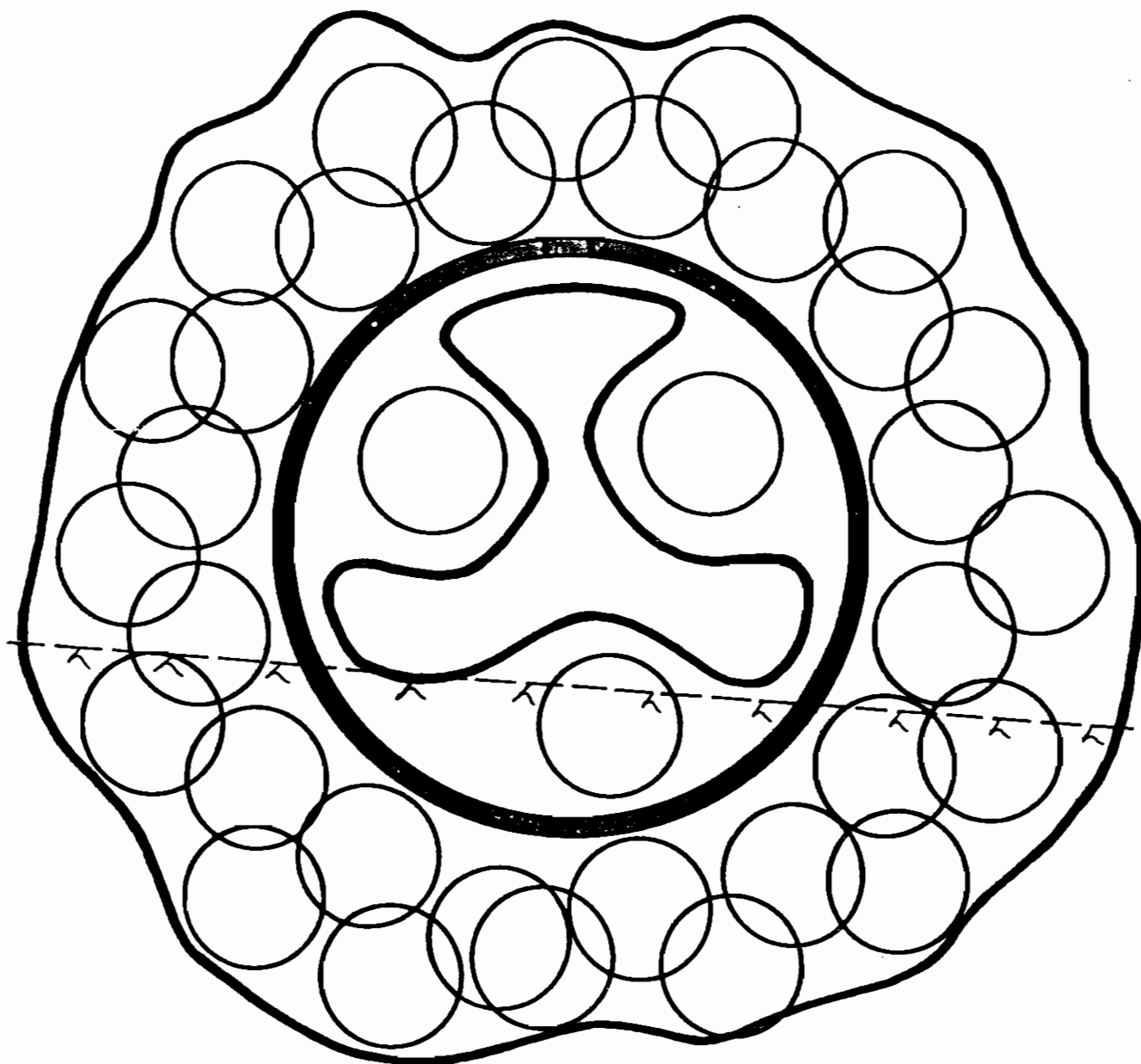


**HELSINGIN KAUPUNGIN  
GEOTEKNILLINEN TOIMISTO**



**KLUUVIN RUHJEEN JÄÄDYTYS**

**Geoteknillisen toimiston  
tiedote II 15.10.1978**

JÄÄDYTYSMENETELMÄN KÄYTTÖ KLUUVIN RUHJEESSA JA SEN  
AIHEUTTAMAT MUODONMUUTOKSET MAAPERÄSSÄ

Tämä selvitys on tehty Helsingin kaupungin geoteknisessä toimistossa metrotoimiston toimeksiannosta tehtyjen tarkkailumittausten perusteella. Työ on tehty ajalla 1.9.1977 - 30.5.1978 ja se perustuu Olli Arkiman tutkimustyöhön.

## Sisällysluettelo:

|      |                                                                              | Sivu   |
|------|------------------------------------------------------------------------------|--------|
|      | MERKINNÄT .....                                                              | III-IV |
| 1.   | JOHDANTO .....                                                               | 1      |
| 2.   | KLUUVIN RUHJE .....                                                          | 2      |
| 2.1  | <u>Geologia</u> .....                                                        | 2      |
| 2.11 | Ruhjeen syntyminen .....                                                     | 2      |
| 2.12 | Maakerrokset .....                                                           | 4      |
| 2.2  | <u>Maaperän geotekniset ominaisuudet</u> .....                               | 6      |
| 2.21 | Lujuusominaisuudet .....                                                     | 6      |
| 2.22 | Kokoonpuristuvuusominaisuudet .....                                          | 7      |
| 2.23 | Vedenläpäisevyys .....                                                       | 8      |
| 2.24 | Routivuus .....                                                              | 9      |
| 3.   | LÄPÄISYN SUORITUS .....                                                      | 10     |
| 3.1  | <u>Läpäisyn suoritus Kluuvin ruhjeessa</u> .....                             | 10     |
| 3.2  | <u>Jäädytysmenetelmä</u> .....                                               | 14     |
| 3.21 | Yleistä .....                                                                | 14     |
| 3.22 | Jäädytysajan laskeminen lämpömäärien perusteella .....                       | 17     |
| 4.   | TARKKAILUMITTAUKSET .....                                                    | 19     |
| 4.1  | <u>Mittausohjelma</u> .....                                                  | 19     |
| 4.2  | <u>Painumaletkumittaukset</u> .....                                          | 20     |
| 4.3  | <u>Sivusiirtymämittaukset</u> .....                                          | 31     |
| 4.4  | <u>Huokosvedenpaineen mittaukset</u> .....                                   | 35     |
| 5.   | JÄÄDYTYSREIKIEN PORAVAIHE .....                                              | 42     |
| 5.1  | <u>Porauksen aikana havaitut muutokset maaperässä</u> .....                  | 42     |
| 5.2  | <u>Painuman teoreettinen tarkastelu</u> .....                                | 50     |
| 5.21 | Yleistä .....                                                                | 50     |
| 5.22 | Painuman tarkastelu todennäköisysteoreettisena probleemana .....             | 53     |
| 5.23 | Horisontaaliliikkeet .....                                                   | 54     |
| 5.3  | <u>Konsolidaation osuus kokonaispainumasta</u> .....                         | 57     |
| 6.   | AKTIIVIJÄÄDYTYS .....                                                        | 67     |
| 6.1  | <u>Jääkuoren muodostuminen ruhjeessa</u> .....                               | 67     |
| 6.2  | <u>Jään muodostuminen putken ympärille</u> .....                             | 69     |
| 6.21 | Chakimovin ratkaisumalli .....                                               | 69     |
| 6.22 | Jäätymisajan määrittäminen sen jälkeen kun jääsylinterit ovat yhtyneet ..... | 78     |

|      | Sivu                                                                                          |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6.3  | <u>Kuoren muodostumisen aiheuttamat siirtymät</u>                                             |
|      | <u>maassa</u> ..... 81                                                                        |
| 6.4  | <u>Jääkuoren vahvuuden määrittäminen</u> ..... 84                                             |
| 6.41 | Laskentaperusteet ..... 84                                                                    |
| 6.42 | Laskenta Morganin menetelmällä ..... 85                                                       |
| 6.43 | Jääkuoren lujuusominaisuudet ..... 88                                                         |
| 6.44 | Laskennan tulokset ..... 90                                                                   |
| 7.   | PASSIIIVIJÄÄDYTYKSEN ..... 93                                                                 |
| 7.1  | <u>Jäädytyksen ylläpito</u> ..... 93                                                          |
| 7.2  | <u>Passiivijäädytyksen aikana tapahtuneet muodonmuutokset maassa</u> ..... 94                 |
| 8.   | JÄÄTYNEEN MAAN OMINAISUUDET ..... 95                                                          |
| 8.1  | <u>Näytteiden otto jäätäneestä maasta</u> ..... 95                                            |
| 8.2  | <u>Jäätäneen maan indeksiominaisuudet</u> ..... 97                                            |
| 8.3  | <u>Jäätäneen maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet</u> ..... 99                            |
| 8.31 | Yleistä teoriaa ..... 99                                                                      |
| 8.32 | Laboratoriokokeet ..... 101                                                                   |
| 8.4  | <u>Routanousu ja routapaine laboratoriokokeiden perusteella</u> ..... 106                     |
| 8.5  | <u>Jäätymis-sulamiskokeet</u> ..... 109                                                       |
| 9.   | MITATTUJEN JA ARVIOITUJEN ROUTALIIKKEIDEN VERTAILU ..... 115                                  |
| 9.1  | <u>Arvioitu routanousu ruhjeessa</u> ..... 115                                                |
| 9.2  | <u>Jäädytyksen aikana mitatut routaliikkeet maassa</u> ..... 115                              |
| 10.  | SULAMINEN ..... 116                                                                           |
| 10.1 | <u>Yleistä teoriaa jäätymisestä ja sulamisesta</u> ..... 116                                  |
| 10.2 | <u>Arvioitu sulamisen aiheuttama painuma</u> ..... 120                                        |
| 10.3 | <u>Valurautakuoren muodonmuutoksien aiheuttama painuma</u> ..... 123                          |
| 10.4 | <u>Sulamiseen tarvittava aika</u> ..... 124                                                   |
| 10.5 | <u>Jääkuoren sulaminen ja sulamisvaiheen aikana tapahtuneet muodonmuutokset maassa</u> .. 127 |
| 11.  | PÄÄTELMÄ KLUUVIN RUHJEEN LÄPÄISYSTÄ ..... 128                                                 |
| 12.  | YHTEENVETO ..... 129                                                                          |
|      | ENGLISH SUMMARY ..... 131                                                                     |
|      | KIRJALLISUUS ..... 134                                                                        |



## MERKINNÄT:

|           |                                                 |
|-----------|-------------------------------------------------|
| a         | tunnelin säde (m)                               |
| $\bar{a}$ | sulavan maan konsolidaatiokerroin               |
| $\bar{b}$ | sulavan maan lisätiivistyskerroin               |
| c         | koheesio ( $\text{kN/m}^2$ )                    |
| c'        | tehokas koheesio ( $\text{kN/m}^2$ )            |
| $c_k$     | ominaislämpökapasiteetti ( $\text{kJ/Kkg}$ )    |
| $c_v$     | konsolidaatiovakio ( $\text{m}^2/\text{v}$ )    |
| d         | raekoko (mm)                                    |
| e         | Neperin luku                                    |
| i         | jäätymisaste                                    |
| k         | vedenläpäisevyyskerroin (m/s)                   |
| n         | huokoisuus (%)                                  |
| $p_o$     | esikuormitus ( $\text{kN/m}^2$ )                |
| p         | paine (kPa)                                     |
| q         | lämpömäärä ( $\text{kJ/kg}$ )                   |
| $q_s$     | jään sulamislämpö ( $\text{kJ/kg}$ )            |
| $r_o$     | jäädytysputken säde (m)                         |
| s         | painuma (mm)                                    |
| $s_h$     | sivusiirtymä (mm)                               |
| t         | aika                                            |
| u         | huokospaine (kPa)                               |
| w         | vesipitoisuus painoprosentteina kuiva-aineesta  |
| $w_l$     | juoksuraja (%)                                  |
| $\bar{A}$ | sulavan maan tiivistymiskerroin omasta painosta |
| E         | kimmomoduli ( $\text{MN/m}^2$ )                 |
| $E_m$     | sulan maan kimmomoduli ( $\text{MN/m}^2$ )      |
| I         | hitausmomentti ( $\text{m}^4$ )                 |
| $I_p$     | plastisuusluku (%)                              |
| M         | kokoonpuristuvuusmoduuli ( $\text{MN/m}^2$ )    |
| $M_A$     | momentti pisteessä A ( $\text{kNm}$ )           |
| N         | normaalivoima (kN)                              |
| P         | todennäköisyys                                  |
| Q         | kokonaislämpömäärä (kJ)                         |
| T         | lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )                |

|               |                                         |
|---------------|-----------------------------------------|
| $V_1$         | maavuodon määrä ( $m^3$ )               |
| $\alpha$      | veden laajenemiskerroin jäätyessä       |
| $\gamma$      | tilavuuspaino ( $kN/m^3$ )              |
| $\delta$      | siirtymä (mm)                           |
| $\epsilon$    | huokosluku                              |
| $\xi$         | jäädytysputken halkaisija (m)           |
| $\eta$        | painuman arvo tietyssä pisteessä        |
| $\lambda$     | lämmönjohtavuus (W/Km)                  |
| $\nu$         | Poissonin luku                          |
| $\xi$         | jääsylinterin säde (m)                  |
| $\rho$        | tiheys ( $kg/m^3$ )                     |
| $\sigma$      | jännitys ( $kN/m^2$ )                   |
| $\sigma_{ul}$ | hetkellinen jännitys ( $kN/m^2$ )       |
| $\sigma_{lt}$ | pitkäaikainen jännitys ( $kN/m^2$ )     |
| $\tau_{ul}$   | hetkellinen leikkauslujuus ( $kN/m^2$ ) |
| $\phi$        | kitkakulma                              |
| $\phi'$       | tehokas kitkakulma                      |

# 1. JOHDANTO

Kluuvin ruhje on vaikeimpia rakennustyökohteita Helsingin itäisellä metrolinjalla. Kluuvin ruhjeen rakennuttajana toimi Helsingin kaupungin metrotuimisto. Kohteen suunnittelusta vastasi Linjasuunnittelu Oy. Pääurakoitsijana oli Lemminkäinen Oy. Hankkija Oy asensi jäädytyslaitteiston.

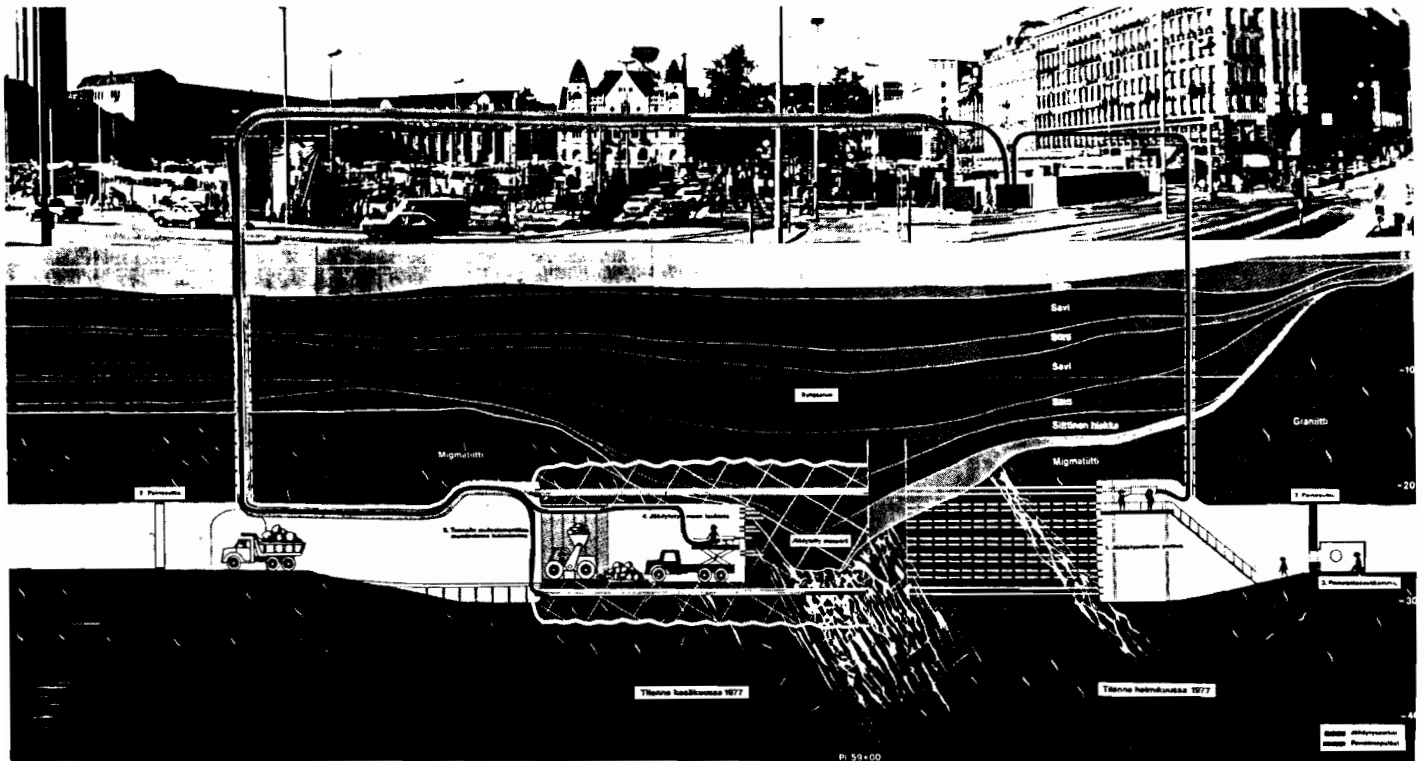
Ruhjeen läpäiseminen vaati jäädytysmenetelmän käyttöä. Paineilmajärjestelmä oli varajärjestelmänä, koska Suomessa ei ole aikaisemmin tehty vastaavaa urakkaa.

Maatunnelin rakentamiseen liittyy aina riski maaperän liikkeistä ja pohjavedenpinnan alenemisesta. Jäädytysmenetelmää käyttämällä haluttiin minimoida riskit. Tunnelin sijaitessa pohjavedenpinnan alapuolella osittain melko löyhässä kirkkamaassa ei mikään muu menetelmä ollut teknillisesti kilpailukykyinen.

Jäädytysmenetelmään liittyviä maan liikkeitä ei tunnettu riittävän hyvin. Vertailupohjaa haettiin lähinnä Leningradin metrosta. Siellä on tehty useita tunneliosuuksia jäädytysmenetelmällä. Maaperäolosuhteet ovat kuitenkin erilaiset. Kluuvin ruhjeessa suurin osa jäädytettävästä massasta oli ruhjeista kalliota. Kuvassa 1 on esitetty periaatekuva Kluuvin ruhjeen läpäisystä.

Helsingin kaupungin geoteknillinen toimisto (Gtt) rakensi Kluuvin ruhjeen maakerrokseen tarkkailumittausverkoston. Gtt suoritti myös mittaukset. Tämän mittausverkoston avulla voitiin seurata maakerroksissa ja maan pinnalla tapahtuvia liikkeitä. Ruhjeen päällä oli myös pohja- ja orsivedenpinnan havaintoputkia. Savikerroksissa oli huokosvedenpaineen mittauksia varten huokoskärkiä.

Tässä työssä pyritään selvittämään Kluuvin ruhjeen läpäisyn aikana maaperässä tapahtuneita muutoksia. Lisäksi tarkastellaan jäädytysmenetelmää yleensä ja jääkuoren lujuutta Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen (VTT) geoteknillisen laboratorion tekemien lujuuskokeiden perusteella /19/.



Kuva 1. Kaaviokuva ruhjeen läpäisystä. Paineilma- ja jäädytysnesteputket tulevat maan pinnalta kaivinpäällysteen läpi porattua reikää pitkin.

## 2.

### KLUUVIN RUHJE

#### 2.1

#### Geologia

#### 2.11

#### Ruhjeen syntyminen

Kluuvin ruhjeeksi kutsutaan Helsingin keskikau-pungin aluetta leikkaavaa Kauppatorin rannasta Töölönlahteen ulottuvaa kallioperäsiirrosta. Siirros on luoteis-kaakkoissuuntainen ja osa laajempaa siirrosjärjestelmää (kuva 2).

Kluuvin ruhje on maankuoren liikuntojen aikaansaama kallioperän liikuntasärmä. Etelä-Suomessa ja Ruotsissa vallitsi noin 1800 milj. vuotta sitten vuorijonon muodostuskausi. Vuorijonomuodostuksen loppuvaiheessa kasvava puristusvoima aiheutti kalliomassojen murtumisen. Tällöin syntyivät siirrosjyäkset. Suuri osa siirroksista syntyi noin 30° kulmassa puristusvoimaan nähden. Kluuvin ruhje on tyypillinen tässä suunnassa oleva siirros. Kluuvin ruhje on niinsanottu strike-slip-siirros, jossa liikkumista on tapahtunut vaakatasossa. Geologi Ahti Sarasteen mukaan siirtymä on noin 600 m.



Kuva 2. Kluuvin ruhjeen sijainti. Kallionpinta ruhjeen kohdalla merkitty korkeuskäyrillä. Metron rata-tunnelit leikkaavat ruhjeen kohtisuorasti.

Ruhjevyöhykkeessä tapahtuneen hiertymisen tuloksena on kiviaines täydellisesti murskautunut. Murskautunut ja jauhautunut kiviaines on pinttynyt ja kiteytynyt ja taas rikkoutunut uudessa hiertymässä. Liikunnan tuloksena on kivissä tapahtunut kemiallisia reaktioita, joiden tuloksena on syntynyt ruhjevyöhykkeen olosuhteita vastaava mineraalikoostumus.

Ruhjoutuneessa kallioaineksessa on tapahtunut runsaasti rapautumista. Rapautuminen on edennyt pääasiassa rakoja pitkin, jolloin rakovyöhykkeisiin on syntynyt savimineraaleja. Osa rakominaaaleista on kivettynyt uudelleen. Näin on syntynyt sekava rakojen rikkoma kivipaketti.

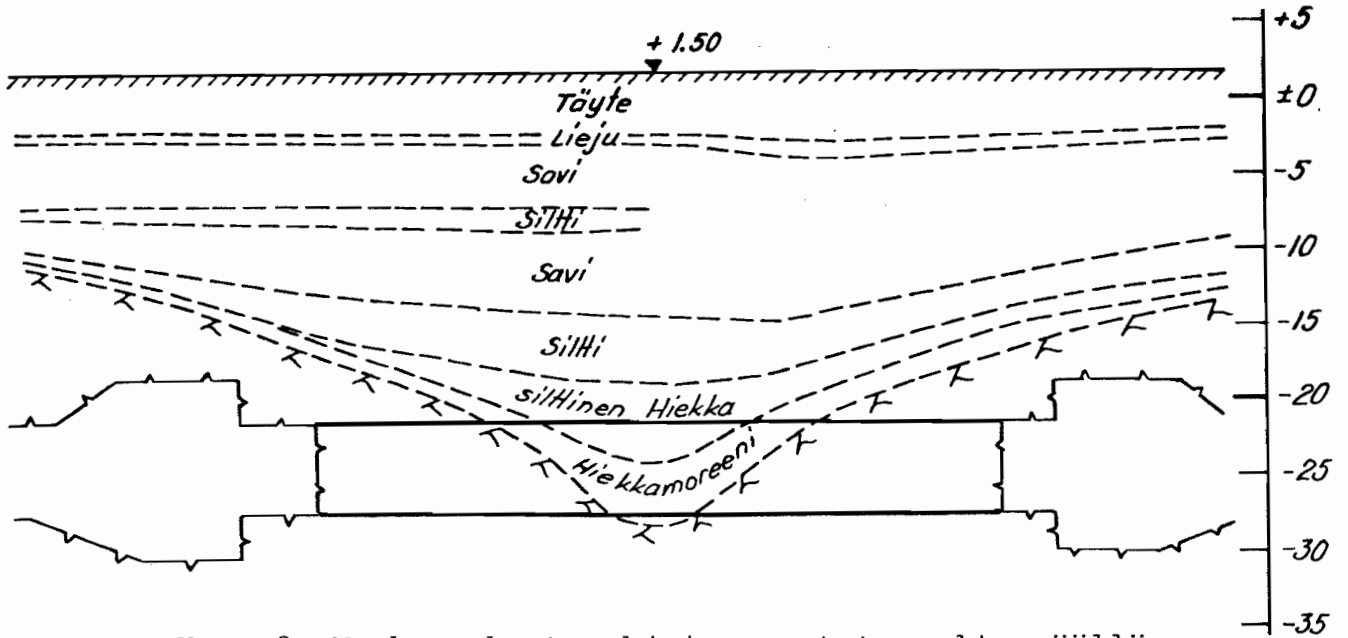
Vuorijonopoimutuksen jälkeen on Etelä-Suomen kallioperä ollut eroosioaluetta. Kluuvin ruhje on mannerjään liikunnan suuntainen ja ruhjelaakso on ollut alttiina mannerjään kulutukselle. Jääkauden vaikutus kalliota kuluttavana tekijänä on ollut kuitenkin vain muutamia metrejä, koska mannerjää ei ulottunut ruhjeessa kovin syvälle.

## 2.12

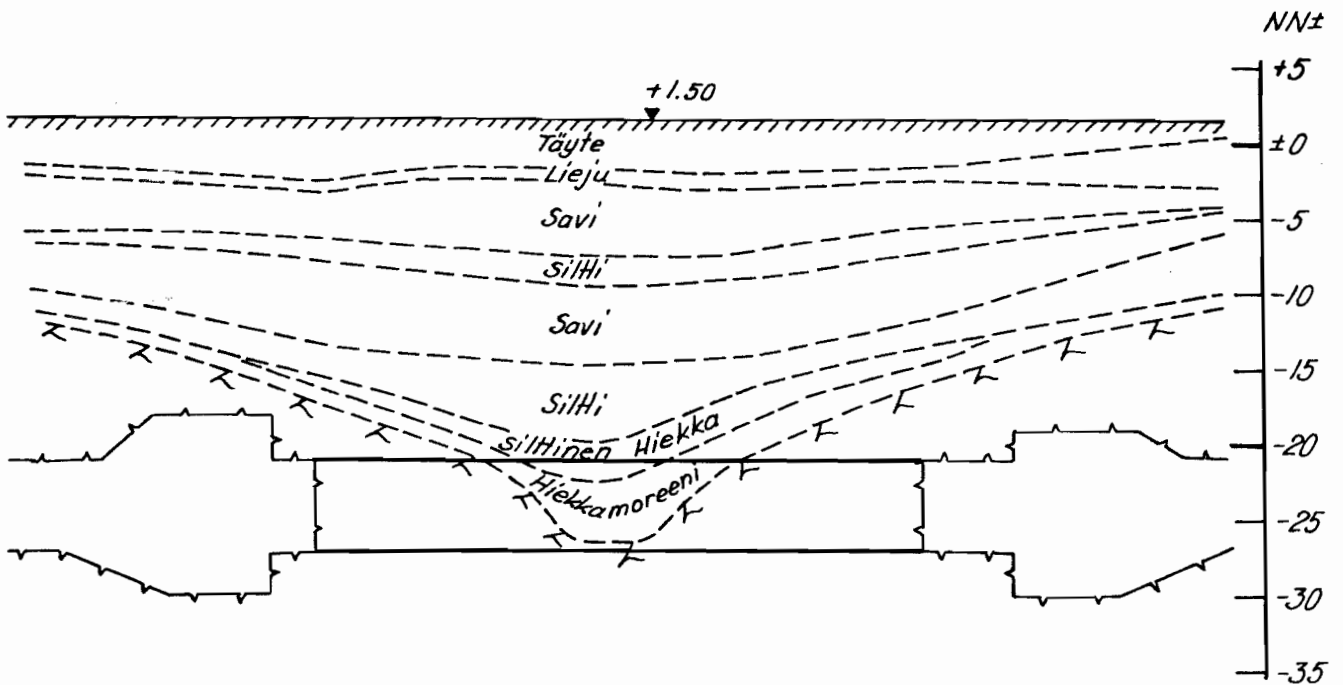
### Maakerrokset

Maanpinnan korkeus vaihtelee Rautatientorilla +1,4 - +2,0. Ratatunnelialueella on ylimpänä 3,0 - 4,0 m paksuinen kivinen ja paikoitellen lohkaraitakin sisältävä täyttemaakerros. Täytteen alla on paikoitellen todettu ohuehko liejuinen silttikerros. Liejukerroksen alla on enimmillään noin 12 m paksu vaihteleva savikerrostuma, joka ulottuu alimmillaan tasoon -15,0. Savikerroksen keskellä on todettu 0,5 - 1,5 m paksuinen silttikerros. Saven alla on suurimmillaan 10 m paksu kitkamaakerros. Välittömästi saven alapuolella on 3 m paksu silttikerros. Tämän alapuolella on noin 3 - 4 m paksu kerros hiekkaa ja alinna hiekkamoreenia. Kallionpinta on ruhjelaakson pohjalla alimmillaan tasossa -27,0.

Heikkousvyöhykkeen leveys on kokonaisuudessaan noin 60 m. Maapeitteisen tunneliosan pituus on tunnelin kattotason kohdalla pohjoisessa tunnelissa noin 21 m ja eteläisessä tunnelissa noin 17 m. Kuvissa 3 ja 4 on esitetty Kluuvin ruhjeen maakerrokset.



Kuva 3. Maakerrokset pohjoisen ratatunnelin päällä.  
Leikkaus A-A. Leikkaus A-A on esitetty kuvas-  
sa 32. Mittakaava 1:50.



Kuva 4. Maakerrokset eteläisen ratatunnelin päällä.  
Leikkaus B-B. Leikkaus B-B on esitetty kuvas-  
sa 32. Mittakaava 1:50.

## 2.2

Maaperän geotekniset ominaisuudet

## 2.21

## Lujuusominaisuudet

Päällimmäisenä oleva hiekkapohjainen täyte on melko tiivistä kitkamaata, joka sisältää paljon lohkareita. Sen ominaisuuksia ei ole tarkemmin tutkittu.

Savi- ja silttikerrosten lujuusominaisuudet tutkittiin VTT:n geotekniikan laboratoriossa kolmiakσιαalilaitteilla syvyysväliltä 6 - 16 m. Taulukko 1 esittää näiden maakerrosten lujuusominaisuudet /21/.

Saven ja siltin alla oleva hiekka on melko löyhästi kerrostunut. Alimmaisena oleva hiekkamoreeni on tiivistä. Taulukko 2 esittää kitkamaakerrosten lujuusominaisuuksia. Taulukko 2 /19/ on saatu ruhjeen läpäisyn yhteydessä otetuista näytteistä. VTT:n geotekniikan laboratoriossa suoritettiin sarja avoimia kolmiakσιαalikokeita näillä näytteillä.

Taulukko 1. Tehokkkaat koheesion ja kitkakulman arvot Kluuvin ruhjeen savikerroksissa eri syvyyksillä /21/.

| syvyys<br>(m) | $w_l$ (%) | $I_p$ (%) | ylikons.      |                         | norm.kons.    |                         |
|---------------|-----------|-----------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
|               |           |           | $c'$<br>(kPa) | $\phi'$<br>( $^\circ$ ) | $c'$<br>(kPa) | $\phi'$<br>( $^\circ$ ) |
| 6,23          | 45,2      | 22,8      | 4             | 22                      | 0             | 28                      |
| 6,57          | 60,2      | 36,1      | "             | "                       | "             | "                       |
| 11,13         | 66,6      | 40,5      | 6,9           | 21                      | 2,6           | 24                      |
| 11,89         | 66,1      | 42,1      | "             | "                       | "             | "                       |
| 12,00         | 57,7      | 35,6      |               |                         | 1             | 23                      |
| 12,53         | 49,5      | 28,8      |               |                         | "             | "                       |
| 15,33         | 37,0      | 15,1      |               |                         | 0,5           | 33                      |
| 15,76         | 28,1      | 7,9       |               |                         | "             | "                       |

Taulukko 2. Koheesion ja kitkakulman arvot tunnelitasolla sijaitseville maalajeille /19/.

| Maalaji | taso(m) | w (%) | $\gamma_m$ (kN/m <sup>3</sup> ) | c (kN/m <sup>2</sup> ) | $\phi$ ( $^\circ$ ) | Huom. |
|---------|---------|-------|---------------------------------|------------------------|---------------------|-------|
| hKk     | -21,0   | 19,5  | 20,9                            | 0                      | 34                  |       |
| Hk      | -23,0   | 19,5  | 20,7                            | 0                      | 33                  |       |
| hkMr    | -25,0   | 8,5   | 21,1                            | 0                      | 28                  | Häir. |



## 2.22

## Kokoonpuristuvuusominaisuudet

Kluuvin ruhjeen kohdalla on kokoonpuristuvia savi- ja silttikerroksia tasovälillä -2,0 - -15,0. Savikerrosten vesipitoisuus on yleensä juoksurajan läheisyydessä tai enintään 15 % sen yli. Savi on erittäin plastista ( $I_p > 25$  %) ja saven välissä oleva siltti kohtalaisen plastista ( $I_p = 15 - 20$  %).

Kluuvin ruhjeen savista suoritettiin lukuisia ödometrikokeita eri syvyyksistä. Helsingin kaupungin geoteknillinen toimisto (Gtt) suoritti 28 ödometrikokeita kuormitussarjalla  $0,125 \text{ kp/cm}^2$  -  $4,0 \text{ kp/cm}^2$  ilman palautuskuormituksia. Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen geotekniikan laboratorio (Geo) tutki yhden näytesarjan (7 näytettä) kuormitussarjalla  $0,06 - 16 \text{ kp/cm}^2$  /20/.

Koetulosten perusteella voidaan päätellä, että savi tasovälillä -5,0 - -14,0 ei ollut ennen Kluuvin ruhjeen rakentamista täysin konsolidoitunut päällä olevan täytteen kuormituksesta. Samaa osoittavat myös alueella suoritettut huokospainemittaukset.

Suoritettujen ödometrikokeiden perusteella saadaan taulukossa 3 olevat arvot kokoonpuristuvuusmoduulille  $M$  ja konsolidaatiovakiolle  $c_v$  eri tasoissa. Tunnelitasolla sijaitsevien maakerrosten kokoonpuristuvuusominaisuuksia voidaan arvioida kolmiakσιαalikokeiden antamien tulosten perusteella.

Taulukko 3. Eri tasoilla sijaitsevien maalajien kokoonpuristuvuusominaisuudet Kluuvin ruhjeessa. /19, 20/.

| Maalaji | taso  | $M (\text{MN/m}^2)$ | $c_v (\text{m}^2/\text{v})$ | Huom. |
|---------|-------|---------------------|-----------------------------|-------|
| savi    | - 4,5 | 0,667               | 0,5                         |       |
| "       | - 9,0 | 1,470               | "                           |       |
| "       | -13,5 | 3,700               | "                           |       |
| hHk     | -21,0 | 30                  |                             |       |
| Hk      | -23,0 | 30                  |                             |       |
| hkMr    | -25,0 | 10                  |                             | Häir. |

## 2.23

## Vedenläpäisevyys

Kluuvin ruhjeen maakerrosten vedenläpäisevyysominaisuuksien määrittämiseksi suoritettiin vedenläpäisevyyskokeita laboratoriossa ja kentällä ("in situ"). Lisäksi tehtiin rakeisuusmäärityksiä ja koepumppauksia.

Rakeisuusmäärittäytuloksista voidaan vedenläpäisevyyttä arvioida käyttäen Ruotsin geoteknillisen yhdistyksen julkaisun nomogrammeja /10/. Vedenläpäisevyyden selvittämiseksi tehtiin laboratoriossa vedenläpäisevyyskokeita vakio- ja muuttuvapainekokeina.

Geoteknillinen toimisto teki "in situ" vedenläpäisevyyskokeen Rautatientorilla. Vedensyöttö suoritettiin käyttäen huokoskärjellä varustettua putkea. Tutkimusputkeen johdettiin vettä ja seurattiin vedenpinnan alenemaa ajan funktiona. Vedenläpäisevyys laskettiin kaavasta:

$$k = \frac{R_1^2 \cdot \ln\left(1 + \frac{L}{2 \cdot r_1}\right)}{2 \cdot T \cdot L} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

missä

$R_1$  on putken yläpäässä olevan kapeamman osan säde (9,5 mm)

$L$  " suodattimen pituus (500 mm)

$r_1$  " suodatinosan säde (40 mm)

$T$  " aika, jona vedenpinta alenee  $h_1$ :stä  $h_2$ :een

$h_1$  " vedenpinnan alkukorkeus pohjavedenpinnasta

$h_2$  " " loppukorkeus "

Rautatientorilla tehtiin myös koepumppauksia maan vedenläpäisevyyden selvittämiseksi. Koepumppaukset suoritettiin isoläpimittaisesta  $\varnothing$  400 mm kaivosta. Kaivosta pumpattiin enimmillään 100 l/min. Kaivon tukkeuduttua suoritettiin toinen koepumppaus pienemmästä kaivosta.

Joskus määritetään vedenläpäisevyyden arvo rakeisuusmäärittäytuloksista suoraan Hazenin kaavalla:

$$k = 10\,000 \cdot D_{10}^2 \quad (2)$$

missä

$k$  on vedenläpäisevyys (m/s)

$D_{10}$  " raekoko 10 % läpäisyasteen kohdalla.

Tämä kaava antaa kuitenkin sattumanvaraisia tuloksia. Jos maa-aineksessa esiintyy savilajitetta, voi Hazenin kaava antaa 10 - 50 kertaa liian suuren vedenläpäisevyyden arvon.

Laboratoriokokeita varten otettiin pääosa näytteistä kahmarikauhalla kaivinpaaluputkesta kaivutyön yhteydessä. Kaivu suoritettiin vedenalaisena työnä. Näytteeseen tuli täten hienoainesta suhteellisesti enemmän kuin karkeita aineksia. Tällöin laboratoriokokeiden antamat tulokset ovat liian pieniä.

"In situ" koe on huolellisesti tehtynä luotettavampi määrittäminen kuin edellä mainittu. Näiden kokeiden tuloksia on kuitenkin syytä hieman korottaa, koska tutkimusputket osittain tukkeutuivat kokeiden aikana. Koepumppaus on luotettavin vedenläpäisymäärittäminen. Tässä tapauksessa tulokseen on suhtauduttava varauksella, koska suuriläpimittainen siiviläkaivo oli rikkoutunut. Taulukossa 4 on esitetty savikerrosten alla olevien maakerrosten vedenläpäisevyysarvot eri menetelmillä.

Taulukko 4. Maakerrosten arvioidut keskimääräiset vedenläpäisevyyskertoimet  $k(m/s)$ .

| Maa-laji | Tasoväli  | Koepumppausten perusteella arvioitu | "In situ" kokeen perusteella arvioitu | Nomogrammin mukaan arvioitu /10/ |
|----------|-----------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| hHk      | -17 - -20 | $1 \times 10^{-7}$                  | $7 \times 10^{-9}$                    | $5 \times 10^{-6}$               |
| Hk       | -20 - -22 | $5 \times 10^{-6}$                  | $2 \times 10^{-6}$                    | $1 \times 10^{-5}$               |
| hkMr     | -22 - -24 | $1 \times 10^{-4}$                  | $5 \times 10^{-5}$                    | $1 \times 10^{-4}$               |

## 2.24 Routivuus

Rakeisuuskäyrien perusteella ovat siltit tasovälillä -14,0 - -16,0 erittäin routivia. Lihavat savet tasolla -13,0 ja siitä ylöspäin ovat vähemmän routivia huonosta vedenläpäisevyydestä johtuen. Hiekkakerrokset tasolla -18,0 - -23,0 routivat vain hyvin heikosti, samoin hiekkamoreeni tasolla -23,0 - -26,0.

VTT:n tie- ja liikennelaboratorio teki routakokeita näytteistä, jotka otettiin ruhjeesta eri syvyyksiltä. Näistä routakokeista mitattiin vapaa

routanousu. Routanousu tapahtui siis normaali ilmanpaineessa. Tunnelitasolla tilanne on toinen. Siellä vallitsee keskimäärin  $240 \text{ kN/m}^2$  tehokas paine.

Routakokeiden perusteella vain siltit tasovälillä  $-13,0 - -16,0$  ovat erittäin routivia. Tunnelitasolla sijaitsevat karkeammat ainekset ovat vain hyvin heikosti routivia. Routapaine näissä maalajeissa jää pienemmäksi kuin ko. tasolla vallitseva tehokas paine (kappale 8.4).

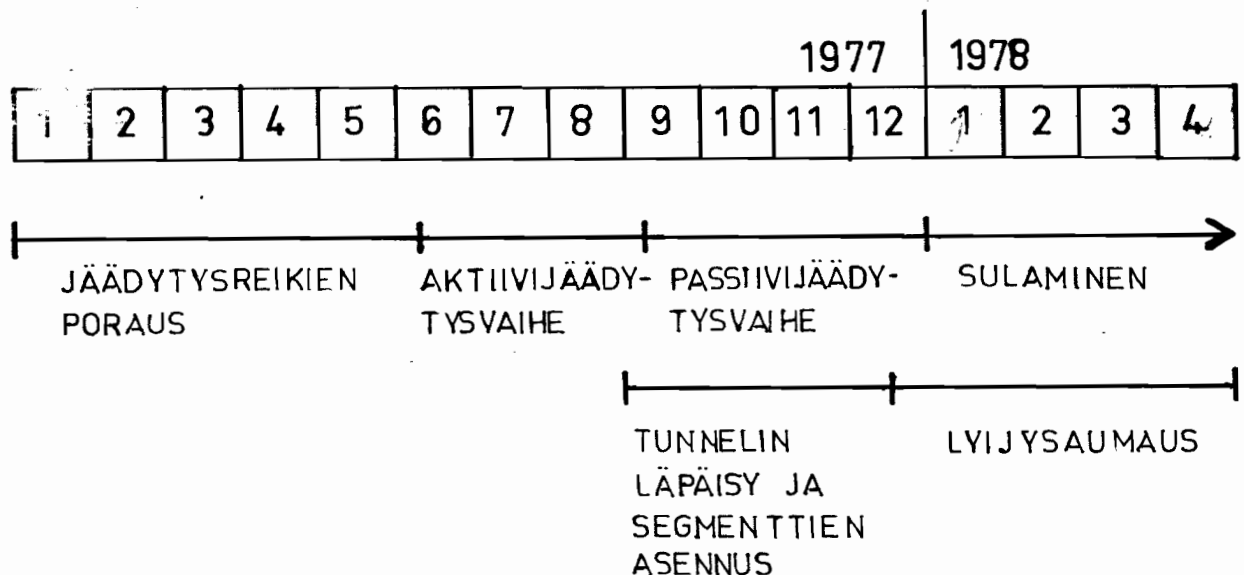
### 3.

#### LÄPÄISYN SUORITUS

##### 3.1

##### Läpäisyn suoritus Kluuvin ruhjeessa

Kluuvin ruhjeen läpäisyssä käytettiin jäädytysmenetelmää. Tähän päädyttiin, koska todettiin maakerrosten injektoinnin olevan vaikeaa. Valittavana oli jäädytysputkien asentaminen joko tunnelista käsin vaakaporauksena tai maanpinnalta käsin pystyporauksena. Vaakaporausmenetelmä valittiin, koska tällöin poraustyö voidaan suorittaa tunnelista käsin. Pystyporausmenetelmä olisi rajoittanut liikennettä Rautatientorilla. Lisäksi porauskustannukset vaakaporausmenetelmässä ovat tässä tapauksessa halvemmat. Kluuvin ruhjeen läpäisyn työaikataulu on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Kluuvin ruhjeen läpäisyn työvaiheet.



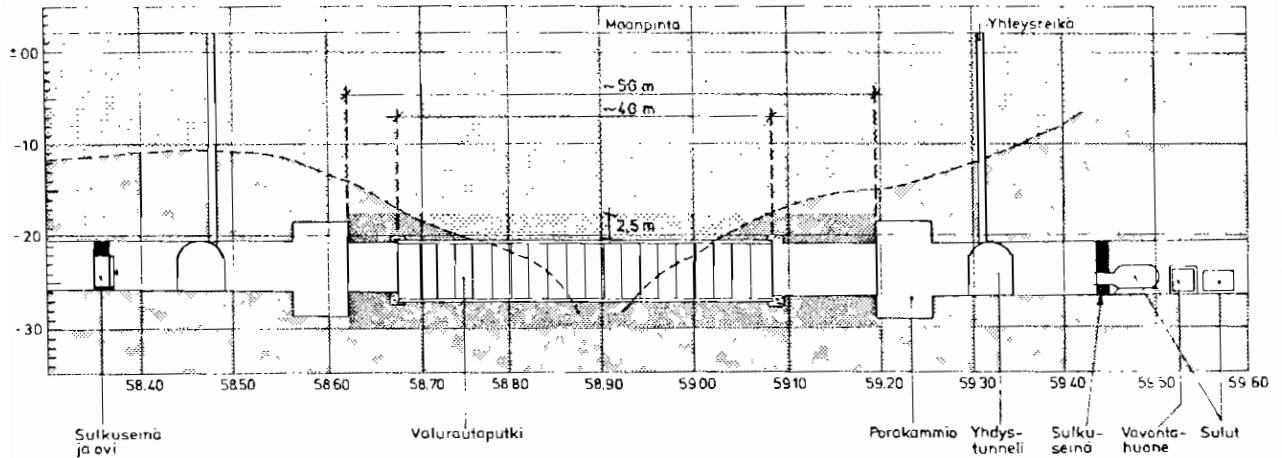


Kuva 7. Pohjoinen tunneli rakennusvaiheessa.

Valurautasegmentit asennettiin heti avauksen jälkeen niin, ettei vapaata jääkuorta ollut kerrollaan näkyvissä paria metriä enempää. Valurautaverhouksen asennuksen jälkeen seurasi tunnelin tiivistysvaihe. Tiivistysvaiheen lopussa suljettiin jäädytysputkisto ja annettiin tunnelia ympäröivän jääkuoren sulaa. Freonin kierto lopetettiin asteittain. Ensin suljettiin jäädytysputkiston sisäkehä ja toista kuukautta myöhemmin ulkokehä.

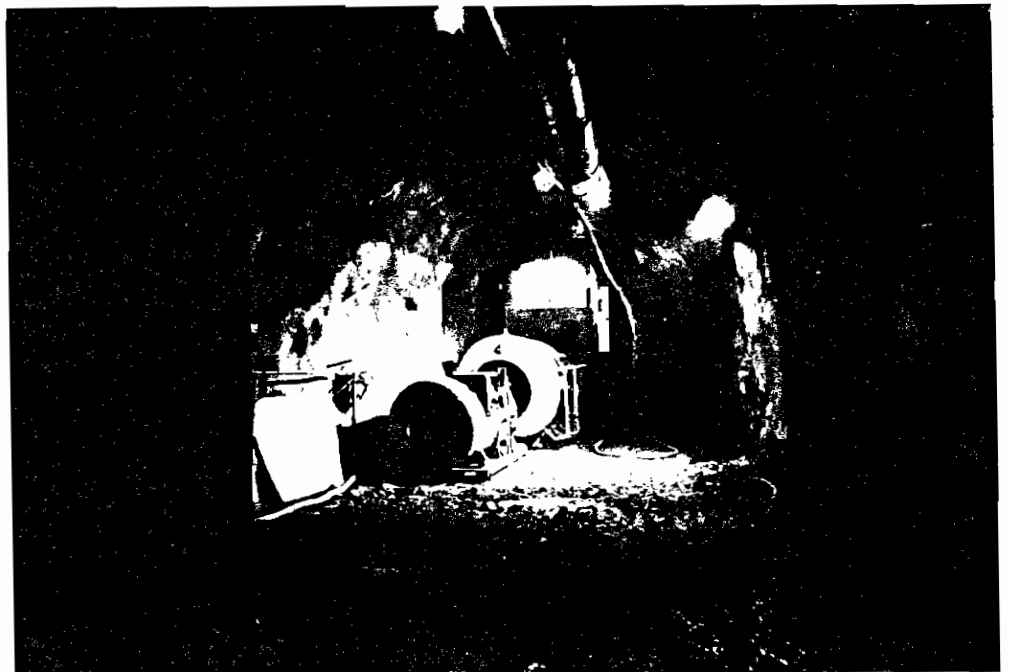
Jäädytyslaitteiston lisäksi rakennettiin paineilmalaitteisto varajärjestelmäksi. Ilmanpaineella olisi voitu estää vesivuodot, jos jääkuori olisi pettänyt. Paineilmalaitteiston avulla oli mahdollista nostaa tunnelin ilmanpaine arvoon 270 kPa. Suurempaa painetta ei olisi voitu käyttää, koska tällöin paineilma olisi tunkeutunut yllä olevien maakerrosten läpi maanpintaan asti.

Kuvasta 8 nähdään paineilmalaitteiden sijainti. Molemmissa päissä ruhjetta on painesulut. Paineilmaa syöttävät kompressorit olivat maanpinnalla. Paineilma tuli tunnelitasolle yhdysreikää pitkin suoraan kalliokaton läpi. Paineilmalaitteistojen keskusvalvomo sijaitsi tunnelitasolla painesulkujen ulkopuolella. Sieltä käsin voitiin tarkkailla koko järjestelmää ja suorittaa tarvittavat säädöt.



Kuva 8. Paineilmalaitteistojen sijainti Kluuvin ruhjeessa.

Paineilmatyössä sulutusajat muodostavat huomattavan osan työajasta. Työskenneltäessä 270 kPa ylipaineessa on pisin sallittu yhtäjaksoinen työaika 120 min. Tämän jälkeen menee paineentasaukseen 100 min. Tässä tapauksessa painetta on tasattava 60 kPa ylipaineessa 32 minuuttia ja 30 kPa ylipaineessa 68 min. Paineentasaus täytyy suorittaa huolellisesti, jotta välttyttäisiin sukeltajantaudilta. Kuvasta 9 nähdään paineen tasaukammioita.



Kuva 9. Kuvassa etualalla lääketieteellinen hoitokammio ja sen takana miehistön paineentasaukammio ja paineilmaavalmomo.

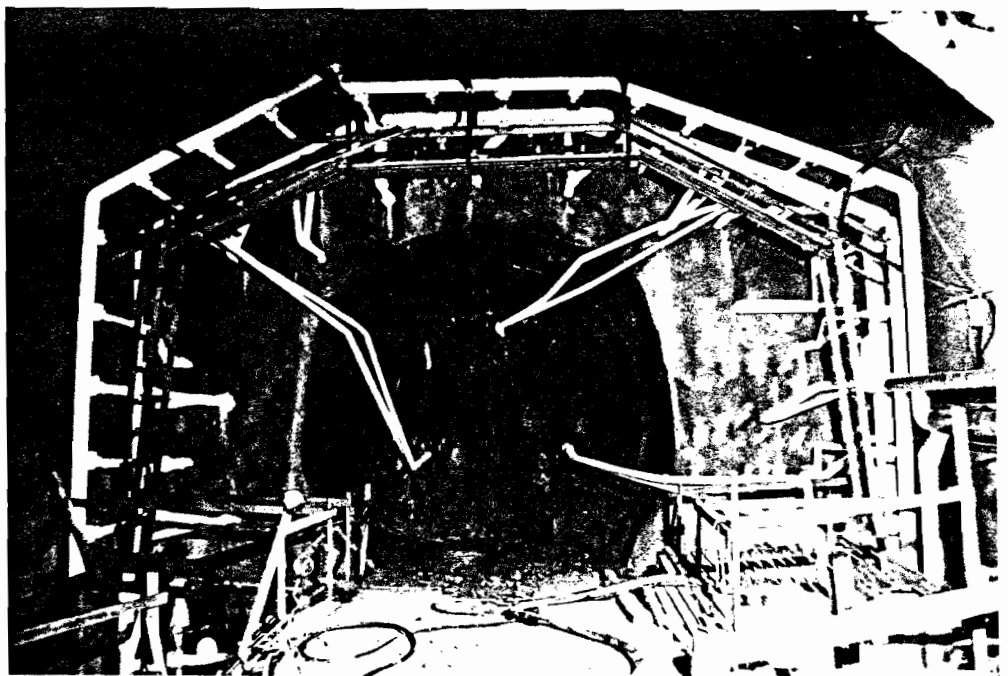
## 3.2

Jäädytysmenetelmä

## 3.21

## Yleistä

Jäädytysmenetelmän käyttö on yleistynyt vaikeissa pohjarakennustöissä. Menetelmä perustuu jäätyneen maan suureen lujuuteen. Se on kymmeniä kertoja suurempi kuin sulan maan lujuus. Menetelmä edellyttää tietysti, että maaperä on riittävän kosteaa yhtenäisen jäämassan syntymiselle. Jäätyneellä maalla on huono vedenläpäisevyys. Jäädytysmenetelmää käytetään mm. tunneleiden, kaivantojen ja kuilujen tukemiseen /6/. Kuvasta 10 nähdään jäädytysputkiston sijoitus Kluuvin ruhjeessa.



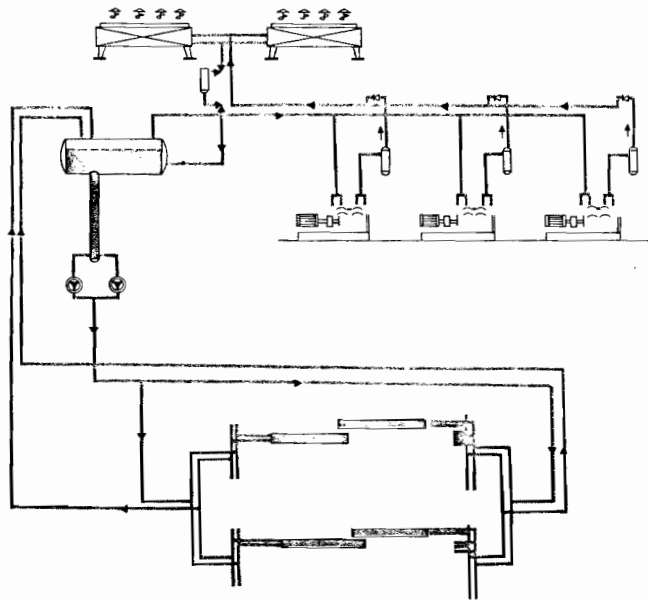
Kuva 10. Jäädytysputkisto Kampin puolen pohjoisessa perässä.

Pohjaveden lämpötila ja virtausnopeus asettavat rajoja jäädytysmenetelmän käytölle. Pohjaveden virtausnopeuden ollessa yli  $2,3 \cdot 10^{-5}$  m/s koh-tisuoraan jääseinämää vastaan, alkaa olla vaikeuksia saada jääsylintereitä yhtymään putkesta putkeen /8/. Tällöin jäädytystehoa täytyy nostaa huomattavasti tai tihentää putkiväliä. Maaperän jäädytys tapahtuu tavallisesti maaperään porattujen jäädytysputkien avulla.

Varsinainen kylmäkoneisto toimii kuten jääkaappi-kin. Kompressorit puristavat kulmaaineena toimivan kaasun nestemäiseen tilaan. Tämän jälkeen nes-



te höyrystyy putkistoissa putken seinämistä tulevan lämmön vaikutuksesta ja nesteen lämpötila putoaa. Maan jäädytystä suoritetaan kahdella eri tavalla. Vanhemmassa järjestelmässä varsinainen kylmäkone on erikseen ja maaputkistossa kiertää suolaliuos. Nykyaikaisemmissa järjestelmissä maaputket ovat osa kylmäkonetta. Kylmäaineen höyrystyminen tapahtuu maaputkistossa. Näin saavutetaan suurempi hyötysuhde ja voidaan käyttää alempia lämpötiloja. Kuvassa 11 on esitetty jäädytysjärjestelmän toimintakaavio Kluuvin ruhjeessa.



Kuva 11. Jäädytysjärjestelmän toimintakaavio Kluuvin ruhjeessa.

Kylmäkoneelta vaadittava kapasiteetti riippuu monista seikoista:

- Maan lämpöteknillisistä ominaisuuksista
- Kylmäaineen lämpötilasta
- Jäädytysreikien välisestä etäisyydestä
- Jäädytysnesteen kiertonopeudesta.

Jäädytykseen tarvittava aika on kääntäen verrannollinen kylmäaineen lämpötilaan. Täten alhaisella lämpötilalla lyhennetään huomattavasti jäädytykseen tarvittavaa aikaa. Tällöin kokonaisenergian kulutus vähenee, koska lämpöhäviöt muodostuvat pienemmiksi.

Toinen mahdollisuus lyhentää jäädytykseen tarvittavaa aikaa on pienentää jäädytysputkien välistä etäisyyttä. Välimatkan pudotessa puoleen kasvaa jäädytysteho nelinkertaiseksi. Tämä on kuitenkin kalliimpi tapa nopeuttaa jäätymistä kuin kylmäaineen lämpötilan alentaminen, koska noin 50-60 % jäädytyksen kustannuksista aiheutuu porauksesta ja asennuksista /8/.

Jäädytysnesteen kiertonopeus maaputkistossa olisi pidettävä suhteellisen pienenä, noin  $8-15 \cdot 10^{-2}$  m/s /8/. Nopeutettaessa kiertoa liian paljon jäädytysneste ei toimi tehokkaasti. Tällöin kuluu hukkaan pumppausenergiaa.

Jäädytykseen tarvittava aika on riippuvainen myös jäädytysputken halkaisijasta. Jos kaikki muut tekijät pysyvät samoina, jäädytykseen tarvittava aika määräytyy putken halkaisijan perusteella.

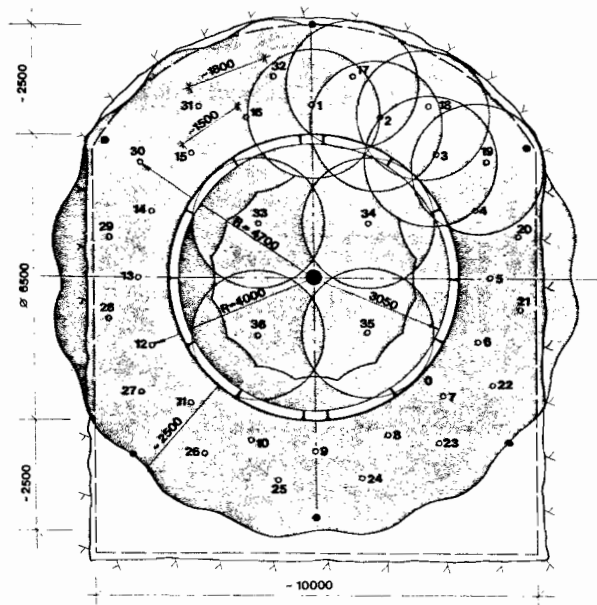
Taulukko 5. Jääsylinterin kasvunopeus eri läpimittaisilla jäädytysputkilla /8/. Jäädytysputken halkaisija on  $\zeta$ .

| Jäätymisaika (t) päivässä, kun $\zeta = 2r_o$ (m) |                 |                  |                 |                 |
|---------------------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| $\zeta, m$                                        | $\zeta = 0,060$ | $\zeta = 0,0885$ | $\zeta = 0,114$ | $\zeta = 0,140$ |
|                                                   | t               | t                | t               | t               |
| 0,1                                               | 0,230           | 0,135            | 0,090           | 0,045           |
| 0,2                                               | 1,70            | 1,275            | 1,00            | 0,784           |
| 0,3                                               | 4,655           | 3,860            | 3,181           | 2,770           |
| 0,4                                               | 9,920           | 8,170            | 6,600           | 6,100           |
| 0,5                                               | 17,00           | 14,32            | 12,50           | 11,07           |
| 0,6                                               | 26,40           | 22,60            | 19,85           | 17,85           |
| 0,7                                               | 37,82           | 32,72            | 29,15           | 26,32           |
| 0,8                                               | 52,60           | 45,20            | 40,50           | 36,80           |

Taulukosta 5 nähdään 0,1 - 0,8 m säteisen jääsylinterin muodostumiseen kuluva aika eri putkiläpimitoilla. Jos putken halkaisijaa 114 mm pidetään peruslukuna, saadaan seuraavat riippuvuudet. Halkaisijaltaan 140 mm putkella on jäädytykseen tarvittava aika 9 % lyhyempi. Halkaisijaltaan 88,5 mm putkella 11 % pidempi, sekä halkaisijaltaan 60 mm putkella 30 % pidempi kuin 114 mm putkella. Paksummalla putkella muodostuvat materiaali ja asennuskustannukset suuremmiksi, joten sama jäädytysaika voidaan saavuttaa pienemmillä putkilla lyhentämällä putkiväliä /8/.

Kluuvin ruhjeessa jäädytys on toteutettu siten, että jääsylinterit muodostavat ympyrän kehän tunnelin ympärillä. Jäädytysreikien poraus on suoritettu vaakaporauksena. Jäädytysputkien pituus on noin 25 m. Ne on porattu kummastakin päästä ruhjetta. Jäädytysputket sijaitsevat kahdella eri etäisyydellä tunneliprofiilista. Sisempi kehä on 800 mm etäisyydellä ja ulkokehä 1500 mm etäisyydellä tunneliprofiilista. Sisemmällä kehällä jäädytysputkien suunniteltu välimatka on 1590 mm. Ulommalla kehällä vastaava etäisyys on 1885 mm. Kuvassa 12 on esitetty jäädytysputkien sijainti ja numerointi.

Jäädytysaineena on freon-22 niminen kaasu. Kaasun höyrystymislämpötila on noin  $-26^{\circ}\text{C}$ . Jäädytysputken ulkoputken halkaisija on 87 mm. Sisemmän putken ulkohalkaisija on 63,5 mm ja sisähalkaisija 57,7 mm.



Kuva 12. Jäädytysputkien sijainti ja numerointi.

### 3.22

#### Jäädytysajan laskeminen lämpömäärien perusteella

Kluuvin ruhjeessa jäädytettävän maan ja kallion yhteistilavuus oli noin  $10800\text{ m}^3$ . Tämä koko tilavuus piti jäädyttää  $-10^{\circ}\text{C}$  keskilämpötilaan. Lämpötilojen kehitys aktiivijäädytysvaiheessa oletetaan seuraavaksi. Maan alkulämpötila on  $+8^{\circ}\text{C}$ .

Ensin maa jäähtyy nolnaan. Maassa oleva vesi jäähtyy. Tämän jälkeen jäätyneen maan keskilämpötila laskee  $-10^{\circ}\text{C}$  paikkeille.

Seuraavilla laskelmilla on pyritty arvioimaan ruhjeen jäädyttämiseen kuluva aikaa.

Taulukko 6. Ominaislämpöjä /7/.

| Aine                        | ominaislämpökapasiteetti $c_k$ (kJ/kgK) |
|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Vesi                        | 4,19                                    |
| Jää                         | 1,93                                    |
| Maa                         | 0,80                                    |
| Kallio                      | 0,80                                    |
| Jään sulamislämpö 335 kJ/kg |                                         |

Jäähtymisessä poistuva lämpömäärä lasketaan kaavalla 3.

$$q = \Delta t \cdot c_k \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3)$$

missä

$q$  on lämpömäärä/kg

$\Delta t$  " lämpötilaero

$c_k$  " ominaislämpökapasiteetti

Käyttämällä taulukossa 6 esitettyjä ominaislämpöjä saadaan seuraavat lämpömäärät:

$$\text{Vesi} \quad q = 8 \cdot 4,19 + 335 + 10 \cdot 1,93 = 388 \quad (\text{kJ/kg})$$

Maan runkoaines ja

$$\text{kallio} \quad q = 18 \cdot 0,80 = 14,5 \quad ( " )$$

Jäädytettävän maan ja kallion tilavuus ruhjeessa molemmat tunnelit huomioonottaen oli

|         |                     |          |                        |                       |
|---------|---------------------|----------|------------------------|-----------------------|
|         |                     |          | Maata                  | Vettä                 |
| Hiekka  | 1080 m <sup>3</sup> | w = 24 % | 1619 kg/m <sup>3</sup> | 390 kg/m <sup>3</sup> |
| Moreeni | 1520 m <sup>3</sup> | w = 11 % | 2050 kg/m <sup>3</sup> | 226 kg/m <sup>3</sup> |
| Kallio  | 8200 m <sup>3</sup> | w = 3 %  | 2455 kg/m <sup>3</sup> | 75 kg/m <sup>3</sup>  |

Ruhjeesta poistettava lämpömäärä on siten

$$Q = q \cdot m \cdot V \quad (4)$$

missä

$m$  on massa (kg/m<sup>3</sup>)

$V$  " tilavuus (m<sup>3</sup>)

jolloin saadaan koko ruhjeen jäädytyksessä pois-

tettavaksi lämpömääräksi  $Q = 8,97 \times 10^{11} \text{ J}$ .

Jäädytysaikaa laskettaessa on otettava huomioon myös häviöt ympäristöön.

Maaosuudella lämpöhäviö on noin  $10 \text{ W/m}^2$ , siis yhteensä  $2 \cdot 450 \text{ m}^2 \cdot 10 \text{ W/m}^2 = 4,5 \text{ kW}$ . Kallio-osuudella lämpöhäviö on noin  $20 \text{ W/m}^2$ , siis yhteensä  $2 \cdot 1350 \text{ m}^2 \cdot 20 \text{ W/m}^2 = 54 \text{ kW}$ . Jääkuoresta tunnelin sisätiloihin menevät häviöt ovat noin  $10 \text{ W/m}^2$ , siis yhteensä  $1500 \text{ m}^2 \cdot 10 \text{ W/m}^2 = 15 \text{ kW}$ . Häviöt maahan ja kallioon ovat yhteensä noin  $74 \text{ kW}$ . Putkistosta saatava teho on noin  $2 \cdot 167 \text{ kW} = 334 \text{ kW}$ .

Jäädytysaika saadaan kaavalla

$$t = \frac{\Sigma Q}{Q_p - Q \text{ häviö}} \quad (5)$$

missä

$\Sigma Q$  on jääkuoren muodostamiseen poistettava lämpömäärä

$Q_p$  " putkiston lämmönsiirtokyky

$t$  " jäädytysaika

$$t = 8,97 \cdot 10^{11} \text{ J} / (334 \text{ kW} - 74 \text{ kW}) = 3,45 \cdot 10^6 \text{ s} \\ = 958 \text{ h} = 40 \text{ d}$$

Aktiivijäädytysvaiheeseen kuluu näiden laskelmien perusteella noin 40 vuorokautta.

#### 4.

#### TARKKAILUMITTAUKSET

##### 4.1

##### Mittausohjelma

Kluuvin ruhjeen työn yhteydessä suoritettiin geoteknisiä erikoismittauksia /2/, /11/.

Maanpinnan muodonmuutoksien selvittämiseksi suoritettiin painumalevyjen ja raitiotiekiskojen vaaitusta. Maakerroksissa tapahtuvia muodonmuutoksia seurattiin painumaletkumittauksilla. Sivusiirtymämittauksilla tarkkailtiin maan sivusiirtymiä.

Saven konsolidoitumisvaiheen selvittämiseksi suoritettiin huokosvedenpaineen mittauksia. Lisäksi suoritettiin pohja- ja orsivedenpinnan mittauksia.

Tarkkailumittausten suoritusajankohdat ilmenevät kuvasta 13. Pohja- ja orsivedenpinnan mitauksia suoritettiin Kluuvin ruhjeen alueella keskimäärin kaksi kertaa viikossa. Kuvassa 14 on esitetty tarkkailumittausjärjestelmän sijainti. Kuvassa 15 on pystyleikkaus tarkkailujärjestelmästä. Kuvassa 16 on painumalevyjen mittaus tuloksia.

#### 4.2

##### Painumaletkumittaukset

Maakerroksissa tapahtuvia vertikaaliliikkeitä mitattiin painumaletkujen avulla. Kluuvin ruhjeeseen asennettiin kaksi painumaletkua V1 ja V2. Painumaletku suunniteltiin ja rakennettiin geoteknisessä toimistossa Norjan geoteknillisen instituutin haitariletkun pohjalta.

Painumaletkun rakenne on esitetty kuvassa 17. Painumaletku muodostuu kokoonpuristuvasta letkusta, jossa on siivekkeitä määrävälein. Siivekkeitä on pohjoisen tunnelin päällä olevassa letkussa V1 11 kpl ja eteläisen tunnelin päällä olevassa letkussa 10 kpl. Siiveke pysyy siipiensä ansiosta paikallaan maaperässä eikä lähde vajoamaan putkea pitkin alaspäin. Siivekkeissä on noin 10 mm paksuinen magneettinauharengas.

Mittaaminen tapahtuu teräksiseen mittanauhaan kiinnitetyllä "reed" releellä (kuva 18), joka aiheuttaa äänimerkin joutuessaan haitariletkuun kiinnitettyjen rengasmagneettien magneettikenttään. Mittauksen yhteydessä painumaletkujen yläpäät vaaittiin ja siivekkeiden korkeustasot laskettiin  $\pm$  tasoina. Painumaletkumittausten tulokset on esitetty kuvissa 19 - 20.

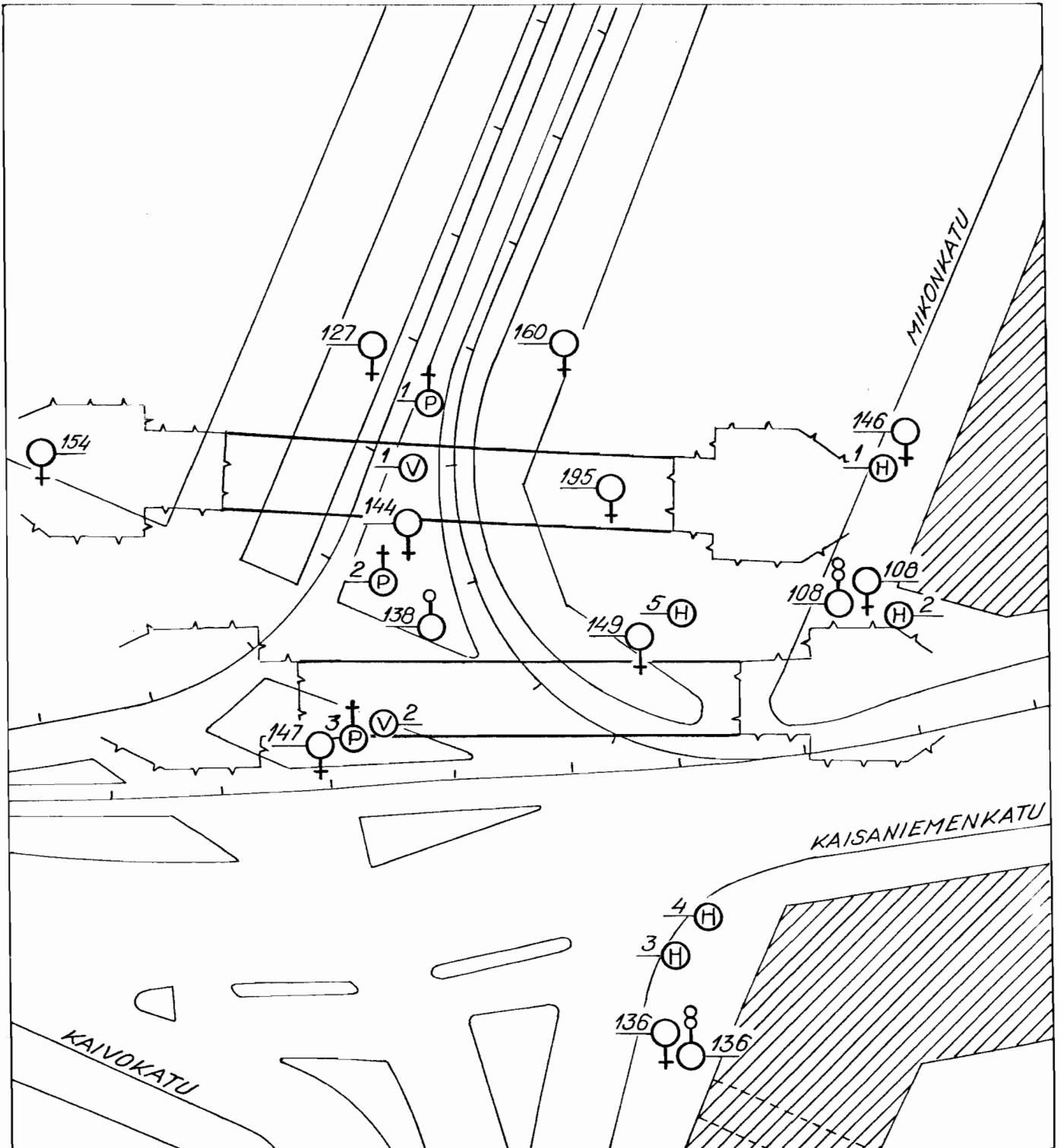
Painumaletkumittausten tarkkuus on kahden millin luokkaa. Painumaletkumittausten tarkkuutta pyrittiin arvioimaan passiivijäädytysvaiheen aikana tehdyistä mittauksista. Letku V1:n mittaustasot eivät liikkuneet kesäkuun ja lokakuun 1977 välisenä aikana. Tällä välillä suoritettiin 11 mitauskierrosta. Mittaustulokset jakautuvat ilmeisesti normaalijakauman mukaan mittausten lukumäärän ollessa riittävän suuri.

| Työaikotaulu          | Porausvaihe |       |        |       |       | Aktiivi-jäädytysvaihe |       |     |      |      | Passiivi-jäädytysvaihe |       |       |       |        | Sulaminen → |  |  |  |  |
|-----------------------|-------------|-------|--------|-------|-------|-----------------------|-------|-----|------|------|------------------------|-------|-------|-------|--------|-------------|--|--|--|--|
|                       | 1977        |       |        |       |       | 1978                  |       |     |      |      | 1978                   |       |       |       |        | 1978        |  |  |  |  |
| Tarkkailumittaukset   | Tammi       | Helmi | Maalis | Huhti | Touko | Kesä                  | Heinä | Elo | Syys | Loka | Marras                 | Joulu | Tammi | Helmi | Maalis |             |  |  |  |  |
| Painumalevylt V1      | o           | o     | o      | o     | o     | o                     | o     | o   | o    | o    | o                      | o     | o     | o     | o      |             |  |  |  |  |
| V2                    | o           | o     | o      | o     | o     | o                     | o     | o   | o    | o    | o                      | o     | o     | o     | o      | o           |  |  |  |  |
| Sivusiirtymäputket H1 |             | o     |        | o     | o     | o                     | o     | o   | o    | o    | o                      | o     | o     | o     | o      |             |  |  |  |  |
| H2                    |             |       | o      | o     | o     | o                     | o     | o   | o    | o    | o                      | o     | o     | o     | o      | o           |  |  |  |  |
| H3                    |             |       | o      | o     | o     | o                     | o     | o   | o    | o    | o                      | o     | o     | o     | o      | o           |  |  |  |  |
| H4                    |             |       |        | o     | o     | o                     | o     | o   | o    | o    | o                      | o     | o     | o     | o      | o           |  |  |  |  |
| H5                    |             |       |        | o     | o     | o                     | o     | o   | o    | o    | o                      | o     | o     | o     | o      | o           |  |  |  |  |
| Huokospainekärjet P1  | o           | o     | o      | o     | o     | o                     | o     | o   | o    | o    | o                      | o     | o     | o     | o      | o           |  |  |  |  |
| P2                    | o           | o     | o      | o     | o     | o                     | o     | o   | o    | o    | o                      | o     | o     | o     | o      | o           |  |  |  |  |
| P3                    | o           | o     | o      | o     | o     | o                     | o     | o   | o    | o    | o                      | o     | o     | o     | o      | o           |  |  |  |  |
| Painumalevyt          | o           | o     | o      | o     | o     | o                     | o     | o   | o    | o    | o                      | o     | o     | o     | o      | o           |  |  |  |  |
| Raitiotiekiskot       |             |       | o      | o     | o     | o                     | o     | o   | o    | o    | o                      | o     | o     | o     | o      | o           |  |  |  |  |

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

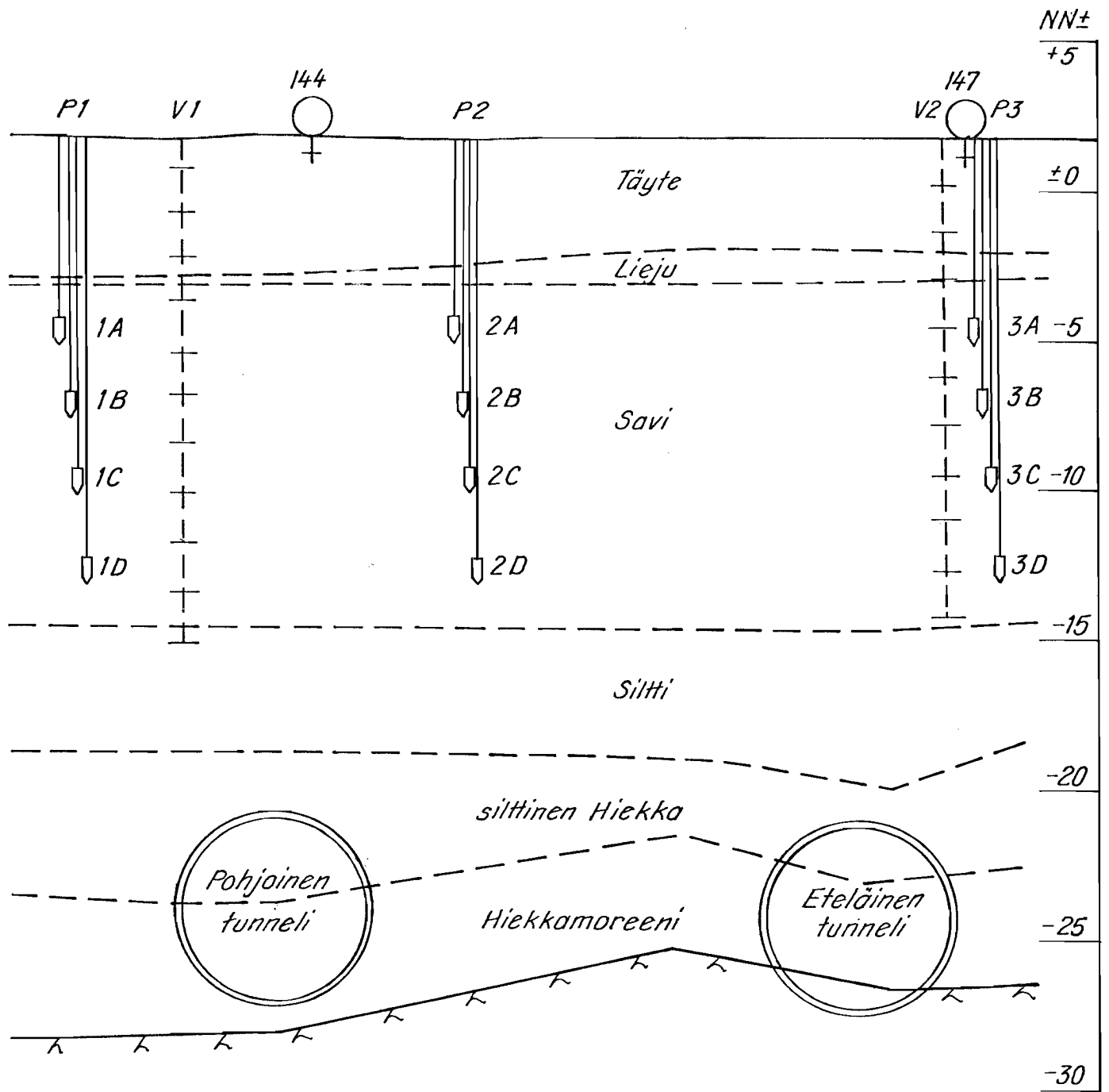
Kuva 13. Mittausohjelma Kluuvien ruhjeen tarkkailumittauksista.

- |                                                                                   |                                           |                                                                                   |                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
|  | POHJAVEDEN JA ORSIVEDEN<br>TARKKAILUPUTKI |  | VERTIKAALISIIRTUMIEN<br>MITTAUSPUTKI   |
|  | PAINUMATARKKAILULEVY                      |  | HORISONTAALISIIRTUMIEN<br>MITTAUSPUTKI |
|                                                                                   |                                           |  | HUOKOSVEDENPAINEEEN<br>MITTAUSKÄRKI    |

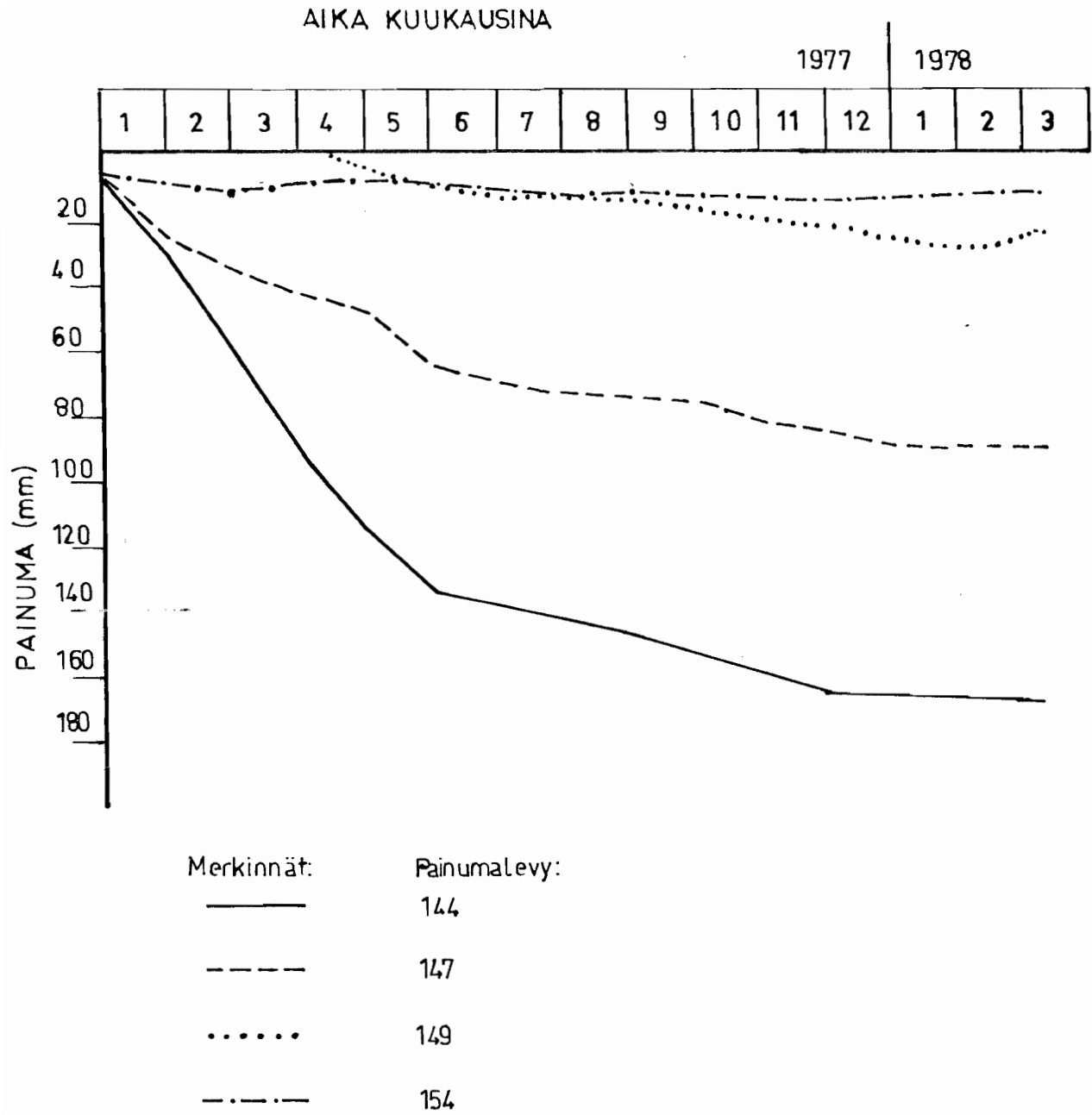


Kuva 14. Tarkkailumittauslaitteiden sijainti.  
Mittakaava 1:500.

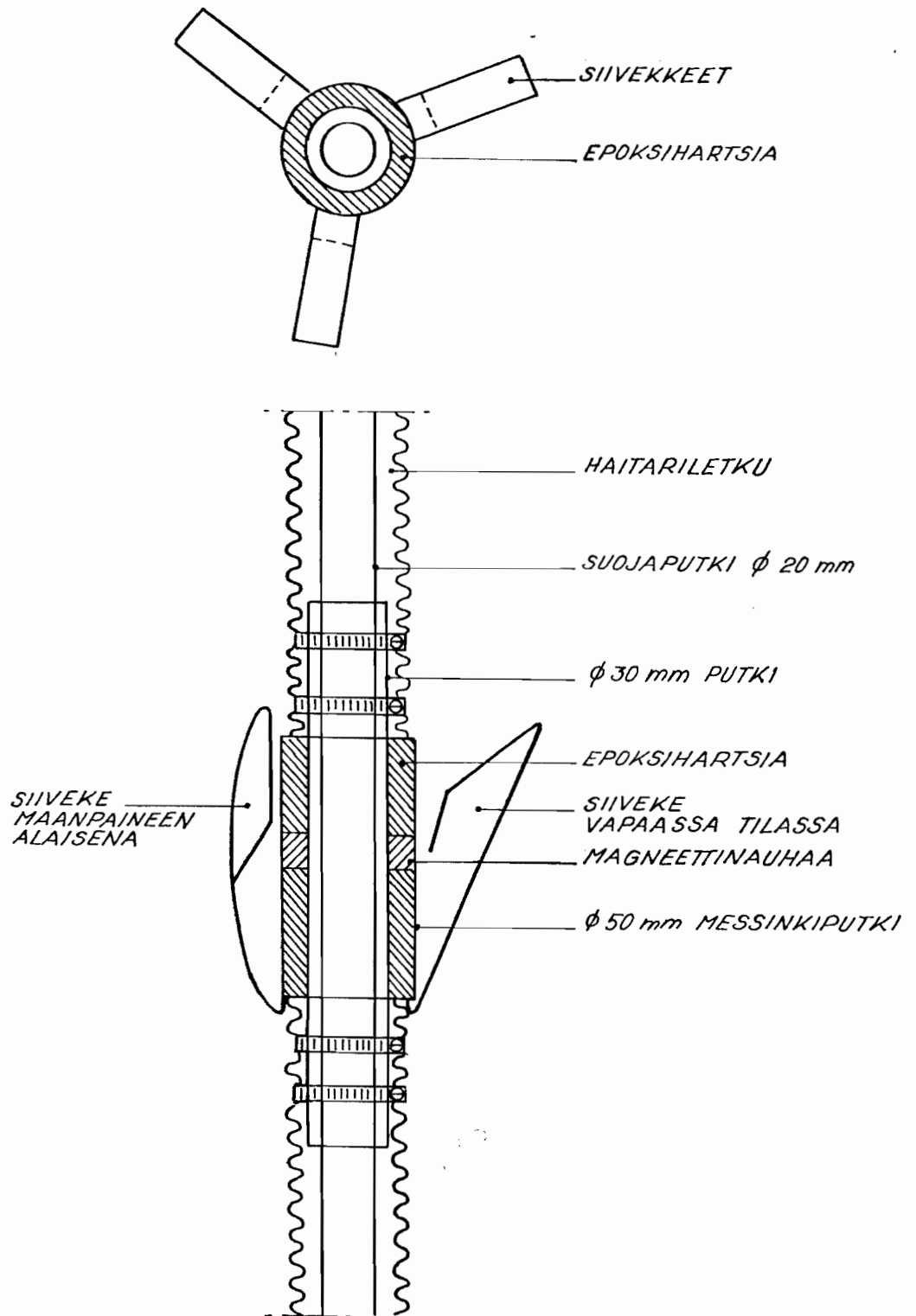




Kuva 15. Tarkkailumittauslaitteiden sijainti maakerroksissa.  
Mittakaava 1:200.



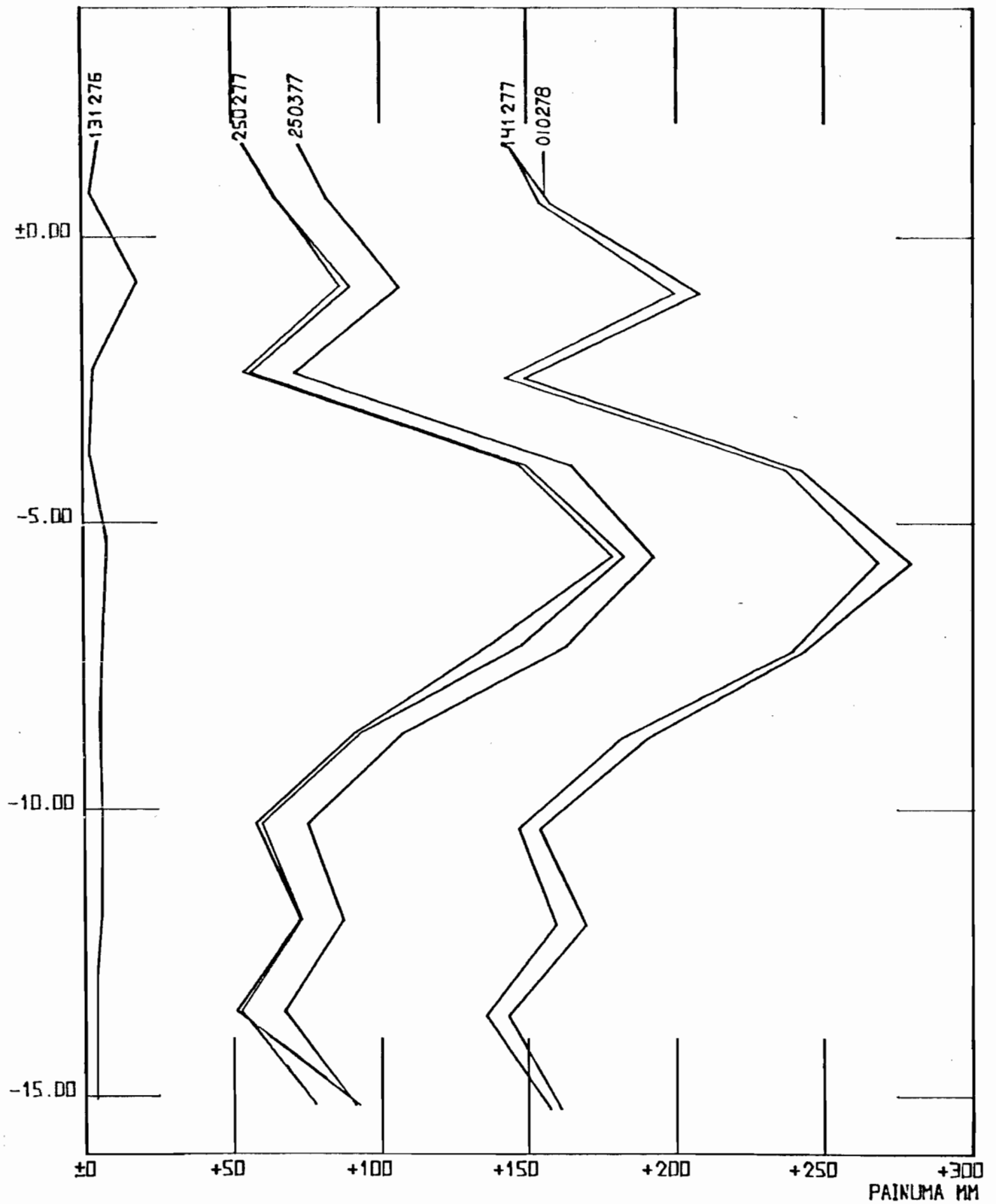
Kuva 16. Painumalevyjen mittaustuloksia.



Kuva 17. Painumaletkun yhden mittastason rakenne.

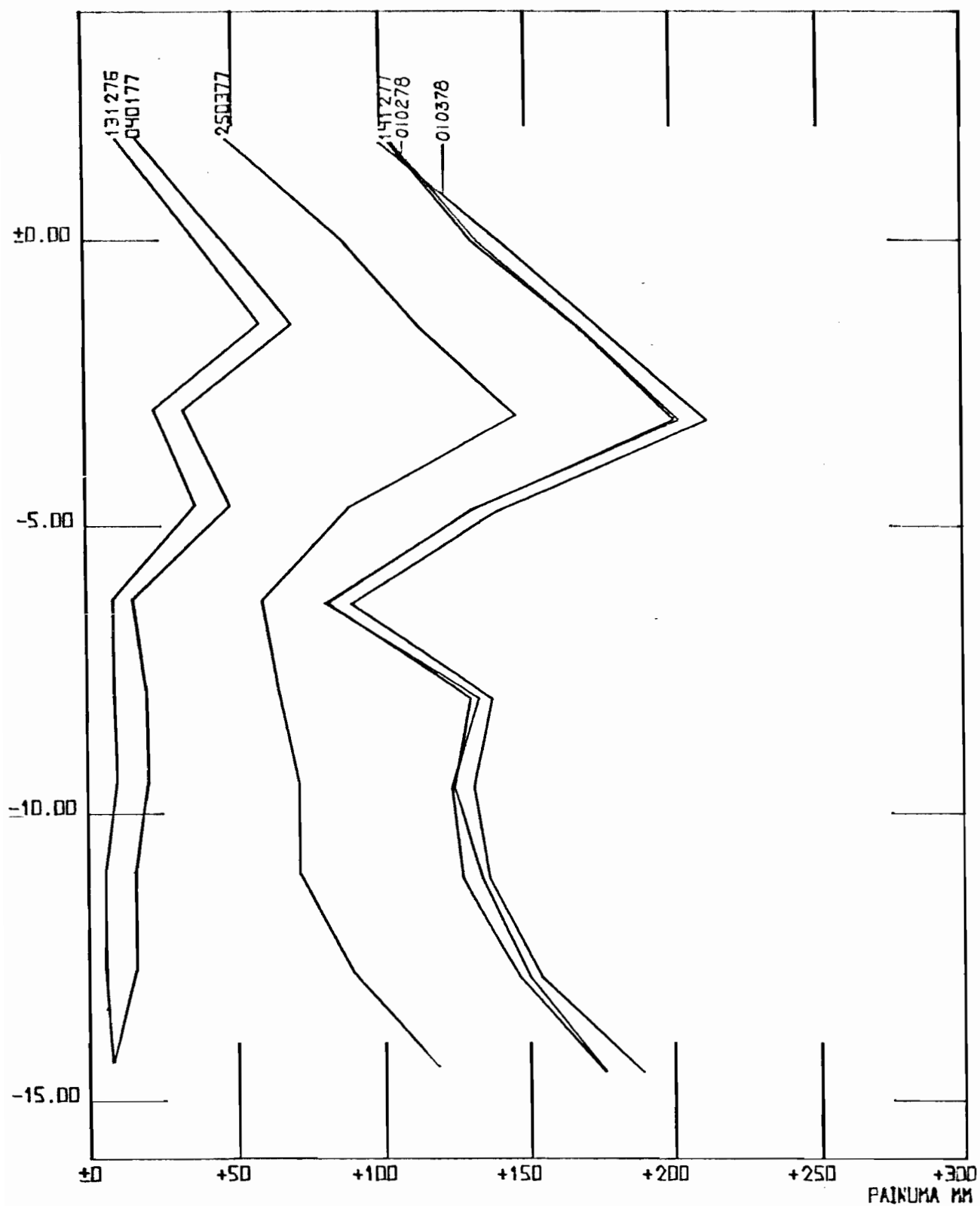


Kuva 18. Painumaletkun mittausta magneetti-ilmaisimella.



Kuva 19. Painumaletkun V1 mittaustuloksia ajalta  
13.12.1976 - 1.3.1978

## LETKU V2

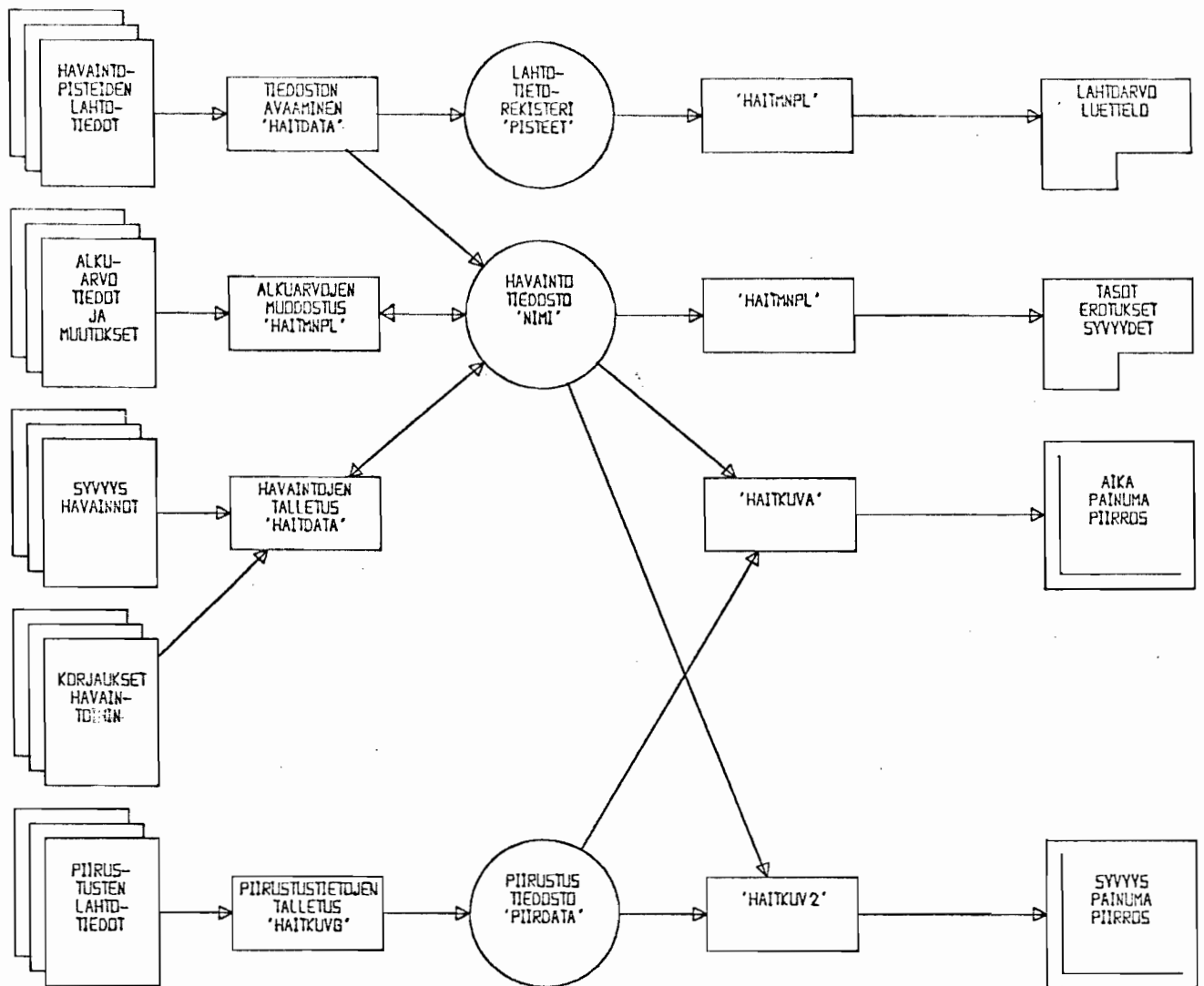


Kuva 20. Painumaletkun V2 mittaustuloksia ajalta  
13.12.1976 - 1.3.1978.

T-jakaumalla saatiin mittaustulosten keskiarvon 95 %:n varmuusväliksi  $\pm 1,8$  mm. Pelkkien vaaitustulosten 95 %:n varmuusväli oli  $\pm 1,4$  mm. Mittausvirhe muodostuu kolmesta eri osatekijästä; vaaituksesta, siivekkeiden syvyystasojen mittaamisesta ja siivekkeiden vajoamiesta maaperässä. Siivekkeiden vajoamista maaperään nähden ei voida mitenkään todeta. Tämä virhelähde on kuitenkin todennäköisesti melko vähäinen, koska käytetyissä mittaustasoissa on kolme siivekettä. Nämä estävät vajoamisen melko hyvin. Suurin osa mittaustulosten virheestä aiheutuu vaaitusvirheestä.

Painumaletkumittausten tietojen käsittely tapahtuu geoteknillisessä toimistossa pienoistietokoneella Wang 2200 C DI Matti Saareلمان tekemillä ohjelmilla. Kaikki tarvittavat ohjelmat ovat samalla levyllä. Mittaustulokset talletetaan toiselle levyille, johon on avattu tiedostoja mittaustuloksia varten. Kuvassa 21 on lohkokaaaviona painumatulosten kulku tietokonekäsittelyprosessissa. Jokaisesta painumaletkusta on alkuarvotiedot; sijainti, lähtötaso, siivekkeiden lähtösyvyydet ym. tiedot alkuarvotiedostossa.

Painumaletkumittausten tulokset syötetään tietokoneelle syvyyksinä katutasolla olevasta letkun kannesta. Lisäksi ilmoitetaan vaaittu korkeus-taso. Nämä tiedot talletetaan haitariletkun nimellä kulkevaan tiedostoon päivämäärätietojen lisäksi 'HAITDATA'-ohjelman avulla. Saman ohjelman avulla voidaan jo talletettuja tietoja korjata. 'HAITMNPL'-ohjelma laskee halutuista mittaustuloksista tasot ja erotukset ensimmäiseen mittaustulokseen. Tulokset saadaan lämpökirjoittimelta. Tulokset voidaan myös piirtää tietokoneeseen kytkeytyllä piirturilla. Geoteknillisessä toimistossa on käytössä piirturi, jonka maksimi piirrosala on 800 · 1200 mm. Piirustusten lähtötiedot, kuten mittakaava ym. tiedot talletetaan 'HAITKUVG'-ohjelman avulla. Piirustukset piirretään 'HAITKUVA' tai 'HAITKUV2' ohjelman avulla riippuen siitä, minkälainen piirros halutaan.



Kuva 21. Painumaletkumittausten tulokäsittely.

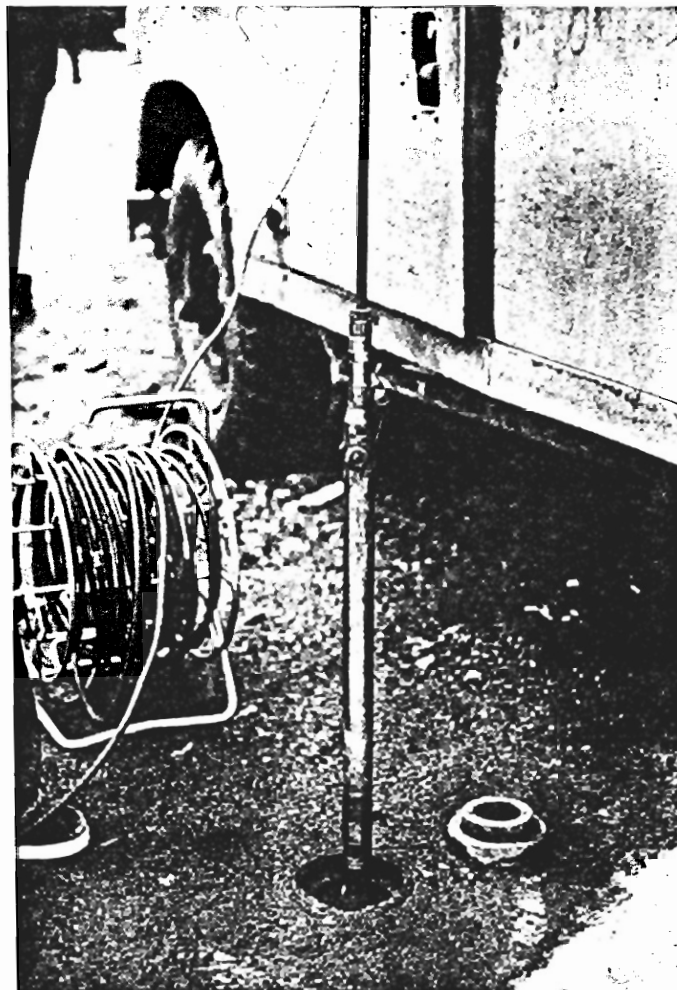


## 4.3

Sivusiirtymämittaukset

Kluuvin ruhjeen ympäristön paaluille perustettujen rakennusten perustusten horisontaalsiirtymien tarkkailemiseksi asennettiin viisi sivusiirtymäputkea. Putket on valmistettu 50 • 50 mm teräksisestä huonekaluputkesta ja ne asennettiin painamalla maahan esiporattuun reikään. Putkien jatkokset tehtiin liimaamalla suojaholkkia apuna käyttäen.

Sivusiirtymämittaukset on tehty norjalaisella Geonor Ab:n valmistamalla P-600 kaltevuusmittarilla (kuvat 22 ja 25). Kaltevuusmittarin toimintaperiaate on seuraava. Laitteen sisällä oleva messinkinen heiluri kuormittaa kallistuessaan kahta teräslankaa (kuva 23). Teräslankojen jännitys mitataan aiheuttamalla niihin värähdysliike ja mittaamalla värähtelyjen taajuus. Kaltevuus saadaan tällöin kaavasta:



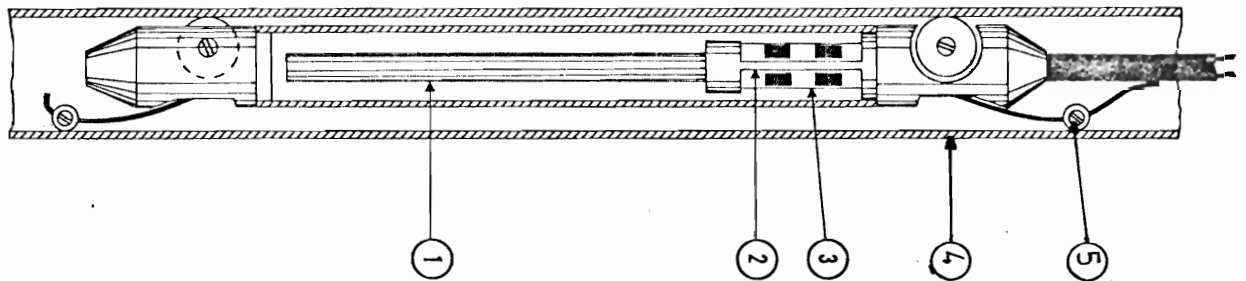
Kuva 22. Sivusiirtymien mittausta.

$$\sin \theta = K (f_1^2 - f_2^2) - (f_{10}^2 - f_{20}^2) \quad (6)$$

missä

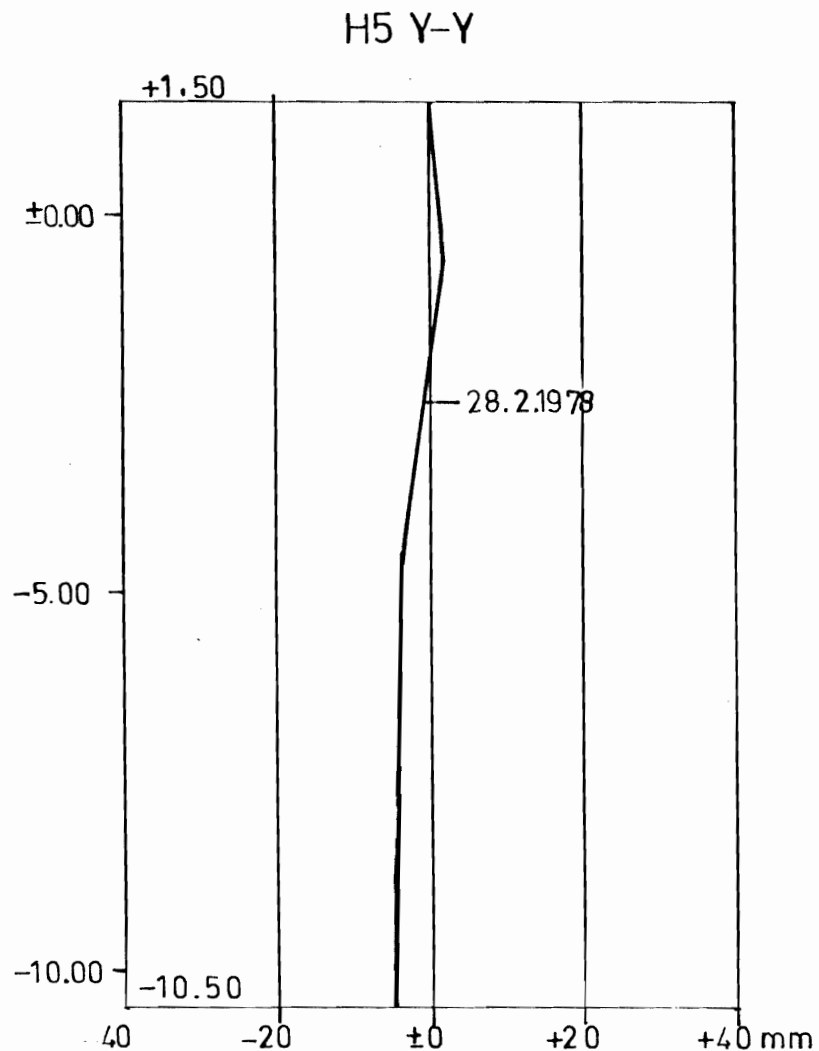
$\theta$  on anturin kaltevuus  
 $K$  " laitevakio  
 $f_1$  ja  $f_2$  " mitatut lankojen värähtelytaajuuudet  
 $f_{10}$  ja  $f_{20}$  " lankojen värähtelytaajuuudet laitteen ollessa pystyasennossa.

Kaltevuudet mitataan 1 m syvyyksiväleihin ja putken taipumaviivan muoto saadaan tuloksista integroimalla. Esimerkki sivusiirtymämittausten tulostavasta on esitetty kuvassa 24.



Kuva 23. P-600 inklinometrin mittausosan rakenne.

1. Sylinterin muotoinen heiluri.
2. Suora lehtijousi.
3. Värähtelevä lanka.
4. Sivusiirtymäputki.
5. Ohjauspyörä.

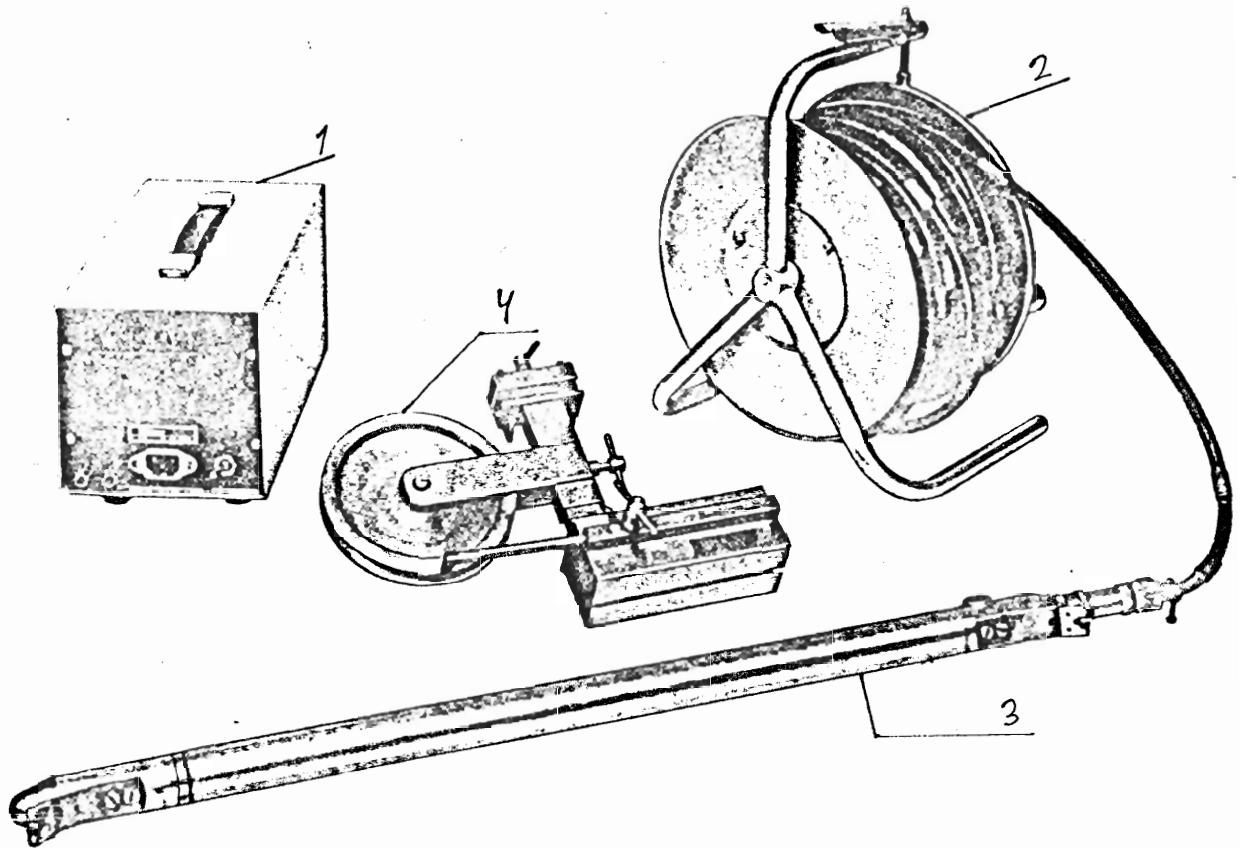


Kuva 24. Sivusiirtymämittausten esitysmuoto.

Kahden värähtelylangan ansiosta laitteen tarkkuus on melko suuri. Lisäksi tämä eliminoi lämpötilan vaikutuksen mittaustuloksiin. Näissä mittauksissa on käytetty raskaalla heilurilla varustettua inklinometriä. Heilurin toiminta-alue on  $\pm 6^\circ$  ja valmistajan ilmoittama tarkkuus on  $\pm 0,03^\circ$ . Laitte pysyy pyöriensä ja jousiensa avulla tiukasti putkien seinämissä kiinni, joten se ei pääse muuttamaan suuntaa putkessa.

Siirtymät on mitattu kahdessa toisiaan vastaan kohtisuorassa suunnassa. Yhden akselisuunnan mitausta varten mitataan vastakkaiset suunnat. Näin saadaan yhden akselisuunnan siirtymän laskemista varten kaksi lukemaa molemmista langoista. Näistä lasketaan keskiarvo ja mittausvirhe.

Näin saatu mittausvirhe on ollut 0,1 - 0,5 mm/m.



Kuva 25. Sivusiirtymien mittauslaitteisto.

1. Mittari.
2. Kela.
3. Mittausanturi.
4. Ohjauspyörä.

Sivusiirtymäputkien H1 - H4 yläpäiden asema mitattiin 21.4.1977 lähtien käyttäen kiintopisteenä viereiseen rakennukseen asennettuja mittauspultteja. Ennen yläpäiden mittausta oletettiin, että sivusiirtymäputken alapää pysyy paikoillaan ja vain yläpää liikkuu. Tällöin mittaustarkkuus oli melko hyvä. Kesällä 1977 suoritettujen mittauskierrosten (10 kpl) perusteella mittaustulosten keskiarvon 95 %:n varmuusväli oli  $\pm 0,45$  mm.

Yläpään sidontamittaus katsottiin tarpeelliseksi, koska sivusiirtymäputkien alapää ei ole pohjamoreenissa, vaan putkien alapuolelle jää pari metriä savea ja silttiä. Yläpään sidonta on suo-

ritettu mittanauhalla ja näin ollen tarkkuus ei ole kovin suuri. Sivusiirtymämittausten tarkkuus heikkeni jonkun verran yläpäiden mittausten tul-  
tua mukaan. Yläpään mittausten keskiarvon 95 %:n varmuusväli T-jakaumalla on  $\pm 1,8$  mm.

Syksyllä 1977 sivusiirtymäputkessa H3 ei tapah-  
tunut todellisia sivusiirtymiä. Tänä aikana suo-  
ritettiin 9 mittauskierrosta. Näiden mittausten  
perusteella 95 %:n varmuusväli koko mittauksen tu-  
loksille on  $\pm 3,8$  mm. Virhe oli samaa suuruusluok-  
kaa jokaisella mittaustasolla. Se ei kasvanut  
siirryttäessä putkea pitkin alaspäin.

Sivusiirtymäputkien mittaustulokset käsitellään  
tietokoneella. Kuvassa 26 on lohkokaaaviona sivu-  
siirtymätulosten kulku tietojenkäsittelyproses-  
sissa.

Mittausputkien lähtötiedot sijaitsevat alkuarvo-  
tiedostossa 'INKLALKU'. Sieltä ne voidaan tarvit-  
taessa tulostaa lämpökirjoittimella.

Kaltevuushavainnot talletaan 'P600DATA'-ohjelman  
avulla tiedostoon taajuslukuina. 'P600DATA'-  
ohjelma laskee myös siirtymät. Taajuudet ja siir-  
tymät talletetaan peräkkäin samaan tiedostoon.  
Siirtymät voidaan tulostaa 'P600LIST'-ohjelman  
avulla lämpökirjoittimella.

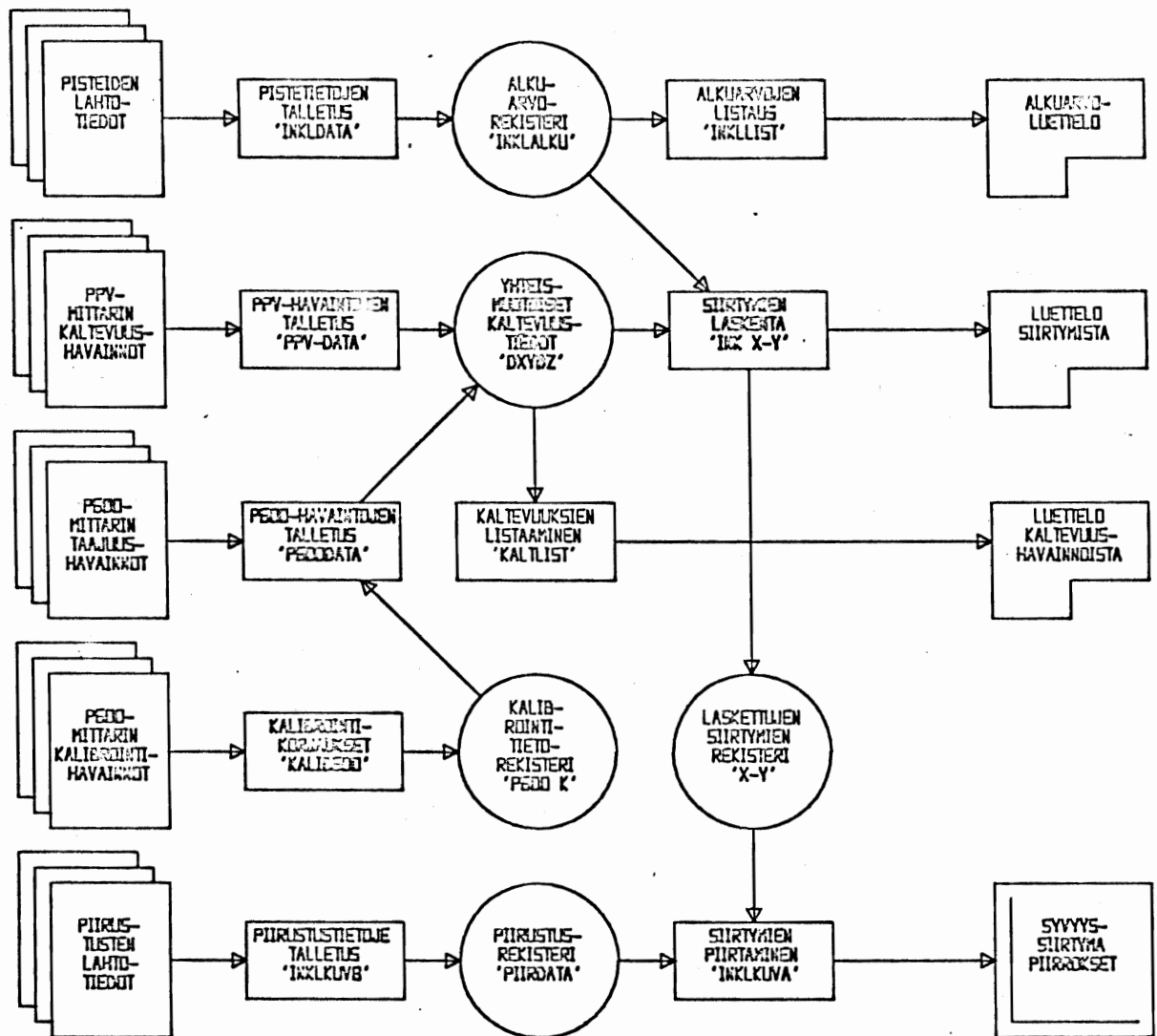
Piirustustietojen talletus tapahtuu 'INKLUVG'-  
ohjelman avulla. Syvyys-siirtymä piirrosten piir-  
täminen tapahtuu 'INKLUVA'-ohjelman avulla.

#### 4.4

##### Huokosvedenpaineen mittaukset

Savi- ja silttikerroksissa olevan huokosveden pai-  
neen mittaamiseksi rakennettiin Kluuvin ruhjee-  
seen kolmeen pisteeseen neljään eri tasoon (-5,  
-7,5, -10 ja -13) yhteensä 12 huokospainekärkeä  
(kuva 15). Huokospainekärjet kiinnitettiin tii-  
viisti maan pintaan ulottuviin suojaputkiin. Huo-  
kospainekärjet sekä niiden mittaamiseen tarvitta-  
van anturin on valmistanut ruotsalainen Jacobson  
& Widmark Ab /16/.

Kuvassa 27 on esitetty huokospaineen mittausta  
asematorilla.

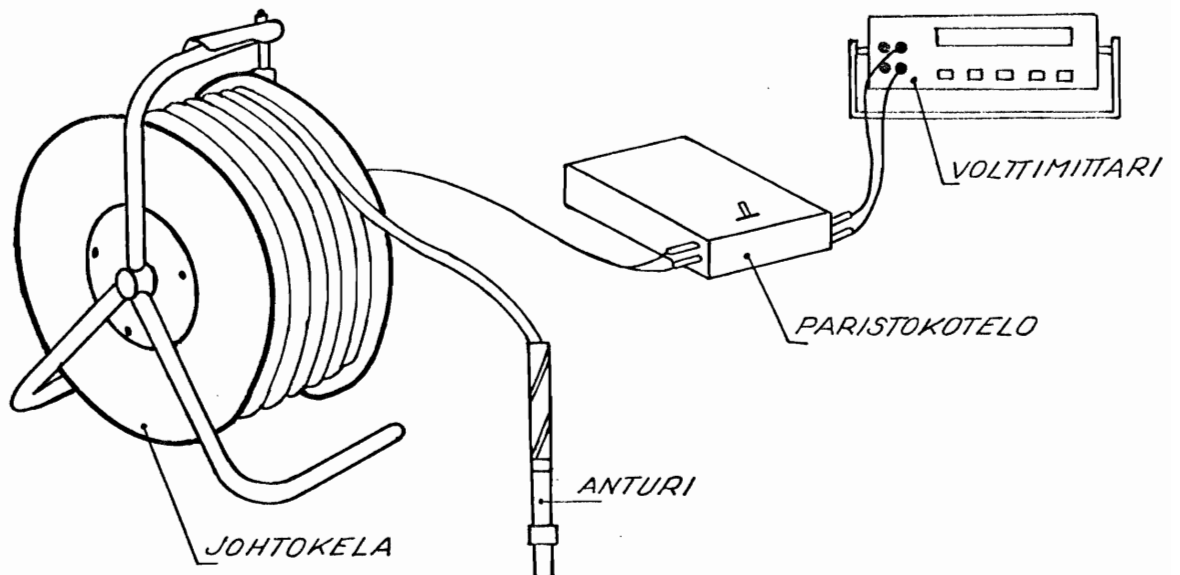


Kuva 26. Sivusiirtymämittausten tulokäsittely.



Kuva 27. Huokospainemittausta asematorilla.

Saven pienen vedenläpäisevyyden vuoksi huokosveden määrää ei voida mitata avoimesta putkesta, vaan huokosveden painekorkeus mitataan paineanturilla. Paineanturi toimii vastusvenymäliuskaeriaatteella. Anturin mittasiltaan syötetään tasajännitettä 2 - 10V. Mittasillasta mitattavan jännite-eron (0 - 20 mV) muutokset ovat suoraan verrannollisia syöttöjännitteeseen ja anturiin vaikuttavan paineen muutoksiin. Kuvassa 28 on esitetty huokospainelaitteisto.



Kuva 28. Huokospainelaitteisto.

Mitattaessa täytetään huokospainekärjen suojaputki vedellä ja anturi lasketaan lähelle putken pohjaa sekä mitataan anturin mittasillan jännite-ero. Tämän jälkeen kiinnitetään anturi huokospainekärkeen ja otetaan lukemat 5 min välein, kunnes huokospaine saavuttaa vakioarvon. Huokospainepinnan tason poikkeama suojaputken yläpään tasosta saadaan tällöin ensimmäisen ja viimeisen mittaustuloksen erotuksesta. Huokospaineen absoluuttinen arvo voidaan laskea myös suoraan mittaus-tuloksesta, mutta tarkkuus on tällöin huonompi.

Huokospaineen tasoittuminen mittauksen aikana vastaamaan ympäröivän saven painetta kestää noin 30-45 min. Mittausaikana on pidetty kuitenkin 15 minuuttia. Tällöin on normaalisti saavutettu melko hyvä tasoittuminen tasoittumisprosentin vaihdellussa 70 - 90 %. Tällä tarkoitetaan 15 min. painelukeman suhdetta pitkäaikaisen mittauksen antamaan painelukemaan.

Normaalimittauksen antamasta tulossarjasta (5 min, 10 min ja 15 min) lasketaan ekstrapoloimalla pitkän ajan painelukema (30 min). Tähän laskentaan käytetään lineaarista regressioanalyysiä logaritmisella funktiosijoituksella.

$$V = A \cdot \text{LOG } (T) + B \quad (7)$$

missä

V on paineanturin syöttämä jännitteen arvo

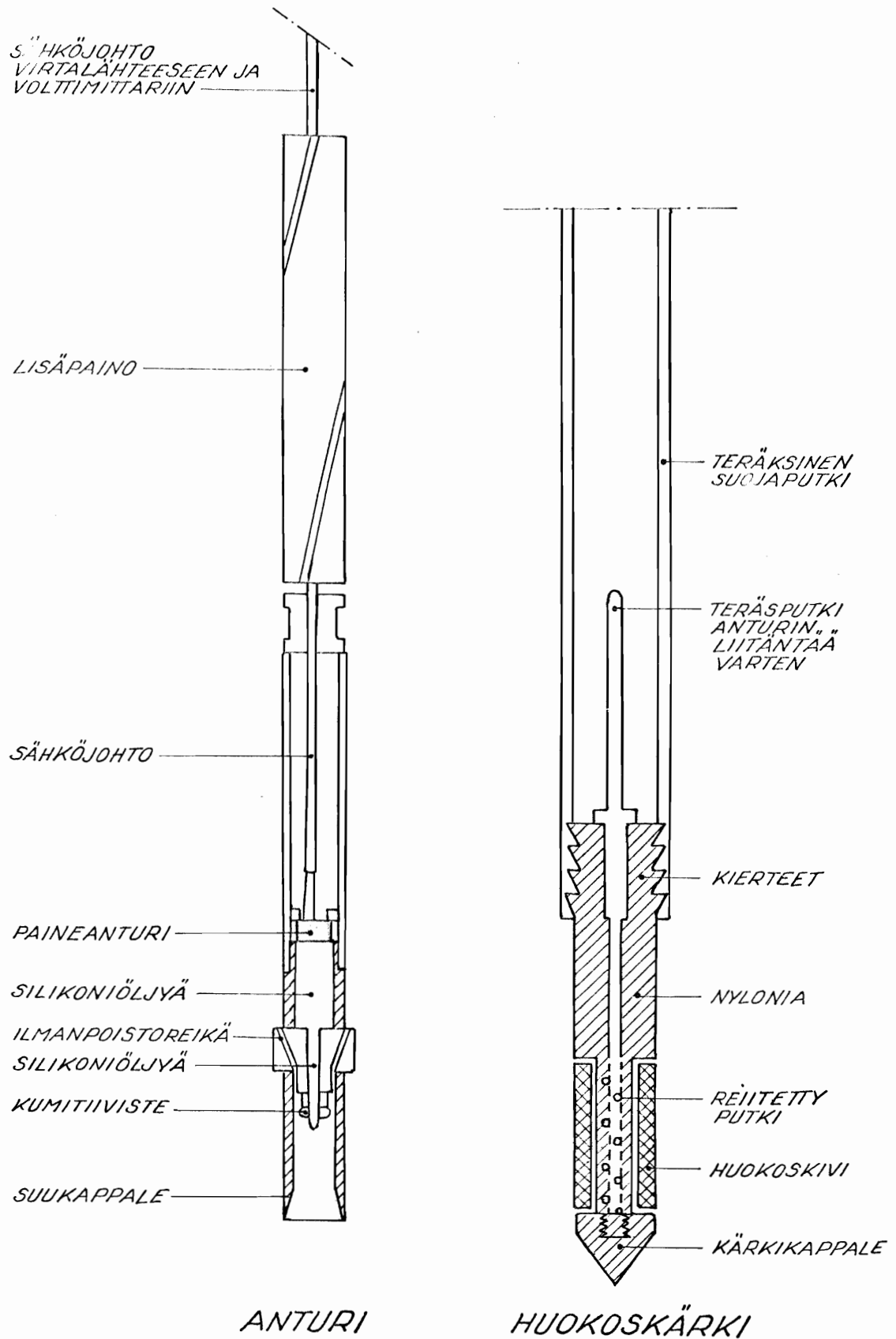
T " aika (esim. 30 min)

A ja B ovat vakioita.

Huokospainemittausten tuloksia on esitetty kuvassa 45.

Geoteknillinen toimisto on hankkinut mittausten kuluessa uuden suukappaleen huokospaineanturiin (kuva 29). Tässä mallissa anturi voidaan pudottaa suoraan mittausputkeen. Ilma poistuu itsestään suukappaleesta. Paineikalvoa vasten on silikoniöljyä. Tämä on yhteydessä ilmaan pienen reijän kautta. Reikä on niin pieni, että öljy ei valu pois. Vesipaine vaikuttaa kalvoon tämän reijän kautta. Tällä suukappaleella on huokospaineen tasoittuminen ollut nopeampaa. Tämä johtuu anturin suuremmasta kosketuspaineesta huokoskärkeen. Mahdolliset painevuodot jäävät pienemmiksi.





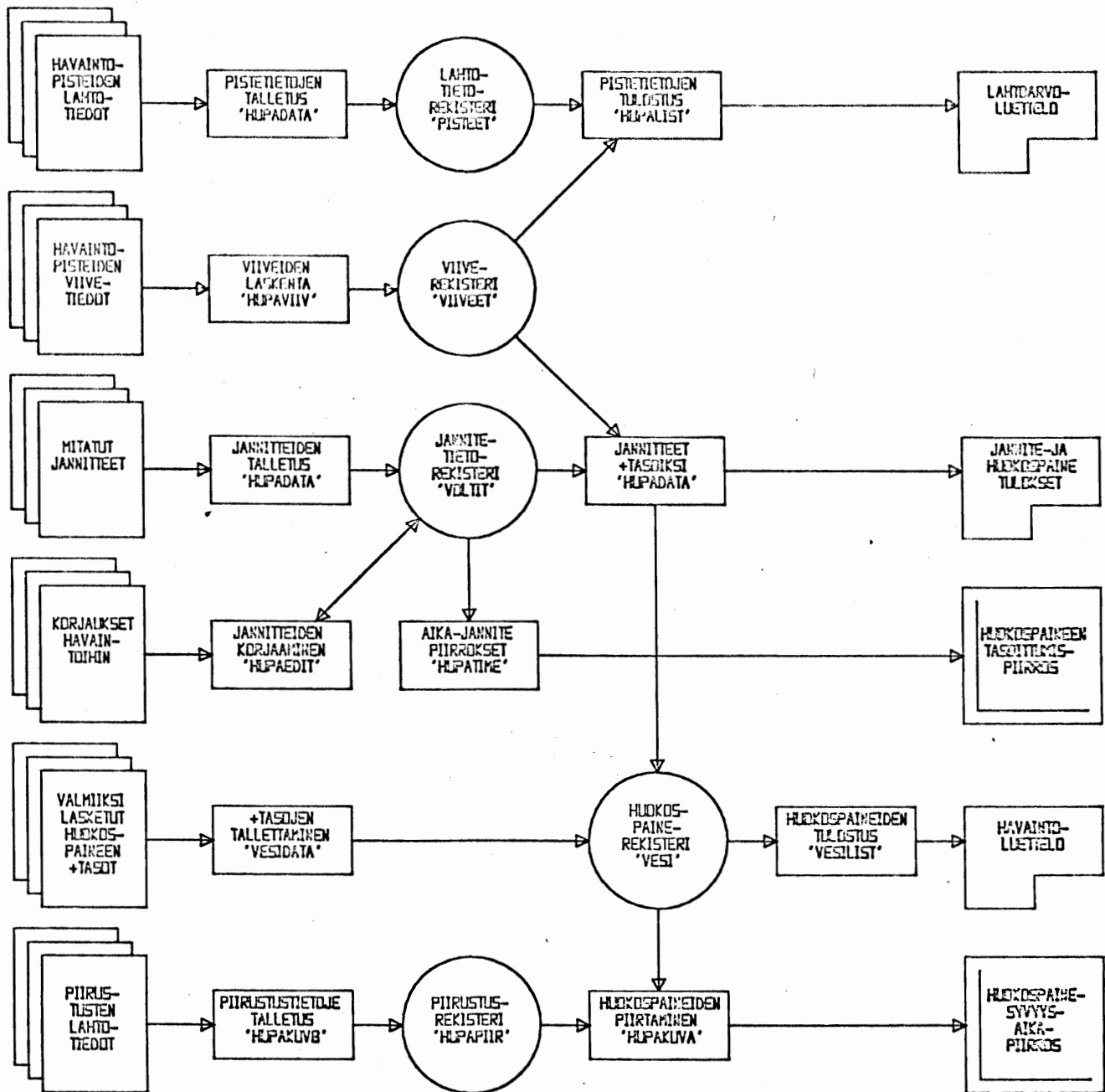
Kuva 29. Huokospaineanturin ja huokoskärjen rakenne.

Huokospainemittausten tarkkuus on keskimäärin luokkaa  $\pm 25$  cm. Eräissä huokoskärjissä huokospaine pysyi vuoden 1977 huhtikuusta joulukuuhun melko vakiona. Tällä välillä suoritettiin 10 mittauskierrosta. T-jakaumalla saadaan keskiarvon 95 %:n varmuusväliksi 0,18 m. Mittausvirhettä muodostuu itse paineanturin virheiden lisäksi anturin ja huokoskärjen välisen liitoksen vuodoista. Tämä virhetekijä pitäisi näkyä huokospaineen tasoittumiskäyrissä.

Huokospainetulosten käsittely tapahtuu tietokoneella.

Kuvassa 30 on lohkokaaaviona huokospainetulosten kulku tietojenkäsittelyprosessissa. Jokaisesta huokospainekärjestä on lähtötiedot pisterekisterissä. Nämä voidaan tarvittaessa tulostaa lämpökirjoittimella. Huokospainemittauksista saadaan tuloksina jännitelukemia ajan funktiona. Tulokset talletaan 'VOLTIT'-tiedostoon 'HUPADATA'-ohjelman avulla. 'HUPADATA'-ohjelma laskee huokospainetasot eri ajan hetkinä mittausten alusta lukien. Huokospainetasot voidaan tulostaa lämpökirjoittimella.

'HUPATIME'-ohjelman avulla voidaan piirtää huokospaineiden tasoittumiskäyrät. Piirustusten lähtötiedot talletetaan 'HUPAKUVG'-ohjelman avulla 'HUPAPIIR'-tiedostoon. Piirtäminen tapahtuu 'HUPAKUVA'-ohjelman avulla.



Kuva 30. Huokospainemittausten tulokäsittely.

5.

## JÄÄDYTYSREIKIEN PORAUUS

5.1

Porauksen aikana havaitut muutokset maaperässä

Kluuvin ruhjeessa jäädytysputket työnnettiin maahan poraamalla erikseen Kampin ja Hakaniemen puolelta (kuva 37). Putket kohtaavat toisensa ruhjeen puolivälissä maaosuudella. Jäädytysputkien pituus vaihtelee 25–30 metriin. Porauksen aloituspoikemat ovat  $\pm 0,2$  m suuruusluokkaa. Loppupään poikemat vaihtelevat 0,2 – 0,8 m. Ruhjeen keskivaiheilla putket ovat 2 – 6 m limittäin. Näin tunneliin ei muodostu vuotokohtia putken sijaintipoikkeamista huolimatta. Kuvasta 31 näkyy jäädytysputkien sijainti.

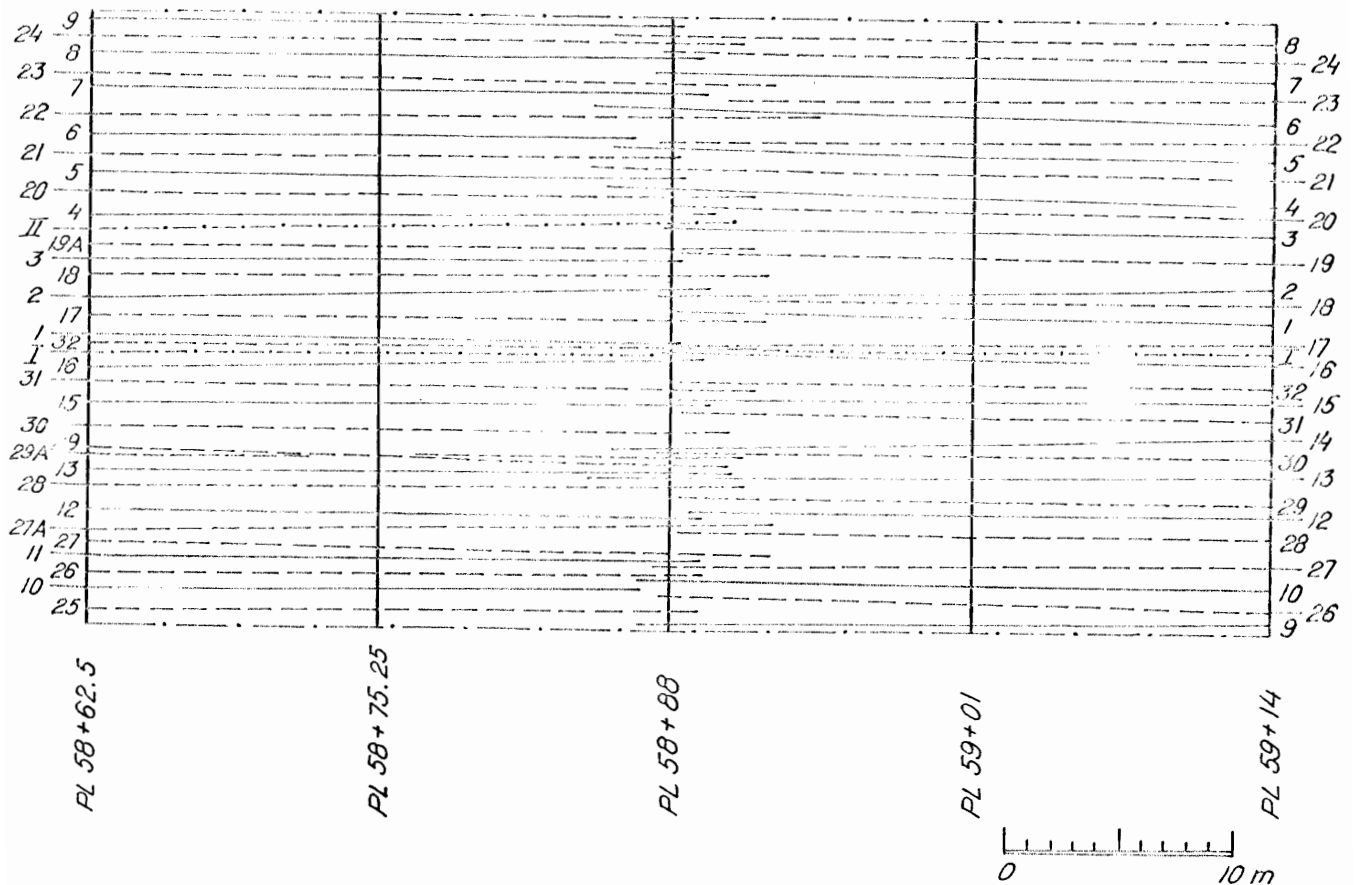
Porausvaihe alkoi tammikuussa 1977 ja päättyi toukokuussa 1977. Poraus alkoi Kampin pohjoisesta porauskammiosta. Vähän myöhemmin poraus alkoi Kampin eteläisestä porauskammiosta. Maalis-huhtikuun vaihteessa porauskalusto siirrettiin Hakaniemen puolelle. Hakaniemen puolen porauskammioiden poraus kesti huhtikuun alusta kesäkuun alkuun.

Heti porauksen alettua Kampin pohjoisessa perässä alkoi maassa tapahtua suuria painumia. Painumat havaittiin ensimmäiseksi painumaletkussa Vl. Tammikuun aikana havaittiin tapahtuneen noin 70 mm painuma melkein kaikissa siivekkeissä. Läheisessä painumalevyssä 144 painuma oli pienempi. Tämä painumalevy reagoi painumiin hitaammin ja aloitti nopean painumisen vasta helmikuun alussa (kuva 33).

Painumaletku Vl sijaitsee suoraan pohjoisen tunnelin maaosuuden keskikohdan päällä.

Painumat johtuvat hiekkakerrosten tiivistymisestä ja maavuodoista. Kampin pohjoisen tunnelin porauksen aikana tapahtui todennäköisesti eniten maavuotoja. Tällöin asian ollessa uusi, ei maavuotojen määriä mitattu ja näin ei ole mitään varmaa tietoa vuotojen määristä. Suurimmat maavuodot ovat ilmeisesti tapahtuneet porauksen loppuvaiheessa injektointitulppia tehtäessä.

Poraustyön valvojan mukaan maavuotojen määrä Kampin puolen porauksissa on yhteensä noin  $4 \text{ m}^3$  ja Hakaniemen puolen porauksissa noin  $4 \text{ m}^3$ . Maavuotojen määrä on yhteensä noin 8 – 10  $\text{m}^3$ . Suurin osa painumasta täytyy kuitenkin johtua hiekkakerrosten tiivistymisestä porauksen aiheuttaman täri-



Kuva 31. Tasoon piirretty jäädytysputkisto. Pohjoinen tunneli.

Merkintöjä:

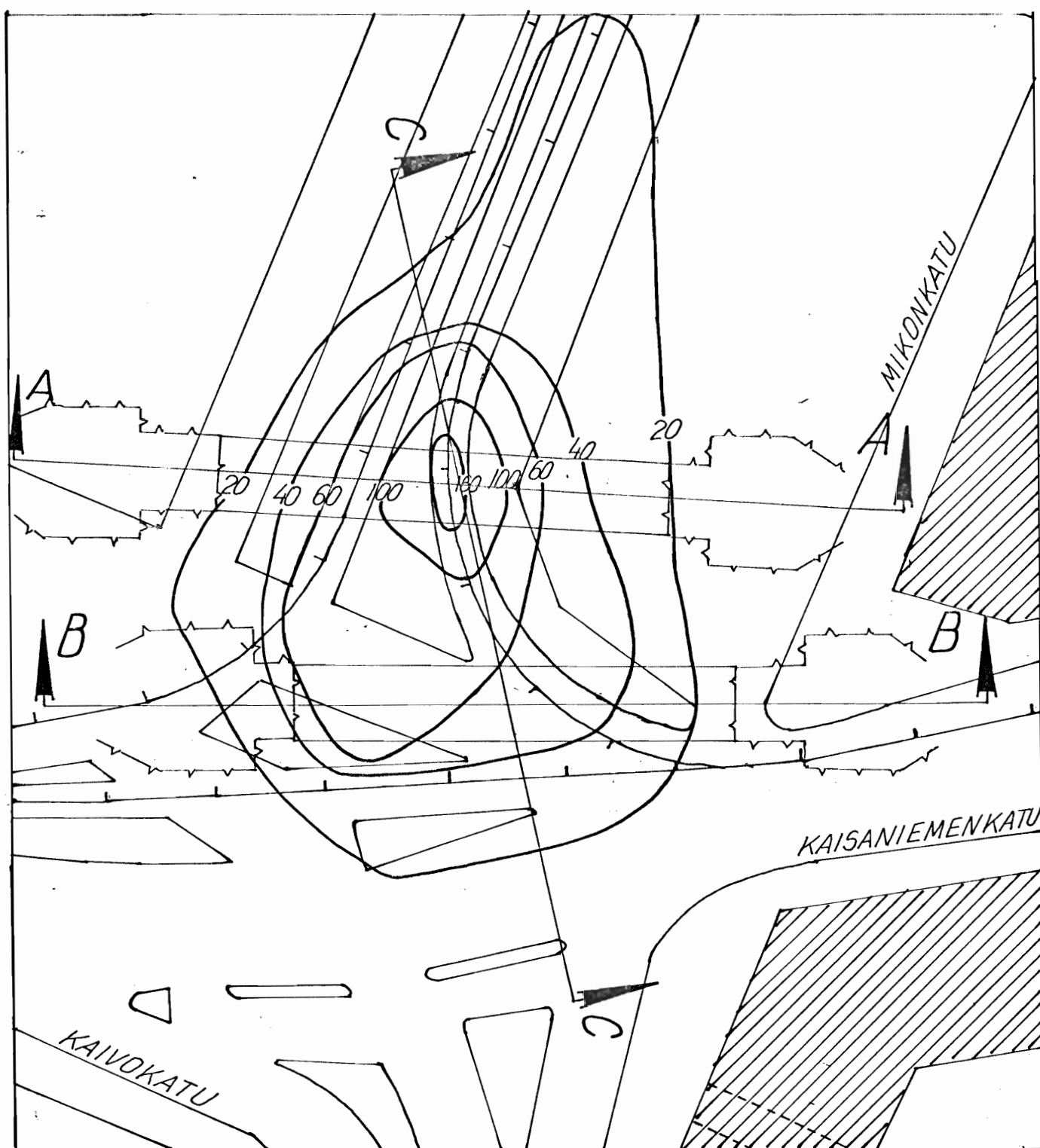
Sisäkehällä oleva jäädytysputki

Ulkokehällä " "

Lämpötilan mittausreikä

nän ja huuhtelun vaikutuksesta. Poraustyön aikana tapahtuneen painuman tilavuus maan pinnalta mitattuna on yhteensä noin 110 m<sup>3</sup>. Painumanotkon samavokäyräpiirustus on kuvassa 32.

Helmikuun aikana tapahtui letkussa V1 savikerroksissa yli 100 mm painuma, joka ei näkynyt maan pinnalla juuri ollenkaan (kuva 34). Sen jälkeen letku V1 on painunut melko tasaisesti koko pituudeltaan. Poraustyön päätyttyä kokonaispainuma pohjoisen tunnelin päällä maan pinnalla oli noin 150 mm. Painumalevy 144 osoitti myös lähes 150 mm painumaa. Painumaletkun V1:n alin siiveke, joka sijaitsee saven alapuolisessa siltissä osoitti myös 150 mm painumaa. Letkun V1 puolivälissä olevat siivekkeet osoittivat jopa 240 mm painumia.



Kuva 32. Aikavälillä 1.1.1977-1.6.1977 tapahtuneet maanpinnan painumat sama-arvokäyrinä. Kuvaan on merkitty leikkausten A-A, B-B ja C-C sijainti. Mittakaava 1:500.

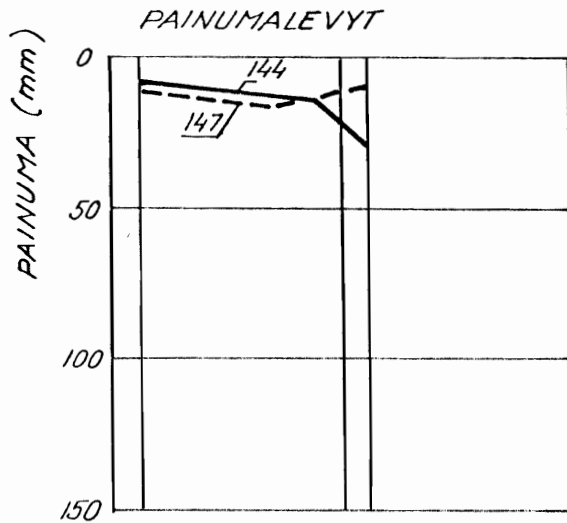
1977

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

45.

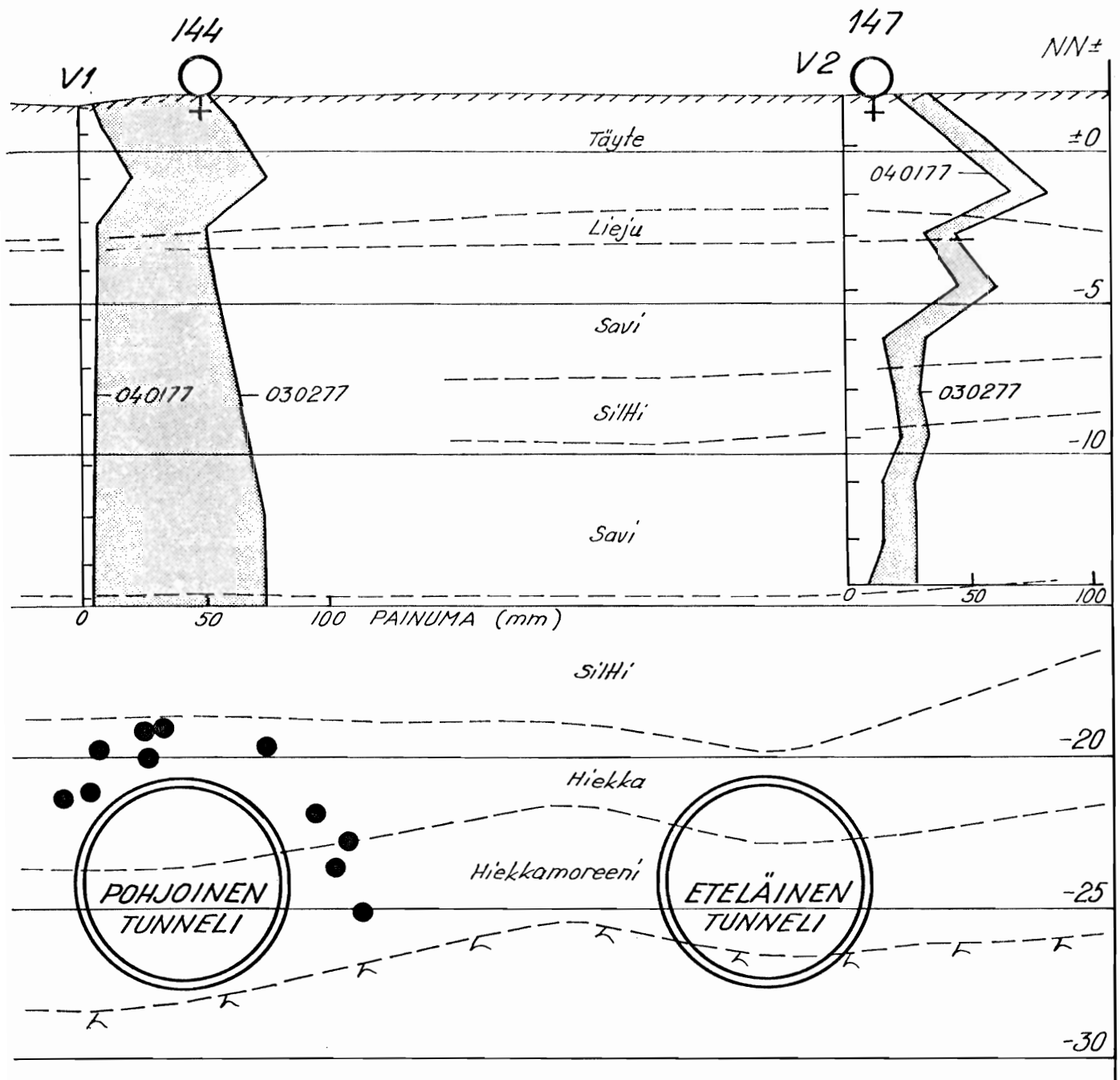
|          |          |
|----------|----------|
| TAMMIKUU | HELMIKUU |
|----------|----------|

Kuva 33. Painumalevyjen ja painumaletkujen painumat aikavälillä 4.1.1977-3.2.1977.



MERKINNÄT:

- KAMPIN PORAUSKAMMIOSTA KO. AIKAVÄLILLÄ PORATUT REIÄT



1977

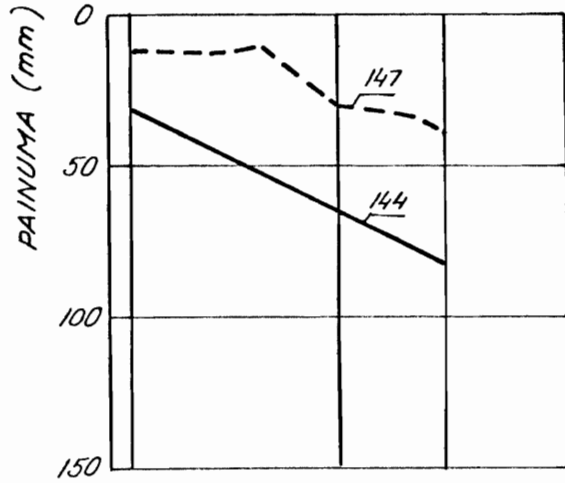
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

46.

HELMIKUU

MAALISKUU

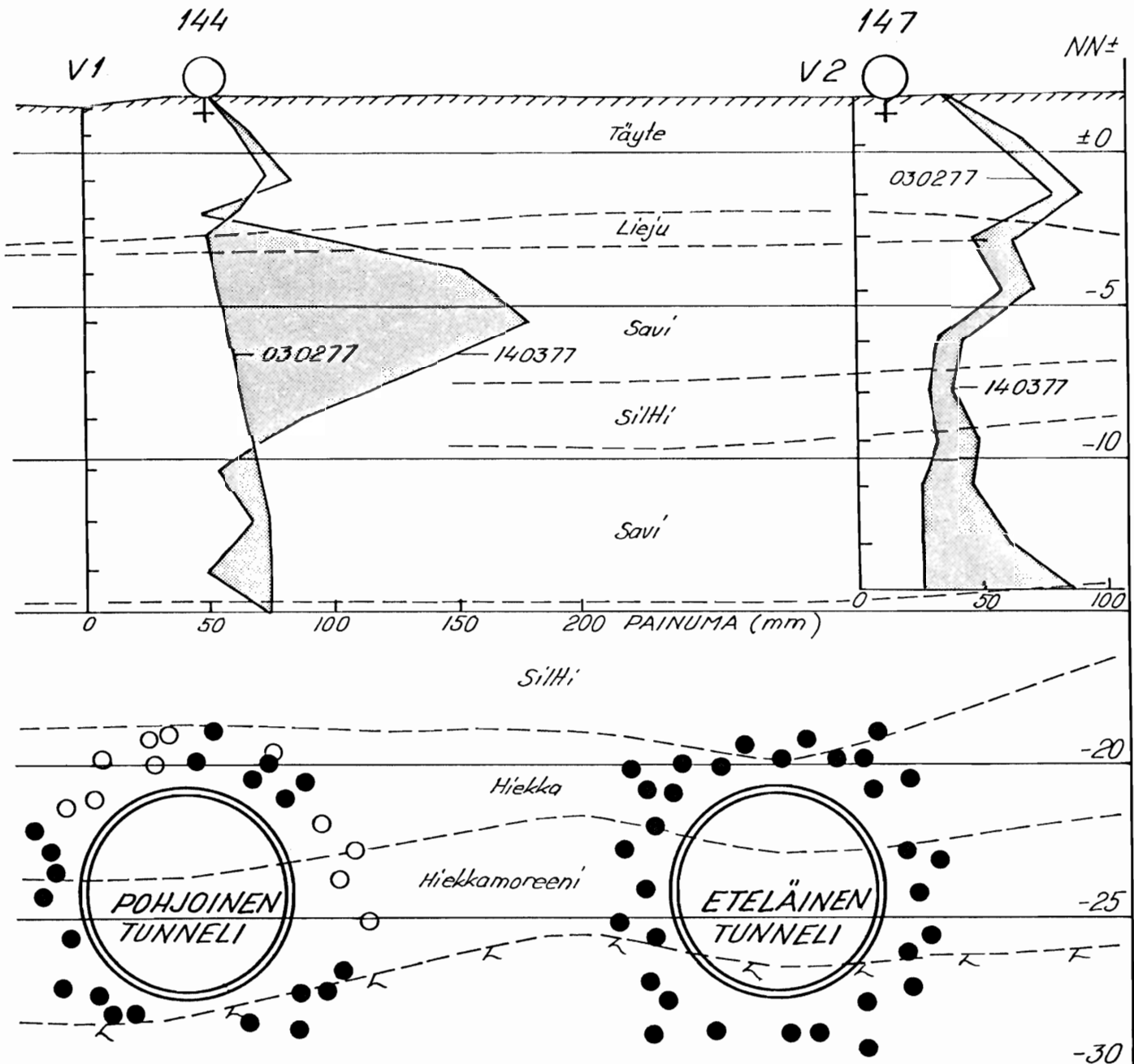
## PAINUMALEVY



Kuva 34. Painumalevyjen ja painumaletkujen painumat aikavälillä 3.2.1977-14.3.1977.

## MERKINNÄT:

- KAMPIN PORAUSKAMMIOSTA KO. AIKAVÄLILLÄ PORATUT REIÄT





1977

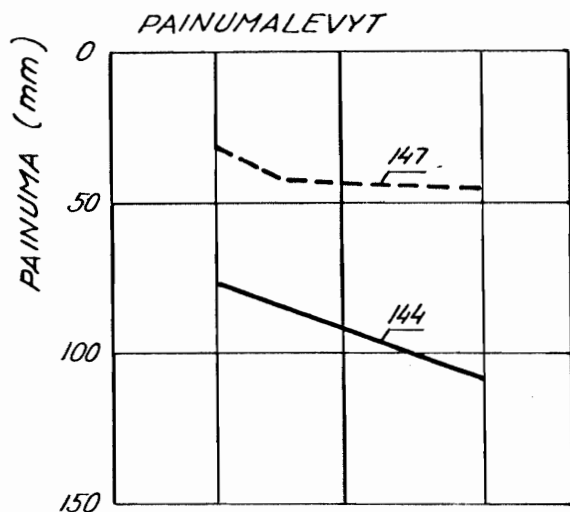
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

47.

MAALISKUU

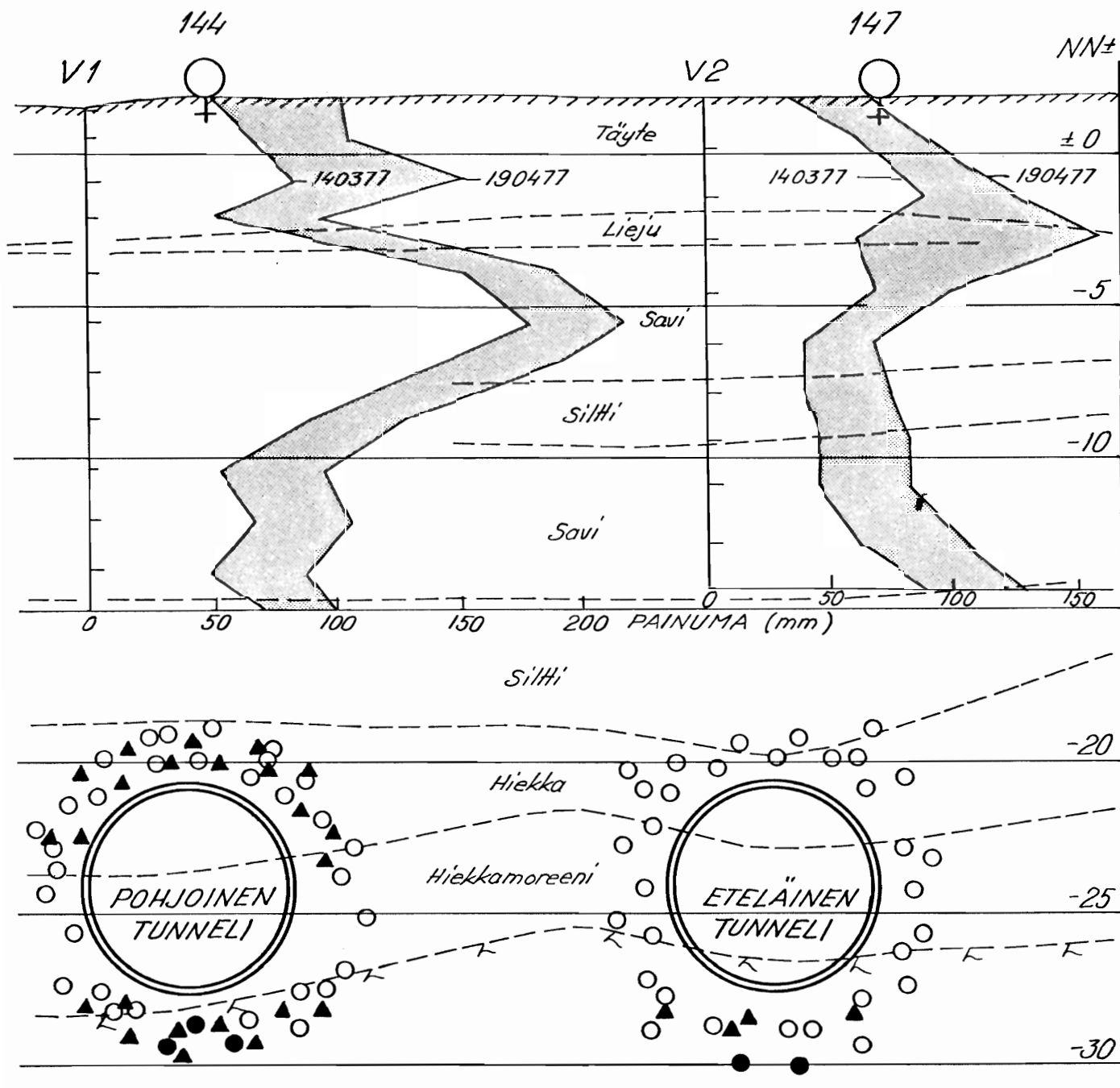
HUHTIKUU

Kuva 35. Painumalevyjen ja painumaletkujen painumat aikavälillä 14.3.1977-19.4.1977.



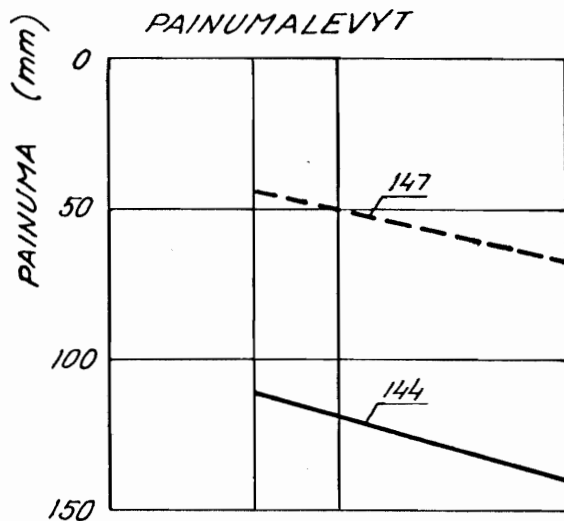
## MERKINNÄT:

- KAMPIN PORAUSKAMMIOSTA KO. AIKAVÄLILLÄ PORATUT REIÄT
- ▲ HAKANIEMEN PORAUSKAMMIOSTA KO. AIKAVÄLILLÄ PORATUT REIÄT



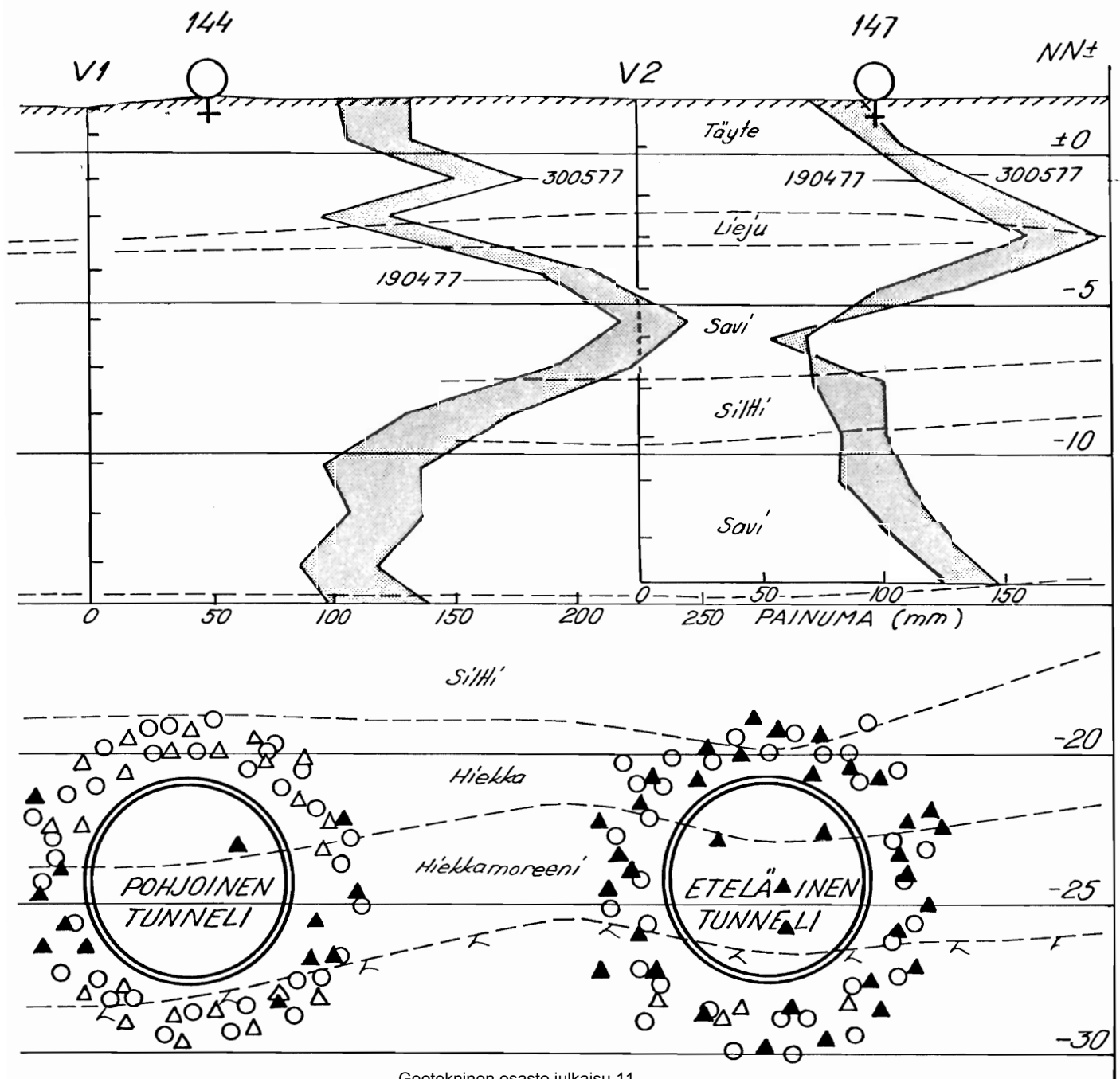
|                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| <p><i>HUHTIKUU</i></p> | <p><i>TUOKOKUU</i></p> |
|------------------------|------------------------|

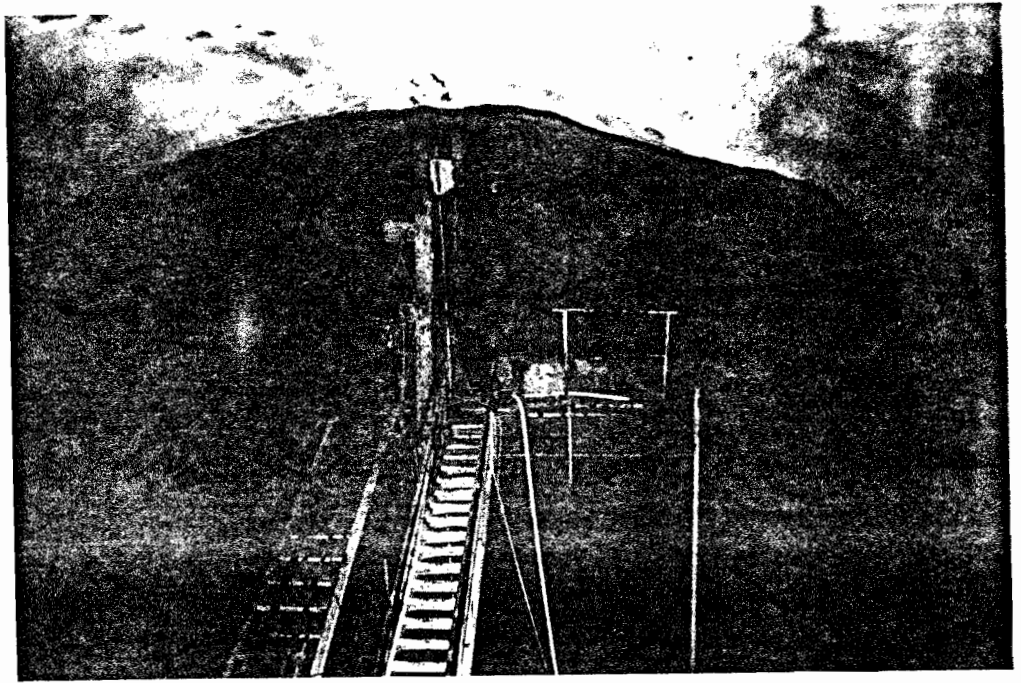
Kuva 36. Painumalevyjen ja painu-  
maletkujen painumat  
aikavälillä  
19.4.1977-30.5.1977.



*MERKINNÄT:*

- KAMPIN PORAUSKAMMIOSTA  
KO. AIKAVÄLILLÄ PORATUT  
REIÄT
- ▲ HAKANIEMEN PORAUSKAMMIOISTA  
KO. AIKAVÄLILLÄ PORATUT  
REIÄT





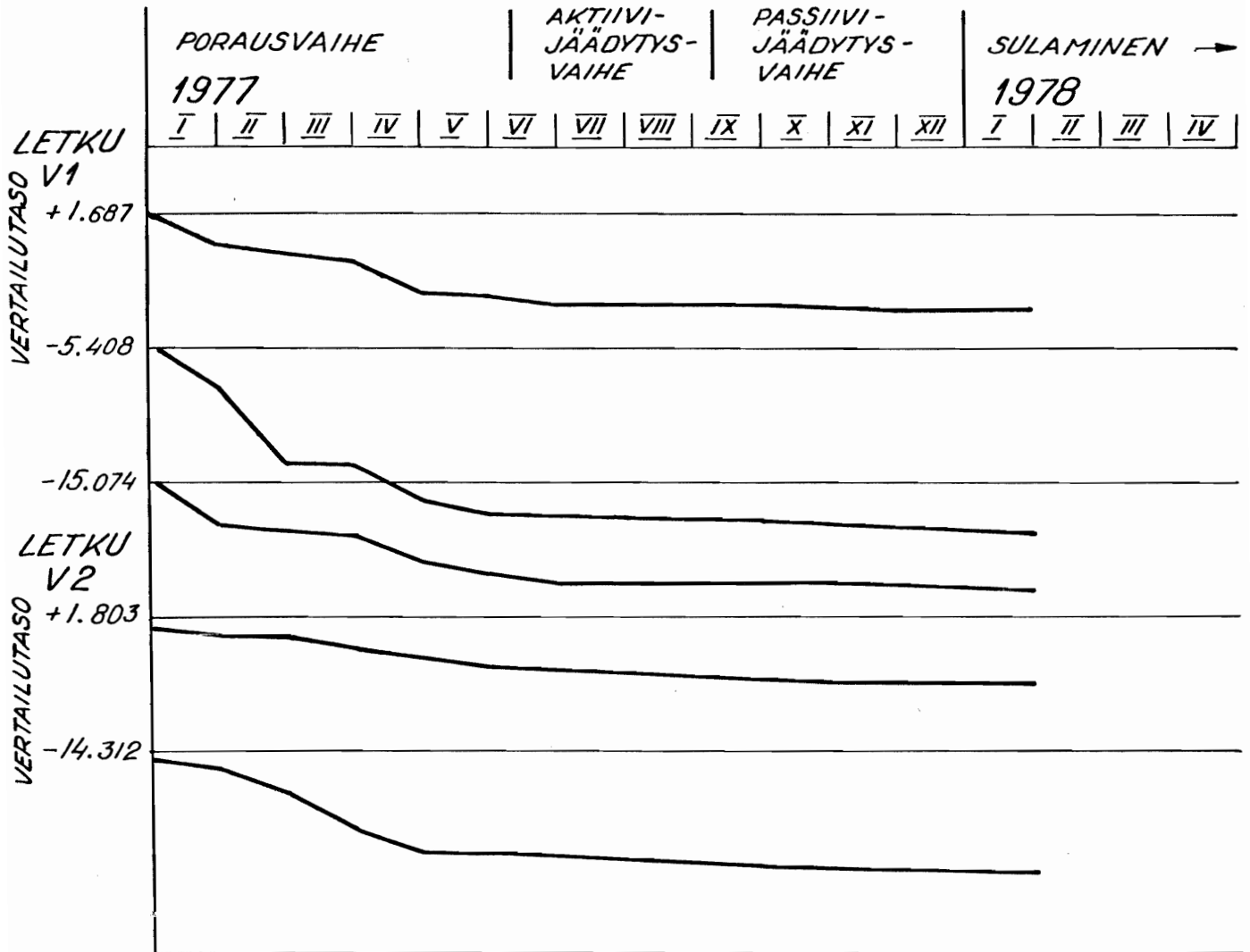
Kuva 37. Jäädytysreikien porausta. Poraus suoritettiin pystysuunnassa liikkuvilta porauslavoilta käsin.

Eteläisen tunnelin päällä painumat alkoivat jo aikaisemmin, koska siellä suoritettiin koeporauksia jo joulukuussa. Suurimmat painumat painumaletkussa V2 tapahtuivat maalis- ja huhtikuussa. Tällöin oli poraustyö eteläisessä tunnelissa vilkkaimmillaan. Letkussa V2 havaittiin suurimmat painumat saven välisissä silttikerroksissa. Kuvissa 33-36 on esitetty painuman kulku poraustyön edistymisen mukaan.

Maavuodot aiheuttivat tapahtuessaan ilmeisesti jyrkimmän painumanotkon. Maavuodot tapahtuivat ruhjeen keskellä jäädytysputkien päistä. Tiivistymisen aiheuttama painuma tapahtui laajemmalla alueella. Nämä yhdessä muodostivat melko laajan painumakartion. Kuvassa 38 on esitetty maakerrosten painumat eri tasoilla Kluuvin ruhjeen läpäisyn aikana.

Horisontaaliliikkeet olivat melko pieniä. 40 m päässä painumakartion keskipisteestä ei havaittu mittaustarkkuuden ylittäviä sivusiirtymiä. Tällä etäisyydellä rakennusten vieressä sijaitsevat sivusiirtymäputket H1, H2, H3 ja H4. Putki H5 sijaitsee noin 25 metrin päässä painumakartion keskipisteestä.

Letkussa H5 havaittiin noin 10 mm siirtymä putken yläpäässä painuman suuntaan.



Kuva 38. Maakerrosten painumat eri tasoilla Kluuvin ruhjeen läpäisyn aikana. Painumamittakaava 1:10.

Huokospaineet nousivat tasaisesti porauksen aikana. Paineen nousu oli noin 1 - 1,5 m. Huokospaineen nousu johtuu lähinnä siitä, että savi-maalajit häiriytyivät nopean painumisen aikana.

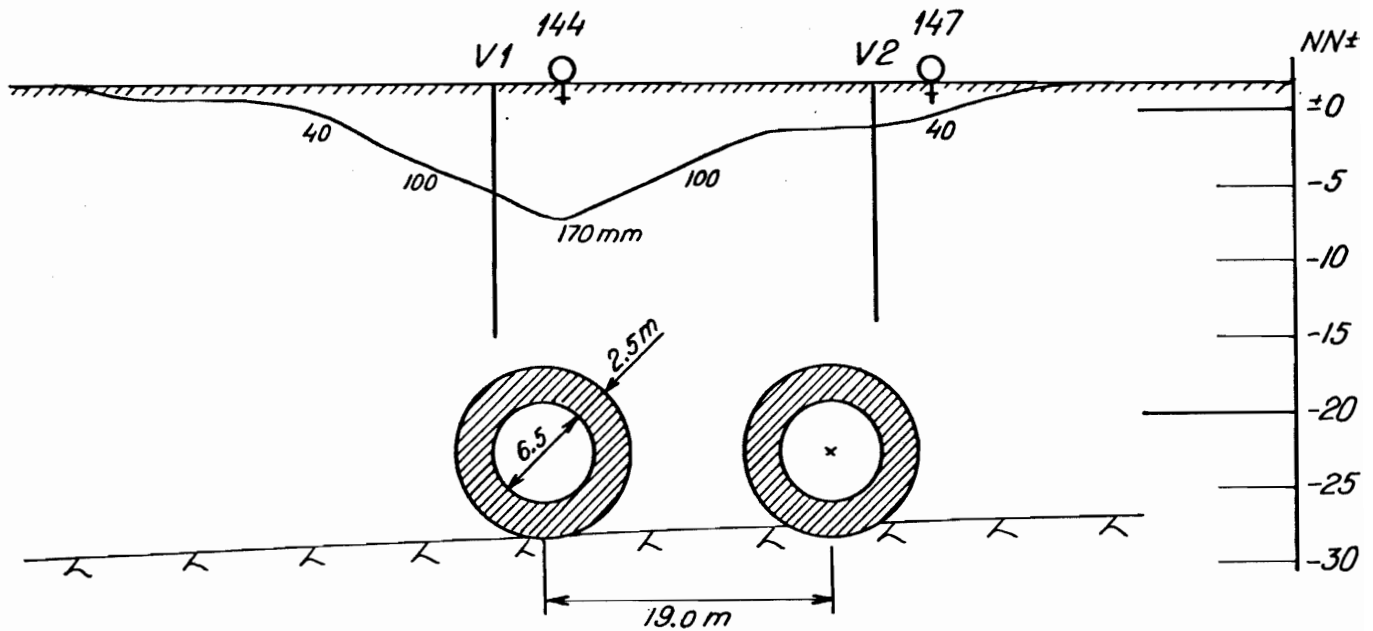
## 5.2

### Painuman teoreettinen tarkastelu

#### 5.21

#### Yleistä

Tunnelin päällä olevien maakerrosten painumisesta syntyvä painumakuvio on tavallisesti melkein riippumaton maksimipainuman suuruudesta. Tavallisesti tarkastellaankin vain kahta parametria, maksimipainumaa ja painumakuvion muotoa.



Kuva 39. Porausvaiheen aikana maan pinnalla tapahtuneet painumat. Leikkaus C-C. Mittakaava 1:500. Painumamittakaava 1:10.

Painumakuvion muoto riippuu paljolti tunnelin muodosta ja koosta sekä maaperän geologiasta. Painuman suuruus sen sijaan riippuu tunnelin rakentamisen yhteydessä tapahtuvista maahäviöistä ja Kluuvin ruhjeen tapauksessa maaporauksesta. Kuvassa 39 on esitetty Kluuvin ruhjeen painumaton muoto.

Painuman jakautumista on yritetty tutkia monella eri tavalla. On kehitetty monenlaisia empiirisiä kaavoja. Painumaa on myös tutkittu kimmoteorian pohjalta. Tällöin asian tarkasteluun soveltuu hyvin elementtimenetelmä. Elementtimenetelmällä ei ole kuitenkaan saatu tyydyttäviä tuloksia. Vaakajännitykset ovat yleensä olleet probleeman alkuarvoihin verrattuna vääriä /13/. Kimmoteorian pohjalta saatu painumakuvio saadaan tarkasti myös Gaussin todennäköisyysfunktioilla.

Leningradin metrossa on käytetty maksimipainuman laskemiseen seuraavaa kimmoteoriaan pohjautuvaa kaavaa /13/:

$$S_{\max} = (1 - \nu^2) \frac{\Delta p}{E} \cdot z_0 \frac{1}{(z_0/2a)^2 - 1} \quad (8)$$

missä

$S_{\max}$  on maksimipainuma maan pinnalla

$E$  " kimmomoduli

$\nu$  " Poissonin luku

$\Delta p$  " alkuperäisen paineen ja tunnelin säteen suuntaisen paineen erotus

$a$  " tunnelin säde

$z_0$  " tunneliprofiilin painopisteakselin etäisyys maan pinnasta.



Kuva 40. Valurautaverhouksen taustan ruiskubetointia.

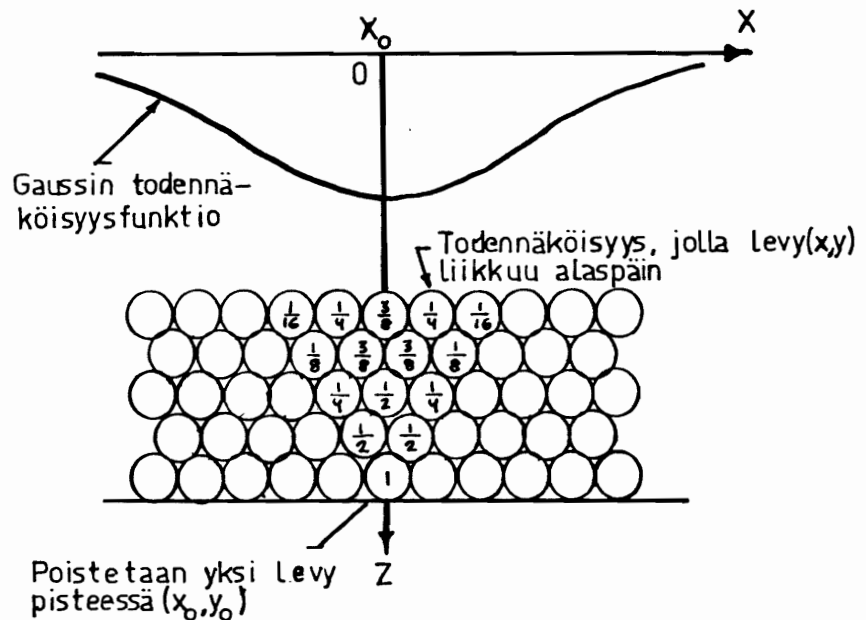
Kaava 8 arvioi tietyistä maahukasta aiheutuvan painuman. Kilpimenetelmällä tunnelia rakennettaessa tunnelin verhouksen ja kaivetun profiilin väliin jää tyhjätilaa, joka on maahukkaa. Painumia voidaan vähentää injektoimalla verhouksen taustaa (kuva 40). Maahukkaa tapahtuu kuitenkin aina vähän. Kluuvien ruhjeessa verhouksen taustan injektointi suoritettiin järjestelmällisesti. Tyhjätila ei ehtinyt mennä umpeen ennen injektointia, koska jäätynyt maa kantoi päällä olevat maakerrokset.

## 5.22

## Painuman tarkastelu todennäköisyysteoreettisena probleemana

Todennäköisyysteoreettisissa tarkasteluissa maa-aines korvataan lukuisilla pienillä kappaleilla tai levyillä, jotka ovat alaspäin vaikuttavan painovoimakentän vaikutuksen alaisena. Vastakohdista kimmoteoreettisiin ratkaisuihin, joissa maata pidetään yhtenäisenä massana, todennäköisyysmassa on rakeinen aine, jossa on suuri määrä sattunaisesti tai tasaisesti jakautuneita epäjatkuvuuksia. Todennäköisyysteoreettinen lähestymistapa ei lainkaan huomioi maassa vallitsevia jännityksiä ja siksi sitä ei voida suoraan käyttää jännitysten arviointiin.

Tällä menetelmällä saadut tulokset poikkeavat periaatteessa hyvin paljon kimmoteorian pohjalta saaduista ratkaisuksista. Vain hyvin tasarakeisessa maassa olosuhteet vastaavat todennäköisyysmassaa. Sen vuoksi menetelmää voidaan käyttää vain painumien ja sivusiirtymien karkeaan arviointiin. Teoreettisia ratkaisumalleja täytyy aina soveltaa siten, että ne sopivat yhteen käytännön havaintojen kanssa.



Kuva 41. Painuma stokastisena probleemana /13/.

Todennäköisyysmassassa kappaleet ovat alaspäin suuntautuvan vetovoimakentän alaisena. Kun alin levy otetaan pois, muodostuu tyhjätila. Tämä tila täyttyy ja tyhjä tila etenee maan pinnalle asti. Levyt täyttävät tyhjätilat kuvassa 41 olevien todennäköisyyksien mukaan. Alaspäin kulkevan

levyn on toteutettava seuraava yhtälö /13/:

$$\frac{\delta P(x, z)}{z} = B \cdot \frac{\delta^2 P(x, z)}{\delta x^2} \quad (9)$$

Tämän differentiaaliyhtälön yhteinen ratkaisu on /13/:

$$P(x_0, z_0; x, z) = \frac{1}{\sqrt{\pi 4 B (z_0 - z)}} \exp \left[ - \frac{(x_0 - x)^2}{4 B (z_0 - z)} \right] \quad (10)$$

P on todennäköisyys, jolla levy, joka sijaitsee pisteessä (x, z), liikkuu alaspäin alimman pallon (x<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>) liikkumisen seurauksena. Vakio B on riippuvainen levyjen halkaisijasta. Sweet (1965) on tutkimuksissaan päässyt tulokseen /13/:

$$B = \frac{\bar{d} (1 + v^2/d^2)}{\tan \phi \sqrt{1 + \tan^2 \phi}} \quad (11)$$

missä

$\bar{d}$  on keskimääräinen raehalkaisija

$v^2$  " raekoon vaihtelun varianssi

$\phi$  " aineen kitkakulma.

Todellisuudessa geologiset olosuhteet vaihtelevat kuitenkin niin paljon, että on parasta käyttää kokemuseräistä arvoa vakiolle B.

Yhtälö 9 kuvaa määrätylle syvyydelle z Gaussin jakauman, jossa hajonta i(z) on /13/:

$$i(z)^2 = 2B (z - z_0) \quad (12)$$

Painumanotkon tilavuus pysyy samana z<sub>0</sub>:sta maan pintaan asti. Jos pisteessä (x<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>) tapahtuvan maahukan määrä on V<sub>1</sub>, painuma pisteessä (x, z) on /13/:

$$s(x, z) = \frac{V_1}{\sqrt{4 \pi B (z_0 - z)}} \exp \left( - \frac{(x_0 - x)^2}{4 B (z_0 - z)} \right) \quad (13)$$

Maksimipainuma on

$$s_{\max} = s(x_0, z) = \frac{V_1}{\sqrt{4 \pi B (z_0 - z)}} = \frac{V_1}{i(z) \sqrt{2 \pi}} \quad (14)$$



Todellisuudessa maahukan tapahtuessa maan pinnalla olevan painuman tilavuus on pienempi kuin tunnelissa tapahtuvan maahäviön tilavuus. Maksimipainuman arvo on näin ollen pienempi kuin näillä laskelmilla saatu.

## 5.23

## Horisontaaliliikkeet

Seuraavassa oletetaan painumanotkon olevan Gaussin todennäköisyysjakauman muotoinen.

Jos pystysuora painuma  $s$  tunnetaan, vaakasuorat jännitykset voidaan laskea painuvan maakerroksen jokaisessa pisteessä. Jos tilavuus oletetaan vakioksi, niin vaakasuora jännitys pisteessä on pystysuoran jännityksen vastaluku /13/:

$$\sigma_h = - \frac{ds}{dz} \quad (15)$$

missä

$\sigma_h$  on vaakasuora jännitys.

Vaakasiirtymä  $s_h$  saadaan integroimalla vaakajännityksen lausekkeista /13/:

$$s_h = \int_{-\infty}^x \sigma_h \cdot dx = - \kappa \cdot \frac{x \cdot s}{z_0 - z} \quad (16)$$

missä

$\kappa$  on 0,8 (kokeellinen vakio)  
 $x$  " vaakaetäisyys painumakartion keskipisteestä  
 $s$  " painuman arvo  
 $z_0 - z$  " laskettavan pisteenetäisyys maahäviön tapahtumapisteestä.

Painuvan maakerroksen keskellä on puristusjännityksen maksimikohta. Vetojännityksen nollakohta on siellä, missä vaakaliikkeet ovat suurimmat.

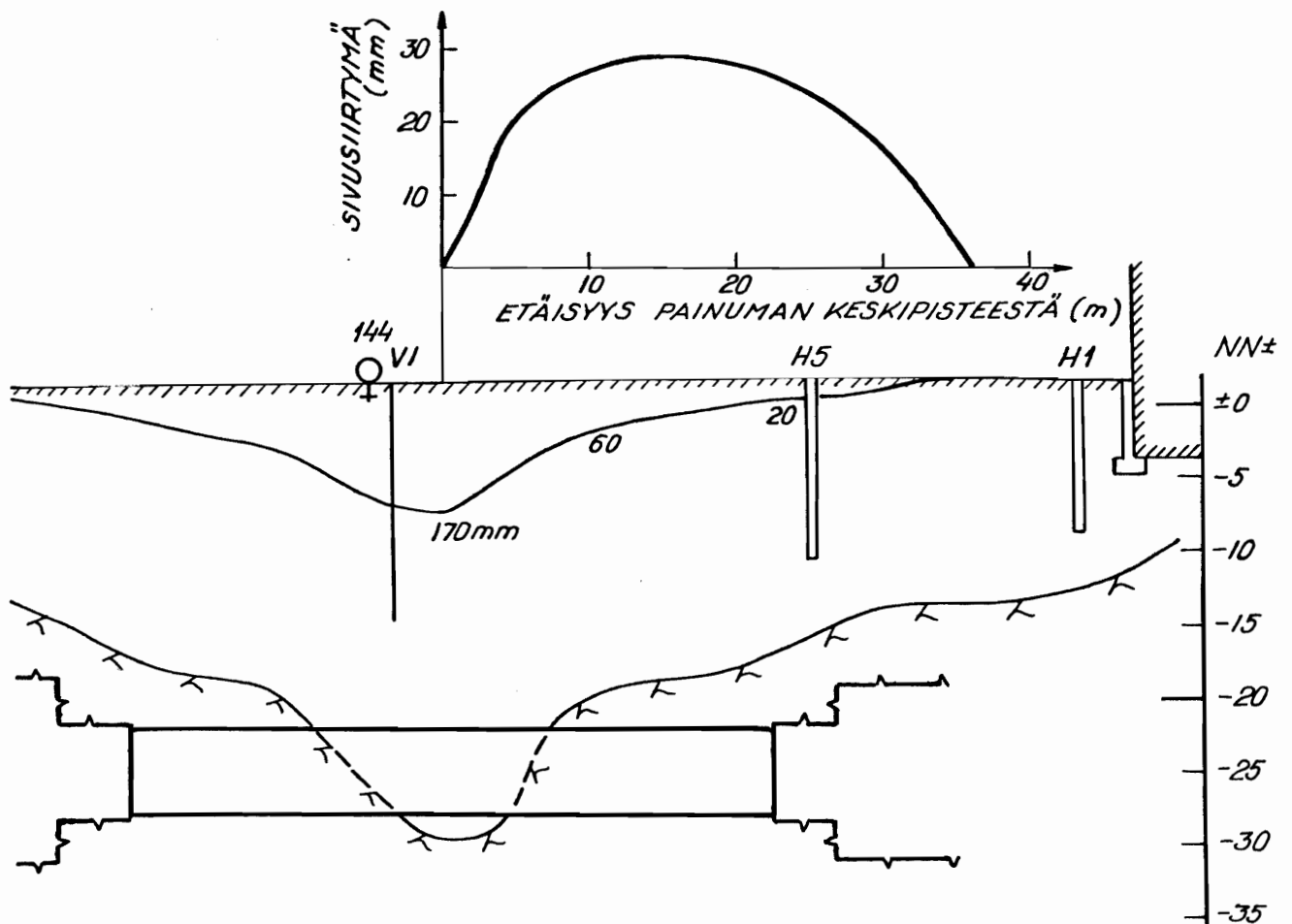
Sivusiirtymä voidaan laskea karkeasti, kun tunnetaan painuma /14/:

$$s_h(x) = \frac{x \cdot s(x)}{H} \quad (17)$$

missä

$s_h(x)$  on sivusiirtymä  
 $x$  " etäisyys kartion keskipisteestä  
 $s(x)$  " painuma  
 $H$  " tunnelin päällä olevan maakerroksen pakkaus.

Kluuvin ruhjeen painumiin sovellettuna sivusiirtymät vaihtelevat 0 - 30 mm. Sivusiirtymäputken H5 kohdalla pitäisi sivusiirtymän olla noin 20 mm. Arvot on kuitenkin laskettu kaavalla, joka perustuu indeaalimalliin, jossa pyöreät pallot valuvat alaspäin. Lisäksi kallion pinnan korkokuva on hyvin vaihteleva Kluuvin ruhjessa. Kuva 42 on esitetty teoreettinen sivusiirtymä Kluuvin ruhjeessa.



Kuva 42. Sivusiirtymä painuman ja etäisyyden funktiona. Sivusiirtymän arvot laskettu kaavalla  $17/14/$ .

## 5.3

Konsolisaadion osuus kokonaispainumasta

VTT:n geotekniikan laboratorion tekemien tutkimustulosten mukaan keskimääräinen konsolidaatiovakion  $c_v$  arvo Kluuvin ruhjeen saville on  $0,5 \text{ m}^2/\text{v} / 20/$ . Savikerroksen puolivälissä sijaitsevan silttikerroksen vaikutus painumisen nopeuteen on todennäköisesti huomattava. Sen konsolidaatiovakio on noin  $2 - 10 \text{ m}^2/\text{v}$ . Mikäli tämä on yhteydessä ulkopuoliseen orsivedenpintaan, vaikuttaa kerrostuman alla tapahtuva vedenpaineen aleneminen ensisijaisesti silttikerroksen alapuoliseen savikerrokseen, kun taas yläpuolella olevan savikerroksen molemmiin puolin vedenpaine pysyy vakiona. Huokospainemittauksen perusteella näyttäisi siltä, että silttikerros ei ole yhtenäinen.

Silttikerros otetaan huomioon differenssilaskennassa merkitsemällä kyseisen kerroksen konsolidaatiovakioksi  $2,0 \text{ m}^2/\text{v}$ . Painumisnopeuteen vaikuttaa kerroksen ominaisuuksien lisäksi sen tehoakas paksuus. Tässä oletetaan, että huokospaine purkautuu sekä ylös että alaspäin.

VTT:n geotekniikan laboratorio on tehnyt laskelmia Kluuvin ruhjeen savikerroksen painumisesta eri pohjavedenpinnan tasolla  $/20/$ . Näissä laskelmissa on oletettu pohjavedenpaineen laskevan koko kerroksen merkitsevän paksuuden osalta. Orsivedenpinta on kuitenkin pysynyt melko vakiona, joten VTT:n painumanomogrammien painuma-arvo voidaan puolittaa. Näissä laskelmissa on eri pohjaveden alenemisille laskettu kokoonpuristuvuusmoduulin arvot yhtälöstä  $18 / 20/$ :

$$E'_k = \frac{\Delta p \cdot H}{s} \quad (18)$$

missä

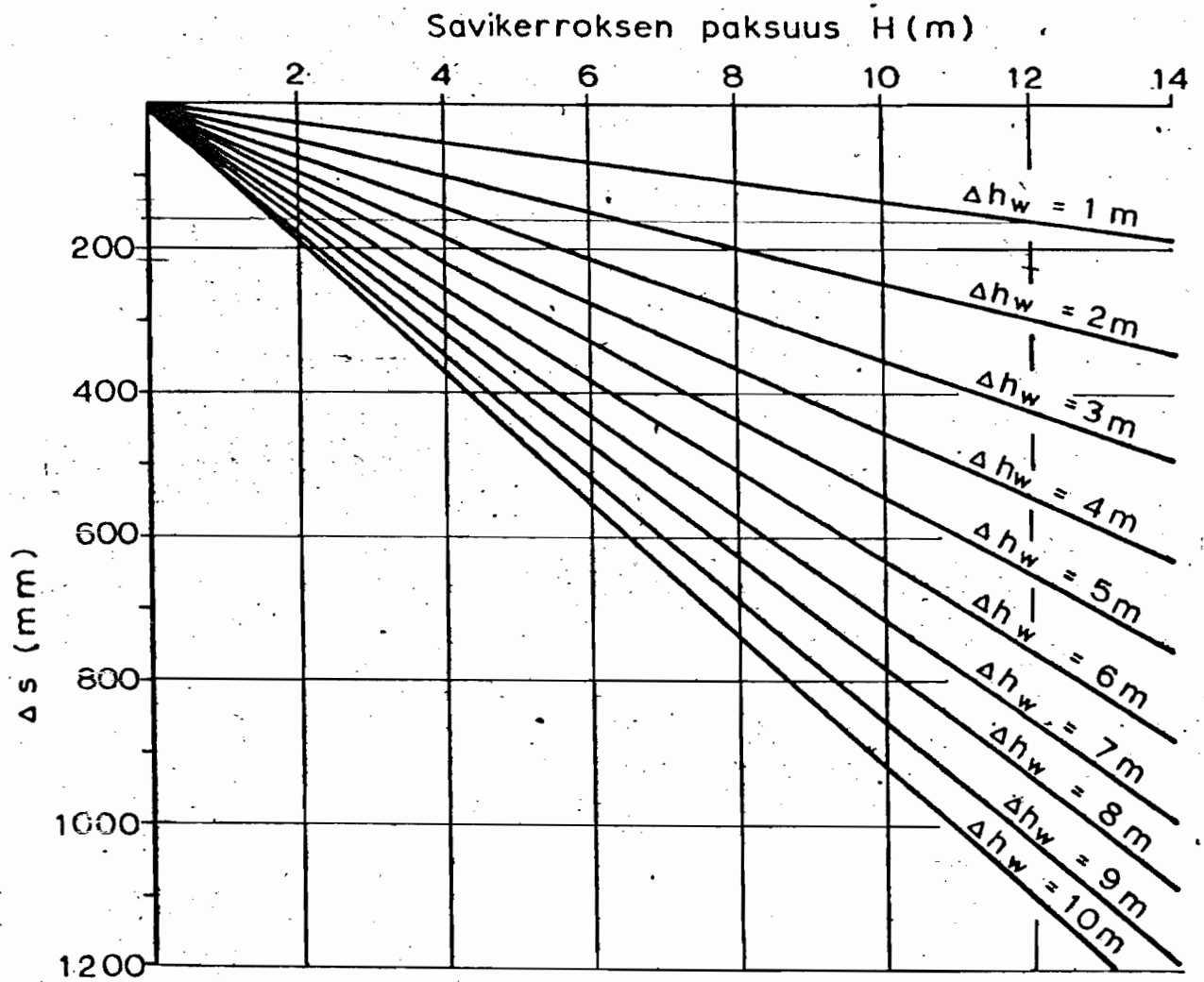
$\Delta p$  on pohjaveden aleneman aiheuttama paineen muutos  $[\text{kN}/\text{m}^2]$

$H$  " kerrospaksuus  $[\text{m}]$

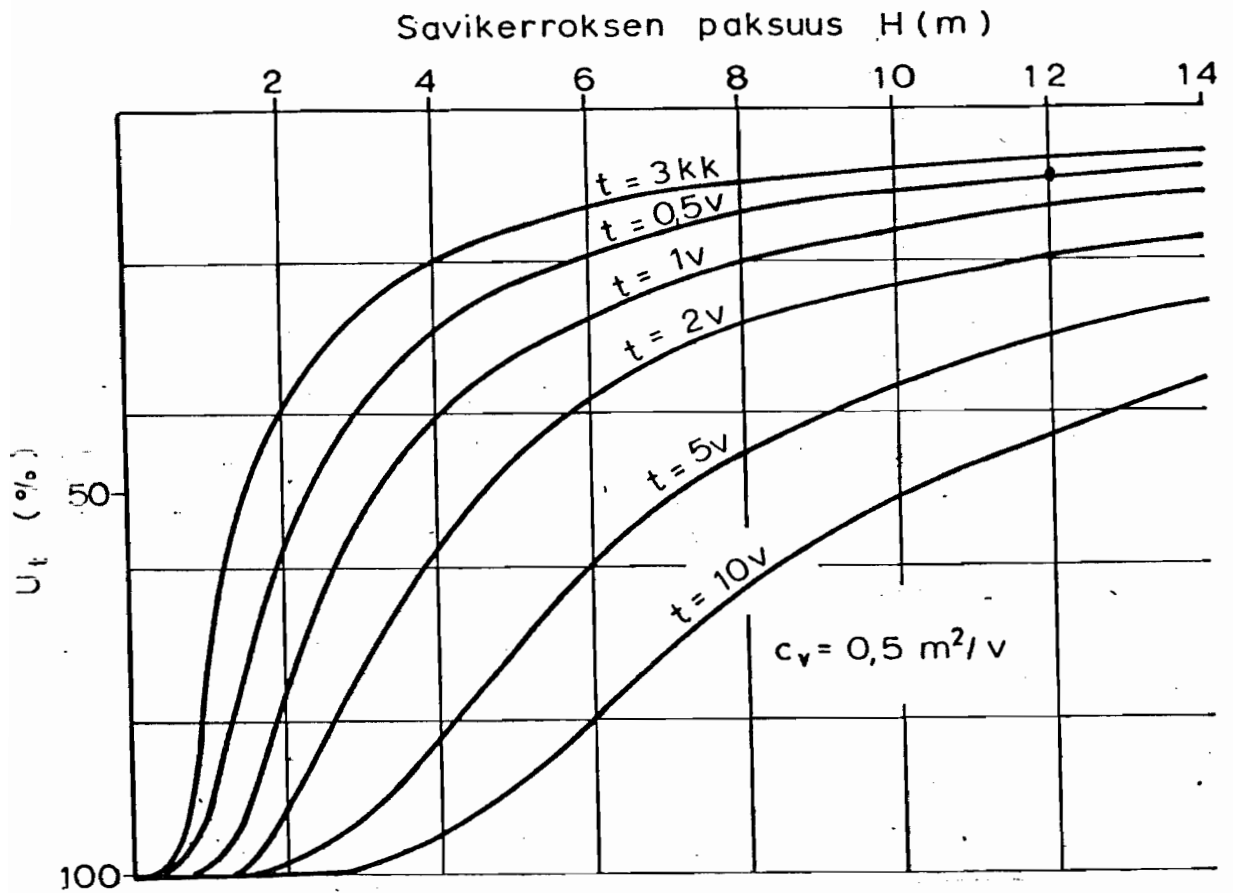
$\Delta s$  " painuma vedenpaineen muutokselle  $p$ .

Pohjaveden alenemaa  $1 - 10 \text{ m}$  vastaaviksi  $E'_k$ :n arvoiksi on saatu  $0,76 - 1,09 \text{ MN}/\text{m}^2 / 20/$ .

Eri kerrospaksuuksille saadaan pohjaveden paineen muutoksen aiheuttamat painumat seuraavalla kaavalla  $/20/$ :



Kuva 43. Kokonaispainuman riippuvuus savikerroksen paksuudesta ja pohjaveden pinnan alenemasta Kluuvin ruhjeella /20/.



Kuva 44. Konsolidaatioasteen riippuvuus kuormituksen vaikutusajasta ja savikerroksen paksuudesta Kluuvin ruhjeella /20/.

$$s = \frac{\Delta p \cdot H}{E'_k} \quad (19)$$

Painumisnopeuden laskelmat on tehty käyttäen konsolidaatiovakion arvona  $c_v = 0,5 \text{ m}^2/\text{v}$ .

Kuvissa 43 ja 44 on esitetty käyrästöt kokonaispainuman arvoista ja konsolidaationopeus. Näiden käyrien perusteella saadaan arvio konsolidaatiopainumasta Kluuvin ruhjeen työn aikana.

Savikerrosten paksuus ruhjeen päällä on noin 12 m. Poraustyön aikana pohjavedenpinta oli tasolla -2. Orsivesi oli vähän nollan alapuolella. Koko savikerroksen paksuudelle jaettuna tämä vastaa noin 1,5 m pohjaveden alenemaa. Kuvasta 43 saadaan kokonaispainuman arvoksi 220 mm. Kuvan 44 mukaan ensimmäisen vuoden aikana tapahtuu 14 % kokonaispainumasta (31 mm). Konsolidaationopeus pitäisi olla noin 2,5 mm/kk.

Painumisnopeuden arvioinnissa on käytettävä ensimmäisen vuoden aikana tapahtuvaa konsolidaationopeutta, koska pohjavesi on pitkäaikaisesti ollut lähellä nollatasoa ja vasta noin puoli vuotta ennen porausvaihetta pohjaveden pinta alkoi laskea huomattavasti. Tämä johtui suurista pohjaveden alennuksista läheisellä rakennustyömaalla. Pitkäaikaisten painumamittausten perusteella ovat painumat Rautatientorin alueella aikaisemmin olleet luokkaa 0,5 - 1,0 mm/kk.

Porausvaihe kesti noin 5 kk. Tänä aikana konsolidaatiopainuma oli näiden laskelmien perusteella noin 12 mm. Porausvaiheen aikana tapahtunut kokonaispainuma pohjoisen tunnelin päällä oli noin 130 mm ja eteläisen tunnelin päällä noin 70 mm. Konsolidaation osuus painumista on siis melko pieni, noin 10 - 15 %. Tätä todistavat huokospaineen mittauksetkin. Huokospaineiden olisi pitänyt laskea lähelle pohjavedenpinnan tasoa, jos painumat olisivat tapahtuneet konsolidaation ansiosta. Huokospaineet kuitenkin nousivat jopa 2 m porauksen aikana. Tämän täytyy johtua saven häiriintymisestä suuren painuman johdosta.

Konsolidaation kehitystä Rautatientorilla Kluuvin ruhjeen läpäisyn jälkeen on pyritty arvioimaan laskemalla huokospaineita differenssimenetelmällä. Laskennassa on lähdetty liikkeelle mittauksin havaitusta huokospaineepinnasta (kuva 45). Laskelmissa on käytetty yksidimensionaalisen konsolidaation mallia /4/, /5/:

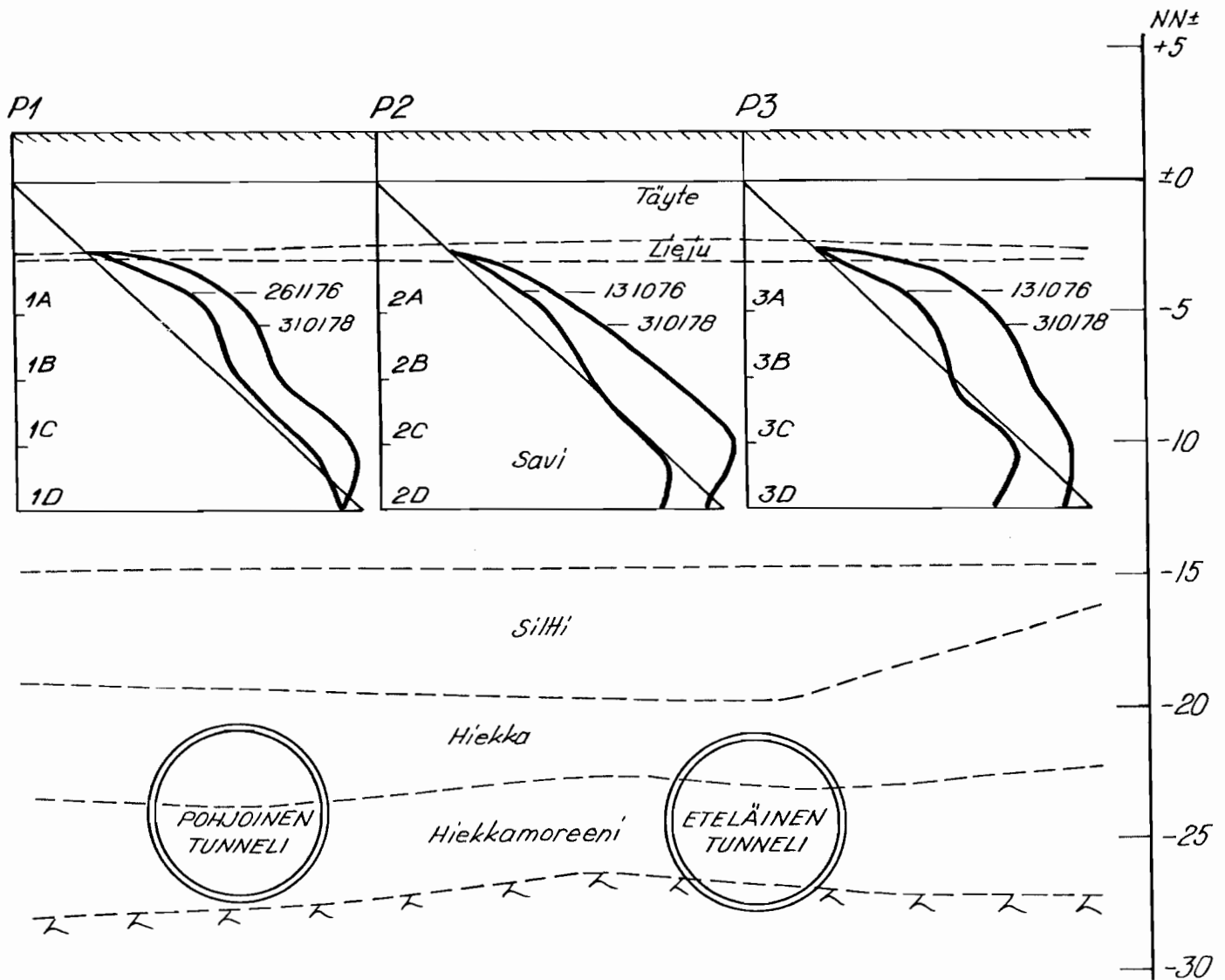
$$\frac{\delta u}{\delta t} = c_v \cdot \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \quad (20)$$

missä

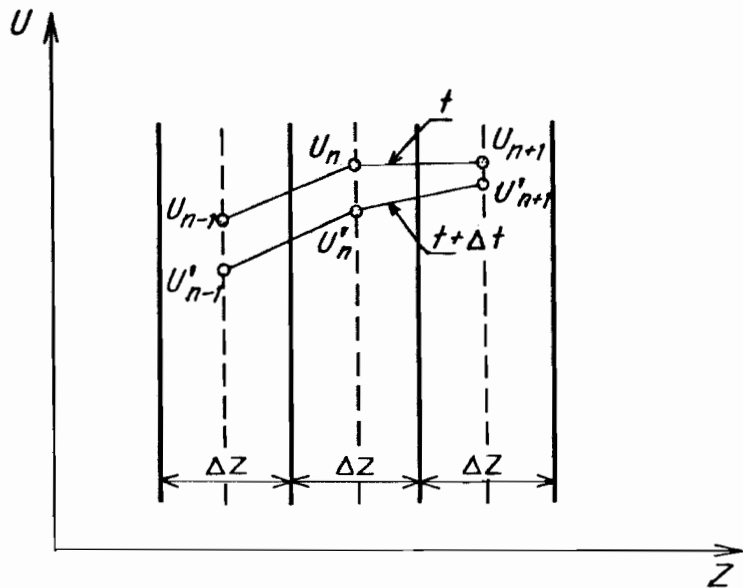
$\delta u$  on huokospaineen muutos

$\delta t$  " ajan muutos

$c_v$  " konsolidaatiovakio.



Kuva 45. Huokospainepintoja Kluuvin ruhjeen savikerroksissa. Yhden cm poikkeama painekolmiosta vastaa 1 m huokospainetta.



Kuva 46. Elementtijako differenssimenetelmässä /4/.

Differenssimenetelmää käytettäessä jaetaan konsolidoituva maakerros  $\Delta z$  -levyisiin lamelleihin ja esitetään konsolidaatioyhtälö differenssiyhtälön muodossa /4/, /5/:

$$\frac{u'_n - u_n}{\Delta t} = \frac{c_v}{\Delta z} \left( \frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta z} - \frac{u_n - u_{n-1}}{\Delta z} \right) \quad (21)$$

eli

$$u'_n - u_n = \frac{c_v \cdot \Delta t}{(\Delta z)^2} (u_{n+1} + u_{n-1} - 2u_n) \quad (22)$$

missä  $u'_n$  tarkoittaa huokosvedenpaineen arvoa hetkellä  $t + \Delta t$ , kun  $u_n$  on saman lamellin  $u$ -arvo hetkellä  $t$  ja  $c_v$  on maan konsolidaatiokerroin (kuva 46).

Valitsemalla  $c_v \cdot \Delta t / (\Delta z)^2 = \mu = \text{vakio}$  voidaan siten ajankohtaa  $t = t_0$  vastaavasta huokospaineen nollaisokroonista lähtien asteittain laskea huokosveden ylipaine eri pisteissä.

Taulukkomuodossa tapahtuvaa laskentaa varten on yksinkertaisinta valita  $\mu = 0,5$ , jolloin saadaan /4/, /5/:

$$u'_n = 0,5 \cdot (u_{n+1} + u_{n-1}) \quad (23)$$

Toisin sanoen huokosveden ylipaine tietyn lamellin keskiviivalla ajankohtana  $t + \Delta t$  saadaan lähielementtien huokosveden ylipaineen aritmeettisena keskiarvona ajankohtana  $t$ .



Graafisessa ratkaisussa valitaan  $\mu = 0,25$ , jolloin /4/, /5/:

$$u'_n = 0,25 (u_{n+1} + u_{n-1}) + 0,5 u_n \quad (24)$$

$$\text{Aikatekijä } T_v = \frac{c_v \cdot t}{H^2} = \frac{c_v \cdot \Delta t}{(\Delta z)^2} \cdot \frac{\tau}{n^2} = \mu \cdot \frac{\tau}{n^2} \quad (25)$$

missä

$\tau$  on isokroniluku

$n$  " elementtien lukumäärä

$\mu$  " 0,5 (taulukkolaskennassa)

$$\text{Isokroonien aikaväli } t = \mu \cdot (\Delta z)^2 / c_v \quad (26) \quad /5/$$

Kokoonpuristuva kerros voi muodostua erilaisen konsolidaationopeuden omaavista kerroksista. Elementin korkeus täytyy vain sovittaa seuraavan kaavan mukaan.

$$\frac{\Delta z_1}{\Delta z_2} = \sqrt{\frac{c_{v1}}{c_{v2}}} \quad (27)$$

Konsolidaatioaste  $U$  saadaan seuraavalla kaavalla /4/, /5/:

$$U = 1 - \frac{\sum_0^n u_\tau}{\sum_0^n u_0} \quad (28)$$

missä

$u_\tau$  on huokosveden ylipaine elementissä hetkellä  $t = \tau$ .

$u_0$  " vastaava paine hetkellä  $t = 0$

$n$  " elementtien lukumäärä pystysuunnassa

Lasketaan esimerkkinä huokospainepisteen P3 kohdalla olevan savikerroksen huokospaineita. Oletetaan, että orsivedenpinta pysyy tasolla  $\pm 0$  ja pohjavedenpinta tasolla  $-1$ . Tällöin saadaan kuvan 47 mukainen huokospainepinta, kun otetaan lähtökohdaksi syyskuussa 1977 mitatut huokospaineen arvot. Otetaan elementtiväliksi  $\Delta z$  on 2 m. Tällöin isokroniväliksi tulee  $t = 0,5 \cdot (2)^2 / 0,5 = 4$  vuotta. Huokosvesi purkautuu kahteen suuntaan.

Savikerros jaetaan kuuteen elementtiin. Kunkin elementin keskellä vallitseva huokospaine lasketaan seuraavilla kaavoilla:

$$\begin{aligned}
 u'_A &= 0,5 \cdot u_B \\
 u'_B &= 0,5 \cdot (u_A + u_C) \\
 u'_C &= 0,5 \cdot (u_B + u_D) \\
 u'_D &= 0,5 \cdot (u_C + u_E) \\
 u'_E &= 0,5 \cdot (u_D + u_F) \\
 u'_F &= 0,5 \cdot u_E
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Kuvassa 47 on huokospaineisokroonit 1 - 20.

Silttikerros tasolla -7 voidaan ottaa huomioon muuttamalla elementtiväliä konsolidaatiovakioiden mukaisesti niin, että isokroonien aikaväli on sama.

$$\Delta z = 2 \text{ m} / \sqrt{\frac{0,5}{2}} = 4 \text{ m}$$

Kuvassa 48 on huokospaineisokroonit 1 - 20 tälle tapaukselle. Huokospaineiden tasoittuminen tapahtuu hieman nopeammin, jos silttikerros otetaan huomioon.

Konsolidaatioaste on yksimaalajisessa tapauksessa 0,501. Savikerrosten keskimääräinen kokoonpuristuvuuskerroin  $m_v = 1,3 \text{ m}^2/\text{MN}$ . Painuma  $h_t$  lasketaan seuraavalla kaavalla /4/, /5/:

$$\begin{aligned}
 \Delta h_t &= m_v (F_{uo} - F_{ut}) \\
 F_{uo} &= \sum_0^n u_o \cdot \Delta z \\
 F_{ut} &= \sum_0^n u_t \cdot \Delta z
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

missä

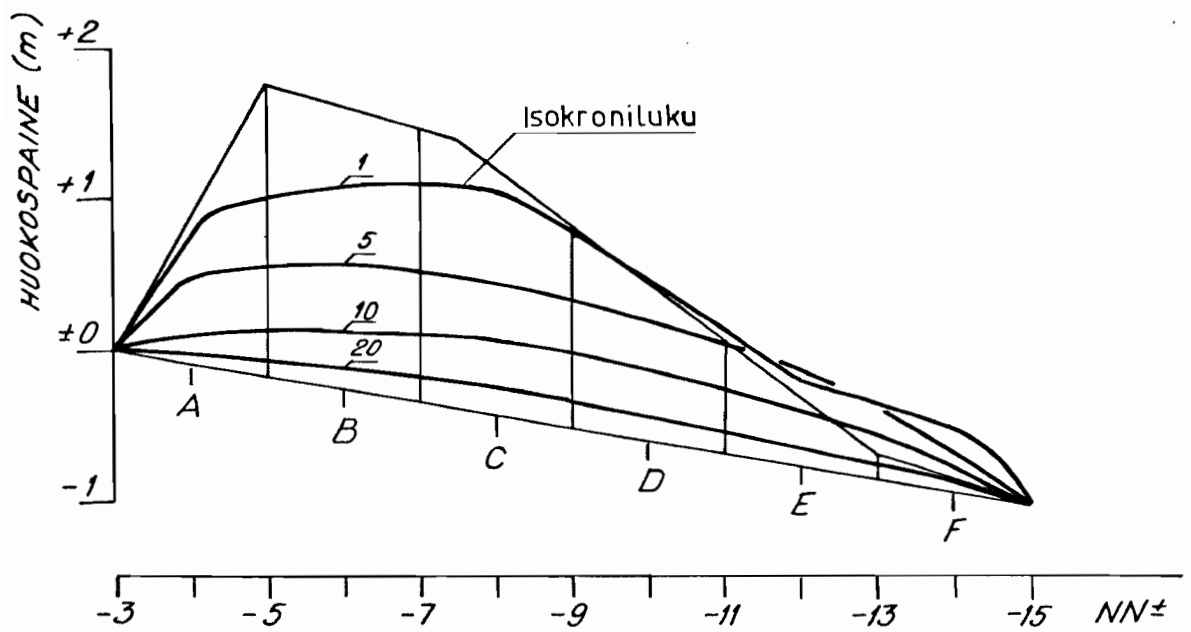
$F_{uo}$  on alkuperäinen huokospainepinta

$F_{ut}$  " isokroonia  $\tau$  vastaava huokospainepinta

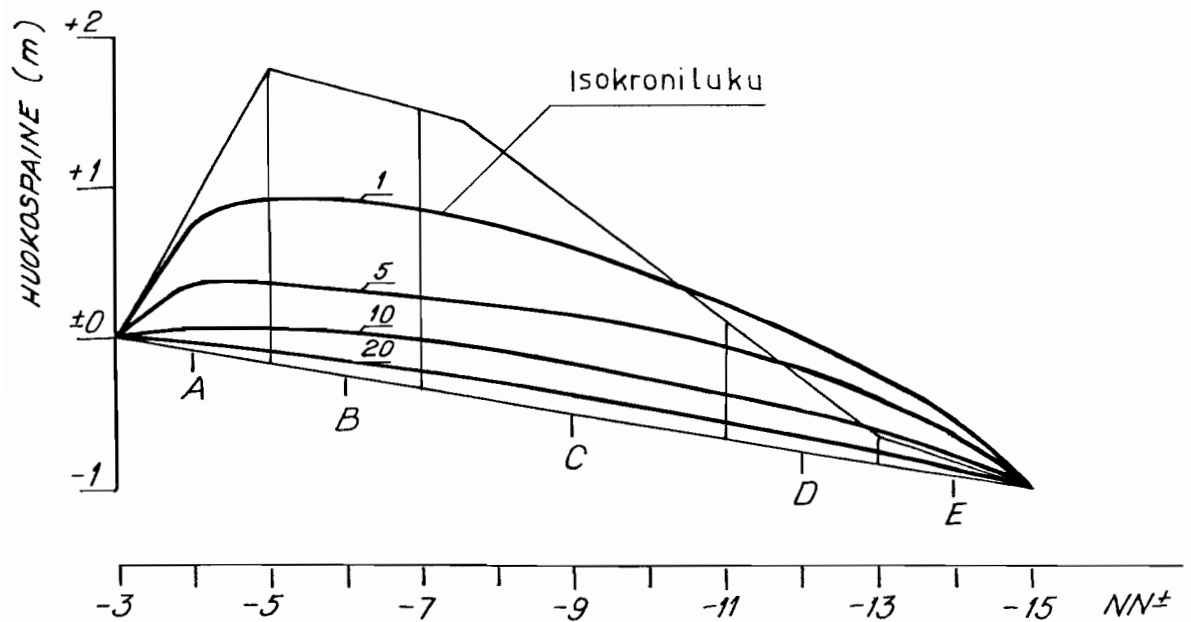
Jos koko savikerroksessa vallitsee keskimäärin yhden metrin huokosveden ylipaine, niin kokonaispainuma

$$\Delta h_t = 12 \text{ m} \cdot 10 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,3 \text{ m}^2/1000 \text{ kN} = 15,6 \text{ cm}.$$

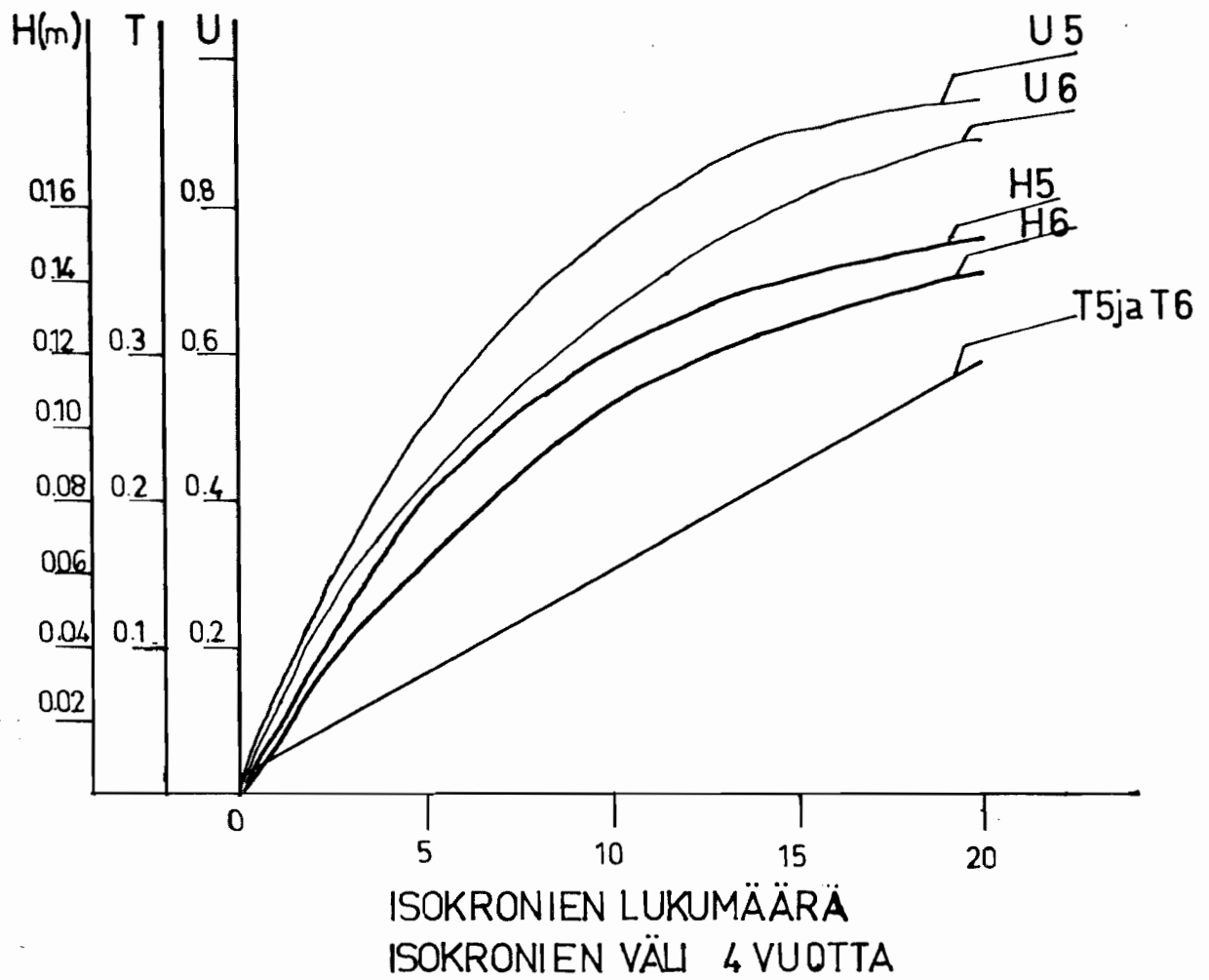
Kuvissa 47 - 49 on esitetty taulukkomuotoisen differenssilaskennan tulokset. Kuvasta 49 nähdään konsolidaatioaste, aikatekijä ja painuma. Konsolidaationopeus tulee olemaan näiden laskelmien perusteella lähimmän neljän vuoden aikana noin 0,3 mm/kk.



Kuva 47. Huokospainepinnat kuuden elementin tapauksessa.



Kuva 48. Huokospainepinnat viiden elementin tapauksessa.



Kuva 49. Konsolidaatioaste  $U$ , kokonaispainuma  $H$  ja aikatekijä  $T$  viiden ja kuuden elementin tapauksessa.

## 6.

## AKTIIVIJÄÄDYTYS

## 6.1

Jääkuoren muodostuminen ruhjeessa

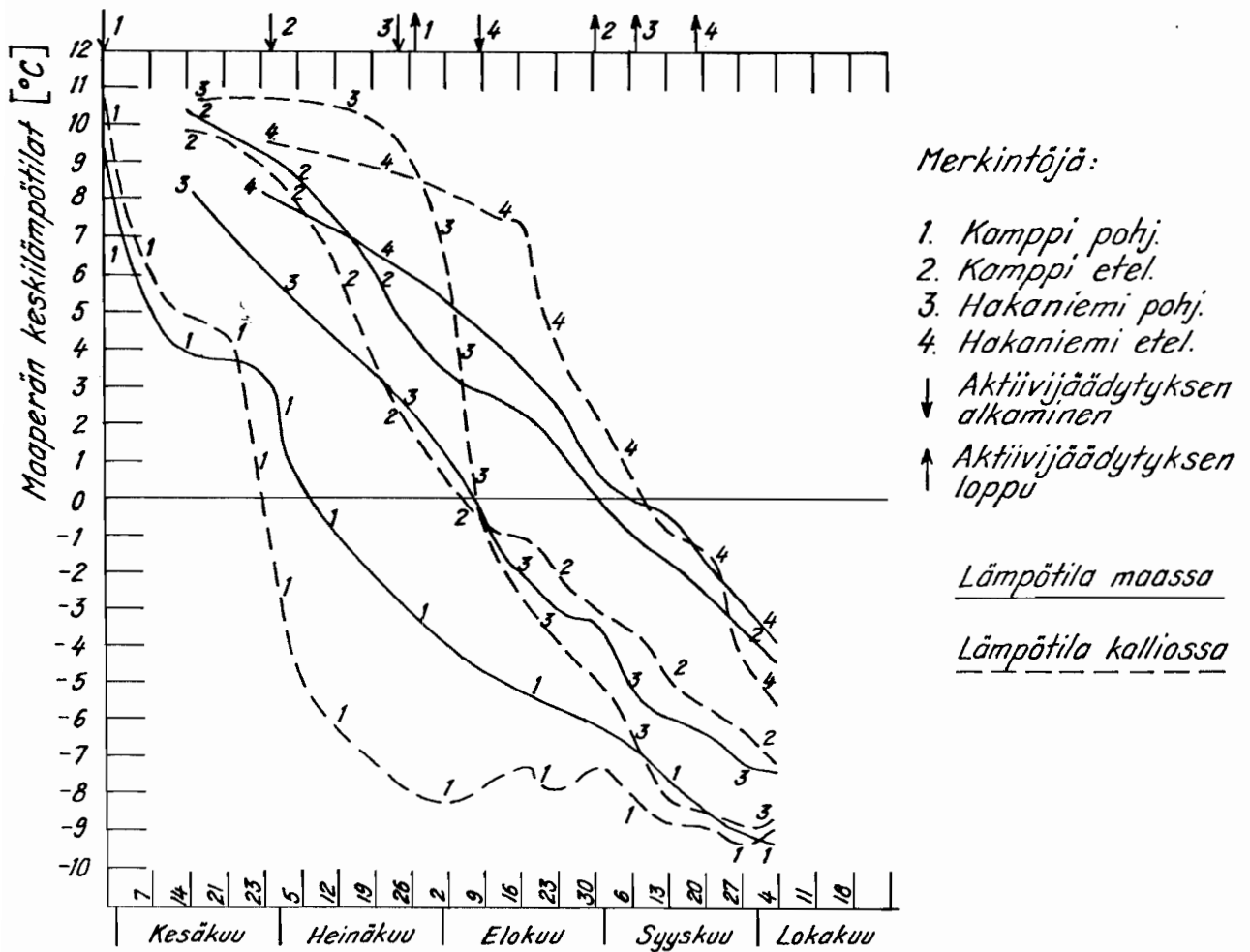
Aktiivijäädytyksellä tarkoitetaan jäädyttämisvaihetta. Kluuvin ruhjeessa jäädytys aloitettiin ensimmäiseksi Kampin puolen pohjoisesta perästä. Siellä jäädytys aloitettiin kesäkuun alussa. Kampin eteläisessä perässä oli vaikeuksia saada freon-kiertoa toimimaan. Putkistoon jäi liikaa kosteutta. Putket tyhjiöpumpattiin perusteellisesti. Jäädytys alkoi täällä heinäkuun alussa. Hakaniemen puolen pohjoisessa perässä jäädytys käynnistyi heinäkuun lopulla ja eteläisessä perässä elokuun alussa.

Jäädytyksen kehitystä seurattiin lämpötilan mittausreijistä. Lämpötilan mittausreikiä oli keskimäärin viisi perää kohti. Ne oli sijoitettu eri etäisyyksille tunneliprofiilista. Näin saatiin parempi käsitys lämpötilan jakautumisesta poikkisuunnassa. Sen jälkeen, kun jääkuori oli kasvanut riittävän paksuksi suljettiin muutama jäädytysputki ja niihin asennettiin lämpötilan mittauselementit.

Jäädytyksen käynnistyttyä Kampin pohjoisessa tunnelissa lämpötilat alkoivat pudota melko nopeasti sekä maassa että kalliossa. Kalliossa lämpötilan lasku oli nopeinta. Tämän vuoksi jäädytyksen alussa käytettiin kallio-osuudella vain ulointa jäädytyskehää. Kuitenkin kattopuolella olivat molemmat kehät toiminnassa.

Kampin pohjoisessa perässä aktiivijäädytysvaihe oli toiseksi pisin, noin 8 vk. Tämä johtuu siitä, että ensimmäisen perän jäädytys alensi muiden perien lämpötilaa. Kallio toimii tehokkaana lämmönjohtimena. Hakaniemen puolella pohjoisessa tunnelissa maan keskilämpötila putosi ennen jäädytyksen aloittamista kymmenestä asteesta Celsiusta kolmeen asteeseen. Tässä näkyy selvästi kallion lämpöä tasaava vaikutus. Paikoitellen jääkuoren paksuus kallio-osuudella oli jopa 7 m. Keskilämpötila kalliossa oli kuitenkin korkeampi kuin maaosuudella, noin  $-5 - -6^{\circ}\text{C}$ .

Maaosuudella keskilämpötila aktiivivaiheen lopussa oli noin  $-10^{\circ}\text{C}$ . Kampin eteläisessä perässä aktiivijäädytysaika oli pisin, noin 9 vk. Tämä johtuu siitä, että Kampin eteläisessä perässä oli



kuva 50. Lämpötilojen kehitys maassa ja kalliassa aktiivijäädätyksen aikana (vertaa kuva 68).

vaikeuksia saada putkia tyhjiöpumpatuiksi. Hakaniemen molemmissa perissä aktiivijäädätysvaihe kesti noin 6 vk. Keskilämpötilojen kehitys aktiivivaiheen aikana on esitetty kuvassa 50.

Jääsylinterien yhtyminen tapahtui aikaisemmin. Tämä tarkoittaa sitä hetkeä, jolloin jääsylinterit juuri koskettavat toisiaan. Kampin pohjoisessa perässä jääkuoren sulkeutuminen vei aikaa 3-4 viikkoa. Muissa perissä kehitys oli nopeampaa. Sulkeutuminen tapahtui 2,5 - 3 viikossa. Jääsylinterien säteen keskimääräinen kasvunopeus maaosuudella oli siis 35 mm/vrk.

Sulkeutumisen jälkeen kului 3-4 viikkoa ennenkuin saavutettiin 2,5 - 3,0 metriä paksu jääsylinteri. Sulkeutumisen jälkeen jääkuoren painopisteaksi

siirtyy lähemmäksi ympyrän keskipistettä. Yksittäisen jäädytyskehän tapauksessa 60 % jääkuoren paksuudesta on jäädytysputkien sisäpuolella ja 40 % ulkopuolella /15/. Kuvassa 51 on nähtävissä jääkuoren muoto eri ajankohtina pohjoisen tunnelin maaosuudella.

Koko aktiivijäädytysaikana kesäkuun alusta syyskuun loppuun oli lämmönpoisto ruhjeesta noin  $2 \cdot 10^{12}$  J. Tämä on noin kaksi kertaa enemmän kuin pelkän maaperän jäädytykseen ilman lämpöhäviöitä kuluisi (kappale 3.22). Energian kulutus oli aktiivijäädytysvaiheen aikana suurimmillaan. Se oli  $3 - 8 \cdot 10^{10}$  J.

## 6.2

### Jään muodostuminen putken ympärille

#### 6.21

#### Chakimovin ratkaisumalli

Jäätymiseen tarvittava aika ratkaistaan tavallisesti lähtien seuraavasta lämpötasapainoyhtälöstä, joka kuvaa kaksiulotteista lämpövirtaa /8/:

$$\left( \lambda_1 \cdot \frac{\delta T_1}{\delta x} - \lambda_2 \cdot \frac{\delta T_2}{\delta x} \right)_{x=\xi} = q_s \cdot \rho \cdot \frac{d\xi}{dt} \quad (31)$$

missä

$\lambda_1$  ja  $\lambda_2$  ovat lämmönjohtavuusluvut sulalle ja jäätyneelle maalle

$\frac{\delta T_1}{\delta x}$  on lämpötilagradientti alueella  $0 \leq x \leq \xi$

$\frac{\delta T_2}{\delta x}$  " " "  $\xi \leq x \leq \infty$

$\xi$  " jääsyntinterin säde

$\rho$  " veden tiheys

$q_s$  jään sulamislämpö

$\frac{d\xi}{dt}$  " jäätymisen kehitys

Oletetaan, että jääsyntinterin säde  $\xi$  on suorassa riippuvuussuhteessa R:ään /8/. R on etäisyys jäädytysputken pinnasta vyöhykkeellä, jossa vallitsee alkuperäinen lämpötila.  $R = b \cdot \xi$ . Kerroin b on maan ominaisuuksista riippuva verrannollisuuskerroin, joka kuvaa jäätymisrajan etäisyyttä jäätymisrajasta (kuva 52).

MERKINNÄT:

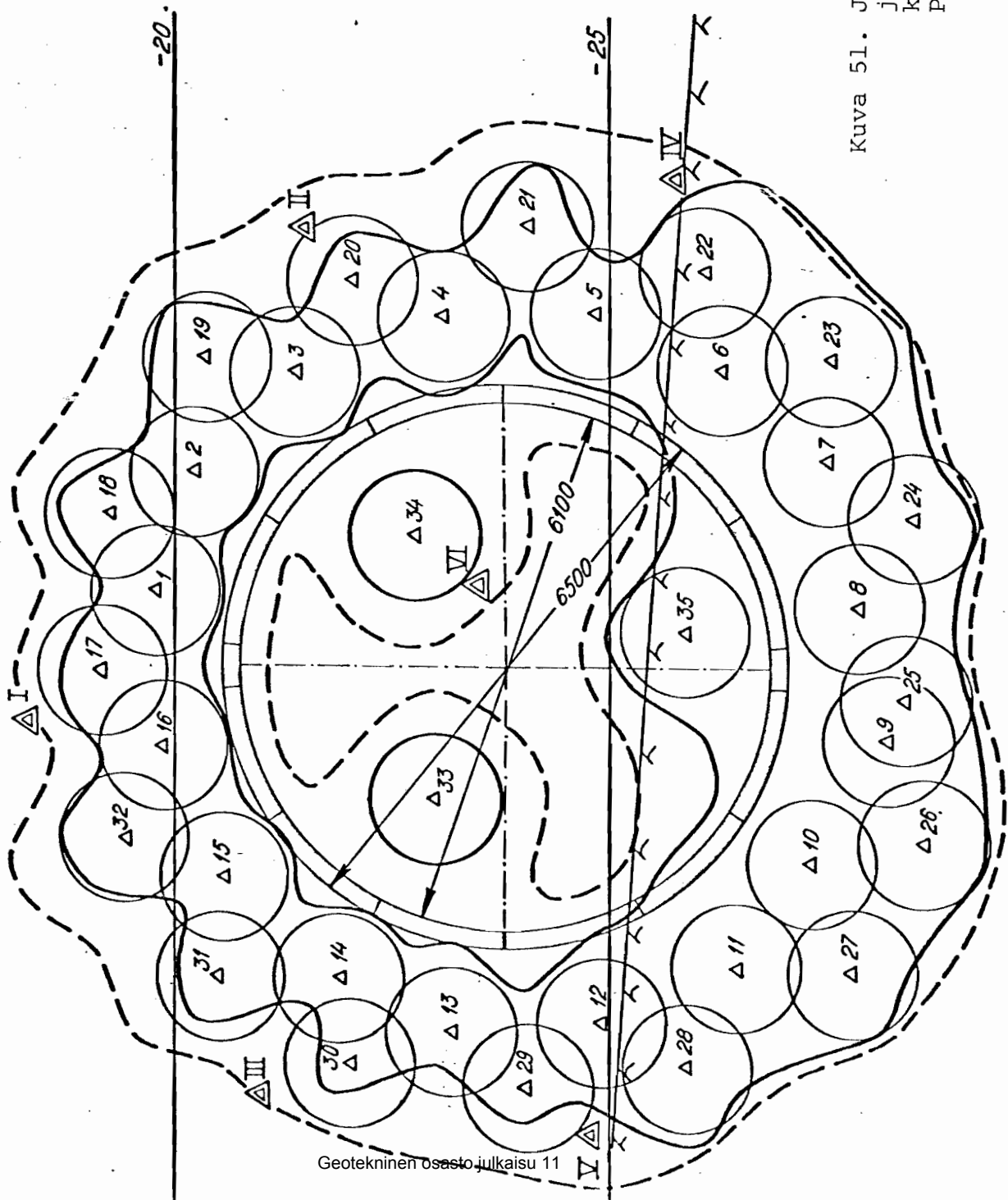
△ LÄMPÖTILAN MITTAUSREIKÄ

△ JÄÄHDYTYSPUTKEN MITATTU ASEMA

— ARVIOITU KALLIONPINNAN KORKEUS

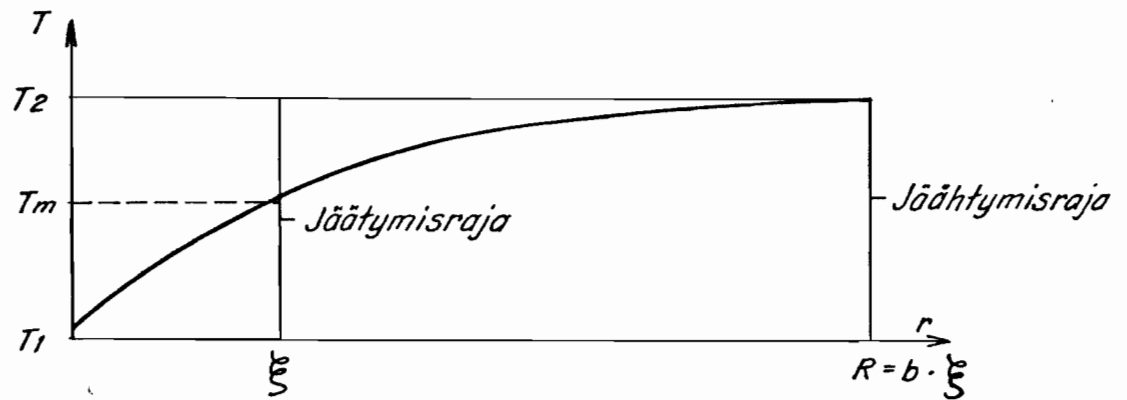
— NOLLAISOTERMIN SUJAINTI 5.8-71

--- NOLLAISOTERMIN SUJAINTI 13.9-71

MITTAKAAVA:

Kuva 51. Jäädätyksen kehitys kluuvien ruu-  
jeessa aktiivijäädätysvaiheen ai-  
kana. Pohjoinen tunneli.  
Poikkileikkaus 58+91,5.





Kuva 52. Lämpötilan jakautuminen jäädytysputkien ympärillä /8/.

Lämpötila jakautuu jäätyneessä maassa seuraavan yhtälön mukaan /8/:

$$T_1 = (T_0 - \frac{T_0 - T_m}{\ln \frac{\xi}{r_0}} \cdot \ln \frac{r}{r_0}), \quad r_0 \leq r \leq \xi \quad (32)$$

Tämä yhtälö noudattaa tasaisen lämpövirtauksen lakeja jäätyneessä maassa /8/:

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dT}{dr} = 0 \quad (33)$$

missä

$T_0$  on putkea vasten oleva maan lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_m$  " sulamispiste ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_1$  " muuttuva lämpötilasuure jäätyneessä maassa (et.riippuva)

$r_0$  " jäädytysputken ulkosäde (m)

$\xi$  " jääsylinterin säde (m)

$r$  " säteensuuntainen koordinaatti (m)

Lämpötilojen  $T$  arvot lasketaan näissä kaavoissa Celsiusasteina käyttäen nollakohtana maan alkuperäistä lämpötilaa. Täten esimerkiksi sulamispiste  $T_m$  on  $8^{\circ}\text{C}$ , jos maan alkuperäinen lämpötila on  $+8^{\circ}\text{C}$  (kuva 56).

Jos oletettaisiin lämpötilan jakautuvan samalla tavalla logaritmisesti myös sulassa maassa, niin  $T_2 \rightarrow \infty$ , kun  $r \rightarrow \infty$ . Todellisuudessa maalla on niin pieni lämmönjohtavuus, että jäädytysputken

vaikutus ei ulotu kovin kauas. Jäädytyskokeilla on havaittu b:n arvon olevan 4,5 - 5,5 yksittäisen jäädytysputken ympärillä.

Lämpötila jakautuu sulassa maassa seuraavan yhtälön mukaan /8/:

$$T_2 = \left[ \frac{T_m}{\ln \frac{\xi}{R}} \cdot \ln \frac{r}{R} \right] \quad (34)$$

missä

$T_2$  on lämpötila sulassa maassa tietyllä etäisyydellä. Maasta poistuva lämmön määrä jääsynteerin säteen ollessa  $\xi$  on seuraava /8/:

$$Q = \pi(1-n) \cdot w \cdot \rho \cdot i \cdot q_s (\xi^2 - r_o^2) + 2 \cdot \pi \cdot c_{k1} \cdot \rho_1 \cdot \int_{r_o}^{\xi} T_1 \cdot r \cdot dr + 2 \cdot \pi \cdot c_{k2} \cdot \rho_2 \cdot \int_{\xi}^R T_2 \cdot r \cdot dr \quad (35)$$

Kun tähän sijoitetaan (32) ja (34) saadaan /8/:

$$Q = \pi(1-n) \cdot w \cdot \rho \cdot i \cdot q_s (\xi^2 - r_o^2) + 2 \cdot \pi \cdot c_{k1} \cdot \rho_1 \cdot \int_{r_o}^{\xi} \left( T_o - \frac{T_o - T_m}{\ln \frac{\xi}{r_o}} \ln \frac{r}{r_o} \right) \cdot r \cdot dr + 2 \cdot \pi \cdot c_{k2} \cdot \rho_2 \cdot \int_{\xi}^R \frac{T_m}{\ln \frac{\xi}{r}} \left( \ln \frac{r}{R} \right) \cdot r \cdot dr \quad (36)$$

ja integroinnin jälkeen /8/:

$$Q = \pi(1-n) \cdot w \cdot \rho \cdot i \cdot q_s (\xi^2 - r_o^2) + 2 \cdot \pi \cdot c_{k1} \cdot \rho_1 \cdot \left[ T_o \cdot \frac{\xi^2 - r_o^2}{2} - \frac{T_o - T_m}{2} \left( \xi^2 - \frac{\xi^2 - r_o^2}{2 \ln \frac{\xi}{r_o}} \right) \right] + \pi \cdot c_{k2} \cdot \rho_2 \cdot \left( \frac{R^2 - \xi^2}{2 \ln \frac{R}{\xi}} - \xi^2 \right) \quad (37)$$

Tästä Q:n yhtälöstä on mahdollista määritellä säteen ja jäätymisajan välinen riippuvuus. Lämpömäärä, joka vapautuu  $\xi$ :n kasvaessa  $d\xi$ :n verran ajassa  $dt$  täytyy kulkea putken vaipan läpi  $(2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot l) / 8$ :

$$dQ = -2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \lambda_1 \left( \frac{\delta T_1}{\delta r} \right)_{r=r_o} \cdot dt \quad (38)$$

$\frac{R}{\xi}$  korvataan  $b$ :llä ja (37) derivoidaan  $\xi$ :n suhteen ja näin saatu yhtälö asetetaan yhtäsuureksi (38) kanssa. Tällöin saadaan /8/:

$$\begin{aligned} & \left\{ 2\pi(1-n) \cdot w \cdot \rho \cdot i \cdot q_s \cdot \xi + 2\pi \cdot c_{k1} \cdot \rho_1 \left[ T_o \cdot \xi - \frac{T_o - T_m}{2} \right. \right. \\ & \left. \left. \left( 2\xi \cdot \frac{\xi}{\ln \frac{\xi}{r_o}} - \frac{\xi^2 - r_o^2}{2\xi \cdot \left( \ln \frac{\xi}{r_o} \right)^2} \right) \right] + 2\pi \cdot c_{k2} \cdot \rho_2 \cdot T_m \cdot \left( \frac{b^2 - 1}{2 \cdot \ln b} - 1 \right) \xi \right\} d\xi \\ & = 2\pi \cdot \lambda_1 \left( \frac{T_o - T_m}{\ln \frac{\xi}{r_o}} \right) dt \end{aligned} \quad (39)$$

Tämän yhtälön molemmat puolet integroidaan, ensimmäinen  $r_o$ :sta  $\xi$ :hin ja toinen nolasta yksöseen. Saadaan /8/:

$$\begin{aligned} & \left[ (1-n) \cdot w \cdot \rho \cdot i \cdot q_s + c_{k2} \cdot \rho_2 \cdot T_m \cdot \left( \frac{b^2 - 1}{2 \cdot \ln b} - 1 \right) \right] \cdot \left( \frac{\xi^2}{2} \ln \frac{\xi}{r_o} - \frac{\xi^2 - r_o^2}{4} \right) \\ & + c_{k1} \cdot \rho_1 (T_o - T_m) \cdot \left( \frac{\xi^2 - r_o^2}{4} \right) - c_{k1} \cdot \rho_1 (T_o - T_m) \cdot \int_{r_o}^{\xi} \frac{\xi^2 - r_o^2}{\xi \cdot 2 \cdot \ln \frac{\xi}{r_o}} \cdot d\xi \\ & = \lambda_1 (T_o - T_m) \cdot t \end{aligned} \quad (40)$$

Merkitään  $z = 2 \cdot \ln \frac{\xi}{r_o}$

Lauseke (40) saa seuraavan muodon /8/:

$$\int_{r_o}^{\xi} \frac{\xi^2 - r_o^2}{\xi \cdot 2 \cdot \ln \frac{\xi}{r_o}} d\xi = \frac{r_o^2}{2} \cdot \int_0^z \frac{e^{\frac{z}{2}} - 1}{z} dz = \frac{r_o^2}{2} \cdot \varphi(z) \quad (41)$$

Tämä voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon /8/:

$$\begin{aligned} t = & \frac{1}{7,2 \cdot \lambda_1 (T_o - T_m)} \cdot \left[ (1-n) \cdot w \cdot \rho \cdot i \cdot q_s + c_{k1} \cdot \rho_1 \cdot T_m + \right. \\ & c_{k2} \cdot \rho_2 \cdot T_m \cdot \left( \frac{b^2 - 1}{2 \cdot \ln b} - 1 \right) \cdot \left( \xi^2 \cdot \ln \frac{\xi}{r_o} - \frac{\xi^2 - r_o^2}{2} \right) + \\ & \left. \frac{c_{k1} \cdot \rho_1}{7,2 \cdot \lambda_1} \cdot \left( \frac{\xi^2 - r_o^2}{2} \right) - \frac{c_{k1} \cdot \rho_1}{7,2 \cdot \lambda_1} \cdot \frac{r_o^2}{2} \cdot \varphi(z) \right] \end{aligned} \quad (42)$$

missä

|             |                                                                 |
|-------------|-----------------------------------------------------------------|
| $t$         | on jäätymisaika tunteina (h)                                    |
| $\lambda_1$ | " lämmön johtavuus jäätyneessä maassa (W/km)                    |
| $\lambda_2$ | " sulaneen maan lämmönjohtavuus (W/km)                          |
| $n$         | " maan huokoisuus murto-osina                                   |
| $w$         | " maan kosteus (paino) murto-osina                              |
| $q_s$       | jään sulamislämpö (kJ/kg)                                       |
| $i$         | " jääpitoisuus so. jäätyneen veden osuus maan vesipitoisuudesta |
| $c_{k1}$    | " jäätyneen maan ominaislämpö (kJ/Kkg)                          |
| $c_{k2}$    | " sulaneen maan ominaislämpö (kJ/Kkg)                           |
| $\rho_1$    | " jäätyneen maan irtotiheys kuivana (kg/m <sup>3</sup> )        |
| $\rho_2$    | " sulaneen maan irtotiheys -"- (kg/m <sup>3</sup> )             |
| $\rho$      | " veden kiintotiheys (kg/m <sup>3</sup> )                       |

Kaavasta 42 voidaan viimeisen integraalin  $\varphi(z)$  sisältävä tekijä jättää pois. Sen pois jättäminen aiheuttaa noin prosentin muutoksen tulokseen /8/.

Lämpötilaeroa  $T_o - T_m$  voidaan pitää jäädytysnesteen absoluuttisena negatiivisena lämpötilana. Chakimovin /8/ tekemien tutkimusten mukaan lämpötila putken lähellä on noin 1,5 - 2° C korkeampi kuin jäädytysputkessa olevan jäädytysnesteen lämpötila.

Kun ryhmä jäädytysreikiä on toiminnassa tulee maksimi-  
arvoksi, jonka  $\xi$  voi saavuttaa  $\xi = 1/2 \cdot l$ , missä  $l$  = jäädytysreikien välinen etäisyys. Kluuvin ruhjeessa jäädytysreikien maksimi-  
etäisyys on noin 2,0 m ulommalla kehällä. Keskimääräinen jäädytysputkien väli Kluuvin ruhjeessa on noin 1,5 m  $\Rightarrow \xi = 0,75$  m (kuva 53). Jäädytysputken säde  $r_o$  on 0,0453 m.

Kluuvin ruhjeessa tunnelin katto-osalla on hiekkaa, jolla on seuraavat ominaisuudet /18/:

|                             |                                         |
|-----------------------------|-----------------------------------------|
| huokoisuus                  | $n = 0,43$                              |
| jäätyneen maan ominaislämpö | $c_{k1} = 1,6 \text{ kJ/kg K}$          |
| sulan maan ominaislämpö     | $c_{k2} = 1,7 \text{ kJ/kg K}$          |
| irtotiheys kuivana          | $\rho_1 = \rho_2 = 1500 \text{ kg/m}^3$ |
| veden kiintotiheys          | $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$            |
| verrannollisuuskerroin      | $b = 3$ (putket vierekkäin /8/)         |

|                                        |                                          |
|----------------------------------------|------------------------------------------|
| lämmön johtavuus jäätyneessä maassa    | $\lambda_1 = 2,3 \text{ W/Km}$ (kuva 54) |
| maan vesipitoisuus                     | $w = 0,28$                               |
| sulamispiste                           | $T_m = 8^\circ \text{ C}$                |
| jäädytysnesteen negatiivinen lämpötila | $T_o - T_m = 21^\circ \text{ C}$         |
| jäätymisaste                           | $i = 1$                                  |
| sulamislämpö                           | $q_s = 335 \text{ kJ/kg}$                |

Ratkaistaan  $t$  yhtälöstä (42). Saadaan  $t = 521 \text{ h} = 22 \text{ d}$ .

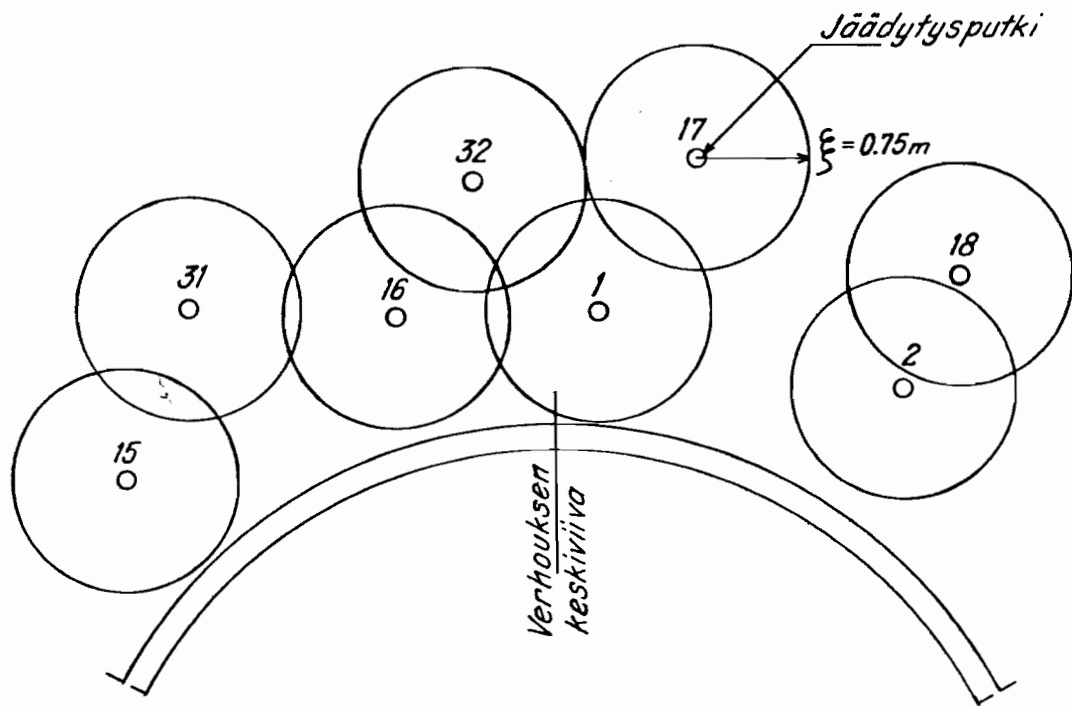
Jääsylvinterit yhtyvät Kluuvin ruhjeessa tämän laskelman perusteella kolmessa viikossa. Jääsylvinterin säde kasvaa siis keskimäärin  $34 \text{ mm/d}$  (kuva 55).

Jos maan lämpökapasiteetti jätetään huomiotta ja oletetaan, että  $i = 1$ , supistuu kaava muotoon /8/:

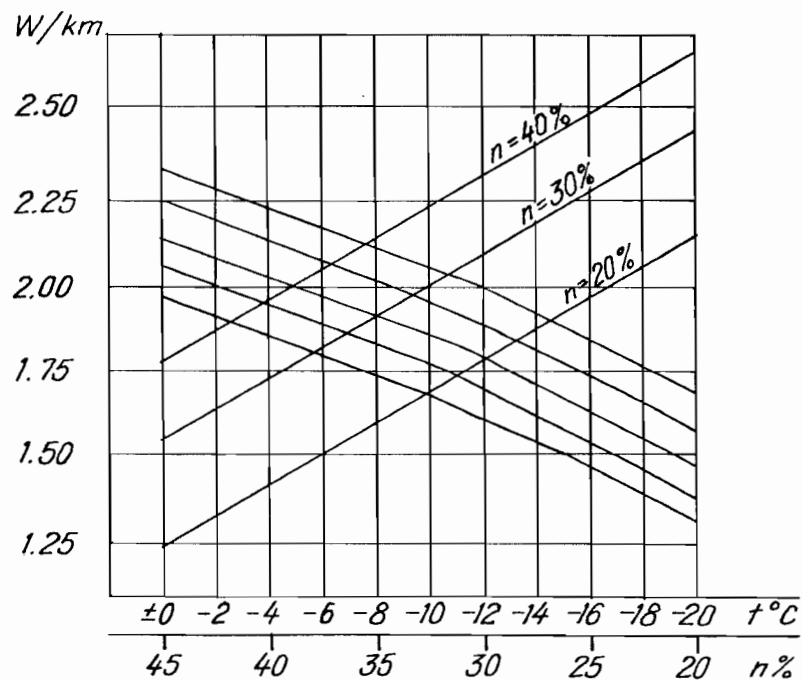
$$t = \frac{(1-n) \cdot w \cdot \rho \cdot q_s}{7,2 \cdot \lambda_1 \cdot (T_o - T_m)} \cdot \left( \xi^2 \cdot \ln \frac{\xi}{r_o} - \frac{\xi^2 - r_o^2}{2} \right) \quad (43)$$

josta saadaan  $t = 200 \text{ h}$ , kun  $\xi = 0,75 \text{ m}$ .

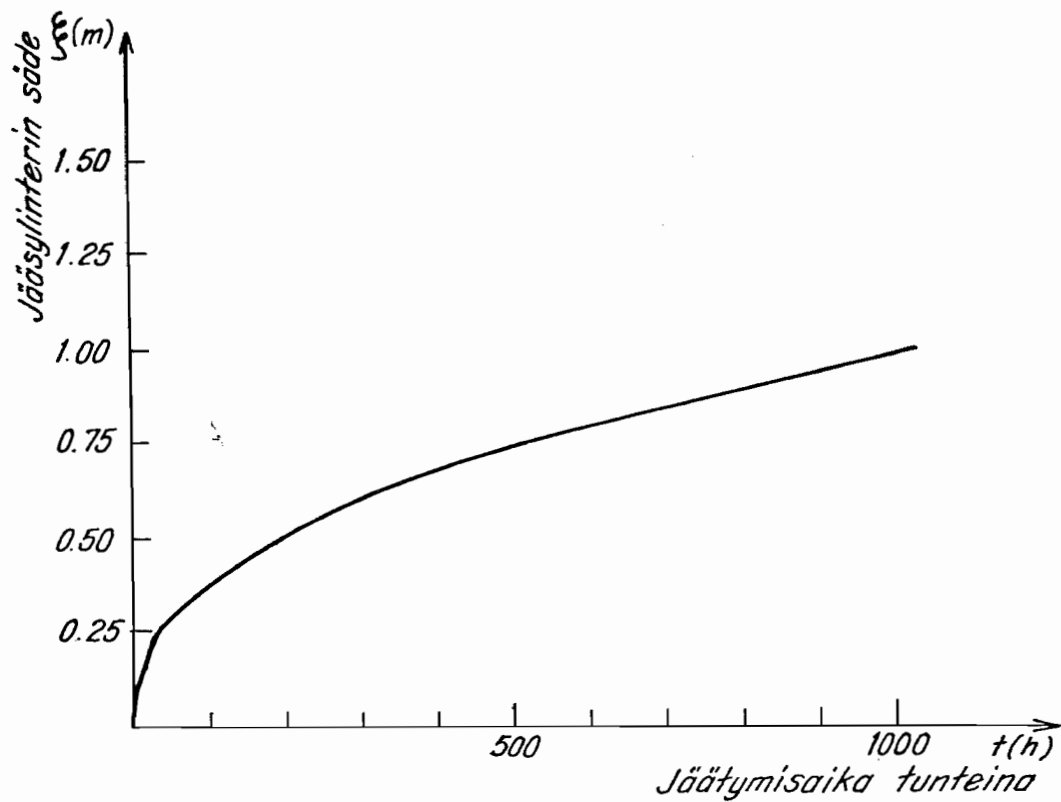
Tämä johtaa väärään tulokseen. Kirjallisuudessa esiintyy useita kaavoja, joissa maan ominaislämpöä ei huomioida.



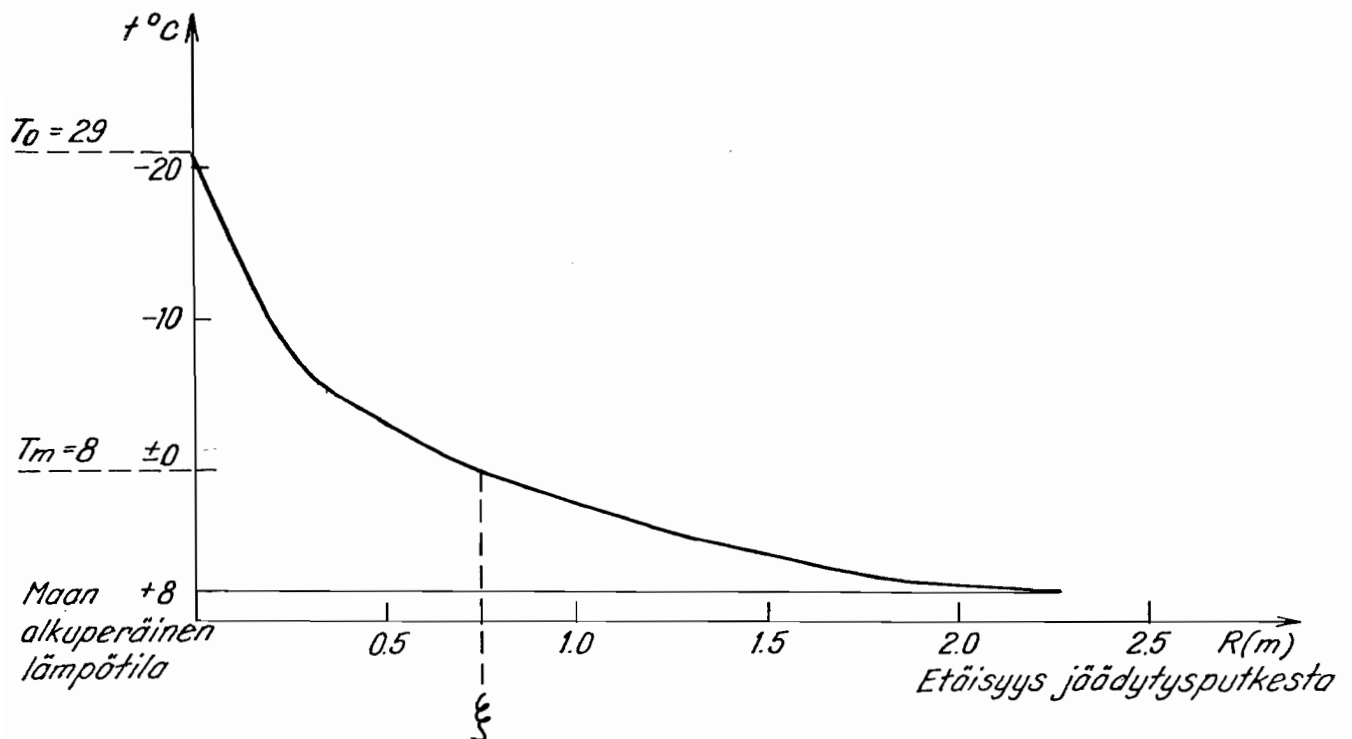
Kuva 53. Jääsylinterien yhtyminen säteen ollessa keskimäärin 0,75 m. Edellisessä laskuesimerkissä on laskettu aika, joka kuluu jääsylinterien yhtymiseen.



Kuva 54. Jäätynneen hiekan lämmönjohtavuus ( $W/Km$ ). Lämmönjohtavuus saadaan nomogramista huokoisuuden ( $n$ ) ja hiekan lämpötilan avulla [17].



Kuva 55. Jääsylinterin kasvu jääsylinterien yhtymishetkeen asti Kluuvin ruhjeen maaosalla Chakimovin menetelmän mukaan.



Kuva 56. Lämpötilajakauma maassa yksittäisen putken ympärillä.

## 6.22

Jäätymisajan määrittäminen sen jälkeen kun jääsyylinterit ovat yhtyneet

Oletetaan, että jäädytysreitit sijaitsevat ympyrän kehällä. Tämän ympyrän säde on  $R$ . Kuoren ulkopuolella tapahtuu jäätymistä alueella  $R_{\xi} > (R_0 + D_0)$  ja kuoren sisäpuolella alueella  $R_{\xi} < (R_0 - D_0)$ . Kuoren ulkopuolisen jäätymisen vaatima lisäaika /8/:

$$t_{lu} = \frac{1}{7,2 \cdot \lambda_1 (T_0 - T_m)} \left[ (1-n) \cdot w \cdot \rho \cdot i \cdot q_s + c_{k1} \cdot \rho_1 \cdot T_m + c_{k2} \cdot \rho_2 \cdot T_m \cdot \left( \frac{b^2 - 1}{2 \ln b} - 1 \right) \right] \cdot \left[ R_{\xi}^2 \ln \frac{R_{\xi}}{R_0 + D_0} - \frac{R_{\xi}^2 - (R_0 + D_0)^2}{2} \right] + \frac{c_{k1} \cdot \rho_1}{7,2 \cdot \lambda_1} \cdot \frac{R_{\xi}^2 - (R_0 + D_0)^2}{2} \quad (44)$$

Kuoren sisäpuolisen jäätymisen vaatima lisäaika /8/:

$$t_{ls} = \frac{1}{7,2 \cdot \lambda_1 (T_0 - T_m)} \left[ (1-n) \cdot w \cdot \rho \cdot i \cdot q_s + c_{k1} \cdot \rho_1 \cdot T_m + c_{k2} \cdot \rho_2 \cdot T_m \cdot \left( \frac{b^2 - 1}{2 \ln b} - 1 \right) \right] \cdot \left[ R_{\xi}^2 \ln \frac{R_{\xi}}{R_0 - D_0} - \frac{R_{\xi}^2 - (R_0 - D_0)^2}{2} \right] + \frac{c_{k1} \cdot \rho_1}{7,2 \cdot \lambda_1} \cdot \frac{R_{\xi}^2 - (R_0 - D_0)^2}{2} \quad (45)$$

missä

$t_l$  on lisäaika, joka kuluu  $\xi$ -säteisten jääsyylinterien yhtymisestä  $R$ -säteisen jääseinämän syntyyn

$2 \cdot D_0$  " jääsyylinterin paksuus

$R_0$  " jäädytysputken etäisyys ympyrän keskipisteestä

$R_{\xi}$  " säteen suuntainen koordinaatti

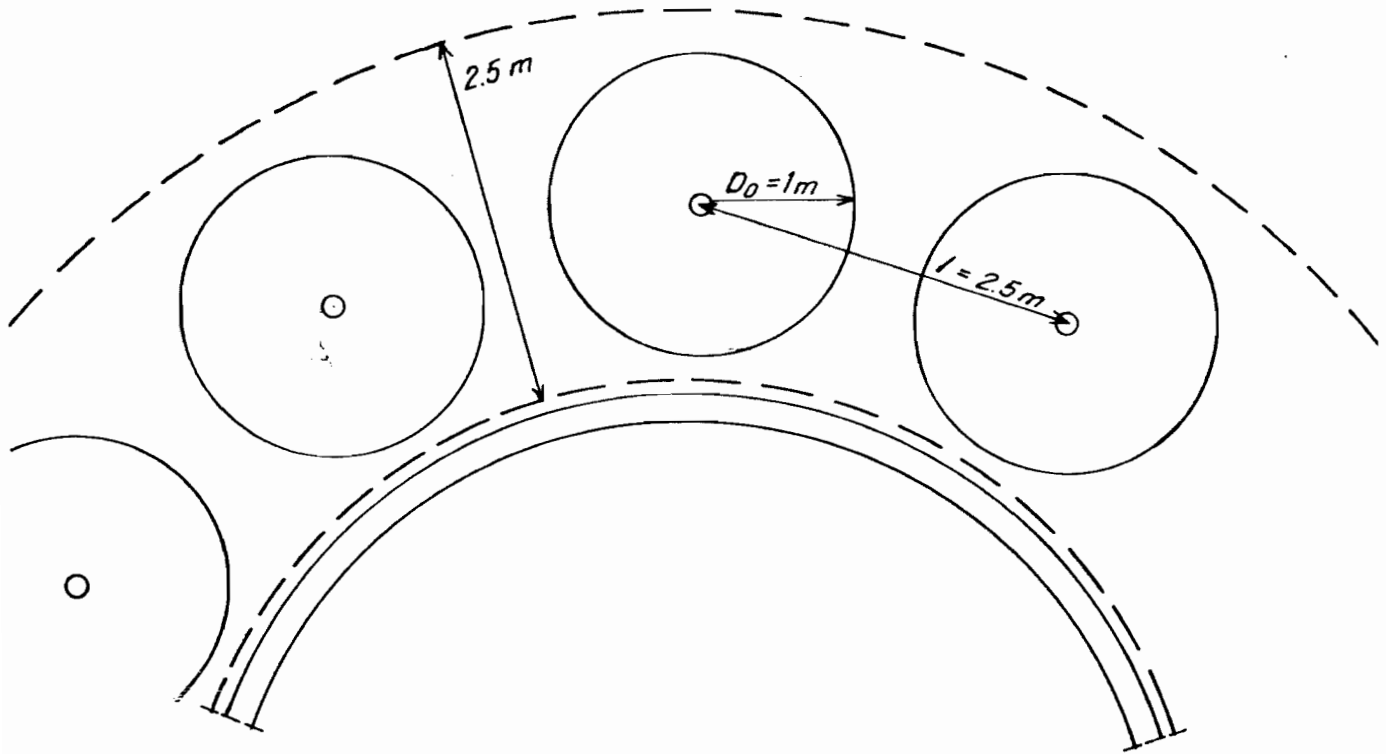
$N$  " jäädytysputkien lukumäärä

$C$  " niiden välinen etäisyys

$2 D_0$  saadaan yhtälöstä /8/:

$$2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot 2 D_0 = \frac{\pi \cdot l^2}{4} \cdot N \Rightarrow D_0 = \frac{N \cdot l^2}{16 \cdot R_0} \quad (46)$$





Kuva 57. Kuva jääkuoresta seuraavaa laskuesimerkkiä varten. Lasketaan aika, joka kuluu yksittäisten jääsylinterien yhtymisestä 2,5 m paksuisen jääkuoren muodostumiseen.

Esimerkkinä lasketaan aika, joka kuluu 2,5 m paksuisen jääseinämän muodostumiseen hiekkamaajissa yksittäisten sylinterien yhtymishetkestä alkaen (kuva 57).

$l = 2,5 \text{ m}$  (jäädytysreikien välinen etäisyys)

$T_o - T_m = 21^{\circ} \text{ C}$

$T_m = 8^{\circ} \text{ C}$

$w = 0,28$

$\rho_1 = \rho_2 = 1500 \text{ kg/m}^3$

$b = 3$  (putket vierekkäin /8/)

$R_o = 4,5$

$R_f = 5,75 \text{ m (ulko)}; R = 3,25 \text{ m (sisä)}$

$D_o = 1 \text{ m}$

$N = 11 \text{ kpl}$

$t_{lu} = 227 \text{ h} \approx 9,5 \text{ d}$

$t_{ls} = 150 \text{ h} \approx 6 \text{ d}$

Tästä huomataan, että jäätyminen tapahtuu nopeammin sisäpuolella kehää. Neuvostoliiton jäädytysohjeissa lasketaankin jääkuoren jakauma siten, että 60 % jään paksuudesta on jäädytysputkien muodostaman kehän sisäpuolella ja 40 % ulkopuolella /15/.

Tarkempiakin menetelmiä jääsylinterin muodostamisen laskemiselle on, mutta ne ovat yleensä matemaattisesti monimutkaisempia. Tarkassa matemaattisesti oikeassa ratkaisussa on reunaehtona  $R \rightarrow \infty$ . Siis jäädytysputken kylmentävä vaikutus ulottuu äärettömään. Chakimovin menetelmässä taas lähdettiin siitä, että jäädytysputken lämpöä alentava vaikutus ei ulotu kauemmaksi kuin noin 4,5 - 5,5 . Käytännössä tällä etäisyydellä ei enää havaita mitattavia lämpötilaeroja, jos mittaus-tarkkuus on  $\pm 0,2^\circ \text{C}$  /8/.

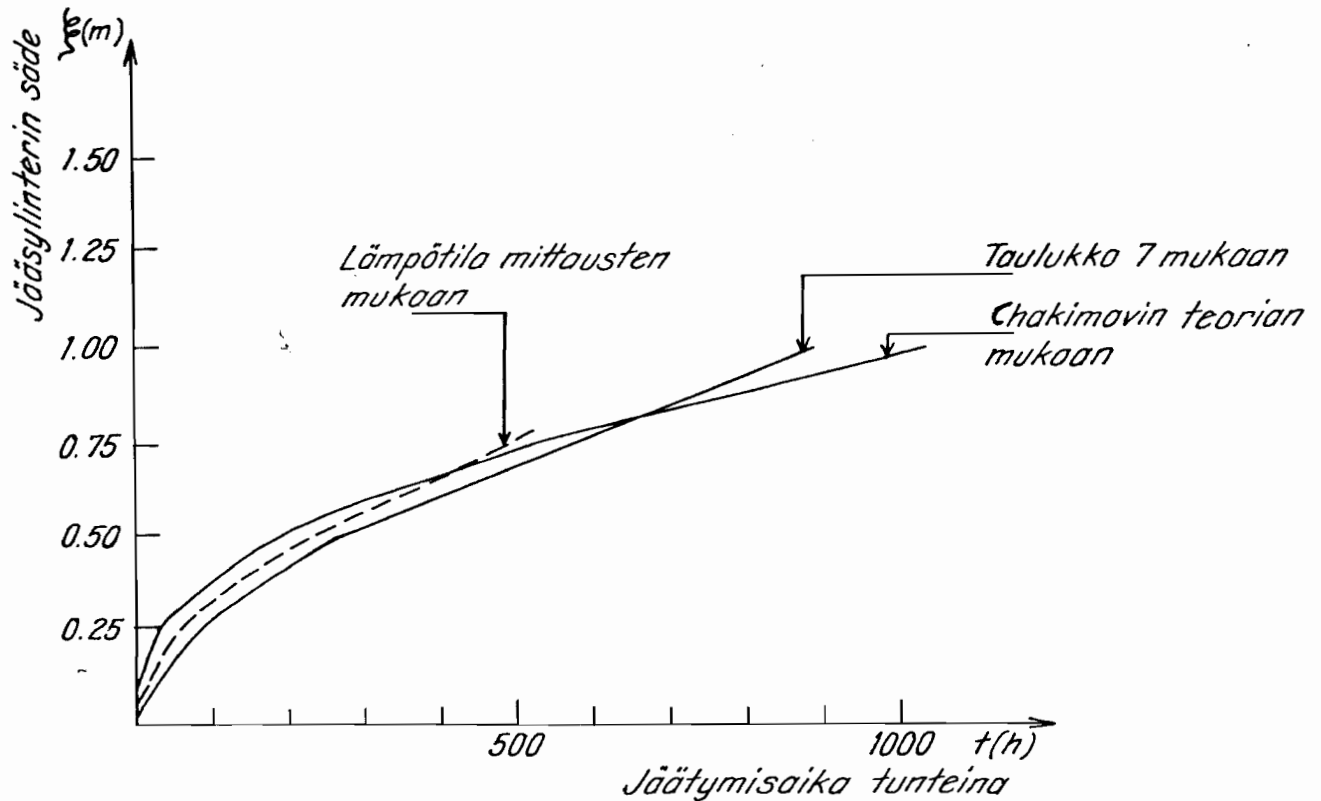
Taulukossa 7 on esitetty maalajeittain jääsylinterin muodostumisen keskimääräinen nopeus /15/. Nämä arvot perustuvat Neuvostoliitossa jäädytystöistä saatuihin kokemuksiin. Esimerkiksi halkaisijaltaan 1,5 m jääsylinterin säteen keskimääräinen kehittymisnopeus on hiekkamaalajissa 32 mm/vrk. Tämä merkitsee 24 d jäätymisaikaa. Hiekkamoreenille jäätymisnopeus on melkein sama, 31 mm/vrk. Kylmäaineen lämpötilaksi jäädytysputken ulkoseinämällä on oletettu  $-22^\circ \text{C}$ , mikä pätee Kluuvin ruhjeessa.

#### Taulukko 7.

Jääsylinterin säteen kasvu (mm/d) yhtymishetkeen asti jäätyksen edistytessä /15/.

| Jääsylinterin halkaisija (m) | Hiekka mm/d | Hiekkamoreeni mm/d | Savi mm/d |
|------------------------------|-------------|--------------------|-----------|
| 0,5                          | 62          | 53                 | 28        |
| 1,0                          | 47          | 42                 | 22        |
| 1,5                          | 32          | 31                 | 18        |
| 2,0                          | 27          | 23                 | 14        |
| 2,5                          | 23          | 17                 | -         |
| 3,0                          | 20          | 15                 | -         |

Kuvassa 58 on vertailtu jäätymisaikaa Kluuvin ruhjeen olosuhteissa teoreettisten laskelmien ja lämpötilamittausten välillä. Kuvasta huomataan, että Chakimovin menetelmä antaa ainakin tässä esimerkitapauksessa melko hyviä tuloksia. Neuvostoliiton jäädytysohjeet (taulukko 7) korreloivat myös melko hyvin mittaustulosten kanssa.



Kuva 58. Jääsylinterin kasvu Kluuvin ruhjessa (hHk) jääsylinterien yhtymishetkeen asti eri menetelmillä.

### 6.3

#### Jääkuoren muodostumisen aiheuttamat siirtymät maassa

Täysin vedellä kyllästetyn maan jäätyessä jäätyneestä maasta purkautuu vettä. Maassa, jonka vedenläpäisevyys on hyvin pieni, vesi ei pääse purkautumaan ja aiheuttaa painetta.

Paine  $p$  syntyy jääsylinterin pinnalla veden jäätymislaajenemisen seurauksena. Jäätyneen maan puristuslujuus on kymmeniä kertoja suurempi kuin sulan maan, joten paine aiheuttaa purkautuessaan siirtymiä jääsylinterin säteen suunnassa.

Kriittinen vedenläpäisevyyden arvo, jolloin hiekkamaalaji häiriytyy jäätyessään saadaan kaavasta /8/:

$$K_0 = \frac{n \cdot b}{1 \left( 2 \cdot A \cdot \ln \frac{\xi}{r_0} + B \right) \cdot \xi} \quad (47)$$

missä

$$I = H/L + H$$

H on vettäjohtavan kerroksen paksuus

L " lyhin tie vapaaseen vesipintaan  
(esim. talon kellaripumppaamo)

$K_{\phi}$  " kriittinen vedenläpäisevyyskerroin

$$B = \frac{c_{k1} \cdot \rho_1}{7,2 \cdot \lambda_1} \quad \text{kerroin (h/m}^2\text{)} \quad (48)$$

$$A = \frac{1}{7,2 \cdot \lambda_1 (T_o - T_m)} \left[ (1-n) \cdot w \cdot \rho_s \cdot q_s + c_{k1} \cdot \rho_1 \cdot T_m + c_{k2} \cdot \rho_2 \cdot T_m \left( \frac{b^2 - 1}{2 \ln b} - 1 \right) \right] \quad (49)$$

Jäätymisnopeus on suurin kun  $\xi = r_o$ . Koska maa on häiriytynyt putkia asennettaessa, otetaan kuitenkin  $\xi = 2 \cdot r_o$ . Tällöin jäätymisen aiheuttama paine on suurimmillaan.

Esimerkkinä lasketaan kriittinen veden läpäisevyysarvo.

|                                                                         |                               |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| huokoisuus                                                              | $n = 0,43$                    |
| verrannollisuuskerroin                                                  | $b = 3$                       |
| suhde                                                                   | $I = \frac{5}{150+5} = 0,032$ |
| kerroin                                                                 | $A = 365 \text{ h/m}^2$       |
| kerroin                                                                 | $B = 145 \text{ h/m}^2$       |
| jääsylinterin säde                                                      | $\xi = 0,087 \text{ m}$       |
| mistä seuraa $K_{\phi} = 0,7 \text{ m/h} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ |                               |

Kluuvin ruhjeessa hiekkojen ja moreenin vedenläpäisevyysarvot ovat alle  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ . Täten maalajit tulevat häiriytymään jonkin verran jäätyessään.

Oletetaan, että yhden metrin korkuinen ja  $\xi$ -säteinen jääsylinteri on maan alla. Tällöin voidaan laskea säteen suuntainen siirtymä kaavalla /8/:

$$\delta = \rho(\xi - \delta) \left\{ \frac{1}{E_2} \left[ \frac{C^2 + (\xi - \delta)^2}{C^2 - (\xi - \delta)^2} + \nu_2 \right] + \frac{1}{E_1} \left[ \frac{(\xi - \delta)^2 + r_o^2}{(\xi - \delta)^2 - r_o^2} - \nu_1 \right] \right\} \quad (50)$$

missä

$\delta$  on säteen suuntainen siirtymä

$p$  " paine jäätymisrintamassa

$\xi$  " jääsylinterin säde

$r_0$  " jäädytysputken ulkosäde

$v_1$  ja  $v_2$  " jäätyneen ja sulan maan Poissonin luvut

$E_1$  ja  $E_2$  " jäätyneen ja sulan maan kimmokertoimet

$C$  " etäisyys, jossa paine  $p$  lakkaa vaikuttamasta.

Termi  $(\xi - \delta)^2$  voidaan jättää huomiotta, koska sillä on vähäinen vaikutus lopputulokseen.

Täten saadaan /8/:

$$p = \frac{E_2 [(\xi - \delta)^2 - r_0^2] \cdot \delta}{(\xi - \delta) \left\{ (1 + v_2) [(\xi - \delta)^2 - r_0^2] + \frac{E_2}{E_1} [(\xi - \delta)^2 + r_0^2] - v_1 \frac{E_2}{E_1} [(\xi - \delta)^2 - r_0^2] \right\}} \quad (51)$$

Tuntemattomat tässä yhtälössä ovat  $p$  ja  $\delta$ . Tässä sovellutuksessa pystysuoran liikkeen puuttuessa voidaan jättää huomiotta maan raerungon tilavuuden muutos lämpötilan muuttuessa ja täten kirjoittaa /8/:

$$\pi \cdot [(\xi + \delta_1)^2 - \xi^2] \cdot H = \pi (\xi^2 - r_0^2) \cdot H \cdot v \cdot \alpha \cdot i \quad (52)$$

Jos jätetään  $r_0^2$  tekijä pois pienen vaikutuksensa johdosta saadaan /8/:

$$\delta_1 = \left( -1 + \sqrt{1 + n \cdot \alpha \cdot i} \right) \cdot \xi \quad (53)$$

missä

$n$  on maan huokoisuus

$i$  " jäisyys (murto-osina)

$\alpha$  " veden laajenemiskerroin jäätymisprosessissa.

Tämä kaava antaa säteen suuntaisen muodonmuutoksen, kun ei oteta huomioon sulan maan liikevastusta.

Koska jäätyneen maan puristuslujuus on huomattavasti suurempi kuin sulan maan, voidaan olettaa

$\delta_1 \approx \delta$  . Jäätyvän maasyylinterin säteen suuntainen muodonmuutos saadaan kaavasta 53, jolloin Kluuvin ruhjeen jäädytykselle saadaan sijoittamalla:

$$\begin{aligned}\xi &= 0,75 \text{ m} \\ i &= 1,0 \\ \alpha &= 0,091 / 8 / \\ n &= 0,43\end{aligned}$$

mistä seuraa  $\delta = 0,0145 \text{ m} = 15 \text{ mm}$

Jäädytysputken säde  $r_0$  on yleensä hyvin pieni verrattuna jääsyylinterin säteeseen  $\xi$  . Jos jäädytysputken läpimitan vaikutus jätetään huomiotta, saadaan kaava 51 yksinkertaistettua muotoon /8/:

$$p = \frac{E_2 \cdot \delta}{(\xi - \delta) \cdot \left[ 1 + \nu_2 + \frac{E_2(1 - \nu_1)}{E_1} \right]} \quad (54)$$

Sijoittamalla edellä laskettu siirtymä 8-15 mm kaavaan 54 saadaan  $p = 0,038 \text{ MN/m}^2 = 38 \text{ KN/m}^2$ , kun

$$\begin{aligned}E_2 &= 2,5 \text{ MN/m}^2 \text{ (silttinen hiekka)} \\ E_1 &= 100 \text{ MN/m}^2 \\ \nu_1 &= 0,4 \\ \nu_2 &= 0,3 \\ \delta &= 15 \text{ mm}\end{aligned}$$

Maan liikevastus pienentää jonkin verran siirtymän arvoa. Kluuvin ruhjeen silttikerroksissa tunnelin katto-osalla voisi teoreettisesti syntyä noin sentin siirtymä maassa ylöspäin jääkuoren muodostumisen seurauksena. Tämä riippuu paljon maalajin vedenläpäisevyydestä. Mahdolliset routanousut tapahtuvat tämän liikkeen lisäksi.

## 6.4

### Jääkuoren vahvuuden määrittäminen

#### 6.41

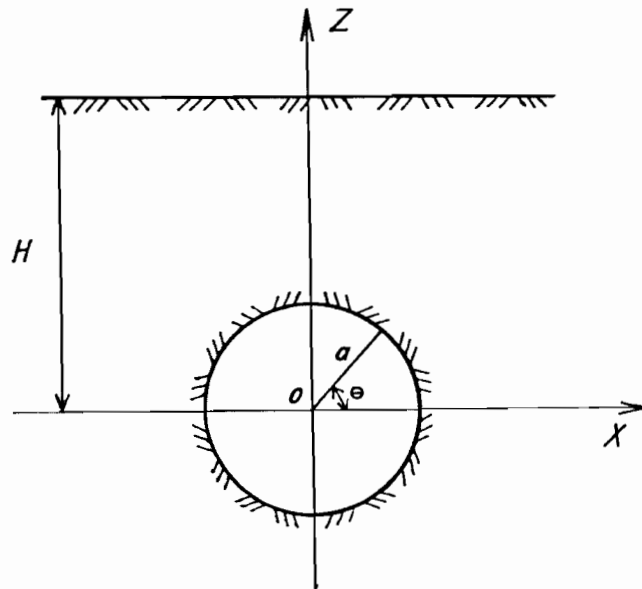
#### Laskentaperusteet

Kluuvin ruhjeen tunneleihin valittiin 2,5 metrin paksuinen jääkuori tunnelin rakennusaikaiseksi suojaksi. Neuvostoliittolaisen jäädytysasiantuntijan mukaan yhden metrin paksuinen jääkuori kestää tunnelitasolla vallitsevan maa- ja vesipaineen. Kahden ja puolen metrin paksuiseen holviin on päädytty, koska räjäytyksistä aiheutuvat dynaamiset kuormat ovat melko suuret.

Jääholvin käyttäytymistä kuormituksen alaisena voidaan tarkastella esimerkiksi Morganin teorian

pohjalta (kuva 59) /9/.

Tässä teoriassa tunneli on elastisessa aineessa. Kuormituksena on maan- ja vedenpaine (kuva 61). Vedenpaineen oletetaan vaikuttavan kaikkialla tasaisesti samansuuruisena kuin tunnelin keskiakselilla. Maanpaineen oletetaan vaikuttavan radiaalisesti. Tässä menetelmässä on tangentiaaliset kuormat jätetty pois, mikä aiheuttaa jonkin verran liian pieniä arvoja momentille.



Kuva 59. Tunneli karteesisissa- ja polaarikoordinaatistossa /9/.

Maanpaine aiheuttaa sekä taivutusmomenttia että normaalivoimaa. Vedenpaine aiheuttaa ainoastaan normaalivoimaa. Maanpaineena on radiaalikuormitus  $p = (p_0/2) (1 - \cos 2\theta)$  /9/. Muodonmuutoksen otaksutaan tapahtuvan elliptisesti (kuva 60).

#### 6.42

Laskenta Morganin menetelmällä

Maanpaineeksi tunnelitasolla saadaan:

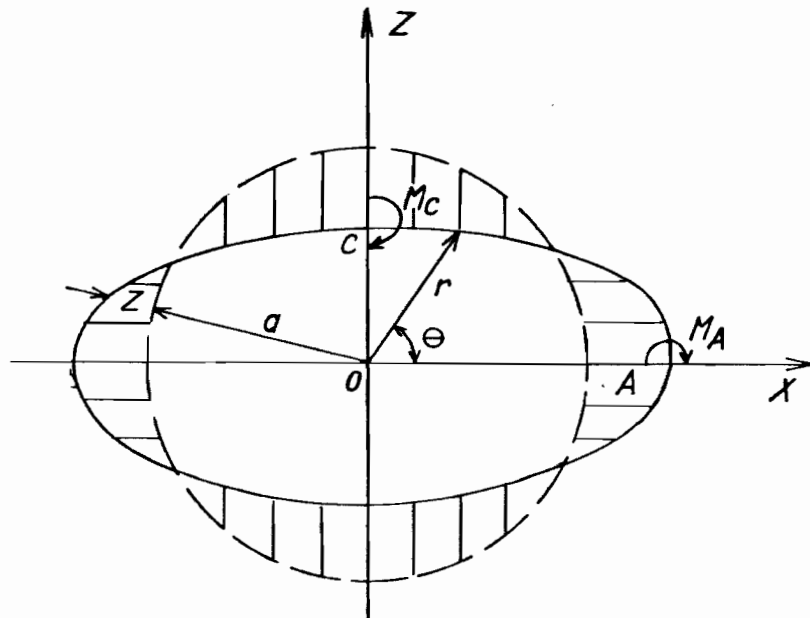
$$p_0(-24,00) = 2,0 \cdot 18,8 + 2,0 \cdot 9,4 + 12 \cdot 7,5 + 10 \cdot 11,0 = 256,4 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vedenpaineeksi tulee } p_w(-24,00) = 240 \text{ kN/m}^2$$

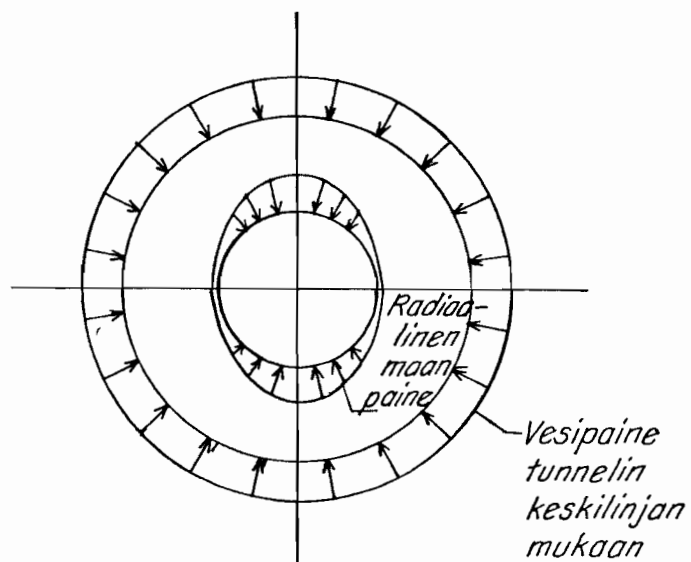
Vedenpaineesta aiheutuu jääkuorelle normaalivoima:

$$N_A = N_C = P_w \cdot a = 240 \cdot 3,25 = 780 \text{ kN/m}^2$$

Tunnelin jääkuorta käsitellään laskelmissa yhden metrin levyisenä kappaleena.



Kuva 60. Elliptinen muodonmuutos /9/.



Kuva 61. Kuormitusotaksumat /9/.



Maanpaineen vaikutuksesta syntyvä momentti, normaalivoima ja siirtymä saadaan Morganin mukaan /9/:

$$\text{Momentti } M_A = -M_C = \frac{p_o \cdot a^2 \cdot EI \cdot (1 + \nu)}{6 \cdot EI \cdot (1 + \nu) + 2 \cdot a^3 \cdot E_m} \quad (55)$$

$$\text{Normaalivoima } N_A = (2/3) \cdot p_o \cdot a + 2 \cdot \frac{E_m \cdot p_o \cdot a^4}{18 \cdot EI \cdot (1 + \nu) + 6 \cdot a^3 \cdot E_m} \quad (56)$$

$$\text{Normaalivoima } N_C = (1/3) \cdot p_o \cdot a + 4 \cdot \frac{E_m \cdot p_o \cdot a^4}{18 \cdot EI \cdot (1 + \nu) + 6 \cdot a^3 \cdot E_m} \quad (57)$$

$$\text{Siirtymä } \delta_A = -\delta_C = \frac{M_A \cdot a^2}{3EI} \quad (58)$$

$$\text{Kuoren hitausmomentti } I = B \cdot H^3/12.$$

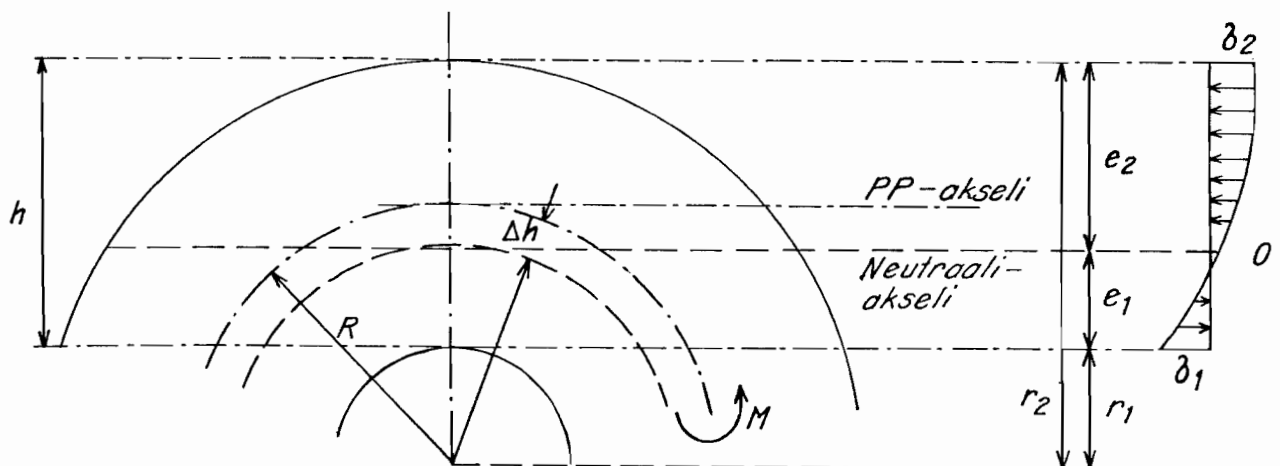
Esimerkkilaskelmassa käytetään jääkuoren paksuutena 2,5 m.

Oletetaan jäätyneen maan kimmomoduuliksi 160000 kN/m<sup>2</sup> ja sulan maan kimmomoduuliksi 20000 kN/m<sup>2</sup> /19/.

$$a = 3,25 \text{ m}, \nu = 0,3333, I = 1,3 \text{ m}^4, EI = 208000 \text{ kN/m}^2$$

saadaan:

|               |                                         |
|---------------|-----------------------------------------|
| Momentti      | $M_A = -M_C = 247 \text{ kN/m}^2$       |
| Normaalivoima | $N_A = 1560 \text{ kN/m}$               |
| Normaalivoima | $N_C = 1523 \text{ kN/m}$               |
| Siirtymä      | $\delta_A = -\delta_C = 4,2 \text{ mm}$ |



Kuva 62. Neutraaliakselin sijainti käyräviivaisessa pal-kissa /12/.

Käyräviivaisen palkin jännityksen jakauma on hyperboolinen, jos oletetaan Bernoullin otaksuman pitävän paikkansa (kuva 62). Jännitykset jääkuoren ulko- ja sisäpinnassa lasketaan seuraavista kaavoista/12/:

$$\sigma_1 = \frac{M \cdot e_1}{A \cdot \Delta h \cdot r_1} \quad \sigma_2 = - \frac{M \cdot e_2}{A \cdot \Delta h \cdot r_2} \quad (59)$$

Käyräviivaisen palkin neutraaliakseli eroaa painopisteakselista  $\Delta h$ :n verran. Suorakaidepoikkeileikkaukselle saadaan /12/:

$$\Delta h = h^2 / (12 \cdot R) \quad (60)$$

Jos  $H = 2,5$  m, niin momentista aiheutuvat jännitykset ovat:

$$\sigma_1 = -297 \text{ kN/m}^2 \text{ ja } \sigma_2 = 202 \text{ kN/m}^2.$$

Normaalivoimasta aiheutuva jännitys on  $\sigma = N/A$ .

Kun jännitys palkissa on  $\sigma = N/A \pm M/W$ , saadaan jännityksiksi jääkuoren sivuilla

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 786 \text{ kN/m}^2 \text{ ja } \sigma_2 = 287 \text{ kN/m}^2 \text{ ja keskipisteessä} \\ \sigma_1 &= 227 \text{ " ja } \sigma_2 = 726 \text{ "} \end{aligned}$$

Jääkuoren muodonmuutosten ja lujuuden tarkastelu suoritettiin tietokoneella. Kuvassa 63 on esitetty tietokoneohjelman kulkukaavio.

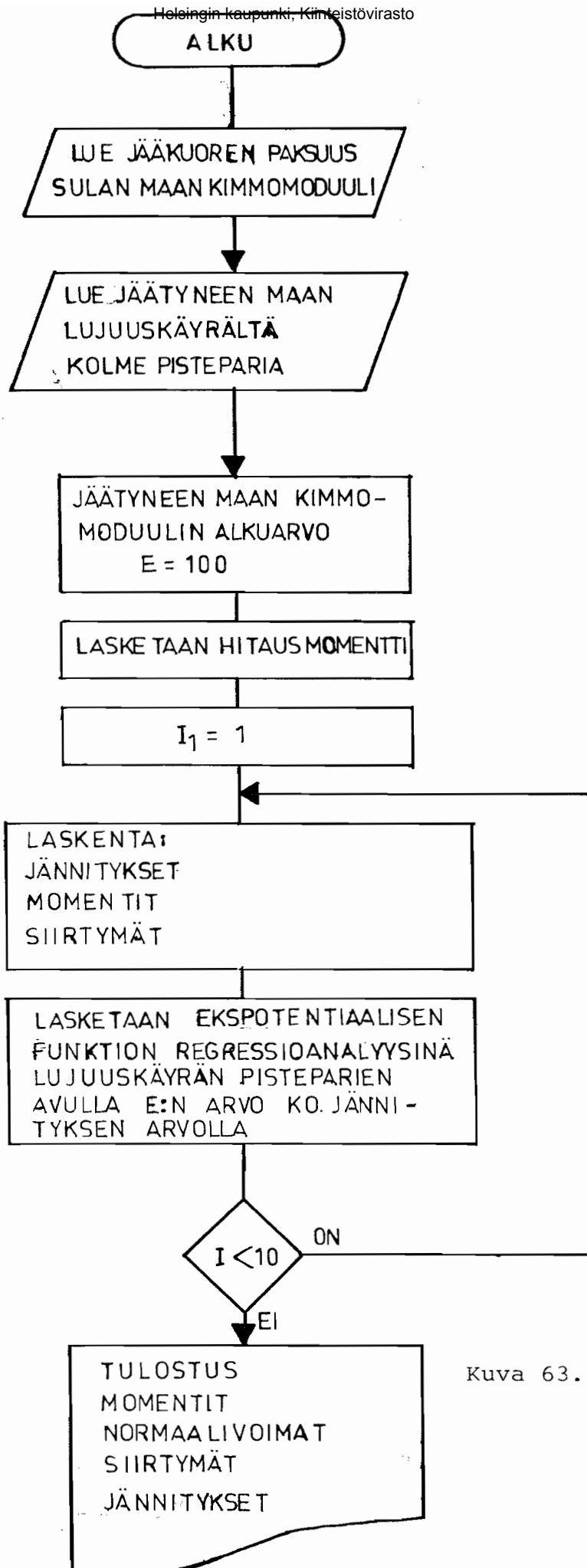
Ohjelmassa Morganin menetelmällä saatu momentti kerrotaan kokemukseräisellä kertoimella 1,5. Tämä johtuu siitä, että Morganin kuormitusotaksumissa ei huomioida tangentiaalikuormia.

Jäätäneen maan jännitys ja muodonmuutoskäyrä on syötetty tietokoneelle pisteinä. Ohjelma laskee jääkuoressa vallitsevat jännitykset iteroimalla 10 kertaa. Joka kierroksella lasketaan edellisen kierroksen maksimijännitystä vastaava kimmomoduuli käyrän tangenttina.

#### 6.43

##### Jääkuoren lujuusominaisuudet

Jääkuoren keskilämpötila passiivijäädytyksen aikana oli maaosuudella hieman alle  $-10^\circ \text{C}$ . VTT suoritti kokeita jäätäneestä maasta kolmiaksiaalilaitteilla. Laboratoriokokeita suoritettiin kolmessa eri lämpötilassa. Näistä kokeista  $-12^\circ \text{C}$  lämpötilassa suoritettut kokeet vastaavat parhaiten passiivijäädytyksen aikana vallinneita olosuhteita. Korkeammassa lämpötiloissa  $-8^\circ \text{C}$  ja  $-3^\circ \text{C}$  suoritettut kokeet antavat kuvaa jääkuoren lujuudesta sulamisvaiheessa.



Kuva 63. Lohkokaavio jää-  
tyneen maan lu-  
juuslaskelmista.

Hienon hiekan hetkelliseksi puristuslujuudeksi saatiin  $3,7 \text{ MN/m}^2$ , kun koelämpötila oli  $-12^\circ \text{C}$  ja sivupaine  $240 \text{ kN/m}^2$ . Hetkellinen puristuslujuus oli  $-8^\circ \text{C}$  lämpötilassa  $2,2 \text{ MN/m}^2$  ja  $-3^\circ \text{C}$  lämpötilassa  $1,5 \text{ MN/m}^2$ . Hienon hiekan lujuusominaisuudet ovat tärkeimmät tunnelin maaosuutta tarkasteltaessa. Pohjoisen tunnelin maaosuuden katto-osa on melkein kokonaan silttiä ja hienoa hiekkaa. Pitkäaikaislujuus on tärkeämpi kuin hetkellinen lujuus. Se on noin 50 % hetkellisestä lujuudesta /1/.

Neuvostoliittolaisissa jäädytysohjeissa käytetään suunnittelulujuutena noin neljäsosaa hetkellisestä lujuudesta /1/. Koemäärittelystä johtuen käytämme tässä näissä laskelmissa suunnittelujuutena kolmasosaa hetkellisestä lujuudesta. Tämä johtuu siitä, että VTT:n tekemissä kolmiaksiaalikokeissa näytteiden leikkausnopeus oli suhteellisen hidas. Neuvostoliitossa jäädytetyn maan puristuskokeet on tehty suuremmalla nopeudella. Tällöin saadaan suurempia lujuusarvoja. Varmuuskertoimen 1,5 pitkäaikaiseen lujuuteen verrattuna on Kluuvin ruhjeen tilanteessa riittävä suunnitteluperuste, koska jääkuori oli rakentamisen aikana vain lyhyen osan kerrallaan näkyvissä. Taulukossa 8 on esitetty lujuusarvot hienolle hiekalle eri lämpötiloissa /18/.

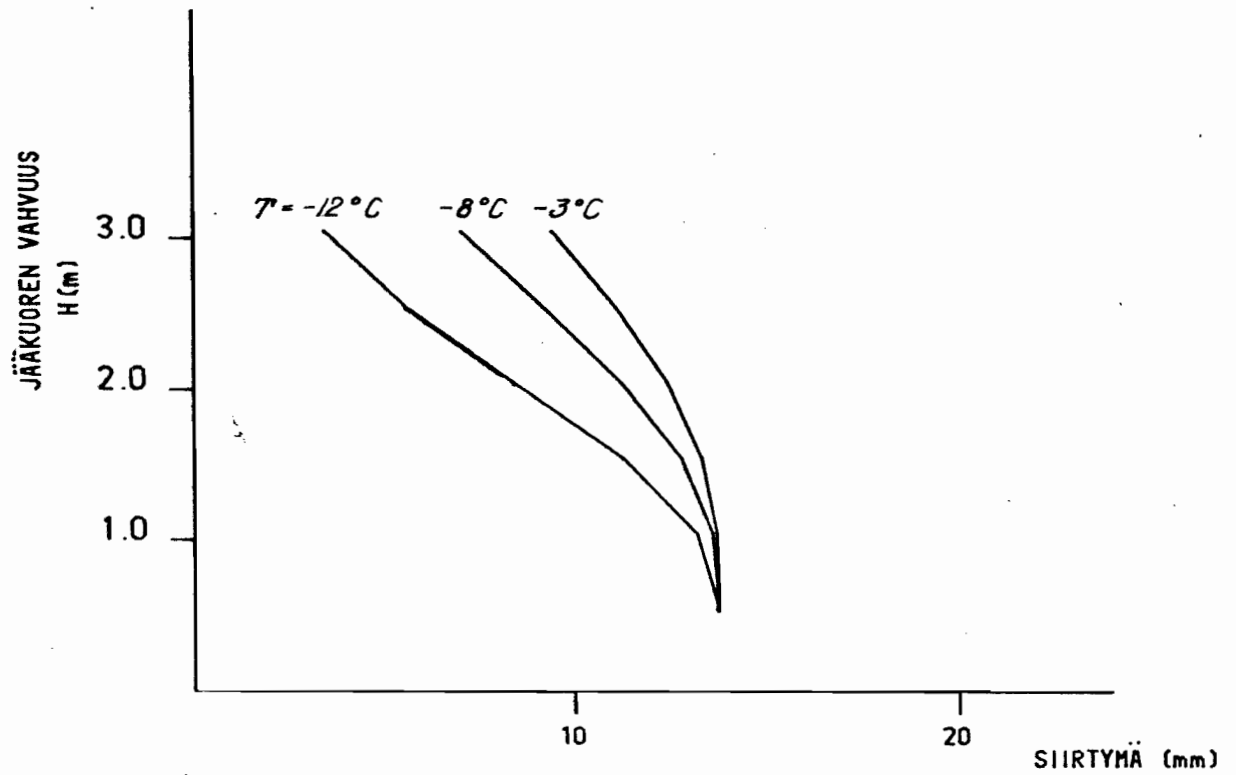
Taulukko 8. Hienon hiekan lujuusarvot eri lämpötiloissa, kun  $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$  /18/.

| Lämpötila ( $^\circ \text{C}$ )           | -12 | -8  | -3  | +20 |
|-------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Maksimipuristuslujuus ( $\text{MN/m}^2$ ) | 3,7 | 2,2 | 1,5 | 0,5 |

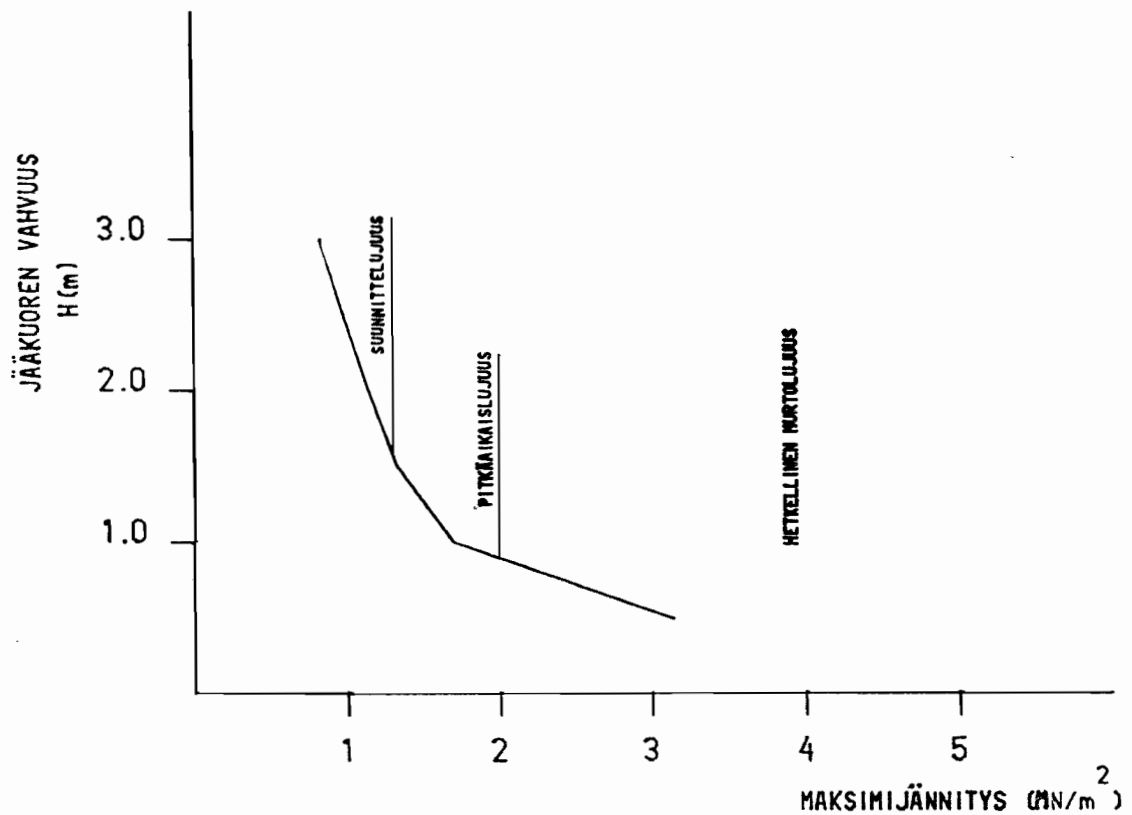
#### 6.44

##### Laskennan tulokset

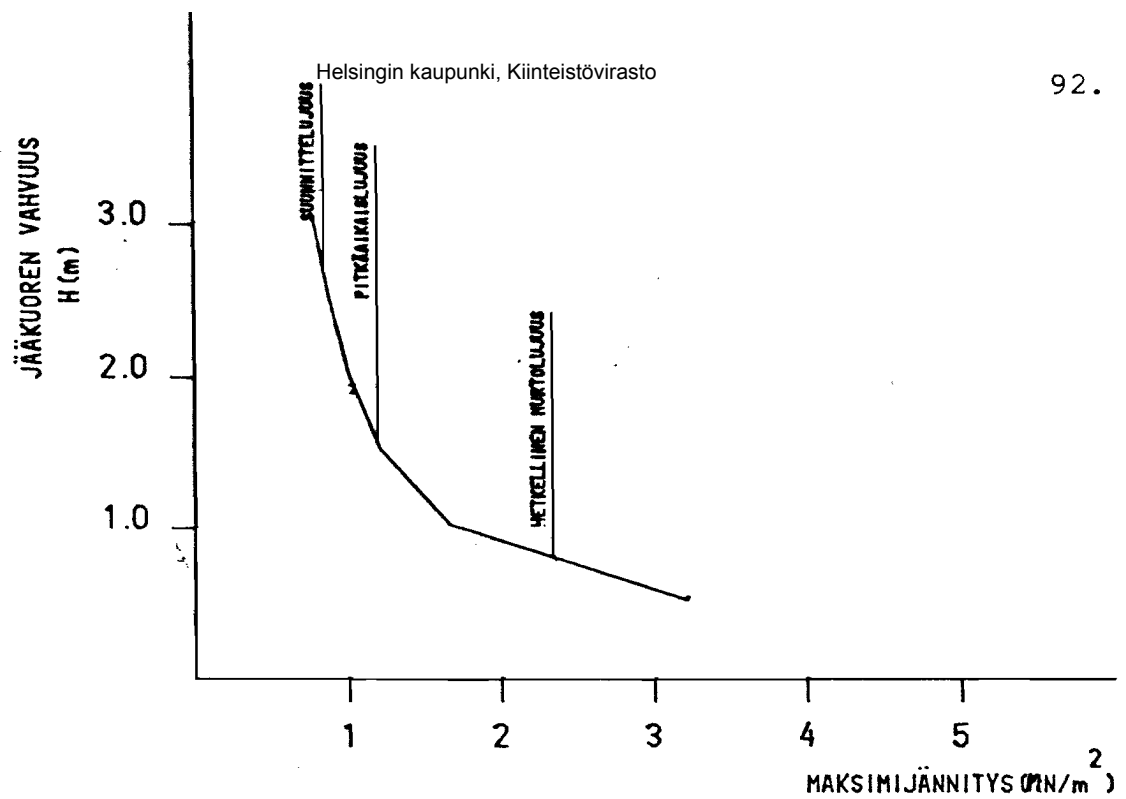
Kuvassa 64 on jääkuoren laen siirtymä alaspäin jään vahvuuden funktiona. Morganin siirtymäkaava ei huomioi tunnelin romahtamista. Kuvissa 65-67 on maksimijännitys jääkuoreissa kuoren vahvuuden funktiona. Kuviin on myös merkitty jäätyneen hiekan lujuusarvot kyseisessä lämpötilassa.



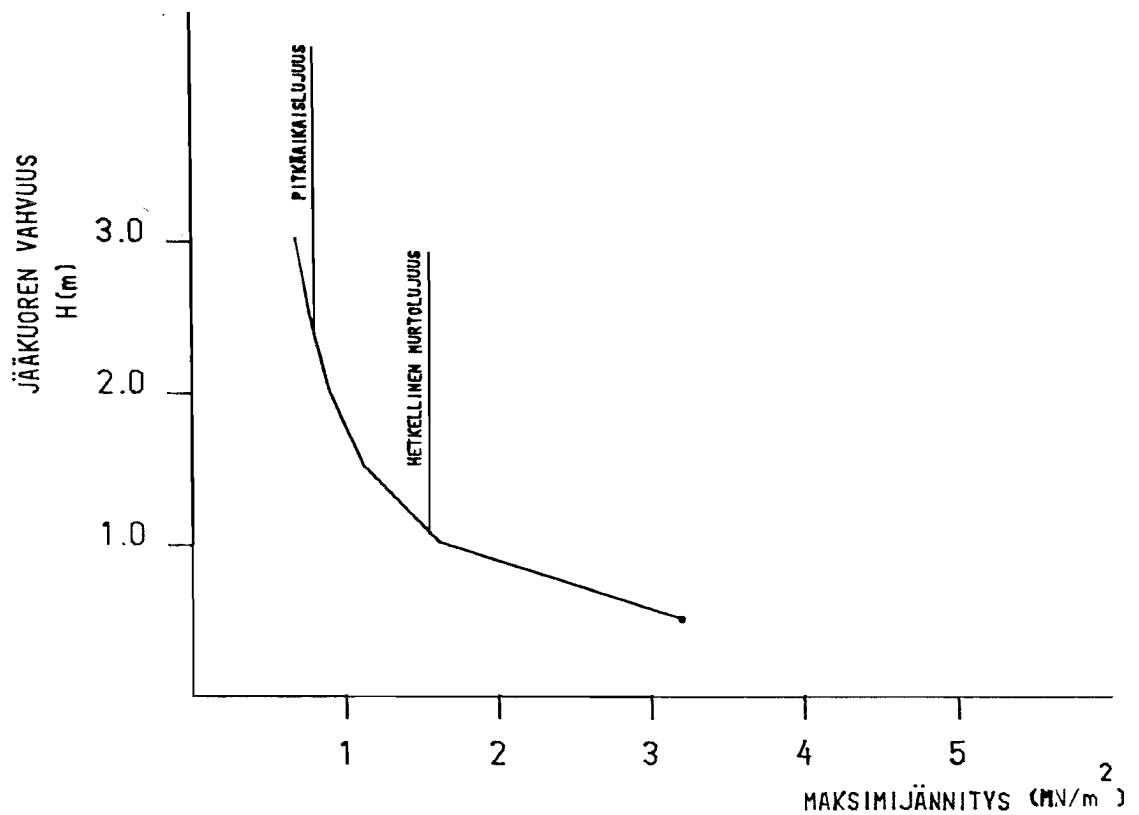
Kuva 64. Jääkuoren laen siirtymä alaspäin jään vahvuuden funktiona.



Kuva 65. Maksimijännitys jääkuoressa kuoren vahvuuden funktiona  $T = -12^{\circ}\text{C}$



Kuva 66. Maksimijännitys jääkuoressa kuoren vahvuuden funktiona  $T = -8^{\circ}\text{C}$



Kuva 67. Maksimijännitys jääkuoressa kuoren vahvuuden funktiona  $T = -3^{\circ}\text{C}$

Kuvasta 65 nähdään, että  $-12^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa 1 m jääkuori kestää pitkäaikaisessa tilantessa (30 d). Suunnittelulujuuden käyttö edellyttää noin 1,5 m paksuista jääkuorta. Lämpötilassa  $-8^{\circ}\text{C}$  saadaan pitkäaikaislujuuden arvolla jääkuoren minimipaksuudeksi 1,5 m ja suunnittelulujuuden perusteella 3,0 m (kuva 66). Lämpötilassa  $-3^{\circ}\text{C}$  saadaan pitkäaikaislujuuden arvolla jääkuoren minimipaksuudeksi 3 m. Jääkuoren lämpötilan ollessa  $-3^{\circ}\text{C}$  murtuu yhden metrin jääkuori välittömästi (kuva 67).

Kluuvin ruhjeessa käytettiin 2,5 m teoreettista jääkuoren vahvuutta ja jään lämpötila oli kaivuvaiheen aikana alle  $-10^{\circ}\text{C}$ . Varmuuskerroin oli näiden laskelmien perusteella kaksi pitkäaikaiseen lujuuteen verrattuna. Näin suuren jään vahvuuteen päädyttiin, koska tunneli läpäistiin räjäyttämällä. Kahden ja puolen metrin vahvuisen jääkuoren laen painuma  $-12^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa on noin 6 mm. Pohja nousee ylöspäin 6 mm.

Kluuvin ruhjeessa oli vain muutaman renkaan pituinen osa jääkuorta kerrallaan näkyvissä, joten jännitykset ja siirtymät eivät päässeet kehittymään täyteen arvoon. Valurautaverhous toimi tehokkaana lisäjäykistäjänä ja vähensi jääkuoren muodonmuutoksia.

## 7.

### PASSIIVIJÄÄDYTYS

#### 7.1

#### Jäädytyksen ylläpito

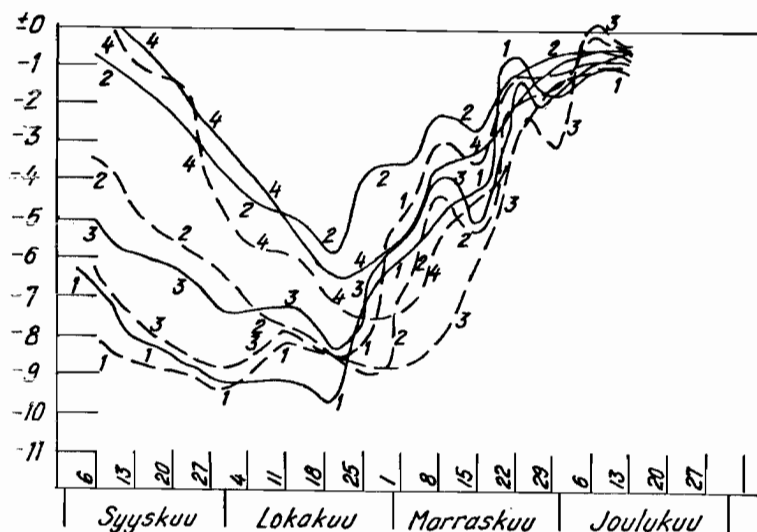
Passiivijäädytyksen aikana oli tarkoituksena pitää jääkuori noin 2,5 metrin paksuisena ja jääkuoren keskilämpötila  $-10^{\circ}\text{C}$ . Todellisuudessa jääkuoren paksuus passiivijäädytyksen aikana oli suurempi. Se vaihteli 3 - 3,5 m välillä. Kallio-osuudella jääkuoren paksuus oli vielä suurempi ollen noin 6 - 7 m. Tämä johtuu kallion pinnestä ominaislämmöstä ja suuresta lämmönjohtavuudesta.

Passiivijäädytyksen aikana jään lämpötilaa pidettiin sopivana säätelemällä freonin kiertoa putkistossa. Yksittäisiä jäädytysputkia pidettiin toiminnassa tarpeen mukaan. Passiivijäädytysvaihe kesti perästä riippuen 3 - 4,5 kk. Kampin pohjoisessa perässä se kesti pisimpään. Tämä johtuu

siitä, että tässä perässä jäädytys aloitettiin ensimmäisenä. Passiivijäädytysvaiheen loppupuolella marraskuussa annettiin jäätyneen maan keskilämpötilan nousta lähelle nollaa, jotta jääkuoren paksuus vähenisi kahteen ja puoleen metriin. Joulukuun alkupuolella suljettiin jokaisesta perästä jäädytysputkiston sisäkehä kokonaan. Ulkokehän putkisto jätettiin toimintaan. Tästä alkoi vaihteittainen sulaminen.

Energian kulutus passiivijäädytyksen aikana oli hyvin vaihteleva ollen keskimäärin  $3,5 \cdot 10^{10}$  J viikossa. Lämpöpönoisto oli passiivivaiheen alussa vielä suurimmillaan. Tällöin poistettava lämmön määrä oli keskimäärin  $1,5 \cdot 10$  J viikkoa kohti.

Kuvasta 68 näkyy maan ja kalliön lämpötilojen kehitys ruhjeessa passiivivaiheen aikana.



*Merkintöjä:*

1. Kamppi pohj.
2. Kamppi etel.
3. Hakaniemi pohj.
4. Hakaniemi etel.

Lämpötila maassa

Lämpötila kalliiossa

Kuva 68. Maan ja kalliön keskilämpötilojen kehitys passiivijäädytysvaiheen aikana (vertaa kuva 50).

## 7.2

### Passiivijäädytyksen aikana tapahtuneet muodonmuutokset maassa

Passiivijäädytysvaiheen aikana tilanne maaperässä pysyi melko vakaana. Painumat olivat melko vähäisiä. Lokakuun aikana havaittiin molemmissa painumaletkuissa 14 mm painuma. Tämä tapahtui alimmissa siivekkeissä eli lähinnä tunnelitasolla. Ylemissä siivekkeissä painuma tapahtui hitaammin. Painuman suuruus passiivivaiheen aikana ylimmissä siivekkeissä oli noin 10 mm. Painuma ajoittui loka-marraskuulle.



Painuma johtuu selvästi tunnelin teosta. Tunnelin perä läpäisi maaosuuden lokakuun aikana molemmissa tunneleissa. Painuma syntyi ilmeisesti välittömästi sen jälkeen, kun jääsylinterin sisällä avattiin tyhjä tila. Painuma havaittiin myös maan pinnalla. Painumalevy 144 pohjoisen tunnelin päällä painui passiivivaiheen aikana noin 15 mm ja painumalevy 147 eteläisen tunnelin päällä noin 10 mm. Konsolidaation osuus painumasta on 1 mm. Painumalevyjen painumisnopeus oli suurimmillaan loka-marraskuussa.

Passiivivaiheen aikana ei tapahtunut sivusiirtymiä. Sivusiirtymäputket sijaitsivat niin kaukana painumakartioista, että todennäköisyysteoreettisillä menetelmillä tästä painumasta laskettu sivisiirtymä ei ulotu edes putkeen H5 asti. Huokospaineiden kehitys tasaantui. Painelukemat pysyivät koko passiivivaiheen ajan melko vakiona. Huokospainekäyrissä esiintyvä pieni hyppely johtuu mittausvirheistä ja pohjavedenpinnan vaihteluista.

## 8.

### JÄÄTYNEEN MAAN OMINAISUUDET

#### 8.1

#### Näytteiden otto jäätyneestä maasta

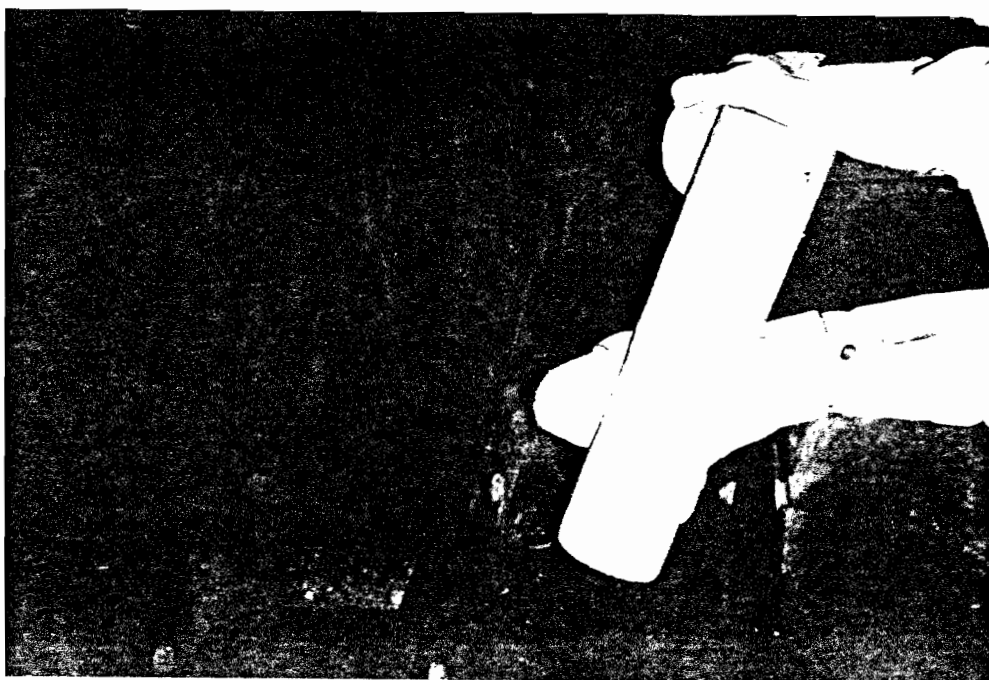
Kluuvin ruhjeen pohjoisen tunnelin maaosuudelta otettiin  $\varnothing$  100 mm näytteitä betoniporalla laboratoriokeiteita varten. Lisäksi otettiin irtonaisia jäätyneitä maakappaleita rakeisuuden ja kosteuspitoisuuden selvittämiseksi (kuva 72).

Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen betonilaboratorio suoritti näytteenottoporauksen. He käyttivät  $\varnothing$  100 mm timanttiterällä varustettua näytteenottoputkea (kuva 69). Putki on 500 mm pitkä. Jatkovarret ovat 500 mm pitkiä. Näytteitä oli tarkoitus ottaa 27 kappaletta á 200 mm. Näytteitä otettiin sekä staattisesti toimivasta jääkuoresta että tunnelin peräseinästä, joka oli myös kokonaan jäässä.

Jääkuoren paksuus poraushetkellä vaihteli 2,5 - 3,0 m. Turvallisuussyistä sallittu poraussyvyys säteen suunnassa rajoitettiin yhdeksi metriksi. Tämä johtui jäädytysputkien sijainnin epävarmuudesta. Jäädytysputket poikkesivat kaltevuusmittarilla mitatusta sijainnistaan 0 - 0,3 m. Jääkuoren puhkaiseminen olisi tietysti ollut vaarallista, koska vesi olisi tullut tunneliin.



Kuva 69. Näytteiden ottoa betoniporalla jäätyneestä maasta.



Kuva 70. Jäätyneestä maasta otettu näyte.

Näytteet tuli säilyttää mahdollisimman häiriintymättöminä jäätyneessä olomuodossa (kuva 70). Porauksessa käytettiin sen vuoksi huuhteluaineena glykolia, jonka lämpötila oli laskettu pakastimessa arvoon  $-15^{\circ}\text{C}$ . Jäätyneessä hiekassa poraus onnistui melko hyvin ja näytteet saatiin ehjinä. Jäätyneessä moreenissa, jonka kosteuspiitoisuus on noin 10 %, näytteenotto oli vaikeampaa. Huuhteluneste syövytti näytteen pintaa ja näyte halkeili usein kivisyydestä johtuen.

Poraaminen onnistui hyvin vaakasuorassa asennossa. Suoraan ylöspäin poraaminen oli vaikeinta. Huuhteluneste valui suoraan alas ja terä pääsi ilmeisesti hieman lämpemenään. Tämän seurauksena kaksi putkea jäättyi kiinni tunnelin kattoon. Ne saatiin pois lämminvesihuuhtelulla.

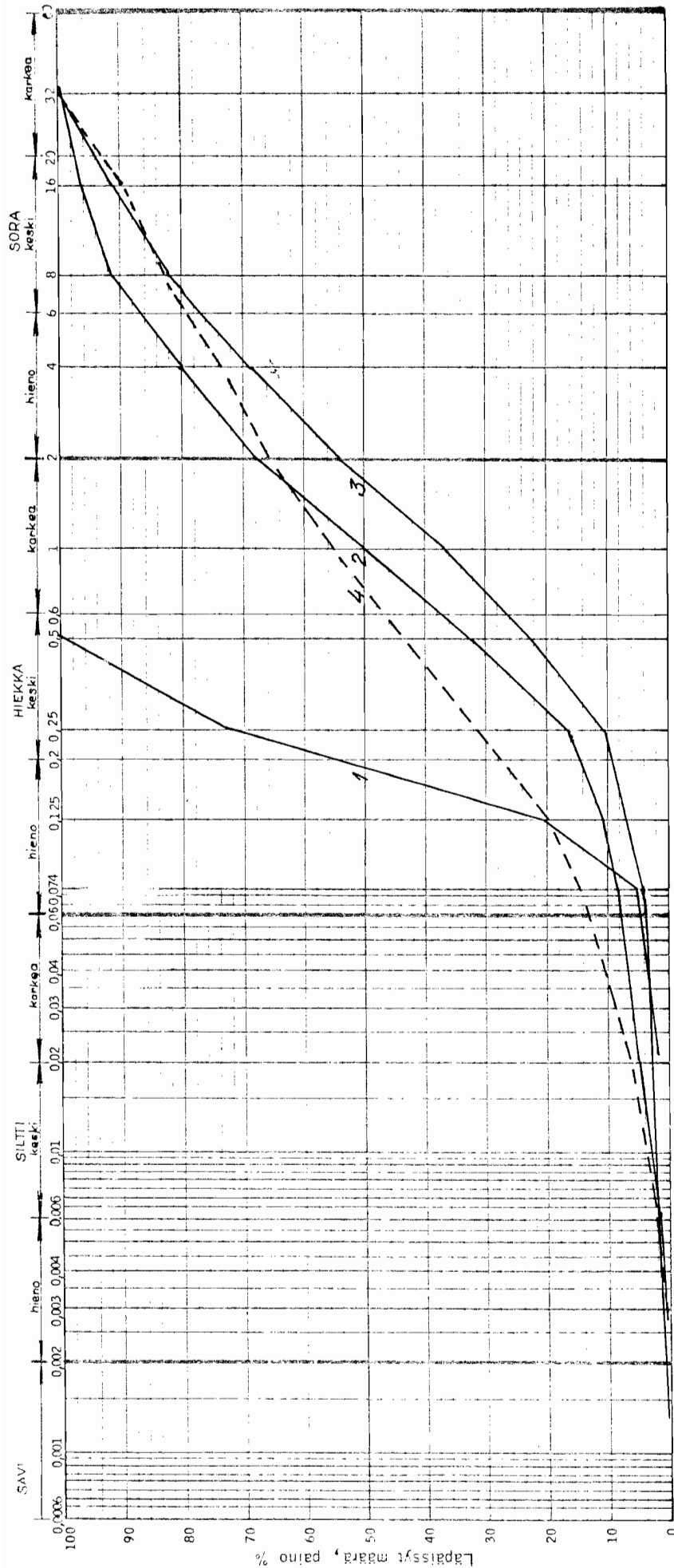
## 8.2

### Jäätyneen maan indeksiominaisuudet

Geoteknisessä toimistossa määritettiin tunnelin perästä otetuista maanäytteistä rakeisuudet ja vesipitoisuus. Kuvassa 71 on tutkittujen maa-lajien rakeisuuskäyrät. Ruhjelaakson keskiosalla hiekkakerrokset ulottuvat tasolle -23 asti. Tämän alapuolella on hiekkamoreenia.

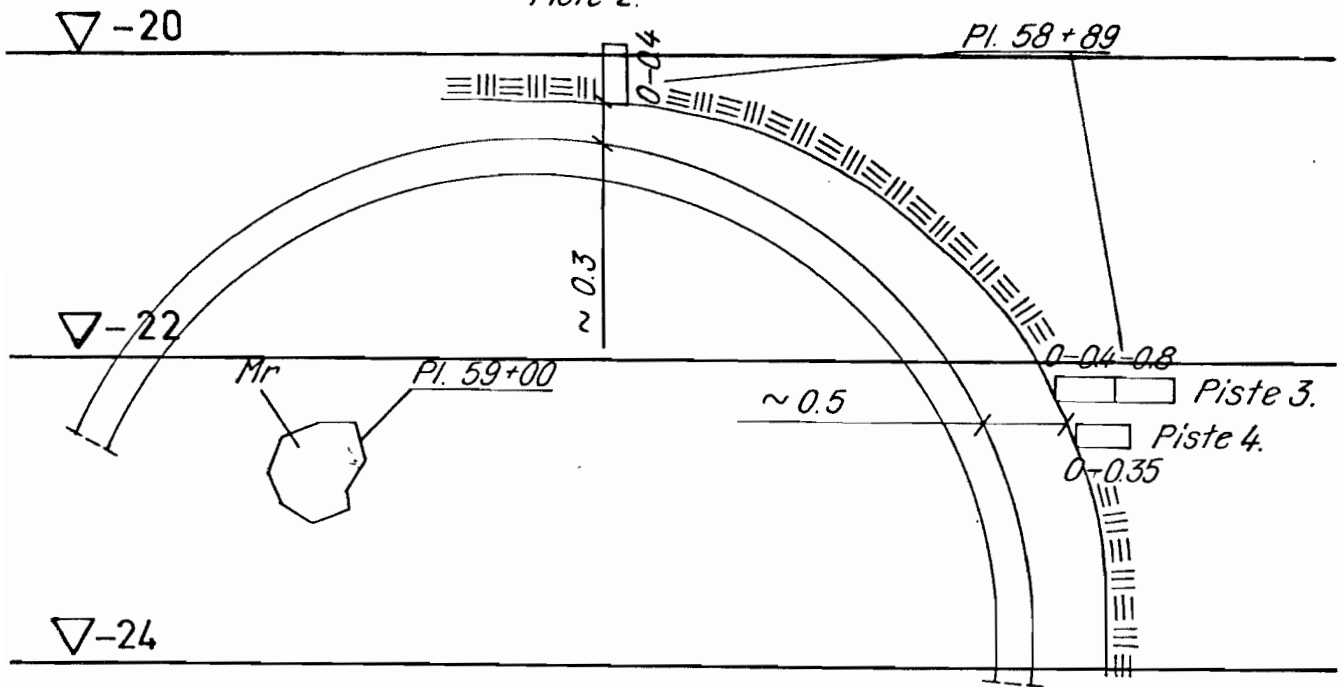
Tasolla -21 pohjoisessa tunnelissa on hienoa hiekkaa. Keskimääräinen raekoko on noin 0,2 mm. Hiekan vesipitoisuudeksi saadaan 28 %. Tämä on hyvin suuri arvo, joten hiekka on löyhässä tilassa. Koska hiekka on täysin veden kyllästämää saadaan huokoisuudeksi  $n = 0,42$ . Jos oletetaan hiekan ominaispainoksi  $26,5 \text{ kN/m}^3$  saadaan märkätilavuuspainoksi  $19,5 \text{ kN/m}^3$  /3/.

Tasolla -24 pohjoisessa tunnelissa on hiekkamoreenia, jonka 50 %:n läpäisyaste on 0,7 mm kohdalla. Vesipitoisuudeksi saatiin 11,8 %. Huokoisuus  $n = 0,24$ . Märkätilavuuspaino on  $22,6 \text{ kN/m}^3$ . Vähän alempana tasolla -26 sijaitseva hiekkamoreeni oli löyhempää. Sen vesipitoisuus oli 15 % ja märkätilavuuspaino  $21,8 \text{ kN/m}^3$ . Eteläisen tunnelin pohjalla tasolla -26 oli moreenia, jonka vesipitoisuus oli 8 %. Tästä saadaan märkätilavuuspainoksi  $23,6 \text{ kN/m}^3$ . Jäätyneen kallion ominaisuuksia ei tutkittu.



Kuva 71. Kluuvin ruhjeen maalajien rakeisuuskäyrät.

| Näyte | Maalaji | w % | Näytteenottopaikka | Poikkileikkaus | Taso |
|-------|---------|-----|--------------------|----------------|------|
| 1     | HK      | 28  | Pohjoinen tunneli  | 58+88          | -22  |
| 2     | hkMr    | 15  | " "                | " "            | -26  |
| 3     | srHk    | 8   | Eteläinen tunneli  | 58+97          | -25  |
| 4     | hkMr    | 12  | Pohjoinen tunneli  | 58+88          | -24  |



Kuva 72. VTT:n suorittamat näytteenottoporaukset /18/.

### 8.3

#### Jäätynneen maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet

#### 8.3.1

#### Yleistä teoriaa

Vettä sisältävän maan lujuusominaisuudet muuttuvat huomattavasti lämpötilan laskiessa alle  $0^{\circ}\text{C}$ . Hiekkamaalajit jäätyvät  $0 - 0,5^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa ja savimaalajit  $0 - 5^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa /17/.

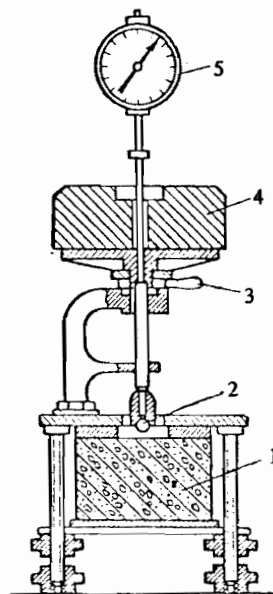
Jäätynneen maan lujuusominaisuudet riippuvat ratkaisevasti maan jäätymisasteesta (i). Jäätymisasteella tarkoitetaan jäätynneen veden suhdetta kokonaisvesimäärään maassa. Maa-aines, joka sisältää jäätyvätöntä vettä käyttäytyy plastisesti. Täysin jäätynneen maan lujuusominaisuudet riippuvat pääasiallisesti rakeita sitovan jään lujuudesta ja lujuuden kasvusta lämpötilan laskiessa. Jäässä on heikkoja vetysidoksia. Vetyatomit kevyinä hiukkasina liikkuvat helposti. Lämpötilan laskiessa vetyatomien liike hidastuu ja ne muodostavat lujempia sidoksia. Jää saavuttaa lähes maksimilujuutensa  $-70^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa.

Ulkoinen paine vähentää jäätymisastetta. Jäätymisasteen vähentyessä maan muodonmuutosmoduuli ja lujuus laskevat. Tsytovinin /17/ tekemän koesarjan perusteella savisella siltillä oli lämpötilassa  $-4^{\circ}\text{C}$  muodonmuutosmoduulin E arvo  $10000\text{ MN/m}^2$ , kun ylipaine oli  $100\text{ kPa}$ . Ylipaineen ollessa  $200\text{ kPa}$  oli  $E = 6000\text{ MN/m}^2$  ja ylipaineen ollessa  $300\text{ kPa}$  oli  $E = 4700\text{ MN/m}^2$ . Ulkoisella paineella

la on vähemmän merkitystä hyvin tiiviissä maa-lajeissa. Alhaisessa lämpötilassa jäätymisaste ei muutu niin paljon, kuin lähellä sulamispis-tettä olevissa lämpötiloissa.

Jäätyneen maan mekaaniset ominaisuudet muuttuvat, jos jännitystä lisätään vakiolämpötilassa. Muu-tos tapahtuu hyvin hitaasti, koska jäähuokosten sulaminen rakeiden kosketuspinnnoissa vie aikaa. Tämä aiheuttaa jonkin verran maan kokoonpuristu-mista. Jäätyneessä maassa tapahtuu voiman vaikut-taessa sekä vaimenevaa että tasaista hiipumaa.

Jäätyneen maan hetkellinen puristuslujuus ( $\sigma_{ul}$ ) on suurempi kuin pitkäaikainen lujuus ( $\sigma_{lt}$ ). Het-kellinen puristuslujuus saadaan selville käyttä-mällä puristuskokeessa suurta kuormitusnopeutta 1500 - 2000 kN/m<sup>2</sup>/min /17/. Pitkäaikaislujuus voi-daan määrittää riittävän hitaalla kuormitusnopeu-della tai hiipumakokeiden avulla. Neuvostoliitos-sa käytetään paljon Tsytovinchin pallotunkeumalai-tetta jäätyneen maan lujuuden selvittämiseksi (kuva 73) /17/.



1. Maanäyte
2. Pallo
3. Lukitusruuvi
4. Paino
5. Mittakello

Kuva 73. Tsytovinchin pallotunkeumalaite /17/.

Laitteessa oleva näyte jäädytetään kryostaatilla haluttuun lämpötilaan. Tämän jälkeen asetetaan noin 22 mm halkaisijaltaan oleva pallo näytteen pintaan tasatulle pinnalle. Palloa kuormitetaan vipuvarren avulla. Näytteeseen kohdistuvan paineen on oltava sopivassa suhteessa pallon tun-keumaan. Hetkellinen lujuus saadaan 10 sekuntia kuormituksen alkamisesta /17/.

$$\sigma_{ul} = \frac{P}{D \cdot s} \quad (61)$$

missä

on hetkellinen puristuslujuus  
 P " palloon kohdistuva voima  
 D " pallon halkaisija  
 s " tunkeutumisvyvyys

Pitkäaikaislujuus arvioidaan 30 minuutin kokeen avulla. Pitkäaikaispainumaksi arvioidaan painuma, joka on kaksi kertaa 30 minuutin painuma /17/.

Hetkellinen puristuslujuus noudattaa lämpötilan funktiona seuraavaa riippuvuutta /17/:

$$\sigma_{ul} = a + b \cdot (T)^2 \quad (62)$$

missä

a, b ja n ovat vakioita

T on itseisarvo negatiivisesta lämpötilasta (° C)

Vakion n arvo vaihtelee yleensä arvojen 0,5 - 1 välillä. Pitkäaikaisen puristuslujuuden arvo on tärkeämpi kuin lyhytaikaisen puristuslujuuden arvo. Pitkäaikainen puristuslujuus on savimaalajeissa jopa viisi kertaa hetkellistä puristuslujuutta pienempi /1/.

Jäätyneen maan leikkauslujuus riippuu lämpötilasta, ulkoisesta paineesta ja voiman vaikutusajasta. Leikkauslujuus saadaan seuraavalla yhtälöllä /17/:

$$\tau_{ul} = c + \tan \theta \quad (63)$$

missä

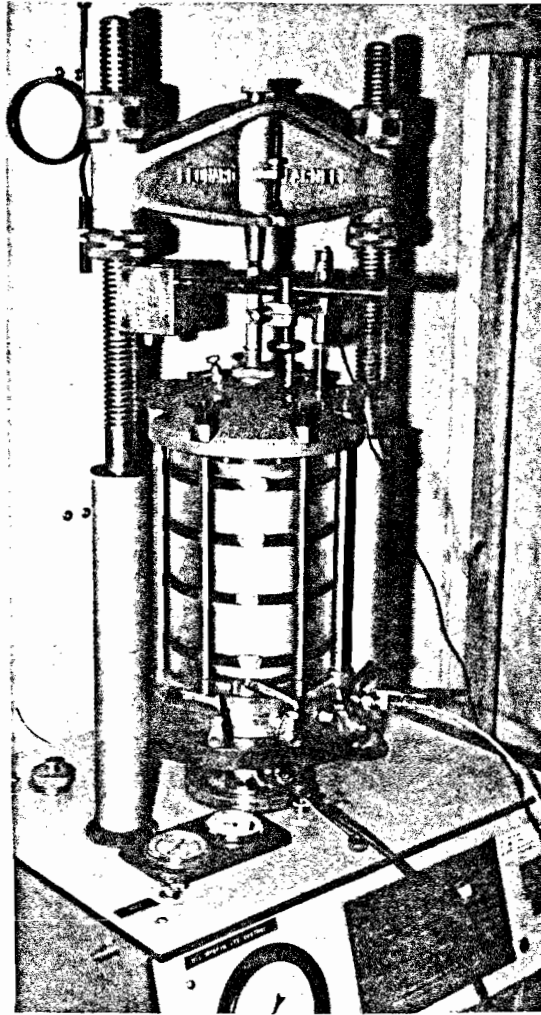
$\tau_{ul}$  on hetkellinen leikkauslujuus  
 c " koheesio (riippuvainen lämpötilasta ja voiman kestosta)  
 $\theta$  " kitkakulma (riippuvainen lämpötilasta, voiman kestosta ja ulkoisesta paineesta).

## 8.32

### Laboratoriokokeet

VTT:n geotekniikan laboratorion pakkashuoneessa suoritettiin sarja kolmiaksisia kokeita jäätyneen maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien selvittämiseksi /19/. Kokeita suoritettiin kolmella eri maalajilla. Maalajit olivat hHk, Hk ja Mr. Jokaisesta maalajista suoritettiin kolme koesarjaa. Koelämpötilat olivat -12° C, -8° C ja -3° C. Näin saatiin selville jäätyneen maan lujuuden ja lämpötilan välinen riippuvuus.

Kokeet suoritettiin englantilaisella Leonard Farnellin valmistamalla kolmiaksiaalipuristimella (kuva 74).



Kuva 74. Leonard Farnellin kolmiaksiaalilaite.

Kuormitusnopeus oli melko pieni,  $50 \text{ kN/m}^2 \text{ min}$ . Näytteen korkeus oli 200 mm ja halkaisija 100 mm. Suurin osa näytteistä rakennettiin jäädyttämällä näytteet pakkahuoneessa. Tunnelista porattu- ja näytteitä käytettiin lähinnä lujuusominaisuuksien vertailuun rakennettujen ja alkuperäisten näytteiden välillä.

Kuitenkin  $-8^\circ \text{ C}$  lämpötilassa suoritettavat kokeet hiekalla ja hienolla hiekalla tehtiin alkuperäisistä näytteistä. Näistä näytteistä saatiin pienempiä lujuusarvoja kuin vastaavista rakennetuista. Näytteet ovat ilmeisesti jonkin verran häirityneet niitä porattaessa ja sahattaessa.

Sellin sisälle johdettiin sivupaineeksi paineilmää. Neste olisi jäädytettynäkin omannut liian suuren lämmönvarauskyvyn ja saattanut muuttaa



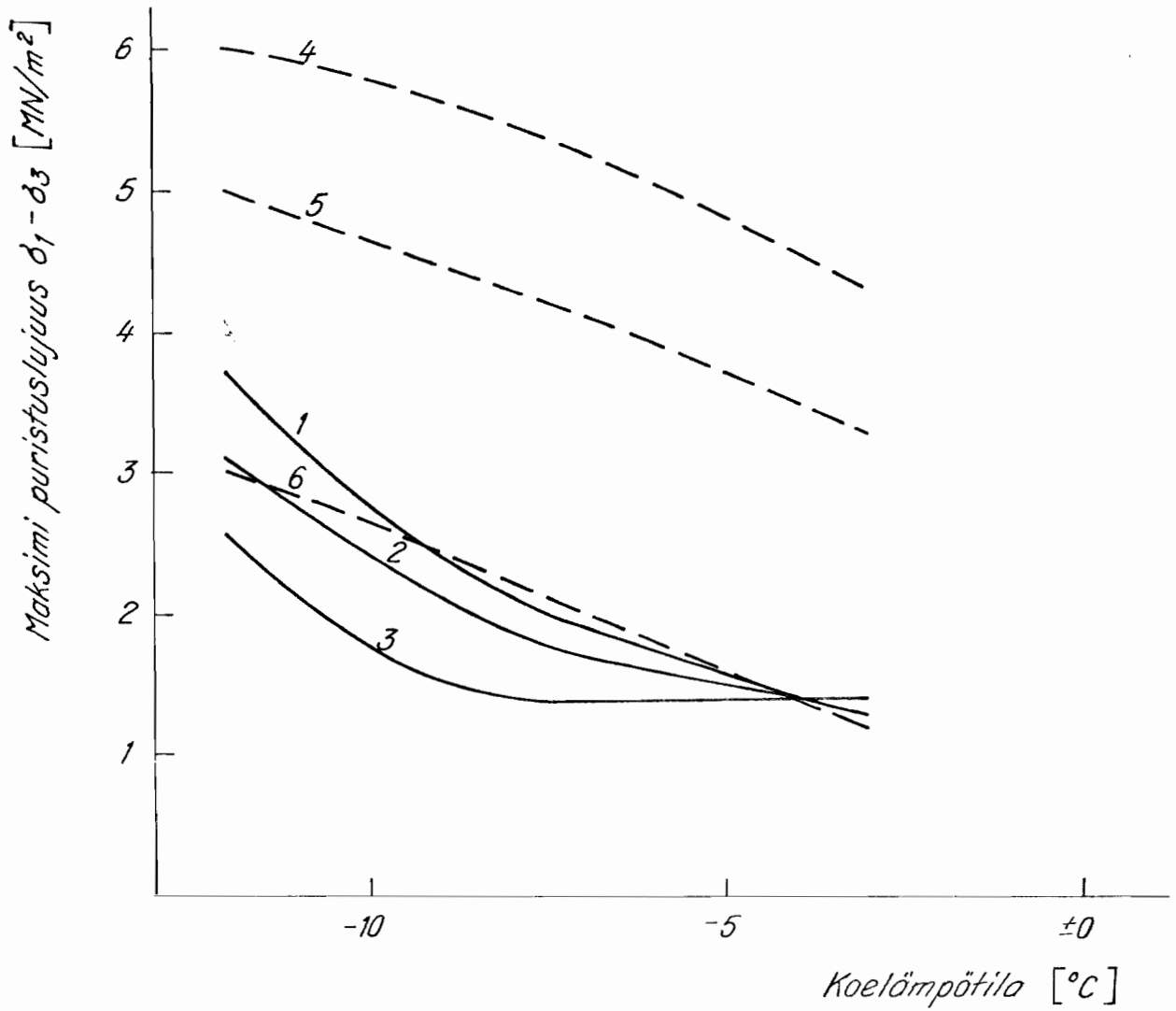
näytteen lämpötilaa. Huokospaineita ei mitattu. Koe oli tyypiltään UU-koe. Leikkausnopeus oli hitaampi kuin Neuvostoliitossa hetkellisen puristuslujuuden määrittämiseen käytetty nopeus. VTT:n käyttämällä koetyypillä hetkellisen murtojuuuden arvoiksi pitäisi saada 10 - 20 % pienempiä arvoja kuin Neuvostoliitossa.

Koe aloitettiin 50 kPa sellipaineella. Sen jälkeen sellipaine nostettiin arvoon 100 kPa ja tämän jälkeen 100 kPa välein 700 kPa asti. Korkeampaa sellipainetta ei voitu käyttää, koska ilmanpaine olisi muuten tunkeutunut kumitiivisteiden alitse näytteeseen. Jokaisella sellipaineen arvolla kuormitusta jatkettiin niin kauan, että maksimikuorma saatiin selville. Näytteeseen vaikuttava voima mitattiin elektronisella voima-anturilla. Samoin siirtymät mitattiin siirtymäanturilla. Mittausanturit oli yhdistetty piirturiin.

Taulukossa 9 on kussakin kokeessa saavutettu maksimipuristuslujuus ja initiaalikimmomoduuli sellipaineen arvolla 200 kPa /19/.

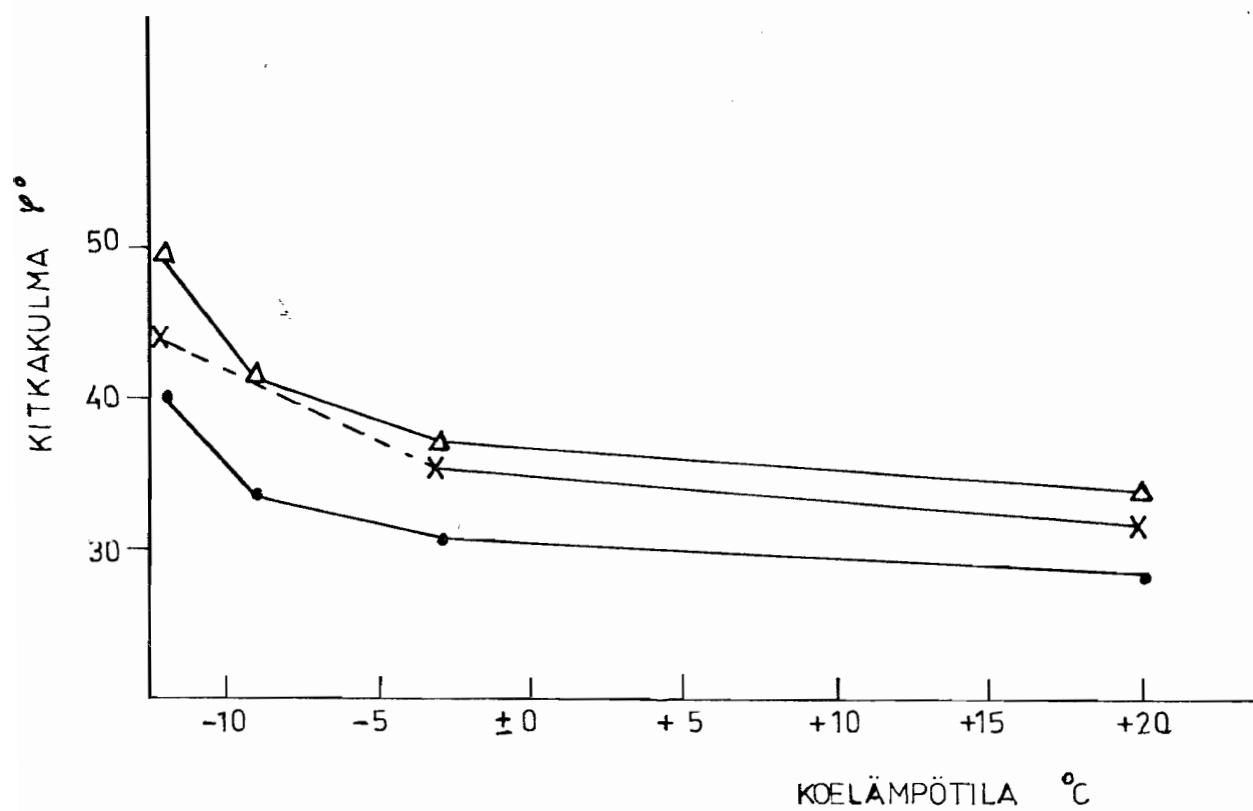
Näistä tuloksista nähdään selvästi, että alkuperäisistä näytteistä lämpötilassa  $-8^{\circ}\text{C}$  tehdyt kokeet antavat pienempiä tuloksia suhteessa muihin kokeisiin. Kuvassa 75 on eri maalajien maksimipuristuslujuus lämpötilan funktiona sellipaineen ollessa 200 kPa. Käyrän pitäisi olla muotoa  $\sigma_{UL} = a + b \cdot (\theta)^n$ . N:n arvo vaihtelee yleensä lukujen 0,5 ja 1 välillä /17/. Tämä johtuu siitä, että  $-8^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa tehdyt kokeet suoritettiin alkuperäisillä näytteillä. Näytteet häiriytyivät ilmeisesti jonkun verran niitä porattaessa ja käsiteltäessä.

Kuvassa 76 on kitkakulman arvot eri maalajeilla lämpötilan funktiona. Kuvasta huomataan, että kitkakulma ei pienene oleellisesti yli  $-3^{\circ}\text{C}$  lämpötiloissa.



1. hHk  $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$  VT:n koetuloksia
2. hKMr  $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$  VT:n koetuloksia
3. Hk  $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$  VT:n koetuloksia
4. Hk  $n = 34\%$  Pitkäaikainen lujuus (30d)
5. Hk  $n = 42\%$  Neuvostoliiton jäädytys-
6. siHk  $n = 40\%$  ohjeista

Kuva 75. Maksimipuristuslujuudet lämpötilan funktiona.



|                                                                                     |  | $\text{kN/m}^2$ |                     |                    |                    |                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----|
|                                                                                     |  |                 | $+20^\circ\text{C}$ | $-3^\circ\text{C}$ | $-8^\circ\text{C}$ | $-12^\circ\text{C}$ |     |
|  |  | PISTE 2         | c =                 | 0                  | 175                | 350                 | 450 |
|  |  | PISTE 3         | c =                 | 0                  | 190                | 290                 | 400 |
|  |  | MOREENI         | c =                 | 0                  | 250                | 375                 | 500 |

Kuva 76. Kitkakulman arvot eri lämpötiloissa /19/.

Taulukko 9. Maksimipuristuslujuus ja initiaalkimmomoduuli kaikista kolmiaksiaalikokeista /19/.

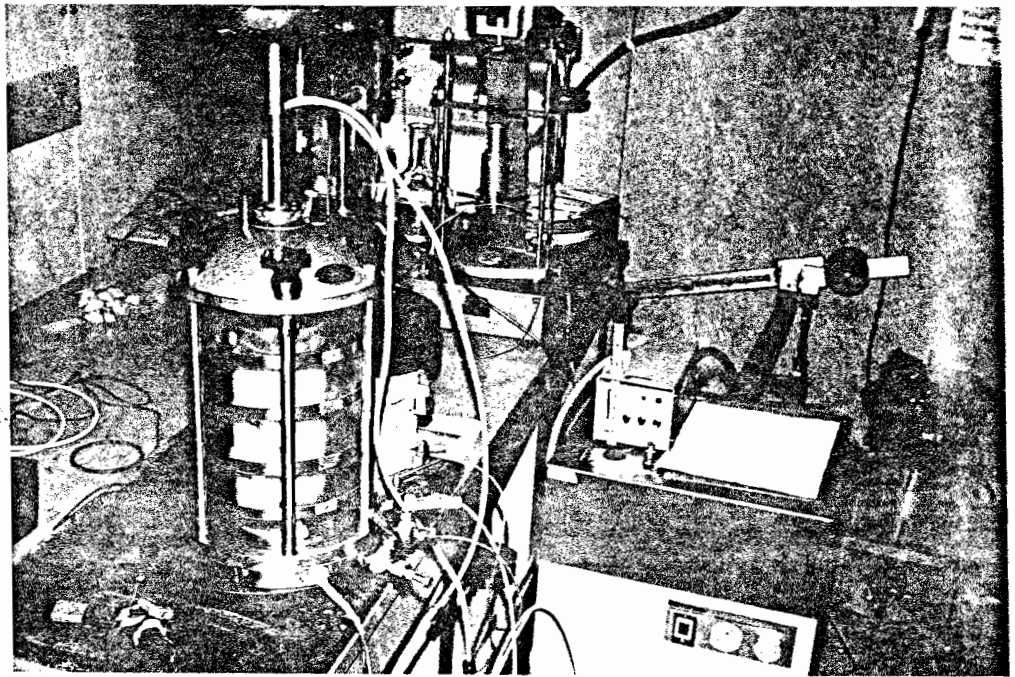
| Koelämpötilat (°C)     |                                                   | -12 | -8  | -3   | +20  |
|------------------------|---------------------------------------------------|-----|-----|------|------|
| Mr                     | $\sigma_1 - \sigma_3 \text{ max (MN/m}^2\text{)}$ | 3   | 1,9 | 1,25 | 0,35 |
|                        | $E_i \text{ (MN/m}^2\text{)}$                     | 200 | 175 | 125  | 10   |
| Piste 2 Piste 3<br>Hk  | $\sigma_1 - \sigma_3 \text{ max}$                 | 2,6 | 1,4 | 1,4  | 0,5  |
|                        | $E_i$                                             | 200 | 50  | 75   | 40   |
| Piste 2 Piste 3<br>hHk | $\sigma_1 - \sigma_3 \text{ max}$                 | 3,7 | 2,2 | 1,4  | 0,5  |
|                        | $E_i$                                             | 200 | 100 | 100  | 40   |

#### 8.4

##### Routanousu ja routapaine laboratorikokeiden perusteella

VTT:n geotekniikan laboratoriossa suoritettiin routakokeita Kluuvin ruhjeen maalajeille /19/. Routakokeet suoritettiin kolmiaksiaalisellissä sivupaineen vaikutuksen alaisena. Näin saatiin olosuhteet lähelle tunneliolosuhteita. Vaikka maalaji olisi lievästi routivaa, routanousua ei välttämättä tapahdu tunnelitasolla (vertaa 2.24). Tunnelitasolla vallitseva sivupaine saattaa olla suurempi kuin routapaine.

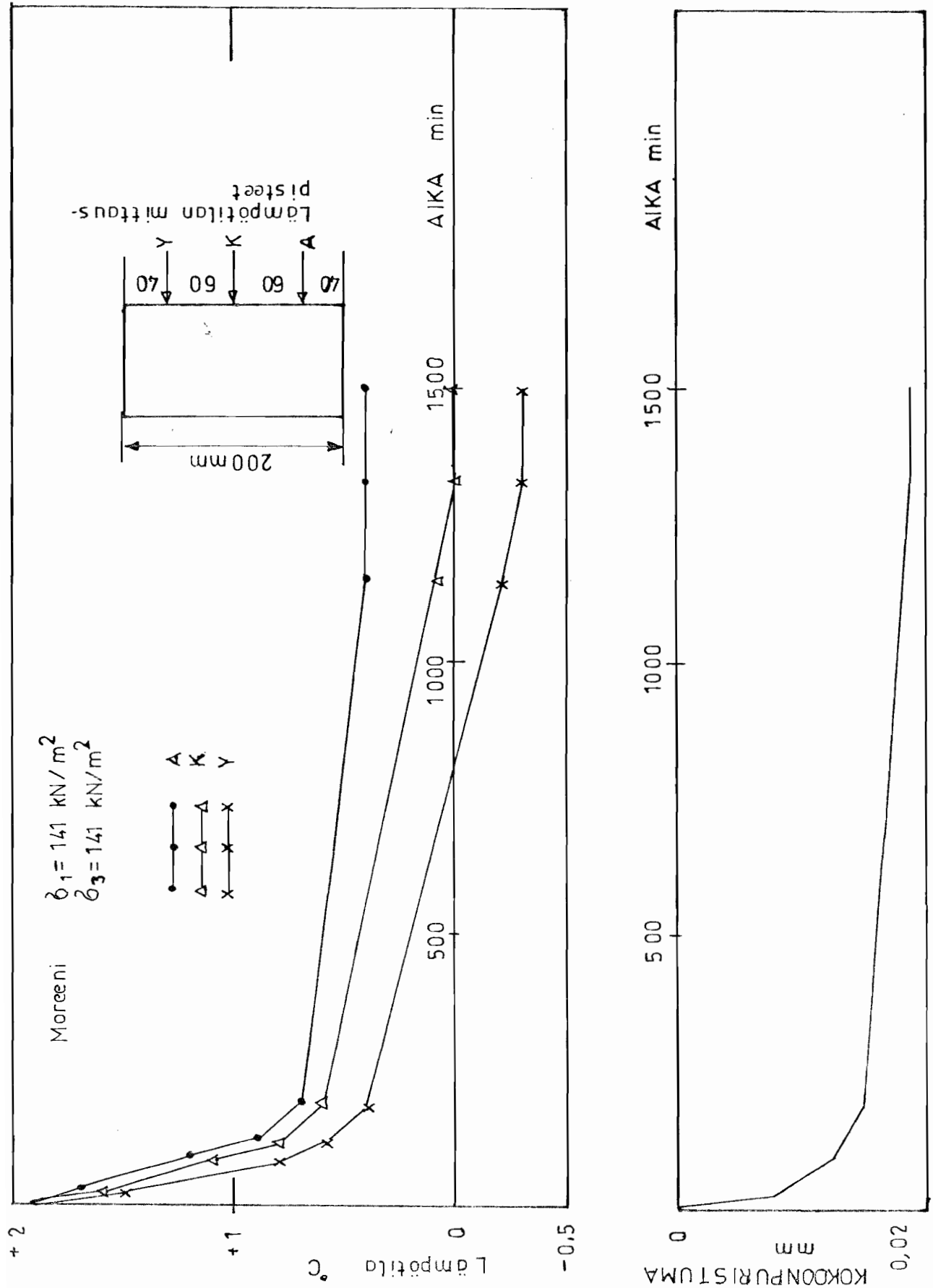
Koelaitteisto on kuvassa 77. Näytteen korkeus oli 200 mm ja halkaisija 100 mm. Näytteet rakennettiin alkuperäiseen tiheyteen ja kosteuspitoisuuteen. Näytteet jäädytettiin, jotta ne saataisiin ehjinä kolmiaksiaalisellisiin. Sellissä ne sulatettiin sivupaineen vaikuttaessa. Selliin johdettiin sivupaineeksi ilmanpaine. Pystysuora kuorma saatiin aikaan punnuksilla. Pystysuora paine männässä asetettiin yhtäsuureksi kuin sellipaine. Sellipaineen nostamisessa oli vaikeuksia ilmavuotojen vuoksi. Tavoitteena oli saada sellipaineeksi 240 kPa. Nyt päästiin vain 150 kPa asti. Mutta koska mitään routanousua ei tapahtunut tälläkään paineella, niin ei ollut mitään syytä suorittaa koetta suuremmalla paineella.



Kuva 77. Routakoelaitteisto. Oikeassa alakulmassa näkyy kryostaatti.

Koelaitteisto oli kylmähuoneessa, jonka lämpötila oli  $+2^{\circ}\text{C}$ . Näytteen yläpäässä messinkisylinterin sisällä oli putkikierukka, jossa virtasi pakkasnestettä. Pakkasneste oli jäädytetty kryostaatilla  $-2^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan. Tämä kierukka jäädytti näytteen yläpinnan  $-2^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan ja aiheutti kylmärintaman näytteen yläpään. Ilman lämpötilaa ja kryostaattia säädeltiin siten, että nollaisotermi sijoittui näytteen keskelle. Näytteen kyljessä oli kolme sähköistä lämpötilaelementtiä, joiden avulla voitiin todeta nollaisotermi sijainti. Kuvassa 78 on lämpötilan kehitys yhden routakokeen kuluessa /19/.

Näytteen alapäähän on vedellä vapaa pääsy. Vapaa vedenpinta oli noin metrin verran nollaisotermi yläpuolella, jotta vesi läpäisisi huokoskiven. Kokeessa oli järjestetty kaikki edellytykset routimiselle ja kerrosroudan syntymiselle. Koe suoritettiin kolmella eri maalajilla; Hk, hHk ja hKMr. Nollaisotermi oli paikallaan useita päiviä. Yhdessäkään kokeessa ei havaittu routanousua. Tämän kokeen avulla varmistuttiin siitä, että Kluuvin ruhjeessa jäädytetyt maalajit olivat routimattomia ainakin siinä paineessa, mikä vallitsi tunnelitasolla /19/.

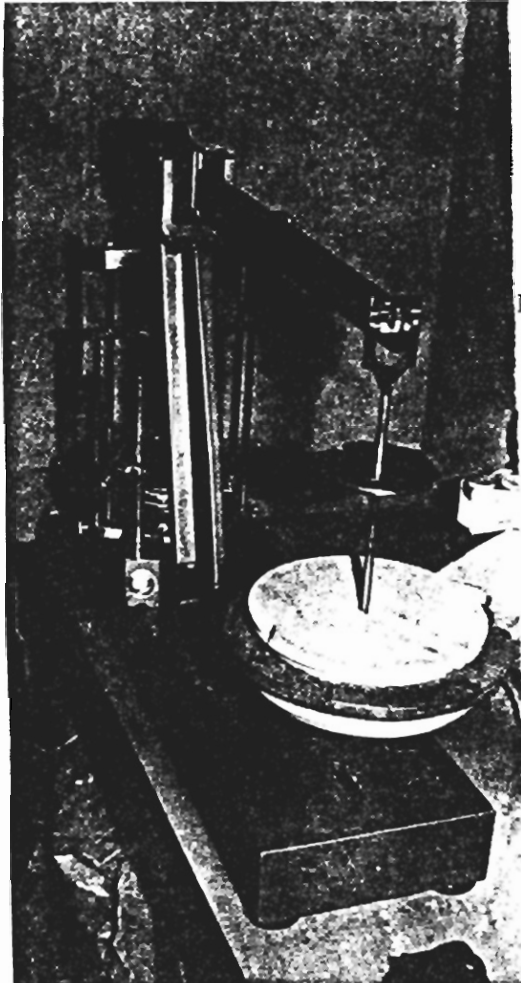


Kuva 78. Routakokeen tuloksia. Nollaisoterman kehittyminen ja routanousu (tässä tapauksessa painuma) /19/.

## 8.5

Jäätymis-sulamiskokeet

VTT:n geotekniikan laboratoriossa suoritettiin sarja jäätymis-sulamiskokeita Kluuvin ruhjeen maalajeilla /19/. Kokeiden tarkoituksena oli selvittää etukäteen ruhjeessa tapahtuvan sulamispainuman suuruus.



Kuva 79. Näyte jääty-  
mässä ödö-  
metrisellissä.

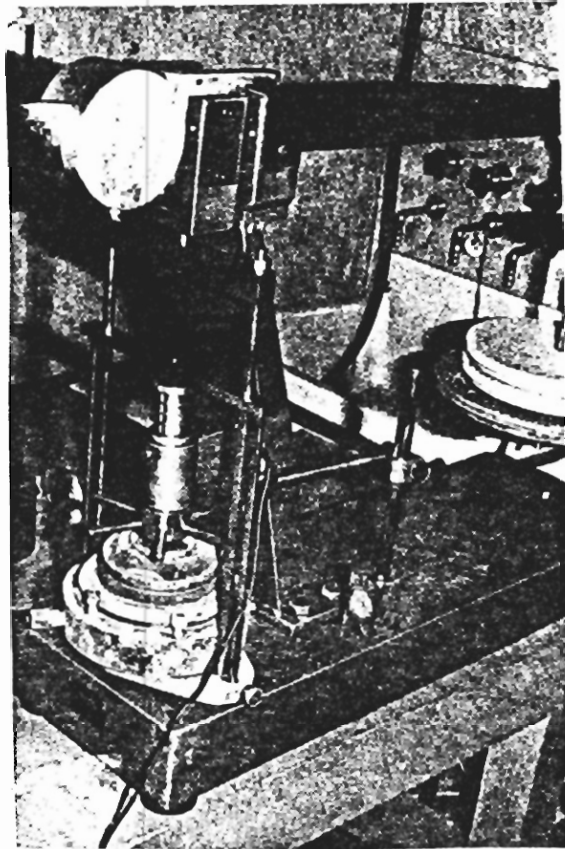
Kokeet suoritettiin ödömetrillä. Kokeissa käytettiin halkaisijaltaan 112,5 mm ödömetriringasta. Näytteen korkeus oli noin 30 mm. Näytteen molemmiin puolin oli huokoskivet. Näytteet rakennettiin ödömetrisellisiin alkuperäiseen tiiviyyteen. Maanäyte kuivattiin ensin lämpökaapissa ja sen jälkeen siihen sekoitettiin alkuperäinen määrä vettä. Näin saatiin näytteelle alkuperäinen irtotiheys.

Näytteen annettiin ensin tiivistyä  $240 \text{ kN/m}^2$  kuorman alla lämpötilassa  $+8^\circ \text{C}$ . Tämän jälkeen ödometri siirrettiin pakkahuoneeseen (kuva 79).

Ilman lämpötila pakkahuoneessa oli  $-12^{\circ}\text{C}$

Ödömetriselliin kohdistuva kuorma pidettiin vakiona koko kokeen ajan. Jäätymis- ja esitivistysvaiheessa ylemmän huokoskiven ja näytteen välissä oli muovikalvo, joka esti veden purkautumisen näytteestä. Alemman huokoskiven läpi tapahtuva virtaus oli estetty sulkemalla vesihana.

Ödometriä pidettiin pakkahuoneessa niin kauan, että näyte oli varmasti jäätynyt ja näytteen laajeneminen lakannut. Tämän jälkeen ödometri näytteen siirrettiin sulamaan kylmähuoneeseen  $+8^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan (kuva 80). Tämä lämpötila vastaa suunnilleen Kluuvin ruhjeen pohjaveden lämpötilaa. Sulamisvaiheessa muovikalvo poistettiin ja sellin pohjassa oleva vesihana avattiin. Näin vesi pääsi purkautumaan kahteen suuntaan.



Kuva 80. Näyte sulamassa ödömetrisellissä.

Sulaminen tapahtui tässä tapauksessa joka puolella näytettä, koska ei käytetty sivuilta lämpöeristettyä selliä. Näytteen litteyden johdosta sulaminen tapahtui pääasiassa näytteen ylä- ja



alapinnassa. Sulamisen voidaan ajatella tapahtuneen lähes yksiaksiaalisesti. Kluuvin ruhjeessa sulaminen tapahtui yksiaksiaalisesti yhtäaikaan kahdessa pinnassa.

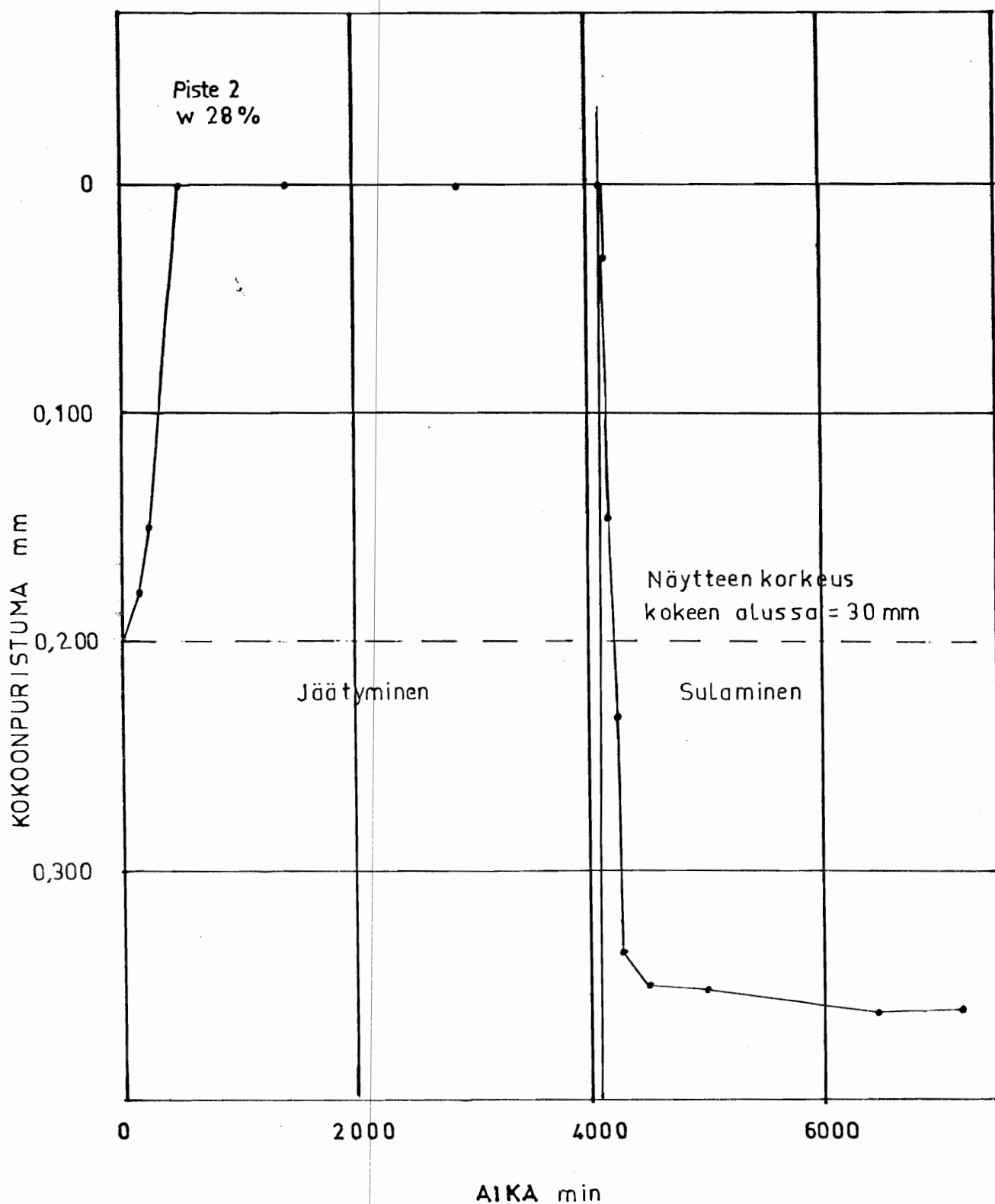
Jäätymisen aiheuttamaa nousua ja sulamisen aiheuttamaa painumaa mitattiin japanilaisella siirtymäanturilla. Sen mittaustarkkuus kokonaismuodonmuutoksen ollessa alle millimetrin luokkaa on noin 0,001 mm. Lukemia kerättiin automattisesti "data loggerin" avulla. Tämä tiedonkerääjälaitte tulostaa havainnot reikänauhalle. Tulokset laskettiin tietokonepäätteellä.

Jäätymis-sulamiskokeita tehtiin kolmelle eri maalajille, hienolle hiekalle, karkealle hiekalle ja moreenille. Moreenilla tehtiin kolme koetta eri vesipitoisuuksilla. Näin pyrittiin selvittämään sulamispainuman riippuvuutta moreenin vesipitoisuudesta. Taulukossa 10 on näytteessä jäätymisen aikana tapahtunut nousu ja sulamisen aikana tapahtunut painuma sekä sulamisaika. Sulamisaika on jaettu kahteen osaan. Varsinainen sulaminen, jolloin jää sulaa ja sen jälkeinen maan sulamiskon-solidaatio.

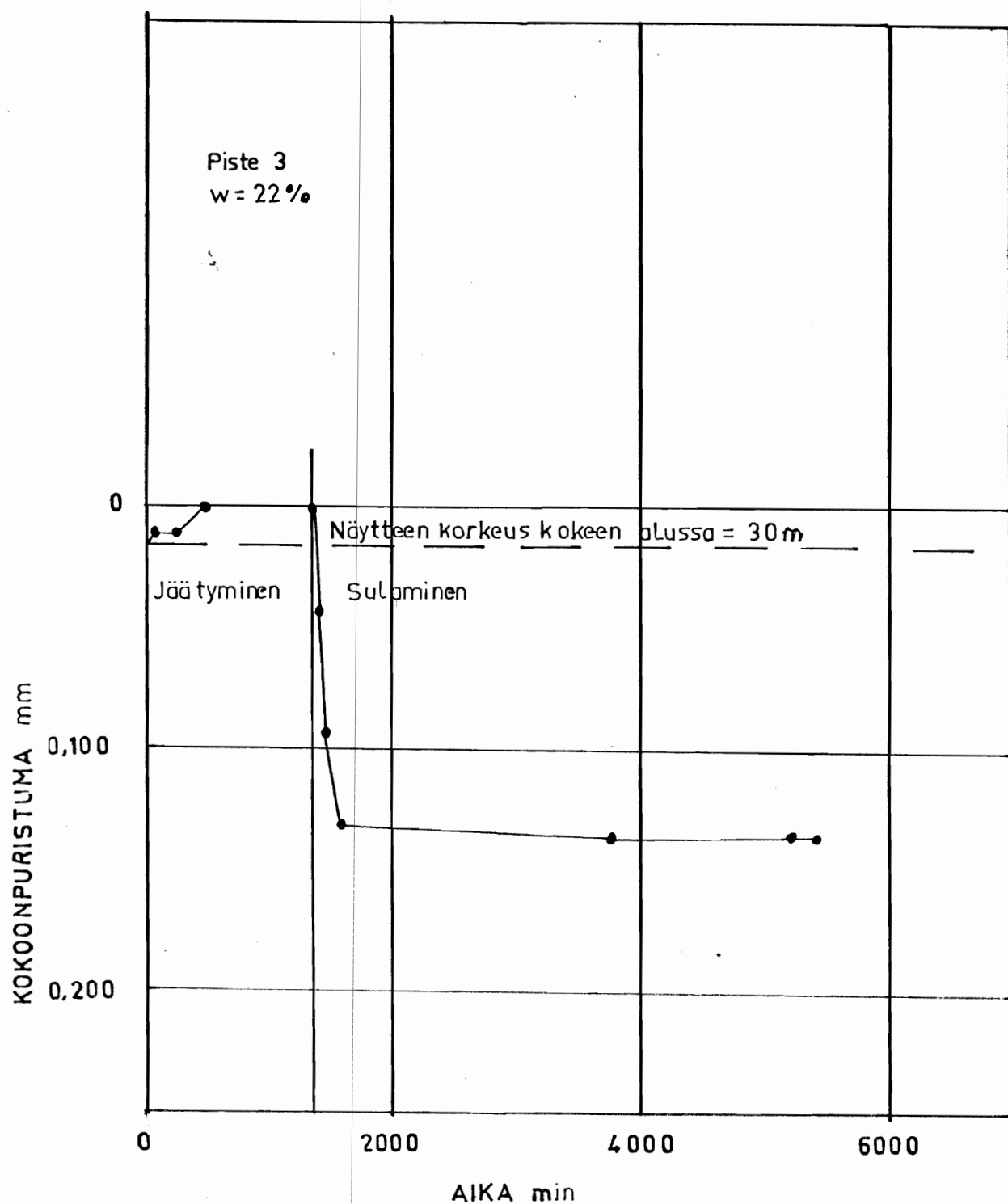
Taulukko 10. Jäätymisnousu, sulamispainuma ja sulamisaika eri maalajeille.

| Maalaji | w (%) | Jäätymis-nousu (mm) | Sulamispainuma (mm) | Sulamispainuma % | Sulamisaika (min) | Kokonaispainuma-aika (min) |
|---------|-------|---------------------|---------------------|------------------|-------------------|----------------------------|
| hHk     | 28    | 0,200               | 0,360               | 1,200            | 200               | 2000                       |
| Hk      | 22    | 0,016               | 0,136               | 0,425            | 300               | 1000                       |
| hkMr    | 7     | 0,014               | 0,140               | 0,460            | 200               | 3000                       |
| "       | 10    | 0,036               | 0,145               | 0,483            |                   |                            |
| "       | 13    | 0,110               | 0,255               | 0,850            | 200               | 3000                       |

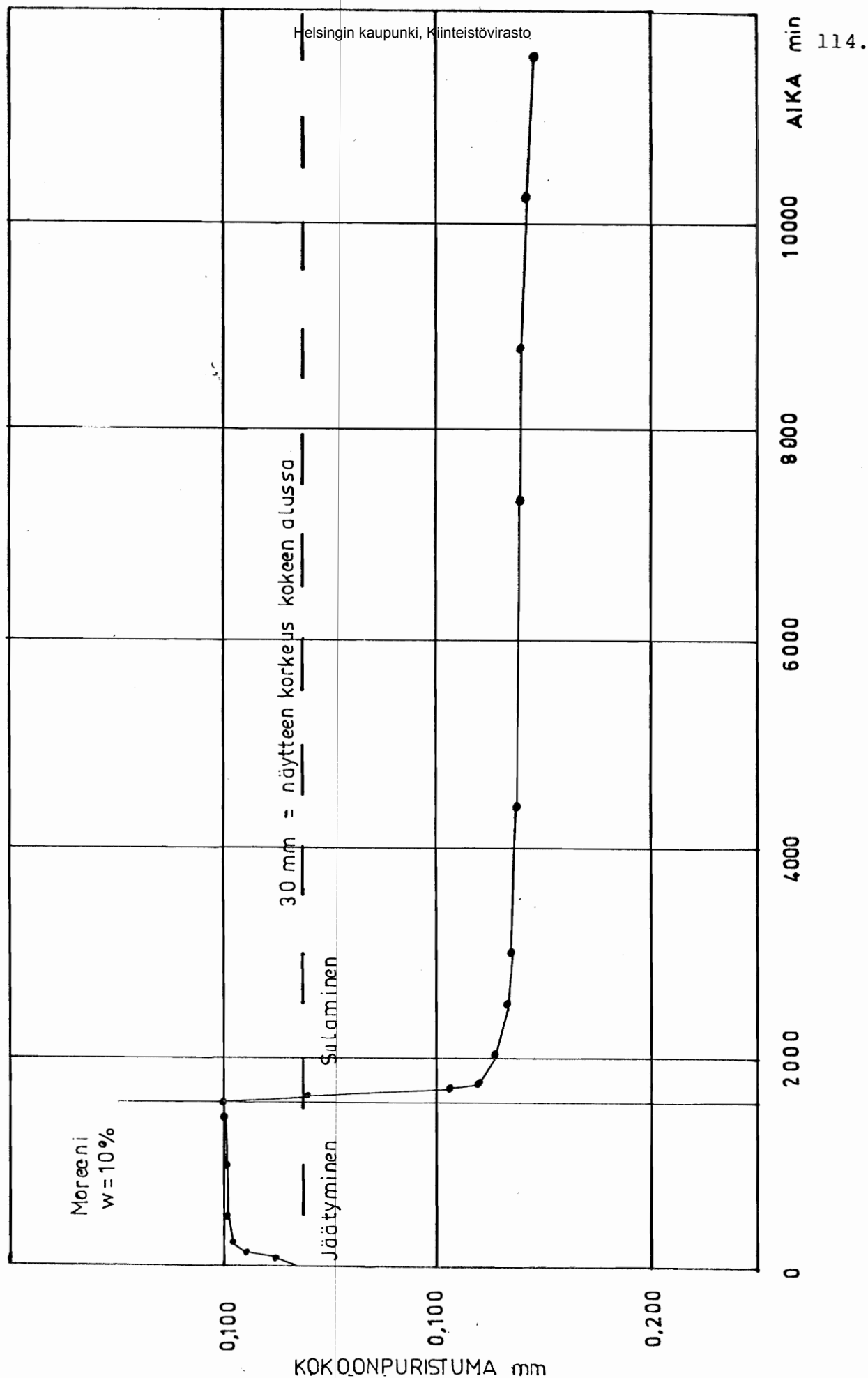
Kuvissa 81-83 on käyrät jäätymis-sulamiskokeiden kulusta /19/. Jäätymis-sulamiskokeita tehtiin vertailumielessä myös muille kuin Kluuvin ruhjeen maalajeille. Näistä kokeista saatiin tukea kokeen luotettavuudelle.



Kuva 81. Jäätymis-sulamiskokeen tulokset hienolle hiekalle /19/.



Kuva 82. Jäätymis-sulamiskokeen tulokset hiekalle /19/.



Kuva 83. Jäätymis-sulamiskokeen tulokset moreenille /19/.

## 9.

## MITATTUJEN JA ARVIOITUJEN ROUTALIIKKEIDEN VERTAILU

## 9.1

Arvioitu routanousu ruhjeessa

Ennen ruhjeen läpäisyä tehtyjen routivuuskokeiden perusteella ovat maa-ainekset Kluuvin ruhjeessa erittäin routivia ainakin tason -17,00 yläpuolella. Selvästi routimattomia olivat maanäytteet tasovälillä -20,0 - -22,0. Maanäytteet tasovälillä -17,0 - -20,0 olivat jossain määrin routivia.

Näiden kokeiden perusteella arvioitiin, että pientä routanousua tapahtuisi jääsylinterin lakiosassa.

Tunnelin läpäisyn yhteydessä otetuista näytteistä saadut rakeisuuskäyrät osoittavat selvästi, että maalajit tason -20,0 alapuolella ovat routimattomia. Kolmiakσιαaliselleissä tehtyjen routakokeiden perusteella nämä maalajit ovat routimattomia (kappale 8.4). Jääsylinterin lakiosan maalajit ovat vähän hienorakeisempia kuin tasolla -21,0 oleva hieno hiekka. Kallion routivuusominaisuuksia ei ole selvitetty. Kallion raoissa oleva savitäyte on routivaa.

Mahdollinen routanousu tapahtuisi lähinnä passiivivaiheen aikana. Aktiivijäädytysvaiheen aikana jäätymisrintama etenee niin nopeasti, että jäälinssellä ei pääse muodostumaan. Passiivivaiheen ajan nollaisotermi on lähes paikallaan kolmen, neljän kuukauden ajan. Routimiselle on tältä osin hyvät edellytykset. Vedensaanti jäätymisrintamaan on ainakin jääkuoren ulkopinnassa varmaa. Kohde sijaitsee pohjavedenpinnan alapuolella vettä johtavissa maakerroksissa. Jääsylinterin sisäpinnalla jäätymisrintaman vedensaanti on vähäistä. Valurautaverhouksen takana oleva sulan maan kerros kuivaa nopeasti ja sylinterin läpi suotautuu vain hyvin vähän vettä. Mahdollinen routanousu tapahtuu jääsylinterin ulkopinnassa. Maalajien ollessa routimattomia tai vähän routivia, voidaan olettaa routanousun jäävän hyvin vähäiseksi.

## 9.2

Jäädytyksen aikana mitatut routaliikkeet maassa

Jäädytyksen aikana ei havaittu routaliikkeitä. Painumaletkujen alimmat siivekkeet ovat noin kolmen metrin päässä jääkuoren pinnasta. Mahdolliset rou-

tanousut pitäisi havaita näissä siivekkeissä. Painumaletku V1:n alin siiveke painui passiivijäädytysvaiheen aikana 12 mm. Letku V2:n alin siiveke painui tänä aikana 13 mm. Yksittäisten mittauskertojen välillä oli joskus tuloksissa parin millin nousu edelliseen mittauskertaan verrattuna. Tämä johtuu kuitenkin mittausvirheistä.

Maan pinnalla painumalevyissä ei havaittu nousua lainkaan. Painumalevyt painuivat passiivijäädytysvaiheen aikana 10 - 15 mm. Horisontaalisia routaliikkeitä ei ole havaittu. Sivusiirtymäputkissa ei ollut mittaustarkkuuden ylittäviä siirtymiä passiivijäädytysvaiheen aikana.

## 10.

### SULAMINEN

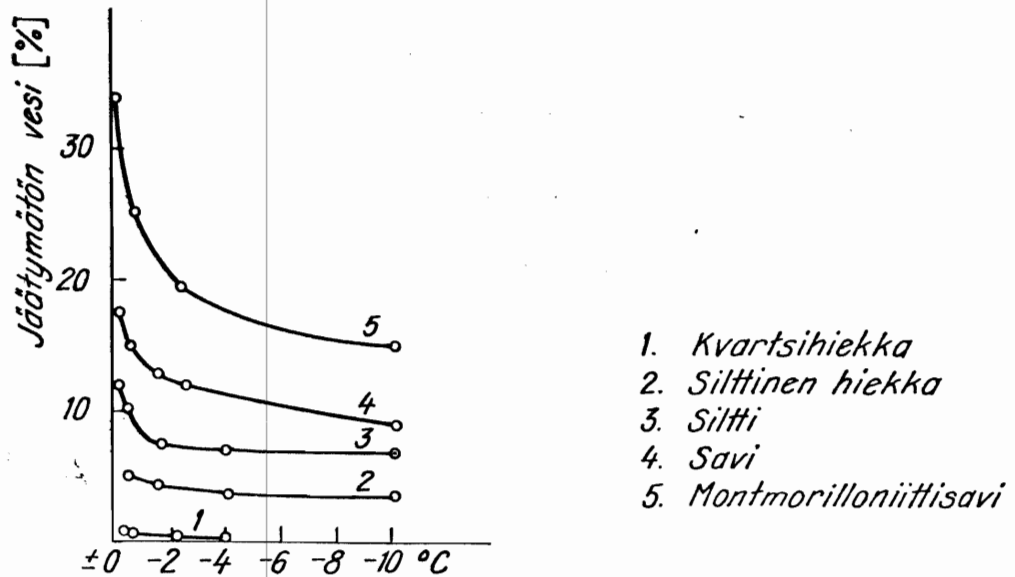
#### 10.1

#### Yleistä teoriaa jäätymisestä ja sulamisesta

Maassa tapahtuu sen jäätyessä huomattavia muutoksia. Maassa oleva irtovesi alkaa jäätyä. Vesi laajenee jäätyessään. Jäätyvään maahan kehittyy kapillaarivoimia, jotka imevät ympäristöstä vettä jäätyvään maahan. Nopeassa jäätymistapahtumassa kostea maa jäätyy yhtenäiseksi möhkäleeksi säilyttäen alkuperäisen kosteuspitoisuuden.

Hitaassa jäätymisprosessissa, missä nollaisotermi on pitkään samalla kohdalla, maassa tapahtuu sen kapillaarisesta imukyvystä riippuen linssiytymistä. Maahan muodostuu pelkkää jäätä sisältäviä linssejä. Nämä aiheuttavat suuria routaliikkeitä maassa. Maalajeilla, joiden vapaa kapillaarinen nousukorkeus on alle yhden metrin, ei linssiytymisen vaaraa ole. Savimaalajeilla linssiytymisen on hitaampaa pienestä vedenläpäisevyydestä johtuen. Routiminen on voimakkainta silttimaalajeilla. Sulamispainumat tapahtuvat samassa suhteessa kuin routanousu.

Kaikki vesi maahuokosissa ei ole aina jäässä, kun lämpötila on alle nolla astetta Celsiusta. Jäätymisaste (i) riippuu maan lämpötilasta ja maalajista. Lähes kaikki nestemäinen vesi maassa on muuttunut jäätyneeseen olomuotoon, kun lämpötila laskee alle  $-70^{\circ}\text{C}$  /16/. Kuvassa 84 on jäätyneen veden osuus nestemäisestä vedestä negatiivisen lämpötilan funktiona /17/.



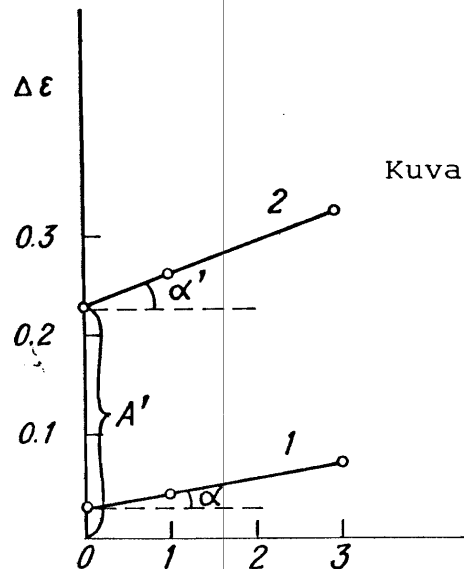
Kuva 84. Jäätymättömän veden osuus  $(100 \cdot (1-i))$  lämpötilan funktiona /17/.

Kun jäätyneen maan lämpötila nousee, on yhä suurempi osa vapaasta vedestä nestemäisessä olomuodossa. Jonkin asteista sulamista tapahtuu siis ennen varsinaista jään sulamislämpötilaa. Nollapisteen yläpuolella sulaa kaikki vesi.

Jäätyneen maan sulaessa tapahtuu kaksi vastakkaista prosessia, maan tiivistyminen sulaessa ja mineraalien laajeneminen. Tiivistymisellä tarkoitetaan maan huokoisuuden vähentymistä, kun sula vesi poistuu raepintojen välistä. Mineraalien laajeneminen voi joskus hyvin pienellä kuormituksella aiheuttaa huokoisuuden kasvua. Pienillä kuormituksilla maakerroksen pintaosissa maan kokoonpuristuvuus lisääntyy yleensä huomattavasti jäätymis-sulamisprosessin seurauksena. Kuormituksen ollessa yli  $200 \text{ kN/m}^2$  jäätymis-sulamisprosessin vaikutus jää pienemmäksi /17/.

Sulaessa kasvaa myös maan vedenläpäisevyys huomattavasti. Vedenläpäisevyys kasvaa jopa 10-100 kertaiseksi. Vedenläpäisevyysarvot palautuvat alkuperäiseksi maan asettuessa. Maan sulaessa kuormituksen alaisena yksidimensionaalisessa tapauksessa sulamispainuma noudattaa seuraavaa kaavaa /17/:

$$s = \frac{h}{1 + \epsilon_0} (\Delta \epsilon)_p \quad (64)$$



Kuva 85. Huokosluvun muutoksen suhde ulkoiseen kuormitukseen /17/.

1. Hiekka
2. Savi

Yksidimensionaalisessa sulamistapahtumassa sulamispainuma saa seuraavan muodon /17/:

$$s_{th} = \bar{A} \cdot h + \bar{a} \cdot h \cdot p \quad (69)$$

Ensimmäinen termi ( $\bar{A} \cdot h$ ) ei riipu ulkoisesta paineesta ja sitä kutsutaan sulamispainumaksi. Toinen termi ( $\bar{a} \cdot h \cdot p$ ) on luonteeltaan konsolidatiopainuma. Yli 300 kN/m<sup>2</sup> kuormituksilla useimmilla maalajeilla  $g = f(p)$  funktio ei ole suoraviivainen, vaan muuttuu loivasti käyräviivaiseksi funktioksi. Tasarakeisella hiekalla kuvaaja on suoraviivainen 400 - 500 kN/m<sup>2</sup> kuormituksiin asti. Tätä suurempia paineita varten on kehitetty seuraava kaava /17/:

$$g = \bar{A} + \bar{a} \cdot p \cdot i - \bar{b} (p_i - p_L)^m \quad (70)$$

missä

$\bar{b}$  on sulavan maan lisätiivistymiskerroin

$p_i$  " suunnittelupaine

$p_L$  " vastaava paine lineaarisessa tapauksessa

$m$  " kokeellinen epälineaalisuusparametri.

Kertoimet  $\bar{A}$  ja  $\bar{a}$  voidaan määrittää kahden samanlaisen jäätynneen näytteen avulla käyttämällä kahden eri painetta. Tällöin saadaan yhtälöryhmä /17/:

$$\begin{aligned} s_1 &= \bar{A} \cdot h + \bar{a} \cdot h \cdot p_1 \\ s_2 &= \bar{A} \cdot h + \bar{a} \cdot h \cdot p_2 \end{aligned} \quad (p_2 > p_1) \quad (71)$$



Ratkaistaan  $\bar{A}$  ja  $\bar{a}$  /17/:

$$a = \frac{s_2 - s_1}{h(p_2 - p_1)} \quad (72)$$

$$\bar{A} = \frac{p_1 s_2 - p_2 \cdot s_1}{h(p_1 - p_2)}$$

Käytännössä on vaikeata löytää luonnosta tai tehdä kahta samanlaista näytettä. Koe voidaan tehdä yhdelläkin näytteellä. Jäädyltetty maa sulatetaan ensin pienen (10 kN/m<sup>2</sup>) kuorman alla. Tällöin saadaan /17/:

$$s'_{10} \approx \bar{A} \cdot h \Rightarrow \bar{A} = \frac{s'_{10}}{h} \quad (73)$$

missä

$s'_{10}$  on sulamispainuma pienellä kuormalla (10 kN/m<sup>2</sup>).

Kerroin  $\bar{a}$  voidaan määrittää riittävällä tarkkuudella lisäämällä näytteen päällä olevaa kuormaa sulatuksen jälkeen. Saadaan /17/:

$$\bar{a} \approx \frac{\Delta s_1}{h \cdot p_1} \quad (74)$$

missä

$\Delta s_1$  on painuman lisäys ensimmäisen kuormitusportaan  $p_1$  aikana.

Kluuvin ruhjeen näytteille suoritettut jäätymis-sulamiskokeet suoritettiin vakioaineella 240 kN/m<sup>2</sup>. Tämä paine vallitsi näytteen pinnassa koko sulamisen ajan. Tämä vastaa tunnelitasolla vallitsevia olosuhteita. Sulamispainuma on tällöin:

$$s_{th} = k_p \cdot h \quad (75)$$

missä

$k_p$  on kokoonpuristuvuuskerroin

$s_{th}$  " sulamispainuma

$h$  " sulavan maakerroksen korkeus

## 10.2

### Arvioitu sulamisen aiheuttama painuma

Jäätymis-sulamiskokeista saatiin kokoonpuristuvuuskertoimet  $k_p$  sulavalle maalle (vertaa taulukko 10) /19/. Kertoimet ovat taulukossa 11. Kuvis-  
sa 3 ja 4 näkyvät maalajikerrostumat Kluuvin ruhjeessa molemmissa tunneleissa. Pohjoisessa tunnelissa on jäätynyttä maata yhteensä noin 1500 m<sup>3</sup> jääsylinterin ollessa 2,5 m paksu. Eteläisessä

missä

$h$  on sulatettavan maakerroksen paksuus

$\epsilon_0$  " alkuperäisen maan huokosluku

$(\Delta \epsilon)_p$  " huokosluvun muutos vakiokuorman vaikutta-  
essa.

Kaavassa 64 on  $(\Delta \epsilon)_p$  ainoa muuttuja maan sulaes-  
sa. Tämän muuttujan muutoksista riippuu maaperän  
kokoonpuristuvuus jäätymis-sulamistapahtuman ai-  
kana.

Suurimmat huokosluvun muutokset tapahtuvat juuri  
maan sulamisen aikana. Kuvassa 85 on esitetty  
huokosluvun muutoksen suhde ulkoiseen kuormituk-  
seen /17/. Kuvasta huomataan, että tämä suhde on  
lineaarinen ainakin 300 kN/m<sup>2</sup> kuormitukseen asti.  
Kuvassa olevan suoran viivan  $\Delta \epsilon = f(p)$  yhtälö  
voidaan kirjoittaa muotoon /17/:

$$\Delta \epsilon = A + \tan \alpha \cdot p \quad (65)$$

Merkittää  $\tan \alpha = a$ . Merkintää  $\tan \alpha = a$  voi-  
daan kutsua sulaneen maan kertoimeksi, koska  
maan kokoonpuristuvuus lisääntyy kulman kasvaes-  
sa.

Yhtälö  $\Delta \epsilon = A + a \cdot p$  osoittaa, että sulaneen  
maan huokosluvun muutos muodostuu kahdesta osas-  
ta; vakioista  $A$ , joka ei riipu ulkoisesta painees-  
ta ja kertoimesta  $a \cdot p$ , joka on suoraan verran-  
nollinen ulkoiseen paineeseen. Sulamispainuman  
yhtälö sivusiirtymien ollessa estettynä voidaan  
kirjoittaa muotoon /17/:

$$\frac{\Delta \epsilon}{1 + \epsilon_0} = \frac{s}{h} = g \quad (66)$$

Yksikkö  $g = \Delta \epsilon / (1 + \epsilon_0)$  on maakerroksen suhteelli-  
nen painuma tasaisen kuorman vaikuttaessa. Kun  
sijoitetaan yhtälössä (65) yhtälöön (66) saa-  
daan /17/:

$$g = \frac{A}{1 + \epsilon_0} = \frac{a}{1 + \epsilon_0} \cdot p \quad (67)$$

$$\text{tai } g = \bar{A} + \bar{a} \cdot p \quad (68)$$

missä

$$\bar{A} = A / (1 + \epsilon_0)$$

$$\bar{a} = a / (1 + \epsilon_0)$$

tunnelissa oli jäätyntä maata noin 1100 m<sup>3</sup>. Seuraavassa taulukossa on eri maalajien osuus jäätyneestä maasta ja sulamisesta aiheutuva maan kokoonpuristumishäviö (m<sup>3</sup>).

Taulukko 11. Eri maalajien osuus jäätyneestä maasta (m<sup>3</sup>) ja sulamishäviö (m<sup>3</sup>).

| POHJOINEN TUNNELI |       |                     |                    |                                 | ETELÄINEN TUNNELI   |                    |                                 |
|-------------------|-------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|
| Maa-laji          | w (%) | V (m <sup>3</sup> ) | k <sub>p</sub> (%) | Sulamis-häviö (m <sup>3</sup> ) | V (m <sup>3</sup> ) | k <sub>p</sub> (%) | Sulamis-häviö (m <sup>3</sup> ) |
| Hk                | 24    | 630                 | 0,85               | 5,36                            | 450                 | 0,85               | 3,8                             |
| hkMr              | 13    | 870                 | 0,85               | 7,4                             |                     |                    |                                 |
| hkMr              | 8     |                     |                    |                                 | 650                 | 0,46               | 3,0                             |
| Koko tunneli      | 1500  |                     | 0,85               | 12,76                           | 1100                | 0,61               | 6,8                             |

Sulamishäviöitä tapahtuu yhteensä noin 20 m<sup>3</sup> ja-  
kautuen siten, että pohjoisessa tunnelissa tapah-  
tuu noin 13 m<sup>3</sup> häviö ja eteläisessä tunnelissa  
noin 7 m<sup>3</sup> häviö. Keskimääräiseksi kokoonpuristu-  
vuuskertoimeksi saadaan pohjoisessa tunnelissa  
0,85 % ja eteläisessä tunnelissa 0,61 %.

Maksimipainumaa ja painumaprofiiliin muotoa voi-  
daan arvioida todennäköisyysteoreettisilla mene-  
telmillä. Maksimipainuman kaavassa (14) on tunte-  
mattomana tekijänä kerroin B. Sille saadaan ar-  
vio laskemalla B:n arvo takaperin porausvaiheen  
aikana tapahtuneista painumista. Tuolloin tapah-  
tui 0,16 m maksimipainuma 100 m<sup>3</sup> maahukasta. Tämä  
maahukka tapahtui molemmissa tunneleissa yhteensä.  
Tästä saadaan B:n arvoksi B = 1295, kun z<sub>0</sub> - z =  
24 m, eli tarkastellaan maan pinnalla tapahtuvia  
painumia. Maahukan ollessa 20 m<sup>3</sup> saadaan maksimi-  
painumaksi kaavalla (14) 30 mm:

$$s_{\max} = \frac{20}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot 1295 \cdot 24}} = 0,03 \text{ (m)}$$

Jos tarkastellaan erikseen pohjoista tunnelia saa-  
daan samalla B:n arvolla maksimipainumaksi 18 mm  
ja eteläisen tunnelin osalta 10 mm. Näiden yh-  
teisvaikutuksena saadaan Gaussin todennäköisyys-  
käyrän mukaan maksimipainumaksi noin 20 mm.

Kuvassa 86 on sulamispainuman profiili tunnelin  
keskilinjalla. Taulukossa 12 on esitetty painuma-  
käyrän arvot.

Painumakäyrän koordinaatit on laskettu Aversinin  
todennäköisyysteoriasta kehittämällä kaavalla /14/:

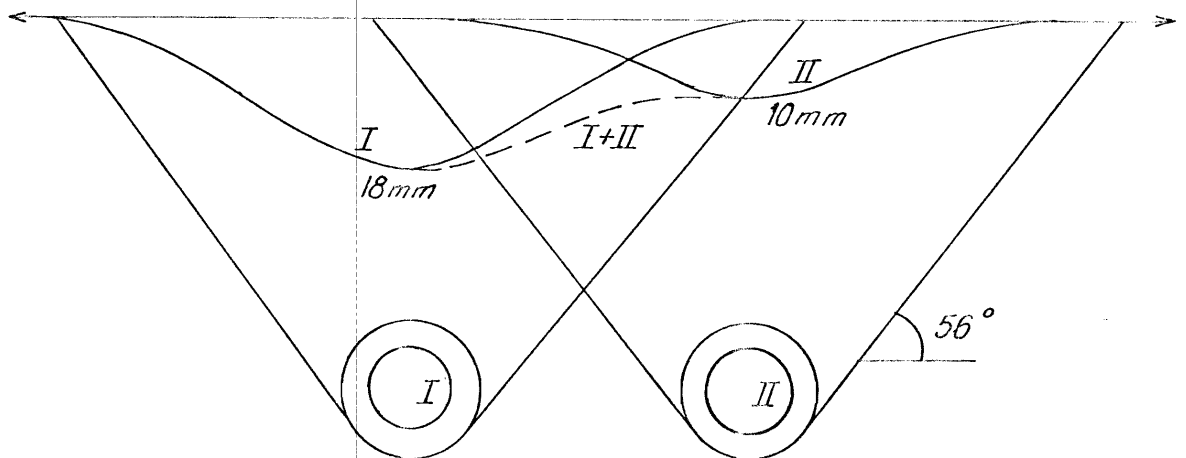
$$\eta = s_{\max} \left(1 - \frac{x}{2r}\right)^4 \cdot e^{\frac{4x}{2r}} \quad (76)$$

missä

 $\eta$  on painuman arvo pisteessä $x$  " etäisyys painuman keskipisteestä $2r$  " painumakartion säde $s_{\max}$  " painuman maksimiarvo

Taulukko 12. Painuman arvot ( $\eta$ ) eri etäisyyksillä ( $x$ ) painuman maksimikohdasta molemmille tunneleille. Vaikutusalueen säteeksi ( $2r$ ) arvioidaan 25 m.

| Pohjoinen tunneli |      | Eteläinen tunneli |      |
|-------------------|------|-------------------|------|
| $x$ (m)           | (mm) | $x'$ (m)          | (mm) |
| 0                 | 18   | 0                 | 10   |
| 1                 | 17,9 | 1                 | 9,96 |
| 5                 | 16,4 | 5                 | 9,12 |
| 10                | 11,6 | 10                | 6,42 |
| 15                | 5,1  | 15                | 2,82 |
| 20                | 0,7  | 20                | 0,04 |
| 25                | 0    | 25                | 0    |



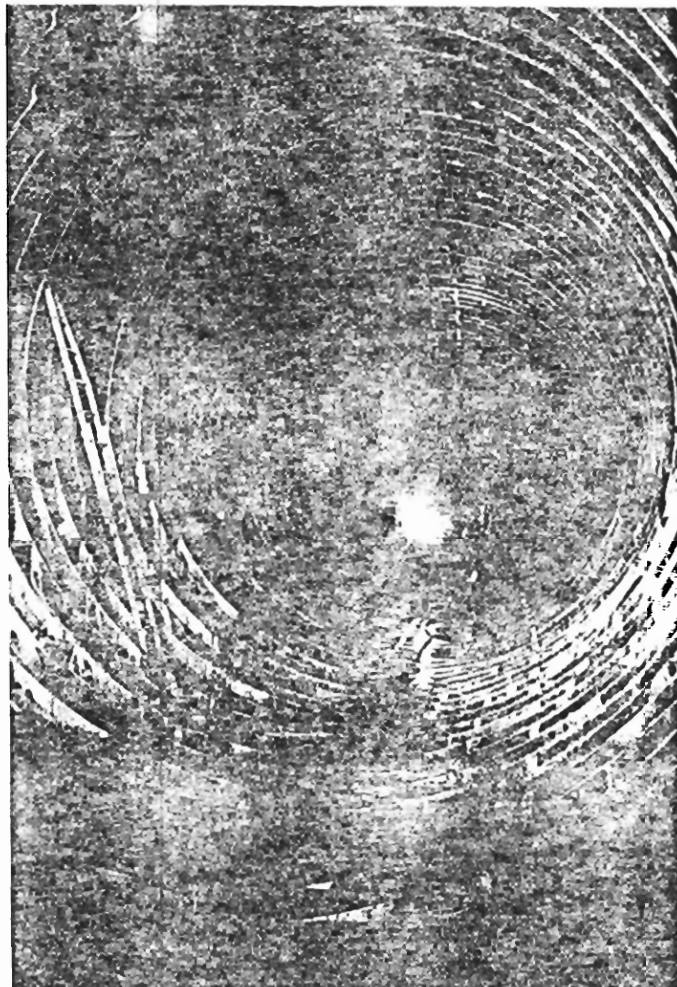
Kuva 86. Sulamispainuma maan pinnalla leikkauksessa C-C (kuva 32).

## 10.3

Valurautakuoren muodonmuutoksen aiheuttama painuma

Valurautasegmenteistä kootun tunneliverhouksen oletettiin painuvan kasaan jonkin verran, kun jääkuori on sulanut ja verhous saa kannettavakseen täyden maa- ja vesipainekuorman. Valurautaverhouksen muodonmuutoksista Kluuvin ruhjeessa ovat monet konsultit tehneet laskelmia. Tarkemmin näitä on laskenut saksalainen konsultti. He saivat finiittielementtimenetelmällä pystysuuntaiseksi muodonmuutokseksi noin 30 mm, kun maankimmomoduuliksi valittiin  $20 \text{ MN/m}^3$ . Tämä merkitsee molempien tunnelien osalle noin  $0,6 \text{ m}^3$  maa-häviötä. Pohjoisen tunnelin osuus on noin  $0,4 \text{ m}^3$ . Tämä aiheuttaa kaavan 14 mukaan noin puolen millin maksimipainuman.

Valurautaverhouksessa ei tapahtunut sulamisvaiheessa lainkaan muodonmuutoksia. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että tunneli on suurelta osin kalliion ympäröimä. Kaikissa laskelmissa oli otaksuttu laskentapoikkileikkauksen sijaitsevan äärettömän pitkässä maatunnelissa. Näin ollen painumia maanpinnalla ei tapahdu tästä johtuen. Kuvassa 87 on esitetty valmista valurautaverhoususta.



Kuva 87  
Valmista valurautaverhoususta.

## 10.4

Sulamiseen tarvittava aika

Sulamiseen tarvittavaa aikaa on melko vaikea arvioida etukäteen. Sulamisnopeus on riippuvainen ympäristöstä tulevasta lämpövirrasta. Kluuvin ruhjeessa jääsynterä sulii samanaikaisesti sekä sisä- että ulkopuolelta. Sisäpuolella vaikutti sulamisnopeuteen ilman lämpötila tunneli-tiloissa. Sulamistapahtumaa hidasti valurautaverhous, injektointimassojen ja sulaneen maan aiheuttama lämpöä eristävä vaikutus.

Jääsynteräin ulkopinnassa sulaminen tapahtui ympäröivien maalajien lämpöhäviöiden ansiosta. Tämän lämpövirran määrä on hyvin paljon riippuvainen pohjaveden lämpötilasta ja virtausnopeudesta. Pohjaveden virtausnopeus on Kluuvin ruhjeessa pieni. Maalajien vedenläpäisevyys on noin  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  m/s. Virtausgradientti on pohjavesimittausten mukaan keskimäärin luokkaa 1 %. Pohjaveden virtausnopeus vaihtelee kuitenkin suuresti riippuen kerroksen vedenläpäisevyydestä ja sijainnista.

Hiekan lämmönjohtavuus Kluuvin ruhjeessa on 2,4 W/Km ja hiekkamoreenin lämmönjohtavuus on 2,1 W/Km /18/. Maan keskimääräinen lämmönjohtavuus Kluuvin ruhjeessa on 2,2 W/Km. Kallion lämmönjohtavuus on noin 12 W/Km. Lämpötilaero pohjaveden lämpötilan ja sulavan jään välillä on  $9 - 10^{\circ}$  C. Lämpövirta jäätyneen maan ulkopintaan sulamisvaiheen aikana on noin  $20 \text{ W/m}^2$ .

Maassa tapahtuvat lämpöhäviöt lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$Q = m_1 \cdot c_k \cdot \Delta T + m_2 \cdot c_k \cdot \Delta T \cdot i \quad (77)$$

missä

Q on lämpömäärä

c " ominaislämpökapasiteetti

T " lämpötilaero

$m_1$  " maa-aineksen massa

$m_2$  " veden massa

i " jäätymisaste

Lämpöhäviö yhtä kuutiometriä maata kohden sulamisvaiheen aikana lämpötilavälillä  $-10^{\circ}$  C -  $0^{\circ}$  C yhdellä sivulla on:

$$Q = 0,33 \cdot 1,93 \text{ kJ/Kkg} \cdot 10 \text{ K} \cdot 1000 \text{ kg} \cdot 0,95 + 0,67 \cdot 0,80 \text{ kJ/Kkg} \cdot 10 \text{ K} \cdot 2650 \text{ kg} = 20250 \text{ kJ} \\ 20 \text{ MJ}$$

Jään sulamislämpö kuutiometriä maata kohden on:

$$Q = 335 \text{ kJ/kg} \cdot 0,33 \cdot 1000 \text{ kg} \cdot 0,95 = 105023 \text{ kJ} \\ 105 \text{ MJ}$$

Lämpöhäviöitä on yhteensä noin  $125 \text{ MJ/m}^3$ .

Sulamisaika lasketaan kaavalla:

$$T = \frac{Q \cdot A}{\lambda \cdot T} \quad (78)$$

missä

$\lambda$  on lämmönjohtavuus

$A$  " yksikköpinta-ala  $1 \text{ m}^2$

Tällöin saadaan sulamisajaksi Kluuvin ruhjeessa:

$$T = 1,25 \cdot 10^8 \text{ J} / (2,2 \cdot 10) = 5,68 \cdot 10^6 \text{ s} = \\ 1578 \text{ h} = 66 \text{ d}$$

Aluksi tapahtuu lähinnä jään lämpötilan kohoamista. Tämän jälkeen jääkuori sulaa noin  $0,5 \text{ m/kk}$ . Sisäpinnassa sulaminen tapahtuu hieman hitaammin. Sulamisnopeuden on Leningradin metron rakentamisen yhteydessä havaittu olevan noin  $0,2 \text{ m/kk}$ . Kluuvin ruhjeessa oli tunnelitilojen lämpötila työn aikana korkeampi kuin Leningradin tapauksessa. Lisäksi Kluuvissa maaperä on melko karkearakeista hiekkaa. Voimme otaksua sulamisnopeuden olevan noin  $0,4 \text{ m/kk}$ . Sulamisnopeus on aluksi suurempi, kun nollaisotermi on lähempänä valurautaverhousta.

Kluuvin ruhjeessa ei jääkuorta sulatettu kerralla pois. Tunnelin tiivistystöiden ajan pidettiin yllä noin yhden metrin paksuista jääkuorta. Ainoastaan jäädytysputkiston ulkokehää pidettiin toiminnassa. Sulaminen kolmen metrin jääkuoresta yhden metrin jääkuoreen vie aikaa vähän yli kaksi kuukautta. Tiivistystöiden aikana tämän yhden metrin jääkuoren keskilämpötilana pyrittiin pitämään  $-5^\circ \text{C}$ . Yhden metrin jääkuoren sulaminen vie aikaa jäädytyksen lopettamisen jälkeen noin 6 viikkoa.

Jäätymis-sulamiskokeiden yhteydessä tutkittiin myös eri maalajien sulamiskäyttäytymistä aika-akselilla /19/. Näissä kokeissa sulaminen tapahtui suunnilleen samassa lämpötilassa kuin Kluuvin ruhjeessa ( $+8^\circ \text{C}$ ). Sulaminen tapahtui ödometrisellessä ilman ympäröimänä. Varsinainen näytteiden sulaminen tapahtui melko nopeasti. Sulaminen vei aikaa keskimäärin 200 min. Tämän jälkeen tapahtui vielä konsolidaation tapaista painumista. Koko

sulamistapahtuma jälkipainumineen kesti noin 2000 min. Maan palaaminen stabiiliin tilaan kesti siis kymmenen kertaa sulamisen ajan.

Näytteiden sulamisen osalta voidaan todeta, että sulamista tapahtui myös sellin seinäpin-tojen kautta. Näytteen sivujen pinta-ala oli noin  $100 \text{ cm}^2$  eli sama kuin näytteen poikkipinta-ala. Näytteen pintaan ympäristöstä kohdistunut lämpöteho oli arviolta  $100 \text{ W/m}^2$ . Kluuvin ruh-jeessa jääkuoren pintaan tuleva lämpöteho oli arviolta  $20 \text{ W/m}^2$ .

Jos verrataan 3 cm näytettä suoraan 3 m jääkuo-reen tapahtuisi jääkuoren sulaminen kahdessa viikossa. Jos otetaan huomioon se, että näyttee-seen tullut lämpöteho oli viisinkertainen ruh-jeessa vallitseviin olosuhteisiin verrattuna saadaan kolmen metrin jääkuoren sulamisajaksi 10 viikkoa. Maan jälkipainumien nopeus ei ole samalla tavalla riippuvainen lämpövirrasta. Jos oletetaan jälkipainuman tapahtuvan suhteessa samassa ajassa kuin sulamiskokeissa, niin koko-naissulamisaikaksi saadaan 30 viikkoa.

Kuvassa 88 on hienon hiekan sulamispainuma line-aarisessa aikapainuma koordinaatistossa 250 mi-nuuttiin asti. Kuvaan on piirretty myös Tsyto-vichin teorian mukainen sulamiskäyrä /17/. Tsy-tovich ehdottaa vakiolämpötilassa tapahtuvalle sulamiselle seuraavaa funktioriippuvuutta /17/:

$$s = \alpha \cdot t \quad (79)$$

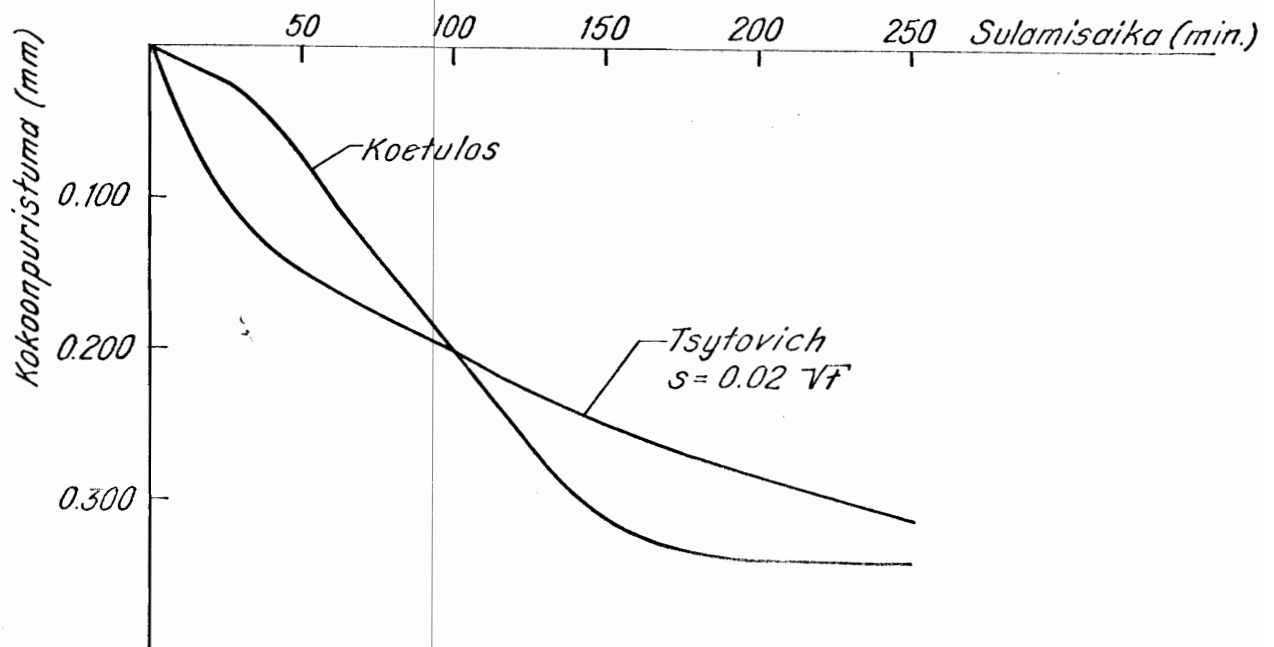
missä

s on sulamispainuma

$\alpha$  " vakio

t " sulamisaika





Kuva 88. Hienon hiekkänäytteen sulamispainuma lineaarisessa koordinaatistossa. Kuvaan piirretty myös Tsytoovichin teorian mukainen sulamiskäyrä /17/.

### 10.5

#### Jääkuoren sulaminen ja sulamisvaiheen aikana tapahtuneet muodonmuutokset.

Jääkuoren vaiheittainen sulaminen alkoi joulukuussa 1977. Tällöin suljettiin jäädytysputkistojen sisäkehät kokonaan. Ulkokehää pidettiin toiminnassa tunnelin tiivistystöiden ajan. Kun lyijytiivistykset saatiin paikoilleen, suljettiin kaikki jäädytysputket.

Sulaminen edistyi oletettua nopeammin. Tämä johtui lähinnä kallion lämpöä johtavasta vaikutuksesta. Kallio-osuuden keskilämpötila nousi nol-  
lan yläpuolelle tammikuun 1978 lopussa. Maaosuuden sulaminen tapahtui hitaammin. Maaperän keskilämpötila nousi nol-  
laan helmikuun puolivälissä. Sen jälkeen termoelementit eivät ole antaneet luotettavia tuloksia maan lämpötilasta.

Verhoukseen asennetuilla vedenpainemittareilla voitiin todeta vedenpaineen nousseen täyteen arvoonsa eteläisen tunnelin maaosalla maaliskuun alussa ja pohjoisen tunnelin maaosalla maaliskuun lopussa. Sulaminen tapahtui kokonaisuudessaan noin viidessä kuukaudessa.

Sulamisvaiheen aikana painumisnopeus oli melko hidas. Painumaletkumittausten perusteella maanpinnan painuma oli aikavälillä 28.12.77-18.4.78 letkussa V1 noin 8 mm ja letkussa V2 noin 3 mm. Painumaletkujen alimmilla tasoilla painumat olivat suuremmat. Painumaletkun V1 alin taso (-15) painui tänä aikavälinä noin 17 mm ja letkun V2 alin taso (-14) noin 6 mm.

Suurimmat sulamispainumat tapahtuivat lähellä sulavaa jääkuorta. Painumat pienenevät maan pinnalle päin, koska painuma leviää suuremmalle alueelle. Pääosa sulamispainumasta on todennäköisesti tapahtunut tämän kolmen ja puolen kuukauden sulamisen aikana.

# 11.

## PÄÄTELMIÄ KLUUVIN RUHJEEN LÄPÄISYSTÄ

Jäädytysmenetelmän käyttö tunnelin rakentamisessa on uutta Suomessa. Tämän vuoksi urakka vaati poikkeuksellisen paljon suunnittelua. Vaakaporausmenetelmän käyttö oli hyvä ratkaisu. Muutoin Helsingin keskustan liikenteelle olisi aiheutunut kohtuutonta haittaa.

Kluuvin ruhjeessa ei luotettu pelkkään jäädytysmenetelmään, vaan rakennettiin lisäksi paineilmajärjestelmä. Tämä osoittautui täysin tarpeettomaksi. Jäädytetty massa Kluuvin ruhjeessa oli lähinnä ruhjeista kalliota ja routimattomia kirkkaita. Tällaisessa maaperässä jäätyminen edistyy yleensä tasaisesti ja muodostaa tiiviin jääkuoren.

Kluuvin ruhjeen suunnittelu- ja valvontatehtävissä käytettiin paljon ulkomaisia asiantuntijoita. Ulkomaisista asiantuntijoista oli paljon apua monissa käytännön kysymyksissä. He kuitenkin helposti samaistivat Kluuvin ruhjeen johonkin ulkomaiseen kohteeseen, jossa maaperäolosuhteet olivat täysin erilaiset. Myös suomalaiset suunnittelijat tekivät monesti lämmönpoisto- ym. laskelmia olettaen koko jäädytetyn tilavuuden olevan irtomaata, jolla on vakio vesipitoisuus. Tällöin päädytään virheellisiin tuloksiin.

Urakka-aika venyi paljon alkuperäistä aikataulusuunnitelmaa pidemmäksi. Tämä aiheutti energia-, vuokra- ym. lisäkustannuksia. Energiakustannusten

kannalta oli epäedullista se, että aktiivijäädytysvaihe siirtyi kesäaikaan.

Ruhjeen läpäisyn ympäristövaikutuksista oli tehty karkeita arvioita vertaamalla maaperää Leningradin maaperään. Tällöin päädyttiin 200 mm maksimisulamispainumaan maanpinnassa. Kluuvin ruhjeen läpäisyssä syntyikin melkein 200 mm maksimipainuma maanpinnassa. Tämä johtui kuitenkin aivan eri syistä. Suurin osa painumasta johtui jäädytysreikien porauksesta. Tämä oli yllätys suunnittelijoille, koska kitkamaakerrosten oletettiin olevan tiiviitä. Näistä yllätyksistä johdun käynnistettiin tiheä mittausohjelma työn ympäristövaikutuksien selvittämiseksi.

Vaikka erilaisia mittauksia suoritettiin suuri määrä, on niistä kuitenkin paljon hyötyä vastaavanlaista urakkaa myöhemmin suoritettaessa. Näiden mittaustulosten pohjalta voidaan kitkamaissa ja kalliossa suoritettavan jäädytystyön ympäristövaikutuksia arvioida melko hyvin.

## 12. YHTEENVETO

Jäädytysmenetelmän käyttö tunnelin rakentamisessa on uutta Suomessa. Jäädytysurakoita on tehty paljon ulkomailla. Menetelmää on sovellettu eniten Neuvostoliitossa.

Kluuvin ruhjeessa olosuhteet olivat kuitenkin erilaiset. Suurin osa jäädytettävästä massasta oli ruhjeista kalliota. Suunnitteluvaiheessa maaperän arveltiin olevan tunnelin katto-osalla routivaa. Urakkaan ryhdyttäessä ei tunnettu riittävän hyvin ruhjeen läpäisyn ympäristövaikutuksia.

Tämän vuoksi rakennettiin Kluuvin ruhjeen tunnelien päällä oleviin maakerroksiin tarkkailumittausjärjestelmä. Tämä muodostui painumalevyistä, painumaletkuista, huokoskärjistä, sivusiirtymäputkista, pohja- ja orsivedenpinnan havaintokärjistä. Tämän mittausjärjestelmän avulla voitiin seurata maaperän liikkeitä ja vedenpainetta eri maakerroksissa. Tässä työssä pyrittiin selvittämään tämän mittausverkoston avulla tunnelin rakentamisen aiheuttamia muutoksia maaperässä Kluuvin ruhjeen läpäisyn yhteydessä. Mittauksia tehtiin melko tiheästi koko rakentamisen ajan (kuva 13 ).

Porausvaiheen aikana tapahtuneet suuret painumat tulivat kaikille osapuolille yllätyksenä. Porausvaiheen alussa Kampin puolen pohjoisen perän porauksen yhteydessä tapahtuivat suurimmat maavuodot tunneliin. Tällöin oli painumisnopeus suurimmillaan. Suurin osa painumasta tapahtui kuitenkin hiekkakerrosten tiivistymisen seurauksena. Painumisnopeus hidastui huomattavasti porausvaiheen jälkeen.

Suunnitteluvaiheessa epäiltiin, että jäätymisen seurauksena maakerroksissa tapahtuu routimista. Routimisen seurauksena tapahtuisi suurehko sulamispainuma, jonka maksimiarvo maanpinnalla olisi 100-200 mm.

Rakentamisen aikana tehdyt routakokeet osoittivat kuitenkin jäädytetyn maaperän olevan routimatonta ko. tasolla vallitsevassa paineessa. Jäätymis-sulamiskokeiden perusteella sulamisen aikana tapahtuvaksi maksimipainumaksi saatiin 20 mm.

Mittausverkoston avulla voitiin todeta, ettei routanousua tapahtunut. Painumaletkujen siivekkeet eivät millään tasolla nousseet jäädytyksen aikana. Painumalevyt ja -letkut osoittivat noin 20 mm maksimipainumaa maan pinnalla neljän kuukauden sulamisen jälkeen. Jäätymis-sulamiskokeet antoivat melko hyvän arvion sulamispainumalle.

Kluuvin ruhjeen mittausverkoston avulla saatiin paljon hyödyllistä tietoa jäädytysmenetelmän ympäristövaikutuksista. Mittaukset antoivat selvän kuvan maaperän liikkeistä.

Osa sivusiirtymäputkista oli liian kaukana painuman keskipisteestä, jotta olisi voitu havaita mitään sivusiirtymää. Sivusiirtymämittausten osuutta olisi ilmeisesti voitu vähentää ja lisätä esimerkiksi painumaletkujen lukumäärää.

Työssä on tarkasteltu myös jääsynterinin muodostumisen vaatimaa aikaa. Chakimovin menetelmällä laskettu jäätymis aika sopii melko hyvin yhteen lämpötilamittausten kanssa.

Lisäksi tarkasteltiin jääkuoren lujuutta rakentamisen aikana tehtyjen maan lujuuskokeiden perusteella. Näiden laskelmien perusteella Kluuvin ruhjeessa käytetyn kahden ja puolen metrin vahvuisen jääkuoren varmuus pitkäaikaista murtumista vastaan keskilämpötilassa  $-12^{\circ}\text{C}$  on noin kaksi. Sulamisaikavaiheessa maan- ja vedenpaine kuormat siirtyvät valurautaverhoukselle, kun jääkuoren paksuus on noin 1 m ja lämpötila  $-3^{\circ}\text{C}$  (kuva 67 ).

## ENGLISH SUMMARY

The usage of freezing method is new in Finland. The changes in soil caused by the tunnel construction with the freezing method were not well known in the planning stage of the contract. Therefore a geotechnical measuring net was built in soil layers above the tunnels. This system is formed of settlement plates, settlement tubes, horizontal displacement tubes, porewaterpressure measuring heads, groundwater- and topwater measuring heads. With this measuring system the ground movements and waterpressures could be observed. The main theme of this work was to clear up the changes that occur in the earth-layers due to the construction of the Kluuvi cleft.

The big settlements that took place during the boring of the freezing tubes were a surprise. Earth losses happened in the beginning of the boring stage in the northern chamber of Kamppi. At this stage the settlement speed was the fastest. The greatest part of the settlement was, however, due to the compaction of sand layers during the boring stage. The settlement speed slowed down immediately after the boring stage.

In the planning stage it was doubted that the frozen soil layers would heave and in consequence of this a big settlement, whose maximum value was approximated to be 100-200 mm, would happen.

The heave tests of frozen samples done during the construction period showed that the soil on the tunnel level will not heave in the pressure prevailing on the tunnel level. Thaw settlements will be pretty small. On the basis of the freeze-thaw tests made in VTT the maximum ordinate of the thaw settling will be about 20 mm.

The time needed for an ice cylinder to form is also calculated by different methods. The freezing time calculated by the Chakimovs method fits well with the soil temperature measurements made in the Kluuvi cleft.

In addition to this the strength of the ice-core was calculated on the basis of the strength tests of frozen samples taken from the Kluuvi cleft. Based on these calculations, the long time safety factor

for the two and a half meter thick ice-core was about two. In the thawing stage the ice-core will not carry earth- and waterpressure loads, when the thickness of the ice-core diminishes to one meter and the temperature of the frozen ground rises above  $-3^{\circ}$  C.

## KIRJALLISUUSLUETTELO

1. DORMAN J.  
Iskusstvennoje zamora živanije gruntov pri stroitelistve metropolitenov, Moskova 1971.
2. HANNA T.H.  
Foundation instrumentation, Trans. Tech.S.A. First Ed. 1973, 372 s.
3. HELENELUND K.V.  
Maanrakennusmekaniikka,  
TKY Otapaino, Otaniemi.
4. HELENELUND K.V.  
Om konsolidering och sättning av belastade marklager,  
Helsingfors 1951, 204 s.
5. HELENELUND K.V.  
Pohjaveden alentamisesta aiheutuva huokosvedenpainneen muutos ja konsolidaatiopainuma,  
Rakennustekniikka 1, 1976, s.69-72.
6. JESSBERGER HANS LUDWIG und NUSSBAUMER MANFRED  
Anwendung des Gefrierfahrens,  
Die Bautechnik 12 (1973) s. 414-420.
7. JUMIKIS ALFREDS  
Thermal soil mechanics,  
Rutgers University Press, New Jersey 1966, 267 s.
8. CHAKIMOV  
Artificial freezing of soils,  
Translation, Jerusalem 1966, 121 s.
9. MORGAN H.D.  
A contribution to the analysis of stress in a circular tunnel,  
Geotechnique, Volume XI March 1961 number 1, s.37-46.
10. Permeabilitet och kapillaritet,  
Svenska Geotekniska Föreningen,  
Byggeforsknings informationblad B7:1972, 44 s.
11. PÄTZOLD JÜRGEN  
Empfehlungen für Messungen in Zusammenhang mit schildvorgetriebenen Tunneln,  
Die Bautechnik 9 (1972), s. 296-301.

12. Rakennustekniikan käsikirja 1,  
Yleiset perusteet 1,  
Kustannus Oy Tammi, Helsinki 1969.
13. SCHMIDT B.  
Settlements and ground movements associated with  
tunneling in soil,  
University of Illinois, Urbana III  
USA D.Thesis 1969, 224 s.
14. SZECHY K.  
The art of tunneling,  
Budapest 1967, 891 s.
15. Tehnieckskije uslovija na proizvodstvo rabot po  
iskyss vennomu zamora zivaniyu gruntov pri  
stroitelistve metropolitenov i tonnelej,  
Moskova 1956.
16. TORSTENSSON BENGT-ARNE  
Mätning av lerans portryck ger uppgift om  
sättningar,  
Byggmästaren 8, 1975, s.15-19.
17. TSYTOVICH N.A.  
The mechanics of frozen ground,  
Mc Graw-Hill Book Company 1975, 426 s.
18. Vremennoje rukovodstvo po projektirovaniju  
protssessa zamora živanija porod dlja prohedki  
vertikalnyk stvolov šaht,  
Harkov 1971.
19. Kluuvin ruhjeen jäädytetyn maan laboratoriokokeet  
VTT, Geotekniikan laboratorio,  
Tutkimusselostus A 2383/78.
20. Lausunto maapohjan painumisominaisuuksista Rauta-  
tientorin ja ns. Kluuvin ruhjeen alueella,  
VTT, Geotekniikan laboratorio, GEO/101/74
21. Expert evidence. The laboratory testing of soil  
samples taken from "Kluuvin ruhje".  
VTT, Geotekniikan laboratorio. G-3178/72.