiliteetin ja sortumamekanismin selvittämiseksi. Toisessa vaiheessa mallinnetaan lujitusrakenteita ja lasketaan lujitusrakenteiden varmuudet kokonaisvarmuusmenetelmällä. /10/, /11/

Jälkitarkasteluvaiheessa tehtyjen mallinnusten tarkoituksena on tarkentaa Viikinmäen vedenpuhdistamon FLAC-mallinnusta vastaamaan mitattuja siirtymiä sekä lujitusrakenteiden kuormia.

Alkuperäisiin mallinnuksiin verrattuna tarkennetuissa mallinuksissa on muutettu ainoastaan vaakajännitystä sekä kalliolaatujen materiaaliparametrejä, lähinnä kitkakulmaa, koheesiota ja vetomurtolujuutta sekä loushintajärjestyksiä. Tarkoituksena on ollut löytää sellaiset parametrit, jotka mahdollisimman hyvin vastaavat kalliomekaanisia määrittämiä, kuvaavat koko kalliomassaa rakoineen ja ruhevyöhykkeineen, ja joiden perusteella saadut siirtymät ja kuormitukset vastaavat eri loushintavaiheissa mitattuja siirtymiä ja lujitusrakenteiden kuormia. Koska loushintajärjestys on muuttunut alkuperäisistä suunnitelmista, on nämä muutokset luonnollisesti lisätty tarkennettuun malliin, jotta päästäisiin mahdollisimman lähelle ekstensometrin kohdalla vallinnutta todellista tilannetta.

Tarkennetut FLAC-mallinnukset on laskettu kolmannesta, kuudennessa ja seitsemännessä ilmastusaltaasta, eli niiltä kohdilta, joissa oli alunperin mallinnettu osittaislouhintaa ja jotka sijaitsivat kriittisissä paikoissa. Tällöin mallinnukseen verrattavat sondi-ekstensometrit ovat VP5, VP6 ja VP8. Pulttiantureista vertailukohteina ovat P31 - 35.

Mallinnusverkkoa on kolmannen ilmastusaltaan kohdalla muutettu siten, että toinen syvennysvaihe, jota alkuperäistä FLAC-mallinnusta tehdessä ei ollut tarkoitus louhia, on lisätty malliin. Lisäksi ohjelman version muuttumisesta johtuvia mallinnusverkon muutoksia on lisätty malliin. Mallinnusverkon muutosten lisäksi pultit, jotka alkuperäisessä mallissa olivat yhtenä palana, on jaettu neljään segmenttiin. Näin saadaan pulttivoimat jokaiselle metrin pituiselle segmentille erikseen, mikä kuvaa paremmin todellista tilannetta, sillä pultin kuormitusanturit sijaitsevat metrin päässä kallionpinnasta. VI ja VII ilmastusaltaan kohdalla loushintajärjestystä on alkuperäisestä mallista muutettu siten, että kattoperän loushintavaiheet vastaavat todellisuudessa ekstensometrien VP5 ja VP6 kohdalla tapahtunutta loushintajärjestystä.

4.2 Käytetyt laskenta-arvot

Mallinnuksessa kallion oletettiin käyttäytyvän Mohr-Coulombin materiaalimallin mukaisesti. Lähtöparametrit perustuvat kairasydännäytteistä määritettyihin kalliomekaanisiin ominaisuuksiin. Lähtöparametrit vaihtelivat sekä kalliolaadun että sijainnin mukaan.

Kolmas ilmastusallas

Kolmannen ilmastusaltaan siirtymiä ja lujitusrakenteiden kuormituksia on mallinnettu loushintajärjestystä muuttaen sekä alkuperäisin materiaaliparametrein että eri kalliolaatujen vetolujuutta nostamalla (koheesiota nostamalla ja kitkakulmaa pienentämällä). Lisäksi on

käytetty laskentatapaa, jossa vetolujuudelle on määritetty pienempi arvo kuin mitä Mohr-Coulombin murtokriteerillä saadaan kitkakulman ja koheesion perusteella. Tällöin kairasydännäytteistä määritetyt vetolujuuden arvot eivät ylity. Kimmoarvoja ei ole muutettu alkuperäisestä mallista. Versiota 4 lukuunottamatta vaakajännitystilana on ollut 5 MPa. /13/ (Taulukko 2)

TAULUKKO 2. Laskennoissa käytetyt parametrit.

Versio	Kalliolaatu	C (MPa)	φ (°)	σ_t (MPa)
1	Ehjä kallio	5.00	40	0.00
1	Ri I	0.50	37	0.00
1	Ri III	0.05	35	0.00
2	Ehjä kallio	5.00	40	5.96
2	Ri I	0.50	37	0.66
2	Ri III	0.05	35	0.07
3	Ehjä kallio	8.00	37	10.62
3	Ri I	1.00	35	1.43
3	Ri III	0.10	33	0.15
4	Ehjä kallio	6.00	32	10.00
4	Ri I	0.00	30	6.00
4	Ri III	1.00	28	1.88

Kuudes ja seitsemäs ilmastusallas

Kuudennen ja seitsemännen ilmastusaltaan kohdalla ei pulttikuormituksia ole mitattu, joten mallinnettuhinkaan pulttikuormituksiin ei tässä yhteydessä puututa. Siirtymistä on sen sijaan tehty neljä eri mallinnusta; kaksi alkuperäisestä mallista, joista toisessa on vain louhintajärjestystä muutettu (versio 1, taulukko 3), toisessa on lisäksi Ri V vyöhykkeen kimmo-ominaisuudet nostettu kaksinkertaisiksi ja annettu ohjelman määrittää materiaalien vetolujuudet Mohr-Coulombin mallin mukaan ja nostettu vaakajännitystila 5 MPa:sta 6.6 Mpa:iin (versio 2). Lisäksi on laskettu kaksi mallia, joissa on muutettu myös muita materiaaliparametrejä (versiot 3 ja 4).

TAULUKKO 3. VI ja VII ilmastusaltaan laskennoissa käytetyt parametrit

Versio	Kalliolaatu	C (MPa)	φ (°)	σ_t (MPa)
1	Ehjä kallio	5.00	40	0.00
1	Ri III	0.50	35	0.00
1	Ri V	0.01	30	0.00
2	Ehjä kallio	5.00	40	5.96
2	Ri III	0.50	35	0.71
2	Ri V	0.01	30	0.02
3	Ehjä kallio	5.00	40	1.00
3	Ri III	0.60	35	0.20
3	Ri V	0.40	30	0.08
4	Ehjä kallio	20.00	41	8.00
4	Ri III	2.00	39	2.50
4	Ri V	1.00	37	1.30

Siirtymien tarkkailussa on huomioitu myös viereisen ilmastusallastunnelin vaikutus. Tällöin VP5:n ja VP6:n kohdalla tarkastellaan kymmentä eri vaihetta (liitteet 14-21).

4.3 Laskennan tulokset

4.3.1 Mallinnus ennen louhintaa

Eteläisen vesiaseman osalta kriittisiä paikkoja olivat esiselkeytysaltaiden kohdalla I allastunnelin ja kulkutunnelin välinen pilari, jossa esiintyi vetomurtumia. Ilmastusaltaiden kohdalla kriittinen paikka oli kolmannen allastunnelin vasen yläkulma, jossa tapahtui vetomurtumista aiheutunut sortuma, lisäksi kolmannen allastunnelin oikeassa seinässä siirtymät olivat suuret. Jälkiselkeytysaltaiden kohdalla kriittisiä paikkoja olivat koneistus- ja laitehallin oikea yläkulma ja kulkutunnelin oikea seinä. /10/,/11/

Pohjoisen vesiaseman osalta kriittisiä paikkoja olivat ilmastusaltaiden kohdalla VI allastunnelin vasen yläkulma ja VII allastunnelin oikea yläkulma. Molemmissa tapahtuu vetomurtumia. Lisäksi VI ja VII allastunnelin seinien siirtymät ovat suuret. Pohjoisen vesiaseman alueella ei esi- ja jälkiselkeytysaltaiden kohdalla esiinny varsinaisesti kriittisiä kohtia. /10/,/11/

Näiden tulosten perusteella tehtiin alunperin tarkemmat mallit mm. III, VI ja VII ilmastusaltaista, joita on sen jälkeen muokattu vastaamaan mitattuja siirtymiä ja lujitusrakenteiden kuormituksia.

4.3.2 Tarkennettu mallinnus

Kolmas ilmastusallas

Alkuperäisen mallin (versio 2, taulukko 6) siirtymät ovat ensimmäisen kattoperän louhinnan jälkeen välillä -0.3 - -0.1 mm, eli katto laskisi hieman. Em. siirtymät tapahtuvat solmupisteissä, jotka ovat katon keskikohdasta mitattuna 1 - 3 metrin päässä kallionpinnasta. Toisen kattoperän louhinnan jälkeen kahden viimeisen (kallionpinnalta mitattuna) solmupisteen siirtymät kasvavat lähelle -30 mm, kun taas kolmannen solmupisteen siirtymä on vain -0.5 mm. Kolmannen kattoperän louhinnan jälkeen kahden viimeisen mittapisteen siirtymät ovat edelleen kasvaneet, kuten myös kolmannen mittapisteen, jonka siirtymä on nyt -0.8 mm. Neljännen vaiheen jälkeen siirtymät ovat hieman pienentyneet, mutta viidennen vaiheen jälkeen ne ovat jälleen samalla tasolla, kuin kolmannen vaiheen jälkeen. Muutokset syvennyslouhinnan jälkeen ovat kuitenkin vähäisiä vain muutamia millimetrin kymmenesosia. /16/

Suuret siirtymät selittyvät materiaaliparametrien varovaisella arvioinnilla, mistä johtuen hallin vasemmassa ylänurkassa eli Ri IV vyöhykkeen alueella tapahtuu myötöä vielä viimeisenkin louhintavaiheen jälkeen. /16/

Kun vetolujuudenkesto poistetaan kaikista kalliolaaduista (versio 1, taulukko 6), muuttuu malli vieläkin konservatiivisemmaksi. Eron huomaa kahdessa viimeisessä solmupisteessä, joiden siirtymät kasvavat kolminkertaisiksi alkuperäiseen versioon verrattuna. ylempien mittapisteen siirtymät pysyvät tässä mallissa puolestaan pienempinä kuin alkuperäisessä; aluksi siirtymän suunta on jopa positiivisella puolella. Vetolujuuden poistaminen aiheuttaa myötöalueiden lisääntymistä verrattaessa alkuperäiseen versioon. /16/

Nostettaessa kivilajien vetolujuutta lähelle mitattuja arvoja, kitkakulmaa hieman laskemalla ja koheesiota nostamalla (versio 3, taulukko 6), pienenevät negatiiviset siirtymät alkuperäisestä versiosta. Kuitenkin siirtymät pysyvät alun jälkeen vielä negatiivisina. Siirtymien suuruus on kuitenkin lähellä mitattuja siirtymiä. /16/

Suurimmillaan version 3 siirtymät ovat katto-osan louhinnan jälkeen, jolloin em. kolmen solmupisteen siirtymät vaihtelevat välillä -0.5 - -1.5 mm. Materiaaliparametrien parantamien poistaa myötöalueet viimeisen louhintavaiheen jälkeisestä tilasta, rikkonaisuusvyöhykkeiden kohdalle jää ainoastaan elastisia alueita, jotka ovat olleet myötötilassa mallinnuksen aikaisemmissa vaiheissa. /16/

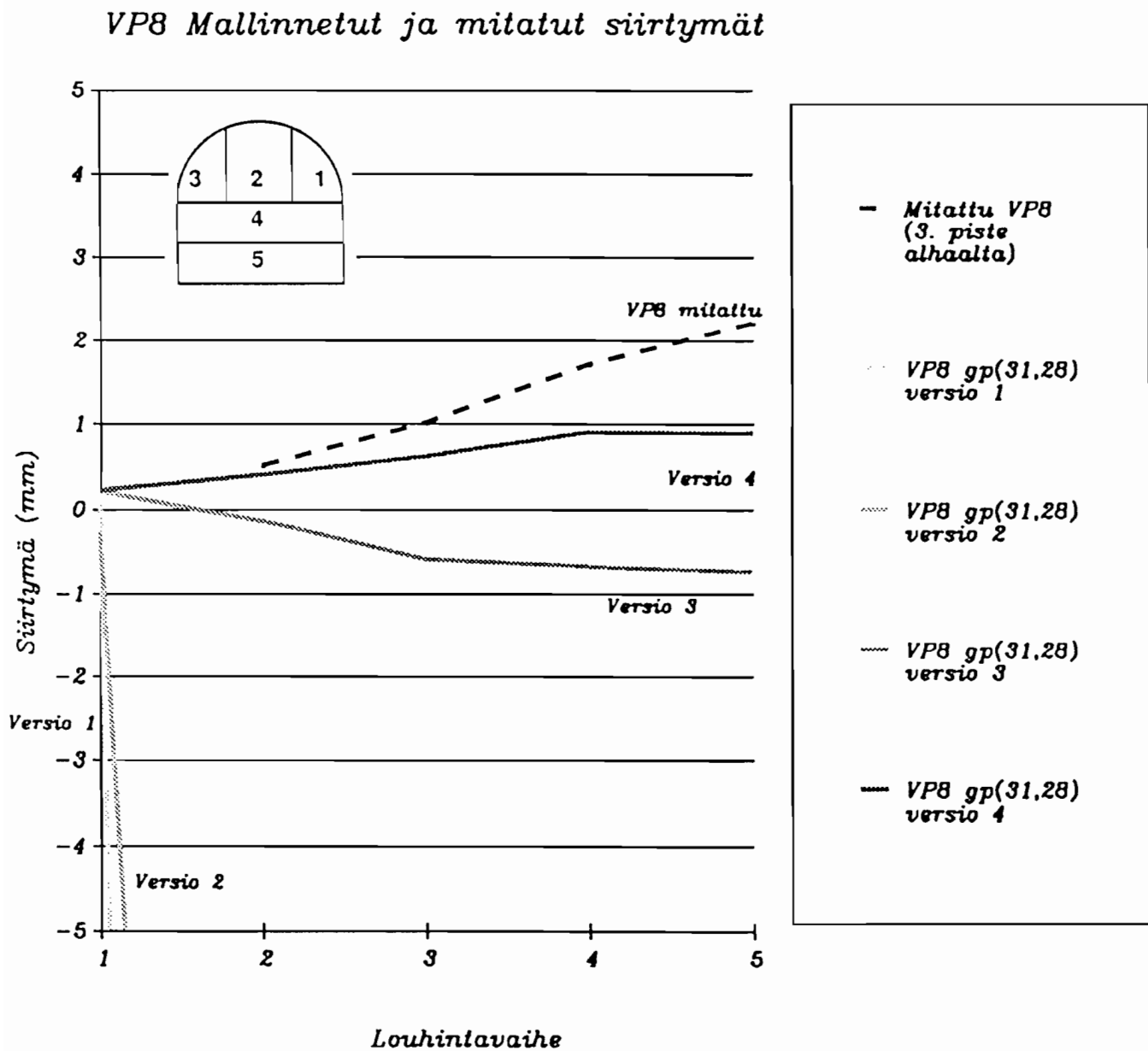
Versiossa 4 on, taulukossa 6 esiintyvien arvojen lisäksi, muutettu vetojännitys 5 MPa:sta suurimpaan alueella mitattuun arvoon 6.8 MPa:iin. Lisäksi kivilajien kohdalla on vetolujuuden arvot muutettu vastaamaan mitattuja arvoja eikä Mohr-Coulombin mallista suoraan saatavia arvoja ole täten käytetty. Näin saadaan siirtymät positiivisiksi ja lähelle mitattuja arvoja, varsinkin kattoperien louhintojen yhteydessä. Tällöin erot mitattujen ja mallinnettujen siirtymien välillä vaihtelevat 0.12 mm:stä 0.35 mm:iin. Version 4 viimeisen louhintavaiheen jälkeisestä tilasta ovat elastiset alueet vähentyneet verrattaessa muihin malleihin. Elastisia alueita on ainoastaan Ri III-IV vyöhykkeessä. Suurimmillaan positiivinen siirtymä versiossa 4 on ensimmäisen syvennysvaiheen jälkeen 0.93 mm. Mitattu siirtymä on tällöin 1.7 mm. /16/

VP8:n mallinnettujen ja mitattujen siirtymien vertailu on esitetty kuvassa n:o 8. Tällöin mitatuista siirtymistä on käytetty 3. mittapistettä alhaalta lukien ja mallinnetuista em. mittapistettä vastaavaa solmupistettä gp(31,29) sekä viimeistä mittapistettä vastaavaa solmupistettä gp(31,27).

VP8:n mitatut siirtymät kasvavat tasaisesti jokaisen louhintavaiheen jälkeen, kuten vetolujuuden kanssa määritetyssä mallissa, ainoastaan suunta on toinen. Toisen kattoperän louhinnan jälkeen mitattu siirtymä oli +0.5 mm ja syvennysvaiheen jälkeen +2.2 mm. Mitatut siirtymät olivat negatiivisia ainoastaan vuodenvaihteen 89/90 tienoilla, jolloin kolmannen ilmastusaltan louhinnoissa on tauko. Neljännen ilmastusaltan nostolouhinta oli tällöin kuitenkin käynnissä. Näiden louhintojen vaikutusta ei ole otettu huomioon kolmannen ilmastusaltan louhintavaiheita määritettäessä (kuva 8).

Mitattujen siirtymien suunnan ja suuruuden erilaisuus alkuperäiseen mallin siirtymiin verrattuna, johtunee mallin varovaisista materiaaliparametrien valinnasta. Tällöin on muistettava, että mallia tehdessä ei ollut käytettävissä kaikkia kairasydännäytteistä saatuja lujuusominaisuuksia, ja että mallilla haettiin konservatiivista tapausta. Lisäksi VP8:n seuranta aloitettiin myöhässä, mikä saattaa vaikuttaa mitattujen siirtymien suuntaan.

Nostamalla mallin vaakajännitystä arvoon 6.8 MPa sekä eri kalliolaatujen vetolujuutta tarpeeksi, saadaan siirtymien suuruudet ja suunnat lähelle mitattuja arvoja (versio 4, taulukko 3). Vaikka versiossa 4 käytetyt arvot ovat kairasydännäytteistä määritettyjä arvoja pienempiä, vaikuttavat ne suurilta, varsinkin kitkakulman ja koheesion osalta, verrattuna kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin. /13/,14/



Kuva 8. VP8:n mallinnetut ja mitatut siirtymät

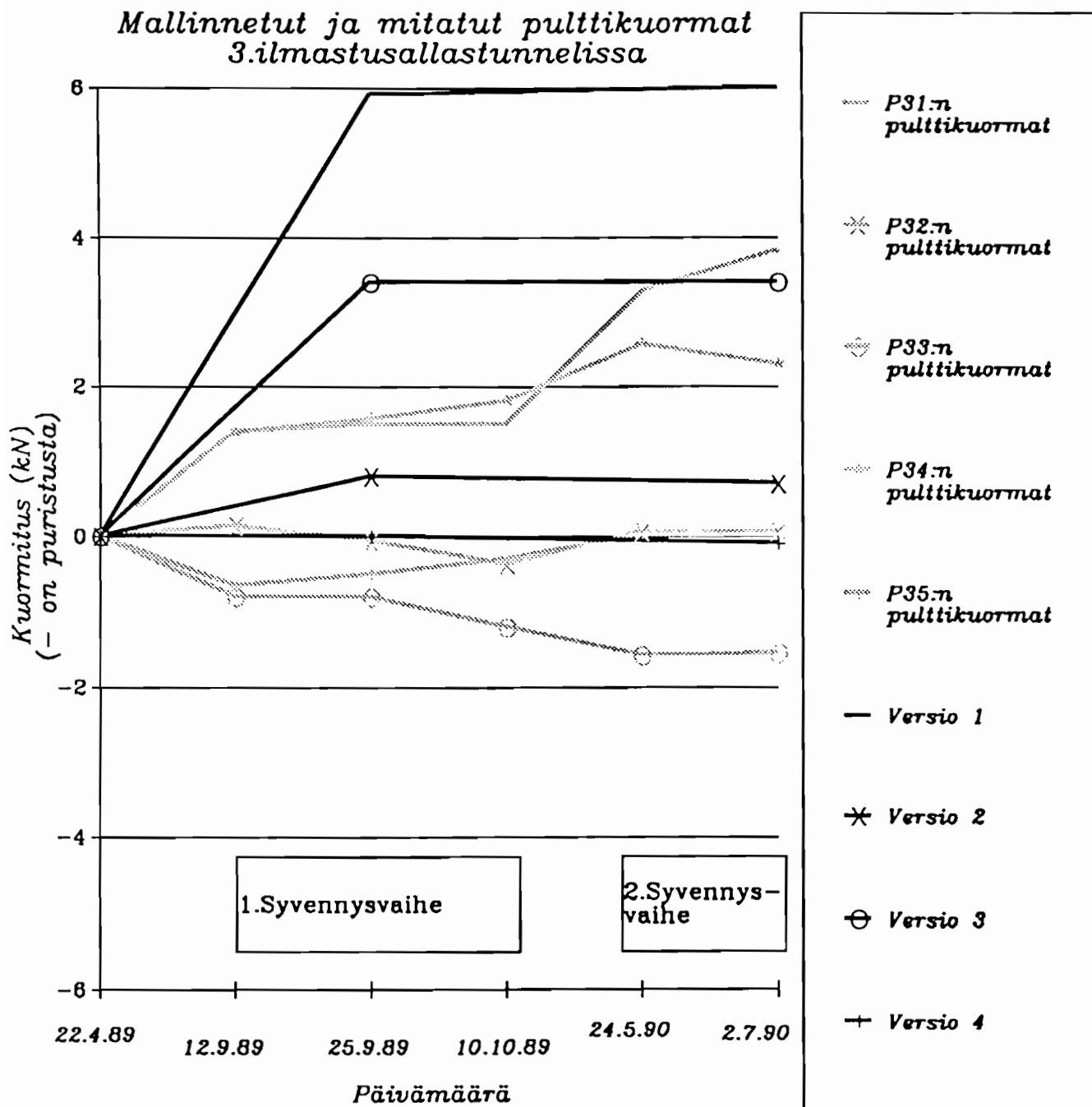
Pulttien kuormia on mallinnettu siten, että katto on pultitettu vasta kolmannen kattoperän louhinnan jälkeen. Tällöin saatu pulttikuormitus on valittu nollassa, johon kahden syvennysvaiheen jälkeisiä pulttikuormia on verrattu. Suurin pulttikuormien nousu tapahtuu lähimpänä toista ilmastusallasta olevissa pulteissa.

Ilman vetojännitystä lasketussa mallissa (versio 1), nostolouhinnan jälkeen kahdessa reunimmaisessa (II ilmastusaltaan puoleisissa) pultissa vetokuormitus nousee nollassa 10.5 - 13.0 kN. Muissa pulteissa nousu on kaksi kertaa pienempää. Keskiarvo ilman kahta reunimmaista pulttia on 3.7 kN. Syvennysvaiheen jälkeiset kuormat ovat nousseet hieman nostolouhinnoista, muutosten ollessa 0 - 1.9 kN:in välillä. Keskiarvon ollessa noin 0.4 kN.

Myös alkuperäisessä mallissa (versio 2) kahden reunimmaisen pultin kuormien nousu poikkeaa muiden pulttien kuormitusten noususta, sillä reunimmaisten pulttien kuormat kasvavat nostolouhinnan jälkeen 9 kN. Kaikkien muiden pulttien kuormien nousu jää alle 2 kN:in. Muutamassa pultissa kuormitus jopa laskee verrattuna kattoperän louhintaan. Keskiarvo ilman kahta reunimmaista pulttia on 0.4 kN. Syvennysvaiheen kuormien muutokset verrattuna nostolouhintoihin vaihtelevat välillä -0.3 - 0.5 kN, keskiarvon ollessa 0 kN. Kahden reunimmaisen ja muiden pulttien välillä ei ole tällöin eroja. Version 3 pulttien kuormissa ei ole suuria eroja version 2 kuormituksiin, joten niitä ei tarkastella.

Myös versiossa 4 pulttikuormat olivat suurimmillaan nostolouhinnan jälkeen kahdessa reunimmaisessa II ilmastusaltaan puoleisissa pultissa. Niiden kuormat kasvoivat kattoperien louhinnan jälkeisestä tilasta 16.1 ja 11.6 kN. Muiden pulttikuormien muutokset vaihtelivat välillä -0.5 - 2.4 kN (ka. 0.4 kN). Syvennyslouhinnan jälkeen pulttikuormat vaihtelivat nostolouhintaan verrattuna kahden reunimmaisen pultin kohdalla välillä 0.3 - 1.4 kN, ja muiden pulttien kohdalla välillä -0.5 - 0.1 kN (ka. -0.1 kN). Mallinnetuista pulttikuormista huomataan, että mitä paremmat parametrit eri kallio-laaduilla on, sitä pienemmät ovat pulttien vetokuormitusten keskiarvot. Maksimikuormitusten osalta tilanne on päinvastainen.

Mitatut kuormitukset III ilmastusaltaan viidessä mittapultissa vaihtelivat nostolouhinnan jälkeen välillä -1.2 - 1.8 kN. Tässä negatiivinen etumerkki tarkoittaa puristusta. Syvennyslouhinnan jälkeen kuormitus oli muuttunut nostolouhinnoista -0.3 - 2.3 kN. Verrattaessa mallinnettuja ja mitattuja pulttien kuormituksia voidaan sanoa, että ne ovat samaa suuruusluokkaa (jätettäessä em. mallinnusten kaksi reunimmaista pulttia huomioimatta). Mallinnetuissa pulteissa nostolouhintojen kuormitukset ovat suurempia kuin mitatuissa pulteissa, kun taas syvennysvaiheen jälkeen tilanne on päinvastainen. Erot ovat kuitenkin pieniä (suurimmillaankin noin 2 kN) (kuva 9). /16/



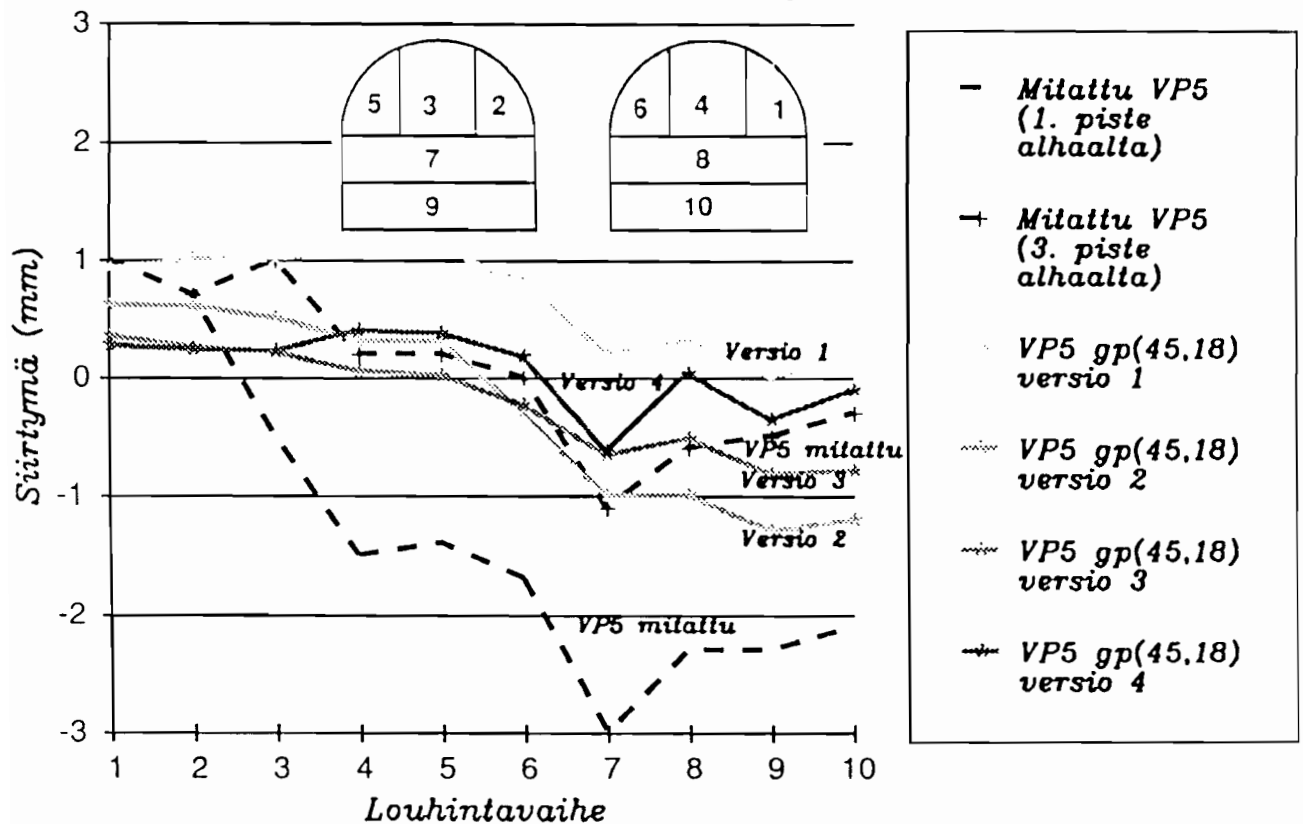
Kuva 9. Mallinnetut ja mitatut pulttikuormat kolmannessa ilmastusallastunnelissa

Kuudes ja seitsemäs ilmastusallas

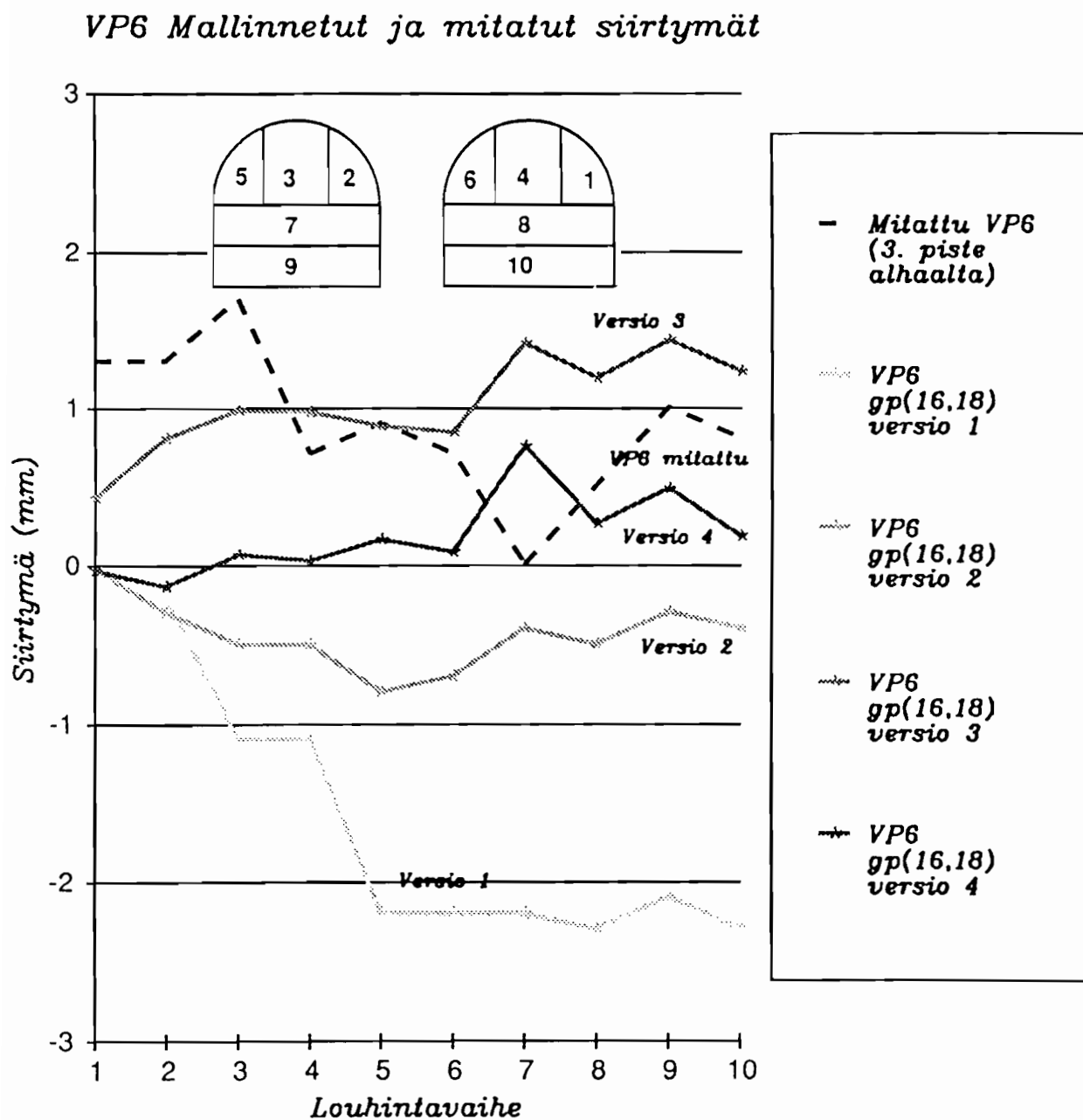
VP5:n kohdalla tarkastellaan vertailussa sekä viimeistä että 3. viimeistä mittapistettä, sillä VP5:n näiden mittapisteiden siirtymissä eroavuuksia. Mallien kohdalla on vertailuun otettu solmupiste (45,18). VP6:n kohdalla seurataan 3. viimeistä mittapistettä, sillä VP6:n mittapisteiden käyttäytymisissä ei ole suuria eroja. Mallien kohdalla on vertailuun otettu solmupiste (16,18). (kuva 10)

Alkuperäisten laskentaversioiden pystysiirtymät poikkeavat kummankin ekstensometrin kohdalla mitatuista. Suurimmillaan ero on VP5:n kohdalla 1.5 mm ja VP6:n kohdalla 3.2 mm. Siirtymien suuruusluokka on kuitenkin sama, päinvastoin kuin VP8:n kohdalla. Erot mitattuihin siirtymiin ovatkin siirtymien suunnassa. Erot johtuvat vetolujuuden määrittämisestä sekä rikkonaisuusvyöhykkeiden varovaisista parametrien arvioinneista. Version 2 siirtymät poikkeavat VP6:n kohdalla mitatuista, erojen ollessa suurimmillaan 2.2 mm. Sen sijaan VP5:n molemmilla vaakajännityskentillä mallinnetut siirtymät vastaavat hyvin mitattuja siirtymiä. Eri vaakajännityksistä aiheutuvat erot olivat versiossa 2 suurimmillaan 0.3 mm. Versioiden 3 ja 4 siirtymät vastaavat hyvin mitattuja siirtymiä. (kuva 10) /16/

VP5 Mallinnetut ja mitatut siirtymät



Kuva 10. VP5:n mallinnetut ja mitatut siirtymät



Kuva 11. VP6:n mallinnetut ja mitatut siirtymät

5. MITATTU KALLIOMEKAANINEN KÄYTTÄYTYMINEN LOUHINNAN AIKANA

5.1 Yleistä

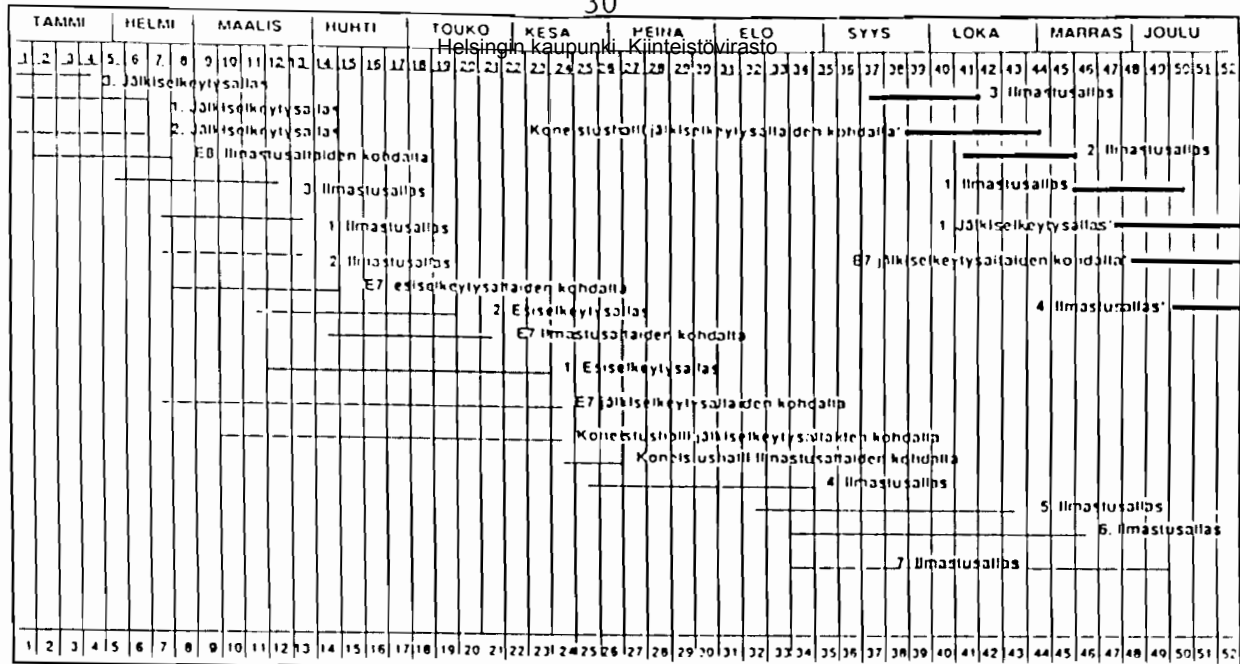
Maanpäällisten sondiektensometrimittausten tarkoituksena oli seurata louhintavaiheista johtuvia siirtymiä ja verrata niitä louhintoja edeltäneeseen tilaan. Tämä ei kuitenkaan onnistunut kaikkien sondiektensometrien kohdalla, sillä muutaman ekstensometrin lukeminen on aloitettu vasta kun louhinta on sivuuttanut jo kyseisen ekstensometrin joko kokonaan tai osittaislouhinnan kyseessä ollessa yhden tai useamman kattoperän louhintavaiheen osalta. Tällaisissa tapauksissa tunnelin katon pystysiirtymiä voidaan pitää vain suhteellisina siirtyminä mittausten aloitushetkestä lukien. Edellä mainittua tukee lisäksi se, että useissa ekstensometreissä on havaittu siirtymiä jo silloin kun louhinta on vasta muutaman katkon päässä itse ekstensometristä.

Mittaustulosten sovittamista louhintajärjestykseen ja -aikatauluun on vaikeuttanut, ensimmäisen kolmen kuukauden jälkeen, louhintojen etenemisen seuranta-aikaväli; kahdesti kuussa tapahtuneet päivitykset eivät anna kovin tarkkaa kuvaa päivittäisistä tapahtumista työmaalla, jos louhintojen etenemä on ollut vähäistä (kuva 12). Nostolouhintojen aikana tulkintaa on vaikeuttanut lisäksi ekstensometrien harva lukemisväli.

Mittaustuloksista on sondiektensometrien osalta tarkasteltu, ellei toisin ole ilmoitettu, viimeisen mittapisteen ilmoittamaa arvoa, koska siirtymät ovat suurimmat lähimpänä kallion pintaa ja mittapisteiden siirtymäkäyrien muoto on saman ekstensometrin kohdalla yleensä identtinen. Mikäli jotain erikoista muiden mittapisteiden siirtymissä on ilmennyt, on myös ne otettu tarkastelun kohteeksi.

Tankoektensometrien tarkoituksena oli seurata louhinnan aikaisia pilareiden vaaka-siirtymiä (poikkeuksena TE24, joka on asennettu hallin kattoon 45° kulmaan). Kaikki tankoektensometrit on asennettu kattoperän louhintojen aikana, joten ne lähinnä kertovat nostolouhintojen vaikutuksista tunneleiden välisiin pilareihin ja katto-osiin.

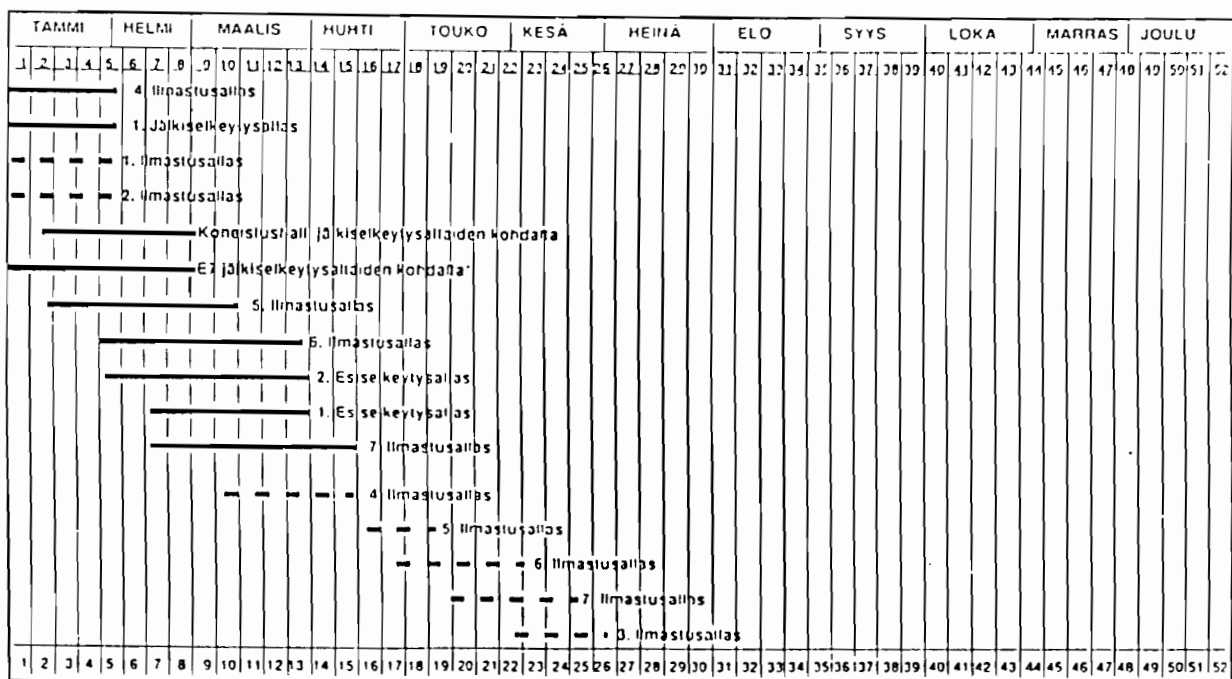
Tankoektensometrien siirtymiä luettiin dataloggerilla, jonka toiminnassa oli varsinkin kesän -89 aikana vaikeuksia, sillä se jouduttiin vaihtamaan muutaman kerran multiplekserin rikkoutumisen vuoksi. Lisäksi dataloggereihin kytkettyjen mittalaitteiden mittaustuloksissa ilmeni jonkin verran häiriöitä. Häiriöt ja rikkoutumiset johtuivat todennäköisesti jännitehäviöstä, sillä kaikki työmaan sähkölaitteet oli kytketty samaan verkkoon. Osasy syy häiriöihin saattaa olla myös kesän ukonilmat. Em. vaikeuksien vuoksi osa kesän -89 mittaustuloksista jäi saamatta. Luotettavaa dataa on saatu syyskuun -89 alusta lähtien.



- Kattoerän louhinta
 ————— 1. Syvennys louhinta
 • Louhinta jatkuu vielä vuoden 90 puolella

VIIKINMÄKI 1989

LOUHINTA-AIKATAULU KALLIOMEKAANISET
 MITTALAITTEIDEN KANNALTA TARKEISSA KOHTEISSA



- 1. Syvennys louhinta
 - - - - - 2. Syvennys louhinta

VIIKINMÄKI 1990

LOUHINTA-AIKATAULU KALLIOMEKAANISET
 MITTALAITTEIDEN KANNALTA TARKEISSA KOHTEISSA

Kuva 9. Vesiaseman toteutunut louhinta-aikataulu kalliomekaanisten mittalaitteiden kohdalla

Tankoekstensometrien siirtymiä on tarkasteltu alkuperäisistä tulostuksista. Myöhemmin esiintyvät siirtymäkäyrät on käsitelty siten, että alkuperäisestä jatkuvasta datasta on otettu mittauslukema noin kahden viikon välein, jolloin häiriöt jäävät pois tulostuksesta.

Kaikki värähtelevän langan periaatteella toimivat anturit olivat myös yhdistettyjä data-loggeriin. Kaikkien näiden antureiden koetulostuksissa esiintyi kuitenkin niin paljon häiriöitä, että niiden tulokset luettiin alusta asti manuaalisesti.

Konvergenssi-mittauksissa käytettiin aluksi mittalankamenetelmää, jossa mittalanka jännitetään mittapulttien väliin. Alkuvuodesta -90 siirryttiin optiseen RMS-2000 menetelmään, joka osoittautui liian epätarkaksi vaativiin tunneliolosuhteisiin, joten kesällä -90 siirryttiin takaisin mittalankamenetelmään.

Manuaalisia mittauksia kuten konvergenssimittauksia ovat usein haitanneet normaalit louhintatyöt ko. mittakohdissa. Konvergenssimittauksissa pultit ovat yleensä korkealla. Mittaukset vaativat nostolava-auton, jotta mittaus voitaisiin suorittaa. Auton saaminen mittapulttien alle on louhintojen aikana ollut usein vaikeaa tai kokonaan mahdotonta. Konvergenssi-mittauksissa on tarkasteltu kaikkia yli 1 mm:n siirtymiä. Sen sijaan tarkkaan pitkäaikaisseurantaan ei ole riittävästi tietoa.

Louhinnan ajan valvontamittausten tuloksinassa pyritään kiinnittämään huomiota kokonaisuuteen, eli yksittäiset piikit eivät tällöin ole niinkään kiinnostavia vaan tietyt suuntaukset yksittäisen mittalaitteen tulostuksissa sekä yhdenmukaisuudet ja eroavaisuudet muiden mittalaitteiden kanssa.

Valvontamittausten tuloksinassa on pääpaino maanpäällisten sondiektensometrien tuloksissa, koska niiden seuranta aloitettiin louhintojen alkuvaiheessa eli aikaisemmin kuin muiden mittalaitteiden. Lisäksi sondiektensometrien seuranta oli häiriöttömämpää kuin muiden mittalaitteiden. Sondiektensometrien mahdollisia virhelähteitä saattavat olla mitta-anturin lämpötilakalibrointi sekä käyntiajasta johtuva korjauskertoimen vähennys. Mitta-anturin kalibrointi suoritetaan aina ulkoilmassa, joten virhettä saattaa syntyä, jos lämpötilaerot ulkoilman ja kairareian välillä ovat suuret. Tätä tukee osittain mittaus-tulokset, sillä kalliokaton nousun maksimi saavutettiin kesäisin ja laskun maksimi talvisin. Mittalaitteen käyntiajasta johtuva korjauskerroin vähennetään jokaisen mittarenkaan mittaus-tuloksesta. Koska lopullinen mittarenkaan siirtymä saadaan lisäämällä ko. mittarenkaan mittatuloksen edellisen mittarenkaan siirtymään, korjauskertoimen vähennys tapahtuu viimeisen renkaan kohdalla yhtä monta kertaa kuin on mittarenkaita. /16/

Korjauskerroin on suuruusluokaltaan suurimmillaan millimetrin sadasosia, joten viimeisestä mittapisteestä suoritettava vähennys on suurimmillaan VP3:n (pisin mittausräikä) kohdalla noin 0.5 mm:n suuruusluokkaa.

Muiden mittalaitteiden seurannassa on ollut häiriöitä ja itse mittalaitteissa teknisiä vikoja enemmän kuin sondiekstensometreissä. Kuitenkin em. seurantamittaukset ovat täydentäneet sondiekstensometriä mittaustuloksia ja antaneet niille vertailukohdan. Esimerkkinä voidaan mainita ensimmäisessä jälkiselkeytysallashallissa tapahtunut pilarin ruiskubetonin halkeilu (kuva 13) joulukuun -89 alussa, johon reagoivat kaikki mittalaitteet: VP2, VP3, tankoekstensometri E31 ja jännitystila- ja muodonmuutosanturit.

/16/



Kuva 13. Ruiskubetonin halkeilu I jälkiselkeytysaltaan ja E7-käytävän välisessä pilarissa

5.2 Sondiekstensometrimittausten tulkinta

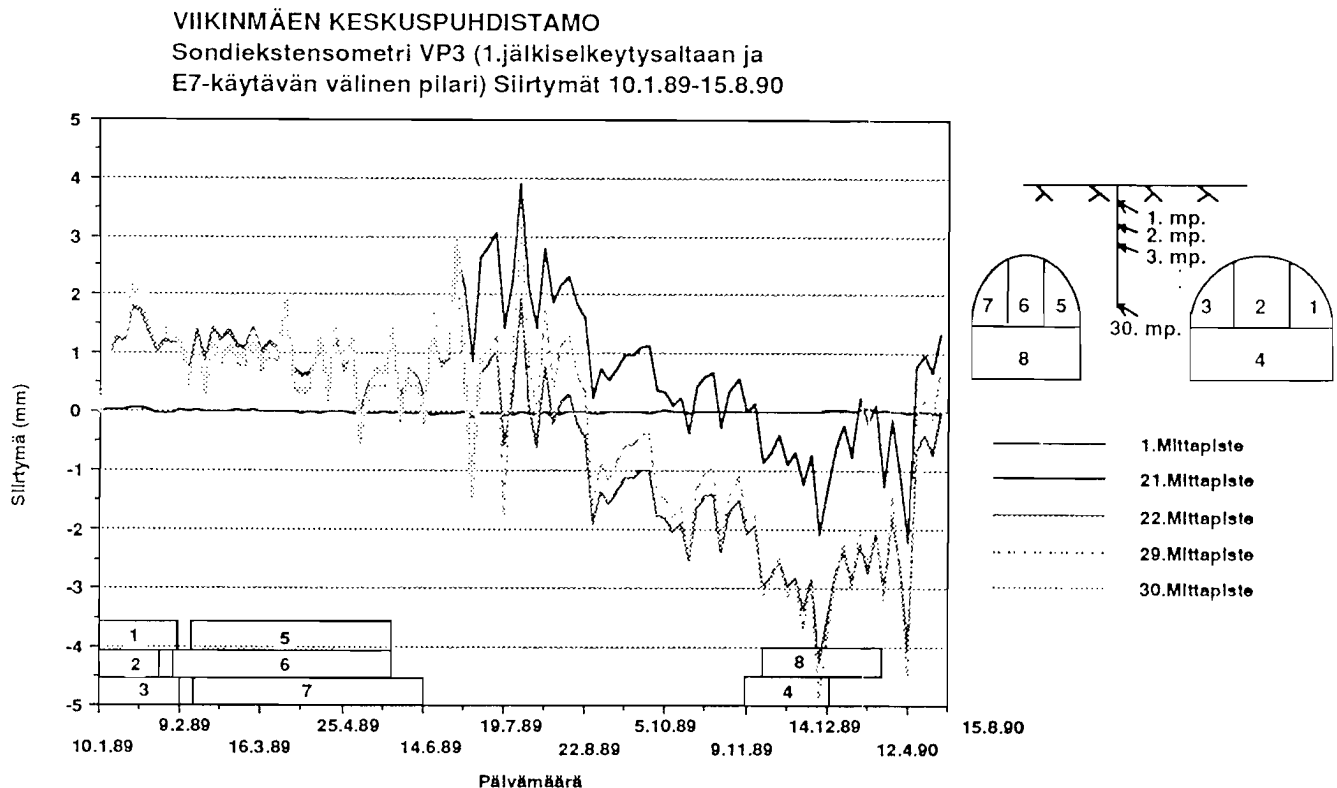
Suurin osa ekstensometreistä on asennettu tammi-helmikuussa -89. Tässä yhteydessä tarkastellaan tunnelin katon siirtymistä kallionpinnan suhteen. Kallionpinnan liikkeitä seurattiin tarkkavaaituksin, joiden mittatarkkuus on oleellisesti huonompi kuin ekstensometrimittauksissa. Tästä syystä absoluuttisen siirtymän tarkkaa suuruutta on vaikea arvioida. Siksi molemmat mittaukset käsitellään erikseen.

Kalliokaton yleinen käyttäytyminen louhintojen aikana oli ekstensometriseurannan perusteella vesiasemien kohdalla seuraavanlaista: kattoperien louhintojen seurauksena katto nousi hitaasti saavuttaen maksimin (noin 3 mm) 1-2 kuukautta louhintojen päättymisen jälkeen. Kalliokaton liike kääntyi laskuun tämän jälkeen. Kalliokatto oli alkutilan yläpuolella keskimäärin 7 kuukautta, nousun keskimääräisen suuruuden ollessa 1,5 mm. Nostolouhintojen alkaessa allastunneleissa kalliokatto saavutti alkutilan, minkä jälkeen lasku jatkui saavuttaen maksimin (noin 2 mm) nostolouhintojen loppuvaiheessa tai hieman niiden jälkeen. Katto oli alkutilan alapuolella 4 kuukautta keskimääräisen siirtymän ollessa 1 mm. Nostolouhintojen jälkeen katon liikesuunta muuttui nousuksi ja nousu jatkui ollen 15.8.90 keskimäärin 1 mm alkutason yläpuolella. Yleisesti ottaen sondiekstensometrien siirtymät ovat pysyneet Viikinmäessä ennakoarvioita pienempinä ja kohtuullisina ottaen huomioon louhitun tilan laajuuden ja kallion paikoittaisen huonon laadun. (liitteet 1, 2 ja 4)

Poikkeuksena edellä mainittuun louhintojen ja siirtymien kytkentään voidaan pitää pohjoisen vesiaseman ilmastusaltaita, joiden kohdalla katon nousu saavutti maksimin jo ennen louhintojen alkamista niiden kohdalla. Nousu aiheutui todennäköisesti eteläisen vesiaseman louhinnoista. Myös jatko oli erilaista, sillä pohjoisten ilmastusaltaiden katon liikesuunta kääntyi laskuun kattoperien louhintojen alkaessa tai hieman ennen niitä. Katon alkutila saavutettiin ko. altaiden kohdalla kattoperien louhintojen aikana ja laskun maksimiarvo kattoperän louhintojen ja nostolouhintojen välisenä aikana. Kaikissa ilmastusaltaissa oli sen sijaan havaittavissa, että ennen nostolouhintojen alkaneen kalliokaton nousu pysähtyi ja kääntyi hetkeksi laskuun nosto- ja syvennyslouhintojen välisenä aikana. Syvennyslouhintojen alkaessa ilmastusaltaiden katto alkoi jälleen nousta ja noudatti tämän jälkeen muiden allastunneleiden käyttäytymistä. (kuva 15, liitteet 3 ja 4)

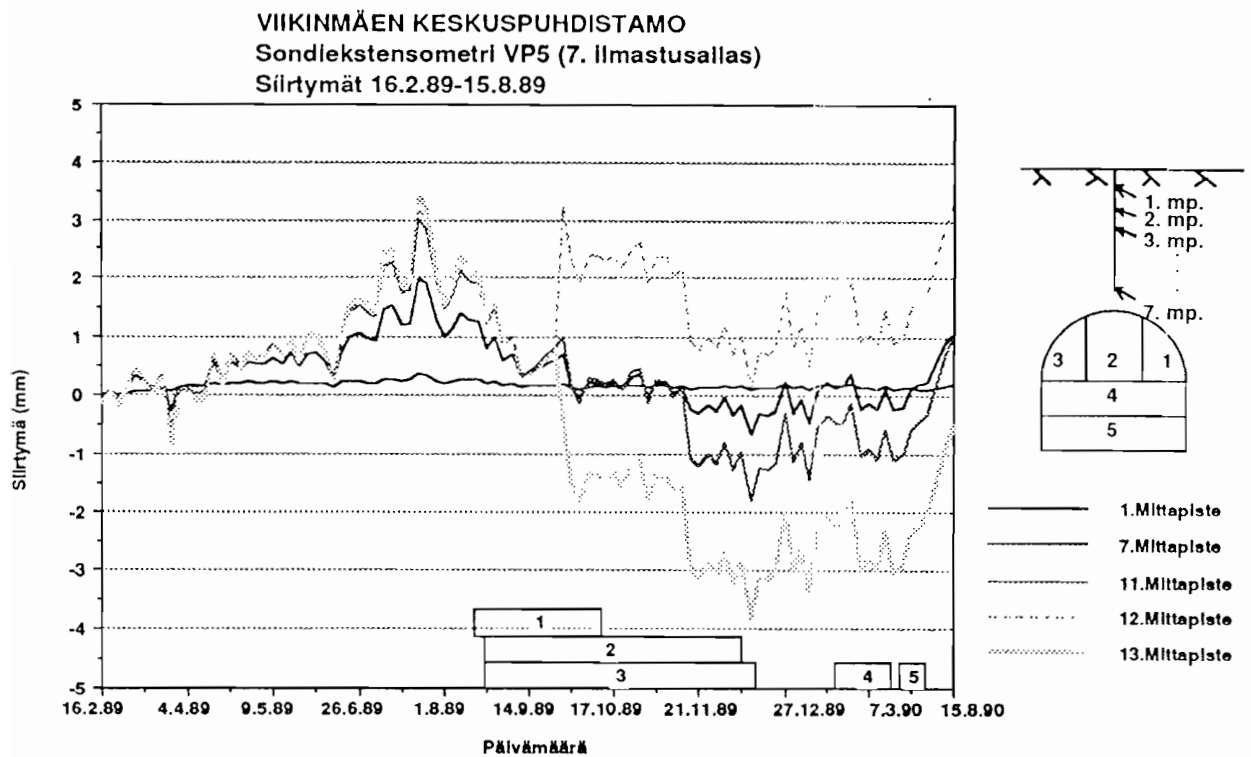
Poikkeuksia edellä mainituista siirtymien suuruuksista on tapahtunut VP3:n, VP5:n, VP11s:n sekä kaikkien esikäsittelytilojen alueella sijaitsevien ekstensometrien kohdalla.

VP3 sijaitsee I jälkiselkeytsaltaan ja E7-käytävän välisessä pilarissa ja on ainoa pilarissa oleva sondiektensometri vesiasemalla. Nostolouhintojen aikana siirtyi VP3:n pilarin puolenvälin korkeudella sijaitseva viimeinen mittapiste 5 mm alaspäin. Tämä oli seurannan ajan suurin yksittäinen siirtymä. Jos verrataan tätä siirtymähuippua VP3:n katon korkeudella olevan mittapisteen siirtymään, joka on 2 mm, voidaan todeta VP3:n siirtymien olevan tavanomaisella tasolla. Kuitenkin liikkeitä ko. pilarissa on tapahtunut, sillä kaikki pilarissa olleet mittalaitteet ilmaisivat samoihin aikoihin muutoksia ja ruiskubetonissa ilmeni halkeamia. (kuvat 14 ja 20, liitteet 5 ja 10)



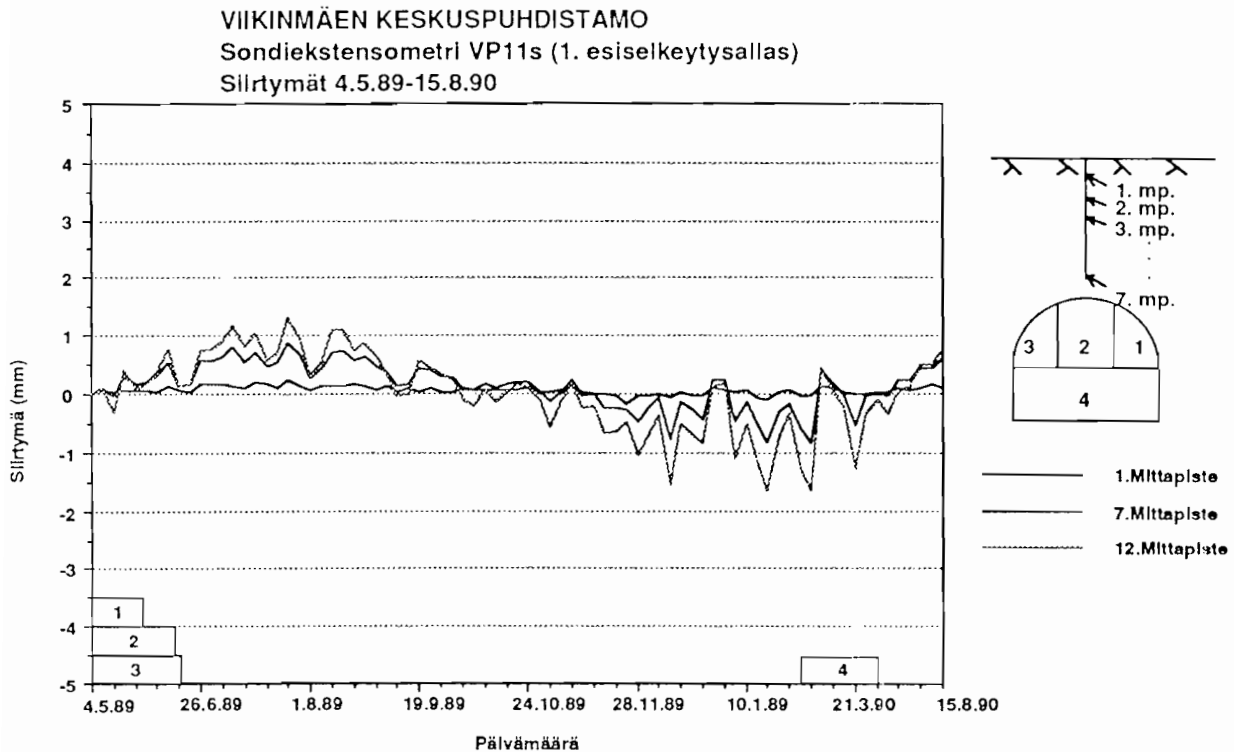
Kuva 14. Mitatut siirtymät ja louhintavaiheet VP3:n läheisyydessä 15.8.90 mennessä

VP5 sijaitsee VII ilmastusaltaan yläpuolella, missä kalliolaatu oli tutkimuksissa todettu huonolaatuiseksi. VP5 ilmaisi pilottitunnelin louhinnan aikana seurannan ajan suurin katon keskikohdan siirtymä alaspäin 3.8 mm. Syynä tähän siirtymähuippuun oli todennäköisesti yksittäisen raon avautuminen viimeisen mittapisteen yläpuolella. Louhittavissa tiloissa ei havaittu mitään tavallisuudesta poikkeavaa. VP11s sijaitsee I esiselkeytsaltaan kohdalla vanhan vesijohtotunnelin läheisyydessä. (kuva 15)



Kuva 15. Mitatut siirtymät ja louhintavaiheet VP5:n läheisyydessä 15.8.90 mennessä

VP11s:n pystysiirtymissä ei tapahtunut mitään tavallisuudesta poikkeavaa, sen sijaan vaakasiirtymän mittauksissa ilmeni noin 15 mm:n siirtymiä E7-käytävään päin kattoperän louhinnan jälkeisessä tilassa, jolloin myös tunnelissa havaittiin runsasta laattamaista komuulua. Vaakasiirtymien kohdalla on huomioitava, että mittaustarkkuus ei ole yhtä hyvä kuin pystysiirtymien kohdalla. (kuva 16, liite 6a)



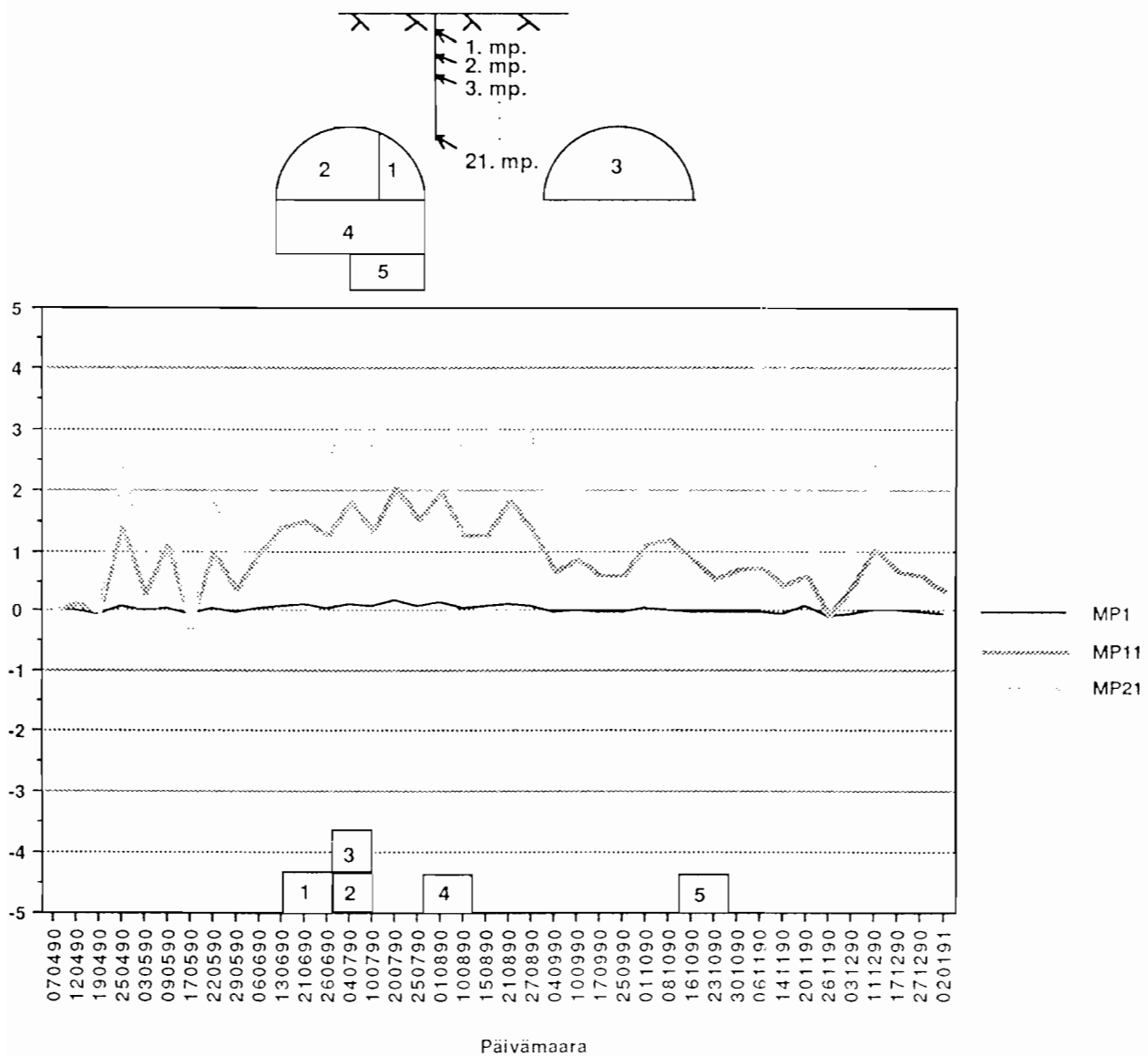
Kuva 16. Mitatut siirtymät ja louhintavaiheet VP11:n kohdalla 15.8.90 mennessä

Esikäsitteilytilojen alueella sijaitsevien VP12:n, VP14:n ja VP15:n kohdalla on myös esiintynyt poikkeavuutta sekä totutusta että toistensa siirtymäkäyttäytymisestä (Tämä johtuu pääasiassa siitä, että ko. kohdissa louhintaprofiilit poikkeavat sekä toisistaan että vesiaseman louhintaprofiileista). Huolestuttavin tilanne on ollut tulopumppaamon yläpuolella sijaitsevan VP14:n kohdalla, jonka siirtymät ovat vuoden -90 loppua lukuunottamatta laskeneet alkutilasta (maksimissaan 4 mm). Syynä tähän on se, että louhinnat ovat olleet VP14:n kohdalla koko seurannan ajan, ja että seuranta aloitettiin myöhässä; kattoperän louhinta oli jo ekstensometrin kohdalla. Lisäksi VP14 on asennettu kaltevaan reikään, joten se ei mittaa aivan pystysiirtymää. Kahden muun ekstensometrin kohdalla kallion lasku on ollut vähäistä. Sen sijaan kallion nousu on molemmissa nostolouhintojen aikana ollut suurimmillaan jopa 4 mm. (kuvat 17-19, liite 6b).

Mahdollista virhelähdettä etsittäessä voidaan louhinnoista riippumattoman käyttäytymisen perusteella todeta, että kalliokaton nousu saavuttaa em. perusteella huippunsa kesäisin ja lasku talvisin, eli molemmat huiput sattuivat aikaan, jolloin lämpötilaerot ulkoilman ja kairareiän välillä olivat suurimmat. Eräänä syynä siirtymien poikkeavuuteen voidaan pitää louhintatahdin vaihtelua eri vuodenaikoina, sillä heinäkuussa -89 ei missään ekstensometrin alapuolella sijaitsevassa allastunnelissa ollut louhintoja käynnissä. Myös kesän -90 louhinnat olivat vähäiset. Vuodenvaihteiden 88/89 ja 89/90 tienoilla louhintoja oli käynnissä useissa eri halleissa. Tästä syystä siirtymätarkastelua pitäisi jatkaa kauemmin, jotta lämpötilan todellinen vaikutus saataisiin selville. Mittausurakoitsijan tekemän kalibroinnintarkistuksen mukaan ei lämpötilojen muutoksilla kuitenkaan todettu olevan vaikutusta mittalukemaan (virhe < 0.1 mm). Tätä tukee osittain myös vuoden 1989 vuorokausien keskilämpötilat (liite 7), sillä lämpötilojen suurimmat ja pienimmät vuorokausikeskiarvot osuivat eri päiville kuin suurimmat positiiviset tai negatiiviset siirtymät. Kuitenkin vuoden -89 alhaisimmat lämpötilat osuvat välille 8.-15.12., jolloin monessa ekstensometrissä mitattiin suurimmat negatiiviset siirtymät. Lisäksi heinäkuu, jolloin suurimmat positiiviset siirtymät esiintyivät, oli vuoden lämpimin kuukausi.

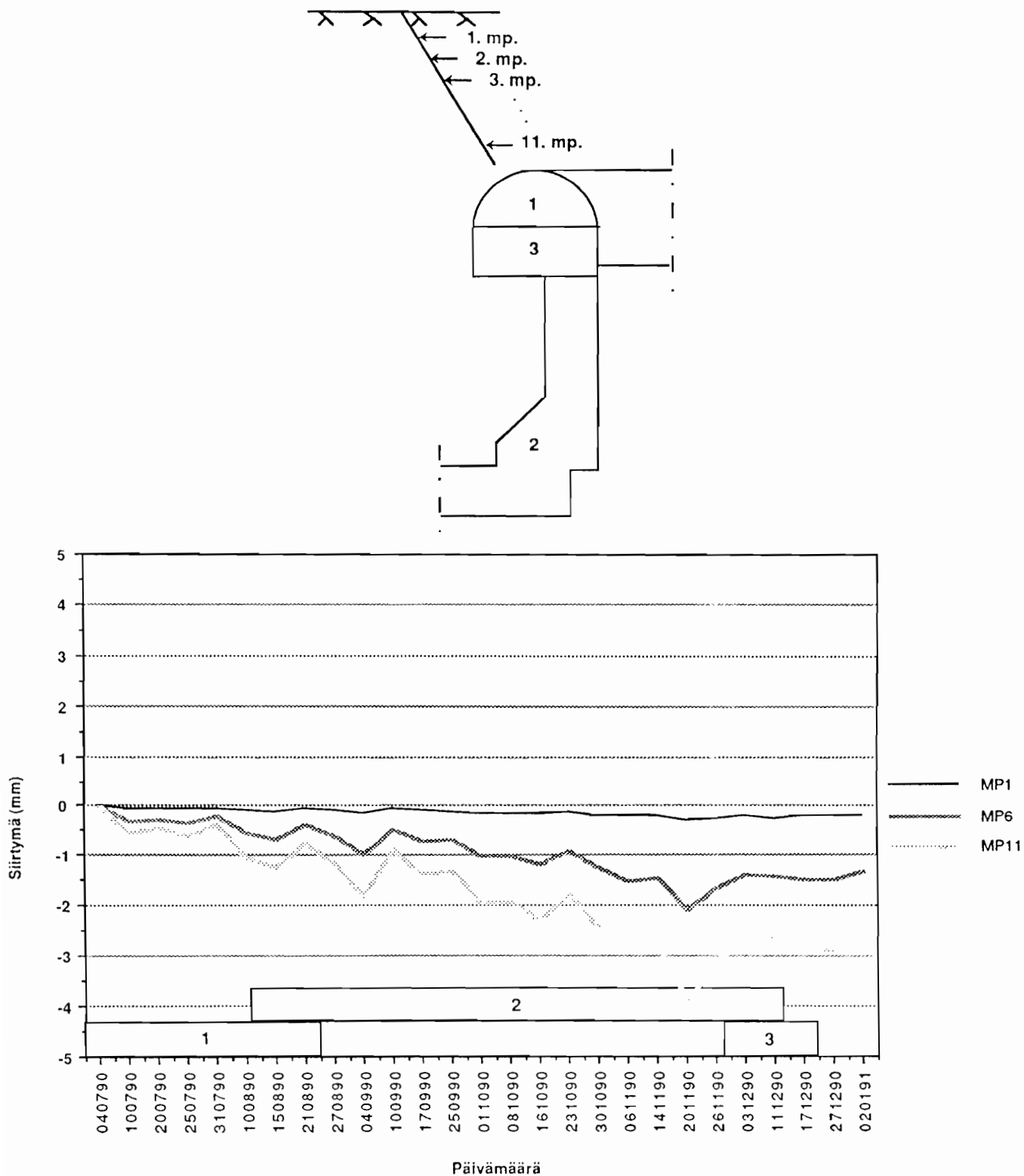
Johtopäätöksenä voidaan lisäksi todeta, että peränajon vaikutukset sondiektensometreihin alkavat näkyä noin 4-5 katkoa eli noin 20 metriä aikaisemmin ennenkuin louhinta on ekstensometrin kohdalla. Peränajosta aiheutuu kiinteän kallion alueella kalliokaton nousua, joka jatkuu noin 1-2 kk louhintojen päättymisen jälkeen. Nostolouhintojen vaikutusta ekstensometreihin ennen ekstensometrin kohdalle tuloa on mahdotonta sanoa aivan tarkalleen, koska louhintojen etenemän seuranta sekä ekstensometriin seurantavälit ovat olleet harvoja. Nostolouhintojen vaikutus sondiektensometriin kannattaa kuitenkin huomioida, mikäli niiden etäisyys on alle 30 metriä. Kalliokatto laskee kiinteän kallion alueella nostolouhintojen ajan ja alkaa nousta louhintojen päättymisen jälkeen. Ruhjevyöhykkeillä nosto- ja syvennyslouhintojen välillä katon nousu pysähtyy ja jatkaa nousuaan syvennyslouhintojen alettua. Louhintojen ollessa ekstensometrin kohdalla, se reagoi ilman säännönmukaisuutta joko nousevalla tai laskevalla siirtymähuipulla, joka yleensä palautuu nopeasti (seuraavaan mittakertaan mennessä) siirtymää edeltäneeseen tilaan. Tämä siirtymähuippu on harvoin yli millimetrin suuruinen. Suurempia kokonaisuuksia tarkasteltaessa voidaan huomata eteläisten ilmastusaltaiden louhintojen aiheuttavan pohjoisissa ilmastusaltaissa "kalliokaton" jo nousua ennen pohjoisten altaiden katto-osien louhimista. Katon nousu näkyy kaikissa pohjoisissa ilmastusaltaissa, vaikka pisimmillään välimatka eteläisiin altaisiin on noin 90 m. /16/

VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondilekstensometri VP12s (E3-käytävän ja
itäisen poikittaistunnelin välinen pillari)
Siirtymät 7.4.90-2.1.91



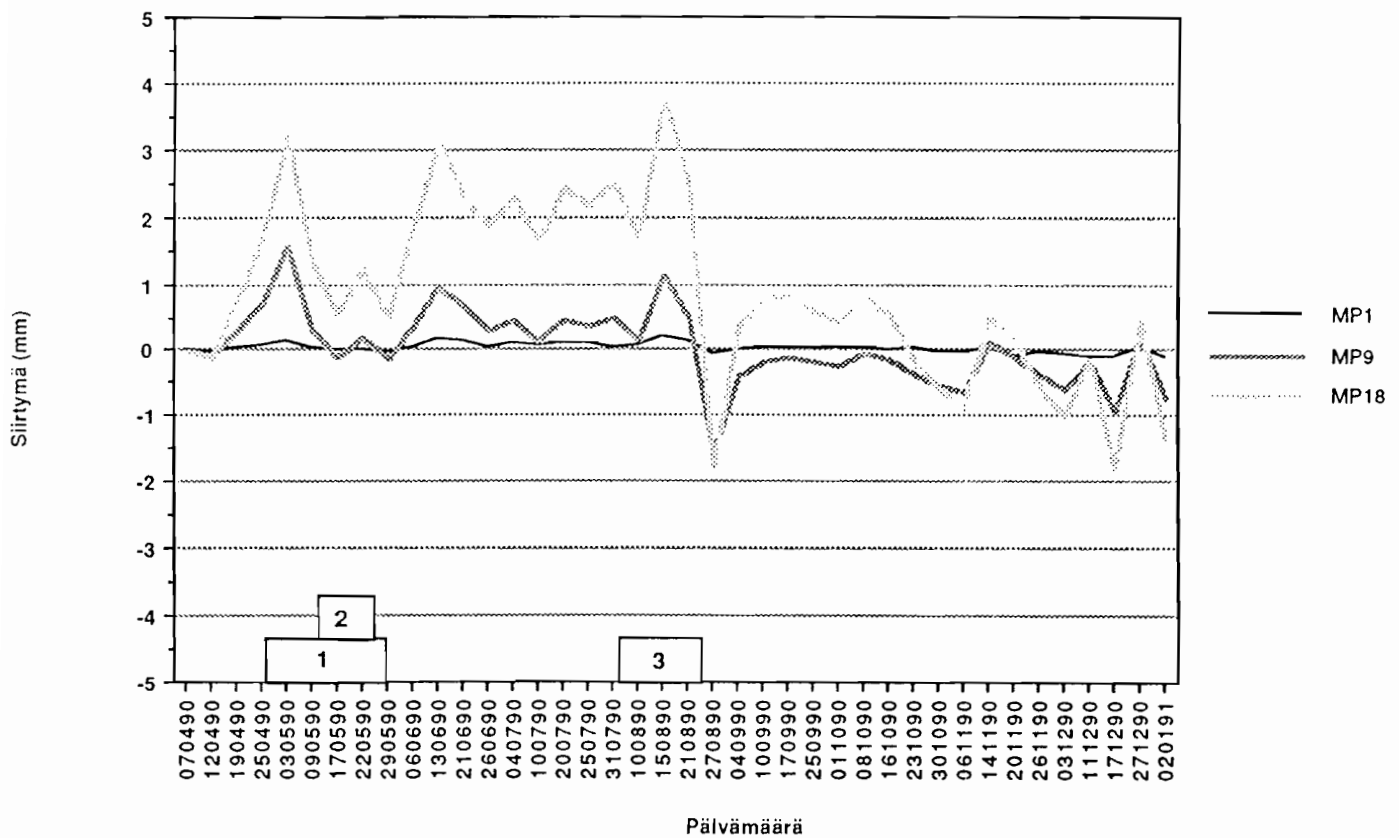
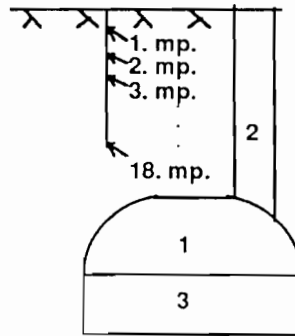
Kuva 17. Mitatut siirtymät ja louhintavaiheet VP12:n läheisyydessä 2.1.91 mennessä

VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondlektstensometri VP14 (tulopumppaamo)
Siirtymät 4.7.90-2.1.91



Kuva 18. Mitatut siirtymät ja louhintavaiheet VP14:n läheisyydessä 2.1.91 mennessä

VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondilekstensometri VP15 (ferrohalli)
Siirtymät 7.4.90-2.1.91



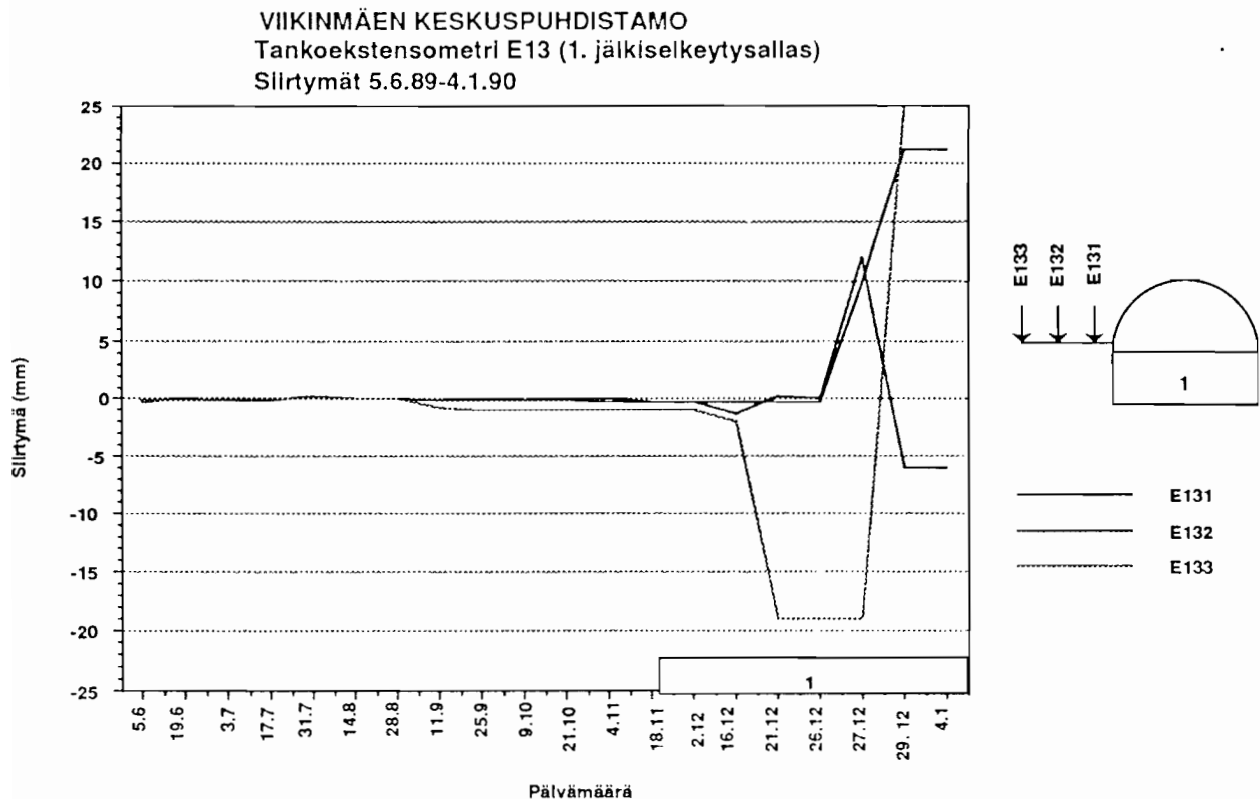
Kuva 19. Mitatut siirtymät ja louhintavaiheet VP15:n läheisyydessä 2.1.91 mennessä

5.3 Tankoekstensometrimittausten tulkinta

Tankoekstensometriä seurannassa käytettyjen dataloggereiden alkuhäiriöiden jälkeen ekstensometriä seuranta sujui moitteettomasti laitteiden toiminnan kannalta. Mittalaitteiden ollessa herkkiä aiheuttivat häiriöt jännitteessä kuitenkin siirtymien kaltaisia muutoksia tulostuksissa. Seurattaessa ekstensometrejä kuukausitulostuksista, saattavat pitkäaikaiset muutokset jäädä em. lyhyiden siirtymähuippujen varjoon. Tästä syystä ja alkuperäisen tulostuksen tiheästä ja vaikeasti käsiteltävästä datasta johtuen, on tulostusta tässä työssä muutettu siten, että mittaväliksi on otettu kaksi viikkoa, jota on tihennetty, jos tulostuksissa on esiintynyt jotain tavallisuudesta poikkeavaa. (kuva 20, liitteet 8 ja 9)

Verrattaessa tankoekstensometriä siirtymäkäyriä sondiektensometriä siirtymäkäyriin, voidaan niiden muodoissa havaita eroja, sillä sondiektensometriä käyrissä tapahtui muutoksia lähes jatkuvasti, vaikkei louhintoja olisikaan lähettyvillä, pysyivät tankoekstensometriä käyrät kuukausia tietyillä tasolla. Muutosten tapahtuessa tankoekstensometriä siirtymäkäyrissä tapahtui vaihesiirto toiselle tasolle ja muutokset loppuivat taas pitkäksi aikaa. Tästä käyttäytymisestä poikkesivat III ja IV ilmastusaltaan välisessä pilarissa sijaitsevat E322 ja E323, joiden siirtymät kasvoivat lähes koko seurannan ajan (liite 9). Siirtymäkäyrien erilaisuus johtuu: a) laitteiden eri asennusajankohdista, sillä tankoekstensometreillä seurattiin ainoastaan nostolouhintojen vaikutusta jolloin siirtymät ovat jonkin verran tasaisempia, b) ekstensometriä eri seurantakohteista, sillä tankoekstensometreillä seurattiin pääasiassa vaakasiirtymiä ja sondiektensometreillä pystysiirtymiä, c) laitteiden erotusterävyysien erilaisuudesta, sillä sondiektensometreillä on 10 kertaa suurempi erotuskyky.

Tankoekstensometrit reagoivat nostolouhintoihin pienillä siirtymillä, kuten mallinnusten perusteella oli odotettavissa. Nostolouhinnat aiheuttivat tankoekstensometrimittausten mukaan pilarin kovertumista, mutta muutoksien suuruus oli keskimäärin alle 1 mm. Tästä poikkesivat I jälkiselkeytysaltaan ja E7-käytävän välisessä pilarissa olevan E13:n mitta-pisteet, joissa nostolouhintojen yhteydessä tapahtui vähintään 12 mm:n muutos, jonka jälkeen ekstensometri rikkoutui todennäköisesti pultituksen yhteydessä (kuva 20). Samantapainen muutos tapahtui II ja III ilmastusaltaan välisessä pilarissa olevassa E242:ssa, josta ei ole saatu tuloksia syvennyslouhintojen jälkeen (liite 8). Myös III ja IV ilmastusaltaan välisessä pilarissa olevat E322 ja E323 poikkesivat normaalista käyttäytymisestä, sillä nostolouhintojen seurauksena niiden siirtymät kasvoivat tasaisesti syvennyslouhintoihin asti, siirtymän muuttuessa maksimissaan 3 - 4 mm (liite 9). Jokaisen ilmastusaltaan kohdalla olevan tankoekstensometrin siirtymäkuvaajissa esiintyvä, 25.8.89 alkava, siirtymähuippu johtui jännitehäiriöistä verkkovirrassa. (liitteet 8 ja 9)



Kuva 20. Mitatut siirtymät ja nostolouhinta TE13:n läheisyydessä 4.1.90 mennessä

Tankoekstensometriseurannan perusteella voidaan todeta pilarien vaakasiirtymien olleen ennakoidun suuruisia, lukuunottamatta I jälkiselkeytysaltaan ja E7-tunnelin välistä pilaria, joka oli tavallista ohuemmassa pilarissa vaakarakoilun alueella. Seurannan perusteella pilarit kovertuivat hieman alkutilaan verrattuna asennustunnelin puolelta. /16/

5.4 Konvergenssimittausten tulkinta

Verrattaessa konvergenssimittaustuloksia muiden mittalaitteiden tuloksiin, huomataan niiden korreloivan hyvin, siltä osin kuin konvergenssituloksia on saatu. Konvergenssimittausten perusteella voidaan todeta, että nostolouhintojen aikana hallien jänneväli kasvaa eli pilarit kovertuvat kuten tankoekstensometrimittauksissa. Louhintojen jälkeen jännevälit lyhenevät maksimiarvostaan tai ainakin niiden kasvu pysähtyy. Katon liikkeistä sekä syvennyslouhinnan vaikutuksista on vaikea sanoa mitään, sillä mittaustuloksia on

näiltä osin saatu niin vähän, että mitään yleistystä ei voi tehdä. Katkonaisesta seurannasta huolimatta konvergenssipulteissa mitattiin nostolouhintojen aikana suurempia liikkeitä kuin tankoekstensometreissä, mikä johtunee siitä, että konvergenssipulit ovat lähempänä louhittavaa tilaa kuin tankoekstensometrit. (kuva 21)

5.5 Jännitystilamittausten tulkinta

Jännitystilamuutostenmittaukset E7-käytävän ja I jälkiselkeytysaltaan välisessä pilarissa osoittivat jännitystilamuutosten pysyvän pieninä lukuunottamatta joulukuussa -89 tapahtuneita muutoksia. Tällöin muodonmuutosanturit muuttuivat louhintojen aikana epästabileiksi, ja niiden mittaustulokset kasvoivat huomattavasti eli niistä tuli epäluotettavia. Jännitystila-antureiden mittaustulokset palasivat muutosten jälkeen entisille tasoille ja niiden lukemista jatkettiin 29.3.90 asti, minkä jälkeen niistä ei ole saatu tuloksia (kuva 22).

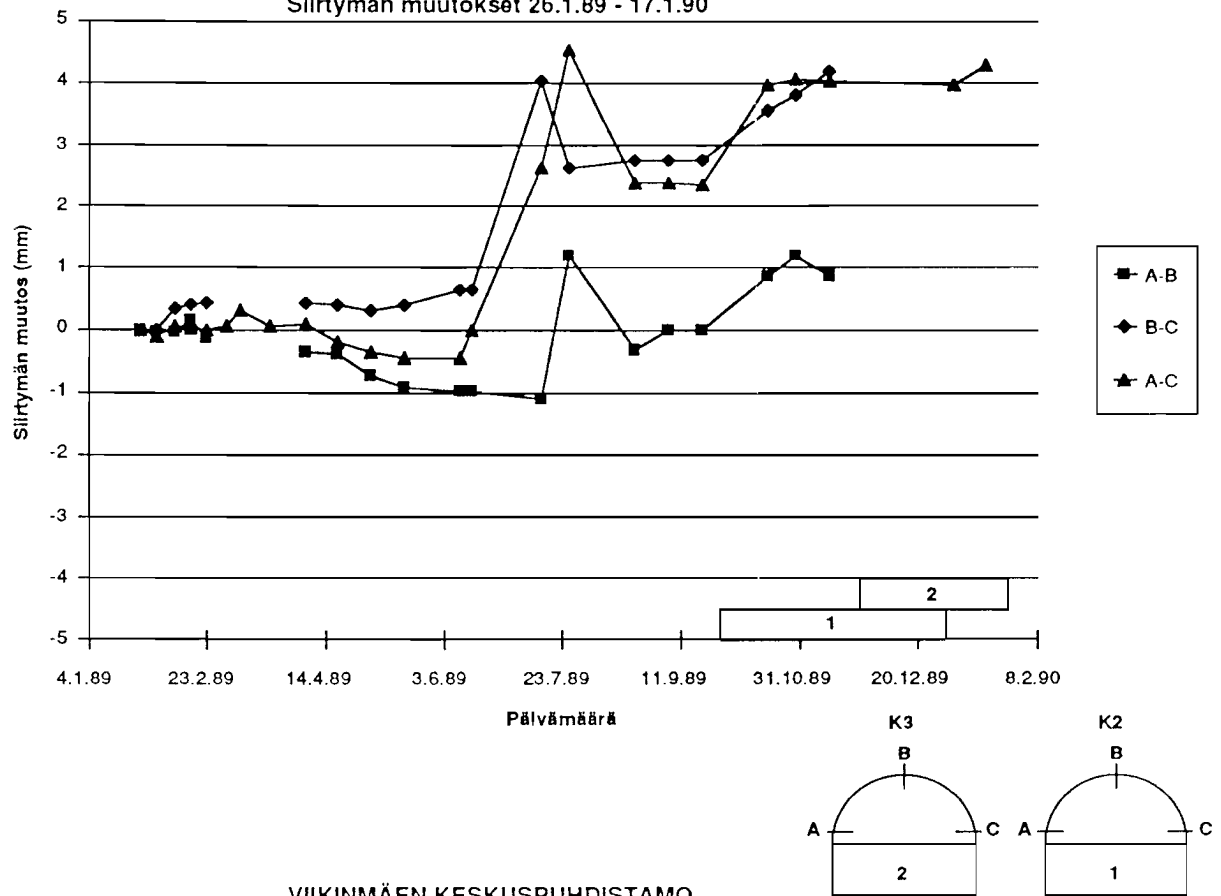
Muodonmuutosantureilla mitatuissa vaakajännityksissä näkyi selvästi nostolouhintojen läheneminen, sillä suhteellisen yhtenäisinä pysyneet S1:n ja S2:n vaakajännitykset alkoivat erkanemaan toisistaan sitä enemmän mitä lähemmäksi louhinnat tulivat. Louhintojen lähestyessä vaakajännityksen kasvu oli suurimmillaan S1:n kohdalla 2.1 MPa ja lasku S2:n kohdalla 1.7 MPa. Louhintojen ollessa anturin kohdalla vaakajännitykset kohosivat suuriksi, maksimin vaihdellessa 7 - 18 MPa:n välillä. Vaikka pilarissa on tapahtunut muutoksia (kaikki pilarissa olevat mittalaitteet reagoivat samanaikaisesti), vaikuttavat em. vaakajännitystilan muutokset suurilta. Todennäköisesti jännitystila on todellisuudessa kasvanut, mutta anturit ovat mittausalueen äärirajoilla muuttuneet epästabileiksi, jolloin todellisen muutoksen suuruutta on vaikea sanoa. Muutettaessa muodonmuutokset jännityksiksi on kimmomodulille käytetty arvoa 60 GPa (kuva 22).

Jännitystila-antureiden mittaamissa pystyjännitystilamuutoksissa ei ole vaakajännityksissä ilmennyt mittaustulosten hajontaa louhintojen lähestyessä havaittavissa, vaikka jännitystila-antureiden herkkyydet ovat muodonmuutosantureiden kanssa yhtäsuuret. Louhintojen ollessa antureiden kohdalla lähempänä kalliotilaa oleva J1-anturi ilmaisi jännityksen laskua 3.4 MPa. J2-anturi puolestaan ilmaisi jännityksen kasvua 0.8 MPa, eli pilarin keskellä jännitystila hieman kasvaisi. Louhintojen loitotessa myös pystyjännitystilassa esiintyi hajontaa. Tällöin J1:n jännitystila kasvoi ja J2:n laski ääriarvostaan (kuva 22).

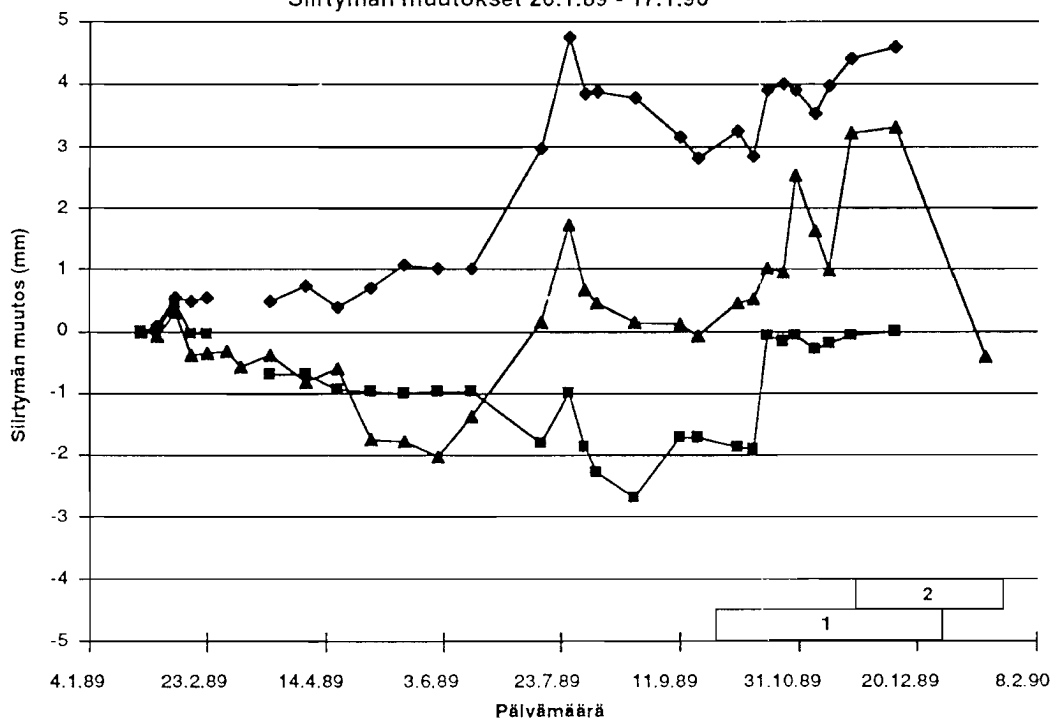
5.6 Lujitusrakenteiden kuormitusmittausten tulkinta

Pulttiantureiden kuormitukset ovat pysyneet pieninä koko seurannan ajan, mikä on realistista, sillä ne asennettiin vasta, kun katto-osa oli kokonaisuudessaan louhittu. Mitatut

VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
 Konvergenssiliekkaus K2 (2. Jälkiselkeytysallas)
 Siirtymän muutokset 26.1.89 - 17.1.90



VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
 Konvergenssiliekkaus K3 (1. Jälkiselkeytysallas)
 Siirtymän muutokset 26.1.89 - 17.1.90

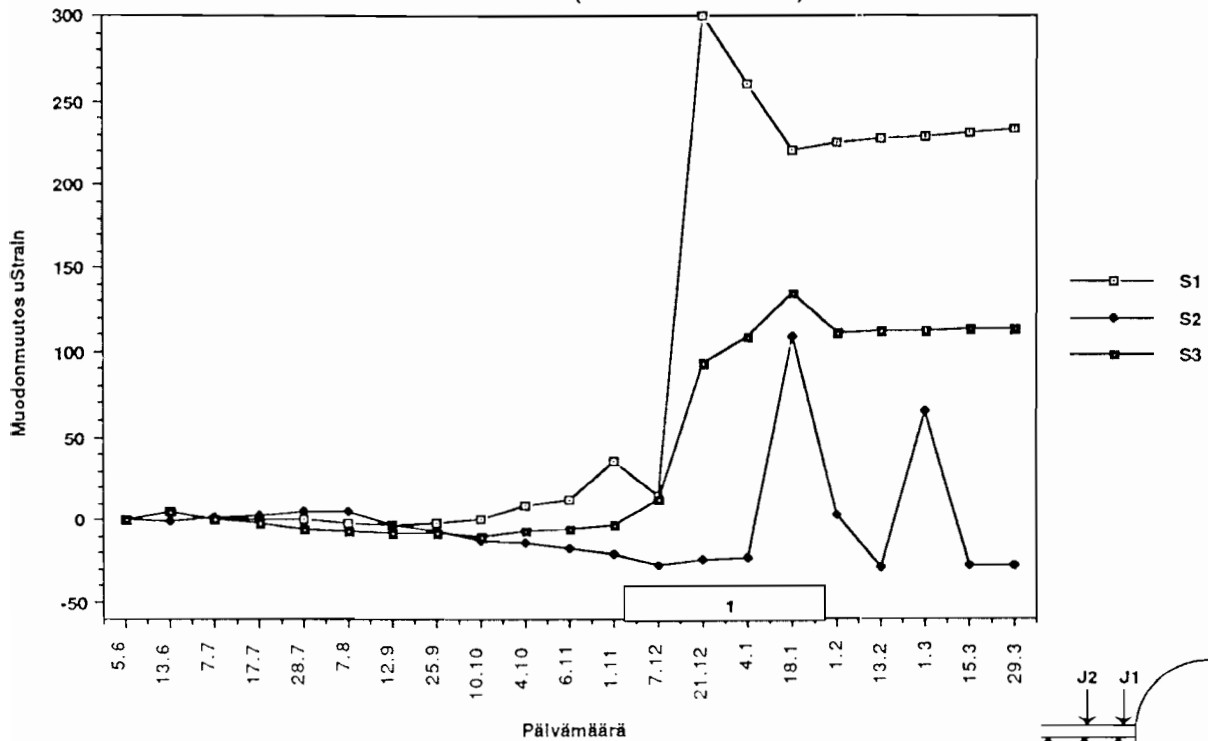


Kuva 21. Mitatut pulttiväljen pituuksien muutokset ja nostolouhinnat K1:n ja K2:n läheisyydessä 17.1.90 mennessä

VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO

Muodonmuutosanturit S1-3 (1. jälkiselkeytysallas)

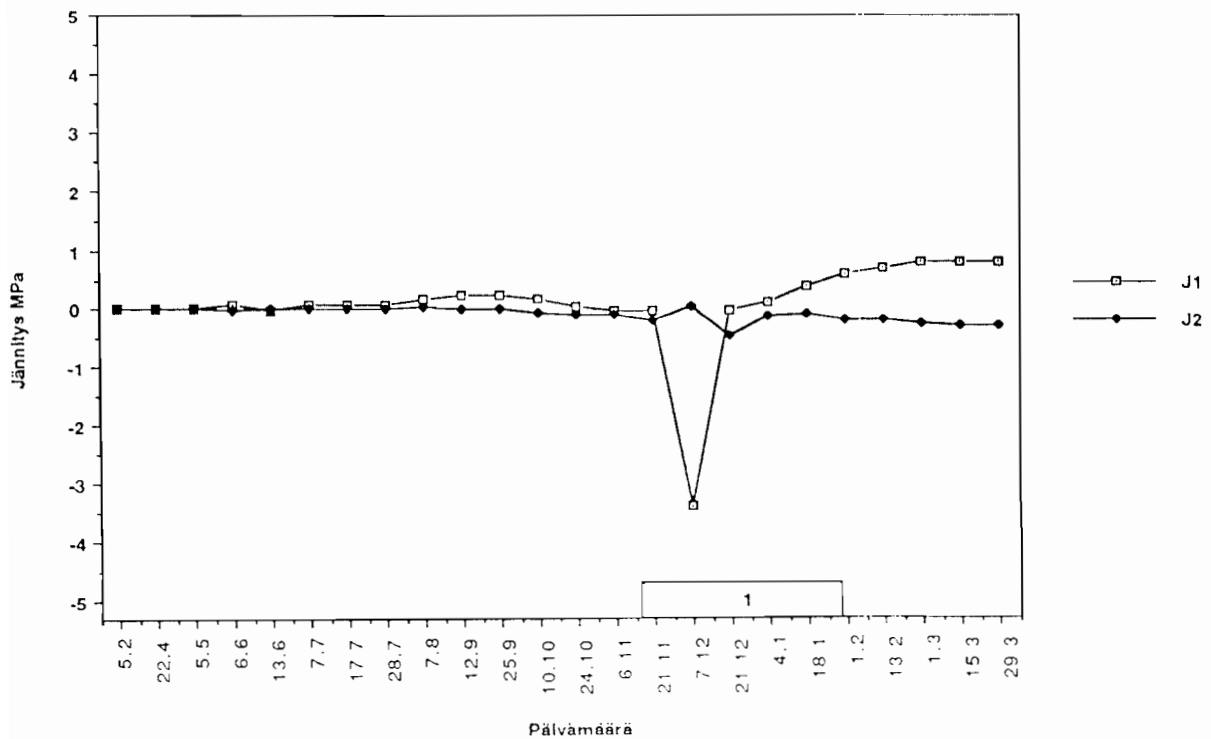
Muodonmuutokset 5.6.89-29.3.90 (Alkuarvot nolattu)



VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO

Jännitystilamuutosanturit J1-2 (1. jälkiselkeytysallas)

Jännitystilamuutokset 5.2.89-29.3.90

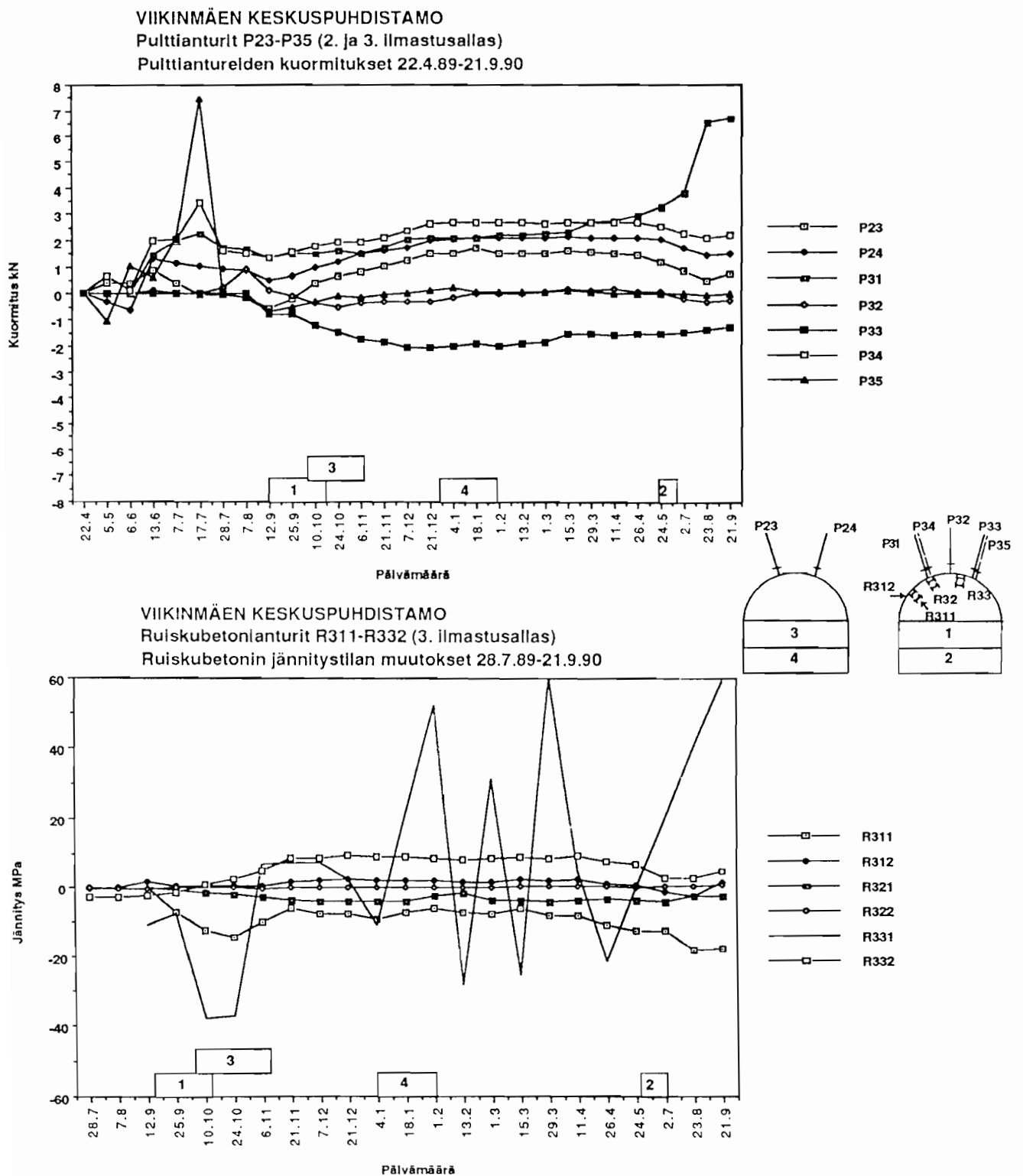


Kuva 22. Mitatut jännitystilän- ja muodonmuutokset sekä nostolouhinnat S1-S3:n ja J1-J2:n läheisyydessä 29.3.90 mennessä

pulttien kuormitukset vastasivat hyvin myös mallinnettuja kuormituksia. Nostolouhinnat aiheuttivat pulteissa pääasiassa vetokuormitusta alkutilaan verrattuna. Vetokuormitukset pysyivät lyhyitä huippuja lukuunottamatta 4 kN:in sisällä, eli varmuuskertoimet pysyivät suurina, kun pultin myötölujuus on oletettu 196 kN:ksi. Puristuskuormitusta alkutilaan verrattuna ei nostolouhintojen aikana pulttiantureissa esiintynyt, lukuunottamatta P33:a, jonka toiminnassa oli aluksi häiriöitä; siinä ei ensimmäiseen neljään kuukauteen esiintynyt lainkaan kuormitusta (kuva 23). Ainoat tavallista suuremmat kuormitukset tapahtuivat 17.7.89 ja seurannan loppuvaiheessa 23.8.90. Molemmilla kerroilla kuormitus siirtyi alkutilaan verrattuna vedon puolelle ollen suurimmillaan 7 kN. Samoina aikoina myös sondi-ekstensometrien positiivinen siirtymä oli suuri. Kummallakaan kerralla ei louhintoja ole ollut lähettyvillä, joten kysymys on louhinnan jälkeisistä muodonmuutoksista (kuva 23).

Ruiskubetonin puristusjännitykset pysyivät alkutilaan verrattuna alle 20 MPa:in koko seurannan ajan, eli rakenteelle sallittu 35 MPa ei ylittynyt. Ensimmäisessä vaiheessa asennettujen antureiden vetojännityksen muutokset olivat alle 3 MPa. Toisessa vaiheessa asennetuista antureista R331 oli mittausurakoitsijan mukaan lähes koko seurannan ajan epästabiili, joten sen tulokset voidaan jättää huomioimatta. Myös R311:n ja R321:n vetojännitykset ovat suuria, joten voidaan olettaa, että 2. vaiheen asennuksen jälkeen joko betonissa on tapahtunut kovettumisesta johtuvaa halkeilua tai betonin ja anturin kontakti ei ole ollut tiivis. Syynä saattavat olla myös todelliset kuormitukset. Koska sallittu vaihteluväli suurimman vetojännityksen ja puristuksen välillä on 36.8 MPa, voidaan mitattujen jännitysten todeta pysyvän tällä välillä. Koska mitatut muutokset on laskettu alkutilasta lähtien, ne eivät ole absoluuttisia jännityksiä ruiskubetonissa, vaan esim. kovettumisesta johtuvia jännityksen muutoksia (kuva 23).

II ja III ilmastusaltaan nostolouhinnat aiheuttivat R311:ssä 15 MPa vedon ja R332:ssa 10 MPa puristuksen alkutilaan verrattuna. III ilmastusaltaan syvennyslouhinnat aiheuttivat jännitystilassa molempien em. antureiden kohdalla 10 MPa:in laskun. Muut anturit pysyivät seurannan ajan lähes stabiileina (kuva 23). Jos ruiskubetonin jännityksiä verrataan sallittuihin arvoihin huomataan, että ne ovat paljon lähempänä näitä raja-arvoja kuin pulttiantureiden kuormitukset. Tämä johtuu siitä, että ruiskubetoni on materiaalina vaikeampi mitata kuin harjateräspultti, mutta myös siitä, että ruiskubetonin kuormitukset ovat lähempänä sallittuja rajoja. Kuormitusten perusteella voidaan sanoa, että rb-kerros on ollut riittävä ja pultitus ylimitoitettu, mutta siirtymien perusteella molempien mitoitus on osunut kohdalleen. Pulttien ylimitoitus kuormitusten suhteen on kuitenkin lähes aina perusteltua, sillä pultin tarkoituksena on usein pidätellä tiettyjä yksittäisiä lohkaraita, jolloin pulttien kuormitukset saattavat jäädä pieniksi.

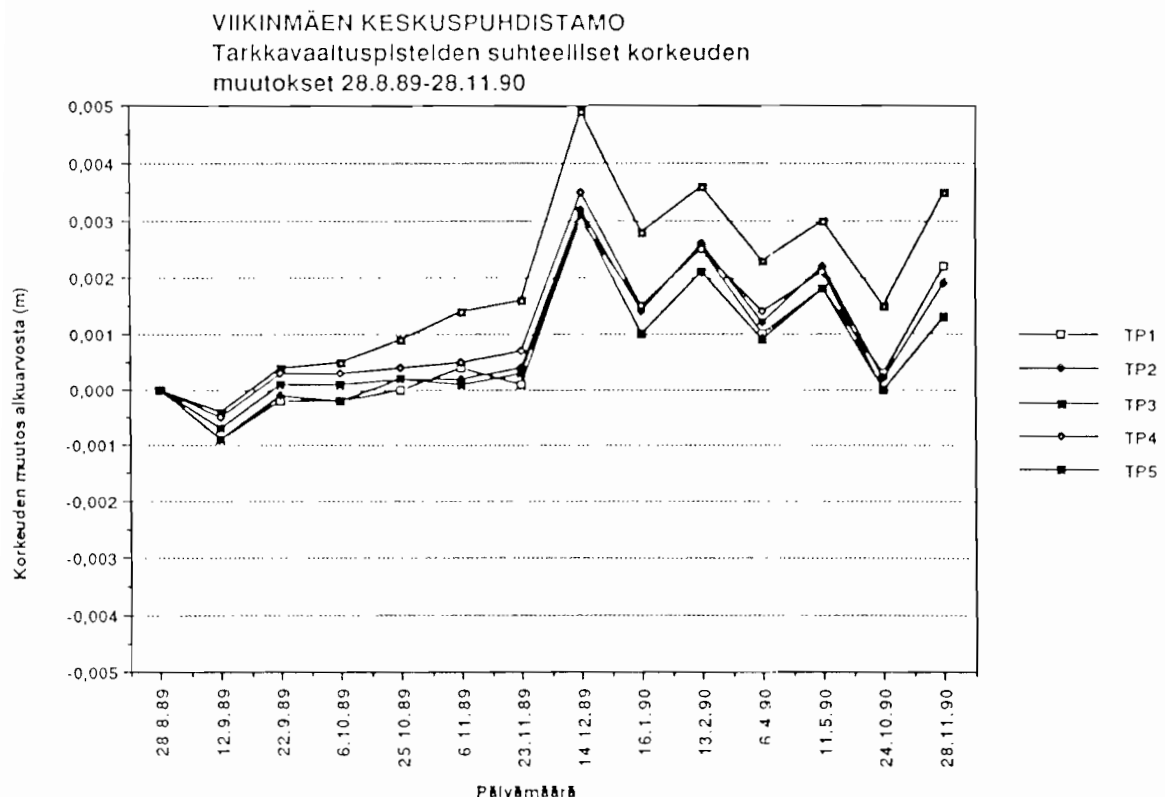


Kuva 23. Mitatut lujitusrakenteiden kuormitukset sekä louhintavaiheet P23-P35:n ja R311-R332:n läheisyydessä 21.9.90 mennessä

5.7 Tarkkavaaitusten tulkinta

Tarkkavaaituksia on tehty sekä maanpäällisten sondiektensometrien (VP1 - VP15) yläpäistä että erillisistä tarkkavaaituspisteistä (TP1 - TP5). Sondiektensometrien yläpäiden suurimmat korkeuden muutokset tapahtuivat 9.8.-12.9.89 välisenä aikana, jolloin pohjoisella ilmastusaltaalla sijaitsevia ekstensometrejä lukuunottamatta korkeustaso laski voimakkaasti. 3 - 11 mm. Syynä laskuun on kattoperien louhintojen valmistuminen eteläisellä vesiasemalla. Lisäksi louhintojen päättyessä vesiaseman osalta havaittiin usean ekstensometrin yläpäässä korkeuden muutoksia suuntaan tai toiseen. Edellä mainittuja muutoksia lukuunottamatta muutokset ovat pysyneet virherajojen sisäpuolella (liite 10).

TP-pisteet sijaitsevat pohjoisella vesiasemalla E4-käytävän yläpuolella kulkevan tien läheisyydessä (kuva 3). Koska TP-pisteet sijaitsevat lähellä toisiaan on niiden käyttäytyminen ollut hyvin samankaltaista, ainoastaan TP3:n muutokset ovat olleet hieman suurempia. TP-pisteiden korkeustason nousi 14.12.89 asti, jolloin nostolouhinnat olivat eteläisellä vesiasemalla käynnissä. Tällöin TP3:n korkeustaso oli noussut 5 mm alkutilaan verrattuna. Mittaustulosten keskivirhe on ollut suurimmillaan 4.2 mm, joten TP-pisteiden korkeustasojen vaihtelut ovat suurimmillaankin olleet vain hiukan yli keskivirheen (kuva 24).



Kuva 24. Tarkkavaaituspisteiden TP1 - TP5 siirtymät 28.11.90 mennessä

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Viikinmäen keskuspuhdistamo on yksi suurimmista Suomessa toteutetuista kalliorakennuskohteista. Puhdistamon tilat louhittiin lisäksi lähelle kallionpintaa (paikoitellen kalliokatto on vain 4 m), joten kohde oli kalliomekaanisesti hyvin vaativa. Tästä syystä Viikinmäkeen on laadittu laaja louhinnanaikainen ja -jälkeinen kalliomekaaninen valvontamittausohjelma. Valvontamittaukset koostuivat 14 maanpäällisestä sondiekstensometristä, 5 maanalaisesta tankoekstensometristä ja 2 sondiekstensometristä ja 22 konvergenssileikkauksesta. Lisäksi eräissä erityispaikoissa mitattiin pysty- ja vaakajännitystilän muutoksia sekä lujitusrakenteiden kuormituksia. Maanpäällisiä sondiekstensometrejä seurattiin louhintojen ollessa kohdalla 2 - 3 päivän välein, muina aikoina seurantavälit vaihtelivat 1 - 4 viikkoon. Maanalaisten sondiekstensometrien kohdalla seurantaväli on vaihdellut 1 - 6 viikkoon. Tankoekstensometrejä seurattiin toukokuuhun -90 asti jatkuvasti automaattisen tiedonkeruulaitteiston avulla ja sen jälkeen manuaalisesti kerran kuussa. Muita mittalaitteita seurattiin toukokuuhun -90 asti keskimäärin kahdesti kuussa ja sen jälkeen kerran kuussa. Seuranta aloitettiin tammikuussa -89 ja se jatkuu supistettuna ainakin vesiaseman valmistumiseen asti.

Kun jatkossa puhutaan kalliokaton noususta tai laskusta tarkoitetaan tunnelin katon siirtymistä kallioipintaan nähden. Kallionpinnan siirtymiä on seurattu tarkkavaaituksin, mutta niissä mittatarkkuus on oleellisesti huonompi kuin ekstensometrimittauksissa. Täten tunnelin katon absoluuttista nousua tai laskua ei aina voida esittää yksityiskohtaisesti.

Maanpäällisen sondiekstensometriseurannan perusteella keskuspuhdistamon louhinnan aiheuttamat kalliomekaaniset muutokset ovat olleet pieniä. Kalliokaton yleinen käyttäytyminen oli vesiasemien kohdalla seuraavanlaista: katon nousu maksimiin (ka. 3 mm) kattoperien louhintojen seurauksena heinäkuun -89 loppuun mennessä, katon lasku alkutilaan lokakuun -89 loppuun mennessä, minkä jälkeen lasku jatkui saavuttaen maksimin (ka. 2 mm) vuodenvaihteen 89/90 mennessä, jolloin nostolouhinnat olivat loppuvaiheessa. Tämän jälkeen katto jälleen nousi alkutilaan tai hieman ylikin elokuuhun -90 mennessä, jolloin syvennysvaihe oli ilmastusaltaiden kohdalta saatu päätökseen.

Poikkeuksia em. käyttäytymisestä on tapahtunut kolmessa kohdassa: 1) I esiselkeytysaltaassa, 2) E7-kulkukäytävän ja I jälkiselkeytysaltaan välisessä pilarissa sekä 3) VII ilmastusaltaassa.

1) I esiselkeytysaltaan kattoholvia leikkaa vinosti vanha pientunneli. Tällä alueella esiintyi runsasta komuulua ja lujitustyöt tehtiin suhteellisen myöhään. Altaan kohdalla sijaitsevassa VP11s-mittalaitteessa ei pystysiirtymissä havaittu juurikaan poikkeavaa käyttäytymistä lukuunottamatta katon normaalia pidempää laskuvaihetta. Vaakasiirtymissä sensijaan mitattiin voimakas kasvu (15 mm). Lujitustoimenpiteiden jälkeen liikkeet loppuivat.

2) Keskimääräistä suurempia liikkeitä havaittiin myös E7-kulkukäytävän ja I jälkiselkeytysaltaan välisessä kapeahkossa pilarissa alueella, jota rajoittavat poikittaiset kulkukäytävät E5 ja E6. Kallioperä on alueella voimakkaasti vaakarakoillutta. Tämän lisäksi pilari on ohut (9 m) sekä jakaantunut poikittaisilla tunneleilla useaan osaan. Kallion pinta on laskeutunut noin 10 mm ja kalliokaton absoluuttinen taso noin 8 mm. Liikkeet alkoivat, kun pilarin kummallakin puolella tehtiin syvennyslouhintoja samanaikaisesti. Katto oli tällöin jo lujitettu. Kyseisen pilarin E5-kulkukäytävän puoleisessa päässä olevan siirtymämittarin tulokset osoittivat voimakasta muodonmuutosta. Osa pilaria lujitettiin tämän jälkeen pilaria lävistävällä pultituksella. Näin saatiin liikkeet loppumaan. Myöhemmissä tarkasteluissa havaittiin ruiskubetonin irronneen alustastaan kyseisellä kohdalla jälkiselkeytysaltaan kattoholvin kannassa.

3) Normaalista suurempi siirtymä mitattiin myös VII ilmastusaltaasta, jossa siirtymämittari VP5 ilmoitti noin 3 mm:n raon syntymisen lähellä holvia. Kallioperä oli tällä kohdalla erittäin rikkonaista, joten louhintatyö tehtiin varovaisesti pienehköissä osissa.

Vesiaseman lisäksi on tulopumppaamon kohdalla, joka sijaitsee esikäsittelytilojen alueella, havaittu mittauksissa tavallista suurempaa kalliokaton laskua sekä pientä epästabiilisuutta louhituissa tiloissa.

Sondiekstensometriseurannan perusteella yksittäisten louhintojen vaikutukset ulottuivat noin 20-30 metrin päähän louhintapaikasta. Suurempia kokonaisuuksia tarkasteltaessa voidaan sondiekstensometriseurannan perusteella osoittaa eteläisen vesiaseman kattoperien louhintojen vaikutusten ulottuvan jopa 90 metrin päähän.

Konvergenssi- ja tankoekstensometrimittausten perusteella nostolouhinnat aiheuttivat pilareiden kovertumista, siirtymien ollessa ennustetun kaltaisia eli pieniä (alle 1,5 mm)

Lujitusrakenteiden kuormituksia mitattiin sekä rikkonaisilla alueilla ruiskubetonista että pulteista. Ruiskubetonin jännitykset ovat olleet lähellä sallittuja rajoja. Suurimmillaan

muutos alkutilaan verrattuna on ollut noin 18 MPa. Pulttien kuormitukset ovat pysyneet pieninä (alle 8 kN).

Tarkkavaaituspisteiden perusteella pohjoisella vesiasemalla tapahtui eteläisen vesiaseman nostolouhintojen aikana kalliopinnan nousua keskimäärin 4 mm. Siirtymien suuruudet ovat kuitenkin pysyneet virherajojen sisäpuolella. Sondiekstensometrien yläpäiden tarkkavaaituksissa havaittiin eteläisellä vesiasemalla korkeustason laskua kattoperien louhinnan jälkeen 3-11 mm. Sondiekstensometrien yläpäiden tarkkavaaistulokset ovat olleet myös virherajojen sisäpuolella.

Pääpaino seurannassa on ollut maanpäällisissä sondiekstensometrimittauksissa. Tämä johtuu siitä, että niiden toiminta on ollut varmaa ja mittaaminen helppoa. Maanalaisten mittalaitteiden toiminnassa sekä varsinkin automaattisessa seurannassa on ollut vaikeuksia joko osan aikaa tai jopa koko ajan. Syynä tähän olivat vaativat mittausolosuhteet sekä louhintojen ensisijaisuus seurantamittauksiin nähden. Kuitenkin muut mittalaitteet ovat toimineet hyvinä lisätietoa antavina vertailukohtina sondiekstensometreille. Viikinmäen kokemusten perusteella ei automaattista tiedonkeruuta nykyisessä muodossaan voi kuitenkaan suositella vaativiin kalliorakennuskohteisiin.

Viikinmäen keskuspuhdistamosta tehtiin yksityiskohtaisen suunnittelun yhteydessä kalliomekaanisia mallinnuslaskelmia ennustamaan puhdistamon louhinnanaikaista käyttäytymistä. Mitoitusperiaatteena käytettiin kokonaisvarmuustarkastelua, jolloin lähtöarvot valitaan varovaisina keskiarvoina /15/. Näiden laskelmien materiaaliparametrit perustuivat kenttätutkimuksista ja alueelta otetuista kairasydännäytteistä määritettyihin laboratorioarvoihin. Koska kalliomekaanisia määrittämiä tehtiin vielä laskelmien jälkeenkin, ovat ennustetut mallinnuslaskelmat perustuneet osittain vaillinaisiin tietoihin.

VI ja VII ilmastusaltaan kohdalta tehtyjen ennustettujen ja mitattujen siirtymien välillä on eroja, ei niinkään siirtymien suuruudessa kuin siirtymien suunnassa. III ilmastusaltaan kohdalla myös siirtymien suuruudet poikkeavat toisistaan. Ennustetuissa malleissa siirtymien suunta oli eri louhintavaiheiden jälkeen lähes poikkeuksetta kalliotilaan päin. Seurantamittausten mukaan tapahtui myös kalliokaton nousua eli siirtymistä kalliotilasta pois päin. Syynä tähän oli se, että vaakajännityskenttä osoittautui ennustettua suuremmaksi ja kalliomateriaali jäykemmäksi varsinkin ruhjevyöhykkeiden kohdalla. Eräänä syynä on myös jatkuvan mallin poikkeavuus todellisesta tilanteesta, sillä annettaessa parametrien arvot kalliolaadun koko kalliomassalle ei saada aikaan täysin todellista vastaavaa tilannetta. Myös mallin kaksiulotteisuus aiheuttaa ongelmia. Ennustetut pulttikuormat ovat

lähellä mitattuja kuormia, vaikka malleja tehdessä on kalliokaton pultitusjärjestys ollut epävarma. Pulttien mallinnetut kuormitukset ovat pysyneet pieninä, koska periaatteeksi on valittu kokonaisvarmuuden sisällyttäminen lujitusrakenteisiin.

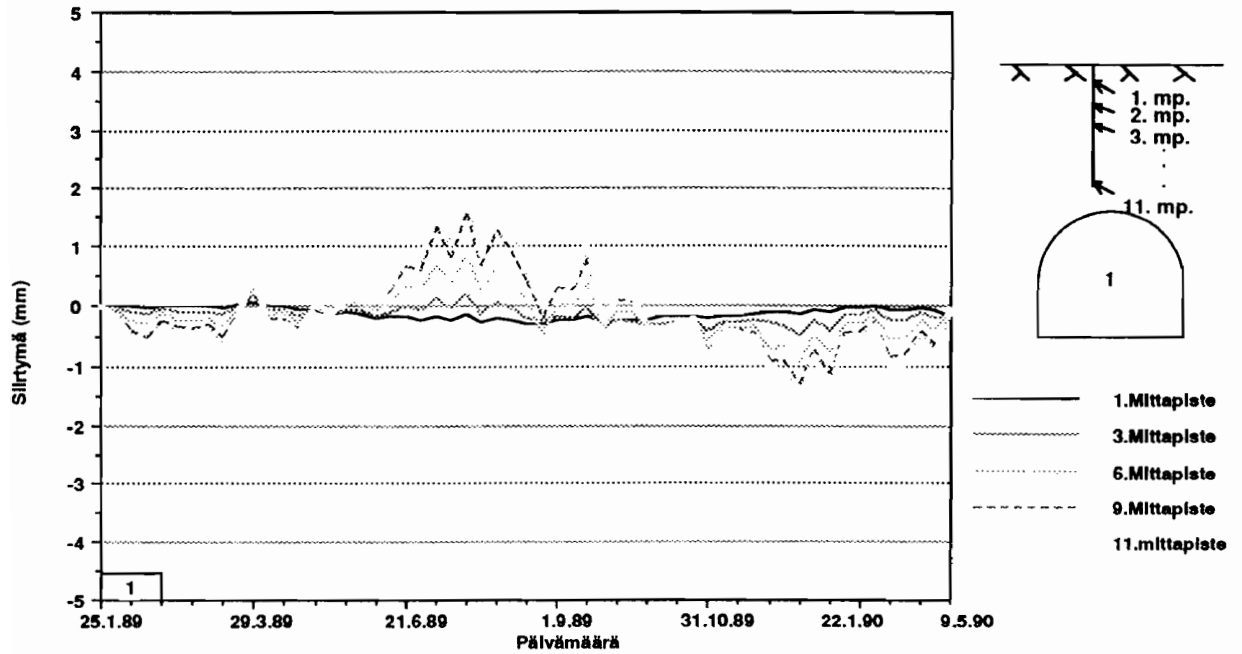
Louhinnan aikana tehdyissä tarkennuslaskelmissa siirtymien suuruudet olivat lähellä mitattuja arvoja, mutta siirtymien suunnissa oli kuitenkin vielä eroja. Louhinnan jälkeen korkeimpia mitattuja materiaaliparametrejä käyttäen saatiin kaikissa tarkennetuissa mallinuksissa siirtymien suunta sekä suuruus lähelle mitattuja arvoja. Tarkennettujen mallinnusten maksimipulttikuormitukset ovat hieman suurempia kuin ennustettujen mallinnusten. Tämä johtuu siitä, että pääpaino tarkennetuissa mallinuksissa on ollut siirtymissä, joita on tarkennettu muuttamalla kalliolaatujen vetolujuutta. Pulttikuormat pysyvät kuitenkin tarkennetussa mallissakin lähellä mitattuja kuormituksia, sillä mitattujen kuormitusten hajonta on kohtalaisen suuri.

Jatkuvalla elementtiohjelmalla tehdyillä varovaisilla ennusteilla saadaan alustava malli louhinnanaikaisesta käyttäytymisestä. Viikinmäessä alustavat mallit ovat poikenneet em. syistä johtuen todellisesta tilanteesta. Laskettua mallia voidaan tarkentaa louhinnan edetessä mitattujen siirtymien perusteella muutettujen materiaaliparametrien avulla. Viikinmäen tarkennetut mallit ovat olleet lähellä todellista tilannetta. Jatkuva elementtiohjelma on siis herkkä tiettyjen materiaaliparametrien muutoksille, mikä asettaa omat vaatimuksensa materiaalien määrittelyn tarkkuudelle.

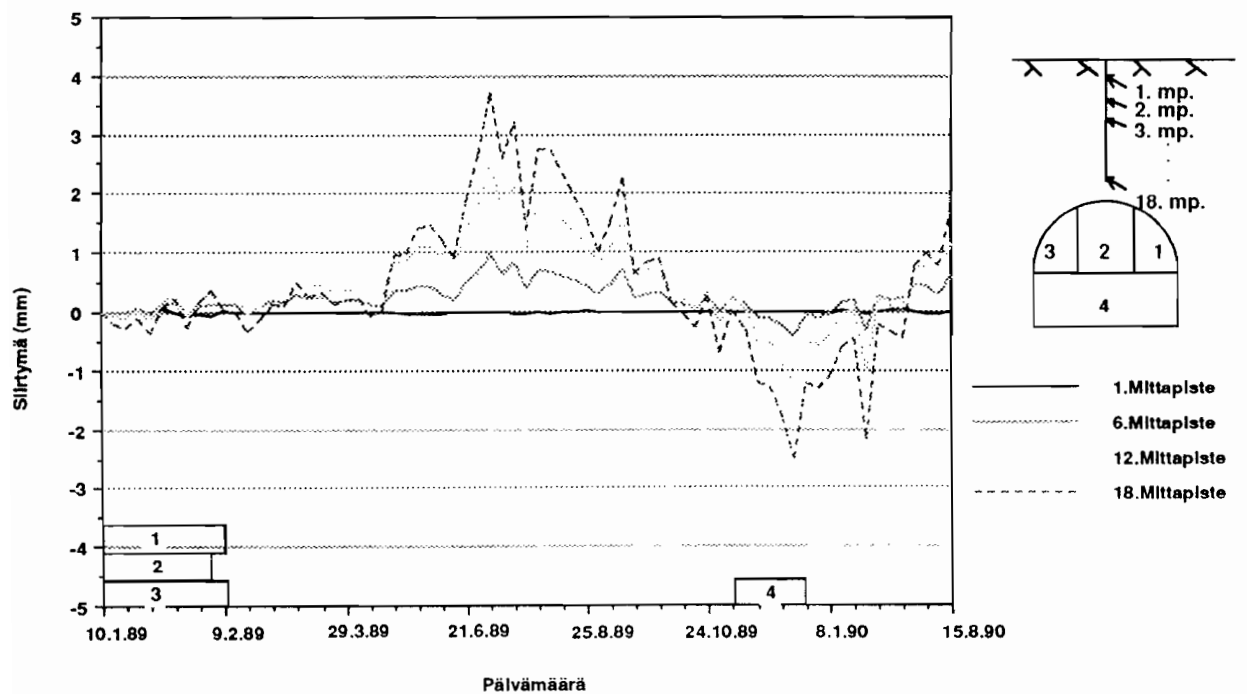
Viitteet

1. EDELMAN, S., Kompendium i Finlands geologi. Åbo Akademi Geologisk-mineralogiska institutionen. 1984, 116 s.
2. SUUNNITTELURYHMÄ VIIKINMÄKI/ SUUNNITTELUKESKUS OY, Viikkinmäen keskuspuhdistamo. Eteläisen vesiaseman louhintaurakka. Kalliotutkimusraportti. 27.5.1988, 6 s.
3. SUUNNITTELURYHMÄ VIIKINMÄKI/ SUUNNITTELUKESKUS OY, Viikkinmäen keskuspuhdistamo. Pohjoisen vesiaseman louhintaurakka. Kalliotutkimusraportti. 14.10.1988, 13 s.
4. SUUNNITTELURYHMÄ VIIKINMÄKI/ KALLIOSUUNNITTELU OY, Viikkinmäen keskuspuhdistamo. Murskaamon louhintaurakka. Kallioperän tutkimusraportti. Marraskuu 1987, 6s
5. JOHANSSON, E., SILVENNOINEN, H., VUENTO, A., Viikkinmäen keskuspuhdistamon kalliomekaaniset valvontamittaukset. Kalliomekaniikan päivä 1989. 15.11.1989, luku VII, 21 s.
6. INTERFELS GmbH/ SUOMEN MALMI OY, Increx -Incremental Extensometer (laite-esite), 3 s.
7. GEOMETRIK OY/ GRUNDTEKNIK AB/ IPT OY, Multi-ekstensometern - en enstängsextensometer med flera mätankare (laite-esite), 6 s.
8. INTERFELS GmbH/ BEMEK AB/ SUCMEN MALMI OY, Konvergensmätningssutrustning (laite-esite), 7 s.
9. GEOKON OY/ GRUNDTEKNIK AB/ IPT OY, Vibrating Wire Stressmeters (laite-esite), 6 s.
10. SUUNNITTELURYHMÄ VIIKINMÄKI/ SAANIO & RIEKKOLA OY, Viikkinmäen keskuspuhdistamo. Eteläinen vesiasema. Kalliotekniset laskelmat. 17.11.1988, 32 s.
11. SUUNNITTELURYHMÄ VIIKINMÄKI/ SAANIO & RIEKKOLA OY, Viikkinmäen keskuspuhdistamo. Pohjoinen vesiasema. Kalliotekniset laskelmat. 30.12.1988, 18 s.
12. PÖLLÄ, J., Ruiskubetoni ja sen käyttö kallion lujittamisessa. VTT tiedotteita 915, Espoo 1988, 170 s.
13. BRADY, B. ja BROWN, E., Rock Mechanics for Underground Mining, London 1985, 527 s.
14. JAEGER, J. ja COOK, N., Fundamentals of Rock Mechanics, London 1969, 515 s.
15. RIEKKOLA, R. ja ROINISTO, J., Viikkinmäen keskuspuhdistamon kalliorakennussuunnittelu. Kalliomekaniikan päivä 1987. 11.11.1987, luku V, 18 s.
16. NIEMINEN, J. Viikkinmäen keskuspuhdistamon louhinnan aikainen kalliomekaaninen seuranta, diplomityö TKK, Espoo 1991. 105 s.

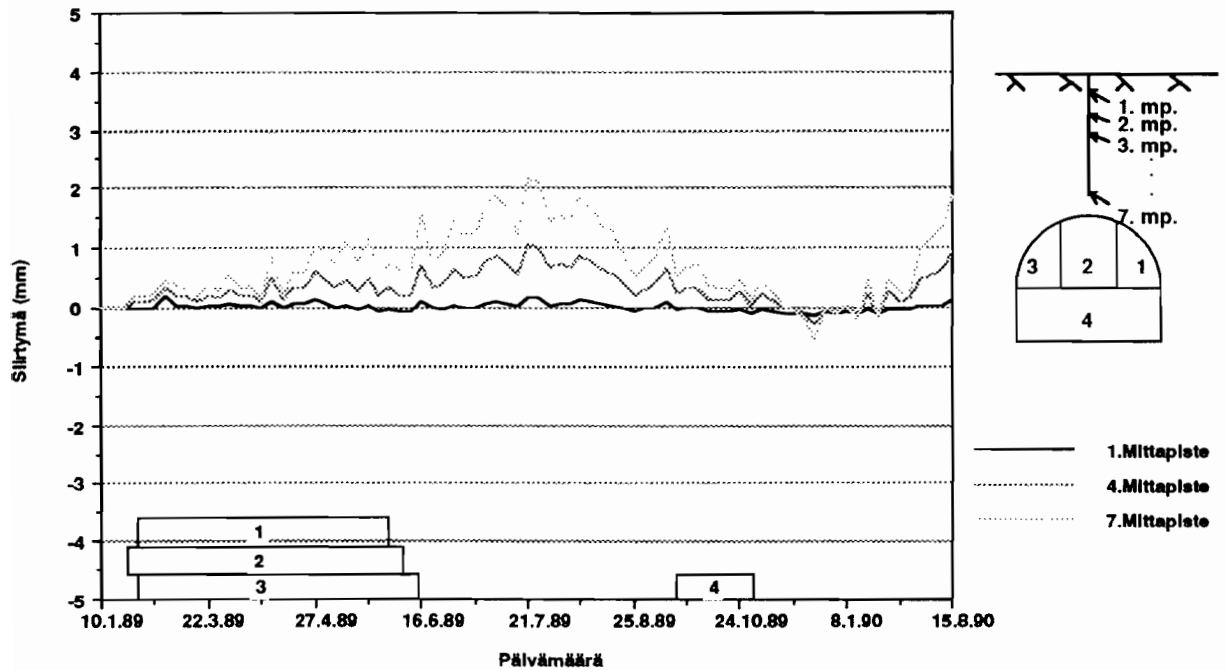
VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondiekstensometri VP1 (E8-tunnelli)
Siirtymät 25.1.89-9.5.90



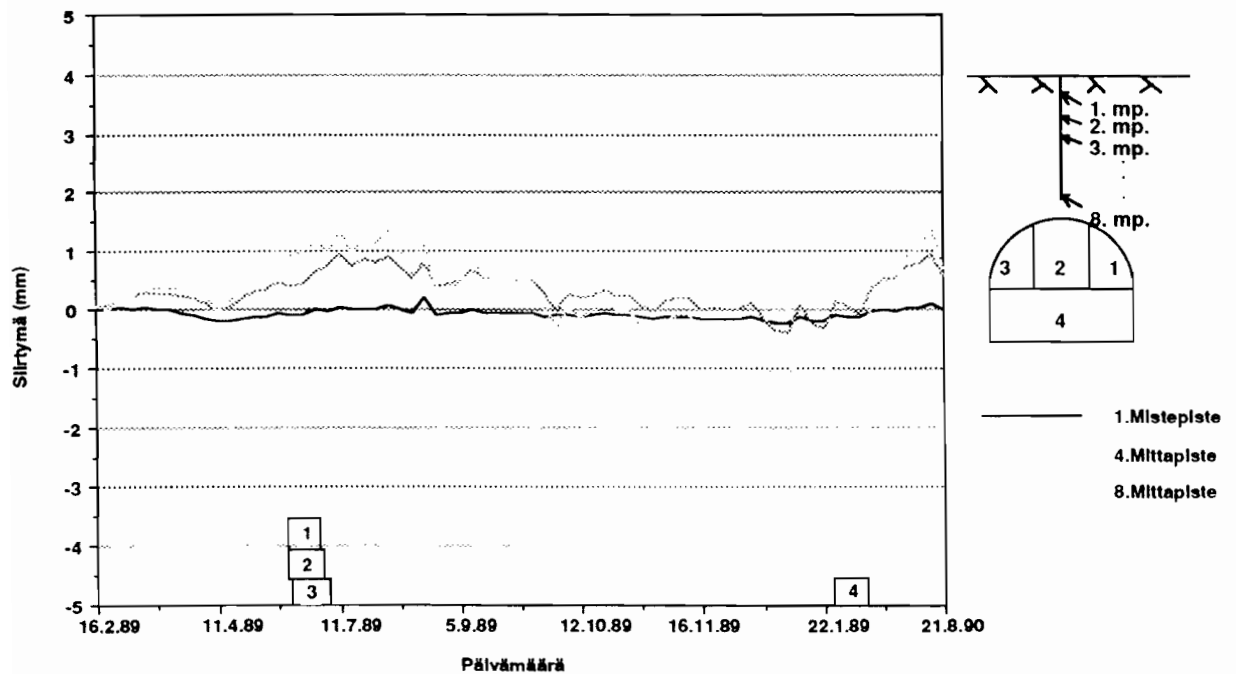
VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondiekstensometri VP2 (1.jätkiselkeytysallas)
Siirtymät 10.1.89-15.8.90



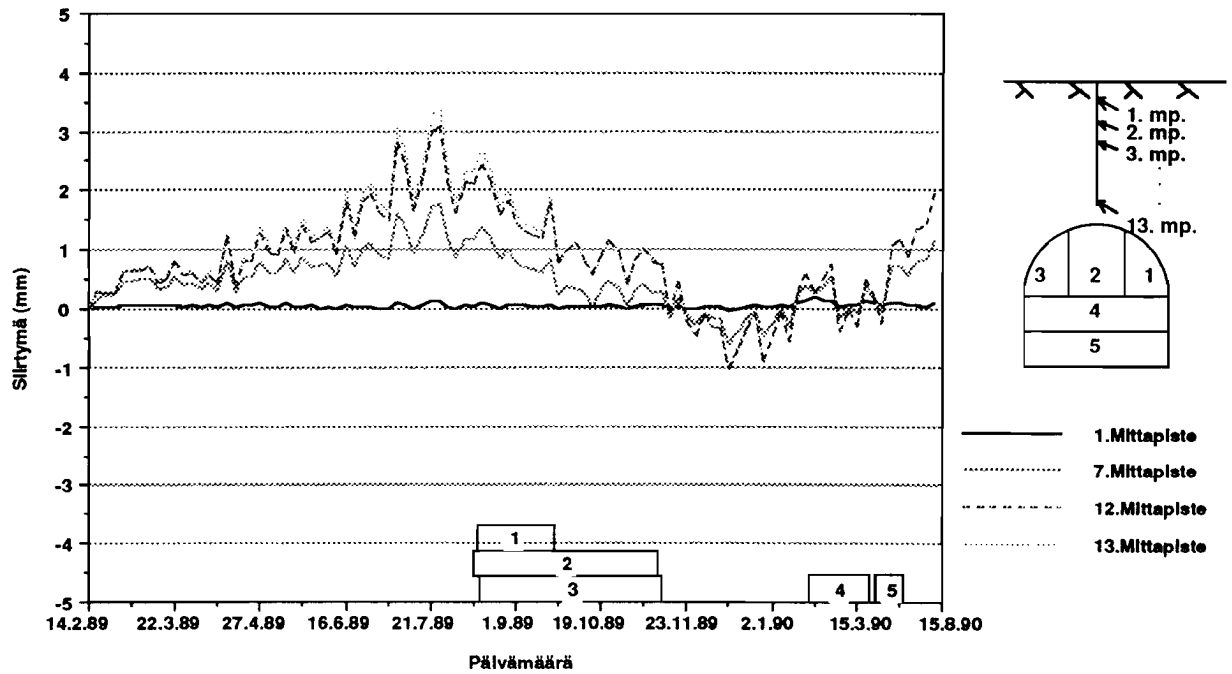
VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondlektensometri VP4 (Koneistushalli)
Siirtymät 10.1.89-15.8.90



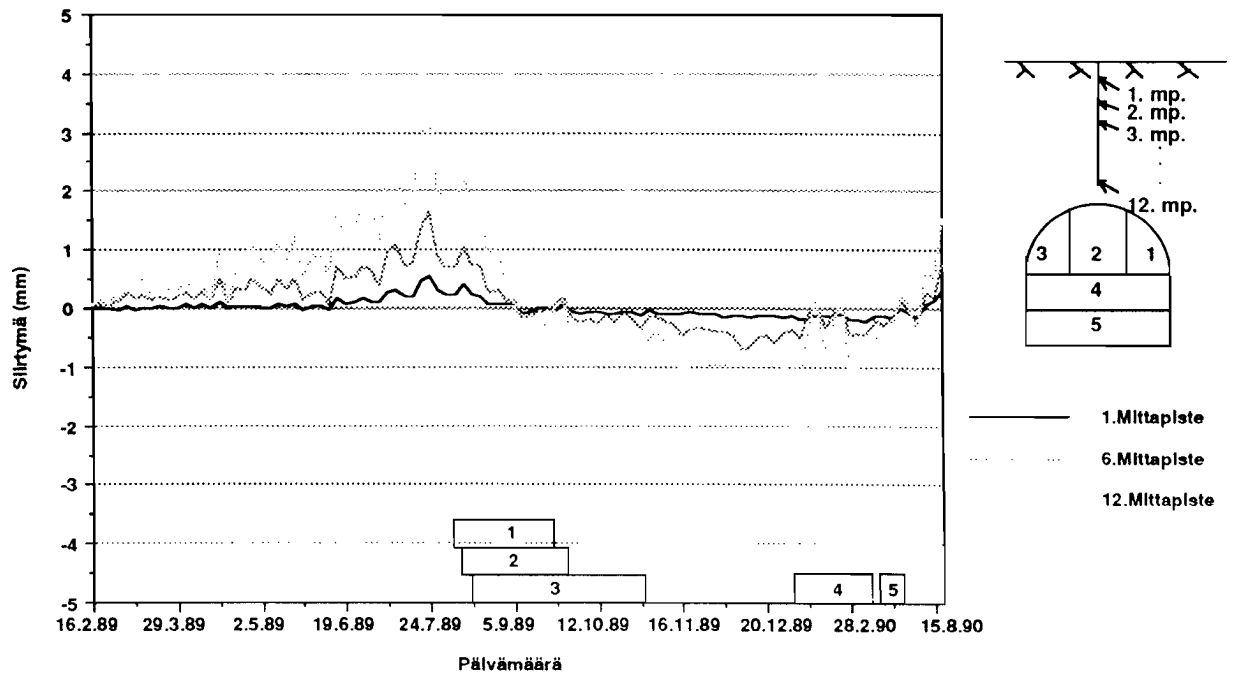
VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondlektensometri VP10 (Koneistushalli)
Siirtymät 16.2.89-21.8.90



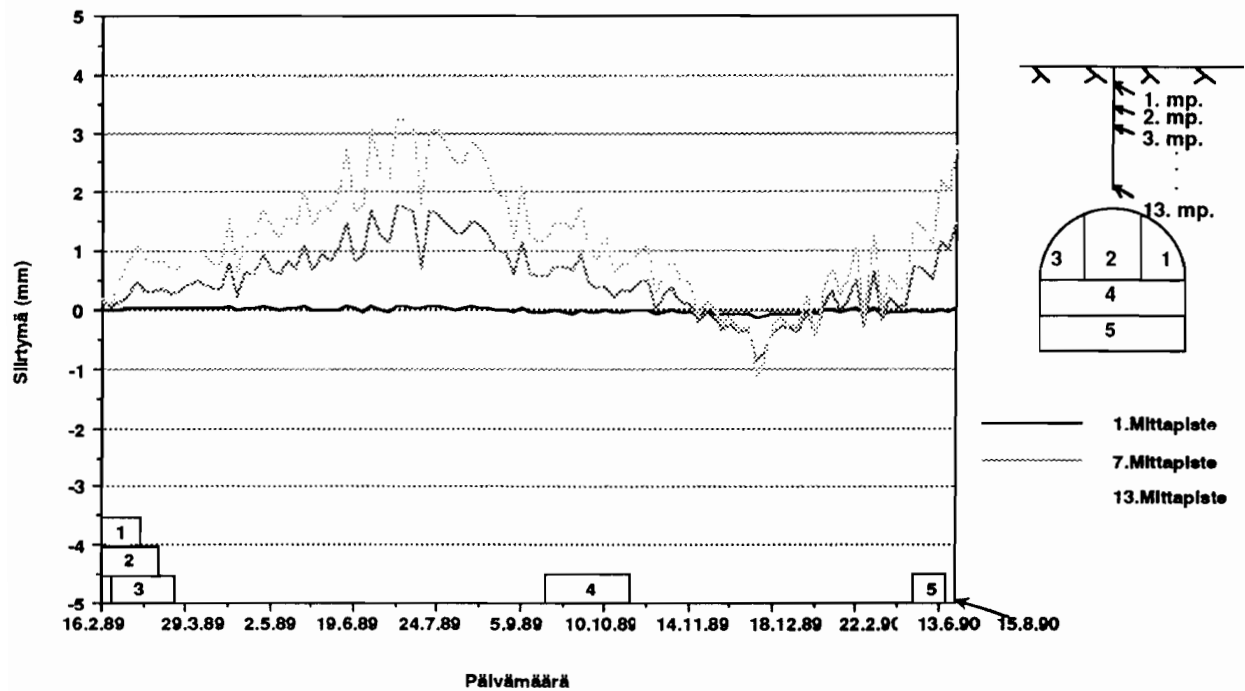
VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondiekstensometri VP6 (6.ilmastusallas)
Siirtymät 14.2.89-15.8.89



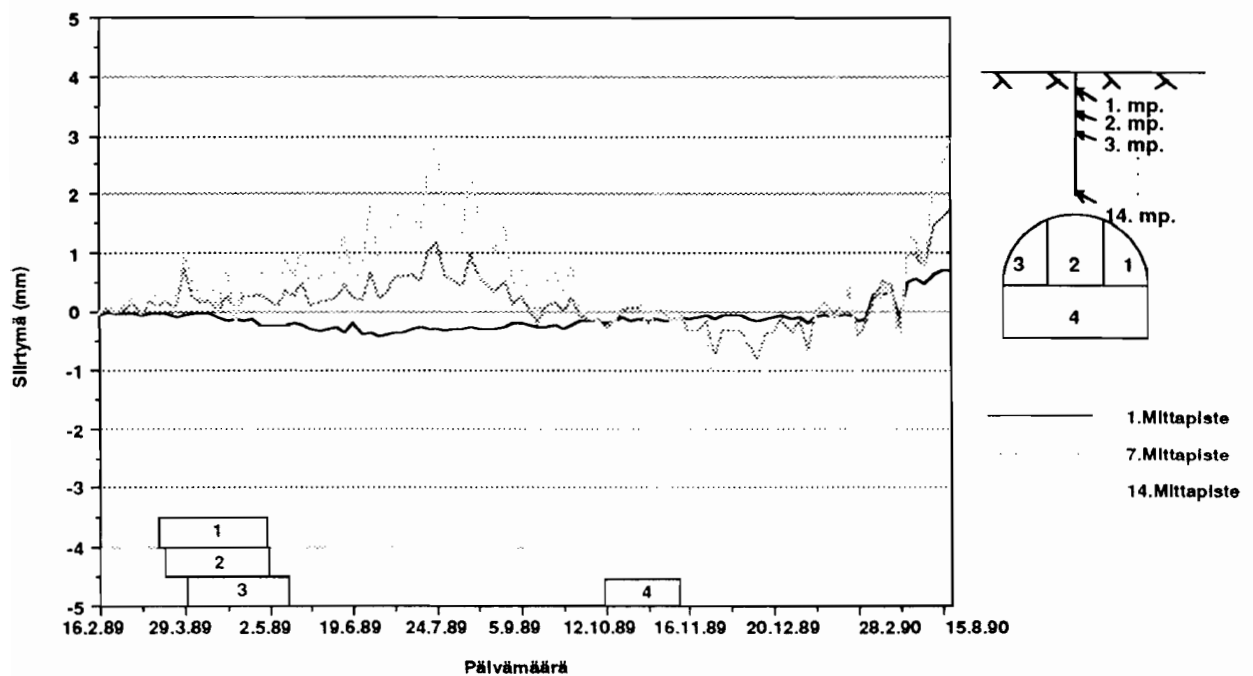
VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondiekstensometri VP7 (5.ilmastusallas)
Siirtymät 16.2.89-15.8.90



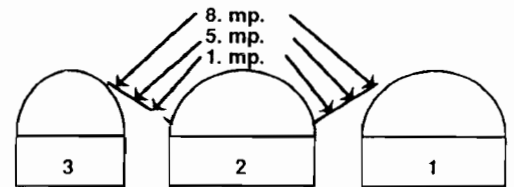
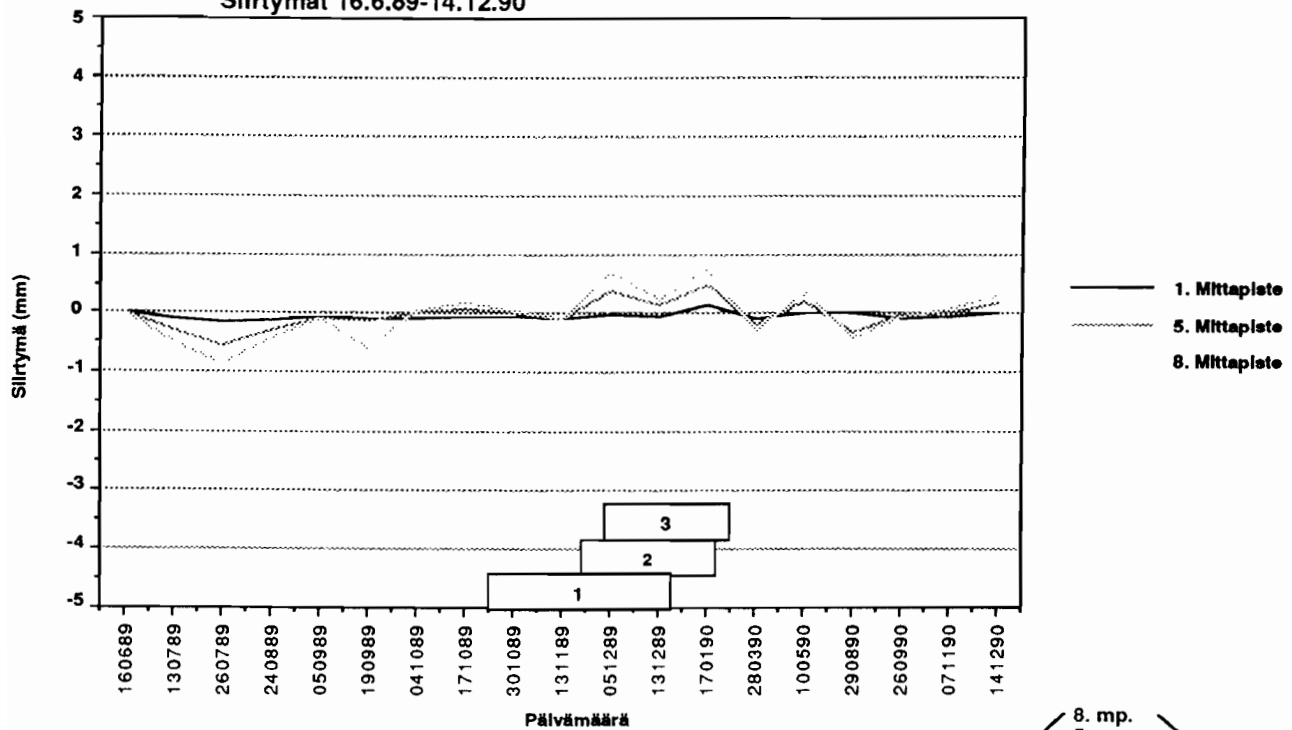
VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondlektensometri VP8 (3. Ilmastusallas)
Siirtymät 16.2.89-15.8.90



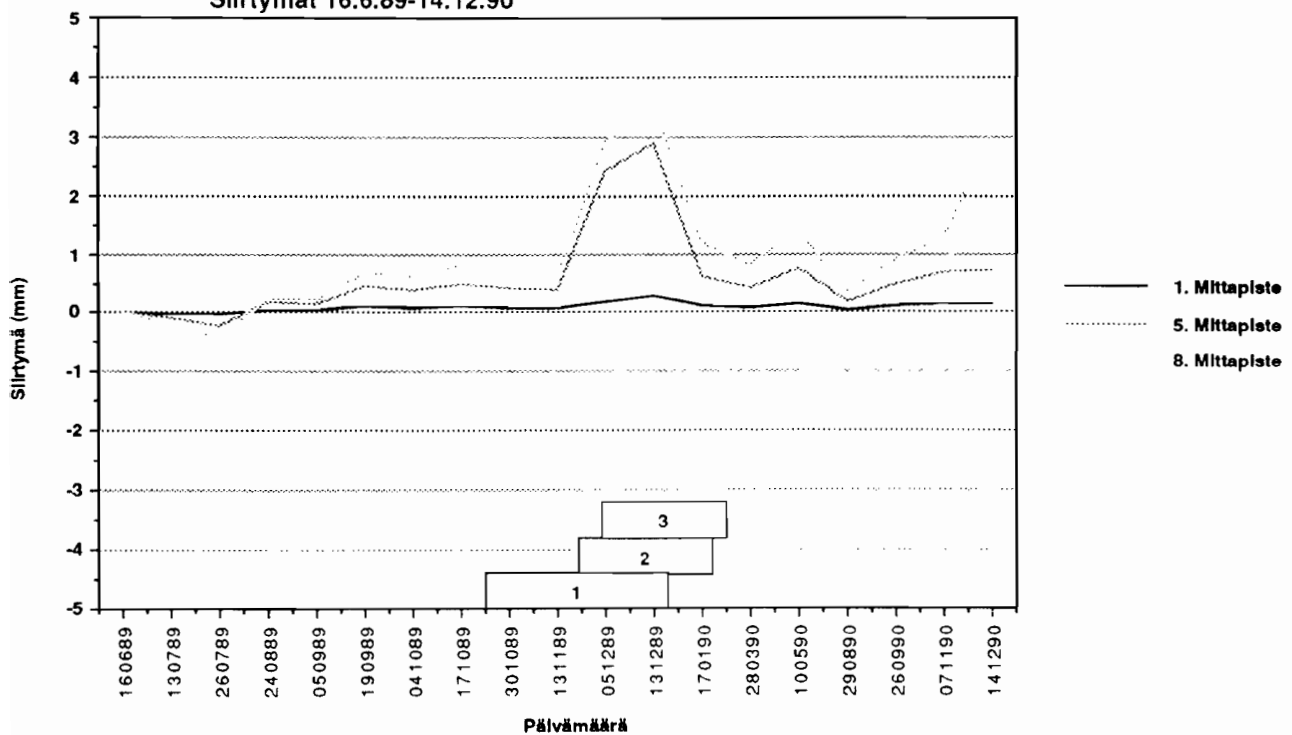
VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondlektensometri VP9 (2. esiselkeytysallas)
Siirtymät 16.2.89-15.8.90



VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondiekstensometri SE1 (1.jälkiselkeytysallas)
Siirtymät 16.6.89-14.12.90



VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Sondiekstensometri SE2 (1. jälkiselkeytysallas)
Siirtymät 16.6.89-14.12.90

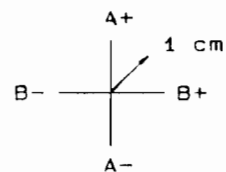


Helsingin kaupunki, Kintteistövirasto
VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
VAAKASIIRTYMÄ KALTEVUUSMITTAUKSELLA

Suomen Malmi Oy
 06-09-1989

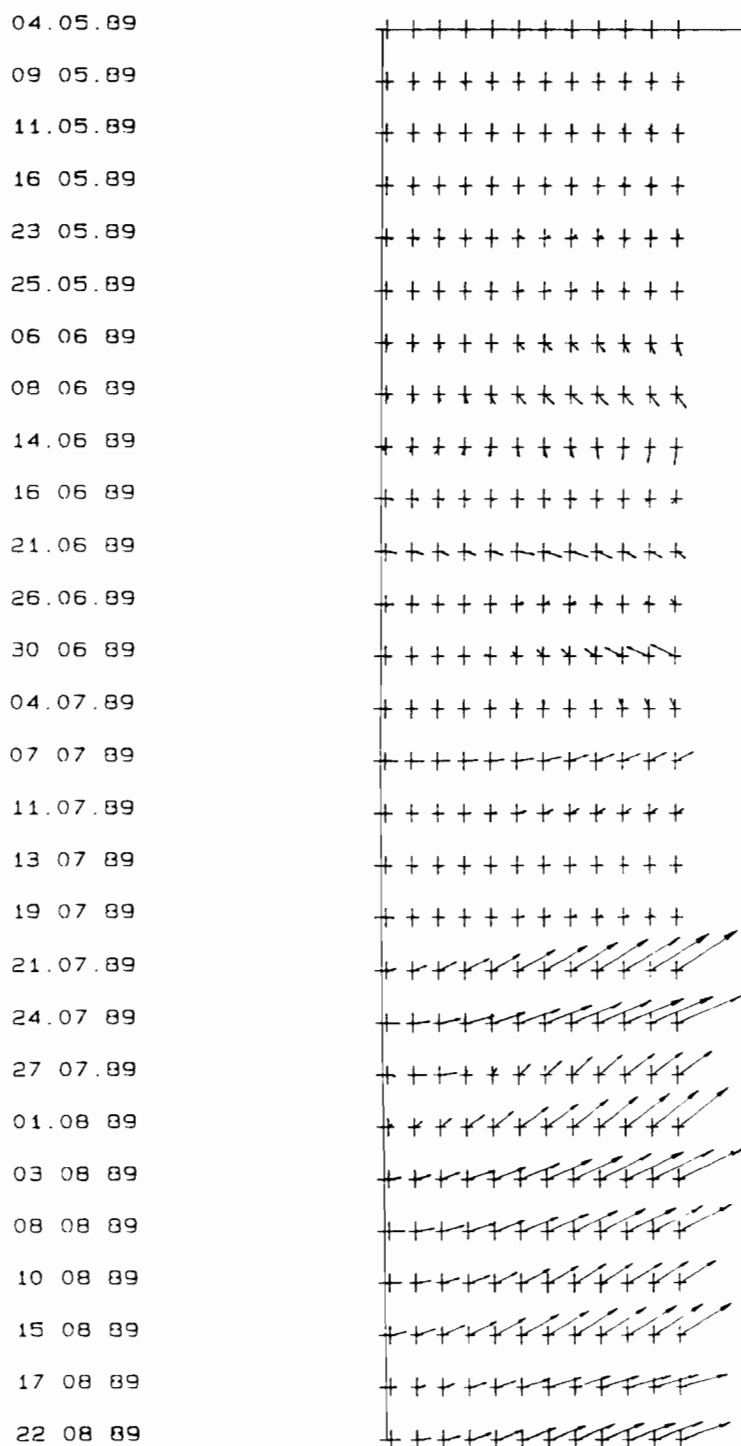
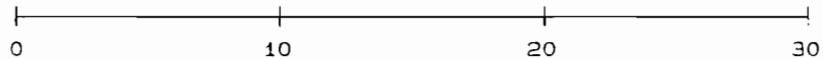
VP 11

Mittauspisteen vaakasiirtymä ja suunta
 ko. pisteen alkuasemasta ensimmäisen
 pisteen suhteen.



Pisteen syvyys (m)

Pvm



LIITE 6b
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto
VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMOLLA
VAAKASIIRTYMÄ KALTEVUUSMITTAUKSELLA

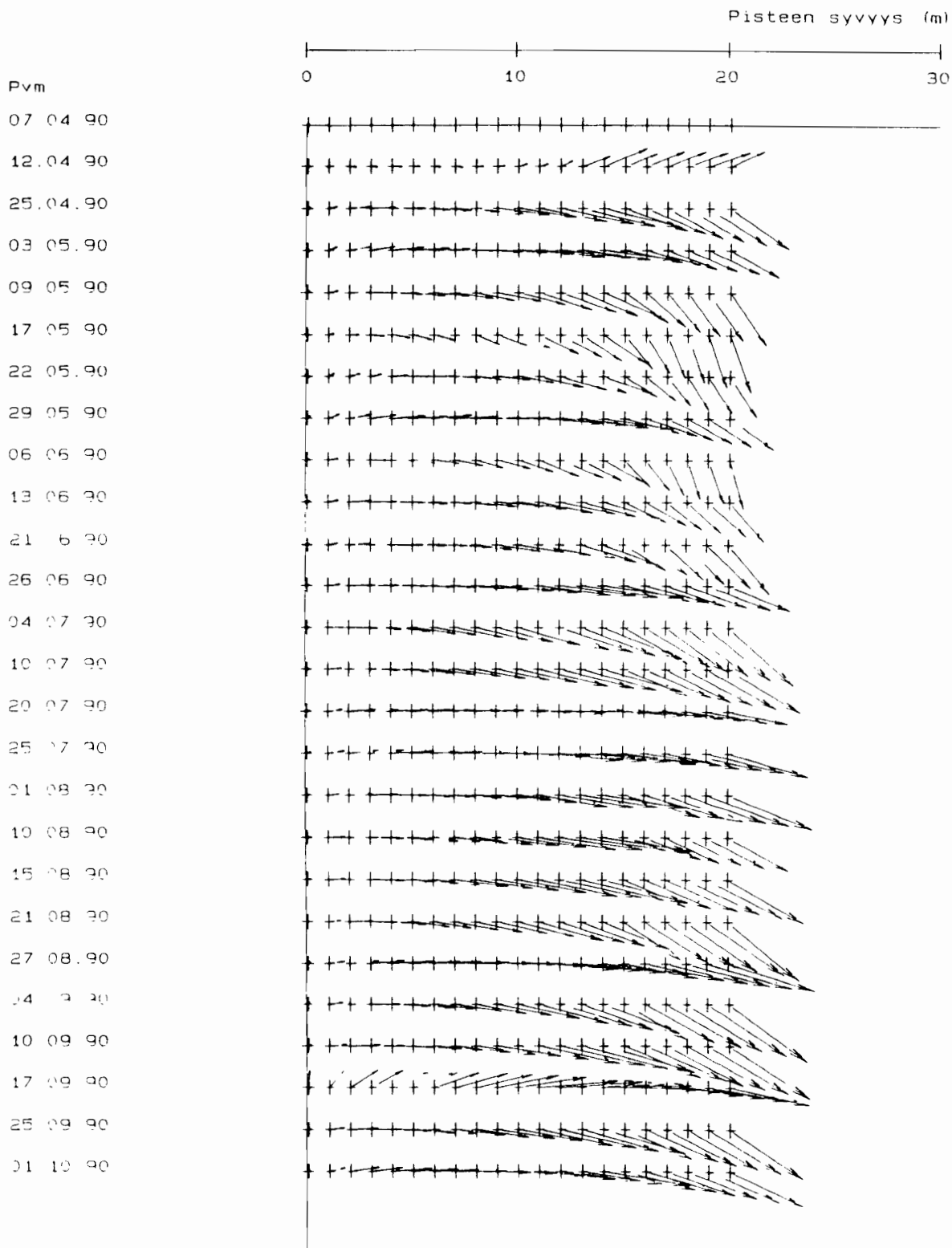
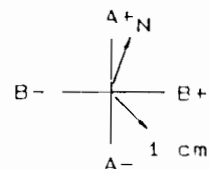
Suomen Malmi Oy
05-10-1990

VP 12

Mittauspisteen vaakasiirtymä ja suunta

ko. pisteen alkuasemasta ensimmäisen

pisteen suhteen.



Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto
 Vuoden 1989 vuorokausien keskilämpötilat Helsingissä

VRI - KESKILÄMPÖTILA
 =====

HELSINKI-VANTAAN LENTORSEMA/VANTAA 1989

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1.	-12.7	2.2	2.0	-1.3	8.2	9.9	17.1	16.2	11.4	3.8	3.9	2.1
2.	-5.0	2.1	1.7	-1.8	8.4	11.9	17.3	14.3	10.0	4.8	4.3	0.9
3.	0.7	4.5	0.7	-1.8	11.4	12.2	19.4	18.8	12.9	4.2	3.2	1.9
4.	0.2	2.4	1.0	-2.1	10.7	17.8	21.3	16.2	9.8	6.5	4.5	-1.2
5.	1.3	2.2	1.4	-0.4	10.3	16.8	22.3	14.6	10.7	5.2	6.0	-7.3
6.	0.3	1.8	1.9	1.6	9.6	14.9	18.9	15.2	13.9	1.9	8.1	-4.3
7.	-1.1	5.3	0.3	3.9	9.2	14.1	20.0	14.7	14.8	1.2	7.1	-9.0
8.	-1.2	1.9	-0.1	3.1	6.0	14.3	21.6	15.9	11.5	4.4	4.7	-11.1
9.	-0.2	-4.1	-0.1	2.9	9.5	14.2	22.3	15.6	10.8	5.5	5.6	-11.4
10.	1.0	-4.1	0.2	4.1	8.9	11.9	17.3	15.6	11.0	5.0	6.0	-14.1
11.	-2.4	0.0	1.3	3.7	7.6	14.6	14.8	16.6	8.3	5.6	8.1	-10.6
12.	0.3	1.6	0.4	7.3	8.1	14.3	17.6	16.9	7.7	3.7	8.7	-17.4
13.	1.1	0.7	0.8	11.7	10.9	11.9	17.8	16.4	12.0	3.5	5.0	-8.6
14.	0.6	-0.8	2.0	12.1	9.1	11.7	18.0	16.0	10.6	4.4	0.4	-20.0
15.	1.8	0.3	2.0	5.8	11.4	11.2	15.0	15.7	11.3	4.1	0.2	-19.3
16.	2.6	0.1	0.3	2.9	12.4	18.6	13.7	18.6	11.6	4.1	-1.8	-7.9
17.	2.5	-3.9	1.1	3.2	12.3	17.8	13.2	17.1	12.5	5.1	1.7	-5.1
18.	-0.7	-4.2	0.7	5.1	11.3	16.0	11.9	16.6	12.0	2.6	2.0	-3.9
19.	-3.6	-1.1	0.6	9.1	10.4	16.1	12.9	15.5	11.1	7.2	4.8	2.9
20.	2.0	1.0	2.2	7.4	11.6	18.8	14.8	14.4	14.4	9.4	0.9	0.9
21.	0.6	-0.6	5.5	7.9	10.7	20.8	13.4	14.6	14.6	9.1	-4.7	-3.2
22.	0.6	-2.4	3.2	5.4	10.6	19.3	14.4	14.8	13.0	10.0	-2.6	1.0
23.	-1.9	-1.6	2.6	6.7	16.6	19.2	16.0	12.0	13.4	9.2	-6.4	-3.6
24.	-3.6	1.1	1.7	7.6	17.9	19.8	15.9	11.2	11.2	8.4	-10.1	-1.3
25.	0.9	1.0	1.7	5.1	17.8	19.1	19.8	9.7	12.9	5.6	-8.7	-1.2
26.	0.2	1.5	1.6	10.8	17.1	18.6	21.1	10.3	12.3	6.2	-3.6	2.0
27.	1.3	3.5	2.7	14.0	12.0	20.2	20.6	9.0	12.2	5.2	-14.7	1.4
28.	3.6	2.1	1.1	12.0	10.2	22.2	19.6	10.4	12.3	4.1	-13.3	0.3
29.	2.6		3.3	12.6	10.7	19.8	17.6	9.8	7.2	5.1	-11.3	-2.3
30.	2.6		1.8	9.6	11.9	17.0	17.7	9.7	4.9	5.1	1.1	-3.9
31.	-0.6		0.9		9.9		17.7	10.4		3.4		-2.3

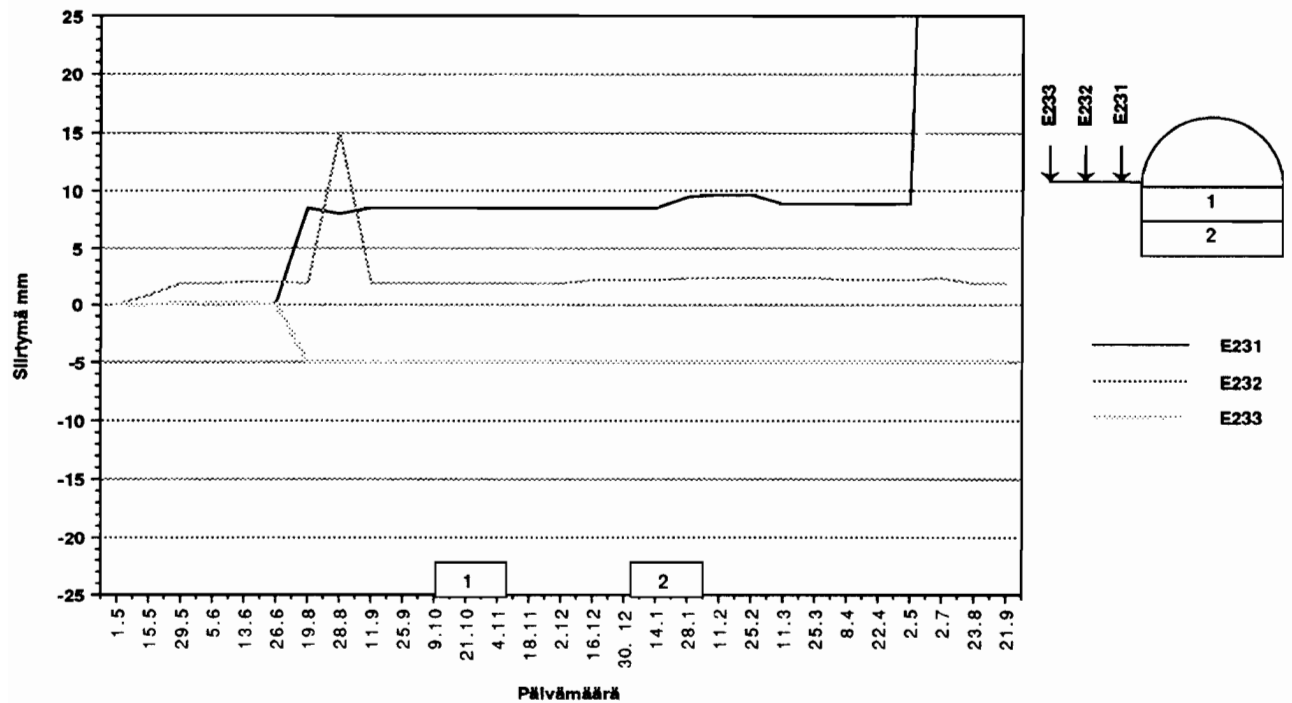
=====

-0.2 0.6 1.5 5.5 11.1 16.1 17.4 14.3 11.4 5.3 0.6 -5.0

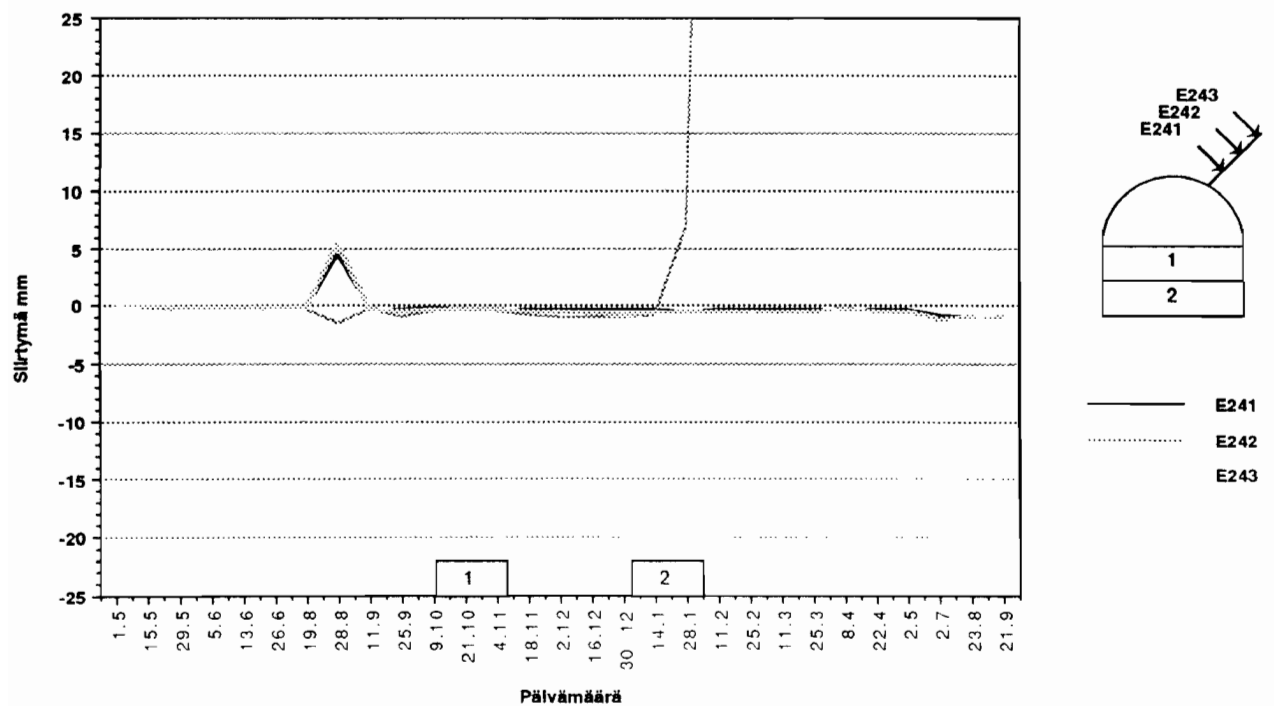
AINEISTONA ILMATIETEEN LAITOKSEN HAVAINNOT 21.11.1990/PS

COPYRIGHT : ILMATIETEEN LAITOKS

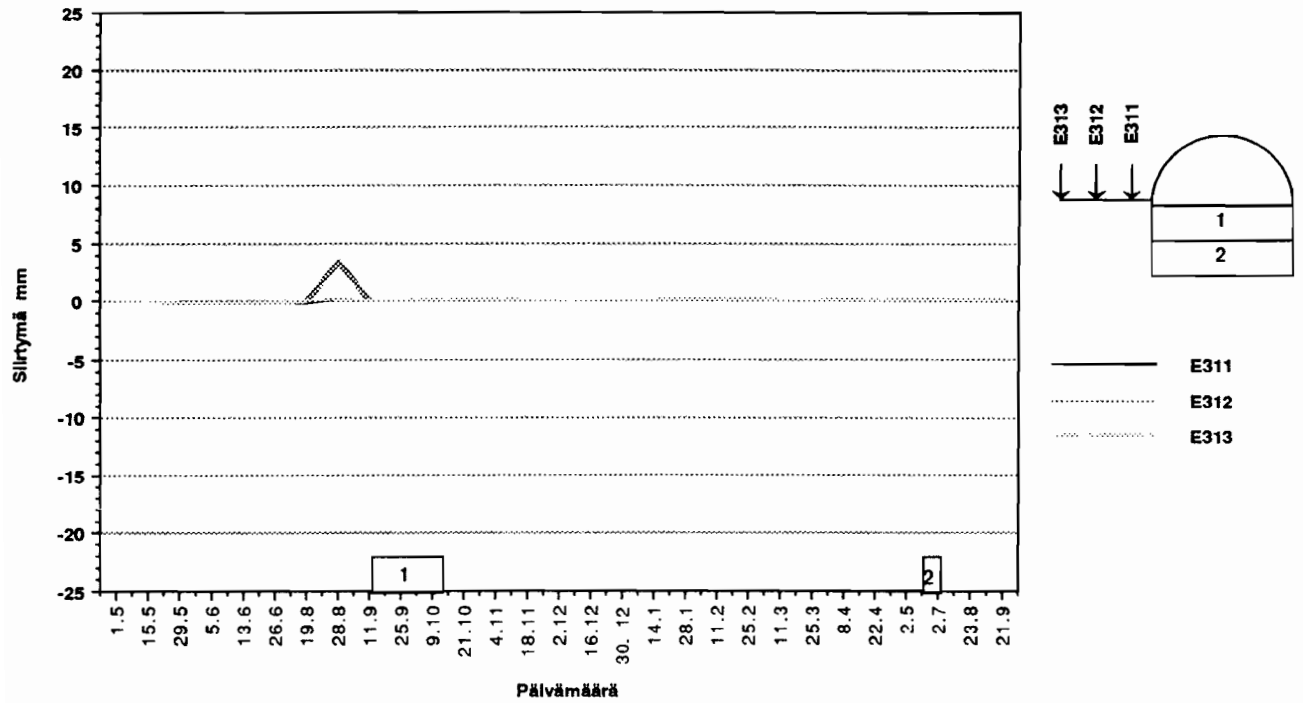
VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Tankoekstensometri E23 (2. Ilmastusallas)
Siirtymät 1.5.89-21.9.90



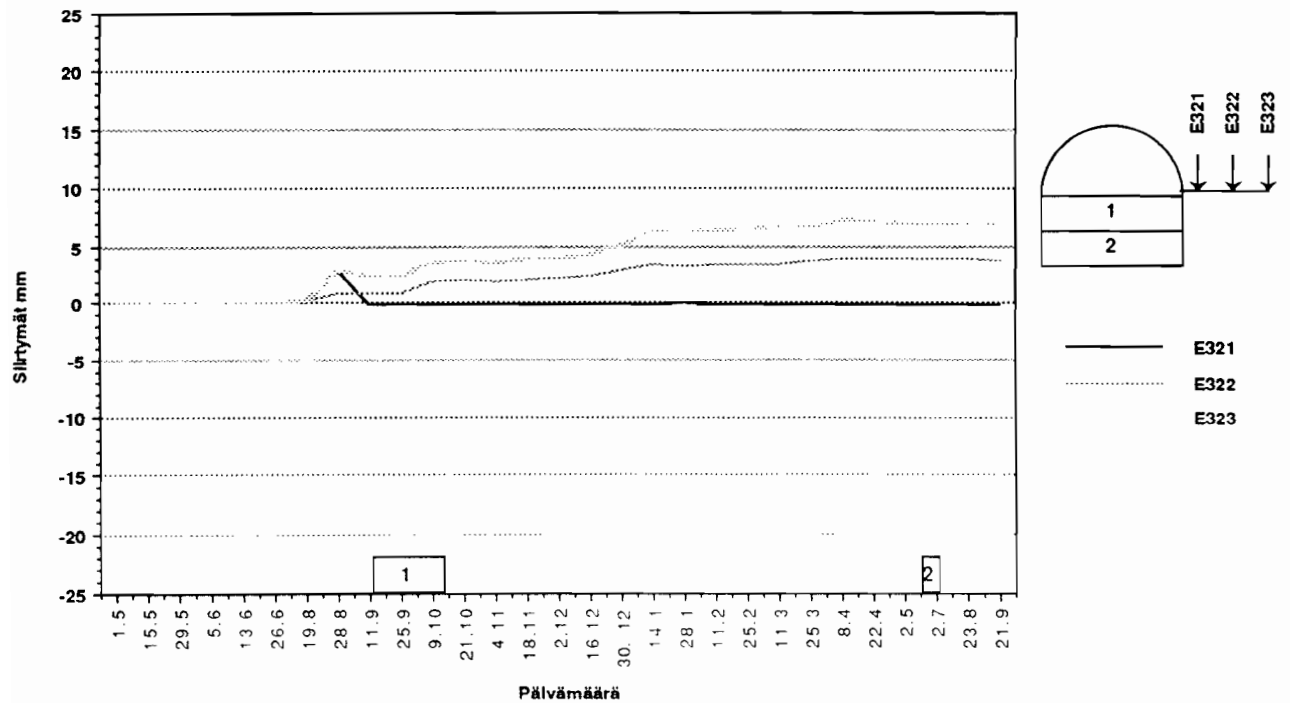
VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Tankoekstensometri E24 (2. Ilmastusallas)
Siirtymät 1.5.89-21.9.90



VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Tankoekstensometri E31 (3.ilmastusallas)
Siirtymät 1.5.89-21.9.90



VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAMO
Tankoekstensometri E32 (3. ilmastusallas)
Siirtymät 1.5.89-21.9.90



Sondiekstensometrien yläpäiden tarkkavaatukset 19.6.89-28.11.90

VIIKINMÄEN KESKUSPUHDISTAM.

Suomen Malmi Oy

TARKKAVAATUKS

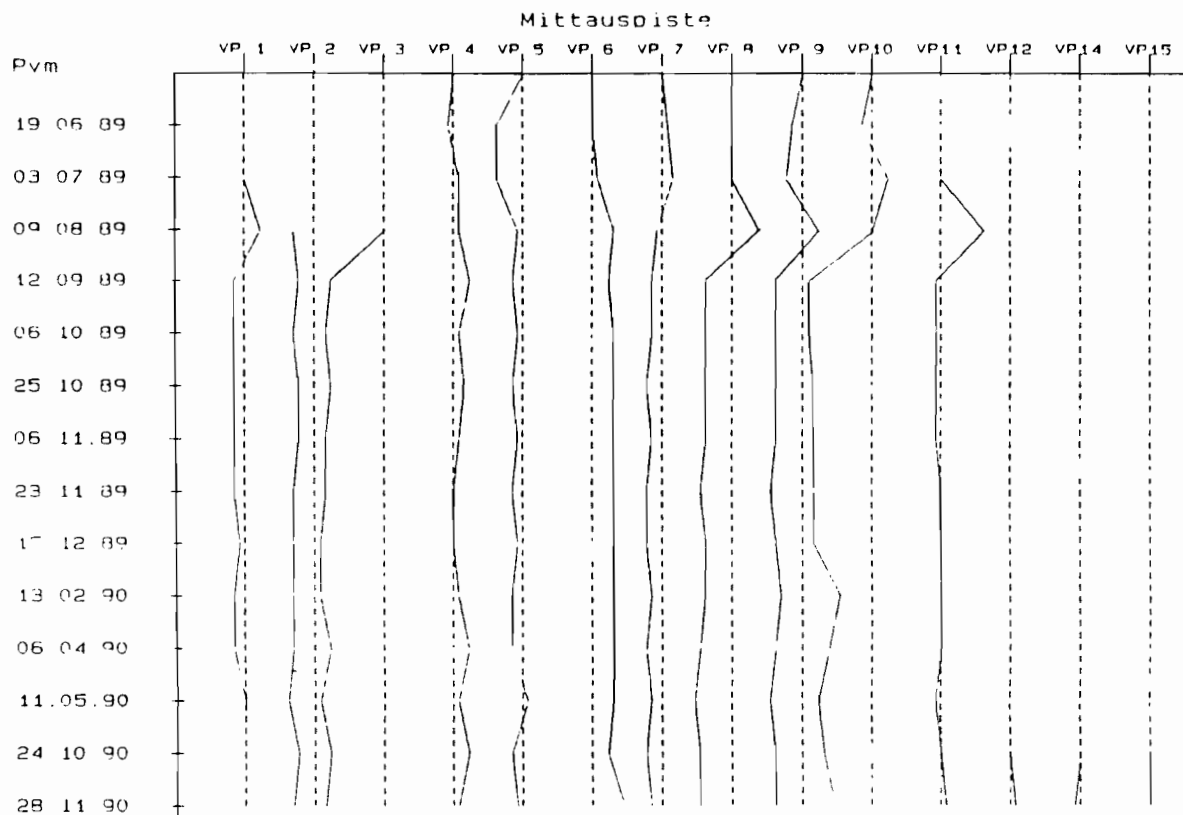
29-11-1990

Pisteen tunnus	Aloituspvm
VP 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	15 06 1989
VP 1, 11	03 07 1989
VP 2, 3	09 08 1989
VP 12, 14, 15	24 10 1990

Korkeuden muutos ensimmäisen mittauksen suhteen:

10 mm

— <--> +



GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

13.4.92

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