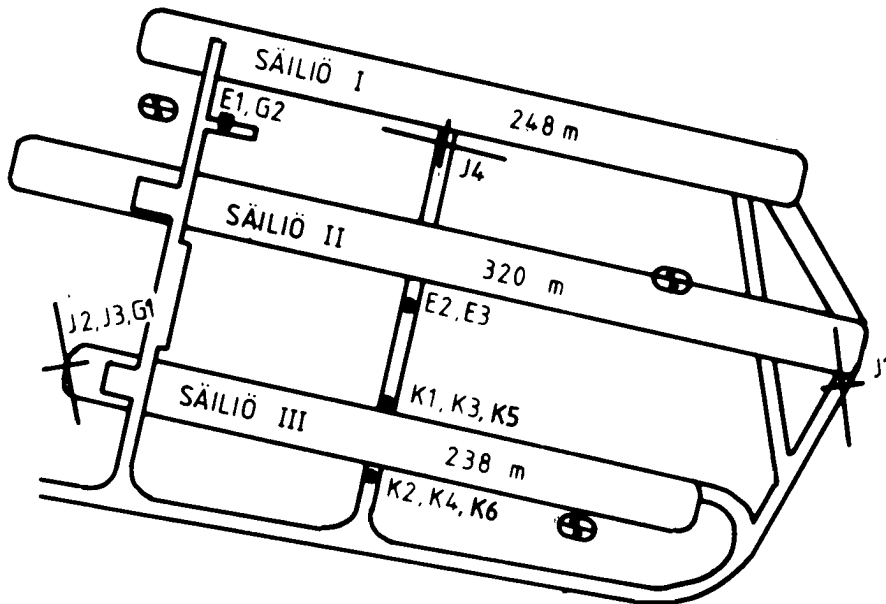
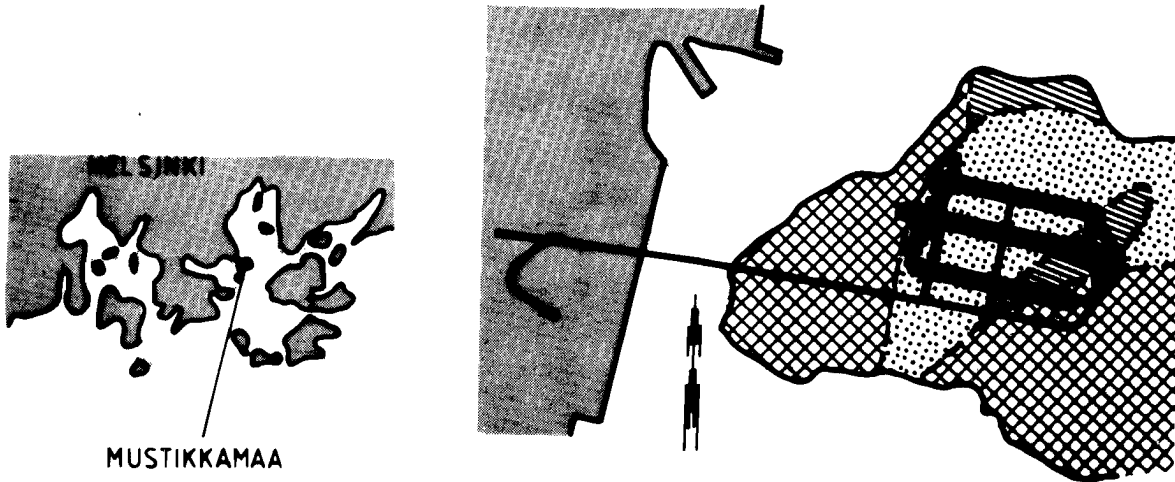


# Helsingin kaupungin kiinteistövirasto GEOTEKNINEN OSASTO

---



Jukka Leinonen

---

## KALLIOMEKAANISET MITTAUKSET HANASAAREN SYVÄVARASTOSSA

---

Geoteknisen osaston tiedote 37

Jukka Leinonen

KALLIOMEKAANISET MITTAUKSET HANASAAREN  
SYVÄVARASTOSSA

Geoteknisen osaston tiedote 37



## TIIVISTELMÄ

Työn tarkoituksena oli rakennusaikaisten kalliomekaanisten tarkkailumittausten suorittaminen eri mittausmenetelmin. Mittaukset tehtiin Helsingin kaupungin energialaitoksen kalliosäiliötyömaalla. Eri tarkkailumittausmenetelmiä pyrittiin myös vertaamaan toisiinsa.

Kirjallisuustutkimus on painottunut mikroseismisen emission syntymekanismien, ominaisuuksien ja käyttömahdollisuuksien selvittämiseen. Lisäksi on selvitetty myös muita työssä käytettyjä tarkkailumittausmenetelmiä. Työn jälkimmäisessä osassa on pyritty erityisesti vertaamaan mikroseismisiä mittauksia muihin tarkkailumittauksiin. Tarkkailumittausten tuloksia on verrattu myös kahden eri elementtilaskelman antamiin tuloksiin.

Tarkkailumittausmenetelminä käytettiin jatkuvia jännitystilamittauksia, ekstensometrimittauksia, mikroseismisiä mittauksia, konvergenssimittauksia, maanpäällistä tarkkavaaitusta ja rakojen siirtymien tarkkailua.

Jatkuvilla jännitystilamittauksilla todettiin, ettei säiliöiden suuntainen jännitys eikä vertikaalijännitys noussut vaarallisen suureksi. Ekstensometrimittaukset osoittivat, että säiliöiden välisissä pilareissa ei ole tapahtunut merkittäviä pystysiirtymiä (siirtymä 40 m:n pituudella alle 1 mm). Lisäksi ekstensometrimittaukset osoittivat, että pilarit käyttäytyvät kuten elementtilaskelmien perusteella oli odotettavissa. Mikroseismisillä mittauksilla havaittiin, että säiliöalue oli varsin stabiili. Eri louhintavaiheissa mikroseismisiä ääniä esiintyi 0 - 30 kpl/5 min. Konvergenssimittauksilla havaittiin, että säiliöiden seinät siirtyivät hieman yli 13 mm säiliöön päin. Maanpäällisillä tarkkavaaituksilla todettiin, että louhinta ei ole vaikuttanut merkittävästi maanpintaan.

Tutkimuksessa havaittiin, etteivät Hanasaaren öljysäiliötyömaalla suoritettut mikroseismiset mittaukset korreloi erityisen hyvin jännitystilamittausten ja ekstensometrimittausten kanssa.

## ABSTRACT

The aim of this investigation was to perform rock mechanical supervision measurements by using various measurement methods during the construction of underground caverns. The client for the caverns was Helsinki Energy Board. The results of supervision measurement methods were also compared with each other.

Literature study clears up the properties and possibilities of utilization of the microseismic emission. Other supervision measurement methods used in this investigation have been cleared up, too. At the second part of the investigation especially microseismic monitoring has been strived to compare with other supervision measurements. The results of the supervision measurements have further been compared with the results of two different finite element calculations.

The supervision measurement methods used were continuous stress and extensometer measurements, microseismic monitoring, convergency measurements, accurate levelling on ground surface and the visual observation of crack displacements.

Continuous stress measurements showed that both the horizontal stresses oriented along the caverns and the vertical stresses were not increasing too high. Extensometer measurements showed that there were no remarkable vertical displacements in the pillars between the caverns (displacement along 40 meter's length was under 1 mm). Extensometer measurements also showed that the pillars behaved as it was expected by the results of the finite element calculations. By microseismic monitoring it was observed that the oil cavern area was very stabile. During different stages of excavation microseismic noise rate was 0 - 30 pc/5 min. By convergency measurements it was found out that the upper walls of the caverns moved about 13 mm to the cavern. Accurate levelling on ground surface showed that excavation does not have any remarkable effect on the ground surface.

In this investigation it was realised that microseismic monitoring performed at Hanasaari oil cavern working place did not correlate especially well with stress and extensometer measurements.

## ALKUSANAT

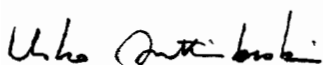
Helsingin kaupunki on merkittävä maanalaisten tilojen rakennuttaja ja suunnittelija. Helsingin kallioperään on louhittu muunmuassa tunneleita, öljysäiliöitä ja väestönsuojia. Näiden kalliotilojen kokonaistilavuus on noin 3,2 milj. m<sup>3</sup>.

Helsingissä, kuten myös muualla Suomessa, kallioperä soveltuu hyvin maanalaiseen rakentamiseen. Rakennuskohteet pyritään sijoittamaan ehjiin ja kiinteisiin kalliomuodostumiin. Tällöin kalliotilojen rakentamisen yhteydessä ei ole yleensä tehty laajoja rakennusaikaisia tarkkailumittauksia. Muualla maailmassa tällaiset mittaukset kuuluvat rakennuskohteen rutiinimittauksiin ja niihin käytetään 1-2 % rakennuskustannuksista.

Hanasaaren syvävarastoa suunniteltaessa päätettiin, suomalaisen mittapuun mukaan, laajojen rakennusaikaisten tarkkailumittausten suorittamisesta. Päätökseen vaikutti Mustikkamaan saaren suuri horisontaalijännitystila sekä Helsingin alueella saadut aiemmat kokemukset suurten kalliotilojen käyttäytymisestä.

Hanasaaren syvävaraston työnaikaiset mittaukset ovat antaneet arvokasta tietoa eri mittausmenetelmien käytöstä ja käyttökelpoisuudesta sekä suurten kalliotilojen käyttäytymisestä vaikeissa kalliomekaanisissa olosuhteissa. Hanasaaren syvävaraston toteuttamisesta saadut kokemukset ovat hyvin arvokkaita suunniteltaessa muita suuria kalliotiloja sekä niiden tarkkailumittauksia.

Helsingissä 20.8.1984

  
Usko Anttikoski  
osastopäällikkö

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

MERKINNÄT

1.	JOHDANTO.....	1
2.	MIKROSEISMINEN EMISSION.....	2
3.	MIKROSEISMISEN EMISSION TUTKIMUKSET.....	3
3.1	Yleistä.....	3
3.2	Mitattavat suureet.....	3
3.3	Laboratoriokokeet.....	6
3.3.1	Mikroseismisen emission syntymekanismit...	8
3.3.2	Puristuksen vaikutus mikroseismiseen emis- sioon.....	11
3.3.3	Kaiser-efekti.....	13
3.3.4	Lämpötilan vaikutus mikroseismiseen emis- sioon.....	14
3.3.5	Mikroseismisten emissiotapahtumien ampli- tudijakauma.....	15
3.3.6	Mikroseismisten emissiotapahtumien taa- juussisältö.....	16
3.4	Kenttätutkimukset.....	19
3.4.1	Mikroseismisen emission eteneminen.....	19
3.4.2	Mikroseismisen emission monitorointi.....	21
3.4.3	Mikroseismisen emission lähteiden paikan- taminen.....	23
3.4.4	Esimerkkejä kenttätutkimuksista.....	25
3.4.5	Yhteenvedo mikroseismisen emission käytös- tä geologisissa materiaaleissa.....	27
4.	MUITA KALLION TARKKAILUMITTAUSMENETELMIÄ.....	29
4.1	Jännitystilamittaukset.....	29
4.2	Ekstensometrimittaukset.....	31
4.3	Konvergenssimittaukset.....	33
4.4	Tarkkavaaitukset.....	34
4.5	Rakojen tarkkailu.....	35

5.	HANASAAREN SYVÄVARASTON KALLIOTEKNINEN SUUNNITTELU...	37
5.1	Rakenne, louhinta ja lujitukset.....	37
5.2	Alueen geologia.....	38
5.3	Kenttätutkimukset.....	39
5.3.1	Kallionäytekairaukset.....	39
5.3.2	Jännitystilamittaukset.....	40
5.4	Kenttätutkimusten vaikutus säiliöiden suunnitte- luun.....	40
6.	RAKENNUSAIKAISET MITTAUKSET.....	42
6.1	Yleistä.....	42
6.2	Jännitystilamittaukset.....	43
6.2.1	Kolmidimensionaalisen jännitystilan mit- taus.....	43
6.2.2	Jatkuvat jännitystilamittaukset.....	45
6.2.3	Tulokset louhinnan edetessä.....	46
6.3	Mikroseismiset mittaukset.....	51
6.3.1	Mittauslaitteet.....	51
6.3.2	Arviot mittauksista.....	54
6.3.3	Tulokset louhinnan edetessä.....	55
6.4	Muodonmuutosmittaukset.....	58
6.4.1	Ekstensometrimittauksset.....	58
6.4.2	Konvergenssimittaukset.....	66
6.4.3	Tarkkavaaitukset.....	68
6.4.4	Rakojen tarkkailu.....	69
7.	SUORITETUT ELEMENTTILASKENNAT.....	72
7.1	Tekla Oy:n Finite-elementtilaskelma.....	72
7.2	TKK:n Finite-elementtilaskelma.....	73
8.	ERI MENETELMIEN ANTAMIEN TULOSTEN VERTAILU.....	75
8.1	Mikroseismiset mittaukset verrattuna jännitys- tilamittauksiin.....	75
8.2	Mikroseismiset mittaukset verrattuna ekstenso- metrimittauksiin.....	76
8.3	Jännitystilamittaukset verrattuna elementti- laskelmiin.....	77
8.4	Ekstensometrimittauksset verrattuna elementti- laskelmiin.....	79
8.5	Konvergenssimittaukset verrattuna elementti- laskelmiin.....	80
8.6	Tarkkavaaitukset verrattuna elementtilaskelmiin	81
9.	YHTEENVETO.....	82
	KIRJALLISUUSLUETTELO.....	84
	LIITTEET	



MERKINNÄT

A	mikroseismisen emission amplitudi
D	mitattavien pulttien välinen etäisyys
E	kimmomoduli
$E_0$	muodonmuutosenergia hydrostaattisessa paineessa
$E_1$	deviatooriseen jännitykseen suhteessa oleva muodonmuutosenergia
$E_M$	mikroseismisen emission energia
$E_{tot}$	kokonaismuodonmuutosenergia
EDR	mikroseismisen emission energian jakaumasuhde
ER	mikroseismisen emission energian vapautumisnopeus
$E(l)$	mikroseismisen emission energia taajuudella 500 - 5000 Hz
$E(h)$	mikroseismisen emission energia taajuudella 10 250 - 15 000 Hz
$F(\omega)$	mikroseismisen emission taajuusspektri
$G(t)$	mikroseismisen emission aaltomuoto
L	jännitystilamittausreiän pituus
$L_1 \dots L_3$	ekstensometrin kiinnityspisteiden syvyydet
ME	mikroseisminen emissio
N	kumuloitunut aktiivisuus
NR	mikroseisminen emissiotajuus
R ~	tarkasteltavan pisteen poikkeama alkuperäisestä asemasta
To	mikroseismisen emissiotapahtuman syntyajankohta
$V_1 \dots V_5$	mikroseismisen emissiosignaalin nopeus kalliossa
$V_L$	pitkittäisaallon nopeus
$V_S$	leikkausaallon nopeus
$V_R$	pinta-aallon nopeus
$X_0, Y_0,$ $Z_0$	mikroseismisen emissiolähteen paikan koordinaatit
$X_1, Y_1,$ $Z_1 \dots$	mikroseismisen laitteen anturien koordinaatit
$X_5, Y_5,$ $Z_5$	

$\vec{a}$	yksikkövektori
$\vec{b}$	yksikkövektori
$\vec{f}$	taajuus
$q$	deviatoorinen komponentti
$t$	aika
$t_1 \dots t_5$	mikroseismisen emissiosignaalin saapumisaika mikroseismisen laitteen anturiin
$x_0, y_0,$ $z_0$	tarkasteltavan pisteen alkuperäinen asema
$x, y, z$	tarkasteltavan pisteen asema muutoksen jälkeen
$\nu$	Poissonin luku
$\sigma_0$	isotrooppinen hydrostaattinen paine
$\sigma_1$	akssiaalinen jännitys
$\sigma_2$	jännityskomponentti
$\sigma_3$	sellipaine
$\sigma_m$	murtojännitys
$\Delta\sigma$	jännitysalue
$\omega$	kulmanopeus
$\Sigma E$	mikroseismisen emission kumuloitunut energia
$\phi$	läpimitta



1. JOHDANTO

Suomessa ei kalliotilojen rakentamisen yhteydessä ole yleensä tehty laajoja rakennusaikaisia tarkkailumittauksia, koska Suomen kallioperä on hyvä ja rakennuskohteet pyritään sijoittamaan ehjiin ja kiinteisiin kalliomuodostumiin. Muualla maailmassa kalliotilat joudutaan usein rakentamaan heikkoon kallioon ja tällöin laajat rakennusaikaiset tarkkailumittaukset kuuluvat rakennuskohteen rutiinimittauksiin.

Mustikkamaan saaren suuren horisontaalijännitystilan ja Helsingin alueella saatujen aiempien kokemusten perusteella päätettiin Hanasaaren syvävarastoa suunniteltaessa, että rakennusaikana tullaan suorittamaan laajahkot tarkkailumittaukset. Tarkkailumittausmenetelmiksi valittiin kallionjännitystilamittaukset, muodonmuutosmittaukset ja mikroseismit mittaukset.

Tämän työn tavoitteena on rakennusaikaisten kalliomekaanisten tarkkailumittausten suorittaminen ja tulkinta sekä niiden antamien tulosten keskinäinen vertailu kalliosäiliötyömaalla. Lisäksi työn yhteydessä on tarkoitus verrata elementtimenetelmällä laskettuja jännityksiä ja muodonmuutoksia mitattuihin arvoihin. Näin laajaa selvitystä eri mittausmenetelmistä ja niiden vertailusta ei tekijän tietojen mukaan ole Suomessa rakennusteknisessä louhintatyössä tehty.

## 2. MIKROSEISMINEN EMISSIO (ME)

Fysikaalisena ilmiönä akustinen emissio (mikroseisminen emissio) on muodonmuutosenergian (strain energy) nopeaa vapautumista materiaalissa /29/. Akustista emissiota esiintyy kaikissa materiaaleissa, kuten kivessä, metalleissa, maalajeissa, betonissa, keramiikassa, jäässä ja puussa /25/. Osa muodonmuutosenergiasta säteilee lähteestä kimmoisten aaltojen muodossa, jotka voidaan havaita materiaalin pinnalla. Toinen osa energiasta vapautuu lämpönä /29/.

Muodonmuutosenergian vapautumisen edellytyksenä on materiaalissa tapahtuva tasapainotilan muutos. Geologisissa materiaaleissa tasapainotilan muutos voi aiheutua jännitystilasta ja pienen mittakaavan siirtymistä, kuten mikrorakoilusta, leikkautumisesta ja liukumisesta /13/.

Geologisiin materiaaleihin liittyvästä akustisesta emissiosta käytetään myös seuraavia nimityksiä: mikroseisminen aktiivisuus (microseismic activity), jännitysaaltoemissio (stress wave emission), kimmoiset aallot (elastic waves), kallioräiske (rock noise) /19/. Vastaavaa ilmiötä tarkoittaa myös termi seismoakustinen aktiivisuus (seismoacoustic activity).

Tässä työssä käytetään geologisiin prosesseihin liittyvästä akustisesta emissiosta nimityksiä mikroseisminen emissio ja mikroseisminen aktiivisuus.

### 3. MIKROSEISMISEN EMISSION TUTKIMUKSET

#### 3.1 Yleistä

Mikroseismisen emission tutkimukset alkoivat Pohjois-Amerikassa 1930-luvun lopulla, jolloin yhdysvaltalaiset Obert ja Duvall sekä kanadalainen Hodgson alkoivat käyttää mikroseismistä emissiota kalliomassojen pysyvyyden valvontaan /19/. Hieman myöhemmin samanlaiset tutkimukset alkoivat myös Euroopassa ja Aasiassa. Tutkimusten päämääränä oli kallion stabiilisuuden arviointi kaivoksissa, jotta voitaisiin saada ennako-varoitusta sortumavaarasta /11/. Tätä tekniikkaa kutsutaan myös mikroseismiseksi valvonnaksi. Sekä laboratorio- että kenttä-tutkimuksissa pystyttiin toteamaan mikroseismisen aktiivisuuden lisääntyminen, kun näytteen tai rakenteen kuormitus lisääntyi.

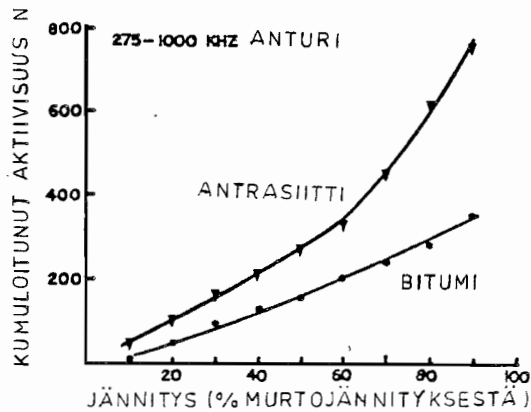
Aiemmin mikroseismisen emission laboratoriokokeet keskittyivät perustutkimukseen. Pyrittiin selvittämään emission syntymekanismit, etenemisominaisuudet, koemateriaalin fysikaalisten muutosten vaikutukset mikroseismiseen aktiivisuuteen jne. Viimeaikaiset laboratoriotutkimukset ovat sen sijaan keskittyneet uusien sovellutusten etsimiseen. Esimerkkeinä voidaan mainita raon kasvusta aiheutuva emissio ja kiven jännityshistorian arviointi Kaiser-efektin avulla /20/.

Kenttätutkimuksista suuri osa on liittynyt stabiilisuuden arviointiin hiilikaivoksissa. Hardy /13/ on tehnyt stabiilisuustutkimuksia myös rakennusteknisen kalliorakentamisen alalla.

#### 3.2 Mitattavat suureet

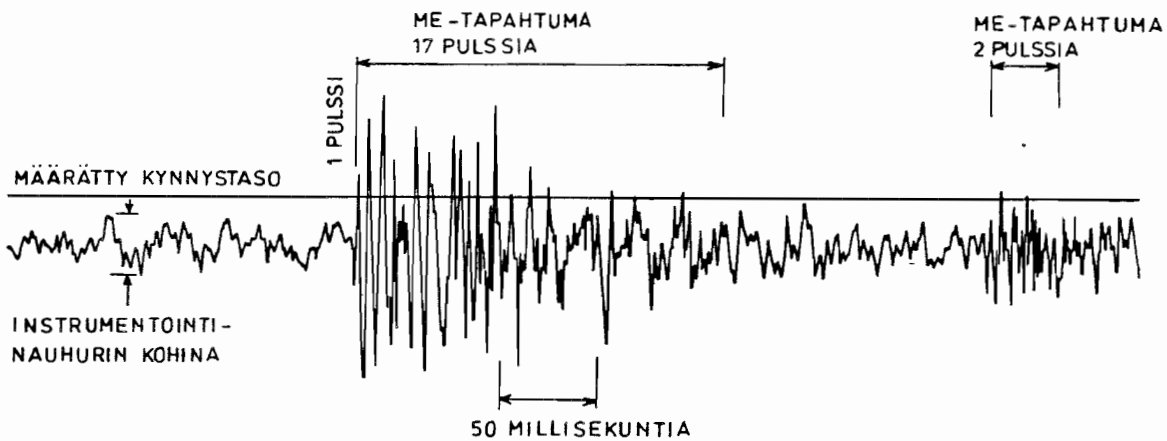
Mikroseismisen emission tutkimuksissa mitatut suureet voidaan jakaa aikaan liittyviin ja taajuuteen liittyviin suureisiin. Aikaan liittyviä suureita ovat /8, 19/:

Kumuloitunut aktiivisuus N (Accumulated Activity, Total Count), tietyssä ajassa määrätyn kynnystason ylittävien ME:n pulssien kokonaismäärä (kuva 1).



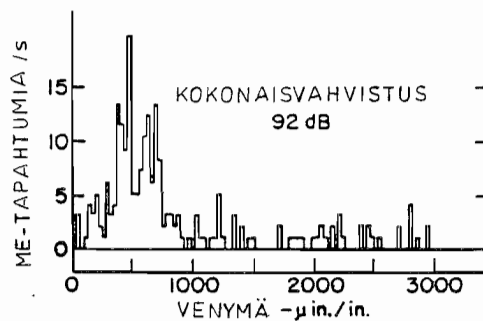
Kuva 1. Kumuloitunut aktiivisuus-jännityskäyrä kahdelle kivihiilelle /24/.

Mikroseisminen emissiotaajuus NR (Noise Rate, Count Rate), määrätyn kynnyksen ylittävien ME:n pulssien lukumäärä aikayksikköä kohti (kuva 2).



Kuva 2. Tyypillinen mikroseisminen emissiosignaali ja määrätyn kynnyksen ylittävien pulssien lukumäärä /41/.

ME-tapahtumien esiintymistaajuus (Events), määrätyn kynnyksen ylittävien erillisten ME-tapahtumien määrä aikayksikköä kohti (kuva 3).



Kuva 3. ME-tapahtumien esiintymistaajuus-venymäkäyrä /32/.

ME:n amplitudi  $A$ , mitataan ME-tapahtuman maksimi amplitudi tai amplitudin kesto aika.

ME:n energia  $E_M$  (Acoustic Emission Energy), on määritelmän mukaan kunkin ME-tapahtuman amplitudin neliö ( $E_M = A^2$ ).

Kumuloitunut energia  $\Sigma E$  (Accumulated Energy), tietyssä ajassa havaittujen ME-tapahtumien kokonaisenergia.

Energian vapautumisnopeus  $ER$  (Energy Rate), kaikkien havaittujen ME-tapahtumien kokonaisenergia aikayksikköä kohti.

Energian jakaumasuhde  $EDR$  (Energy Distribution Ratio), taajuuksilla 500 - 5000 Hz ja 10250 - 15000 Hz havaittujen ME:n kokonaisenergioiden suhde /8/.

Edellisten lisäksi muita aikaan liittyviä mitattavia suureita ovat ME-signaalin kesto aika, ME-pulssien nousuaika sekä RMS-taso, joka tarkoittaa tasasuunnatun signaalin keskimääräistä amplitudia /19/.

Edellämainituista suureista on huomautettava, että  $N$  ja  $NR$  ovat riippuvaisia monitorointijärjestelmän herkkyydestä ja signaalikohinasuhteesta. Suureet  $A$ ,  $E_M$ ,  $\Sigma E$  ja  $ER$  ovat samoin riippuvaisia järjestelmän herkkyydestä ja signaalikohinasuhteesta, mutta myös koko monitorointijärjestelmän taajuusvasteesta /8/.



Mikroseismistä emissiotapahtumaa voidaan kuvata myös signaalien taajuussisällön avulla. Yleensä minkä tahansa signaalin, kuten esimerkiksi ME-tapahtuma, voidaan sanoa muodostuvan lukuisten erillisten komponenttien superpositiona. Minkä tahansa ME-tapahtuman amplitudi aika-alueessa muodostuu monien sinimuotoisten signaalien (tietty taajuus ja amplitudi) superpositiona. Näin muodostuvaa signaalia kuvataan Fourier-integraalilla /8/. Yhtälössä (1) on esitetty Fourier-muunnos, jolla signaalin aaltomuodosta voidaan laskea signaalin taajuusspektri /15/.

$$F(\omega) = \int_0^{\infty} \sqrt{\frac{2}{\pi}} [\cos(\omega t)] G(t) dt \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

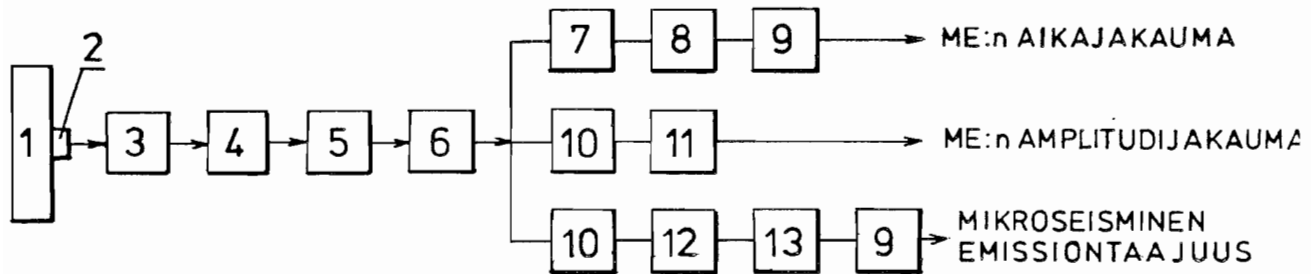
Yhtälössä (1)  $F(\omega)$  on signaalin taajuusspektri,  $G(t)$  on signaalin aaltomuoto,  $f$  on taajuus ja  $t$  on aika. Taajuusspektrin laskentaan käytetään sopivaa tietokoneohjelmaa /8/.

### 3.3 Laboratoriokokeet

Laboratoriokokeiden päämääränä on selvittää mikroseismisen emission fysikaalista luonnetta ja sen käytännön sovellutuksia. Koejärjestelyissä kivinäytettä kuormitetaan eri tavoin ja monitorointilaitteistolla (kuva 4) havaitaan syntyvää mikroseismistä emissiota. Useimmissa kokeissa kivinäytteenä on ollut timanttikairauksesta saatu sydännäyte. Kokeita on tehty myös laattamaisilla näytteillä. Kuormitustapoja on useita. Yleisin lienee 1- tai 3-aksiaalinen puristus. Laattamaisia näytteitä on yleensä kuormitettu taivutuksella tai väännöllä. Kokeita on tehty myös vetokuormituksella. Mikroseismisen emission avulla on tutkittu myös lämpögradieniteista ja lämpölaajenemisesta aiheutuvia jännityksiä.

Näytteen joutuessa kuormituksen alaiseksi siinä tapahtuu ilmiöitä, jotka synnyttävät mikroseismistä emissiota. Tämä emissio etenee syntykohdastaan joka suuntaan kimmoisena aaltona, aiheuttaen näytteen pinnalla mekaanista värähtelyä. Nämä värähtelyt havaitaan herkällä anturilla. Anturi muuttaa mekaanisen liikkeen sähköiseksi pulsseiksi, jotka ovat verrannollisia

värähtelyn nopeuteen tai kiihtyvyyteen. Nykyisin yleisimmin käytetään pietsosähköisiä antureita. Antureista tulevat sähköiset pulssit vahvistetaan ja suodatetaan sekä johdetaan käsitteily- ja tulostuslaitteille /25/.



Kuva 4. Lohkokaaviokuva mikroseismisen emission monitorointijärjestelmästä laboratorionkokeissa /33/. 1. Näyte. 2. Anturi. 3. Esivahvistin. 4. Kaistanpäästösuodin. 5. Päävahvistin. 6. Instrumentointinauhuri. 7. Detektori. 8. Tehovahvistin. 9. Piirturi. 10. Kynnystason säätö. 11. Amplitudianalysointilaite. 12. Laskuri. 13. Digitaalinen/Analoginen muunnin.

Mikroseismisen emission varhaisimmat laboratorionkokeet on tehty taajuusalueella 0,5 - 5 kHz. 1970-luvulla tehtyjen laboratorionkokeiden taajuusalue on ollut 0,1 - 50 kHz /8/. Viimeaikaisissa kokeissa taajuusalue on entisestään kasvanut. Nykyään mikroseismistä emissiota on tutkittu taajuuksilla 2 - 5000 kHz. Taulukossa 1. on esitetty yhteenveto eräistä viimeaikaisista mikroseismisen emission laboratorionkokeista. Seuraavat kappaleet on käsitelty pääasiassa näiden kokeiden perusteella.

Taulukko 1. Eräitä viimeaikaisia mikroseismisen emission laboratoriontutkimuksia.

Näytteen muoto	Kivilaji	Kuormitus	Tutkittu taajuus (kHz)	Kokeen tarkoitus	Kokeen suorittaja	Julkaisu-vuosi	Viite
laatta	basaltti (Murata)	vääntö	30 - 2000	ME-lähteen paikantaminen Raon kasvusta aiheutuvan ME:n tutkiminen	O.Sano	1981	/36/
	gran. (Oshima)	vääntö	10 - 3000				
kairasydän	gran. (Westerly)	kuumennus	5 - 200	Lämpötilasta aiheutuvan ME:n tutkiminen	Chen Yong	1980	/44/
kairasydän	hiekkakivi (Bunt)	2-aks.pur.	100 - 300	3-aks.pur. aiheuttaman ME:n tutkiminen	T.N.Gowd	1980	/7/
kairasydän	gran. (Jinan)	3-aks.pur.	5 - 20	Kaiser efektin tutkiminen	Chen Rong	1979	/33/
	gran. (Changpin)						
kairasydän	gran. (Tono)	1-aks.pur.	10 - 5000	Kaiser efektin tutkiminen	Kei Kurita	1979	/20/
laatta	hiekkakivi	taivutus	2 - 20 300 - 1000	1-aks.pur. aiheutuvan ME:n tutkiminen	M. Suzuki	1978	/38/

Laboratoriokokeiden vaikeutena on hyvän kuormituslaitteiston rakentaminen. Kuormituslaitteisto ei saa itse aiheuttaa mekaanisia tai sähköisiä häiriöitä, jotka tulkittaisiin mikro-seismiseksi emissioksi. Tutkittaessa emissioiden taajuus-sisältöä vaaditaan lisäksi, että kuormituslaitteiston mekaaninen taajuusvaste on mahdollisimman tasainen tutkittavalla taajuusalueella. Edellämainittujen puutteiden takia, varsinkin aiemmissa tutkimuksissa, on esitetty tuloksia, jotka riippuvat enemmän käytetystä monitorointilaitteistosta kuin tutkittavan näytteen ominaisuuksista. Vain harvat tutkijat esittävät käyttämänsä laitteiston tarkat ominaisuudet, vaikka ne olisivat tulosten vertailukelpoisuuden kannalta tärkeitä /8/.

### 3.3.1 Mikroseismisen emission syntymekanismit

Geologisissa materiaaleissa mikroseisminen emissio syntyy muodonmuutosenergian äkillisessä vapautumisessa. Kalliossa olevassa kolmiakσιαalisessa jännityskentässä muodonmuutosenergia voidaan kuvata seuraavalla tavalla:

Kolmiakσιαalinen jännityskenttä muodostuu kahdesta osasta, isotrooppisesta hydrostaattisesta paineesta, yhtälö (3) ja deviatorisesta komponentista, yhtälö (4) /33/.

$$\sigma_0 = 1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4)$$

Hydrostaattisessa paineessa kallion tilavuus voi muuttua ja vastaava muodonmuutosenergian muutos on

$$E_0 = \frac{3}{2} \frac{(1 - \nu)}{E} \sigma_0^2 \quad (5)$$

Deviatoriseen jännitykseen suhteessa oleva muodonmuutosenergia on

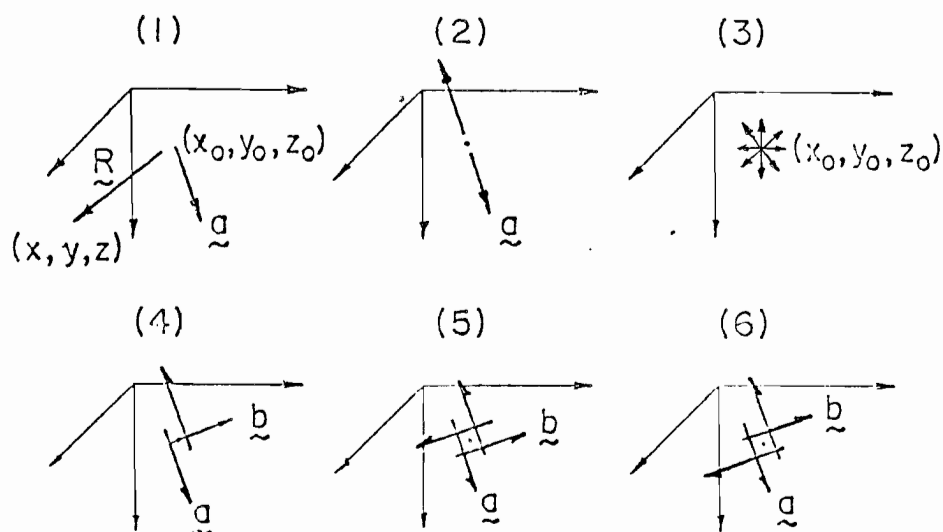
$$E_1 = \frac{1 + \nu}{E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (6)$$

Näin ollen kallioon varastoituneen muodonmuutosenergian kokonaismäärä on

$$E_{Tot} = E_0 + E_1 \quad (7)$$

Akustisten signaalien lähteitä on lukuisia. Yksittäisessä kiteessä pistemäisen, viivamaisen tai pintavirheen syntyyn tai häviämiseen liittyy jännitysaaltojen säteilyä. Monikiteisissä materiaaleissa vioittuneen kohdan säteily muuntuu moninkertaiseksi hajonnaksi. AE:n lähteitä ovat lisäksi dislokaatioliikkeet, raepintojen liukuminen, kaksoiskiteen muodostuminen ja faasimuutokset. Makroskooppisessa mittakaavassa huomattavimmat akustisen emission lähteet ovat rakojen muodostuminen ja kasvaminen, plastinen muodonmuutos sekä onteloiden ja huokosten sortuminen. Kerroksellisissa rakenteissa pääasiallisin akustisen emission lähde on eri kerrosten liike toistensa suhteen /29/.

Tutkittaessa yksittäistä kidettä siihen syntyviä pistemäisiä virheitä voidaan kuvata kuvan 5 mukaisilla mekanismeilla.



Kuva 5. Kiteen virheen syntymekanismit /29/.

$R$  = poikkeama

$\tilde{a} = \tilde{b}$  = yksikkövektori voiman suuntaan

$x_0, y_0, z_0$  = tarkasteltavan pisteen alkuperäinen asema

$x, y, z$  = tarkasteltavan pisteen asema muutoksen jälkeen.

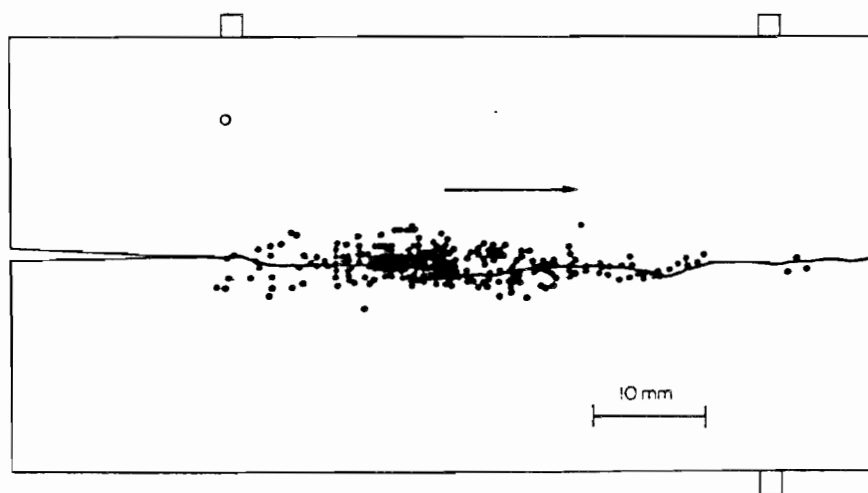
Kuvassa 5 olevat syntymekanismit ovat seuraavat: (1) keskittynyt voima, (2) kaksoisvoima ilman momenttia, (3) laajenemiskeskus, (4) voimapari ja momentti, (5) kiertokeskus ja momentti, (6) kaksi voimaparia ilman momenttia. Edellämainittujen AE:n

syntymekanismien luettelo ei ole täydellinen. Akustinen emissio on yleensä yhden tai useamman syntymekanismin yhdistelmä. Esimerkiksi raon avautumista kuvataan kohtisuoraan syntyvää rakoa vastaan olevalla kaksoisvoimalla tai kaksoisvoiman ja laajenemiskeskuksen yhdistelmällä. Edellämainittujen AE:n syntymekanismien tarkka matemaattinen käsittely on esitetty viitteessä 1.

Mikroseismissen emission lähteitä tutkittaessa ei ole oleellista löytää kaikkia mahdollisia lähteitä, vaan muutama tärkein. Jännitysvenymämittausten perusteella on löydetty kolme mikroseismissä emissiota aiheuttavaa mikroskooppista perusmekanismia /20/. Nämä ovat:

1. Mineraalien aineosien plastinen muodonmuutos johtuen dislokaatioliikkeistä kuten liukumisesta ja nousemisesta.
2. Liukuminen aiemmin syntyneitä rakopintaa pitkin.
3. Yhtäkkäinen raon kasvaminen.

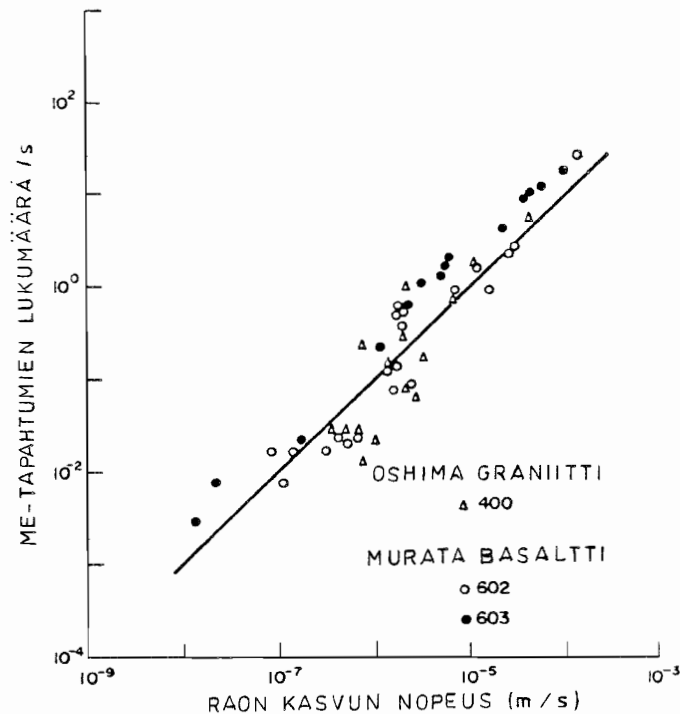
Laboratoriokokeissa monet tutkijat ovat havainneet mikroseismissen emission lähteiden keskittyvän kasvavan raon läheisyyteen /8, 36/. Kuvassa 6 on esitetty laattamaisessa koekappaleessa syntyvän raon ympärille keskittyneet ME:n lähteet. Kuormituksena on vääntö.



Kuva 6. ME:n lähteet syntyvän raon ympärillä, koemateriaali Oshiman graniitti /36/.

- anturi, o kuvaa mittausjärjestelmän erotuskykyä,  
→ raon kasvun suunta.

Kuvassa 6 ME:n lähteiden hajonta on suuri kappaleen vasemmalla puolella. Tämän ilmiön voidaan sanoa johtuvan antureiden sijainnista. Kun tämä otetaan huomioon, voidaan sanoa, että ME:n lähteet sijaitsevat rakopinnan läheisyydessä. Kuvassa 7 on esitetty edellisen kokeen perusteella saatu yhteys raon kasvun nopeuden ja ME-tapahtumien välillä.



Kuva 7. Raon kasvun nopeuden ja ME-tapahtumien välinen yhteys laboratoriokokeessa /36/.

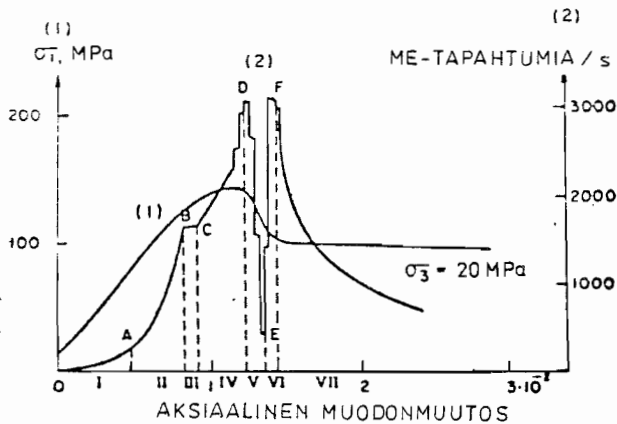
Mogi /26/ on lisäksi osoittanut, että mikroseisminen emissio riippuu materiaalin heterogeenisyydestä.

### 3.3.2 Puristuksen vaikutus mikroseismiseen emissioon

Mikroseismisen emission tutkimuksia on jo hyvin varhain tehty puristamalla kiviä yksiaksiaalisella puristuksella. Tutkimuksissa on pyritty löytämään yhteys jännityksen, muodonmuutoksen ja mikroseismisen aktiivisuuden välillä. Obert ja Duvall pystyivät ja varhain osoittamaan, että mikroseisminen aktiivisuus kasvoi huomattavasti näytteen jännityksen kasvaessa. Tuolloin havaittiin, että mikroseismistä emissiota ilmeni jo kuormituksella, joka oli 10 - 20 % näytteen murtokuormasta /8/. Nykyisistä laboratoriokokeista suurin osa on tehty

kuormittamalla kivinäytteitä kolmiakσιαalisesti. Kokeissa on havaittu, että mikroseisminen aktiivisuus on kasvanut huomattavasti, kun kuormitus on ollut 90 % murtokuormasta /7/.

Aiemmin tehdyissä kokeissa (Mogi 1962, Barron 1971) havaittiin, että mikroseismistä emissiota ei ilmennyt näytteen kimmoisen muodonmuutoksen alueella. Tämä johtui matalataajuisten antureiden käytöstä. Nykyiset tutkimukset taajuusalueilla 100 - 300 kHz ovat osoittaneet, että myös näytteen kimmoisen muodonmuutoksen alueella mikroseisminen aktiivisuus kasvaa lineaarisesti ja nopeasti /31/.



Kuva 8. Hiekkakivelle tehty kolmiakσιαalikoe /31/.

- (1) jännitys-muodonmuutoskäyrä,  
 (2) mikroseisminen emissiotaajuus-muodonmuutoskäyrä,  
 $\sigma_1$  = aksiaalinen jännitys,  $\sigma_3$  = sellipaine.

Kuvassa 8 näytteen kimmoisen muodonmuutoksen alue on II (AB). Mikroseisminen aktiivisuus kimmoisella alueella voi johtua lyhyiden pystysuorien mikrorakojen muodostumisesta näytteessä alunperin esiintyvien rakojen seinämiin /31/. Kuvassa 8 on esitetty tyypillinen kairasydännäytteelle tehty kolmiakσιαalinen koe. Näytteen ympärillä on sellipaine  $\sigma_3$  ollut 20 MPa. Aksiaalisen jännityksen suuruutta on lisätty ja suhteellinen muodonmuutos sekä mikroseisminen aktiivisuus on mitattu. Mikroseismissen emissiotaajuuden käyrä voidaan kuvassa 8 jakaa seitsemään alueeseen. Mikroseisminen emissiotaajuus (NR) on häviävän pieni alueessa I (OA) ja kasvaa lineaarisesti alueessa II (AB). Alueessa III (BC) NR pysyy vakiona tai kasvaa

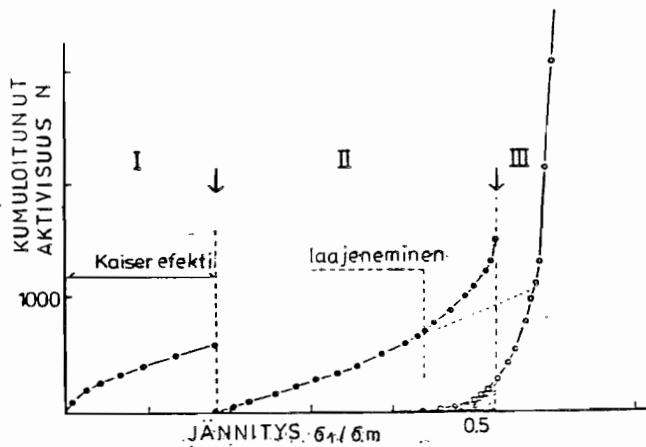
hieman. Yksiaksiaalisessa kokeessa sekä kolmiaksiaalikokeessa alhaisilla sellipaineilla alue III jää kokonaan pois. Alue III aiheutuu todennäköisesti siitä, että paikallinen jännityshuippu aiheuttaa plastisten vyöhykkeiden muodostumisen jo aiemmin syntyneiden rakojen päihin. Plastiset alueet kasvavat muodonmuutoksen jatkuessa raepintoja pitkin. Tämän muodonmuutoksen alueella ei tapahdu purkaustyyppistä mikroseismistä emissiota, joten mikroseisminen emissiotaajuus ei lisääny, vaan pysyy vakiona alueessa III. Muodonmuutoksen jatkuessa plastisissa vyöhykkeissä saattaa esiintyä suuria jännityseroja ja raot alkavat laajeta plastisiin vyöhykkeisiin. Tällöin mikroseisminen aktiivisuus kasvaa nopeasti (alue IV CD). Alueen IV huippuarvo D vastaa jännitys-muodonmuutoskäyrän murtojännitystä  $\sigma_m$ . NR:n nopea väheneminen alueessa V (DE) aiheutuu näytteen murtumisesta. Alueessa VI (EF) tapahtuu NR:n äkillinen nousu huippuarvoon F, joka on näytteen murtumisen jälkeisellä alueella. Alueessa VII NR laskee nopeasti, kun näytteen murtopinnat liukuvat toistensa suhteen. Huippuarvo F vastaa näytteen murtopintojen liukumisen alkamista /7, 31/.

### 3.3.3 Kaiser-efekti

Kaiser tutki 1930-luvulla metalleihin liittyvää akustista emissiota. Hän havaitsi, että akustista emissiota esiintyi peräkkäisissä kuormituksissa hyvin vähän ennen kuin edellisen kuormituskerran jännitystaso oli saavutettu /44/. Ilmiötä kutsutaan nykyään Kaiser-efektiksi. Jos Kaiser-efekti ilmeneisi myös kalliassa, se saattaisi olla käyttökelpoinen menetelmä kallion jännityshistorian arvioimiseen. Japanilaiset Kurita ja Fujii ovat tutkineet Kaiser-efektiä graniittinäytteellä käyttäen yksiakselista puristusta. Kuvassa 9 on esitetty koetulos, jossa Kaiser-efekti ilmenee selvästi kahden ensimmäisen kuormituskerran kesken.

Jännityksen lähestyessä näytteen murtojännitystä mikroseisminä emissiota ilmenee jo ennen kuin edellisen kuormituksen maksimijännitys on saavutettu. Kuormituskertojen välejä harvennettaessa havaittiin, että Kaiser-efekti ilmeni riippumatta siitä, oliko kuormituskertojen väli 10 minuuttia tai yksi kuukausi. Sen sijaan, kun kahden ensimmäisen kuormituskerran jälkeen koe tehtiin märällä näytteellä, ei Kaiser-efektiä ilmennyt.





Kuva 9. Kumuloitunut aktiivisuus-jännityskäyrä kolmessa peräkkäisessä kuormituksessa, kuormituskertojen väli 10 min /20/.

$\sigma_1$  = aksiaalinen jännitys,  $\sigma_m$  = murtojännitys.

Kaiser-efektrin on arveltu johtuvan kimmoisella alueella alunperin esiintyvän raon tai muodostuvan raon kasvamisesta tiettyyn jännityksestä riippuvaan pituuteen. Kun jännitys poistuu, rako painuu kasaan, mutta ei häviä kokonaan. Raon kasvu jatkuu (ts. mikroseismistä emissiota esiintyy) vasta kun jännitys on suurempi kuin edellisellä kuormituskerralla.

Vaikka Kaiser-efekti on havaittu laboratorionäytteissä, ei saatuja tuloksia voida vielä soveltaa kenttätutkimuksiin. Tämä johtuu siitä, että kentällä vallitsevia tarkkoja fyysisiä ominaisuuksia ei pystytä määrittämään. Lisätutkimuksia on vielä aihetta tehdä Kaiser-efektin soveltamiseksi käytäntöön /20/.

### 3.3.4 Lämpötilan vaikutus mikroseismiseen emissioon

Lämpötilasta aiheutuvan rakoilun tutkiminen on tullut ajankohtaiseksi. Nykyisin suunnitellaan maankuoren lämmön hyväksikäyttöä, syviä kaivoksia ja maanalaisia säiliöitä ydinjätteille. Laboratoriotutkimuksissa on pyritty selvittämään lämpötilasta aiheutuvan rakoilun suhdetta mikroseismiseen aktiivisuuteen. Yhdysvalloissa tehtiin tutkimus, jossa graniittinäytettä kuumennettiin /44/. Tällöin havaittiin mikroseismisen aktiivisuuden kasvavan lähes lineaarisesti lämpötilan

nousun suhteen. Riippumatta lämpötilan lisäämisnopeudesta mikroseismistä aktiivisuutta alkoi esiintyä lämpötiloissa 60 - 70 °C. Kyseinen lämpötila aiheutti näytteeseen jännityseron, joka vastasi näytteen vetolujuuden arvoa.

Toistuvilla lämmityskerroilla havaittiin termisen Kaiser-efektin esiintyminen. Mikroseismistä aktiivisuutta ei ilmennyt ennen kuin edellisen lämmityskerran maksimilämpötila oli saavutettu.

Yhteenvedona tutkimuksesta voidaan sanoa, että mitä suurempi on lämpötilan nousu, sitä suurempi on raon kasvun nopeus ja sitä suurempi on myös mikroseisminen aktiivisuus /44/.

### 3.3.5 Mikroseismisten emissiotapahtumien amplitudijakauma

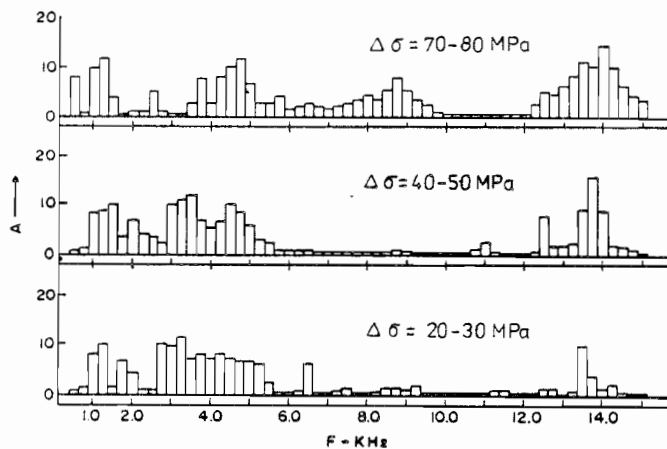
Geologisissa materiaaleissa havaitun mikroseismisen emission amplitudi vaihtelee huomattavasti. ME-tapahtumalle on tyypillistä pulssin amplitudin asteettainen vaimeneminen (kuva 10).



Kuva 10. Mikroseisminen emissiotapahtuma, kuormittava jännitys 48 % murtojännityksestä /19/.

Tutkimuksissa on havaittu, että jännitystason kasvaessa suurin osa ME-tapahtumista on suuriamplitudisia (kuva 11) /9/. Lisäksi on havaittu, että juuri ennen murtumaa suuriamplitudisten emissioiden määrä kasvaa merkittävästi /33/.

Tutkimuksissa ei ole havaittu minkään tietyn ME:n syntymekanismin aiheuttavan erityisesti suuriamplitudisia emissioita. Sen sijaan epäillään suuriamplitudisten emissioiden aiheuttavan erilaisista ME:n syntymekanismeista /8/.



Kuva 11. Kuivan Tennesseeen hiekkakiven amplitudijakauma eri jännitysalueilla /9/.

$A$  = keskimääräinen amplitudi

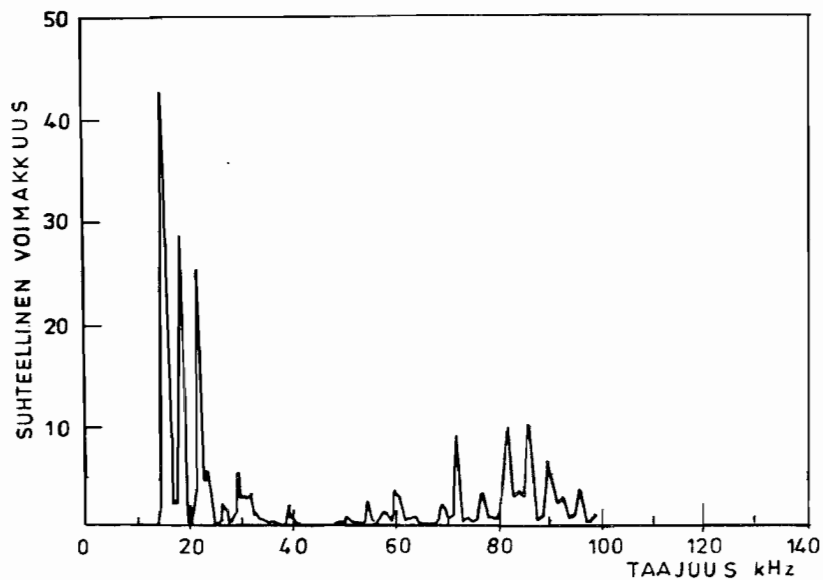
$F$  = taajuus

$\Delta\sigma$  = jännitysalue

Amplitudijakauman analysointi on hyvä menetelmä havaittujen emissioiden tutkimisessa ja sen avulla voidaan saada tietoa, jota muilla menetelmillä ei saada /27/. Esimerkiksi U.S. Bureau of Mines'issa tehdyn tutkimuksen mukaan havaittiin ME:n amplitudijakauman mittaaminen paremmaksi ennustemenetelmäksi hiilikaivoksien katon sortumista ennustettaessa kuin ME-tapah- tumien lukumäärän laskeminen /4/. Kyseisen tutkimuksen mukaan amplitudin kestoaika tietyn kynnyksen yläpuolella on toden- näköisesti suhteessa katosta sortuvan kivimäärän tilavuuteen.

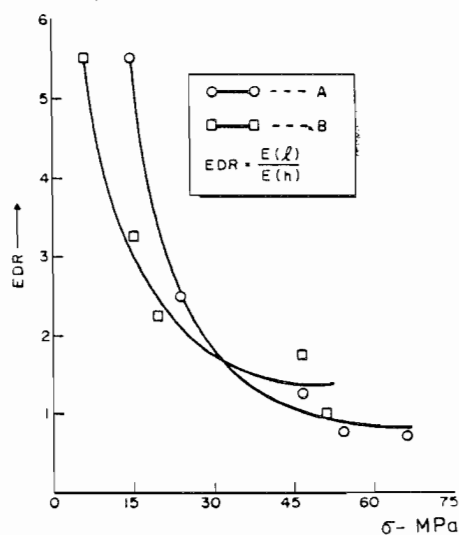
### 3.3.6 Mikroiseismisten emissiotapahtumien taajuussisältö

Useat tutkijat ovat tutkineet mikroiseismisen emission taajuus- sisällön yhteyttä muihin fysikaalisiin ominaisuuksiin. Tutki- muksissa mikroiseisminen emissio on havaittu laajakaistaiseksi ilmiöksi. Geologisissa materiaaleissa akustisen emission on havaittu olevan matalampitaajuisia kuin muissa materiaaleissa /19/. Kuvassa 12 on esitetty kivihiilinäytteelle keskimääräi- sellä kuormituksella saatu taajuusspektri.



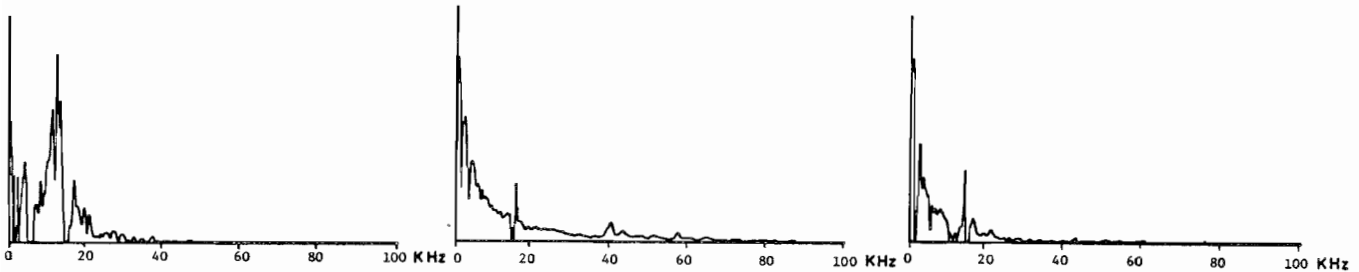
Kuva 12. Kivihiilen taajuusspektri, kuormitus 50 % murtokuormasta /25/.

Kuvasta 12 havaitaan selvästi, että mikroseismistä emissiota ilmenee erityisen paljon tietyillä taajuusalueilla ja toisilla tuskin yhtään /9, 25/. Ilmiö on riippumaton kivilajista (kts. kuvat 11 ja 14). Useiden tutkimusten perusteella vaikuttaa siltä, että suurin osa mikroseismisestä emissiosta esiintyy taajuusalueella 15 - 30 kHz /9, 19, 25/. Hardy on tutkinut kuormituksen vaikutusta mikroseismisen emission taajuuteen energiajakaumasuhteen avulla (EDR) (kuva 13).



Kuva 13. Energiajakaumasuhde EDR Tennesseeen hiekkakivelle kuormittavan jännityksen kasvaessa /9/.  
A = kuiva näyte, B = märkä näyte, E (l) = ME:n energia taajuudella 500 - 5000 Hz, E (h) = ME:n energia taajuudella 10250 - 15000 Hz.

Tutkimuksissa havaittiin, että kuormituksen kasvaessa EDR pieneni. Tämän voisi ajatella johtuvan siitä, että kuormituksen kasvaessa mikroseismisessä emissiossa suurten taajuuksien osuus lisääntyy. Kuitenkin, koska ME:n energia on amplitudin neliö, voidaan sanoa, että kyseinen tutkimustulos vahvistaa suuriamplitudisten emissioiden lisääntymisen kuormituksen kasvaessa. Myöhemmissä tutkimuksissa on päinvastoin havaittu, että kuormituksen kasvaessa mikroseismisen emissioon taajuus siirtyy matalien taajuuksien suuntaan. Kuvassa 14 on esitetty graniitti-gneissi näytteelle mitattu taajuusspektri. Kuormituksina on käytetty 14 %, 48 % ja 97 % näytteen murtojännityksestä.



Kuva 14. Graniitti-gneissi näytteen taajuusspektri, kuormittava jännitys 14 %, 48 % ja 97 % murtojännityksestä /19/.

Kuvasta 14 havaitaan selvästi taajuuksien siirtyminen kuormituksen kasvaessa.

Aiempien tutkimusten perusteella ei taajuusspektriä pidetty menestyksekkäänä mikroseismisen emission kuvaajana /9/. Nykyisten tutkimusten mukaan ME:n taajuuden muuttuminen saattaa olla luotettavampi enne murtumisesta kuin yleisesti käytetty ME-tapahtumien lukumäärän laskeminen /25/. Kuitenkaan tutkimuksissa ei ole onnistuttu erottamaan eri ME:n syntymekanismeja toisistaan taajuusspektrin perusteella. Tämä johtuu siitä, että taajuusspektri riippuu myös käytetyn anturin ominaisuuksista /29/.

### 3.4 Kenttätutkimukset

Mikroseismisen emission kenttätutkimuksia on tehty pääasiassa malmi- ja hiilikaivoksissa, mutta myös kalliosäiliöissä. Kaikkien tutkimusten tarkoituksena on ollut tietyn alueen stabiilisuuden valvonta. Aiemmin malmikaivoksissa tutkittiin mikroseismistä emissiota matalilla taajuuksilla (20 - 50 Hz). Monitorointilaitteistot olivat taajuusalueeltaan kapeakaistaisia. Nykyisissä tutkimuksissa mikroseismistä emissiota on mitattu korkeilla taajuuksilla ja laajakaistaisilla monitorointilaitteistoilla. Tutkimuksissa on osoitettu, että laajakaistaisilla monitorointilaitteistoilla saadaan enemmän tietoa mikroseismisestä emissiosta kuin kapeakaistaisilla monitorointilaitteistoilla /10/.

Hiilikaivoksissa mikroseismistä emissiota on mitattu joko matalilla taajuuksilla (0 - 1000 Hz) tai korkeilla taajuuksilla (36 - 44 kHz). Monitorointilaitteistot ovat myös hiilikaivoksissa olleet yleensä kapeakaistaisia /10, 14/.

Rakennusteknisen kalliorakentamisen alalta esimerkkinä mikroseismisen emission kenttätutkimuksista voidaan mainita Hardyn suorittamat maanalaiseen kaasusäiliöön liittyvät mittaukset. Myös näissä mittauksissa mitattava taajuusalue on ollut 0 - 1000 Hz /12/.

#### 3.4.1 Mikroseismisen emission eteneminen

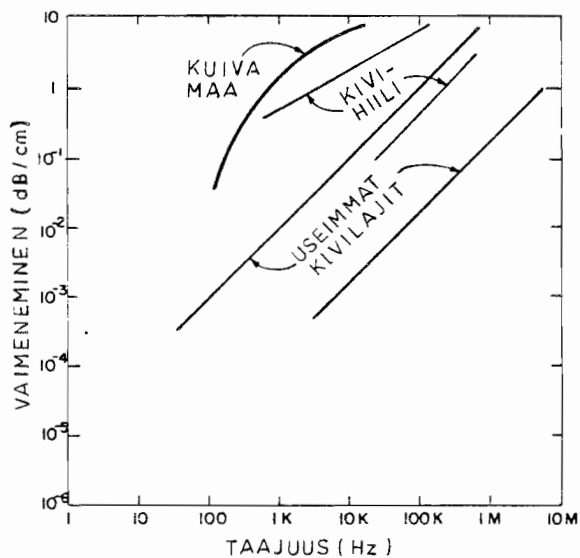
Mikroseisminen emissio etenee syntypaikastaan joka suuntaan kimmoisena palloaaltona. Kimmoinen aalto muodostuu useista aaltolajeista, joilla on erilaiset etenemisnopeudet (kuva 15) /5/.

Mikroseismisen emission havaitsemiseen käytetty anturi ei pysty erottamaan eri aaltolajeja toisistaan vaan havaitsee ne yhtenä venyneenä signaalina. Tämä johtuu aaltojen eri kulkunopeuksista ja vaimenemisesta /27/.

Partikkelin liike	Kulku-suunta	Aaltolaji	Suhteellinen nopeus
		Pitkittäinen tai paine	Nopein $V_L = 1$
		Leikkaus	Hitaampi $V_S = 0,6 V_L$
		Pinta	Hitain $V_R = 0,5 V_L$
		Ohjatut aallot	Molemmat vaiheet ja yhteisnopeudet vaihtelevat

Kuva 15. Mikroiseismisen emission eri aaltolajit /5/.

Kuvassa 16 on esitetty eri taajuuksien emissioiden vaimeneminen muutamissa materiaaleissa /19/.



Kuva 16. Mikroiseismisen emission signaalien vaimeneminen kalliossa ja maassa /19/.

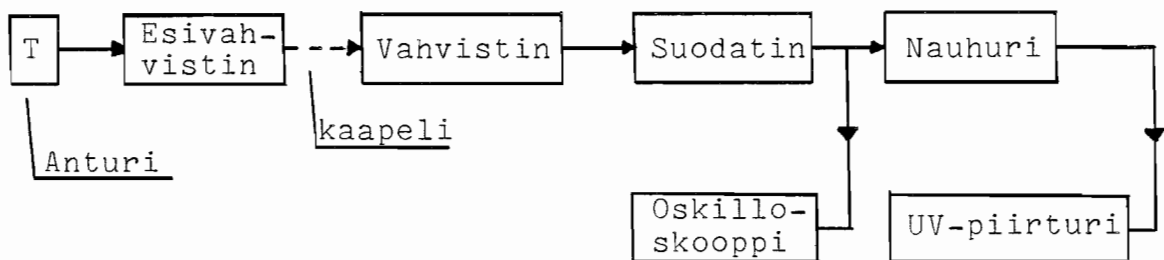
Kuvasta 16 havaitaan, että korkeataajuiset emissiot vaimenevat eniten. Tällöin matalataajuiset emissiot kulkevat pitemmälle kuin korkeataajuiset. Tämän vuoksi maan päältä suoritetuissa mikroiseismisissä mittauksissa käytetään matalataajuisia antureita (0 - 1000 Hz). Hardy on tutkimuksissaan havainnut, että 600 - 900 m etäisyydellä voidaan havaita 5 - 40 Hz taajuisia

ME-tapahtumia. Matalien taajuuksien mittaamisen huonona puolella on lukuisten häiriöäänien sattuminen mitattavalle taajuusalueelle.

Maanalaisissa mikroseismisissä mittauksissa signaalin vaimeneminen ei ole ongelma /19/. Yleensä anturit voidaan sijoittaa lähelle tutkittavaa aluetta. Tällöin mittauksia voidaan tehdä korkealla taajuusalueella. Korkeiden taajuuksien (esim. 36 - 55 kHz) käytön etuna on myös se, että mitattava taajuusalue on useiden häiriötaajuuksien yläpuolella /14/.

### 3.4.2 Mikroseismisen emission monitorointi

Toimintaperiaatteeltaan eri mikroseismisen emission monitorointijärjestelmät ovat samanlaisia. Anturi muuttaa mekaanisen liikkeen sähköiseksi signaaliksi, joka vahvistetaan esivahvistimessa. Esivahvistin on yleensä anturin välittömässä läheisyydessä. Tämän jälkeen sähköinen signaali kulkee kaapelia pitkin varsinaiseen monitorointilaitteistoon. Siinä signaali vahvistetaan, suodatetaan ja rekisteröidään monikanavaiselle nauhurille. Laitteistossa voi myös olla oskilloskooppi signaalin visuaaliseen tarkasteluun. Magneettinauhalla olevat rekisteröinnit voidaan myös tulostaa UV-piirturilla /12/. Kuvassa 17 on esitetty yksinkertaistettu lohkokaavio tyypillisestä mikroseismisen emission monitorointijärjestelmästä.



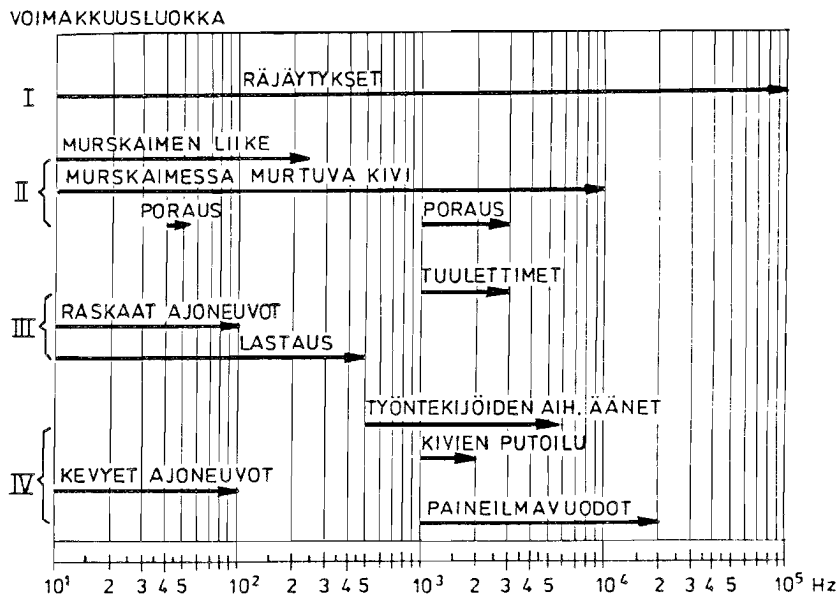
Kuva 17. Yksinkertaistettu lohkokaaviokuva kentällä käytetystä tyypillisestä ME:n monitorointijärjestelmästä /12/.

Monitorointijärjestelmän anturit sisältävät yleensä pietso-sähköisen kiteen (esim. hydrofoni). Nykyisin ei enää paljoakaan käytetä mekaanisia antureita (ns. geofoneja) /19/.



Käyttökohteesta riippuen anturit ovat joko kapea- tai laaja-kaistaisia. Maan päältä suoritetuissa mittauksissa anturit asennetaan poranreiän pohjalle ja poranreikään valutetaan sementtiä tai hiekkaa. Maanalaisissa mittauksissa anturi kiinnitetään suoraan kalliopintaan tai työnnetään poratun reiän pohjalle /12/.

Mikroseismissen emission taajuus geologisissa materiaaleissa on yleensä 100 - 50 000 Hz /19/. Varsinkin tämän alueen matalataajuiselle osalle sattuvat myös useat häiriötaajuudet. Kuvassa 18 on esitetty tyypillisten häiriölähteiden taajuudet kaivoksessa.



Kuva 18. Mekaanisten häiriölähteiden taajuudet kaivoksessa /27/.

Häiriöiden vaikutusta voidaan vähentää seuraavilla tavoilla /19/:

Taajuuden suodatus, rekisteröidään vain valitut komponentit tulevasta signaalista.

Erottelu pulssin nousuajan perusteella, ME:n pulsseilla on lyhyt nousuaika, häiriöiden pulsseilla on pitkä nousuaika. Rekisteröidään vain nopeasti nousevat pulssit.

Paikallinen suodatus, jos tiedetään häiriölähteen paikka, voidaan monikanavaisilla laitteilla hylätä häiriölähteestä päin tulevat signaalit.

Akustinen suojaus, esimerkiksi poranreiän, jossa anturi sijaitsee, suun suojaus estää ilmassa kulkevien häiriöäänien pääsyn anturiin.

Kaupallisten mikroseismisen emission monitorointijärjestelmien valmistajia on monia. Useimmat valmistajat ovat yhdysvaltalaisia. Taulukossa 2 on esitetty muutamia yhdysvaltalaisia ME:n monitorointijärjestelmien valmistajia, joiden laitteet on suunniteltu erityisesti geotekniseen työhön /19/.

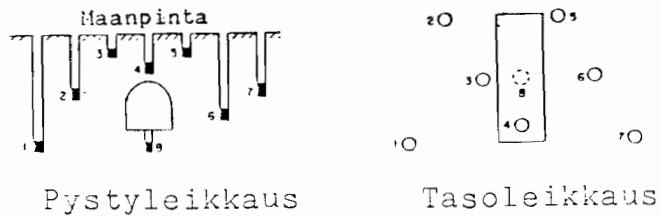
Taulukko 2. Geotekniseen työhön suunniteltujen ME:n monitorointijärjestelmien valmistajia USA:ssa (v. 1981) /19/.

YHTIÖ	TOIMIPAIKKA
Acoustic Emission Technology Corporation	Sacramento, California
Dunegan/Endevco	San Juan Capistrano, California
Walter Nold Company	Natick, Massachusetts
Physical Acoustics Corporation	Princeton, New Jersey
Slope Indicator Company	Seattle, Washington
Weston Geophysical Corporation	Westboro, Massachusetts

### 3.4.3 Mikroseismisen emission lähteiden paikantaminen

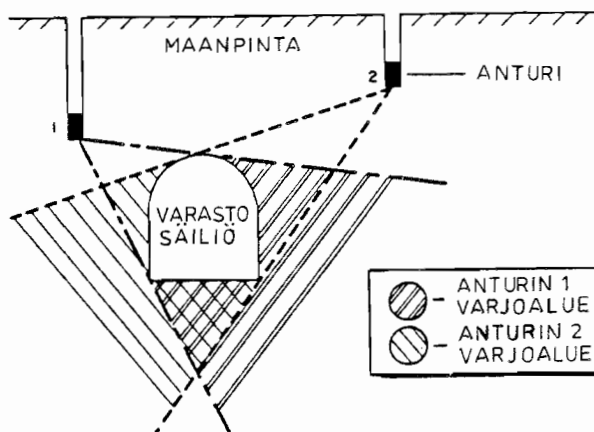
Mikroseismisen tarkkailun hyväksikäytön vuoksi on tärkeää pystyä määrittämään myös emission syntypaikka. Paikantamismenetelmä perustuu samojen kimmoisten aaltojen kulkemiseen eri vastaanottoantureille eri ajoissa ja signaalin etenemisnopeuden mittaamiseen kalliassa. Mikroseismisen emission monitoroinnissa joudutaan tällöin käyttämään myös monikanavaista nauhuria.

Yksittäisten ME-tapahtumien syntypaikkojen määrittäminen on mahdollista vain, jos anturit on sijoitettu oikein. Toisin sanoen anturien paikat on suunniteltava siten, että ne kattavat tarkkailtavan alueen sekä vertikaali- että horisontaalitasossa (kuva 19).



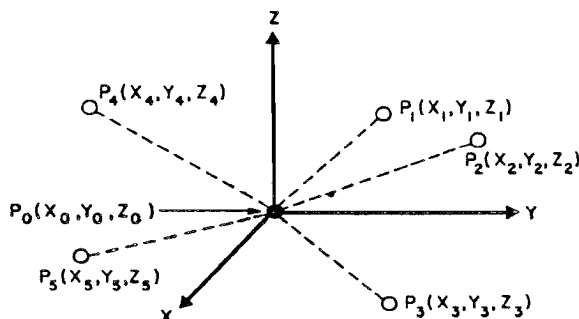
Kuva 19. ME:n antureiden menestyksekkäs sijoitus sekä vertikaali- että horisontaalitasossa kalliosäiliön ympärillä /13/. ■ Anturi

Horisontaalitasossa olevan ME-lähteen paikan määrittämiseen tarvitaan vähintään neljä anturia (ME-lähteen paikan syvyys jää määrittämättä). ME-lähteen kolmidimensionaalisen paikan määrittämiseen tarvitaan vähintään viisi anturia. Kuitenkin on syytä asentaa antureita enemmän kuin vähimmäismäärä, sillä tutkittava kalliotila estää ME-signaalien tulon jokaiseen anturiin. Kuvassa 20 on esitetty kalliosäiliön aiheuttamat varjoalueet.



Kuva 20. Kalliosäiliön aiheuttamat varjoalueet antureille 1 ja 2 /13/.

Kuvassa 21 on esitetty antureiden sijoittuminen ME-lähteen ympärille.



Kuva 21. Antureiden sijoittuminen ME-lähteen ympärille /13/.

$P_0$  = ME-lähteen paikka

$P_1 - P_5$  = anturien paikat

Mikroseismisen emission lähteestä ( $P_0$ ) saapuvat signaalit voidaan havaita antureissa  $P_1, P_2, P_3, P_4$  ja  $P_5$  eri aikoina. Kun lisäksi mitataan signaalin kulkemisnopeus voidaan yhtälön (8) avulla laskea  $P_0$ :n koordinaatit /13/.

$$(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2 = V_i^2 (t_i - T_0)^2 \quad (8)$$

Yhtälössä (8)  $X_0, Y_0$  ja  $Z_0$  ovat ME-lähteen koordinaatit.  $X_i, Y_i$  ja  $Z_i$  ovat antureiden koordinaatit,  $t_i$  on signaalin saapumisaika anturiin,  $V_i$  on signaalin nopeus kalliassa ( $i = 1 \dots n$ ) ja  $T_0$  on ME-tapahtuman syntyajankohta. Koska yhtälössä (8) ovat tuntemattomia  $X_0, Y_0, Z_0$  ja  $T_0$ , vaaditaan niiden ratkaisemiseksi vähintään neljä yhtälöä, ts. mittauksissa vähintään neljä anturia. Jotta ME-lähteen paikka pystyttäisiin määrittämään kohtuullisen tarkasti, tarvitaan vähintään viisi yhtälöä eli vähintään viisi anturia mittauksissa. Yhtälön (8) ratkaisu perustuu pienimmän neliösumman iterointiin tietokoneen avulla. Menetelmän tarkkuus riippuu siitä, kuinka tarkasti antureiden koordinaatit ja ME-signaalin etenemisnopeudet eri suuntiin voidaan mitata. Tämän vuoksi paikan määrittämisen tarkkuus on sitä parempi mitä enemmän antureita käytetään /13/.

#### 3.4.4 Esimerkkejä kenttätutkimuksista

Suomessa mikroseismistä tarkkailua on suorittanut ja tutkinut prof. Maijala /23/. Toimiessaan 1950-luvulla Outokumpu Oy:n

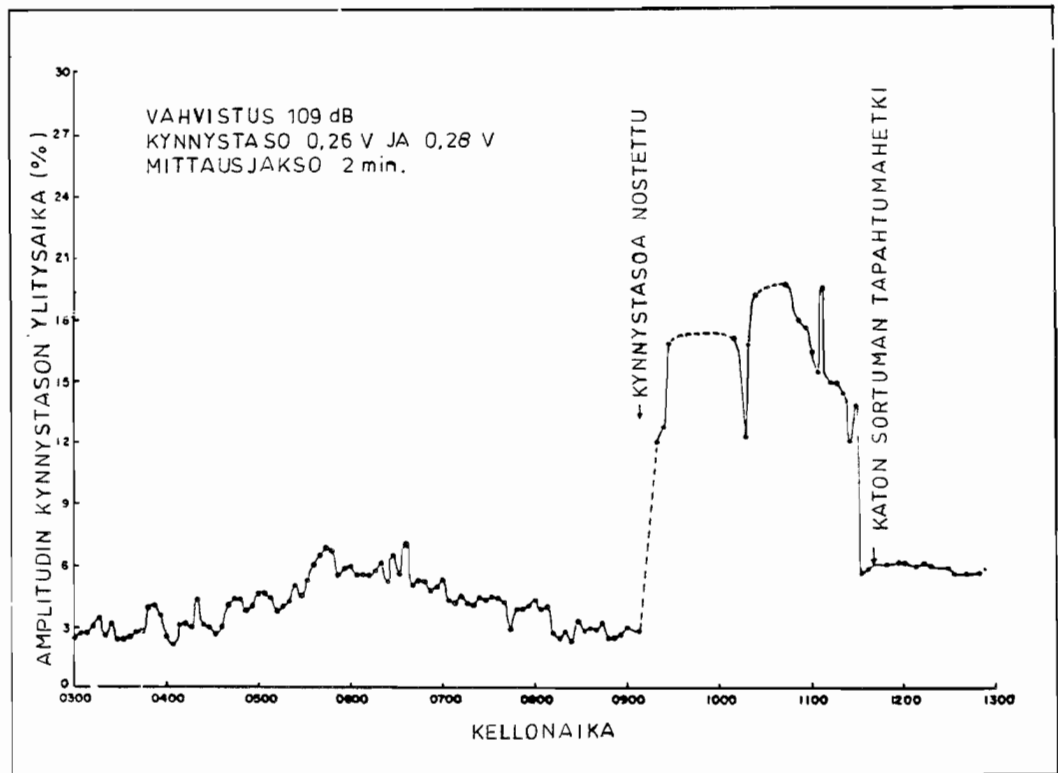
turvallisuusinsinöörinä hän aloitti mikroseismisen tarkkailun useissa eri kaivoksissa yksikanavaisella korvakuulokkeilla varustetulla mikroseismisellä laitteella. Hän sai hyviä kokemuksia tästä yksinkertaisimmasta mikroseismisestä laitteesta monissa stabiilisuuden arviointitapauksissa.

Vuonna 1967 Outokumpu Oy hankki ruotsalaiselta Adelta Ab:lta kaksi automaattista mikroseismistä laitetta. Laite on monikanavainen, maksimi yhdeksän kanavaa. Näillä laitteilla jatkettiin mikroseismistä tarkkailua monilla kaivoksilla.

Esimerkkinä on Outokumpu Oy:n Kotalahden kaivoksella suoritettu pystypilarin louhinta. Huhtijärven malmion louhinta aloitettiin maan alta ja sen jälkeen yläosa louhittiin avolouhintana. Malmion välille jäi tällöin pystypilari tukemaan tämän paikoitellen lähes 100 m pitkän louhoksen pystyseiniä. Mikroseismisiä kallioääniä havaittiin runsaasti noin 200 kpl/5 min (vahvistus 37 dB). Mittausten perusteella pääteltiin, että kyseinen pilari oli rasituksen alaisena. Pilarin louhinta siinä vaiheessa olisi saattanut johtaa louhoksen seinämien murtumiseen. Myöhemmissä mittauksissa havaittiin mikroseismisten kallioäänien loppuneen lähes kokonaan. Pilari oli rikkoutunut ja siinä oli silmin havaittavia rakoja. Mikroseismisen mittauksen perusteella pääteltiin, että pilari ei enää ollut paineen vaikutuksen alaisena. Pilarilouhinta aloitettiin syksyllä 1969 ja se onnistui hyvin /32/.

Yhdysvalloissa tehtiin 1970-luvun puolessa välissä laaja tutkimus U.S. Steel Corporation Genevan hiilikaivoksissa. Tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää mikroseisminen laite varoitamaan katon sortumisesta. Tutkimuksissa käytettiin kahta mikroseismistä laitetta. Toinen laitteisto mittasi määrätyn kynnystason ylittävien amplitudien ylitysaikaa ja toinen laitteisto mittasi mikroseismistä emissiotaajuutta. Molemmissa laitteissa mittausjaksot olivat 1, 2, 3, 4 ja 5 minuuttia ja mitattava taajuus 36 - 65 kHz. Erään mittausjakson aikana katto sortui.

Kuvassa 22 on esitetty mikroseismisen mittauksen tulos sortuman tapahtumapäivänä.



Kuva 22. Mikroseismisen mittauksen tulos, Genevan hiilikaivos, East Carbon Utah 13.11.1975 /4/.

Kuvasta 22 havaitaan, että amplitudin kynnyksen ylitysaika prosentteina kasvoi huomattavasti jo kaksi tuntia ennen sortumaa. Juuri ennen sortumaa tapahtui äkillinen lasku mikroseismissä aktiivisuudessa. Tutkimuksessa havaittiin, että amplitudin kynnyksen ylitysaika prosentteina kuvaa sortumavaaraa paremmin kuin mikroseismisen emissiotaajuus /4/.

#### 3.4.5 Yhteenveto mikroseismissen emission käytöstä geologisissa materiaaleissa

Mikroseismissen valvonnan pääasiallinen käyttötarkoitus on kallion tai maarakenteen stabiilisuuden arviointi ja siten turvallisuuden lisääminen. Seuraavassa on lyhyt yhteenveto mikroseismissen menetelmän käyttöalueista /19/.

Kaivokset - Epästabiliilien alueiden määrittäminen ja valvonta. Yleensä käytetty laitteisto on monikanavainen. Mikroseisminen mittaus lisää turvallisuutta ja on myös suunnittelun apuväline.

Kalliötunnelit - Perän stabiilisuuden välitön toteaminen. Käytetty laitteisto on yleensä yksikanavainen korvakuulokkeilla varustettu. Tavallinen työntekijä voi käyttää laitetta menestyksekkäästi.

Kallioluiskat - Luiskien stabiilisuuden arviointi sekä avolouhoksissa että kallioleikkauksissa. Yksikanavaisella laitteella oli saavutettu vaihtelevaa menestystä.

Hydraulinen murtuma - Hydraulisen murtuman paineen ja murtuman alkamiskohdan määrittäminen. Siihen voidaan käyttää samoja lähteen paikantamismenetelmiä kuin kalliooperässä. Hydraulisen murtuman alkamiskohdan määrittäminen on kuitenkin vaikeaa. Menetelmää on muun muassa käytetty maapadoissa /18/.

Kallion jännityshistorian määrittäminen - Kallion jännityshistoria voidaan määrittää Kaiser-efektin avulla. Tutkimukset ilmiöstä jatkuvat vielä. Kaiser-efektin avulla saatuja jännitysarvoja verrataan irtikairausmenetelmällä saatuihin jännitysarvoihin.

Kallion hiipuman tarkkailu - Pitkäaikaisista mikroseismissä kenttämittauksista ei ole raportoitu, mutta menetelmä sopinee kallion hiipuman tarkkailuun.

Kalliopulttien ja -vaijereiden tarkkailu - Mikroseismissellä laitteella tarkkaillaan kalliopulttien ja -vaijereiden esi-jännityksen muuttumista.

Ennakkovaroituksen saaminen maanjäristyksistä - Bacon /12/ on tutkinut asiaa pienessä mittakaavassa ja saanut hyviä tuloksia.

#### 4. MUITA KALLION TARKKAILUMITTAUSMENETELMIÄ

##### 4.1 Jännitystilamittaukset

Kalliossa jännitystilamittauksia tehdään sekä ennen maanalaisen tilan rakentamista että rakennusaikana. Ennen rakentamista tehtyjä jännitystilamittauksia käytetään suunnittelun apuna esimerkiksi määrättäessä maanalaisen tilan sijoitusta. Rakennusaikana pyritään mittaamaan tietyn alueen jännitystilan muutoksia. Näitä mittauksia nimitetään myös jatkuviksi jännitystilamittauksiksi.

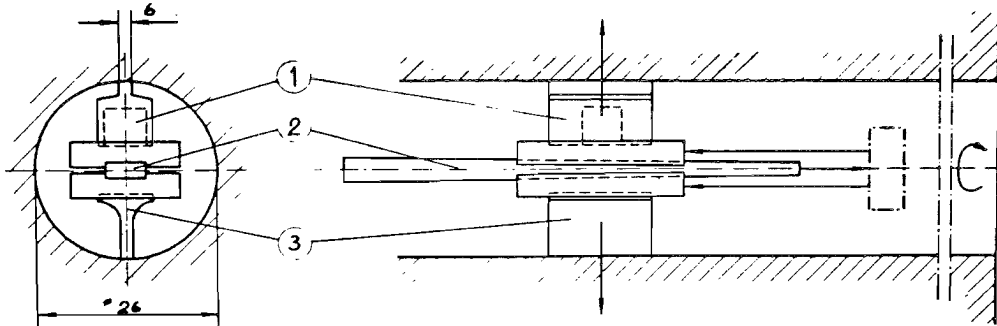
Kolmidimensionaalisen jännitystilan mittaus perustuu poranreiän muodonmuutokseen. Kallioon kairataan ensin pieni reikä. Kun reikä ympäristöineen irrotetaan kallion jännityksistä, tapahtuu reiässä muodonmuutos, joka riippuu kalliosta olleen jännityksen suuruudesta ja suunnasta. Reiän muodonmuutos mitataan erilaisilla mittakennoilla. Mittauslukema saadaan alku- ja loppulukeman erona. Mittausmenetelmää nimitetään irrotuskairaukseen perustuvaksi menetelmäksi. Jännitystilan muutosten mittauksissa mittakenno asetetaan poranreikään ja mittaustulosten erotus antaa kallion jännitystilan suhteellisen muutoksen. Suomessa kallion jännitystilamittauksia on tehty pääasiassa kahdella eri menetelmällä: Hastin ja Leemannin /39/.

##### Hastin menetelmä

Mittaavana elementtinä on magnetostriktiivinen kenno, jossa tapahtuu permeabiliteetin muutos, kun aksiaalisesti puristava voima muuttuu. Mittakenno esijännitetään poranreikään kiilan avulla (kuva 23). Jotta kennoa puristava jännitys saataisiin laskettua mittaustuloksesta, on mittakenno kalibroitava. Tällöin mittakenno esijännitetään teräsprismassa olevaan  $\emptyset$  26 mm:n reikään ja teräsprisma laitetaan puristimeen. Mittaamalla puristusjännitystä vastaava mittaustuloksesta saadaan muodostettua kalibrointikäyrä. Koska kalibrointiprismalla on eri kimmodulin arvo kuin tutkittavalla kivellä, aiheutuu tästä



korjauskerroin. Mittauslukema muutetaan jännitysarvoksi seuraavalla tavalla: kalibrointikäyrästä katsotaan mittauslukema vastaava jännitysarvo, joka kerrotaan vielä korjauskertoimella.

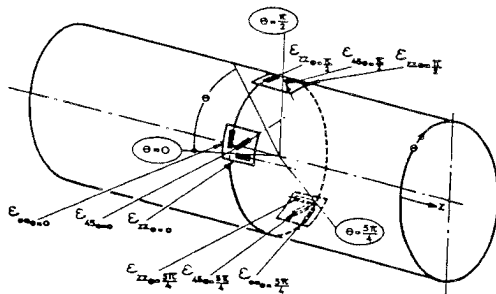


Kuva 23. Hastin mittakenno poranreiässä /39/. 1. anturi, 2. kiila, 3. puristuskisko.

Yhdestä poranreiästä saadaan kolmella mittauksella määritettyä reikää vastaan kohtisuorassa oleva tasojännitystila. Jännitystilän kolmidimensionaaliseen määrittämiseen vaaditaan mittaukset kahdessa toisiaan vastaan kohtisuorassa reiässä. Menetelmällä päästään 20 - 30 m:n syvyyteen ja sitä voidaan käyttää myös märissä rei'issä. Hastin menetelmä sopii myös jatkuviin jännitystilamittauksiin /39/.

#### Leemannin menetelmä

Leemannin menetelmässä mittaavana elementtinä on kolme venymämittausrusetta. Nämä liimataan suoraan poranreiän seinälle (kuva 24).



Kuva 24. Venymäliuskojen sijoitus mittausreiän seinille Leemannin menetelmässä /39/.

Venymäliuskojen liimauksessa käytetään mittakennoa, jossa venymäluiskat painetaan reiän seiniin paineilmalla. Yhdessä mittauksessa saadaan yhdeksän muodonmuutoslukemaa, joista kuusi on toisistaan riippumattomia. Tällöin yhden mittauksen perusteella voidaan laskea kolmidimensionaalinen jännitystilä. Mittaukset onnistuvat vain kuivissa rei'issä. Menetelmän huonona puolena on se, että saadut jännitysarvot riippuvat siitä, kuinka tarkasti kallion kimmomoduli ja Poissonin luku on pystytty määrittämään. Leemannin menetelmä ei sovi jatkuviin mittauksiin /39/.

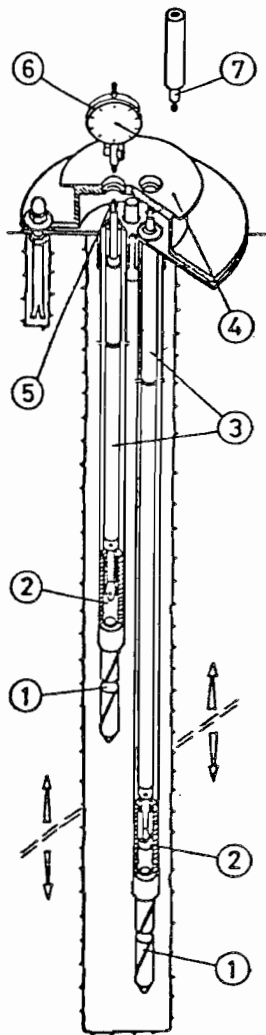
#### 4.2 Ekstensometrimittaukset

Ekstensometrejä käytetään kallion liikkeiden mittaamiseen. Kallion liikkeet voivat aiheutua maanpäällisestä tai maanalaisesta louhinnasta, perustusten painosta ja luonnollisten liuskien liikkeistä /1/.

Ekstensometri on rakenteeltaan tanko tai lanka, joka sijoitetaan poranreikään ja ankkuroidaan määrätylle syvyydelle. Mekaanisilla tai sähköisillä mittalaitteilla mitataan ekstensometrin yläpään ja kalliopinnan liikettä. Samaan poranreikään voidaan asentaa useita eri syvyyksille ankkuroituja ekstensometritankoja tai -lankoja. Näistä ekstensometreistä käytetään nimitystä monipiste-ekstensometrit. Tällöin saadaan paikallistettua kallion siirtymäalue. Kuvassa 25 on esitetty Suomessa yleisesti käytetty Interfelsin tankoekstensometri REX 2,5/1 A. Ekstensometri voidaan asentaa mihin suuntaan hyvänsä.

Ekstensometrin mittaustarkkuus on 0.01 mm, mutta käytännössä, kun otetaan huomioon lämpötilan vaihtelut ja ekstensometritankojen pituus, voidaan todellisten siirtymien mittaustarkkuutena pitää 0.1 mm. Koska ekstensometri mittaa vain kahden pisteen välisen etäisyyden muuttumista, on todellisten siirtymien tuntemiseksi tiedettävä myös mittausten vertailukiintopisteen liike (kuva 26).

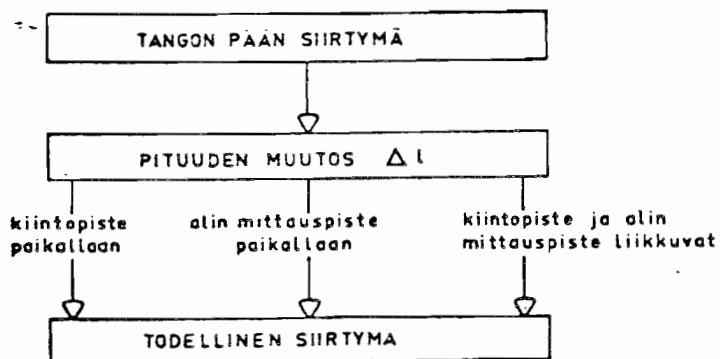
Erityisesti on tiedettävä alimmaksi ankkuroidun ekstensometritangon tai -langan liike.



1. Ankkurointikappale
2. Kiinnityskappale
3. Ekstensometritangot muoviputkessa
4. Kansi
5. Mittapää
6. Mittakello
7. Sähköinen mitta-anturi

Maksimipituus 200 m

Kuva 25. Monipiste-ekstensometri REX 2,5/1 A rakenne-  
periaate /30/.



Kuva 26. Vertikaalisia siirtymiä mittaavien monipiste-  
ekstensometrien tulostus todellisiksi siirtymiksi /34/.

Käytännössä alimmaksi ankkuroitu tanko juotetaan niin syväälle, että sen kiinnityspistettä voidaan pitää liikkumattomana. Vertailukiintopisteen liikettä voidaan valvoa tarkkavaaituksilla.

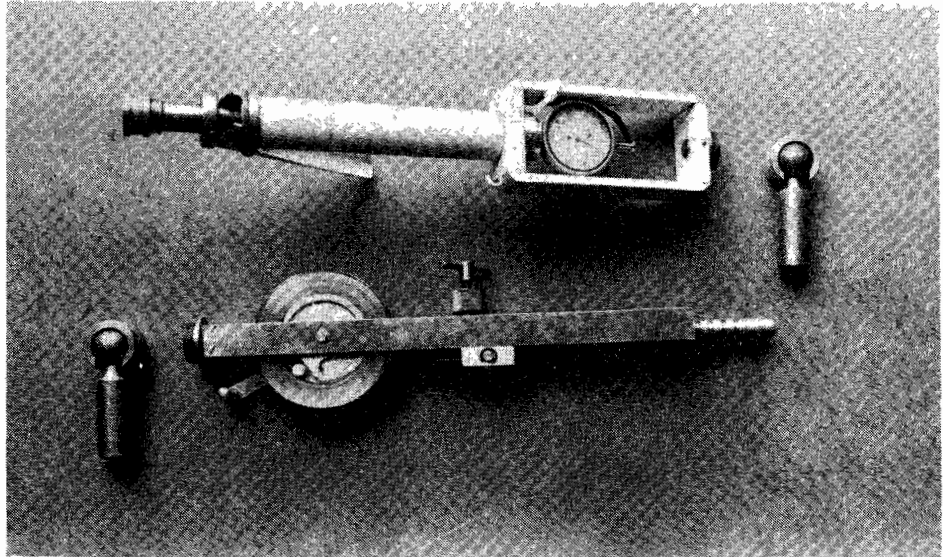
Ekstensometriä asennus on paras suorittaa timanttikairauksella tehtyyn reikään. Tällöin kairasydännäytteestä käy selville kalliassa mahdollisesti olevat raot, jolloin ekstensometritankojen ankkurointi voidaan määrätä niiden mukaan. Jos ekstensometrin reikä porataan tavallisella porakoneella, on porarin syytä pitää tarkkaa kirjanpitoa poraustapahtumasta. Toinen asennuksessa huomioitava seikka on ekstensometrin yläpään suojaus. Ekstensometrin yläpää on suojattava niin, että työntekijät, kulkuneuvot ja sinkoutuvat kivet eivät voi vahingoittaa sitä /1/.

#### 4.3 Konvergenssimittaukset

Konvergenssimittauksissa mitataan kahden pisteen välistä suhteellista muodonmuutosta. Menetelmää käytetään tunnelin tai kalliosäiliön seinien muodonmuutosten mittaamiseen, jotta saataisiin selville mahdollinen sortumavaara. Tällöin voidaan ajoissa ryhtyä tarvittaviin toimenpiteisiin. Konvergenssimittauksia käytetään erityisesti silloin, kun tunnelilouhinnassa on jouduttu lävistämään ruhjevyöhyke. Keski-Euroopassa konvergenssimittauksia käytetään rutiinimittauksina tunnelilouhinnassa. Suomessa konvergenssimittauksien käyttö rajoittuu suurten kalliotilojen ja ruhjevyöhykkeiden valvontaan. Tämä johtuu suomalaisen kallion jäykkyydestä /6, 39/.

Konvergenssimittauksessa teräsnauha jännitetään vakiovoimalla kahden mittapultin väliin. Joissain konvergenssimittareissa käytetään teräsnauhan sijasta terästankoa. Tämä sopii vain mitattaessa lyhyitä etäisyyksiä. Tällöin terästankoa ei tarvitse jännittää. Konvergenssimittauksessa mittalaitte, joka mittaa nauhan tai tangon pään liikettä, kiinnitetään toiseen mittapulttiin. Mittalaitteena on yleensä mittakello. Mittauspisteiden välinen muodonmuutos saadaan mittauskertojen lukemien erona. Mittauksen tarkkuus riippuu suuresti teräsnauhan kireydestä /35/. Tavallisissa mittalaitteissa nauhaa

kiristetään jousella. Jos mittapulttien väli on suuri ( 50 m) nauha jännitetään paineilmapintturilla. Kuvassa 27 on esitetty Suomessa käytetty Interfelsin konvergenssimittari. Tämän mittarin tarkkuus on likimain  $1 \times 10^{-5}$  x mittauspulttien väli (esim. pulttivälillä 20 m tarkkuus on 0.2 mm) /28/.



Kuva 27. Interfelsin konvergenssimittari.

Konvergenssimittauksia voidaan tehdä myös sähköoptisilla etäisyysmittareilla. Erityisesti ne ovat käyttökelpoisia suurissa louhoksissa, missä louhoksen seinämälle ei ole pääsyä. Tällöin sopivassa louhintavaiheessa seinän syvennyksiin sijoitetut prismat voivat olla ainoa keino seinämän liikkeen havaitsemiseksi louhoksen toiselta puolelta /39/. Eräs tällainen sähköoptinen etäisyysmittari on Kern Mekometer ME 3000. Sen tarkkuus on  $\pm (0.2 \text{ mm} \times 1 \cdot 10^{-6} \cdot D)$ , jossa D on mitattavan välimatkan pituus. Esimerkiksi jos mitattava etäisyys on 20 m, on tarkkuus  $\pm 0.22 \text{ mm}$  /17/. Voidaan sanoa, että sähköoptiset etäisyysmittarit ovat vähintään yhtä tarkkoja kuin tavalliset konvergenssimittarit.

#### 4.4 Tarkkavaaitukset

Vaaituksella (tarkkavaaituksella) voidaan mitata tutkittavan pisteen tai pisteiden korkeuden muutosta. Vaaituksessa eri

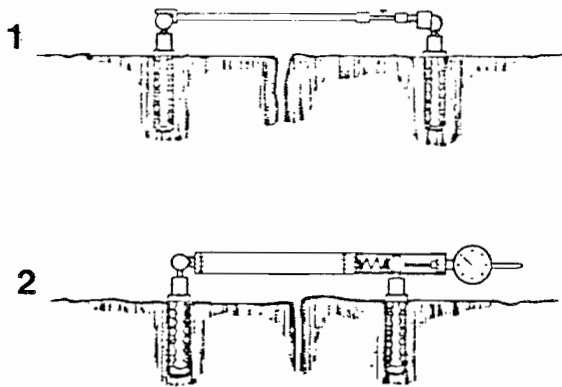
pisteiden välinen korkeusero määritetään vaakasuoran tähtäyslinjan avulla, joka saadaan vaaituskoneella. Tähtäyslinjasta mitataan etäisyydet alas tutkittaviin pisteisiin lattojen avulla /3/. Tarkkavaaitus sopii käytettäväksi sekä maanalaisissa että maanpäällisissä mittauksissa. Tärkeää on, että mittauksen lähtöpiste (lähtökorko) on riittävän kaukana tutkittavasta alueesta. Tällöin lähtöpistettä voidaan pitää liikkumattomana. Tarkkavaaituksen käyttökohteina voidaan mainita maan päältä tehty kalliokaton muodonmuutoksen mittaaminen sekä maanalaisista mittauksista ekstensometrien yläpään liikkeen mittaus. Suomessa maanpäällisiä tarkkavaaituksia on tehty mm. Kampin metroaseman yläpuolella /34/.

Vaaituslatoissa on yleensä 1 cm:n tai 0.5 cm:n jaotus. Tällöin tarkkavaaituksessa millin kymmenesosat joudutaan arvioimaan. Tarkoissa mittauksissa voidaan käyttää vaaituslattia, jossa asteikko on maalattu jännitettyyn invarnauhaan. Tällainen asteikko on tarkkaan jaotettu ja siihen eivät vaikuta ilmankosteuden muutokset. Myös lämpötilaerojen vaikutus on hyvin pieni. Tarkkavaaituskoneet ovat yleensä itsetasaavia. Tarkkuus saadussa tähtäyslinjassa on likimain 1/12 mm 50 mm:n etäisyydellä /3/. Jos tarkkavaaituksessa käytetään optisella mikrometrillä varustettua vaaituskonetta ja invarlattia, voidaan korkeuslukema mitata muutaman sadasosamillimetrin tarkkuudella /16/. Kuitenkin tarkkavaaituksen todellinen tarkkuus on kymmenesosamillimetrejä. Yleensä, kun vaaituksen lähtöpiste on kaukana, joudutaan tekemään monia vaihtoja (vaaituskoneen paikkaa joudutaan muuttamaan), jolloin vaaituksen tarkkuus pienenee. Voidaan kuitenkin sanoa, että hankalissakin olosuhteissa tarkkavaaituksen tarkkuus on parempi kuin 0.5 mm.

#### 4.5 Rakojen tarkkailu

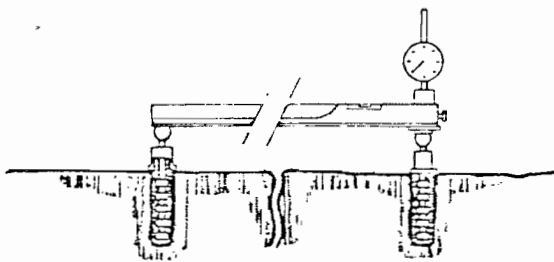
Rakojen muodostuminen ja niiden leviämisen tarkkailu on hyödyllinen tapa selvittää kallion liikkeitä. Vaikka rakojen mittaamiseen on tarjolla yksinkertaisia mittalaitteita, on rakojen visuaalinen tarkastelu hyödyllistä. Eräs tapa valvoa rakojen muodostumista on maalata syntyneet raot koko pituudeltaan. Rakojen kasvu ja uusien muodostuminen on tällöin helposti havaittavissa. Toinen yksinkertainen rakojen

tarkkailutapa on valaa rakoon betoni-indikaattorit. Betoni-indikaattori on raon molemmille puolille ulottuva betonilaastimuuraus. Betonin halkeamisesta näkyy raon liike. Kipsistä tehty indikaattori ei ole suositeltava, koska kostuessaan siihen auennut halkeama voi umpeutua. Varsinaisissa raonmittauksissa mitataan joko suoraan raon väliä tai raon kummallekin puolelle asetettujen pulttien väliä (kuva 28). Pulttien päiden tason muutosta voidaan myös mitata (kuva 29) /6/.



Kuva 28. Mittalaitteita raon välin mittaamiseen /6/.

1. Kannettava tankomikrometri
2. Kannettava putkiekstensometri



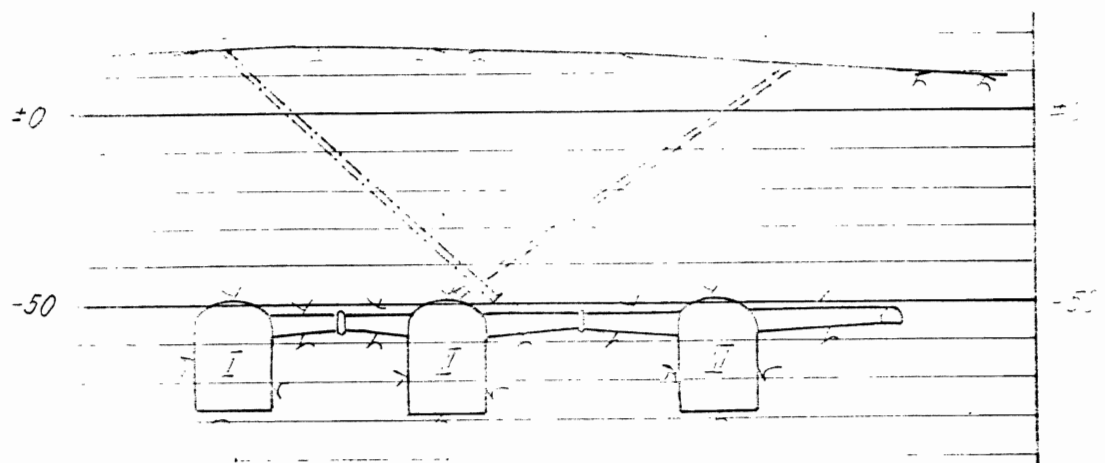
Kuva 29. Kannettava kallistusmittari, pulttien tason muutoksen mittaamiseen /6/.

Rakojen tarkkailun eräänä muotona voidaan myös mainita vuotavien rakojen vuotovesien määrän mittaaminen ja vuotovesianalyysit. Varsinkin jälkimmäisellä mittauksella saadaan hyvin selville vuotovesien alkuperä ja siten mahdollinen rakojen injektoinnin tarve.

5. HANASAAREN SYVÄVARASTON KALLIOTEKNINEN SUUNNITTELU  
5.1 Rakenne, louhinta ja lujitukset

Hanasaaren syvävarasto on tarkoitettu raskaan polttoöljyn varastointiin. Varaston öljyä käyttäviä laitoksia ovat Helsingin kaupungin omistamat voimalaitokset, lähinnä Hanasaaren B voimalaitos sekä huippulämpökeskukset.

Syvävarasto muodostuu kolmen säiliön ryhmästä. Säiliöiden pituudet ovat 248 m, 320 m ja 238 m. Profiililtaan säiliöt ovat enimmillään 30 m korkeita ja 20 m leveitä. Säiliö I ja säiliö II toimivat yhteisenä varastona. Niiden välisen pilarin leveys on 35 m. Säiliön II ja säiliön III välisen pilarin leveys on 50 m (kuva 30). Varaston kokonaistilavuus on 465 000 m<sup>3</sup>ktr. Säiliöt ovat kuivasäiliöperiaatteella toimivia ja niiden pohjana on 1:200 kaltevuudessa oleva betonilaatta. Raskasöljysäiliössä pidetään öljy pumpattavuuden takia jatkuvasti noin 60 °C lämpötilassa. Kuivasäiliöperiaatteella toimivissa säiliöissä vähennetään öljyn lämmitystarvetta pitämällä öljy ja ulkopuolelta tulevat vuotoedet erossa toisistaan. Säiliöt sijaitsevat Mustikkamaan saaren alapuolella pohjatason ollessa -79.10 m (liite 1). Maanpinta Mustikkamaan saarella vaihtelee tasojen +10.00 ja +20.00 välillä /37/.



Kuva 30. Poikkileikkaus säiliöryhmän keskeltä, katkoviivoilla kallionäyttekairausreiät /37/.



Säiliöt louhitaan kolmessa osassa. Kattoperä (korkeus 8.0 m) louhitaan peränajona, välipenger (korkeus 12.5 m) louhitaan pengperlouhintana ja alapenger (korkeus 9.5 m) louhitaan nosto-louhintana.

Säiliötilojen katot on pulttitettu systeempulttituksella heti kattoperälouhinnan valmistuttua. Pultteina on käytetty 3.2 m:n pituisia juotettuja harjateräspultteja ilman aluslevyä. Pulttien halkaisija on 20 mm ja väli on 2 x 2 m<sup>2</sup>. Säiliöiden seinät on pulttitettu vastaavanlaisilla pulteilla työn aikana tarpeelliseksi katsotussa laajuudessa. Jonkin verran on jouduttu käyttämään myös pidempiä pultteja pisimpien ollessa 6 m. Säiliöiden kattojen pulttitukseen on laskettu tarvittavan 15 500 jm ja seinien pulttitukseen 11 000 jm pultteja. Säiliöiden katot on lujitettu ruiskubetonilla työn aikana määriteltävässä laajuudessa. Vahvistamatonta ruiskubetonointia (paksuus 4 cm) on arvioitu tarvittavan 3 400 m<sup>2</sup> ja vahvistettua (paksuus 7 cm + verkko) 2 400 m<sup>2</sup>. Injektointia on arvioitu tehtävän lähinnä pystykuiluissa /48/. Myöhempien jännitystilamittausten perusteella lujitusmääriä on lisätty. Säiliöiden itäpäiden kattoihin on määrätty systemaattinen ruiskubetonointi kuljetusreittien kohdalle. Vahvistamattoman ruiskubetonoinnin määrää on lisätty 2500 m<sup>2</sup> ja vahvistetun 5000 m<sup>2</sup>. Pultitusmäärät ovat pysyneet samoina kuin aiemmin oli suunniteltu. Säiliön II länsipäässä havaittua "korppukivi"-aluetta on jouduttu injektoimaan.

## 5.2 Alueen geologia

Mustikkamaan saaren kallioperä koostuu neljästä kivilajista, jotka karttakuvassa (liite 1) muodostavat koillista kohti leviävän viuhkamaisen kuvion. Lännestä itään päin ovat kivilajit seuraavat: granodioriitti, migmaattinen kiillegneissi, jossa graniittivyöhyke, migmaattinen kvartsimaasälpagneissi sekä jälleen granodioriitti. Neljäs kivilaji amfiboliitti esiintyy vaihtelevan paksuisina luitroina ja linsseinä muiden kivilajien yhteydessä. Säiliöryhmä sijaitsee pääasiassa kiillegneississä kallioperässä.

Säiliöalueen kivilajisuuntaus on erittäin selvä. Yleissuunnaltaan se on lounaasta koilliseen. Liuskeisuuden kaade

vaihtelee pystysuunnan molemmin puolin ja on säiliöalueella enimmäkseen noin 75° kulmassa paikoin jopa 45° kulmassa kaakoon kallistuva. Poimuakseli kallistuu noin 60° kulmassa itään päin säiliöiden koillispuolella. Päärakoilusuuntana on liuskeisuuden suuntainen rakoilu. Vaakasuoraa rakoilua esiintyy pintakalliassa harvakseltaan /37/.

### 5.3 Kenttätutkimukset

Geoteknillinen toimisto (nykyisin geotekninen osasto) suoritti Mustikkamaan saaren rakennusgeologisen kallioperäkartoituksen vuonna 1965. Kartoitus perustui silmävaraiseen tarkasteluun. Tarkoituksena oli selvittää öljyn varastointiin käytettävien kalliosäiliöiden rakentamismahdollisuuksia saaren kallioihin. Selvityksen perusteella todettiin, että Mustikkamaan saari sopii öljysäiliöiden sijoituspaikaksi. Tämän jälkeen on 1970-luvun alkupuolella tehty yleissuunnitelmaan liittyviä lisätutkimuksia. Lisätutkimusohjelma on sisältänyt kallionäytekairauksia, porakonekairauksia, seismisiä luotauksia ja kallion jännitystilamittauksia. Porakonekairauksia on tehty lautalta 11 pisteestä yhteensä 209 m /37/.

#### 5.3.1 Kallionäytekairaukset

Kallionäytekairaukset alkoivat toukokuussa 1970, jolloin tehtiin Sompasaaren salmen alittava 129 m pitkä reikä. Kesällä 1972 kairattiin Mustikkamaan saarella silloin suunnitellulle säiliöalueelle viisi kallionäyttereikää, joiden yhteispituus oli 418 m. Syksyllä 1973 kairattiin 250 m pitkä, loiva kallionäyttereikä Sompaja Hanasaaren välisen satamaltaan alitse. Satamaltaan alla havaitun ruhjeen tarkkaa selvitystä varten kairattiin toinen 120 m pituinen jyrkkäkaateinen reikä. Kesällä 1974 kairattiin lisäksi säiliön III kohdalle sen pituussuuntainen 211 m pitkä reikä. Saman säiliön itäpään alueelle kairattiin myös 81 m pitkä pystysuora reikä. Kallionäytekairausten yhteispituus on jonkin verran yli 1000 m.

Kallionäytekairauksissa havaittiin Sompaja Mustikkamaan saaren välisen salmen alapuolella lähes vaakasuora ruhjevyöhyke

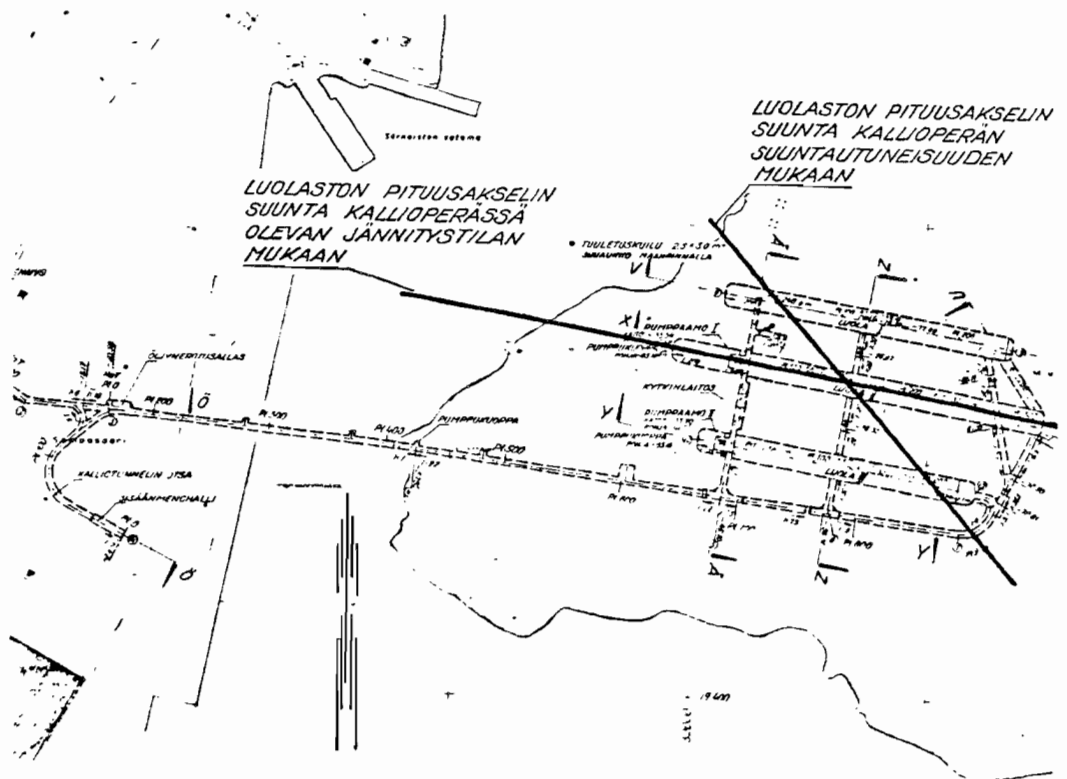
tasolla -25,00. Huonoimmillaan on kivi tässä ruhjevyöhykkeessä parin metrin paksuudelta rikkoutunut murskalemassaksi, jossa murskaleiden välissä on runsaasti rapautumistuotteina syntyneitä saviainesta. Suunniteltu ajotunneli jää reilusti ruhjealueen alapuolelle. Säiliöalueella tehdyistä kallionäytekairauksista havaittiin pääasiassa kallion pintaosissa vaakarakoilua. Merkittävin vaakasuora rakoilu (tasolla -20,00) jää runsaasti louhittavien tilojen yläpuolelle. Säiliön III länsipäässä havaittiin "korppukiveä", hieman hohkakiveä muistuttavaa kivilaatua, jossa on runsaasti rapautuneita huokosia. "Korppukivi" on hyvin vettä läpäisevää /37/.

### 5.3.2 Jännitystilamittaukset

Säiliöiden kattovyöhykkeen horisontaalisen primaarijännityskentän selvittämiseksi tehtiin Hastin menetelmän mukaiset mittaukset neljässä tutkimusreiässä. Mittaukset tehtiin elo-lokakuussa 1972. Mittauspisteiden sijoitus käy selville liitteestä 1, johon on piirretty horisontaaliset jännitysellipsit. Käytetystä mittausmenetelmästä johtuen voitiin tutkimusreiät tehdä korkeintaan noin 15 m:n pituisiksi, jolloin ne ulottuivat alimmillaan tasolle -3,00 - -5,00. Kalliosäiliöiden kattotasoa on -49,10. Mittauksen suorittajan, Suomen Malmi Oy:n, loppuraportin mukaan kallion horisontaalin jännityskentän pääakselin suunta vaihteli välillä 63 - 88° pohjoisesta länteen päin. Suuremman pääjännityksen absoluuttinen arvo vaihteli tutkimusrei'issä 6,4 - 16,7 MPa. Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että alueella vallitseva horisontaalinen jännityskenttä on selvästi suuntautunut ja suhteellisen voimakas /37/.

### 5.4 Kenttätutkimusten vaikutus säiliöiden suunnitteluun

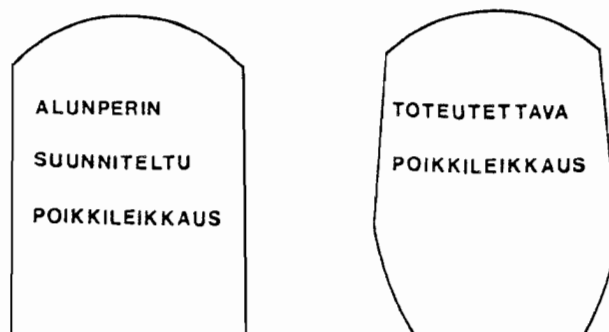
Yleissuunnitteluvaiheessa suunnattiin säiliöiden pituusakseli kohtisuoraan liuskeisuutta ja sen mukaista päärakoilusuuntaa vastaan. Jännitystilamittausten jälkeen on säiliöt kuitenkin sijoitettu kallion jännitystilan asettamien vaatimusten mukaisesti. Tällöin säiliöiden pituusakseli on suuremman horisontaalisen pääjännityksen suuntainen (kuva 31).



Kuva 31. Säiliöiden suuntaus jännitystilän ja kallioperän suuntautuneisuuden mukaan /22/.

Jännitystilamittausten vuoksi muutettiin säiliöryhmän pituus-suhteet vastaamaan likimäärin jännitystilamittauksista saadun jännitysellsin akselien suhteita. Säiliöiden poikkileikkauksen muotoa pyöristettiin hieman (kuva 32).

Säiliöiden korkeustaso on valittu siten, että kallionäyte-kairauksissa havaitut voimakkaimmat vaakarakoiluvyöhykkeet jäävät kalliosäiliöiden yläpuolelle. Katon toimiva paksuus on siten huomattavan suuri. Säiliöiden väliset pilarit on suunniteltu tähänastista käytäntöä leveämmiksi /37/.



Kuva 32. Säiliöiden poikkileikkauksen muutos.

## 6. RAKENNUSAIKAISET MITTAUKSET

### 6.1 Yleistä

Rakennusaikaisten mittausten ensimmäisenä päämääränä oli varmistaa maanalaisilla jännitystilamittauksilla alueella vallitsevan horisontaalin jännityskentän suunta ja suuruus. Toisena päämääränä oli kalliokaton seuraaminen sopivin mittausten menetelmin.

Pääasiallisiksi tarkkailumittausmenetelmiksi valittiin jatkuvat jännitystilamittaukset ja ekstensometrimittaukset. Näiden lisäksi suoritettiin mikroseismistä tarkkailua, maanpäällistä tarkkavaaitusta, konvergenssimittauksia, rakojen tarkkailua sekä aistihavaintoihin perustuvaa tarkkailua.

Jatkuvilla jännitystilamittauksilla pyrittiin seuraamaan säiliön pään maksimi vertikaalijännitystä sekä säiliöiden suuntaisia maksimi horisontaalijännityksiä. Ekstensometrimittausten tarkoituksena oli valvoa säiliöiden välisten pilareiden käyttäytymistä. Mikroseismisillä mittauksilla haluttiin saada välittömästi tieto mahdollisesta kallion murto-  
lujuuden ylityksestä, jotta osattaisiin heti ryhtyä tilanteen edellyttämiin toimenpiteisiin. Tämän lisäksi toimivat mikroseismiset mittaukset edellisten mittausten tukena. Maanpäällisellä tarkkavaaituksella oli tarkoitus selvittää aiheuttaako louhinta muutoksia maanpinnalle saakka. Konvergenssimittauksilla pyrittiin selvittämään säiliöiden seinien liikkeitä.

Tarkkailumittauslaitteet pyrittiin sijoittamaan siten, että niitä päästään mittaamaan kohtuullisen helposti ja ettei aiheuteta tarpeetonta haittaa louhinnalle. Suuri osa tarkkailumittauslaitteista oli sijoitettu säiliöiden yläpuolisiin tiloihin. Tarkkailumittauksia tehtiin aluksi kahden viikon välein, mutta myöhemmin louhinnan lähestyessä tarkkailupisteitä tihennettiin havaintoväliä.

Projektin suuruuteen nähden olisi suunnittelijan kannalta hyödyllistä saada tarkkailumittaus-tietoa laajalta alueelta.

Suomessa ei kuitenkaan ole tämän laatuksia kalliotiloja rakennettaessa totuttu laajahkoihin tarkkailumittauksiin. On jouduttu tyytymään suppeisiin tarkkailumittauksiin, sillä rakennuskustannukset pyritään aina optimoimaan. Suunnittelijoiden ja rakennuttajien käsitykset tarkkailumittausten laajuudesta rakennuskustannusten optimoinnissa eivät aina osu yksiin. Hanasaaren öljysäiliöissä on tälläkin tarkkailumittausten tasolla tehty huomattavan laajat mittaukset verrattuna Suomessa jo toteutettuihin useimpiin kalliosäiliöihin.

## 6.2 Jännitystilamittaukset

Rakennusaikaisilla jännitystilamittauksilla haluttiin varmistaa kallion jännityskentän suunta ja suuruus säiliöiden tasolla sekä seurata jännitysten kehitystä louhinnan edetessä. Aiemmin vuonna 1972 oli säiliöalueen kallion jännitystila määritetty Hastin menetelmällä maanpinnalta. Koska kyseisellä menetelmällä ei voitu mitata säiliöiden tasolla olevaa jännityskenttää, suoritettiin kolmidimensionaalisen jännitystilamittaukset heti kun työtunnelien louhinta oli edennyt sopivaan vaiheeseen. Samassa yhteydessä asennettiin jatkuvatoimiset jännitystilamittausanturit louhinnan aikaista ja sen jälkeistä seuranta varten.

### 6.2.1 Kolmidimensionaalisen jännitystilan mittaus

Maanalainen kolmidimensionaalisen jännitystilan mittaus tehtiin säiliöalueelle johtavista ajokäytävistä tasoilla -62.00 ja -45.00. Mittauksen suoritti Suomen Malmi Oy keväällä 1982. Mittauksessa käytettiin Leemanin menetelmää ja se tehtiin kahdesta eri reiästä. Mittausreikä J 1 (liite 2) sijaitsee säiliöiden II ja III välisessä pilarissa itäpäässä ja mittausreikä J 3 (liite 3) sijaitsee säiliön III länsipään katossa.

Kummastakin reiästä tehtiin kuusi täydellistä kolmidimensionaalista jännitystilamittauksia. Mittauksissa havaittiin, että pääjännitysten suunnassa oli likimain  $90^\circ$  ero maanpäältä tehtyihin mittauksiin verrattuna. Pisteessä J 1 suuremman pääjännityksen arvo oli 26,9 MPa ja pienemmän 10,4 MPa. Pisteessä J 3 suuremman pääjännityksen arvo oli 19,1 MPa ja pienemmän 8,7 MPa /43/.

Mittausten perusteella suurempi pääjännitys on jotakuinkin kohtisuoraan säiliöiden pituussuuntaa vastaan, toisin sanoen säiliöiden suunta ei ole paras mahdollinen jännityskenttään nähden. Asian varmistamiseksi tehtiin säiliöiden keskialueella ja myös korkeussuunnassa edellisten mittausten puolivälissä lisää yksi jännitystilamittaus pisteessä J 4 (liite 4) syyskuussa 1982 /42/.

Tämä mittaus osoitti suuremman pääjännityksen suunnan olevan lähes sama kuin maan päältä suoritetuissa mittauksissa. Pisteessä J 4 suuremman pääjännityksen arvo oli 20.0 MPa ja pienemmän 8.5 MPa.

Maan alta mitatut jännityskentät eivät siis mittausten mukaan ole saman suuntaisia keskenään. Säiliöryhmän eteläosassa tehtyjen kahden jännitystilamittauksen perusteella suurempi pääjännitys on lähes kohtisuoraan säiliöiden pituussuuntaa vastaan. Säiliöryhmän pohjoispuolella ja maan päältä mitattujen jännitystilojen mukaan suurempi pääjännitys on säiliöiden suuntainen. Yhteenvedo kaikista jännitystilamittauksista on liitteessä 5 /40/.

Mittauksissa havaittuun jännityskentän suunnan muutokseen säiliöiden alueella on monia selityksiä. Eräs mahdollisuus on se, että maanalaisissa mittauksissa on mitattu ajokäytävien aiheuttamaa sekundaarista jännitystilaa. On myös mahdollista, että jännitystila on mitattu rakoilleesta kalliosta, jolloin mittaustulos voi olla virheellinen. Säiliöryhmän mittasuhteet huomioonottaen on myös mahdollista, että jännitystila on kääntynyt alueen tektoniikan mukaan. Tällöin kallion jännityskentän suunnan vaihteluun vaikuttaisi merkittävimmin voimakas vaakarakoilu noin 35 m:n syvyydellä sekä alueen poimutus /40/.

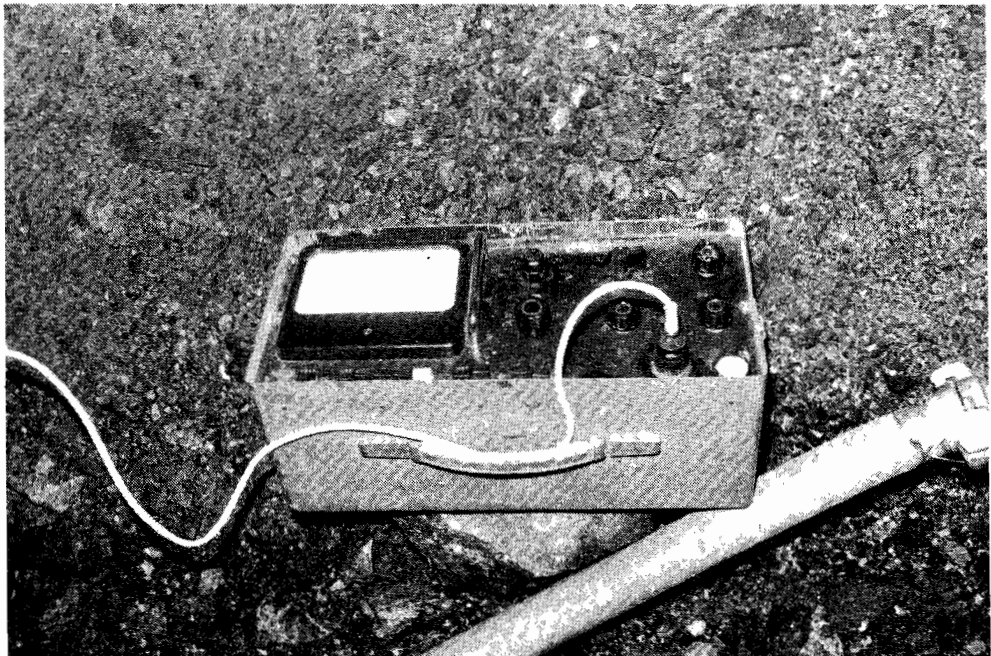
Tässä työssä käytetyt laskelmat ja tulosten tulkinnat perustuvat siihen, että kallion suurempi pääjännitys on kohtisuoraan säiliöiden pituussuuntaa vastaan ja on suuruudeltaan noin 25 MPa.

## 6.2.2 Jatkuvat jännitystilamittaukset

Jatkuvat jännitystilamittaukset on tehty Hastin antureita käyttäen. Anturit on asentanut Suomen Malmi Oy ja mittaajana on toiminut kirjoittaja. Antureita on asennettu kolme kappaletta: J 1, J 2 ja J 3. J 1 ja J 3 on asennettu samoihin reikiin, joista on määritetty kolmidimensionaalinen jännitystila (liite 2 ja liite 3).

Anturin J 2 sijainti on esitetty liitteessä 6. Anturi J 1 mittaa säiliön II ja III välisen pilarin itäpään jännitystä säiliön suunnassa. Anturi J 2 mittaa säiliön suuntaista jännitystä säiliön III länsipään katossa. Anturi J 3 mittaa vertikaalijännitystä säiliön III länsipään katossa. Anturit J 2 ja J 3 on asennettu pumppaamotilan läheisyyteen, koska se on säiliöryhmän arin alue. Siinä kalliotilan korkeus on suurimmillaan hieman yli 50 m.

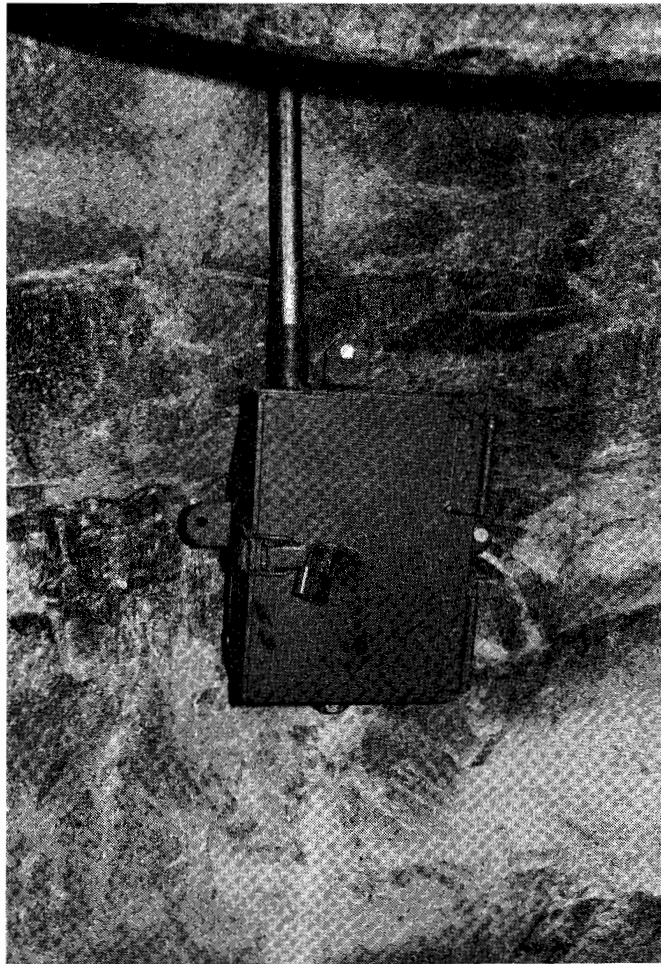
Kuvassa 33 on esitetty Hastin anturin mittaamiseen käytetty Ta-mittari.



Kuva 33. Hastin anturin mittaamiseen käytettävä Ta-mittari.



Anturien johtojen suojaaminen on tärkeää. Lähellä louhintaa olevissa mittauspisteissä anturien johdot pidettiin poranreiän sisällä ja reiän suu tukittiin tulpalla. Myöhemmässä vaiheessa anturien johdot voitiin kiinnittää reiän ulkopuolelle. Kuvassa 34 on esitetty anturin J 1 johdon suojaus. Ajokäytävän katossa olevasta reiästä johto kulkee seinään kiinnitetyssä hehkutetussa kupariputkessa alas ja päättyy tukevaan lukittavaan koteloon.



Kuva 34. Jännitysanturin J 1 johdon suojakotelo.

### 6.2.3. Tulokset louhinnan edetessä

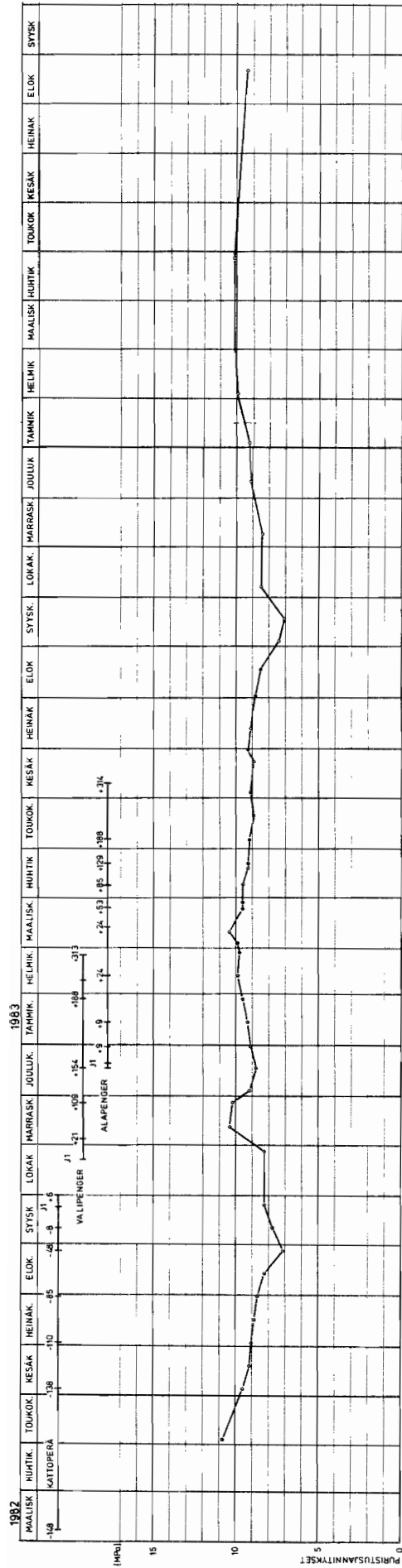
Jatkuvatoimimisista jännitystila-antureista mitatut muutokset on kuvissa 35 - 37 esitettyihin käyriin muutettu jännityksen absoluuttisiksi arvoiksi. Absoluuttisena lähtöarvona on pidetty kyseisistä paikoista mitattuja jännitysarvoja.

Lähtöarvo on reiässä tehdyn Leemanin menetelmän jännitysmääritysten keskiarvo sen jälkeen, kun havainnoisa on poistettu epäluotettavat mittaustulokset.

Kuvassa 35 on esitetty säiliön suuntaisen jännityksen muuttuminen anturissa J 1, joka sijaitsee säiliön II itäpään pilarissa. Kuvassa esitetyt louhintavaiheet liittyvät säiliön II louhintaan. Kuvasta 35 havaitaan jännityksen lasku, kun kattoperä lähestyy anturia. Kun kattoperä on saavuttanut anturin tason, jännitys on hieman noussut ja pysynyt sen jälkeen vakiona. Välipenkereen louhinta on alkanut anturista poispäin, jolloin jännitys on jälleen kasvanut, mutta kääntynyt pian jälleen laskuun. Kun alapenkereen louhinta on edennyt poispäin anturista, on jännitys kasvanut. Alapenkereen louhinnan edistyessä jännitys on laskenut hieman. Louhinnan aikana anturissa J 1 mitattu jännitys ei noussut suuremmaksi kuin alueella alunperin vallinnut jännitys. Louhinnan jälkeen säiliön suuntainen jännitys on tasaantunut ja saavuttanut 10 kk louhinnan jälkeen lähes alkuperäisen arvonsa.

Kuvassa 36 on esitetty säiliön suuntaisen jännityksen muutos anturissa J 2. Aluksi jännitys on laskenut anturissa. Hieman ennen kuin säiliön III kattoperä on saavuttanut anturin tason, on anturissa jännitys kohonnut 7.3 MPa:iin. Tämä johtuu siitä, että kattoperän pääty kerää jännityksiä. Kun kattoperä on mennyt ohi, jännitykset vapautuvat ja päädyn jännityksiä keräävä vaikutus siirtyy edemmäksi. Maksimiarvon jälkeen jännitys on tasaantunut. Pumppaamon II kuilua avarrettiin avauksen jälkeen vähän kerrallaan noin kuukauden aikana. Tänä aikana jännitys laski anturissa J 2 ja tasaantui kuilun louhinnan päätyttyä. Jännityksen pysyminen pitkään vakiona kuilun louhinnan päätyttyä johtuu mahdollisesti siitä, että anturi sijaitsee kuilun louhinnan aiheuttamassa lohkaroitumisvyöhykkeessä.

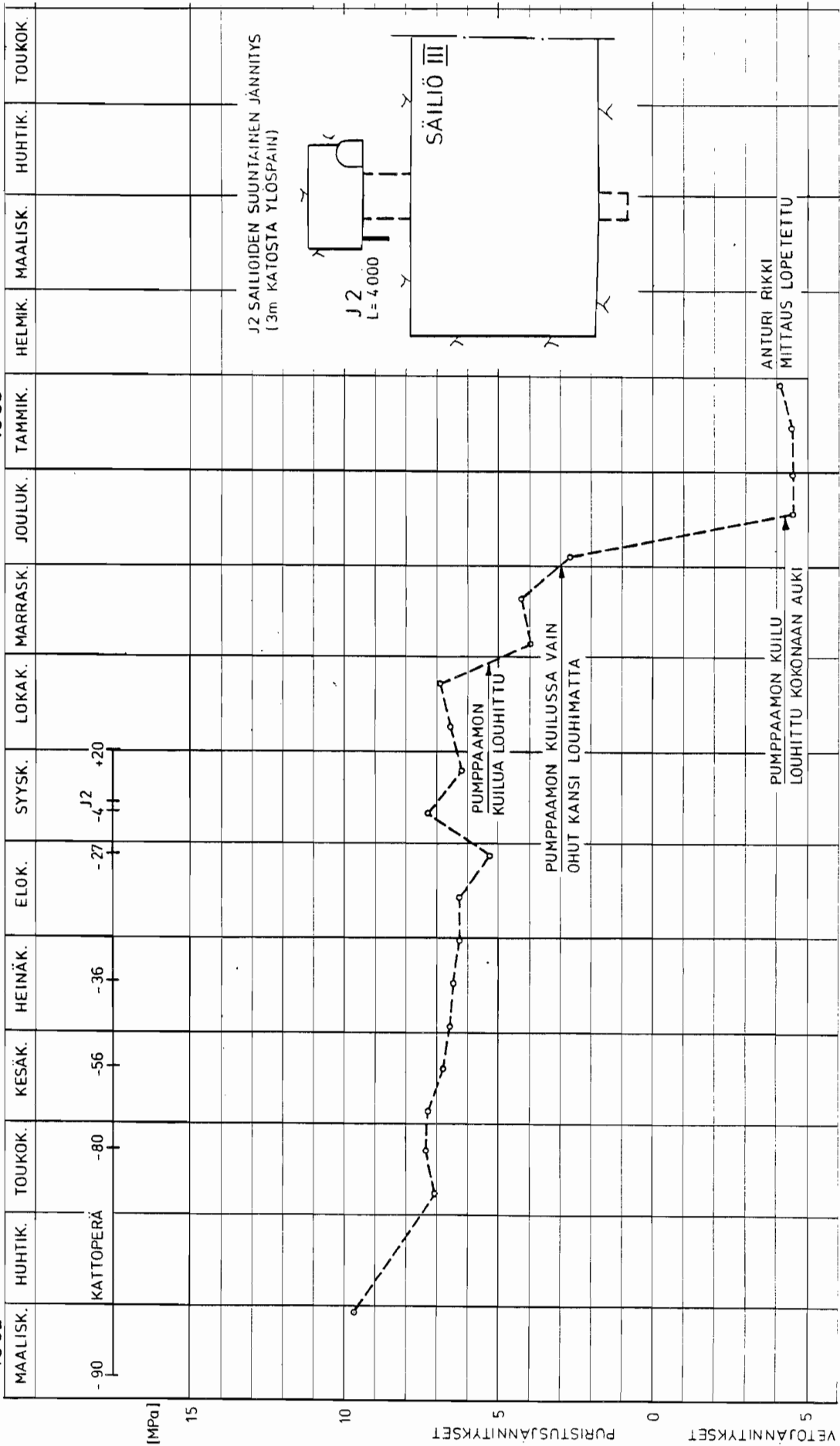
Tammikuun 1983 loppupuolella jännitysanturi J 2 meni epäkuuntoon niin, ettei saatu minkäänlaisia lukemia. Anturia yritettiin poistaa reiästä, mutta se ei onnistunut. Ilmeisesti kuilun tai säiliön III kattoperän pultituksen yhteydessä oli anturiin päässyt rakoja pitkin pulttien juotoslaastia. Tämän johdosta anturin J 2 jatkomittauksista päätettiin luopua.



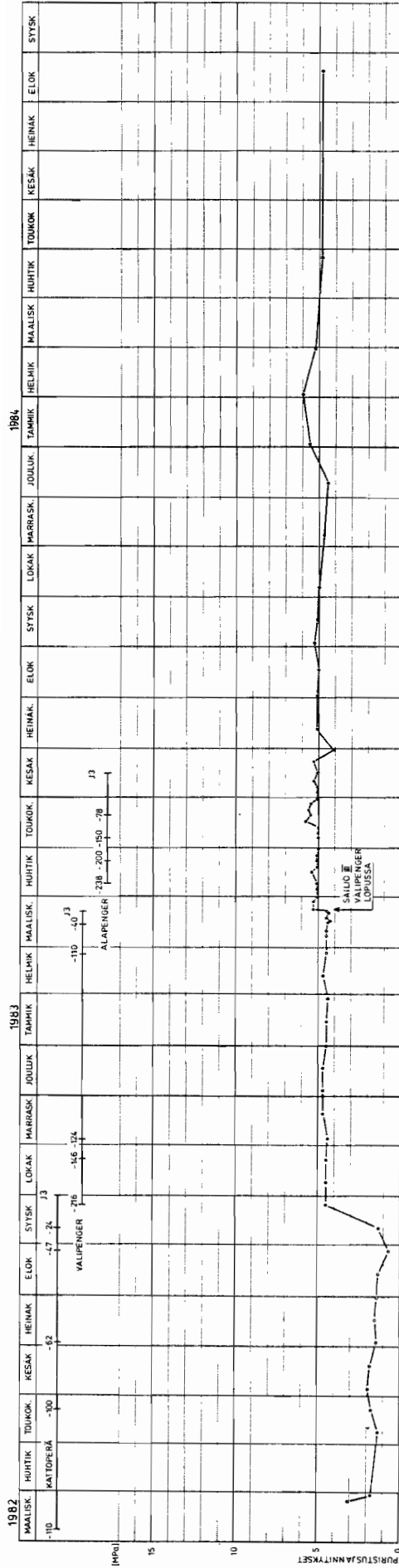
Kuva 35. Säiliöiden suuntaisen jännityksen muuttuminen anturissa J 1, louhintatilanteet metreissä anturiin päin (-) ja anturista poispäin (+).

1983

1982



Kuva 36. Säiliöiden suuntaisen jännityksen muuttuminen anturissa J 2, louhintatilanteet metreissä anturiin päin (-) ja anturista pois päin (+).



Kuva 37. Vertikaalijännityksen muuttuminen anturissa J 3, louhintatilanne metreissä anturiin päin (-).

Kuvassa 37 on esitetty vertikaalijännityksen muuttuminen säiliön III länsipäässä (anturi J 3). Säiliön III kattoperän louhinnan alkuvaiheessa jännitys on pysynyt melko tasaisena. Hieman ennen kuin kattoperä on edennyt anturille saakka, on jännitys kasvanut noin 3,0 MPa. Myös tässä havaitaan päädyn jännityksiä keräävä vaikutus. Välipenkereen louhinnan aikana on jännitys pysynyt samalla tasolla (4,5 MPa). Kun välipenger on louhittu päähän asti, on jännitys kasvanut äkillisesti 1,0 MPa ja on sen jälkeen pysynyt vakiona.

Alapenkereen louhinnan loputtua jännitys laski, mutta 8 kuukauden kuluttua louhinnan päättymisestä jännitys on tasaantunut samalle tasolle kuin mitä se oli jo välipenkereen louhinnan jälkeen.

### 6.3 Mikroseismiset mittaukset

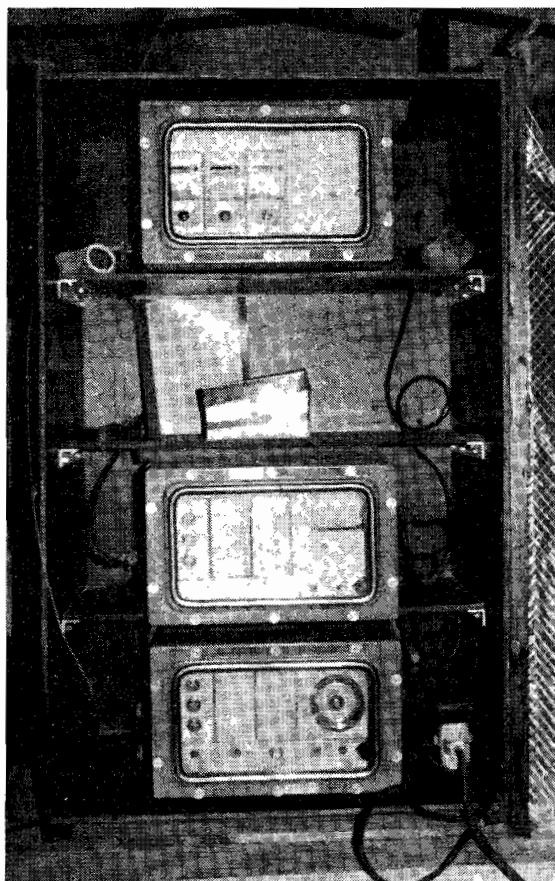
Säiliöiden kattoperien louhinnan aikana havaittiin useita eri kertoja kallioräiskettä ja tähän ilmiöön liittyvää kallion hilseilyä. Erityisen runsaasti räiskettä havaittiin säiliössä I. Mikroseismiset mittaukset aloitettiin kattoperissä syyskuun lopulla 1982. Alkuvaiheessa mikroseismisiä mittauksia tehtiin kannettavalla korvakuulokkeilla varustetulla laitteella louhinnan edistymisen mukaan. Myöhemmin saatiin käyttöön Outokumpu Oy:n omistama automaattinen mikroseisminen laite Adelta. Tällä laitteella on mittauksia tehty lähinnä viikonloppuisin pumppaamossa II ja Mustikkamaan nousun alapuolella. Mittausreikinä on käytetty noin kolme metriä pitkiä alakätisiä reikiä, joihin anturit (geofonit) on työnnetty. Geofonin ja kallion kontaktin parantamiseksi reiät ovat olleet vedellä täytettyjä.

#### 6.3.1 Mittauslaitteet

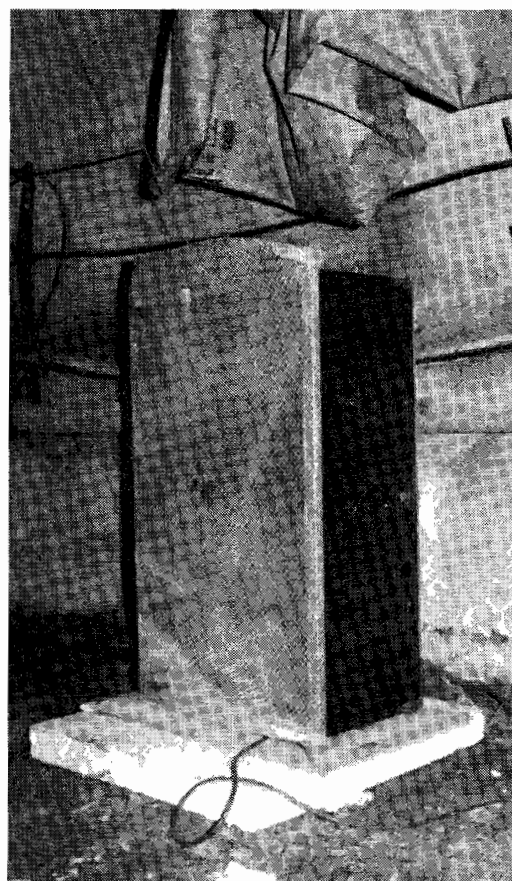
Alkuvaiheen mittauksissa käytettiin Outokumpu Oy:n valmistamaa kannettavaa mikroseismistä laitetta. Laitteessa on mukana korvakuulokkeet, mutta myös nauhurin liittäminen siihen on mahdollista. Anturina laitteessa on mekaaninen anturi eli geofoni. Sen resonanssitaajuus on noin 1200 Hz. Mittaukset

suoritettiin 5 minuutin jaksoissa ja kuullut mikroseismit äänet taulukoitiin. Laitteen yhteydessä käytettiin myös kasettinauhuria.

Tammikuussa 1983 mittauksia jatkettiin ruotsalaisen Adelta Ab:n valmistamalla automaattisella mikroseismissä laitteella. Se koostuu kolmesta yksiköstä, joista kukin on suihkustiiviissä kotelossa (kuva 38). Kuvassa 39 on esitetty laitteisto suojattuna. Laitteen alle asennettiin polystyreenilevy vaimentamaan louhintatärinöitä.



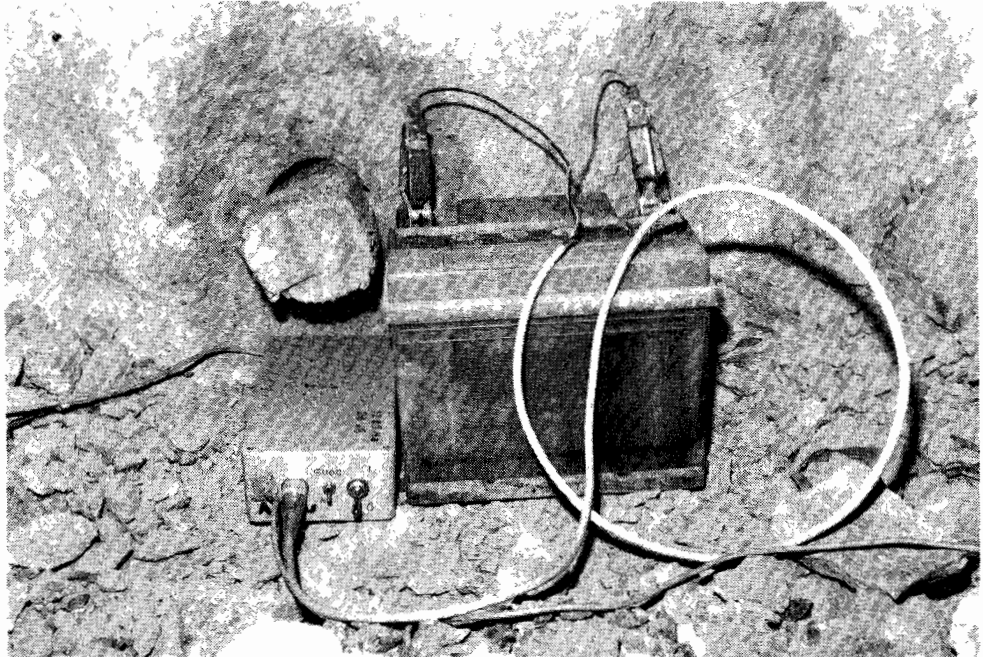
Kuva 38. Automaattinen mikroseisminen laite. Yksiköt alhaalta ylöspäin: vahvistin-, suodatin- ja rekisteröintiyksikkö.



Kuva 39. Automaattinen mikroseisminen laite suojattuna.

Laitteeseen kuuluu kaksi toimintakuntoista geofonia, joiden resonanssitaajuus on noin 1200 Hz. Geofonien herkkyydet voidaan säätää samalle tasolle. Laitteen vahvistinosassa geofonin antama signaali vahvistetaan (maksimi vahvistus 60 dB).

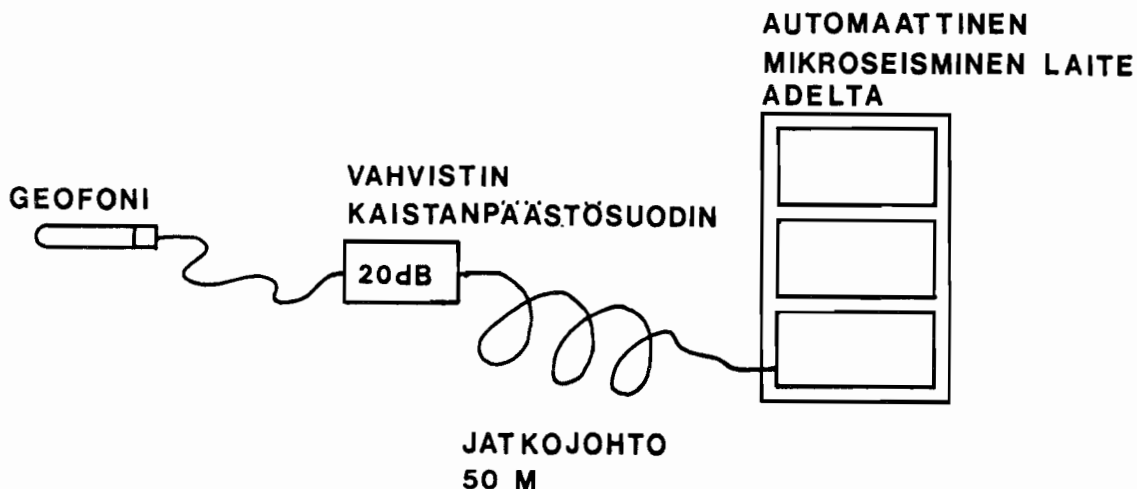
Suodatinosassa säädetään kynnystaso, jonka ylittävät ME-pulssit lasketaan. Rekisteröintiosassa laskurit tulostavat paperinauhalle 5 minuutin mittausjakson aikana tulleiden ME-pulssien lukumäärän. Geofonit haluttiin asentaa niin kauas mittausyksiköstä, että jouduttiin hankkimaan jatkojohtoja. Jatkojohtojen käytön mahdollistamiseksi tehtiin louhintatekniikan laboratoriossa akkukäyttöiset lisävahvistimet. Ne sisältävät kaistanpäästösuotimen ja ne kytketään geofonin ja jatkojohdon väliin (kuva 40).



Kuva 40. Akkukäyttöinen geofonin lisävahvistin, kaistanpäästösuodin voidaan kytkeä myös pois päältä.

Kaistanpäästösuodin päästää läpi vain hyvin kapean taajuusalueen geofonin resonanssitaajuuden molemmiin puolin. Lisävahvistimen kokonaisvahvistus on noin 20 dB. Kuvassa 41 on esitetty käytetyn mittauslaitteiston kaaviokuva.





Kuva 41. Käytetyn mittauslaitteiston kaaviokuva.

Geofonin lisävahvistimen todellista vahvistusastetta ei pystytä tarkasti määrittämään. Tästä syystä työssä esitetyt kokonaisvahvistuksen arvot eivät vastaa aiempien Adeltalla suoritettujen mittausten kokonaisvahvistuksen arvoja.

Nykykunnossa laitteella ei pystytä määrittämään mikroseismisen emission syntypaikkaa. Laitteeseen kuuluva piirturi on ollut epäkunnossa koko mittausten ajan. Laitteen kytkinkello ei myöskään toiminut moitteettomasti ja se jouduttiin korvaamaan pistorasiaan liitetyllä kellolaitteella.

### 6.3.2 Arviot mittauksista

Useiden tutkimusten mukaan suurin osa mikroseismisestä emissiosta esiintyy taajuusalueella 15 - 30 kHz /9, 19, 25/. Suoritetuissa mittauksissa mikroseismistä emissiota on mitattu taajuudella 1200 Hz. Tällöin suurin osa mikroseismisestä emissiosta on todennäköisesti jäänyt havaitsematta. Korkean taajuusalueen käytöllä päästäisiin myös eroon monista häiriöäänistä.

Automaattiseen mikroseismiseen laitteeseen rakennetut kaistanpäästösuotimet eivät kyenneet suodattamaan pois kaikkia häiriöääniä. Erityisesti louhintaporauksen ollessa käynnissä

lähetyvillä laskurit rekisteröivät siitä aiheutuvia ääniä. Tämän vuoksi voitiin mikroseismisiä mittauksia suorittaa vain viikonloppuisin, jolloin louhinta ei ollut käynnissä. Käytetty laitteisto on muuten osoittautunut kestäväksi ja varmatoimiseksi.

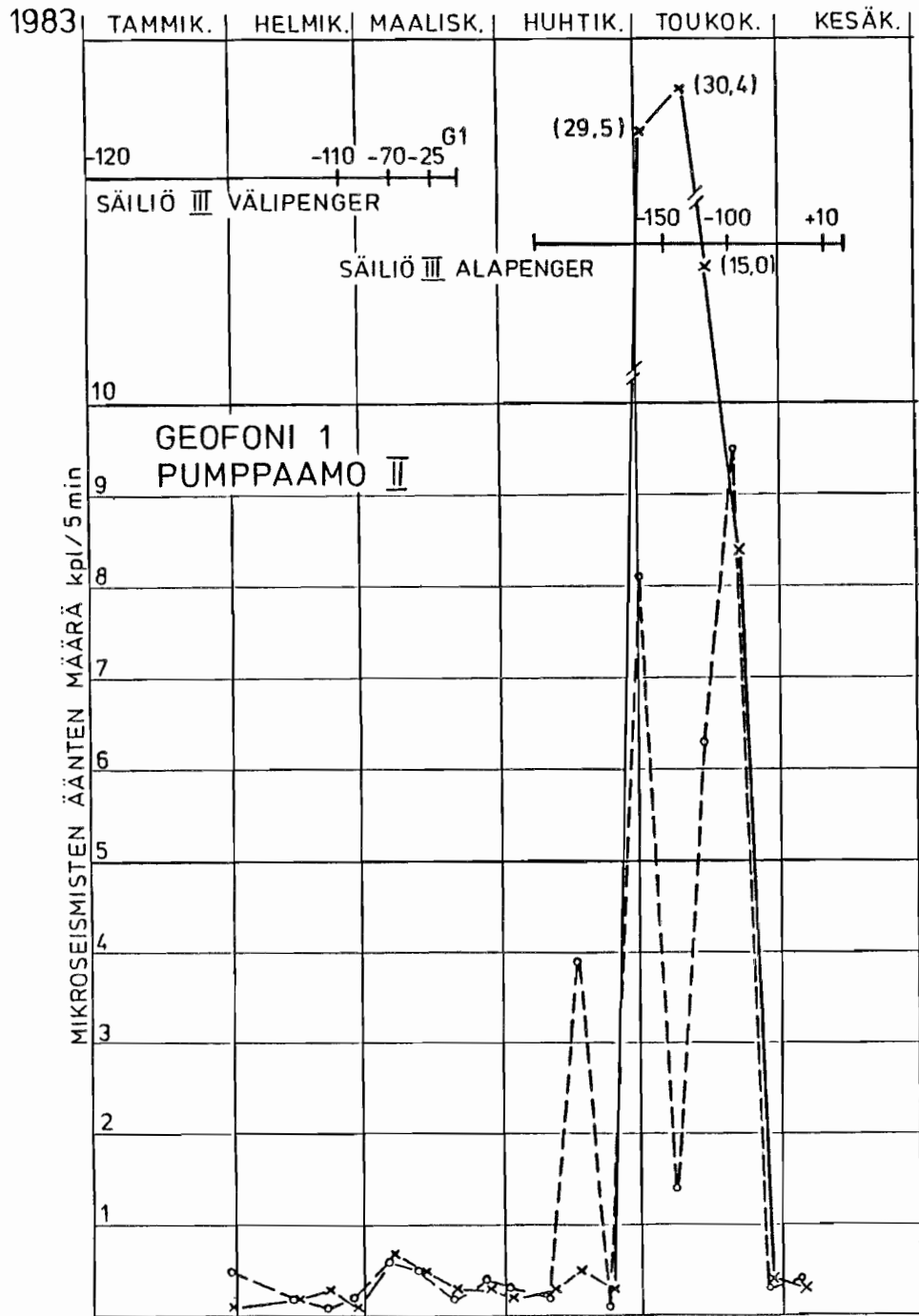
### 6.3.3 Tulokset louhinnan edetessä

Kattoperälouhinnan aikana mikroseismisiä ääniä kuunneltiin kannettavalla mikroseismisellä laitteella. Kuunteluissa käytettiin laitteen vahvistusasentoa 7 (todellisen vahvistuksen määrä ei ole tiedossa). Kaikki kuullut mikroseismiset äänet laskettiin mukaan. Kattoperävaiheen aikana mikroseismisiä ääniä havaittiin 0 - 30 kpl/5 minuuttia.

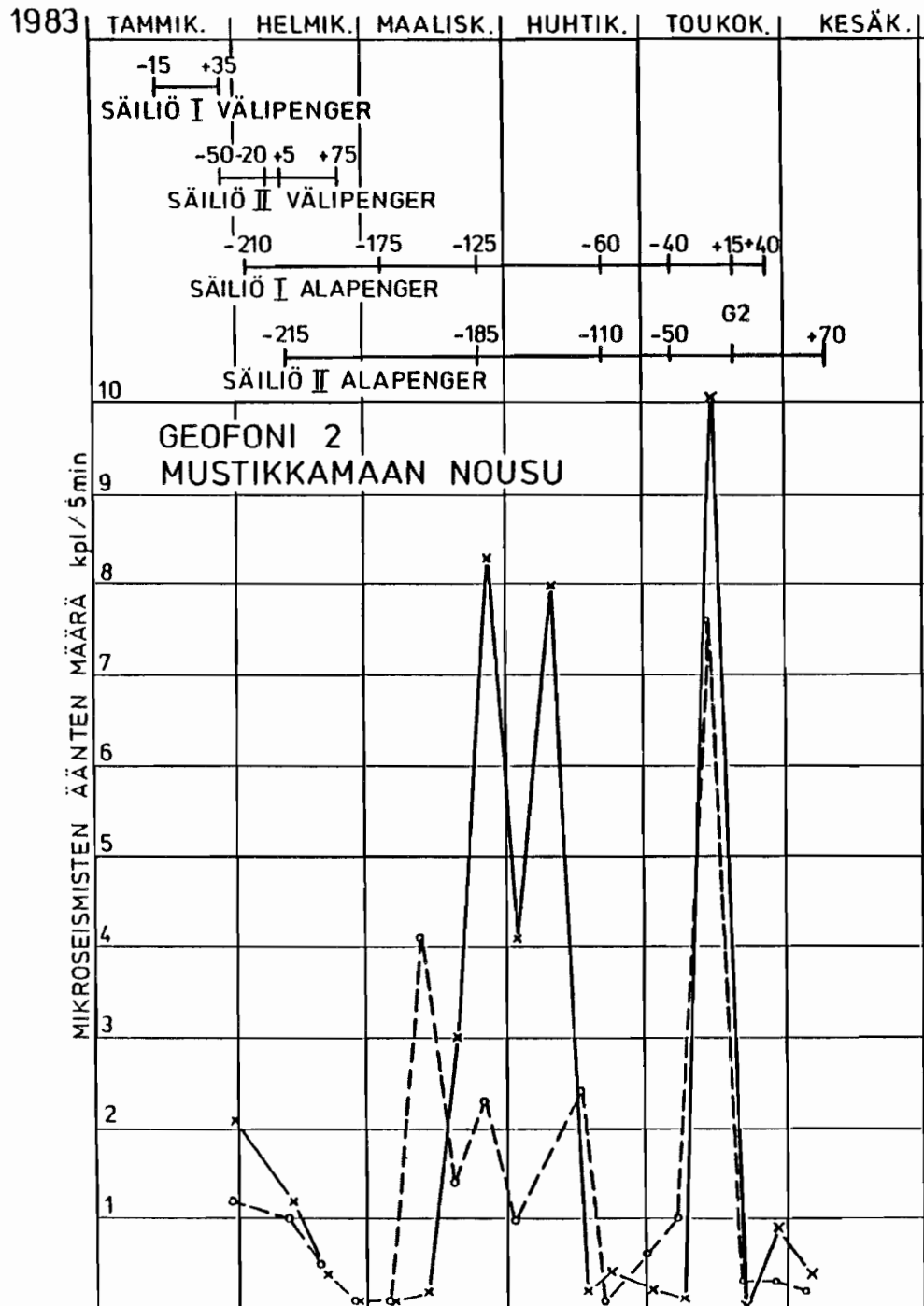
Automaattisen mikroseismisen laitteen geofoni 1 sijaitsi pumppaamossa II ja geofoni 2 Mustikkamaan nousun läheisyydessä. Geofonien välimatka oli noin 100 m. Mittauksissa vahvistus oli 50 dB ja suodatus 5 dB, joten kokonaisvahvistus oli 45 dB. Suodatuksen suuruudesta johtuen laitteisto on rekisteröinyt vain hyvin voimakkaat mikroseismiset äänet. Geofonien suuren keskinäisen etäisyyden vuoksi saman mikroseismisen emissiolähteen signaalit eivät aina kulkeudu molempiin geofoneihin.

Mittaustuloksista on piirretty mikroseismisten äänten lukumäärä aikayksikössä havaintopäivien funktiona. Käyrissä yksi havaintopiste vastaa keskiarvoa 6 tunnin aikana mitattujen mikroseismisten äänien määrästä. Kuuden tunnin pituinen havaintojakso on mitattu 16 ja 38 tunnin kuluttua louhintaräjähdyksestä.

Kuvassa 42 on esitetty geofonin 1 havaitsema mikroseisminen aktiivisuus. Mikroseismisiä ääniä on säiliön II länsipäässä esiintynyt hyvin vähän. Välipenkereen louhinnan aikana ja noin kuukauden ajan sen jälkeen mikroseisminen aktiivisuus on vaihdellut vain hieman. Huhti-toukokuussa on muutamana viikonloppuna mikroseisminen aktiivisuus ollut suurempaa kuin aiemmin. Huippuarvo 30 kpl/5 min ei kuitenkaan ole mitenkään erityisen suuri arvo.



Kuva 42. Geofonin 1 havaitsema mikroseisminen aktiivisuus.  
 ○---○ louhintaräjähdyksestä 16 tuntia,  
 x---x louhintaräjähdyksestä 38 tuntia,  
 louhintatilanne metreissä geofoniin päin (-).



Kuva 43. Geofonin 2 havaitsema mikroseisminen aktiivisuus.  
 o---o louhintaräjähdyksestä 16 tuntia,  
 x—x louhintaräjähdyksestä 38 tuntia,  
 louhintatilanteet metreissä geofoniin päin (-)  
 ja geofonista poispäin (+).

Kuvassa 43 on esitetty geofonin 2 havaitsema mikroseisminen aktiivisuus säiliöiden I ja II välisen pilarin länsiosassa. Kuvasta 43 havaitaan, että mikroseisminen aktiivisuus on kasvanut, kun säiliöiden I ja II välipenger on louhittu loppuun. Huippuarvon 4 kpl/5 min jälkeen aktiivisuus on palannut normaalille tasolle. Alapenkereiden louhinnan aikana on mikroseismissä aktiivisuudessa ilmennyt muutamia huippuarvoja (max 10 kpl/5 min). Näiden jälkeen aktiivisuus on palannut normaalille tasolle.

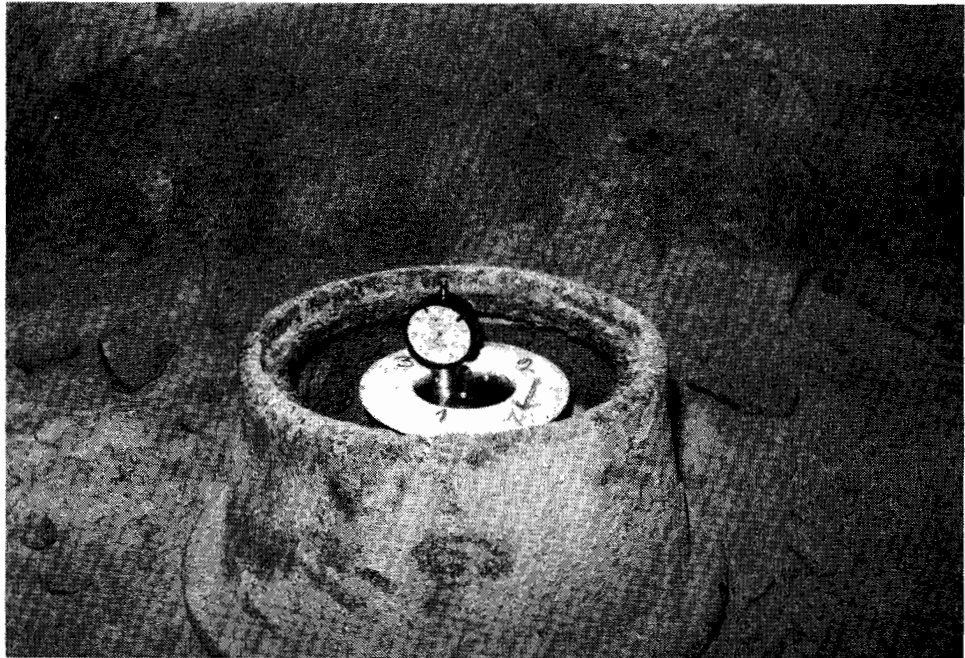
On aivan normaalia, että tuloksissa esiintyy huippuarvopiikkejä. Tärkeätä on, että huippuarvon jälkeen tapahtuu paluu normaalille tasolle. Vaarallinen tilanne syntyy, jos mikroseisminen aktiivisuus huippuarvon jälkeen jää pysymään korkealle tasolle.

#### 6.4 Muodonmuutosmittaukset

Pääasiallisin muodonmuutosmittausmenetelmä säiliöryhmässä on ekstensometrimittaukset. Tarkkailumittauksia suunniteltaessa päätettiin tehdä myös maanpäällinen tarkkavaaitus ja mitata säiliössä mahdollisesti ilmeneviä rakoja. Varsinaista rakojen liikkeen mittausta ei kuitenkaan tehty, vaan rakoja tarkkailtiin visuaalisin menetelmin. Myöhemmin päätettiin tehdä myös konvergenssimittauksia yhdessä säiliössä sopivalla kohdalla.

##### 6.4.1 Ekstensometrimittaukset

Alunperin säiliöalueelle asennettiin yksi Interfelsin kolmipiste-ekstensometri E 1 säiliöiden I ja II väliseen pilariin (liite 7). Myöhempien kolmidimensionaalisten jännitystila-mittausten perusteella asennettiin yksi kaksipiste-ekstensometri E 2 ja yksi kolmipiste-ekstensometri E 3 säiliöiden II ja III väliseen pilariin (liitteet 8 ja 9). Ekstensometrien asennuksen on tehnyt Suomen Malmi Oy ja mittaamisen on suorittanut kirjoittaja. Mittauksessa on käytetty mekaanista mittakelloa (kuva 44).



Kuva 44. Kolmipiste-ekstensometri E 3 ja mittakello.

Ekstensometrien mittauspään suojaukseen ei asennusvaiheessa osattu kiinnittää riittävästi huomiota. Tästä oli seurauksena kaikkien ekstensometrien mittauspäiden vahingoittuminen louhintatyön jossain vaiheessa. Ekstensometri E 1 sijaitsee Mustikkamaalle johtavan nousun alapuolella. Nousun päältä suojaverkon ohi tai läpi tippunut laudanpätkä rikkoi ensin mittauspään. Myöhemmin kun ekstensometrin mittauspää oli korjattu, nousun pohjalla oleva vesi jäättyi. Tällöin mittauspää vioittui jälleen jään liikkeiden vuoksi. Tuuletusilma ime-tään nousun kautta säiliöihin, joten jäätyminen oli mahdollista pakkasaikaan. Kun ekstensometri saatiin jälleen kuntoon, sen mittauspää lämpöeristettiin polystyreenilevyillä ja suojattiin polystyreenilevyillä vuoratulla tynnyrin puolikkaalla (kuva 45).

Tällä tavoin suojattuna ekstensometrin mittauspää kesti kunnossa. Ekstensometrin sijoittaminen nousun alapuolelle ei ole suositeltavaa. Edellämainittujen haittojen lisäksi noususta valuva vesi hankaloittaa mittausta. Tähän sijoitukseen päädyttiin kuitenkin sen takia, että nousu oli halutussa mit-tauskohdassa ainoa paikka, jossa nykyaikainen iskuporakone sopi korkeutensa puolesta työskentelemään. Timanttikairauk-sena olisi reiän teko tullut huomattavasti hitaammaksi ja



Kuva 45. Ekstensometrin E 1 mittauspään suojaus.

kalliimmaksi. Ajokäytävän katossa sijaitsevan ekstensometrin E 2 mittauspää vaurioitui tulppauraa louhittaessa sinkoilleista kivistä. Ekstensometri saatiin korjattua pian. Ekstensometri E 3 pysyi pitkään kunnossa, koska se oli upotettu tukevan teräksisen suojakannen sisään. Se kesti hyvin yliajavien raskaiden louhedumppereiden liikenteen. Kun ajo kyseisessä tunnelissa loppui ja tunnelin pohja puhdistettiin irtoaineksestä, kolhaisivat puhdistustyön tekijät mittauspäästä kaivurilla. Mittauspää vioittui, mutta se saatiin korjattua jo seuraavana päivänä.

Aluksi piirrettiin siirtymäkäyrät ekstensometrimittausten mittakellon lukemien erosta ensimmäiseen mittaukseen verrattuna (esimerkkinä kuva 48). Kyseisistä käyristä ei kuitenkaan käy selville kiinnityspisteiden todelliset liikkeet, sillä mittaustaso (ekstensometrin yläpää) liikkuu myös. Ekstensometriä kiinnityspisteiden ja mittauspään todellisten siirtymien käyrät on piirretty olettaen, että alin kiinnityspiste pysyy paikoillaan. Muita kiinnityspisteitä on sitten verrattu alimpaan kiinnityspisteeseen. Ekstensometrin E 1 alimman kiinnityspisteen paikoillaan pysymistä seurattiin tarkkaavaa vaaituksella. Hankalien vaaitusolosuhteiden takia vaaituksen

virhe tuli kuitenkin suureksi. Tällöin ekstensometrin E 1 alimman kiinnityspisteen paikoillaan pysymistä ei saatu varmistettua. Kuitenkin koska ekstensometriin E 1 ja E 3 alin kiinnityspiste on säiliöiden pohjatason alapuolella, voidaan alinta kiinnityspistettä pitää liikkumattomana.

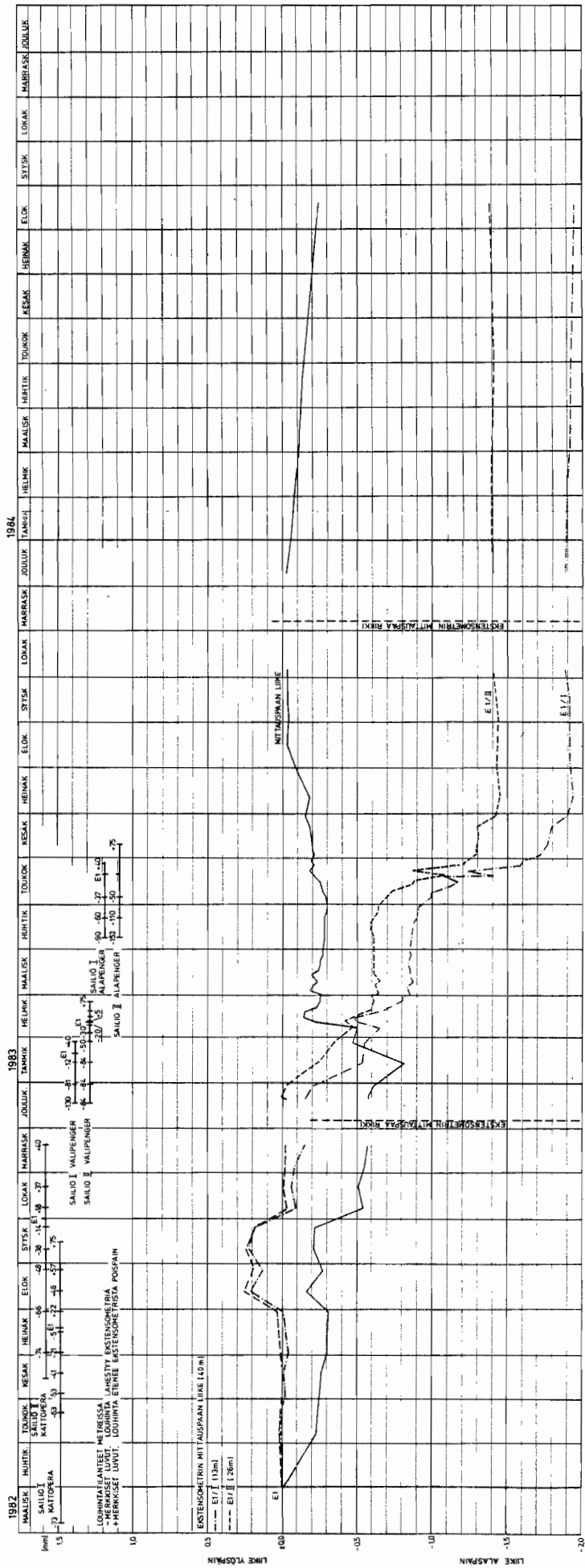
Kuvassa 46 on esitetty ekstensometrin E 1 kiinnityspisteiden I ja II sekä mittauspään todelliset siirtymät. Kuvasta 46 havaitaan, että kattoperälouhinnan aikana säiliöiden I ja II välinen pilari on puristunut kokoon. Välipenkereen louhinnan aikana pilarin kokoonpuristuma on pienentynyt. Alapenkereen louhinnan aikana pilarin sisällä on tapahtunut liikettä, vaikka ekstensometrin yläpää on pysynyt lähes paikallaan. Siirtymät ovat pysähtyneet kolme kuukautta louhinnan loppumisen jälkeen.

Kuvassa 47 on esitetty ekstensometrin E 3 kiinnityspisteiden I ja II sekä mittauspään todelliset siirtymät. Ekstensometrin kiinnityspisteessä E 3/I on ensimmäisen ja toisen mittauksen välillä tapahtunut 1.0 mm:n siirtymä. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että kiinnitysankkuri on päässyt liikkumaan juotoksen kovettumisen aikana. Kiinnityspisteen E 3/II siirtymäkäyrä on piirretty myös nollassa lähteväksi. Kuvasta 47 havaitaan, että säiliöiden II ja III välinen pilari on aluksi puristunut kokoon. Kun välipenkereen louhinta säiliössä II on ohittanut ekstensometrin, pilari on alkanut laajeta. Alapenkereiden louhinnan aikana pilarin kokoonpuristuma on jälleen kasvanut. Kulkuyhteyden katkeamisen vuoksi ekstensometrin E 3 mittaus jouduttiin lopettamaan lokakuussa 1983.

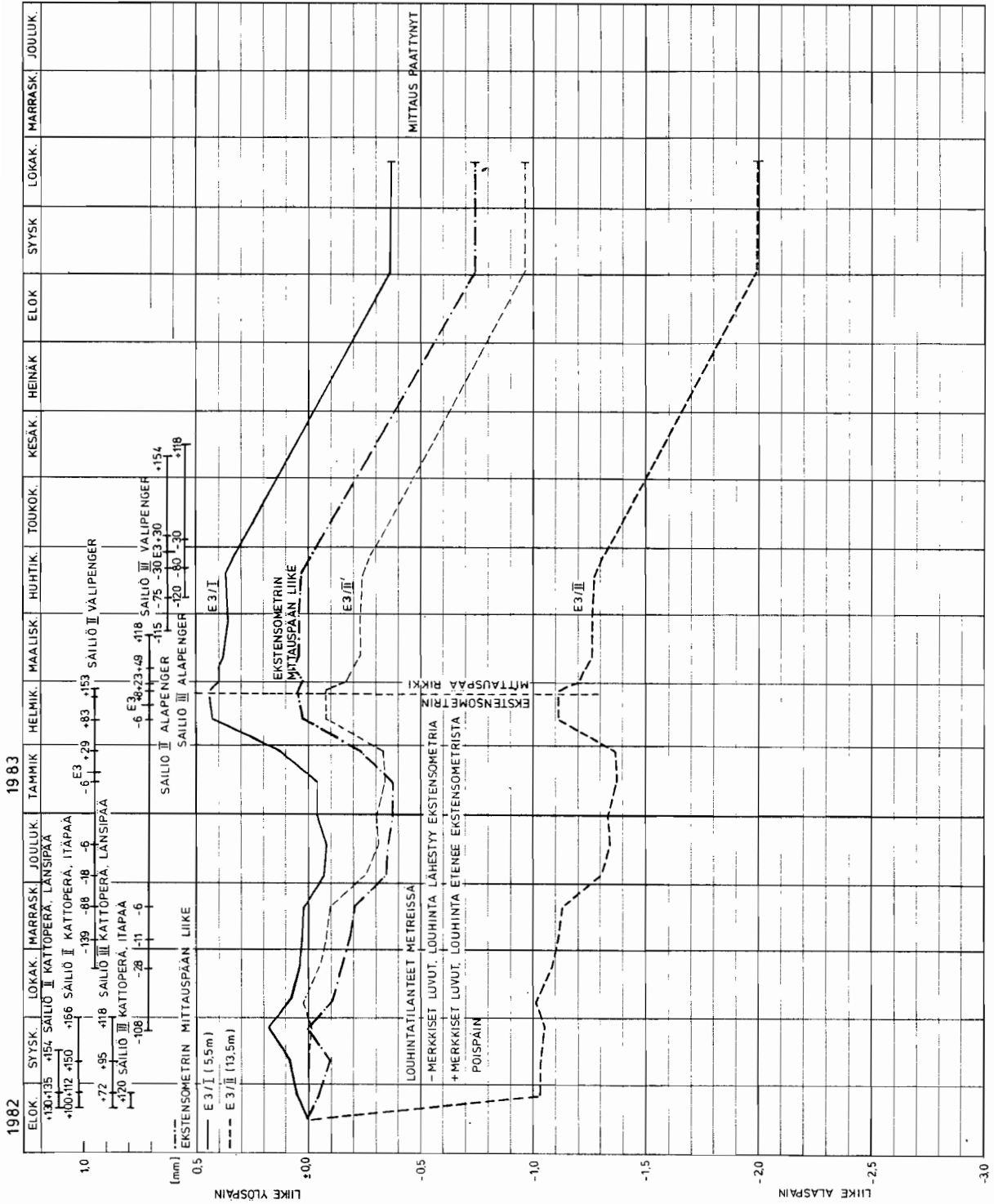
Kuvassa 48 on esitetty ekstensometrin E 2 mittauspään ja kiinnityspisteiden (I, II ja III) välinen liike. Tulosten tulkintaa ei voida tehdä, koska kiinnityspisteiden todellisia siirtymiä ei tiedetä.

Ekstensometriin E 1 ja E 3 kiinnityspisteiden ja mittauspään siirtymien havainnollistamiseksi siirtymäkäyrät on piirretty ekstensometrissä tutkittavien pisteiden kohdalle (kuvat 49 ja 50). Edellämainituissa kuvissa siirtymien suunta on myös piirretty todellisen mukaisesti.

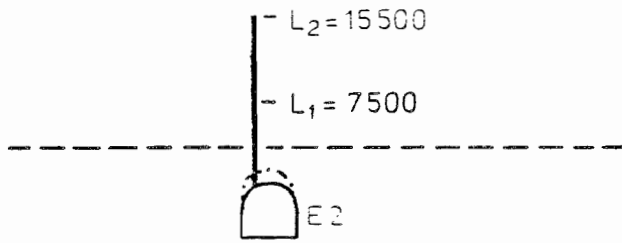




Kuva 46. Ekstensometrinen E 1 mittauspaikan sekä kiinnityspisteiden I ja II todelliset siirtymät.



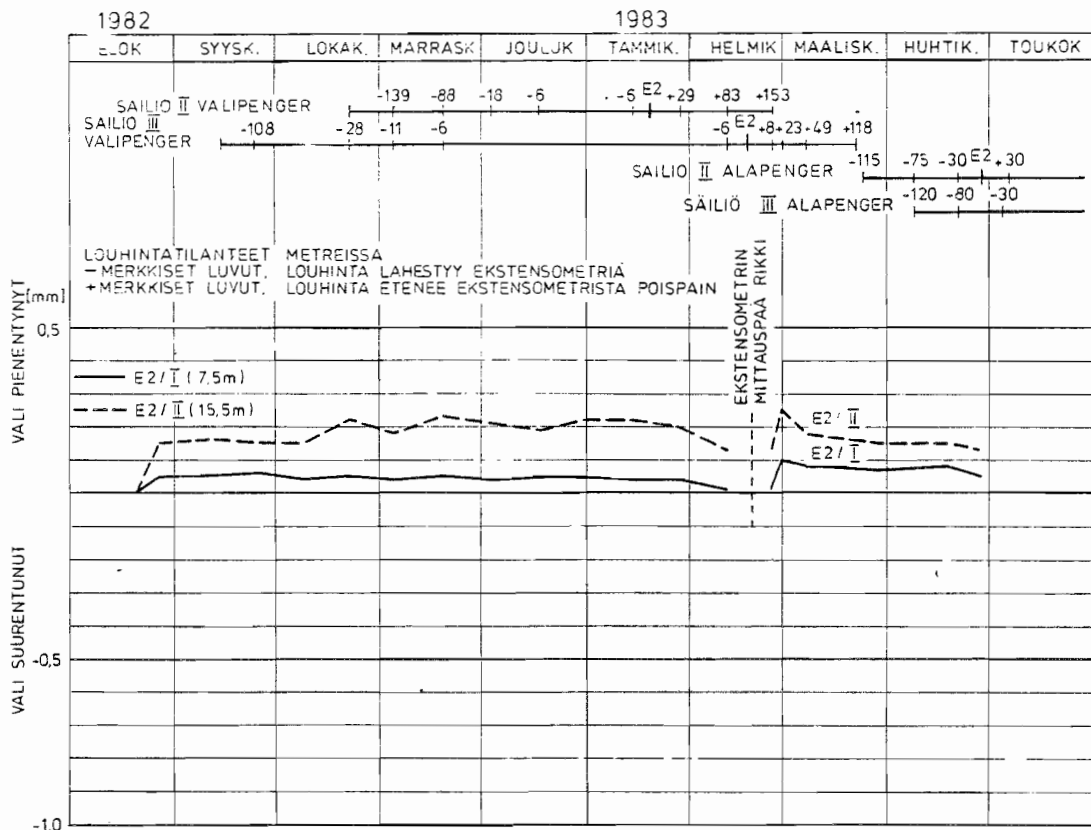
Kuva 47. Ekstensometrinen E 3 mittauspään sekä kiinnityspisteiden I ja II todelliset siirtymät.



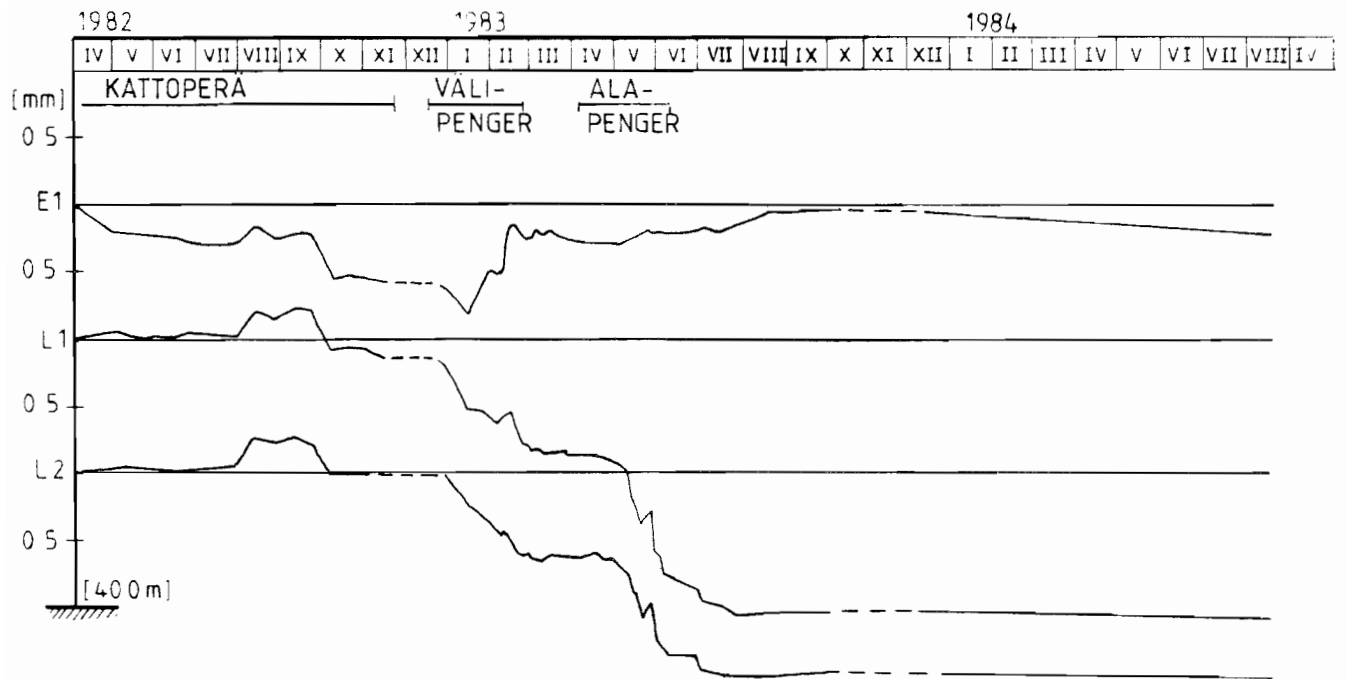
PILARI SAILIOIDEN III JA II VALISSA



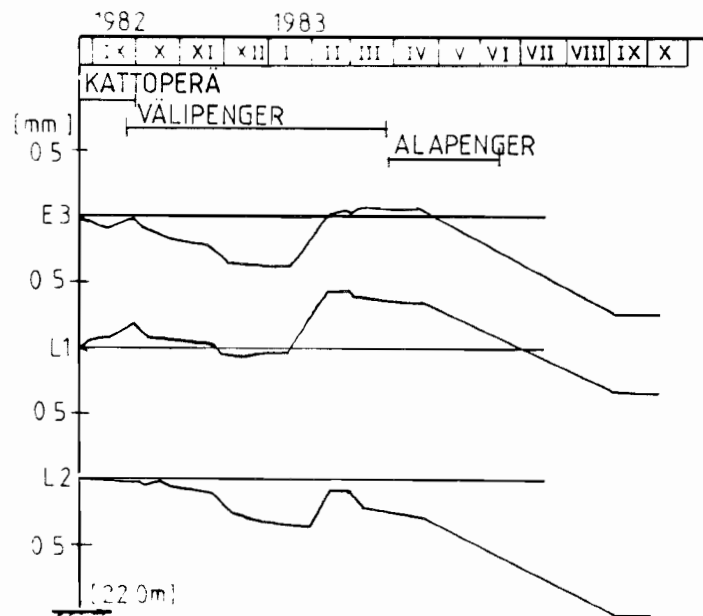
EKSTENSOMETRI SÄILIÖIDEN II JA III VALISESSA  
PILARISSA KESKELLÄ, KATTOPERAVAIHEEN  
AJOTUNNELIN KATOSTA YLOSPAIN



Kuva 48. Ekstensometrin E 2 mittauspään ja kiinnityspisteiden (I ja II) välinen siirtymä.



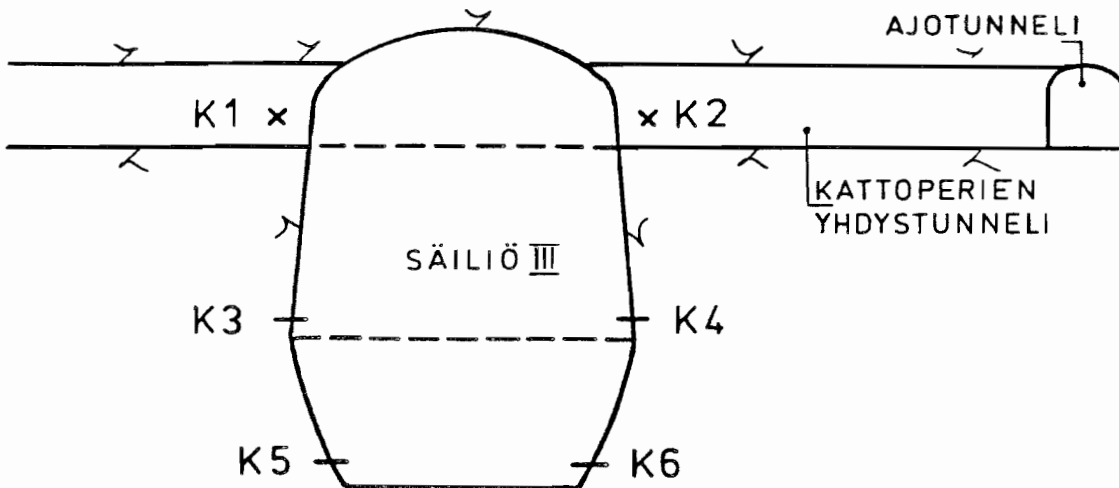
Kuva 49. Ekstensometrin E 1 mittauspään ja kiinnityspisteiden todellinen liike pisteittäin.



Kuva 50. Ekstensometrin E 3 mittauspään ja kiinnityspisteiden todellinen liike pisteittäin.

#### 6.4.2 Konvergenssimittaukset

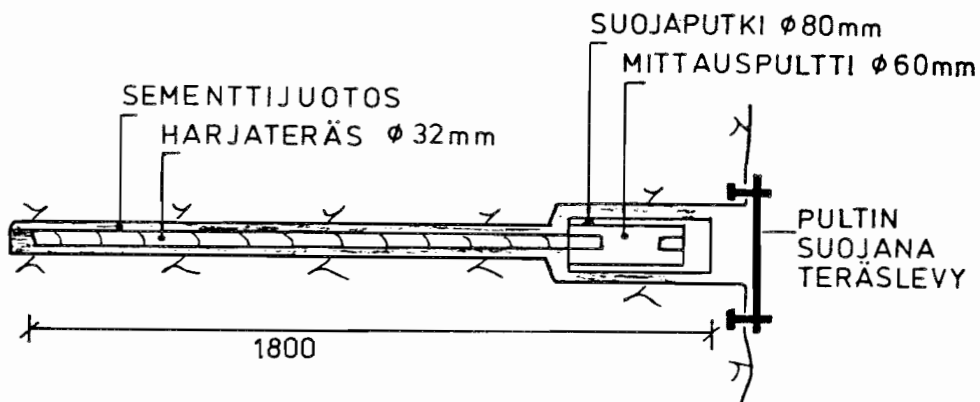
Säiliön seinien käyttäytymistä päätettiin tutkia konvergenssimittausten avulla. Mittauspaikaksi valittiin säiliön III kattoperien yhdystunnelin ja varsinaisen säiliön risteyskohta. Kuvassa 51 on esitetty poikkileikkaus kyseisestä kohdasta.



Kuva 51. Konvergenssimittauspisteet säiliössä III.

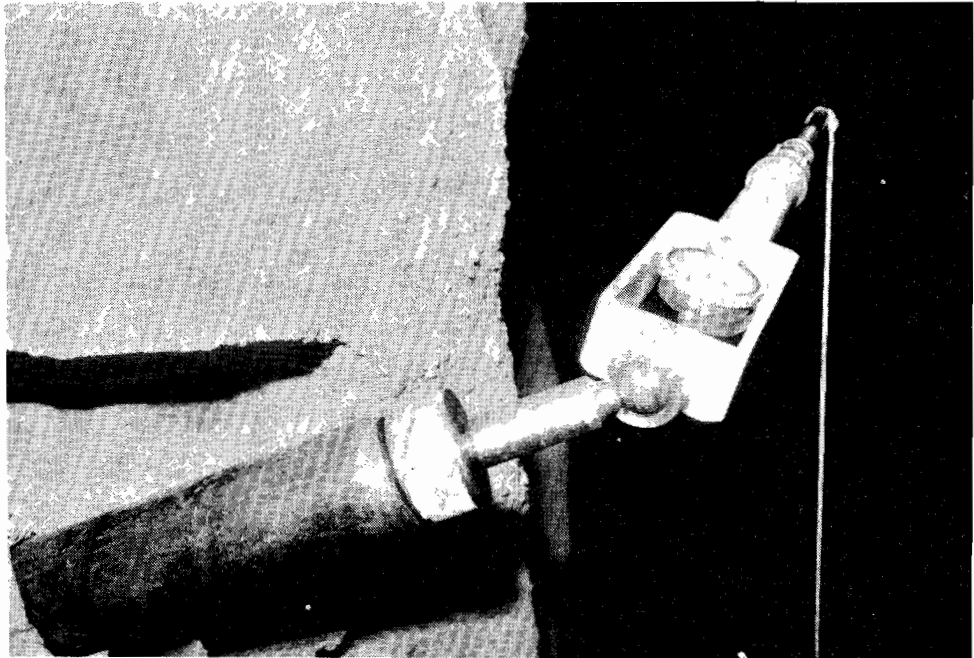
Mittauksissa käytettiin Interfelsin konvergenssimittaria, jossa nauhan pituus on 25 m. Konvergenssipultit tehtiin normaalia jykevämmiksi ja pitemmiksi. Tällä haluttiin varmistaa, että pultit eivät ole kiinni irtolohkareissa.

Kuvassa 52 on esitetty halkileikkaus käytetystä konvergenssimittauspultista.



Kuva 52. Konvergenssimittauspultti kalliassa.

Mittauksen ajaksi pultin päähän kiinnitettiin 30 cm pitkä halkaisijaltaan 6 cm oleva jatkokappale. Kuvassa 53 on esitetty konvergenssimittarin mittakellopään kiinnitys mittauspulttiin.



Kuva 53. Konvergenssimittarin mittakellopään kiinnitys mittauspulttiin.

Konvergenssimittausten tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Konvergenssimittaustulokset, muutoslukema on positiivinen, kun mittauspisteiden välimatka on lyhentynyt.

Pulttiväli	Pvm	Louhintatilanne	Pulttien välinen liike (mm)
K 1 - K 2 (~23.10 m)	11.2.83	kattoperä louhittu	0
	12.3.83	välipenger louhittu	7.64
	27.3.83	"	4.67
	27.4.83	"	5.35
	7.10.83	alapenger louhittu	9.34
K 1 - K 4 (~24.40 m)	27.3.83	välipenger louhittu	0
	27.4.83	"	1.27
	7.10.83	alapenger louhittu	7.94
K 3 - K 2 (~25.00 m)	27.3.83	välipenger louhittu	0
	27.4.83	"	1.45
	7.10.83	alapenger louhittu	8.49
K 3 - K 4 (~19.70 m)	27.3.83	välipenger louhittu	0
	27.4.83	"	0.91 <sup>x)</sup>
	7.10.83	alapenger louhittu	12.29

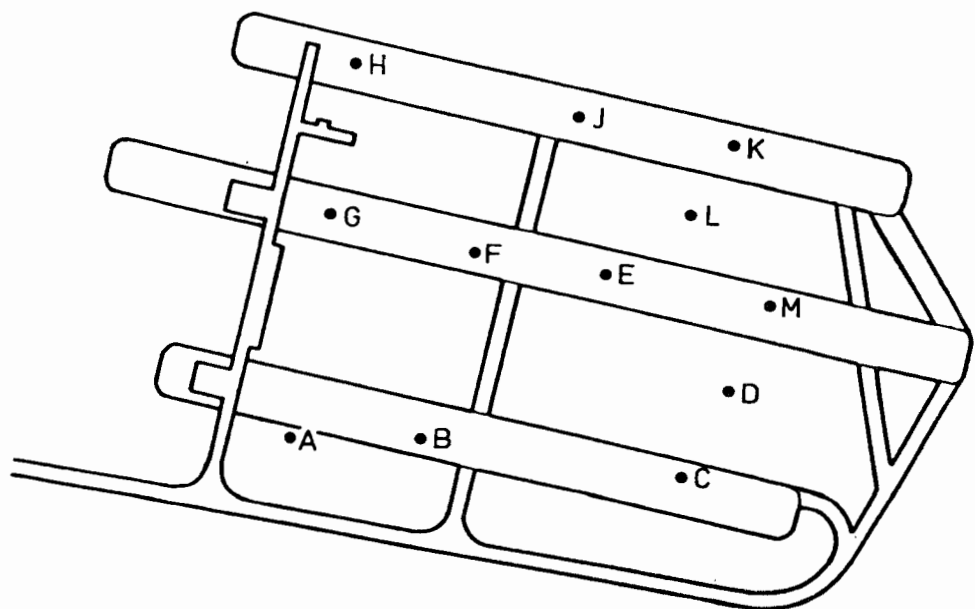
x) lukema edustanee menetelmän virhettä

Alapenkereen tasolla olevia mittauspultteja ei pystytty mittaamaan, koska toinen niistä jäi vahvistustöiden yhteydessä verkolla vahvistetun ruiskubetonin alle. Mittausten mukaan säiliön seinät näyttävät liikkuneen sisäänpäin, mutta osa liikkeestä on todennäköisesti tapahtunut tärinän ja kallion paikallisen löyhtymisen takia. Mittauksissa pystyttiin havaitsemaan vain säiliön seinää vastaan kohtisuora liike.

#### 6.4.3 Tarkkavaaitukset

Mustikkamaan saaren kallioidille asennettiin 12 tarkkavaaituspistettä kesällä 1982. Pisteiden sijainti säiliöiden yläpuolella on esitetty kuvassa 54. Tarkkavaaituspisteinä on pieneen poranreikään kiristetyt paisuntakuoripultit. Pultin yläpäähän ja kallion väli on tiivistetty silikoonimassalla, jotta vesi ei pääsisi poranreikään. Näin estetään pultin mahdollinen liikkuminen talviaikana. Tarkkuusvaaituksessa on käytetty normaalia tarkkavaaituslattiaa ja -konetta. Mustikkamaan saaren kalliopinnan suurien korkeusvaihteluiden vuoksi tarkkavaaitus on hankala suorittaa.

Mittauspisteiden korkeuden kumulatiiviset muutokset on esitetty taulukossa 4. Vaikuttaa siltä, että pintakallio säiliöiden yläpuolella on noussut hieman.



Kuva 54. Tarkkavaaituspisteiden sijainti Mustikkamaan saaren kalliolla.

Taulukko 4. Mustikkamaan tarkkavaaituksen tulokset, vaaituspisteiden siirtymät kymmenesosamilleinä.

Pvm	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
16.08.82	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0
27.10.82	+ 6	+16	+19	+22	-	-	-9	-6	-2	+4	+ 3	-27
08.11.82	+10	+17	+19	+23	-	-	-3	-4	-2	+5	+ 5	-26
16.05.83	+ 8	+16	+16	+23	-	-	+1	+4	+8	+7	+13	- 9
10.11.83	+16	+26	+40	+60	-	-	+3	+3	+1	+13	+14	- 1

#### 6.4.4 Rakojen tarkkailu

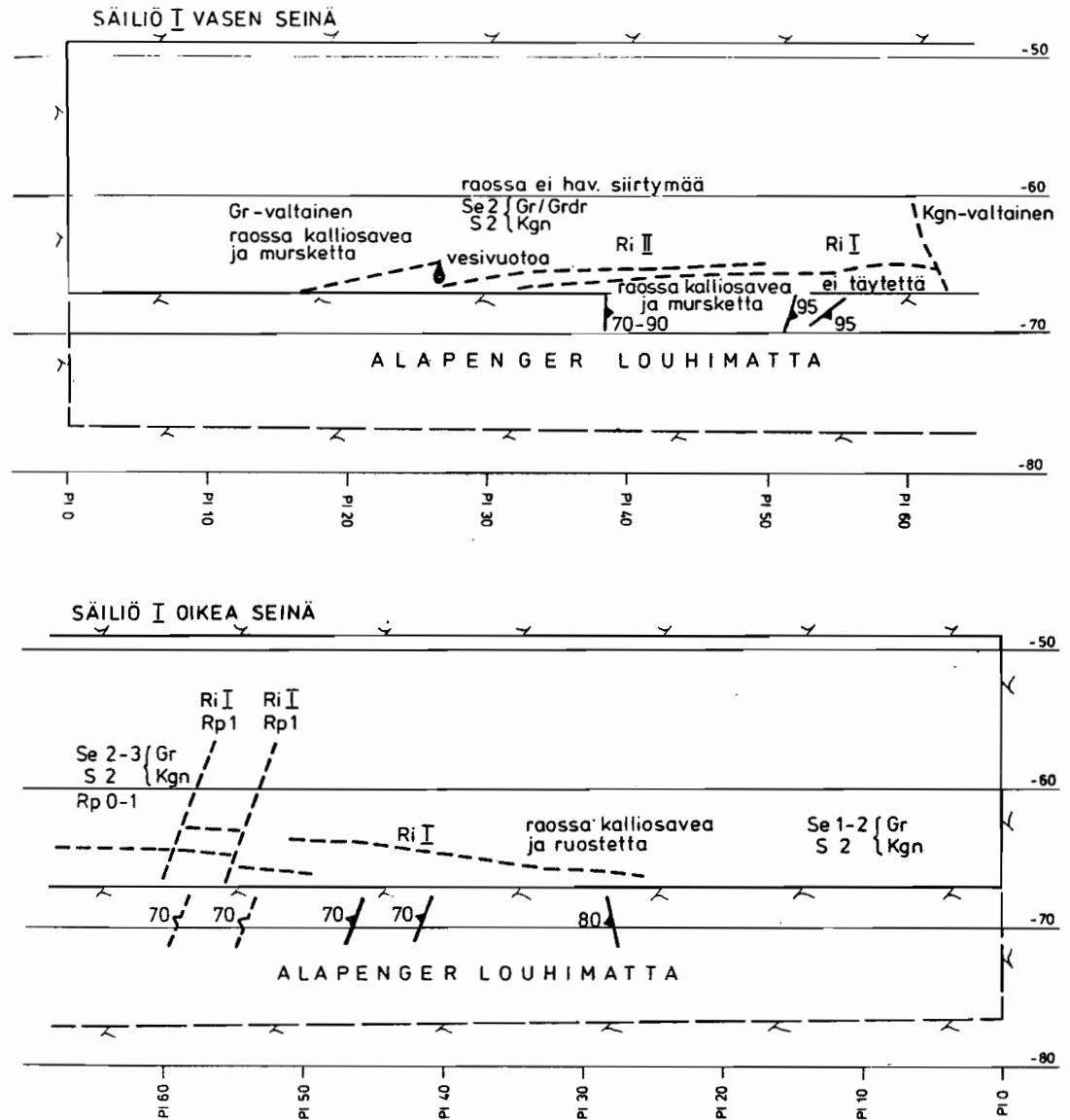
Tammikuun loppupuolella 1983 tuli välipenkereen louhinnassa esiin vaakasuora rakovyöhyke säiliön I länsipäässä. Aluksi raosta vuoti runsaasti miedosti suolaista vettä, mutta parissa päivässä veden tulo loppui. Raon liikkumista on seurattu betoni-indikaattoreilla (kuva 55). Betoni-indikaattorin periaate on selvitetty sivulla 36. Kuvassa 56 on esitetty rakovyöhykkeen rakennusgeologinen kartoitus.

Välipenkereen louhinnan yhteydessä paljastui vaakarakovyöhyke myös säiliön II länsipäästä (kuva 57). Rakovyöhyke ei kuitenkaan ole aivan samalla kohdalla kuin säiliössä I. Tähän ragoon murattiin muutamaa kohtaan betoni-indikaattorit. Rakovyöhykkeessä ei ole havaittu liikettä.



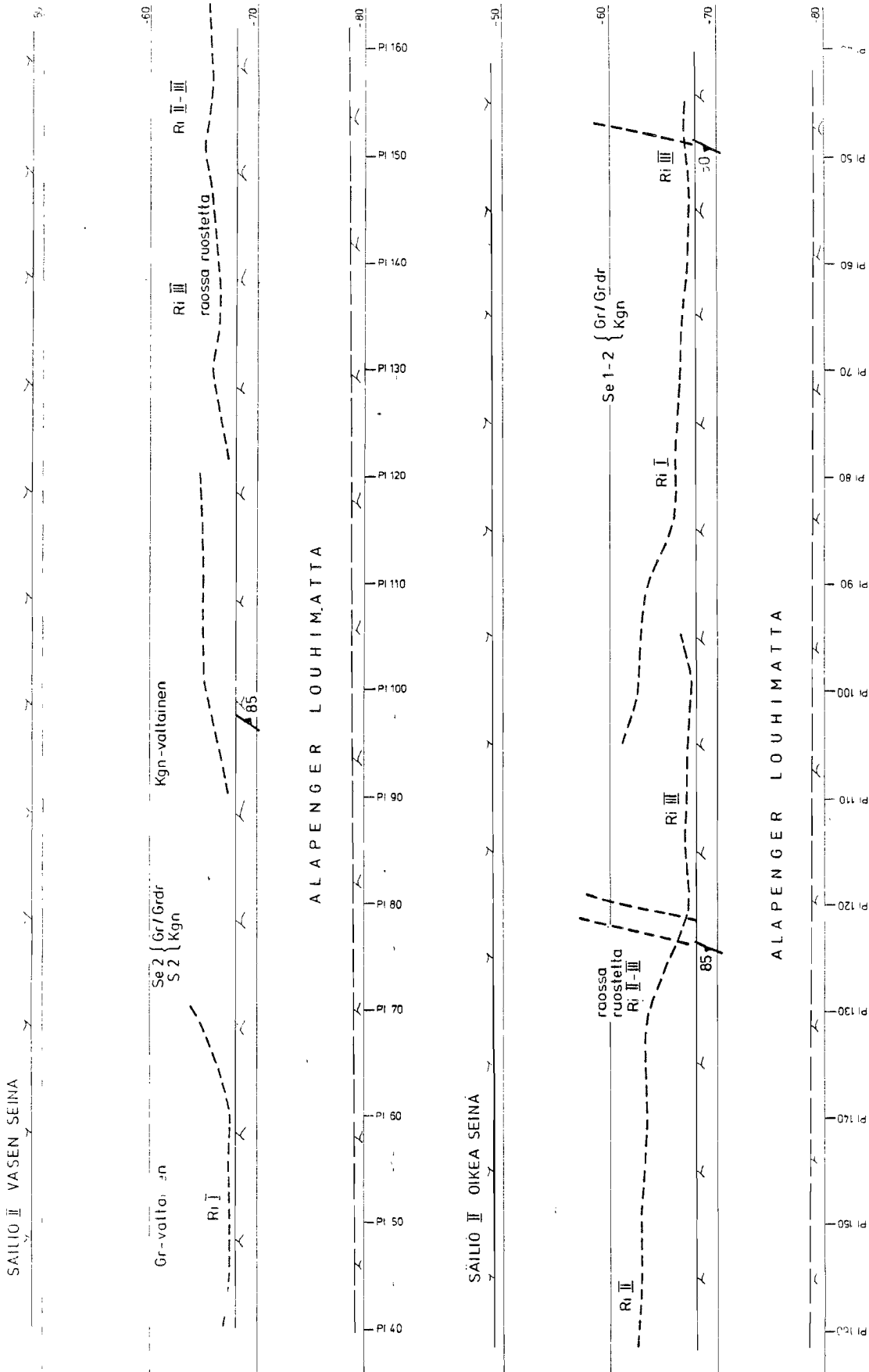
Kuva 55. Betoni-indikaattori raossa säiliön I länsipäässä.





Kuva 56. Säiliön I länsipäässä havaitun rakovyöhykkeen rakennusgeologinen kartoitus.

Säiliöryhmän eri puolille rakoja pitkin vuotavasta vedestä otettiin 10 näytettä ja ne analysoitiin energialaitoksen vesilaboratoriossa. Tuloksista havaittiin, että säiliöön vuotaa pääasiassa suolaista vettä. Vain kahdessa näytteessä oli makeaa vettä. Koko louhintatyön ajan on säiliöihin tulevia vuotovesiä tarkkailtu. Useita kuukausia louhinnan päättymisestä olivat vuotovesimäärät säiliöissä I ja II yhteensä 20 ltr/min, säiliössä III 10 ltr/min ja Mustikkamaan puoleisissa ajokäytävissä 85 ltr/min. Pohjavedenpintaa mitattiin Mustikkamaan saarella kahdesta pisteestä. Mittauksissa todettiin, että pohjavedenpinta ei ole louhintatyön aikana eikä sen jälkeen poikennut vuodenaikavaihteluista.



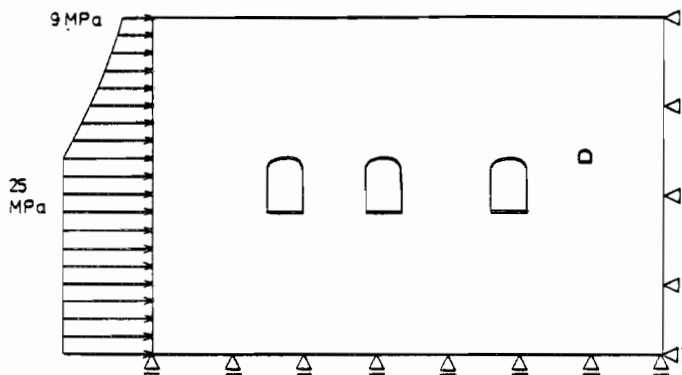
Kuva 57. Säiliön II länsipäässä havaitun rakovyyhykkeen rakennusgeologinen karttoitus.

7. SUORITETUT ELEMENTTILASKENNAT

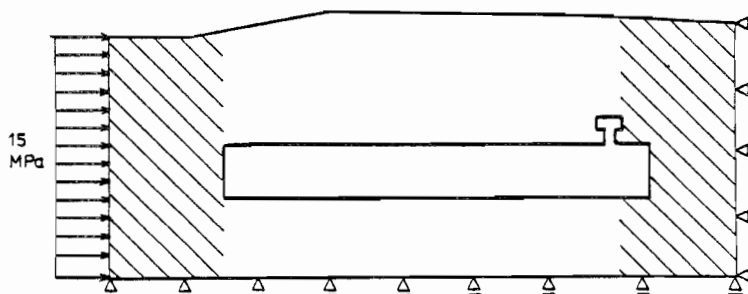
7.1 Tekla Oy:n Finite-elementtilaskelma


Syksyllä 1982 tehtiin Tekla Oy:ssä Hanasaaren syvävaraston jännitysanalyysi. Se tehtiin käyttämällä rakenneanalyysin elementtiohjelmistoa, RAEMO:a, ohjelma perustuu äärellisten alkioiden menetelmään (FEM) ja siinä voidaan käyttää 1-, 2- tai 3-ulotteisia elementtejä. Laskenta pohjautui aiemmin vuonna 1975 Tekla Oy:ssä tehdyn jännitysanalyysin elementti-verkkoihin. Suurin muutos aiempaan laskelmaan verrattuna oli jännitystilän suunnan ja suuruuden muutos.

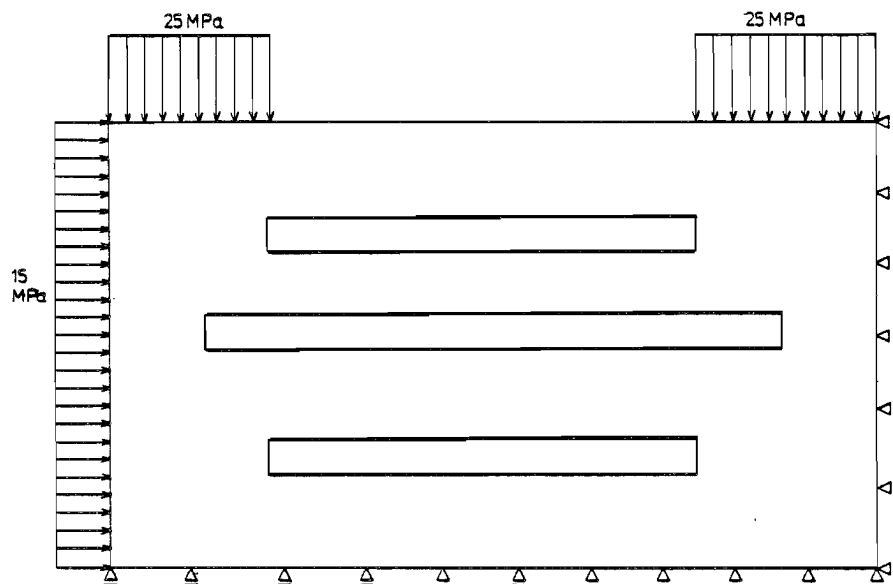
Hanasaaren syvävarastosta tehtiin kolme laskentamallia: poikittaisleikkaus (kuva 58), pitkittäisleikkaus (kuva 59) ja vaakaleikkaus (kuva 60).



Kuva 58. Poikittaisleikkauksen malli ja mallin kuormitus, (malli 50 metriä säiliön III länsipäästä) /35/.



Kuva 59. Pitkittäisleikkauksen malli ja mallin kuormitus.  Kallion paino mukana laskelmassa (säiliön III keskeltä) /35/.

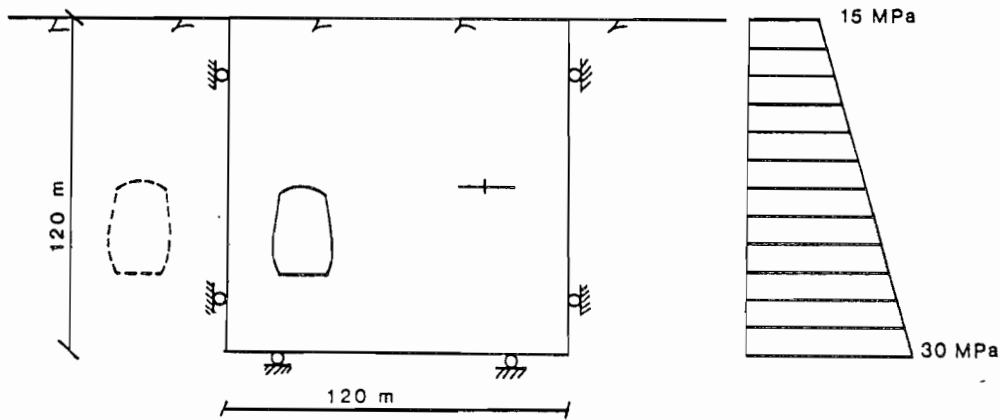


Kuva 60. Vaakaleikkauksen malli ja mallin kuormitus  
(vaakaleikkaus luolien pohjatasossa) /35/.

Laskelmassa käytettiin nelikulmioelementtejä. Kivilajien vaihtelua kuvattiin ohjelmassa käyttäen kolmea kimmomodulin arvoa 63.3 GPa, 73.9 GPa ja 84.4 GPa. Poissonin luvun arvona käytettiin 0.25. Kallion oma painona on käytetty  $2.65 \text{ t/m}^3$ . Tuloksina laskennoista saatiin taulukkotulostus siirtymistä ja jännityksistä, elementtiverkon kuva solmu- ja elementtinumeroineen sisältäen myös 100-kertaiset siirtymät sekä pääjännitysten siirtymäkuva. Laskennan siirtymissä on mukana myös rakennemallin materiaalien oma kokoonpuristuminen ulkoisen kuorman vaikutuksesta. Tämän takia laskennasta ei voida tarkasti määrittää esimerkiksi ekstenso-metreille vertailusiirtymiä /35/.

## 7.2 TKK:n Finite-elementtilaskelma

Teknillisessä korkeakoulussa tehtiin myös elementtilaskelma Hanasaaren syvävarastosta. Laskennassa käytettiin elementti-ohjelmaa SAP 2D. Elementtimalli (kuva 61) oli kahden säiliön muodostama symmetrinen tapaus. Symmetria-akselina oli säiliöiden I ja II välisen pilarin keskikohta.

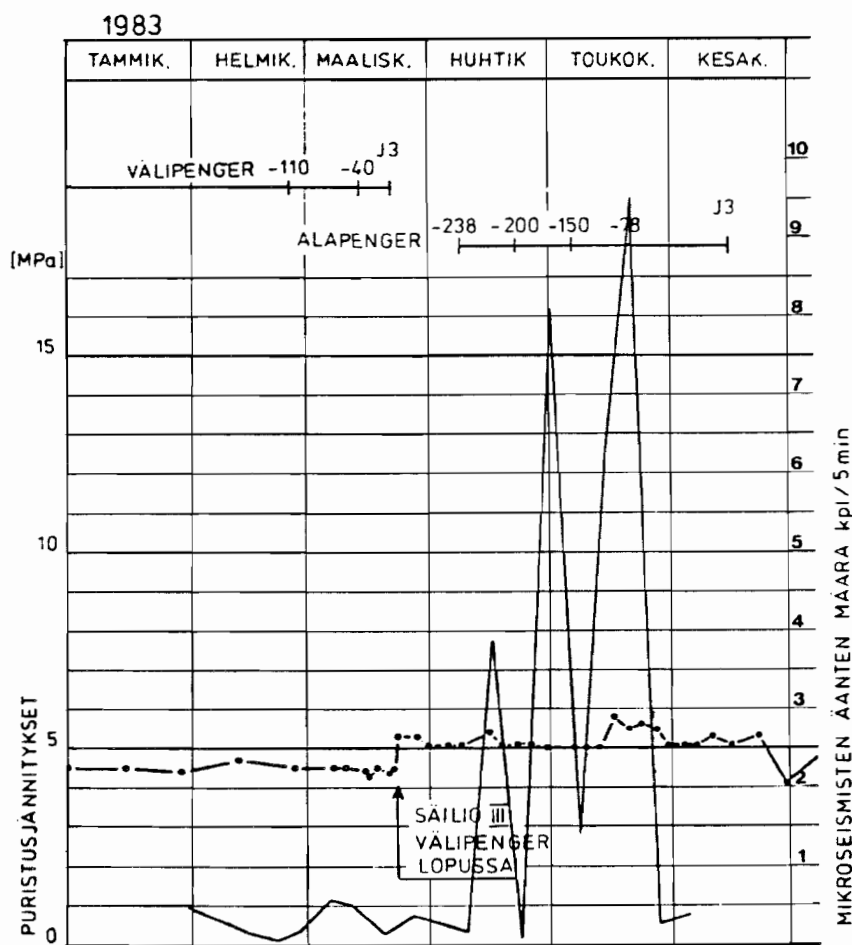


Kuva 61. Laskennan malli.

Säiliön poikkileikkauksen muoto oli toteutettavan poikkileikkauksen muotoinen. Ohjelmassa elementtiverkko generoitiin täyteen elementtejä, jolloin oli mahdollista poistaa elementtejä louhintavaiheen mukaan. Ohjelman lähtöarvoina pyrittiin käyttämään samoja arvoja kuin Tekla Oy:n laskennassa, jotta laskelmat olisivat vertailukelpoisia. Käytetyt materiaaliarvot: kimmomoduli 70 GPa, Poissonin luku 0.25 ja kallion omapaino  $2.65 \text{ t/m}^3$ . Ohjelma käyttää alkujännitystilana sisäistä jännitystilaa. Tällöin lasketuista siirtymistä on vähennetty rakennemallin oman kokoonpuristuman aiheuttamat siirtymät. Tulostus ohjelmasta saatiin kuvina louhintavaiheittain. Seuraavat kuvat saatiin tulostuksena: pääjännitysten siirtymä, siirtymä, puristusjännitysten jakauma, vetojännitysten jakauma ja varmuuskertoimet.

8. ERI MENETELMIEN ANTAMIEN TULOSTEN VERTAILU  
8.1 Mikroseismiset mittaukset verrattuna jännitys-tilamittauksiin

Jännitystila-anturi J 3 ja mikroseismisen laitteen geofoni 1 sijaitsivat molemmat pumppaamossa II, joten niiden antamia tuloksia voidaan verrata keskenään. Kuvassa 62 on esitetty samassa kuvassa jännityksen ja mikroseismisen aktiivisuuden muuttuminen. Mikroseisminen aktiivisuus on mitattu 16 tunnin kuluttua louhintaräjähdyksestä.



Kuva 62. Jännityksen ja mikroseismisen aktiivisuuden muuttuminen pisteessä J 3.

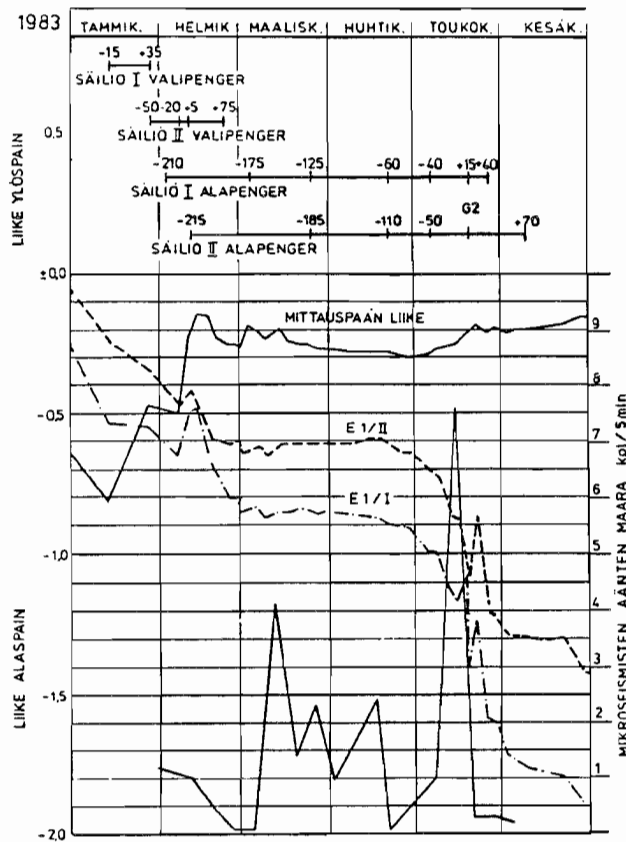
Kuvasta havaitaan, että mikroseisminen aktiivisuus on ollut hyvin pientä ja tasaista (alle 1 kpl/5 min) tammi-huhtikuussa. Samaan aikaan jännitys on ollut pääosin tasaista 4.5 MPa, mutta noussut 5.3 MPa:iin. Jännityksen kasvua ei havaita mikroseismissen aktiivisuuden käyrässä. Kun jännitys on pysynyt tasolla 5.1 MPa, mikroseismissessä aktiivisuudessa havaitaan vaihtelua. Sen sijaan kun jännitys on noussut 5.8 MPa:iin, on juuri sitä ennen havaittavissa mikroseismissen aktiivisuuden kasvu (ensin 6.5 kpl/5 min ja sitten 9.5 kpl/5 min).

Tuloksista voidaan sanoa, että jännitystilän muutos ja mikroseisminen aktiivisuus eivät korreloi hyvin keskenään. Outokumpu Oy:n Pyhäsalmen kaivoksella (Kiminkinen) havaittiin niiden korreloivan keskenään. Kyseisellä kaivoksella suoritetuissa tutkimuksissa havaittiin, että ennen jännitystilän muutosta mikroseisminen aktiivisuus kasvoi. Hanasaaren syvävarastossa jännitys anturissa J 3 on kasvanut niin vähän, että se ei ole aiheuttanut mikroseismissen aktiivisuuden kasvua.

## 8.2 Mikroseismit mittaukset verrattuna ekstensometri mittauksiin

Ekstensometri E 1 ja geofoni 2 ovat 10 m:n päässä toisistaan säiliöiden I ja II välisessä pilarissa. Ekstensometrillä E 1 vertailukäyriksi on otettu kiinnityspisteiden todelliset siirtymät ja mikroseismissistä mittauksista käyrä aktiivisuus 16 tunnin kuluttua louhintaräjähdyksestä. Kuvassa 63 edellä mainitut käyrät on piirretty samaan kuvaan.

Kuvasta 63 havaitaan, että vaikka pilarin puristuma on pienentynyt mikroseisminen aktiivisuus on myös pienentynyt. Kun ekstensometrillä siirtymäkäyrät ovat pysyneet suhteellisen tasaisena, on mikroseismissen aktiivisuuden käyrässä havaittavissa vaihtelua. Hanasaaren syvävarastossa mikroseisminen aktiivisuus ei korreloinut hyvin ekstensometri mittauksien kanssa.



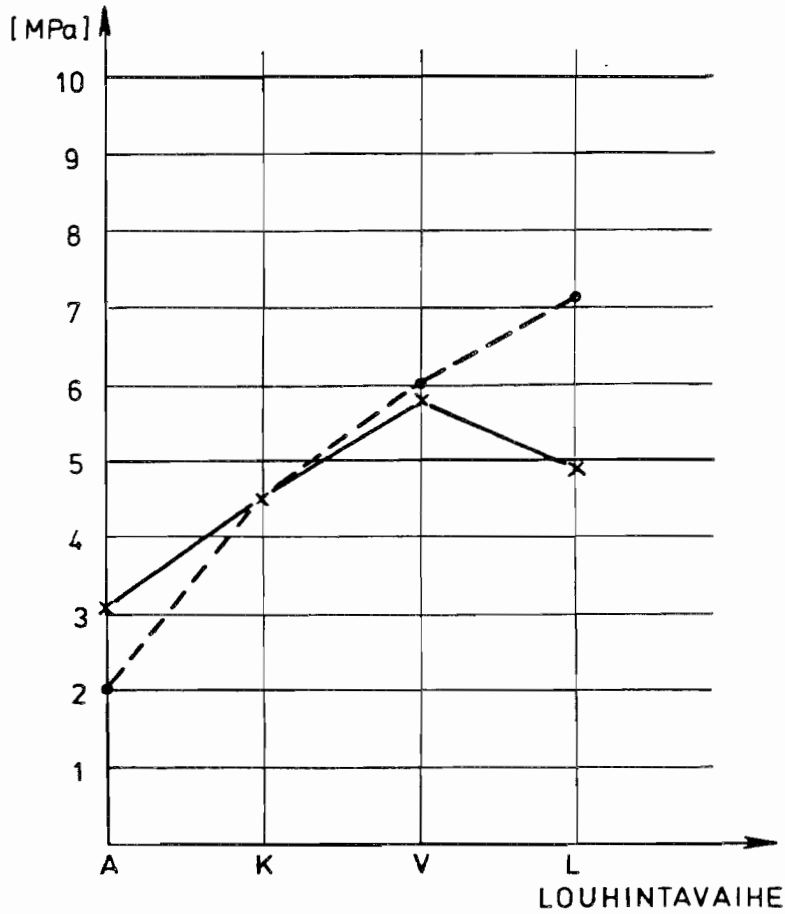
Kuva 63. Mikroiseisminen aktiivisuus 16 tunnin kuluttua louhintaräjähdyksestä ja ekstensometrin E 1 kiinnityspisteiden siirtymät.

### 8.3 Jännitystilamittaukset verrattuna elementtilaskelmiin

Vertailussa käytetään molempia elementtilaskelmia. TKK:n laskelmasta saadaan jännityksen muuttuminen louhintavaiheittain ja Tekla Oy:n laskelmasta jännitystila, kun säiliöt oli louhittu kokonaan.

TKK:n laskelmaa on verrattu jännitysenturin J 3 antamiin tuloksiin. Itseasiassa TKK:n laskelma ei ole aivan sama tilanne, mitä anturin J 3 sijainti todellisuudessa edellyttäisi. Erona on säiliöiden II ja III välisen pilarin paksuus. Todellisuudessa se on 50 m, kun taas laskelmassa se on 35 m. Kuvassa 64 on esitetty vertikaalijännityksen muuttuminen louhintavaiheittain sekä laskelmassa että mittauksissa.





Kuva 64. Mitatut ja lasketut jännitysarvot pisteessä J 3  
 A = Primaarijännitys  
 K = Sekundaarijännitys, kattoperä louhittu  
 V = Sekundaarijännitys, välipenger louhittu  
 L = Sekundaarijännitys, alapenger louhittu  
 — Mitattu jännitys  
 -- Elementtilaskennan mukainen jännitys

Kuvasta 64 havaitaan, että mitatut jännitysarvot vastaavat jokseenkin laskennallisia jännitysarvoja.

Taulukossa 5 on esitetty mitatut ja lasketut jännitysarvot 10 kk louhinnan päätyttyä.

Taulukko 5. Mitatut ja lasketut jännitysarvot lopullisessa tilanteessa (MPa).

Anturi	Mitattu jännitysarvo	Laskettu jännitysarvo	Huom.
J 1	10.1	36.9	-
J 3	4.9	5.3	-
J 2	-	-4.5	Anturi rikkoon- tunut jo katto- perävaiheessa

Jännitysanturin J 1 suuri ero lasketun ja mitatun arvon välillä saattaa johtua siitä, että anturi sijaitsee mahdollisesti louhintaräjähdyksessä lohkaroituneessa vyöhykkeessä tai on jonkinlaisessa katvealueessa.

#### 8.4 Ekstensometrimitaukset verrattuna elementtilaskelmiin

Ekstensometrimitausten siirtymien vertailuarvona on käytetty Tekla Oy:n laskelmasta saatuja siirtymiä ekstensometriin E 1 ja E 3 kohdalta. Ekstensometriä E 2 ei voida verrata elementtilaskelmiin, koska sen kiinnityspisteiden todellista liikettä ei tiedetä. Ekstensometriin E 1 ja E 3 vertailussa on oletettu, että alin kiinnityspiste pysyy liikkumattomana. Elementtilaskelmista saatuihin vertailuarvoihin sisältyy myös elementtiverkon oman kokoonpuristumisen aiheuttamat siirtymät ekstensometrini kohdalla. Tästä aiheutuu pieni virhe vertailuarvoihin. Tekla Oy:n laskelma antaa ekstensometriin siirtymät säiliöiden lopullisessa korkeudessa.

Taulukossa 6 on esitetty ekstensometrini mittauspään ja kiinnityspisteiden mitatut ja lasketut siirtymät.

Taulukko 6. Ekstensometrini mittauspään ja kiinnityspisteiden I ja II mitatut ja lasketut siirtymät (mm).

Vertailtava piste	Mitatut	Lasketut
E1/mittauspää	-0.03	0.66
E1/I	-1.92	-0.03
E1/II	-1.43	-0.29
E3/mittauspää	-0.74	-0.10
E3/I	-0.36	-0.06
E3/II	-0.96	0.13

+ merkki, siirtymä ylöspäin

- merkki, siirtymä alaspäin

Kummassakin ekstensometrissä mitatut siirtymät ovat suuremmat kuin lasketut siirtymät. Liikkeen suunta on myös poikkeava kahdessa pisteessä.

Ekstensometrin E1 kohdalla laskettu tilanne ei vastaa todellista, koska ekstensometrin vaikutusalueelta paljastui louhinnan yhteydessä rakovyöhyke.

#### 8.5 Konvergenssimittaukset verrattuna elementtilaskelmiin

Louhintatekniikan laboratoriossa tehty elementtilaskelma kahden säiliön symmetrisestä tapauksesta ei ole aivan vastaava tilanne missä konvergenssimittaukset on todellisuudessa tehty. Mallissa pilarin paksuus on 35 m, kun konvergenssimittauspaikassa säiliöiden II ja III välisen pilarin paksuus on 50 m. Muuten malli vastaa hyvin todellista tilannetta, sillä konvergenssimittaukset on tehty säiliön puolella välissä, jolloin säiliön päiden vaikutus jää vähäiseksi. Elementtilaskelma antaa kuitenkin säiliön seinien liikkeen suuruusluokan. Taulukossa 7 on esitetty säiliön III seinien laskettu ja mitattu siirtymä.

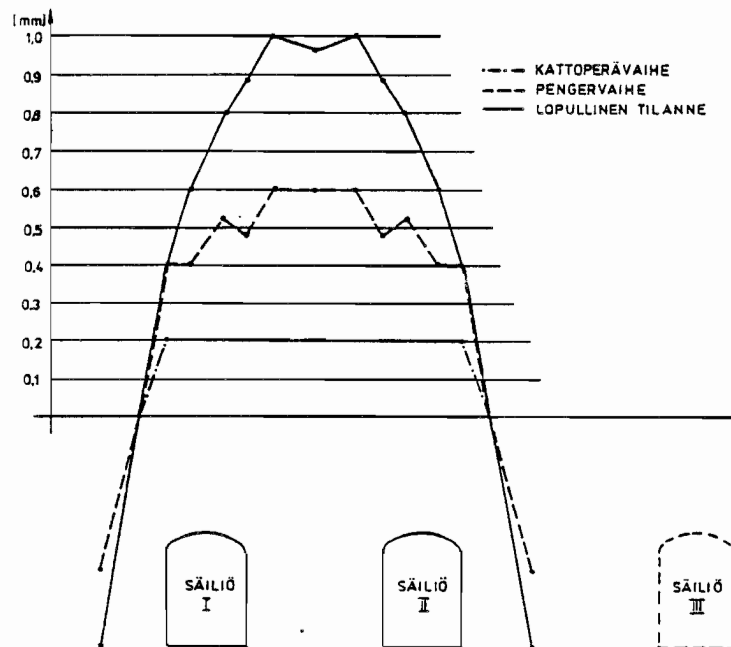
Taulukko 7. Säiliön III seinien siirtymän havaitut ja lasketut arvot.

Pulttiväli	Louhintavaihe	Havaittu siirtymä	Laskettu siirtymä
K 1 - K 2 (kattoperän taso)	välipenger louhittu	ka 5.9 mm	10.8 mm
	alapenger louhittu	9.3 mm	13.2 mm
K 3 - K 4 (välipengerin taso)	alapenger louhittu	12.3 mm	14.4 mm

Laskettu siirtymä on suuruusluokaltaan sama kuin mitattu siirtymä.

## 8.6 Tarkkavaaitukset verrattuna elementtilaskelmiin

Vertailtavana oleva elementtilaskelma on TKK:ssa tehty laskelma. Tekla Oy:n tekemää laskelmaa ei käytetä, koska siinä on siirtymissä mukana myös elementtiverkon oman kokoonpuristuman siirtymät. Kuvassa 65 on esitetty maanpinnan kohoamisen louhintavaiheittain.



Kuva 65. TKK:n elementtilaskelman mukainen maanpinnan kohoaminen louhintavaiheittain.

Viiden kuukauden kuluttua säiliöiden louhinnan loppumisesta saatiin tarkkavaaituksessa maanpinnan kohoamiseksi säiliöiden I ja II alueella keskiarvo 0,5 mm. Säiliön III alueella maanpinnan kohoamisen keskiarvoksi saatiin 3,5 mm. Elementtilaskelman mukainen maanpinnan nousu on noin 0,9 mm. Tulosten ero saattaa johtua säiliöiden kalliokatossa tasolla -20,00 olevasta ruhjevyöhykkeestä.

## 9. YHTEENVETO

Hanasaaren syvävarastossa on tehty huomattavan laajat tarkkailumittaukset verrattuna useimpiin Suomessa toteutettuihin kalliosäiliöihin. Pääasiallisina tarkkailumittausmenetelminä olivat jatkuvat jännitystilamittaukset, ekstensometrimittaukset ja mikroseismiset mittaukset. Edellä mainittujen lisäksi suoritettiin konvergenssimittausta, maanpäällistä tarkkavaaistusta ja rakojen siirtymien tarkkailua.

Jatkuvilla jännitystilamittauksilla todettiin, etteivät säiliöiden suuntainen jännitys eikä vertikaalijännitys nousseet vaarallisen suuriksi. Verrattaessa mitattuja jännitysten muutoksia vastaaviin laskettuihin eri louhintavaiheissa havaittiin niiden sopivan hyvin yhteen.

Ekstensometrimittaukset osoittivat, että pilareissa ei ole tapahtunut merkittäviä pystysiiirtymiä (siirtymä 40 m:n pituudella alle 1 mm). Lisäksi ekstensometrimittaukset osoittivat, että pilarit käyttäytyivät kuten elementtilaskelmien perusteella oli odotettavissa.

Mikroseismisillä mittauksilla haluttiin varmistaa säiliöalueen stabiilisuus louhinta-aikana. Mittauksissa havaittiin, että säiliöalue on varsin stabiili. Kattoperän louhinnan aikana mikroseismisiä ääniä esiintyi 0 - 30 kpl/5 min (laitteistona kannettava mikroseisminen laite). Välipenkereen louhinnan aikana mikroseismisiä ääniä esiintyi 0 - 2 kpl/5 min. Alapenkereen louhinnan aikana niitä on esiintynyt 0 - 30 kpl/5 min. Edellä mainituissa mittauksissa käytettiin automaattista mikroseismistä laitetta (Adelta). Tutkimuksessa havaittiin, että Hanasaaren syvävarastossa mikroseismiset mittaukset eivät korreloineet erityisen hyvin jännitystilamittausten ja ekstensometrimittausten kanssa. Jos käytettävissä olisi ollut nykyaikainen mikroseisminen laitteisto ja havaintoväliä olisi pystytty tihentämään, mittausmenetelmien vertailuun olisi saatu enemmän tuloksia. Tällöin mittausmenetelmien vertailu olisi ollut luotettavampi kuin nyt tehty vertailu.

Konvergenssimittauksia tehtiin yhdessä säiliössä (säiliö III). Mittauksissa todettiin, että säiliön seinät käyttäytyivät kuten elementtilaskelmien perusteella oli odotettavissa. Kattoperän tasolla säiliön seinät siirtyivät säiliöön päin hieman yli 13 mm.

Maanpäällisillä tarkkavaaituksilla todettiin, että louhinnalla ei ole ollut merkittävää vaikutusta maanpinnalle. Maanpinta on noussut säiliöiden yläpuolella suurimmillaan 3,5 mm.

Sekä tarkkailumittausten että työmaahavaintojen perusteella on luultavaa, ettei suurempi pääjännitys ole kohtisuoraan säiliöiden pituussuuntaa vastaan, ainakaan säiliöryhmän kaikissa osissa. Mahdollista on, että jännitystila säiliöalueella vaihtelee tektoniikan mukaan.

Tarkkailumittauspisteiden sijoitus Hanasaaren syvävarastossa palveli ennen kaikkea rakennusaikaista valvontaa. Tutkimuksen kannalta olisi ollut parempi, jos eri tarkkailumittausmenetelmien mittauspisteet olisivat sijainneet keskitetysti. Mielenkiintoista olisi ollut esimerkiksi verrata pilarissa olevan ekstensometrin tuloksia jatkuvatoimiseen jännitystilaanturiin, joka mittaisi saman pilarin vertikaalijännityksen muutosta. Muuttuneen horisontaalin jännitystilan takia olisi myös ollut kiintoisaa seurata kohtisuoraan säiliötä vastaan olevan jännityksen muuttumista.

KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Anon, Suggested Methods for Monitoring Rock Movements, using Borehole Extensometers, Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. 15 (1978) 6, s. 307-317.
2. Bacon, C. F., Acoustic Emission Along the San Andreas Fault in Southern Central California, Materials Evaluation (1976) May, s. 16-31. (Ref. Koerner, R. M., McCabe, W. M., Lord, A. E., Jr., 1981.)
3. Bergman, A. W., Martimo, P., Mittausmenetelmiä ja koneita, Teoksessa Rakennustekniikan käsikirja osa 2, Tammi, Helsinki 1970.
4. Farstad, A. J., Kalvels, D., Kehrman, R. F., Fisher, C., Jr., Leschek, W. C., Microseismic Roof Fall Warning System, Washington DC 1976, Bureau of Mines OFR 18-77, 154 s.
5. Fowler, K., A., Acoustic Emission Transducers and an Experimental Method of Verifying their Performance, Panametrics, Technical Memorandum no 5, The Joint Meeting of the Boston Chapters of ASNT, IEEE, AES, ASTM, ASME, 1970. (Ref. Nieminen, M., 1976.)
6. Franklin, J. A., The Monitoring of Structures in Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 14 (1974) 4, s. 163-192.
7. Gowd, T. N., Factors Affecting the Acoustic Emission Response of Triaxially Compressed Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 17 (1980) 4, s. 219-223.
8. Hardy, H. R., Jr., Application of Acoustic Emission Techniques to Rock Mechanics Research, Acoustic Emission, American Society for Testing and Materials, 1972, s. 41-83.

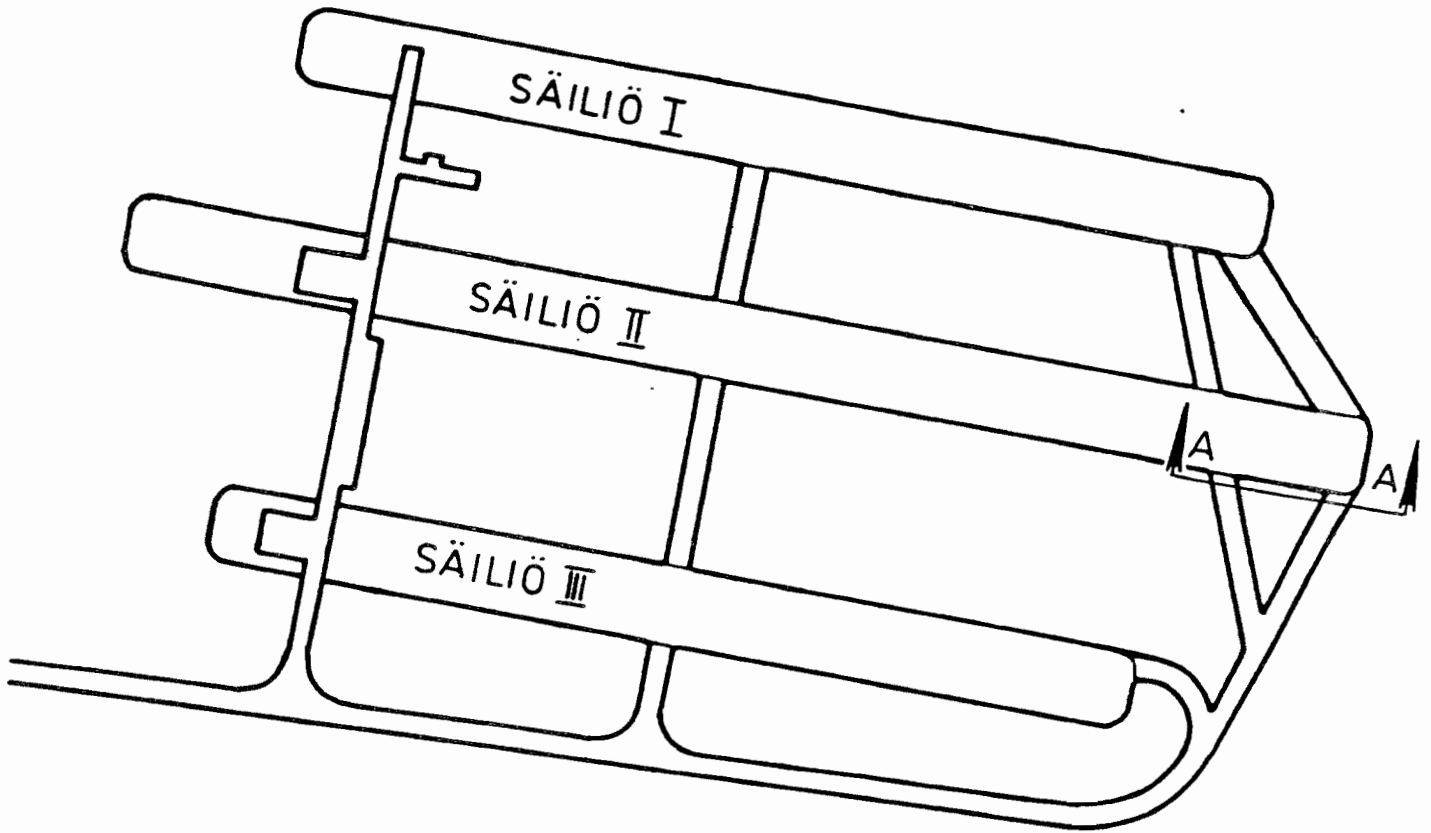
9. Hardy, H. R., Jr., Microseismic Techniques - Basic and Applied Research, Rock Mechanics Suppl. 2 (1973), s. 93-114.
10. Hardy, H. R., Jr., Microseismic Techniques Applied to Coal Mine Safety, Washington DC 1974, Bureau of Mines OFR 23-75, 216 s.
11. Hardy, H. R., Jr., Evaluating the Stability of Geologic Structures using Acoustic Emission, Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission, American Society for Testing and Materials, 1975, s. 80-106.
12. Hardy, H. R., Jr., Mowrey, G. L., Study of Underground Structural Stability using Near-Surface and Down-Hole Microseismic Techniques, Field Measurements in Rock Mechanics, Zürich 1977, Proceedings, vol. 2., s. 75-91.
13. Hardy, H. R., Jr., Application of Microseismic Techniques to the Monitoring of Storage Cavern Stability, Storage in Excavated Rock Caverns, Tukholma 1977, Proceedings, vol. 2., s. 321-328.
14. Hooker, V. E., Leighton, F., Steblay, B. J., Microseismic Investigations in Coal Mines, Mining Congress Journal 60 (1974) 10, s. 66-71.
15. Hotinen, V., Tietoliikennetekniikan perusteet, INSKO 64-73, Helsinki 1973, s. 20.
16. Kangas, K., Geodeettisiä mittausmenetelmiä kalliomekaniikassa, Teoksessa Kalliomekaniikan päivät 1968, Vuorimiesyhdistys, Helsinki 1968.
17. Kangas, K., Kaivosmittaus ja karttajärjestelyt, Teoksessa Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja, Vuorimiesyhdistys B 29, Helsinki 1982.
18. Koerner, R. M., Lord, A. E., Jr., McCabe, W. M., Acoustic Emission Monitoring of Soil Stability, J. of the Geotechnical Engineering Division 104 (1978) GT5, s. 571-582.



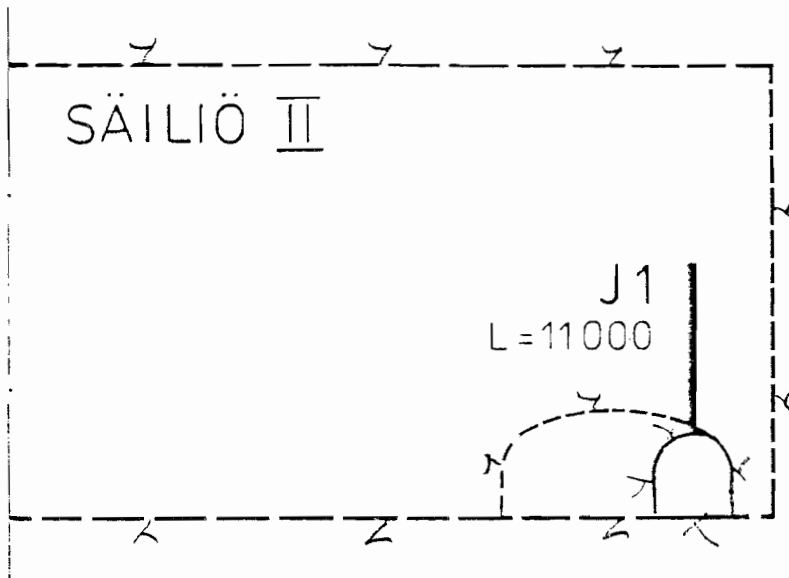
19. Koerner, R. M., McCabe, W. M., Lord, A. E., Jr.,  
Overview of Acoustic Emission Monitoring of Rock  
Structures, *Rock Mechanics* 14 (1981) 1, s. 27-35.
20. Kurita, K., Fujii, N., Stress Memory of Crystalline  
Rocks in Acoustic Emission, *Geophysical Research  
Letters* 6 (1979) 1, s. 9-12.
21. Kähönen, Y., Saraste, A., HANASAAREN SYVÄVARASTO  
Muistio kalliorakennussuunnitelman perusteista,  
Helsingin kaupunki geotekninen osasto, Julkaisematon,  
1975.
22. Kähönen, Y., Kallion laatu ja rakenne, Teoksessa  
Räjäytys- ja louhintatyöt, Rakennusmestarien keskus-  
liitto, Helsinki 1981.
23. Maijala, P. V., Tutkimus mikroseismisistä kallio-  
äänistä ja niiden hyväksi käytöstä kalliotilojen  
pysyvyyttä määritettäessä, Helsinki 1970, Teknillinen  
korkeakoulu, lisensiaattityö.
24. McCabe, W. M., Acoustic Emission in Coal: A Laboratory  
Study, Second Conference on Acoustic Emission/Micro-  
seismic Activity in Geologic Structures and Materials,  
Pennsylvania 1978, Proceedings, s. 35-51.
25. McCabe, W. M., Koerner, R. M., Lord, A. E., Jr.,  
Acoustic Emission (Microseismic) Monitoring for Ground  
Control, Rapid Excavation and Tunneling Conference,  
Atlanta Georgia 1979, Proceedings, vol. 1, s. 879-897.
26. Mogi, K., Study of Elastic Shocks caused by the Fracture  
of Heterogenous Materials and its Relation to the  
Earthquake Phenomena, *Bull. Earth. Res. Inst.* 40 (1962)  
1, s. 125-173. (Ref. Rong, C., 1979.)
27. Nieminen, M., Mikroseismisen aktiivisuuden rekiste-  
röintijärjestelmä kalliotilojen pysyvyyden valvontaan,  
Espoo 1976, Teknillinen korkeakoulu, diplomityö.

28. Oksanen, J., Kallion tarkkailumittaukset, Otaniemi 1982, Teknillinen korkeakoulu, diplomityö.
29. Pao, Y-H., Theory of Acoustic Emission, ASME AMD Elastic Waves and Nondestr. Test of Mater, San Francisco 1978, Proceedings, vol. 29, s. 107-128.
30. Partikainen, P., Ekstensometrit kalliotilojen pysyvyyden valvontamenetelmänä, Teoksessa Kalliomekaniikan päivä 1978, Vuorimiesyhdistys, Helsinki 1978.
31. Rao, M. V. M. S., Gowd, T. N., A Study of Acoustic Emission from Stressed Rocks and Rockmasses, J. of Mines, Metals & Fuels 27 (1979) 3, s. 80-85.
32. Richardson, A., M., Using AE Techniques in Laboratory Investigations of Salt Behavior, Second Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, Pennsylvania 1978, Proceedings, s. 61-77.
33. Rong, C., Acoustic Emission of Rocks under Triaxial Compression with Various Stress Paths, Int, J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 16 (1979) 6, s. 401-405.
34. Saanio, V., Kampin metroaseman kallioteknisten mitausten tulkinta, Rakennustekniikka (1977) 1, s. 7-11. (Ref. Partikainen, P., 1978.)
35. Sajaniemi, R., Hanasaaren syvävaraston jännitysanalyysi, Tekla Oy, Julkaisematon, 1982.
36. Sano, O., A Note on the Sources of Acoustic Emissions associated with Subcritical Crack Growth, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 18 (1981) 3, s. 259-263.
37. Saraste, A., Kähönen, Y., HANASAAREN SYVÄVARASTO Selostus luolasto- ja tunnelialueen kalliooperästä, Helsingin kaupunki geotekninen osasto, Julkaisematon, 1981.

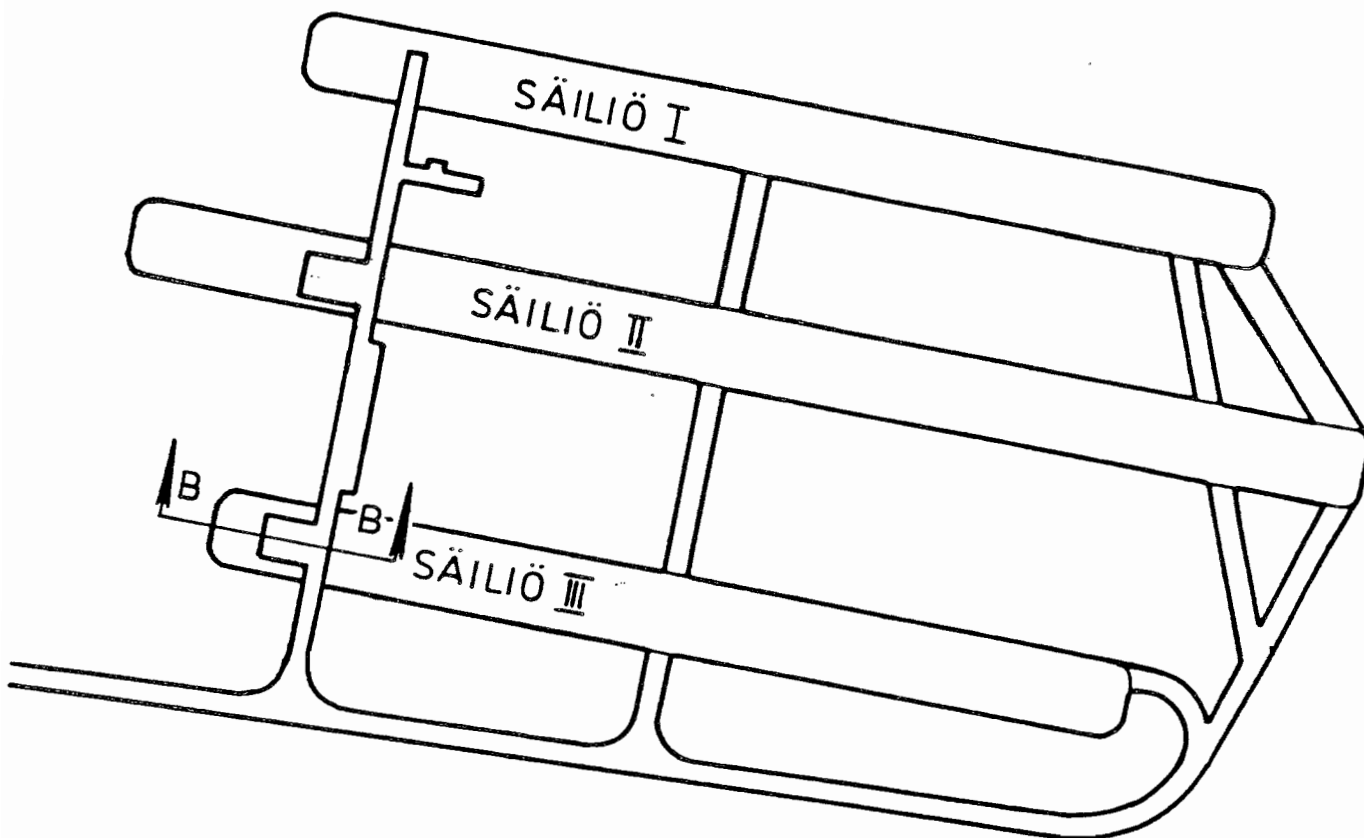
38. Suzuki, M., Abé, H., Takahashi, H., Tamakawa, K., Kikuchi, M., Acoustic Emission Characteristics and Fracture Toughness of Sandstone, The Technology Reports of the Tohoku University 43 (1978) 1, s. 231-240.
39. Särkkä, P., Johansson, E., Kalliomekaniikka, Teok- sessa Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja, Vuori- miesyhdistys B 29, Helsinki 1982.
40. Särkkä, P., With, E., Muistio Mustikkamaan kallio- perän jännitystilasta, Suomen Malmi Oy, Julkaisematon, 1982.
41. Walton, R. J., Field Measurements in Rock Mechanics, Lecture Series No. 48, Australia CSIRO-Div. Appl. Geomech., 1979, 28 s.
42. With, E., Mittausraportti Helsingin kaupungin Hana- saaren syvävaraston luolatiloissa 7.-8.9.1982 suori- tetuista kallion jännitystilän mittauksista ja eks- tensometriä asennuksesta, Suomen Malmi Oy, Julkai- sematon, 1982.
43. With, E., Mittausraportti Helsingin kaupungin Energia- laitoksen Hanasaaren syvävarastossa keväällä 1982 suoritetuista kalliomekaanisista mittauksista, Suomen Malmi Oy, Julkaisematon, 1982.
44. Yong, C., Wang, C., Thermally induced Acoustic Emission in Westerly Granite, Geophysical Research Letters 7 (1980) 12, s. 1089-1092.



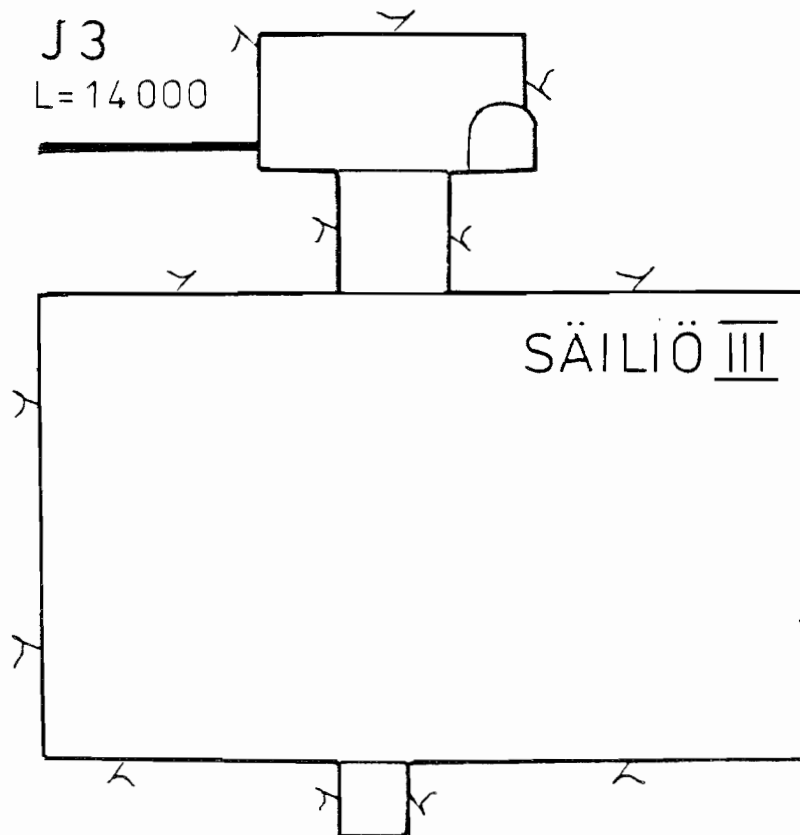
LEIKKAUS A-A



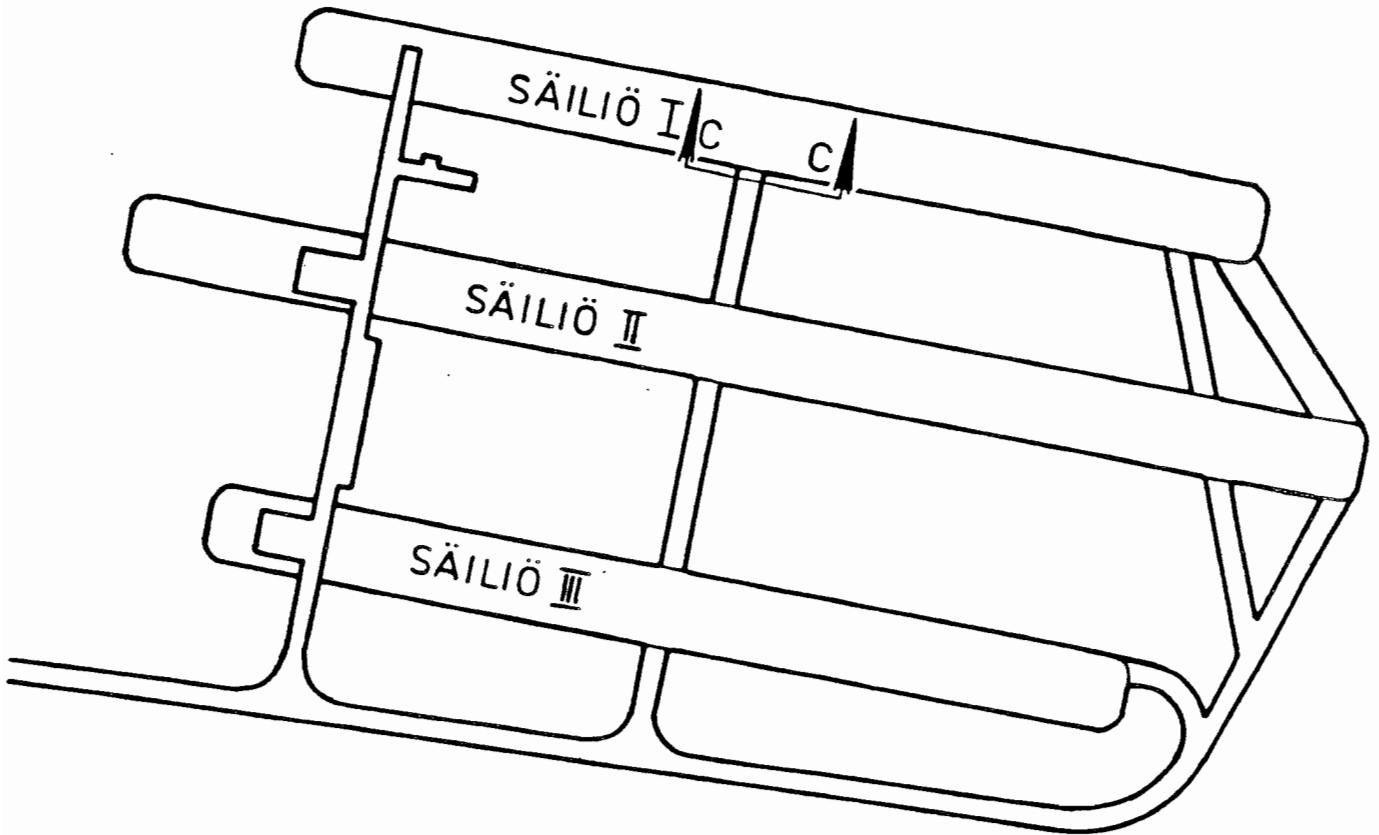
J1 SÄILIÖIDEN SUUNTAINEN JÄNNITYS  
( 16m POHJATASOSTA YLOSPÄIN, PILARISSA )



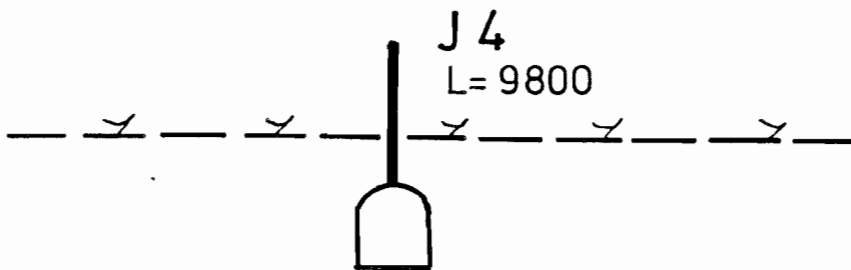
LEIKKAUS B-B



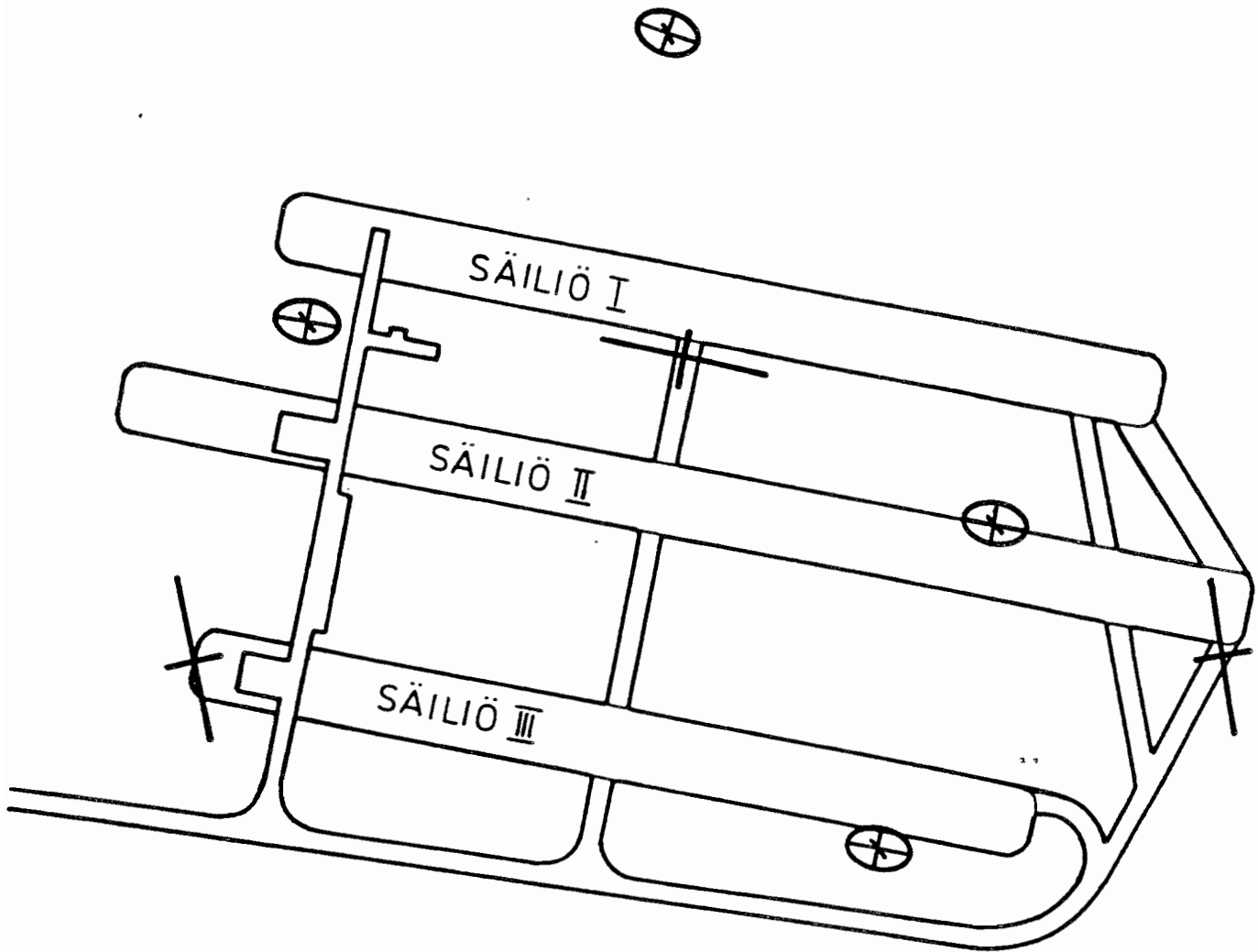
J3 VERTIKAALIJÄNNITYS  
(10m KATOSTA YLÖSPÄIN)



LEIKKAUS C-C



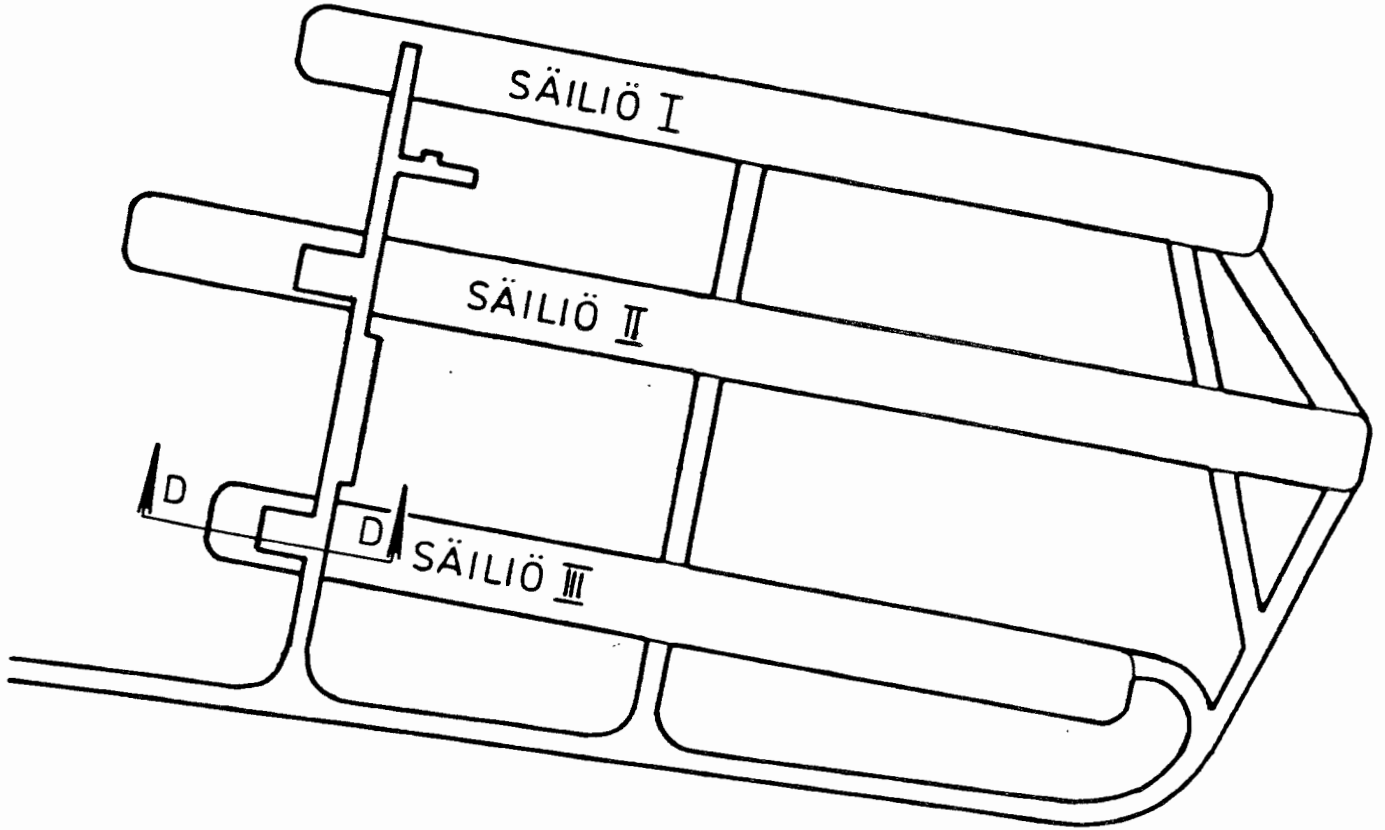
JÄNNITYSTILAMITTAUSPISTE 4  
SÄILIÖIDEN I JA II VÄLISESSÄ PILARISSA



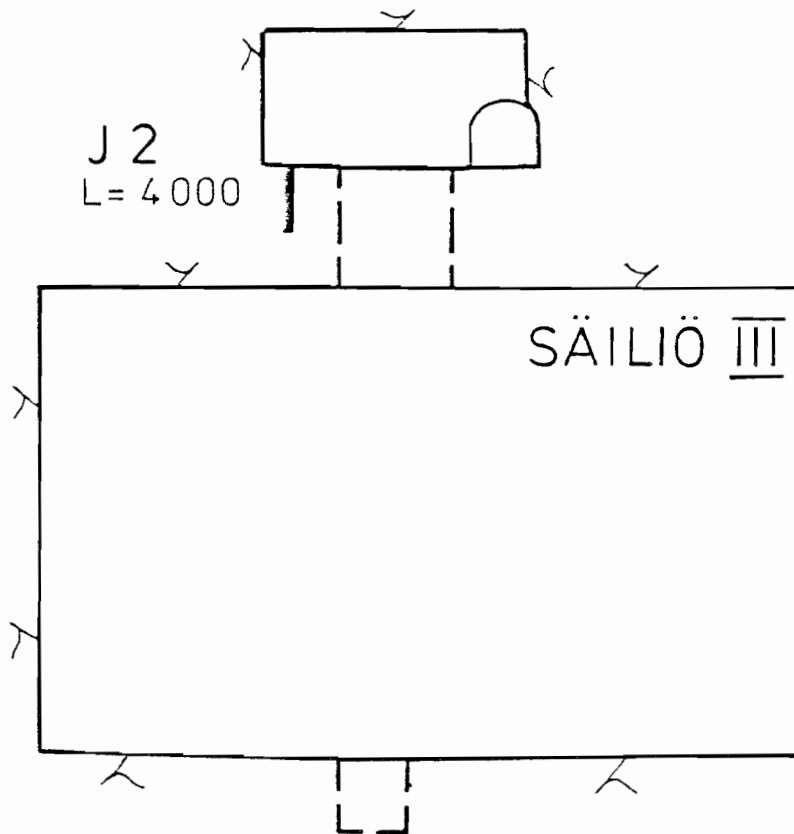
MAAN PÄÄLTÄ HASTIN MENETELMÄLLÄ  
MITATTU KALLION JÄNNITYSTILA



MAAN ALTA LEEMANNIN MENETELMÄLLÄ  
MITATTU KALLION JÄNNITYSTILA

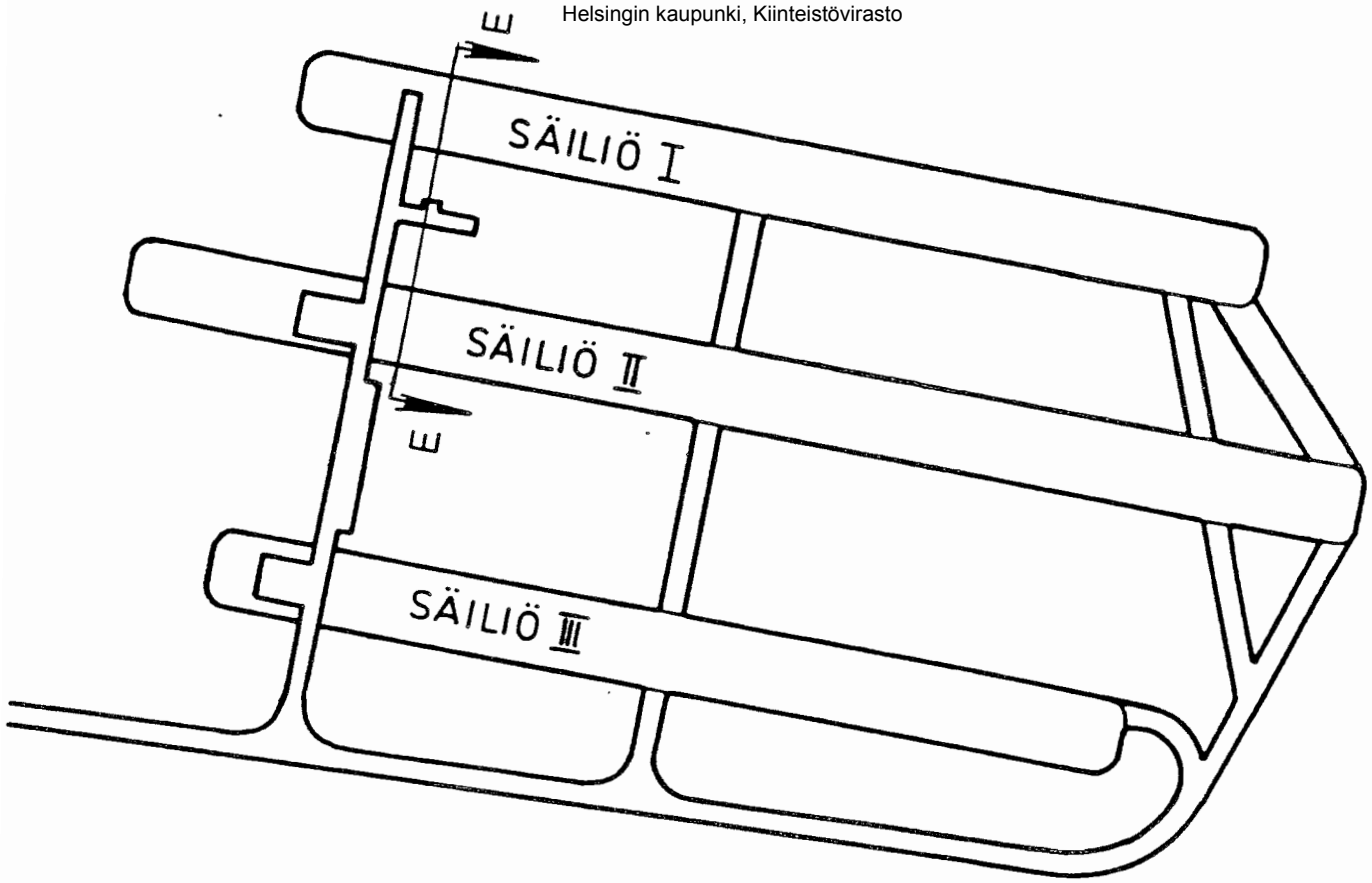


LEIKKAUS D-D

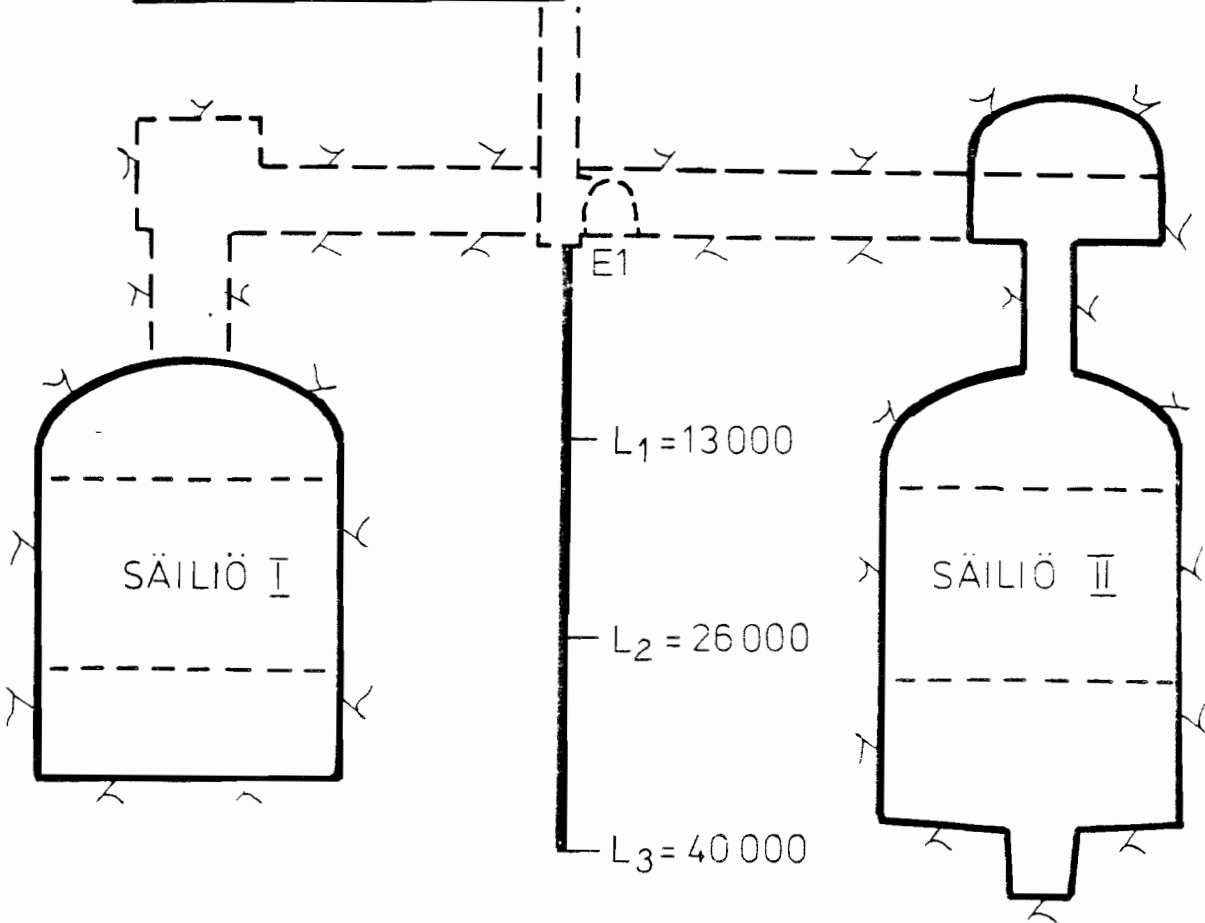


J2 SÄILIÖIDEN SUUNTAINEN JÄNNITYS  
(3m KATOSTA YLÖSPÄIN)

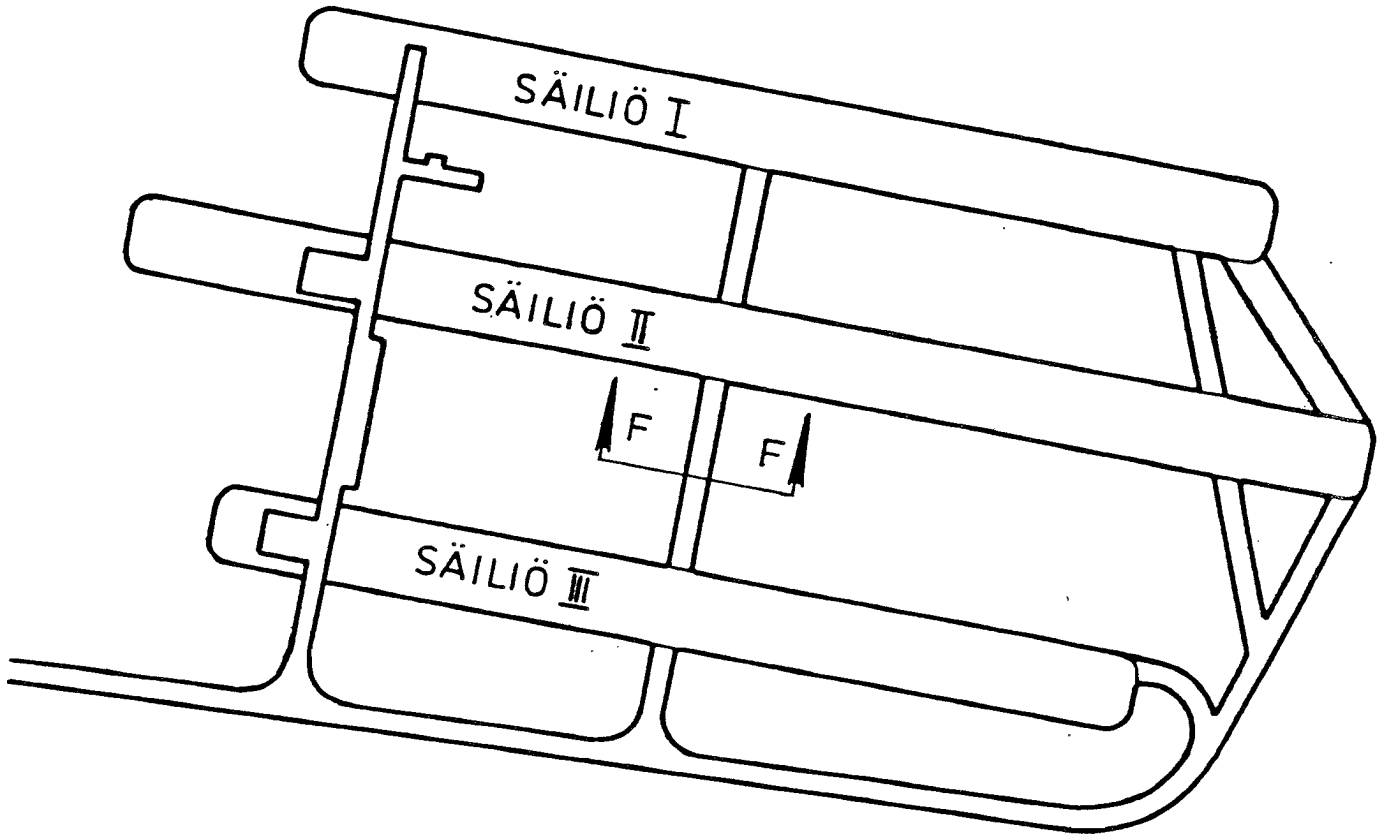




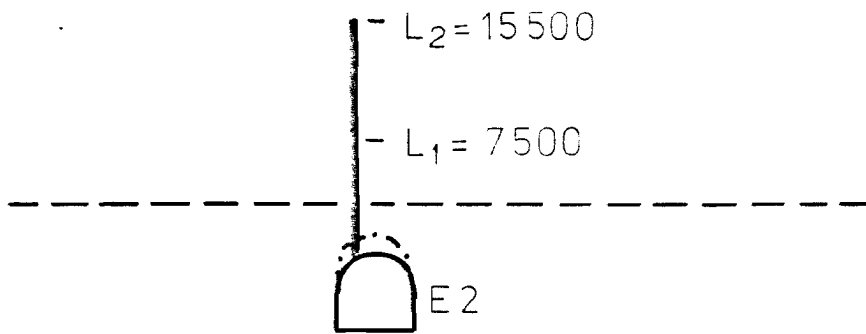
LEIKKAUS E-E



EKSTENSOMETRI SÄILIÖIDEN I JA II VÄLISESSÄ  
PILARISSA, SÄILIÖIDEN LÄNSIPÄÄSSÄ



LEIKKAUS F-F

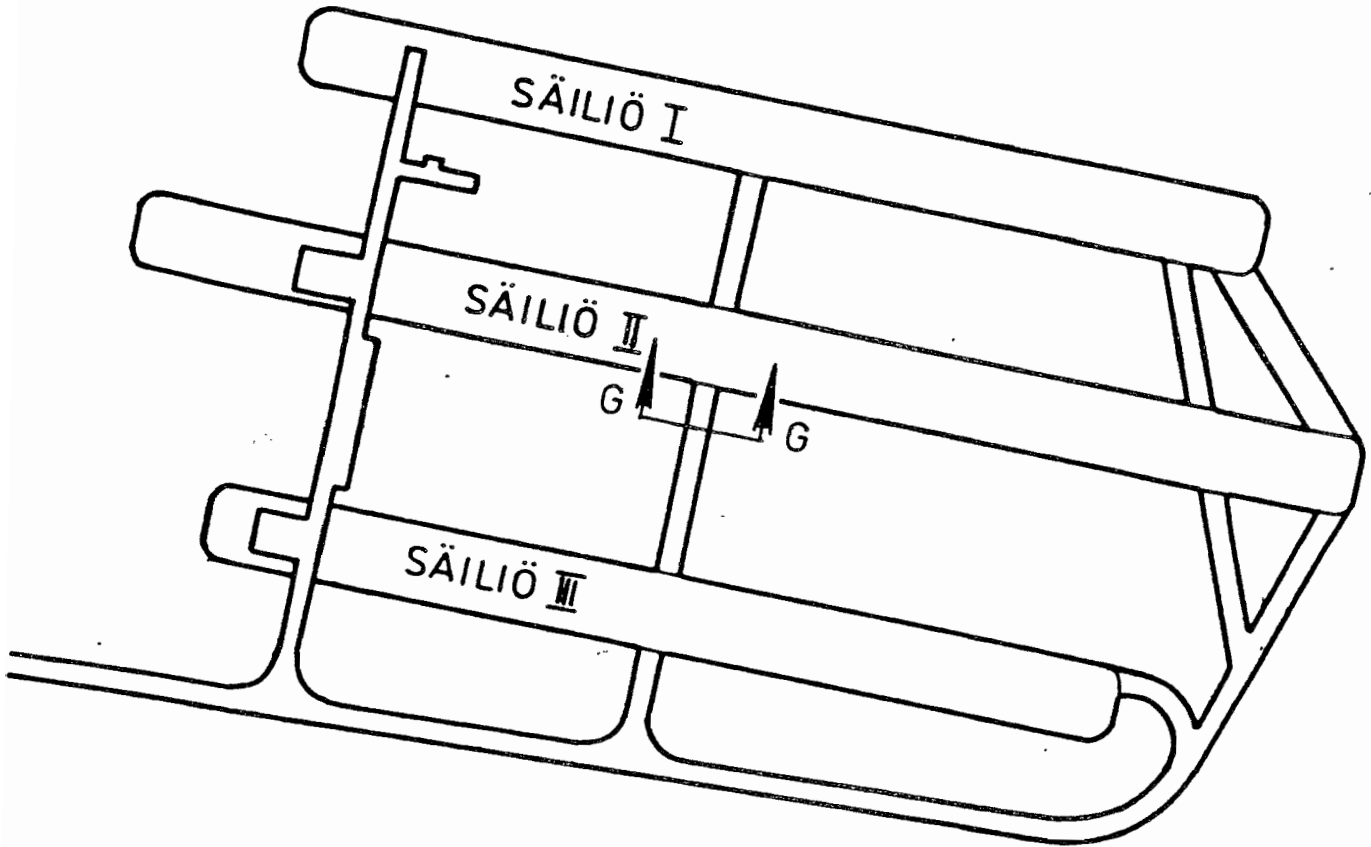


PILARI SÄILIÖIDEN III JA II VÄLISÄ

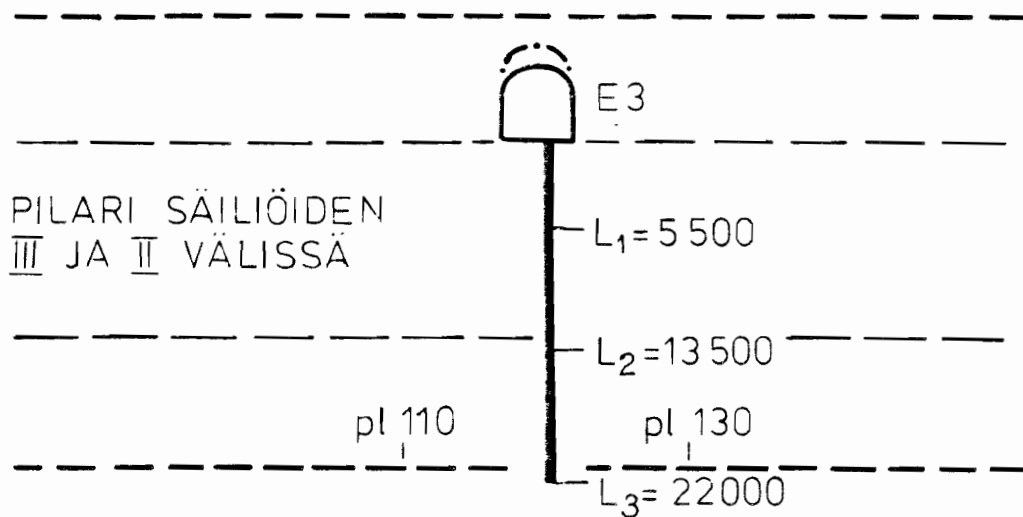
pl 110

pl 130

EKSTENSOMETRI SÄILIÖIDEN II JA III VALISSEÄ  
PILARISSA KESKELLÄ, KATTOPERÄVAIHEEN  
AJOTUNNELIN KATOSTA YLÖSPÄIN



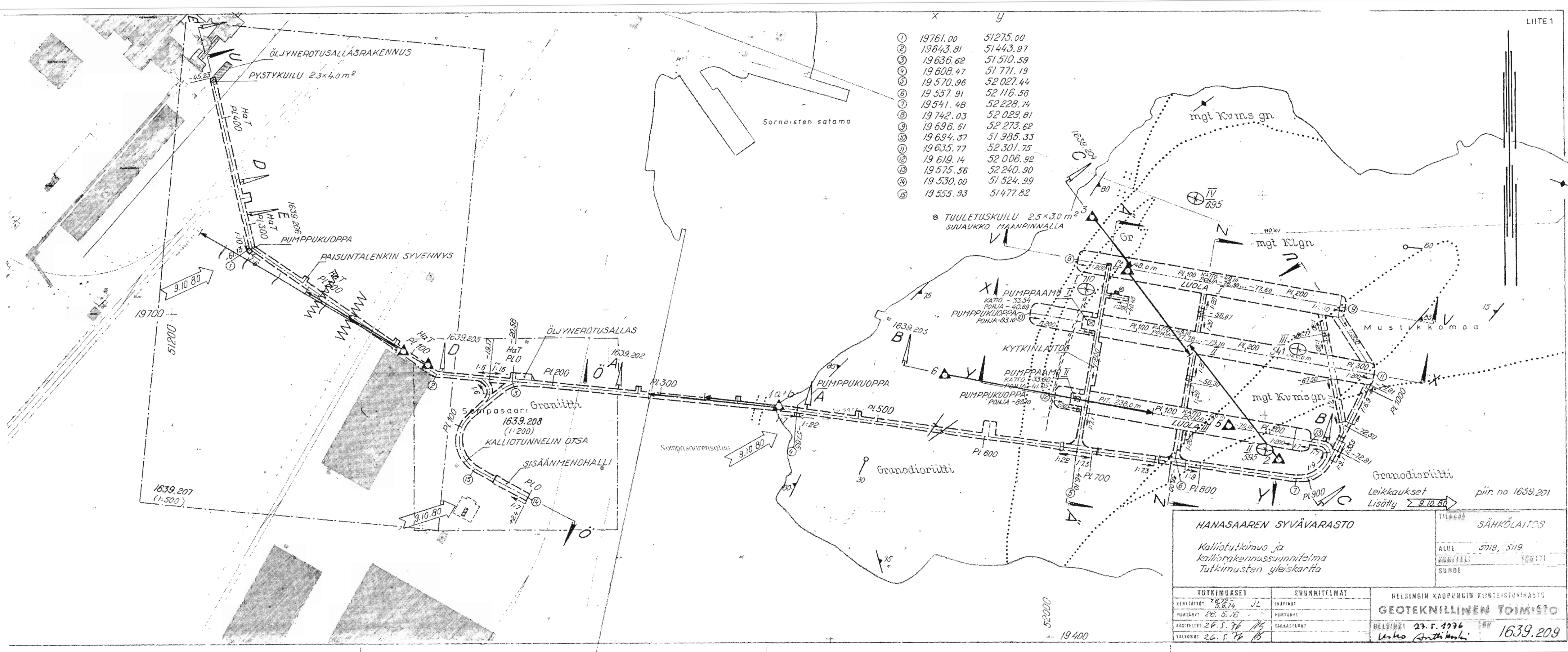
## LEIKKAUS G-G



EKSTENSOMETRI SÄILIÖIDEN II JA III VÄLISSESSÄ  
PILARISSA KESKELLÄ, KATTOPERÄVAIHEEN  
AJOTUNNELISTA SÄILIÖIDEN POHJATASOLLE

## GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

1. Anttikoski, U., Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen. 1973. 30,-
2. Anttikoski, U., Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1973. 50,-
3. Anttikoski, U., Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1974. 50,-
4. Mäkinen, R., Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella. 1974. 50,-
5. Saarela, M., Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys. 1974. 30,-
6. Saarela, M., Kitkapaalujen kantavuus. 1976. 30,-
7. Petäjä, J., Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen. 1977. 50,-
8. Raudasmaa, P., Metrotunneleiden injektointi. 1977. 120,-
9. Anttikoski, U., Kalliotunnelien käyttö varastointiin. 1977. 50,-
10. Tikkanen, H., Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa. 1978. 70,-
11. Arkima, O., Kluuvin ruhjeen jäädytys. 1978. 120,-
12. Raudasmaa, P., Puiset perustusrakenteet. 1979. 50,-
13. Havukainen, J., Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa. 1979. 50,-
14. Vähäaho, I., Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen. 1979. 50,-
15. Raudasmaa, P., Pohjavesitarkkailu -80. 1980. 50,-
16. Anttikoski, U., Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunneli-konferenssin kokemusten perusteella. 1979.
17. Roinisto, J., Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin. 1981. 50,-
18. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa. 1981. 50,-
19. Roinisto, J., Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys. 1981. 50,-
20. Vuola, P., Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta. 1981. 50,-
21. Havukainen, J., Korhonen, O., Tonttialueiden maarakenteet. 1981. 30,-
22. Havukainen, J., Esimerkkejä jätteen hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä. 1981.
23. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa. 1982. 50,-
24. Latvala, A., Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys. 1982. 30,-
25. Havukainen, J., Hämäläinen, A., Sulamäki, A., Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttö-mahdollisuuksista maarakentamisessa. 1982. 30,-
26. Halkola, H., Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä. 1982.
27. Paavola, P., Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannusselvitys. 1982. 50,-
28. Vähäaho, I., Maarakennusta koskeva mallityöselitys. 1982. 70,-
29. Gulin, K., Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa. 1982. 50,-
30. Halkola, H., Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät. 1982. 50,-
31. Havukainen, J., Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet. 1983. 30,-
32. Havukainen, J., Användning av stenkolsaska vid anläggingsarbeten, tekniska anvisningar. 1983. 30,-
33. Havukainen, J., The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines. 1983. 30,-
34. Salmelainen, J., Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta. 1983. 50,-
35. Havukainen, J., Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista. 1983.
36. Hytti, P., Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa. 1984. 60,-
37. Leinonen, J., Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa. 1984. 60,-
38. Pirinen, J., Kelluvan rantapenkereen rakentaminen. 1984. 60,-



<b>HANASAAREN SYVÄVARASTO</b> Kalliotutkimus ja kalliorakennussuunnitelma Tutkimusten yleiskartta		TILAAJA SÄHKÖLAITOS ALUE 5019, 5119 KOYTELÄ TONITTI SUMME
TUTKIMUKSET KEMISTÖT 7.6.74 JL PIIRIT 26.5.76 ARKITEHTI 26.5.76 VALVONUT 26.5.76	SUUNNITELMAT LAITINUT PIIRITÄNYT TARKASTANUT	HELSINGIN KAUPUNGIN KIIKTEISTÖVIRASTO <b>GEOTEKNILLINEN TOIMISTO</b> HELSINKI 27.5.1976 Uho Antikainen
		piir. no 1639.201 Lisätty 2.9.10.80 1639.209