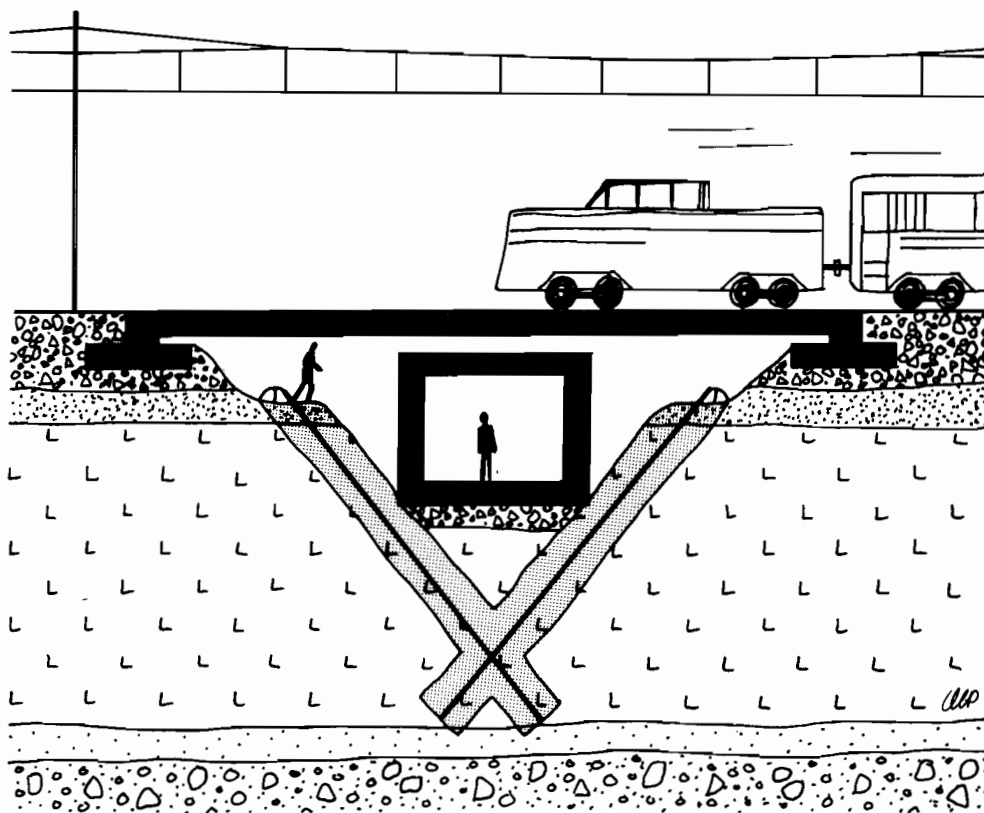




Ilkka Vähäaho

JÄÄDYTYSMENETELMÄN KÄYTTÖ

Ilkka Vähäaho

J Ä Ä D Y T Y S M E N E T E L M Ä N K Ä Y T T Ö

Geoteknisen osaston tiedote 44

ALKUSANAT

Tämän 7 vuotta kestäneen jäädytysprojektin alkaessa olla julkaisukunnossa on aika kiittää kaikkia niitä henkilöitä ja tahoja, jotka ovat matkan varrella myötävaikuttaneet.

Suunnitelman tilaajana ja jäädytyskokeen rahoittajan ennen sen muuttumista "tieteelliseksi tarkasteluksi" oli rakennusviraston katuosasto. Jäädytyskoetta ovat omilla panoksillaan tukeneet myös Lemminkäinen Oy ja Hankkija, lisäksi kokeen seurantar ryhmässä oli myös VR:n ja VTT:n edustus.

Myöhemmän työskentelyn osalta kiitos koko geotekniselle osastolle sekä erityisesti Usko Anttikoskelle rohkaisusta kehitystyössä, kenttätoimistolle ja laboratoriolle kiitos lähes loppumattomien pyyntöjen toteuttamisesta, Ahti Latvalalle jäädytysödometrikokeiden suorittamisesta, Juha Korvelle ja Aimo Karviselle lämpötilamittausaineiston atk-käsittelystä, Janusz Sowinskille avustamisesta korvauskuormalaskelmissa, Marja Paloniemelle Auto-Cad ja Lotus 1-2-3 ohjelmistoilla toteutetuista kuvista, edelliselle ja Paula Laukolle liitepiirustuksista sekä Ritva Elsteelle vaikeaselkoisen tekstin puhtaaksikirjoittamisesta.

Kaikki tässä tiedotteessa julkituotu aineisto on tarkoitettu kaikkien tarvitsijoiden käytettäväksi ja kritisoitavaksi. Useita väittämiä on tietoisesti esitetty tieteellisiä tarkasteluja ajatellen superilla aineistoilla, mutta olisi kohtuullista että vastaväittäjät ainakin perustaisivat omat teoriansa tieteellisesti kattaviin aineistoihin. Tärkein tulos ainakin kirjoittajan mielestä on tiettyjen uusien lainalaisuuksien löytyminen. Kaavoissa esitettyjen kertoimien arvoille on sen sijaan tarpeen saada tarkennusta ja kattavuutta. Suurin kiitos tästä työstä olisi se, että tutkijat jatkaisivat ja monipuolistaisivat alan kehitystyötä.

Helsingissä, kesäkuun 22. päivänä 1987

Ilkka Vähäaho

TIIVISTELMÄ

Tämän työn yhteydessä on tutkittu sekä jäädytetyn että sulaneen saven ominaisuuksia laboratoriossa ja kentällä.

Kirjoittaja on päättänyt myös esittämään aikaisemmin julkaisemattomia riippuvuuksia sulavalle savelle. Sulamisen tai kuormituslisäyksen aiheuttamat kokoonpuristumat voidaan määrittää saven vesipitoisuuteen ja normaaliin palautusmoduuliin perustuen. Veden poistumiselle jäätyksen ja sulamisen seurauksena saatiin yhteys, jonka mukaan vesipitoisuus jäätyksen ja sulamisen seurauksena putoaa n. kahteen kolmasosaan alkuperäisestä arvostaan. Leikkauslujuus pienenee alkuperäisestä sulamisvaiheen aikana ja alkaa sen jälkeen kasvaa. Lopullinen leikkauslujuus on alkuperäistä suurempi. Häirityn leikkauslujuuden kasvu on vielä huomattavasti suurempaa, eikä edes sulamisvaiheen aikaista leikkauslujuuden pienenemistä ole havaittu.

Jäädytetyn saven sadan tunnin kuormitusta vastaavaksi mitoitusleikkauslujuudeksi saatiin n. 50 kertaa saven alkuperäinen leikkauslujuus. Sulamispainumien suuruudesta huolimatta huokosvedenpaine ei noussut normaaleja konsolidaatiopainumia vastaavasti. Lisäksi sulamispainumat tapahtuvat vastaavia kuormituksen aiheuttamia konsolidaatiopainumia nopeammin. Saven jäädytykselle mitattiin keskimääräiseksi kokonaisenergian tarpeeksi n. 200 kWh/m³, kun teoreettinen veden jäätyminenenergia on n. 100 kWh/m³. Näin ollen pelkkä energiakustannus ei tee jäädytysmenetelmän käytöstä kallista ratkaisua.

Kaikki esitetty viittaa siihen, että jäätyminen muuttaa pysyvästi saven alkuperäisen rakenteen. Maalajimuutos on kirjoittajan mielestä lähinnä savesta silttiin päin. Edelleen näiden pohdintojen seurauksena tuntuu kuivakuoren muodostumiselle löytyvän luonnollinen pakkasesta johtuva selitys. Samoin saviluiskien sortumisille maassamme näyttäisi löytyvän ainakin yksi hyvä selitys, nimittäin pakkasten jälkeen sulaneiden savikerrosten heikentynyt leikkauslujuus.

ABSTRACT

This work has been done under the title "The Use of Ground Freezing". It contains tests on both frozen and thawed clays with water content from 40...120 % of the weight of solids. Tests were made in laboratory and in the field.

The author presents some new relations to thawing clay. Settlements caused by thawing or extra loads can be determined from the results of water content and normal oedometer tests. The outflow of water from frozen and thawed clay has been observed to drop the water content to two thirds from the original value. Shear strength decreases during thawing process but later on begins to increase and the final strength is bigger than the original. Increase in the disturbed shear strength is still much bigger and even the drop under thawing was not observed with disturbed shear strength.

The ultimate design shear strength for frozen clay during 100 hours load was figured to be about 50 times the original shear strength. In spite of dimensions of thawing settlements the pore water pressure did not increase as it does with consolidation settlements. Besides, thawing settlements occurred faster than consolidation settlements. The need of total energy was measured to c. 200 kWh/m³ of clay when the theoretical freezing energy of water is c. 100 kWh/m³. So at least energy costs do not make the use of freezing method too expensive.

All that is presented indicates that freezing changes the structure of clay permanently and that the change in soil type is from clay to silty material. Furthermore, the origin of dry crust has at least to the author got a new natural explanation and it is the frost. Similarly some land slides have got at least one good explanation which is the decrease in shear strength after cold periods.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	2
TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
MERKINNÄT	6
1. JOHDANTO	7
2. KYLÄNVANHIMMANTIEN ALIKÄYTVÄN POHJASUHTEET	8
3. JÄÄDYTETYILLE NÄYTTEILLE TEHDYT KOKEET	9
3.1 Puristuskokeet	9
3.2 Leikkauskokeet	9
3.3 Kokoonpuristuvuuskokeet	10
3.4 Mitoitusarvot Kylänvanhimmantien kohteessa ...	10
4. POHJARAKENNUSTAPA	11
5. SULAMISPAINUMA-ANALYYSI	12
5.1 Ensimmäinen sulaminen	12
5.2 Muut jäätymisilmiöön liittyvät liikkeet	16
5.3 Syy sulamispainumiin	16
5.4 Laskentaesimerkkejä	21
6. JÄÄDYTYSKOE	25
6.1 Instrumentointi	25
6.2 Koetulokset	26
6.2.1 Jäätyminen ja energia	26
6.2.2 Huokosvedenpaine ja painumat	33
6.2.3 Siipikairaukset	37
7. YHTEENVETO	42
KIRJALLISUUSLUETTELO	45
LIITELUETTELO PIENENNETYISTÄ PIIRUSTUKSISTA	46

MERKINNÄT

A	=	sulamisen aiheuttama kokoonpuristuma kun kuormitus pysyy vakiona [%]
a	=	sulaneen maan kokoonpuristuvuusmoduuli [MPa]
d	=	jäätyneen kerroksen paksuus
G _e	=	näytteen paino ennen kuormitusta
G _j	=	näytteen paino kuormituksen jälkeen
k ₁	=	sulamispainumakerroin (≈ 3)
k ₂	=	kerroin (≈ 20)
k ₃	=	kerroin (≈ 40)
k ₄	=	sulaneen maan kokoonpuristuvuusmoduulikerroin ($\approx 2...4$)
k _w	=	vesipitoisuuden pienenemiskerroin ($\approx 2/3$)
m ₂	=	ödometrikokeesta määritetty palautusmoduuli [MPa] kun jännityseksponentti $\beta_2 = 1$
r _t	=	leikkauslujuuden muutoskerroin
S	=	painuma
S _k	=	konsolidaatiopainuma
S _{ke}	=	kartioleikkauslujuus ennen jäädytystä
S _{kj}	=	kartioleikkauslujuus jäädytyksen jälkeen
S _s	=	siipikairaleikkauslujuus ennen jäädytystä
S _{sj}	=	siipikairaleikkauslujuus jäädytyksen jälkeen
S _{sh}	=	häiritty leikkauslujuus ennen jäädytystä
S _{shj}	=	häiritty leikkauslujuus jäädytyksen jälkeen
V	=	näytteen tilavuus ennen koetta
w	=	vesipitoisuus kuivapainosta [%]
w _j	=	vesipitoisuus kuivapainosta [%] jäädytyksen ja sulamisen jälkeen
β_2	=	jännityseksponentti
$\Delta \varepsilon$	=	suhteellinen kokoonpuristuma [%]
$\Delta \varepsilon_2$	=	toistojäädytyksen ja sitä seuraavan sulamispainuman yhteisvaikutus [%]
$\Delta \varepsilon_3$	=	kolmannen jäädytyksen ja sitä seuraavan sulamispainuman yhteisvaikutus [%]
$\Delta \varepsilon_k$	=	konsolidaatiosta aiheutuva kokoonpuristuma [%]
$\Delta \sigma$	=	kuormituslisäys sulamispainuman jälkeen

1. JOHDANTO

Tämä työ on lähtenyt liikkeelle normaalina vaativana pohjarakennussuunnitteluprojektina vuoden 1979 lopulla. Suunnittelukohteena, joka on edelleen toteuttamatta, on Kylänvanhimmantien kevyenliikenteen alikäytävä. Tämä pääradan alittava tunneli yhdistäisi toisiinsa Oulunkylän ja Käpylän ulkoilualueet.

Tärkein tekijä, joka johti jäädytysvaihtoehtoon oli lähtötieto, jonka mukaan suurimmat sallitut katkot rataa kohti olisivat 4 tuntia, ja nekin öisin. Suunnittelu ja tutkimukset ehtivät jo melko pitkälle ennen kuin lähtöarvot muuttuivat ratkaiseviltä osin, ja kumosivat pääosin ne syyt, joiden vuoksi jäädytystä hyväksikäyttävää suunnitelmaa laadittiin. Ajo- ja sähkökatkot voivat nimittäin olla huomattavasti aiemmin ilmoitettua pitemmät ja mahdollistavat näin perinteisemmätkin rakentamismenetelmät, vaikkei urakkakilpailua olekaan vielä käyty.

Pohjarakennussuunnitteluvaiheessa kertyi kuitenkin niin paljon uutta ja mielenkiintoista aineistoa, että jäädytyskoe päätettiin rakennuttajan, suunnittelijan ja urakoitsijan yhteisvoimin toteuttaa.

Tähän tiedotteeseen on koottu tiivistetyssä muodossa jäädytystä koskeva laboratorio- ja kenttäkoeaineisto sekä kirjoittajan havaitsemat riippuvuudet eri tekijöiden välillä. Tarkoituksena oli löytää normaaleihin parametreihin perustuvia suunnittelua palvelevia lainalaisuuksia, joita voitaisiin soveltaa yleisestikin alustavassa suunnittelussa sekä toisaalta antaa hankittu tieto tarvitsijoiden käyttöön ja edelleen kehitettäväksi.

2.

KYLÄNVANHIMMANTIEN ALIKÄYTTÄVÄN POHJASUHTEET

Maanpinta on raiteiden kohdalla noin tasossa +23,7...+24,0. Raiteiden Käpylän puoleisen vastapenkereen kohdalla maanpinta on pääosin tasossa +22,6 ja pengeralueiden ulkopuolella noin tasossa +21,5...+22,4.

Päällimmäisenä maakerroksen pengeralueella on kitkamaatäytettä, jota on syvimmillään vastapenkereen kohdalla noin tasoon +20,0. Täyttemateriaali on niin tiivistä, ettei sitä ole voitu läpäistä painokairalla, vaan pintakerros on puhkaistu poraamalla. Lohkareita ei kairauksissa ole tavattu muualla kuin vastapenkereen kohdalla. Kitkamaatäytteen alla on saven sekainen täyttemaakerros, joka on syntynyt penkereen rakentamisen yhteydessä.

Saven yläpinta, täytteessä paikoin esiintyviä savi-linssejä lukuunottamatta on noin tasossa +19,7...+21,0.

Savikerros paksunee alikäyttävän suunnassa Oulunkylän puolelta Käpylään päin siten, että saven alapinta on korkeimmillaan noin tasossa +18,5 ja alimmillaan noin tasossa +12,7. Savikerroksessa esiintyy paikoin silttivilikerroksia. Saven leikkauslujuudeksi on siipikairalla mitattu arvoja, jotka vaihtelevat penkereen alla välillä 11...24 kPa ja pengeralueen ulkopuolella välillä 8...15 kPa. Saven vesipitoisuus vaihtelee penkereen alla välillä 40...85 % ja ulkopuolella välillä 45...95 % kuivapainosta. Saven alapinta esitetään käyrästönä piirustuksessa GEO 2203.208.

Saven alla on paksuimmillaan noin 1,3 m silttiä ja tämän alla silttimoreenia, jota on paikoin jopa tasolle +6,0 asti.

Pohjavedenpintaa on seurattu raiteiston kummallekin puolelle asennetuista havaintopisteistä (2203.01S ja 2203.03S). Pohjavedenpinta on havaintoaikana 4.1.1980...11.3.1987 vaihdellut rajoissa +20,35...+21,84.

Pohjasuhteet käyvät yksityiskohtaisesti ilmi leikkauspiirustuksista GEO 2203.203, 204, 206 ja 207.

3. JÄÄDYTETYILLE NÄYTTEILLE TEHDYT KOKEET

3.1 Puristuskokeet

Ensimmäisessä vaiheessa jäädytettiin 15 häiriintymätöntä näytettä, joista 14 oli savia ja yksi siltti, lämpötilaan -10°C . Puristuskokeet suoritettiin samoin lämpötilassa -10°C . Kuormitusnopeutena käytettiin 100...200 kPa/min. Tyypillinen kuormitus-koonpuristumakäyrä esitetään piirustuksessa GEO 2203.215. Kuten piirustuksesta käy ilmi, niin puristusjännityksen huippuarvo saavutetaan vasta suurilla kokoonpuristuman arvoilla. Murtokuormituksen ja palautuksen jälkeen tehdyissä toistokuormituksissa saavutettiin lähes yhtäsuuret puristusjännityksen arvot kuin ensikuormitusvaiheessa.

Piirustuksessa GEO 2203.216 esitetään yhteenveto suoritetuista kokeista. Piirustuksessa esitetään puristusjännityksen huippuarvot ja näytteiden vesipitoisuudet. Lisäksi siinä esitetään vertailukokeina tehdyt puristuskokeet jäädymättömille näytteille.

Näytteen puristuslujuuden ja vesipitoisuuden välisen yhteyden tutkimiseksi suoritettiin regressioanalyysi kolme parametria sisältävällä potenssifunktiolla. Tulokseksi saatiin piirustuksessa GEO 2203.217 esitetty käyrä.

3.2 Leikkauskokeet

Jäädytetyn maan suuren lujuuden vuoksi on suorien leikkauskokeiden tekeminen varsin hankalaa. Tässä onnistuttiin lopulta käyttämällä geoteknisellä osastolla kehitettyä putkileikkauskoetta. Kokeessa käytettiin häiriintymättömiä näytteitä. Näytteet puristettiin sulina esikuormitusta vastaavaan tilaan, jonka jälkeen ne jäädytettiin lämpötilaan -10°C . Samoista näyteputkista tehtiin myös normaalit puristuskokeet ja pyrkimyksenä oli selvittää, kuinka leikkauslujuus voidaan määrittää puristuskokeen perusteella. Kuormitusnopeus oli molemmissa koetyypeissä 200 kPa/min. Näytteistä mitattiin myös jääty-misen aiheuttama nousu. Leikkauskokeita tehtiin 5 kpl ja vertailevia puristuskokeita 6 kpl.

Tulokseksi saatiin, että jäädytetyn saven 10 % kokoonpuristumaa vastaavan puristuslujuuden ja putkileikkauksena mitatun leikkauslujuuden suhde oli noin 2. Näytteissä, joiden vesipitoisuus vaihteli välillä 38...110 % kuivapainosta mitattiin jääty-misen aiheuttamaksi nousuksi keskimäärin 5 %.

Jäätymisnousut konsolidoimattomille ja konsolidoidulle näytteille, näytteiden mitatut liikkeet puristus- ja leikkauskokeissa, puristusjännityksen arvot 10 % kokoonpuristumalla, murtopuristumalla ja toistokuormituksella, leikkausjännityksen arvot murtohetkellä sekä 10 % kokoonpuristumaa vastaavan puristusjännityksen suhteet leikkausjännitykseen esitetään piirustuksessa GEO 2203.218.

3.3

Kokoonpuristuvuuskokeet

Jäädytetyn ja sulatetun maan käyttäytymisen arvioimiseksi tehtiin kuormituskokeita. Näytteet puristettiin aluksi jännitystilaan, joka vastaa tilannetta ennen rakentamista. Tämän jälkeen näytteet jäädytettiin lämpötilaan -10°C , joka vastaa tilannetta jäädytyksen jälkeen ennen rakentamista. Todellisen tilanteen jäljittelyä jatkettiin suorittamalla jännitystilän pienennys, joka vastaa rakentamisen jälkeistä tilannetta ennen kuin sulatus alkaa. Näytteiden annettiin seuraavaksi sulaa ja tämän prosessin päätyttyä suoritettiin vielä lisäkuormitusta, jotta rakentamisen ja sulatuksen jälkeistä kehitystä voitaisiin arvioida. Näiden kokeiden tulokset esitetään piirustuksessa GEO 2203.219.

Edellisiin koejärjestelyihin tehtiin muutos, jolla saatiin selville kahteen ja kolmeen kertaan jäädytetyn ja sulatetun saven kuormitus-kokoonpuristumakäyttäytyminen. Näiden kokeiden tulokset esitetään piirustuksessa GEO 2203.220. Tässä piirustuksessa on myös vertailun vuoksi esitetty normaalit ödometrikokeet samoilta tasoilta otetuille näytteille.

3.4

Mitoitusarvot Kylänvanhimmantien kohteessa

Jäädytetyn saven keskimääräiseksi 10 % kokoonpuristumaa vastaavaksi hetkellisesti puristuslujuuden arvoksi saatiin n. 2 800 kPa. Vastaavasti hetkelliseksi leikkauslujuudeksi saatiin keskimäärin n. 1 400 kPa. Kun leikkauslujuuden mitoitusarvoksi otetaan 100 tunnin kuormitusta vastaava arvo, on leikkauslujuutta pienennettävä relaksaation vuoksi. Mitoitusleikkauslujuudeksi saatiin 700 kPa, joka on n. 50 kertaa saven leikkauslujuus ennen jäädytystä. Taivutuslujuudeksi on arvioitu 1 000 kPa.

Saven jäätymisnousu oli keskimäärin 5 %. Sulamis-painuma ensimmäisen jäädytyksen jälkeen oli keskimäärin 22 %, toisen jäädytyksen jälkeen 7 % ja kolmannen jäädytyksen jälkeen 6 %.

4. POHJARAKENNUSTAPA

Suunnittelu- ja tutkimusprosessin alkuvaiheessa ko. alikäytävä suunniteltiin toteutettavaksi jäädytystä apuna käyttäen seuraavasti:

Kiskoliikenne alikäytävän kohdalla hoidetaan työnaikaisesti apusilloilla. "Porausojat" kaivetaan apusiltojen asennuksen yhteydessä. Apusillan asennus ja tarvittava poraustila saadaan valmiiksi sallitun neljän tunnin katkoksen aikana. Tämän jälkeen jäädytysreiät porataan näistä porausojista apusiltojen alla junaliikenteen jatkuessa lähes normaalisti. Valmiiksi jäädytetyt seinämät sulatetaan ja jäädytys suoritetaan uudestaan. Tämä sen vuoksi, että näin pääosa painumista (n. 500 mm) saadaan tapahtumaan ennen betonirakenteiden tekoa. Vasta toisen jäädytyskerran jälkeen aloitetaan varsinainen kaivu. Kaivu aloitetaan Oulunkylän puolelta siten, että teollisuusradan kohdalla tehdään koekuormitus, jota seurataan mittauksin. Urakan jatkamisesta tästä eteenpäin tehdään päätös koekuormitustulosten käsittelyn jälkeen. Alikäytävä perustetaan sepelikerroksen välityksellä maan varaan ja varaudutaan noin 150 mm sulamispainumiin. Piirustuksessa GEO 2203.229 esitetään kaaviomaisesti toteutusvaiheen kuviteltu edistyminen.

Tärkein tekijä, joka johti nimenomaan jäädytysvaihtoehtoon suunnitteluun /6/ oli lähtötieto, jonka mukaan suurimmat katkot rataa kohti olivat 4 tuntia, ja nekin öisin. Rakentamistoimenpiteet suunniteltiin niin, että työt voitaisiin tehdä, vaikka rataliikenne olisi jatkuvasti päällä. Sallitun neljän tunnin katkon aikana saataisiin piirustuksessa GEO 2203.229 esitetyn alkutoimenpiteet tehtyä raide kerrallaan. Jäädytysvaihtoehtoon kilpailukyky muihin pohjarakennusvaihtoehtoihin heikkeni ratkaisevasti kun myöhemmin ilmoitettiin, että ratojen niin ajo- kuin sähkökatkokset voisivat olla huomattavasti aiemmin ilmoitettua neljää tuntia pitemmät, vaikkei urakkakilpailua vielä olekaan käyty.

Ko. kohteen osalta toteutettiin kuitenkin jäädytyskoe radan sivustalla, kahdella alkuperäistä suunnitelmaa vastaavalla jäädytysputkella. Kokeeseen ottivat osaa rakennuttaja (katuosaston) ja suunnittelijan (geoteknisen osaston) lisäksi Lemminkäinen Oy sekä Hankkija.

5.
SULAMISPAINUMA-ANALYYSI
5.1
Ensimmäinen sulaminen

Sulavan maan painumalaskelmissa voidaan käyttää seuraavaa yksinkertaistettua kaavaa:

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon &= A + \frac{\Delta \sigma}{a} \cdot 100 \\ S &= \frac{\Delta \varepsilon}{100} \cdot d \end{cases} \quad (1)$$

$\Delta \varepsilon$ = suhteellinen kokoonpuristuma [%] kuormitusvälillä

A = sulamisen aiheuttama kokoonpuristuma, kun kuormitus pystyy vakiona [%]

$\Delta \sigma$ = kuormituslisäys sulamispainuman jälkeen [MPa]

a = sulaneen maan kokoonpuristuvuusmoduuli [MPa]

S = painuma

d = jäätyneen kerroksen paksuus

Kaavan ensimmäinen termi antaa sen osan painumasta, joka tapahtuu pelkästään sulamisen vaikutuksesta, ilman lisäkuormitusta. Jälkimmäinen termi puolestaan ilmoittaa sulaneen maan painuman kuormituslisäyksen vaikutuksesta.

Seuraavassa esitetään tulokset analyysistä, jolla haettiin saven vesipitoisuuteen perustuvat kaavat sulamispainumien ja sulamispainumien jälkeisten painumien määrittämiseksi.

Kirjoittaja ehdottaa sulavan maan painumalaskelmia varten otettavaksi käyttöön seuraavan sisältöisen kaavan:

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon &= \frac{w}{k_1} + \frac{k_4 \cdot \Delta \sigma}{m_2} \cdot 100 \\ S &= \frac{\Delta \varepsilon}{100} \cdot d \end{cases} \quad (2)$$

w = saven vesipitoisuus kuivapainosta [%]

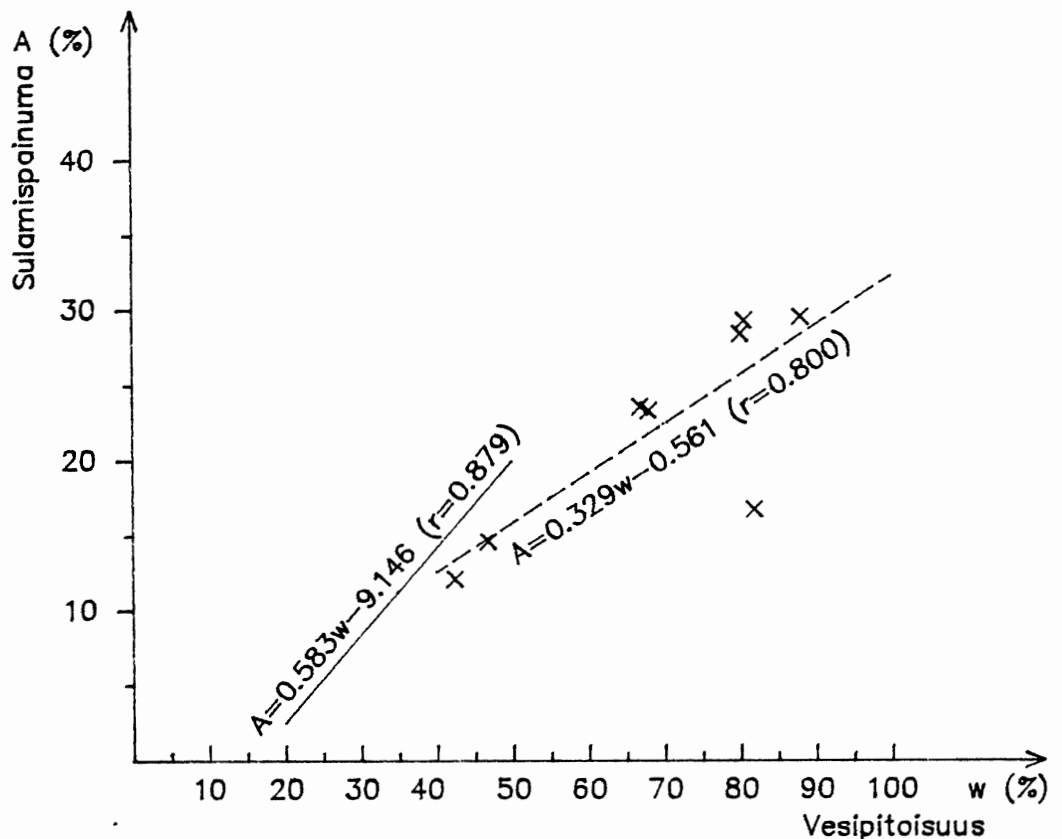
k_1 = sulamispainumakerroin

k_4 = sulaneen maan kokoonpuristuvuusmoduulikerroin

m_2 = ödometrikokeesta määritetty palautusmoduuli [MPa] kun jännityseksponentti $\beta_2 = 1$

Mikäli kertoimille k_1 ja k_4 on löydettävissä riittävän tarkat likiarvot, on mahdollista arvioida jäätyneen maan sulamisaikaiset ja myöhemmin lisäkuormitusten aikaansaamat painumat normaaleita laboratorioparametreja käyttäen. Kun palautusmoduulikin on yleensä arvioitavissa vesipitoisuuden perusteella, olisi laskelma tehtävissä pelkkien saven vesipitoisuustietojen perusteella.

Kuvassa 1 esitetään sulamispainuma (A) vesipitoisuuden (w) funktiona. Katkoviivalla kuvattu suora on geoteknisen osaston tekemistä kokeista laskettu regressiosuora. Yhtenäisellä viivalla kuvattu suora edustaa Kiinassa /13/ tehtyjä yli 1 000 koetta (Tong Changjiang & Chen Enyuan). Kuvaan 1 on kirjattu myös molempien suorien yhtälöt sekä niiden korrelaatiot. Yhteisellä alueella (w = 40...50 %) ovat kumpienkin suorien antamat tulokset hämmästyttävän lähellä toisiaan, ottaen huomioon näytteiden maantieteellisen etäisyyden.



Kuva 1. Sulamispainuman riippuvuus saven vesipitoisuudesta.

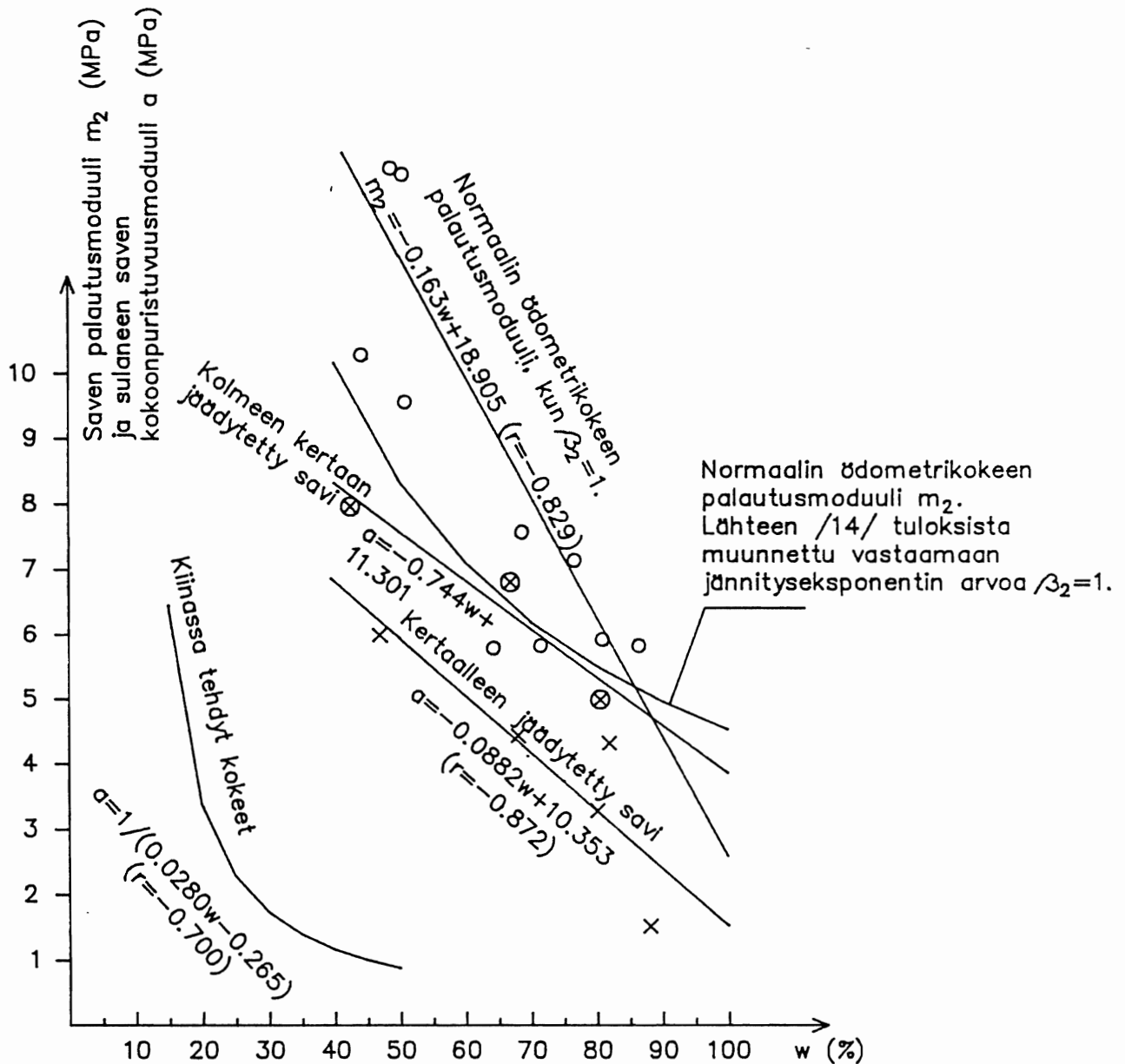
Saven sulamispainuman arvioimiseksi kirjoittaja ehdottaa otettavaksi käyttöön seuraavan yksinkertaisen kaavan.

$$\begin{cases} A &= \frac{w}{k_1} , \\ S &= \frac{A}{100} \cdot d \end{cases} \quad (3)$$

jossa $k_1 = 3$

Kaavan avulla on mahdollista arvioida jäätyneen savikerroksen sulamispainuma pelkästään alkuperäisen vesipitoisuustiedon perusteella.

Sulaneen ja painuneen saven kokoonpuristuvuuskäyttäytyminen poikkeaa radikaalisti alkuperäisestä. Pelkkä vilkaisu piirustuksissa GEO 2203.219...220 esitettyihin ödometrikokeisiin tuo esiin sen seikan, että sulaneen saven ominaisuudet muistuttavat enemmän ylikonsolidoitunutta, kuin alkuperäistä tilaansa. Kuvassa 2 esitetyt suorat kuvaavat geoteknisen osaston suorittamien kokeiden perusteella havaittuja riippuvuuksia vesipitoisuuden ja saven eri moduulien arvojen välillä. Ylin suora edustaa normaalin ödometrikokeen palautusmoduulin (m_2) arvoja, kun käytetään jännityseksponentille arvoa $\beta_2 = 1$. Lisäksi kuvassa 2 esitetään lähteen /14/ tuloksista muunnettu kuvaaja moduulille m_2 vastaamaan jännityseksponentin arvoa $\beta_2 = 1$. Alin suora kuvaa kertaalleen jäädytetyn ja sulaneen saven kokoonpuristuvuusmoduulia. Näiden suorien väliin jää kolmeen kertaan jäädytetyn saven kokoonpuristuvuusmoduulin regressiosuora. Edelleen kuvassa 2 on em. kiinalaisten tutkijoiden /13/ tuloksista laskettu sulaneen maan kokoonpuristuvuusmoduulikäyrä sikäläisten kokeiden tuloksista. Tällä kertaa kiinalaisten tulokset poikkeavat yhteisellä alueella keskimäärin n. viisin kertaisesti geoteknisen osaston tuloksista, tosin Kiinassa tehtyjen kokeiden hajontakin oli huomattava.



Kuva 2. Sulaneen saven kokoonpuristuvuusmoduulin riippuvuus vesipitoisuudesta.

Kirjoittaja on tullut seuraavaan tulokseen lisäkuorituksen aiheuttamien painumien arvioimiseksi.

$$a = \frac{m_2}{k_4}, \quad (4)$$

jossa $k_4 = 2 \dots 4$

Geoteknisen osaston tekemien kokeiden perusteella voitaisiin käyttää kertoimelle k_4 arvoa 2, mutta se tulisi tapauskohtaisesti tarkistaa jäädytyskokeiden avulla, tai tyytyä käyttämään suurempaa arvoa 4. Tällä painumaosuudella ei kuitenkaan ole yleensä kovin suurta merkitystä sulamispainuman rinnalla, kuten myöhemmistä esimerkeistä (kohta 5.4) käy ilmi.

5.2

Muut jäätymisilmiöön liittyvät liikkeet

Edellisessä kappaleessa esiteltiin saven ensimmäisestä jäätymistä seuraavia liikkeitä, mutta ei itse jäätyminen aikaisia nousuja. Suljetuissa kokeissa, joissa saven vesipitoisuus vaihteli $w = 40 \dots 90 \%$ kuivapainosta, mitattiin jäätymisnousuksi sekä ensimmäisen, toisen että kolmannen jäädytyskerran yhteydessä noin $4 \dots 6 \%$, keskiarvon ollessa 5% . Toisen ja kolmannen sulamisvaiheen aikaiset painumat vaihtelivat myöskin melko vähän olleen $5 \dots 8 \%$, keskiarvon ollessa $6,5 \%$.

Selvää logiikkaa alkuperäisen vesipitoisuuden ja jäätymisnousujen tai toisen ja kolmannen vaiheen sulamispainumien välille ei löytynyt. Sen sijaan kun tarkasteltiin toisen jäätyminen ja sulamisen yhteisvaikutusta, saatiin seuraava yhteys:

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_2 = \frac{w}{k_2} \\ S = \frac{\Delta \varepsilon_2}{100} \cdot d \end{cases} \quad (5)$$

$\Delta \varepsilon_2$ = toistojäädätyksen ja sitä seuraavan sulamispainuman yhteisvaikutus [%]

$$k_2 \approx 20$$

Vastaavasti saatiin kolmannen jäätymis-sulamisprosessin yhteisvaikutukseksi:

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_3 = \frac{w}{k_3} \\ S = \frac{\Delta \varepsilon_3}{100} \cdot d \end{cases} \quad (6)$$

$\Delta \varepsilon_3$ = kolmannen jäädätyksen ja sitä seuraavan sulamispainuman yhteisvaikutus [%]

$$k_3 \approx 40$$

5.3

Syy sulamispainumiin

Normaalien konsolidaatipainumien syynä on perinteisesti pidetty savessa olevan veden poistumista kuormituksen vaikutuksesta. Näin olleen konsolidaatipainuman tulisi olla tilavuudeltaan sama kuin kuormitusta savimassasta poistunut vesimäärä. Tutkimuskohteessa suoritettujen normaalien ödometrikokeiden kohdalla poistunut vesimäärä oli hieman pienempi kuin kokonaispainuma. Vesimäärän väheneminen selitti $70 \dots 87 \%$ tapahtuneista kokoonpuristumista, keskiarvon ollessa 79% .

Vuonna 1987 tehtiin automaattiödometreillä, pääosin CC-kokeina (continuous consolidation = jatkuva konsolidaatio) ja loput CRS-kokeina (continuous rate of strain = vakionmuodonmuutoskoe), 50 kokeen sarja eri puolilta Helsinkiä otetuilla näytteillä, jonka mukaan veden poistumisen osuus kokoonpuristumisesta on n. 4/5, (tarkalleen $81 \% \pm 14 \%$). Kokoonpuristuvuus-kokeissa tapahtuukin konsolidaation lisäksi alkupainumaa sekä ilmeisesti myös savipartikkeleiden uudelleen järjestäytymistä.

Yksinkertaisin tapa määrittää konsolidaation osuus painumista on punnita kuormitettava näyte ennen ja jälkeen kuormituksen, jolloin voidaan käyttää kaavaa:

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_k &= \frac{(G_e - G_j)}{V} \cdot 100 \\ S_k &= \frac{\Delta \varepsilon_k}{100} \cdot d \end{cases} \quad (7)$$

$\Delta \varepsilon_k$ = konsolidaatiosta aiheutuva kokoonpuristuma [%]

S_k = konsolidaatiopainuma

G_e = näytteen paino ennen kuormitusta [g]

G_j = näytteen paino kuormituksen jälkeen [g]

V = näytteen tilavuus ennen koetta [cm³]

Vertaamalla jäädytettyjen ja sulaneiden näytteiden vesimääriä luonnontilassa ja kokeen jälkeen, havaittiin veden poistumisen osuudeksi painumasta 72... 97 %, keskiarvon ollessa 84 %. Näyttäisi siltä, että näytteen jäätyminen ja sulaminen saa savelle aikaan konsolidaation tapaisen prosessin. Mainitun "teorian" varmentamiseksi pyrittiin konstruoimaan varsinaisia jäädytettyjä ödometrikokeita yksinkertaisempi menetelmä. Epäonnistuneiden yritysten jälkeen havaittiin, että välttämätön edellytys kokeen onnistumiselle on prosessin (jäätyminen/sulaminen) tapahtuminen näytteen alkuperäistä tilaa vastaavassa konsolidaatiopaineessa. Sen sijaan näytteen luonnontilaisten ominaisuuksien kannalta ei konsolidaatiopaineen vaikutuksella näyttänyt olevan juurikaan merkitystä. Varmuuden vuoksi määritettiin viimeksi mainitutkin ominaisuudet sekä esikonsolidoituina että esikonsolidoimattomina. Taulukossa 1 esitetään tulokset 3:n eri alueen näytteistä.

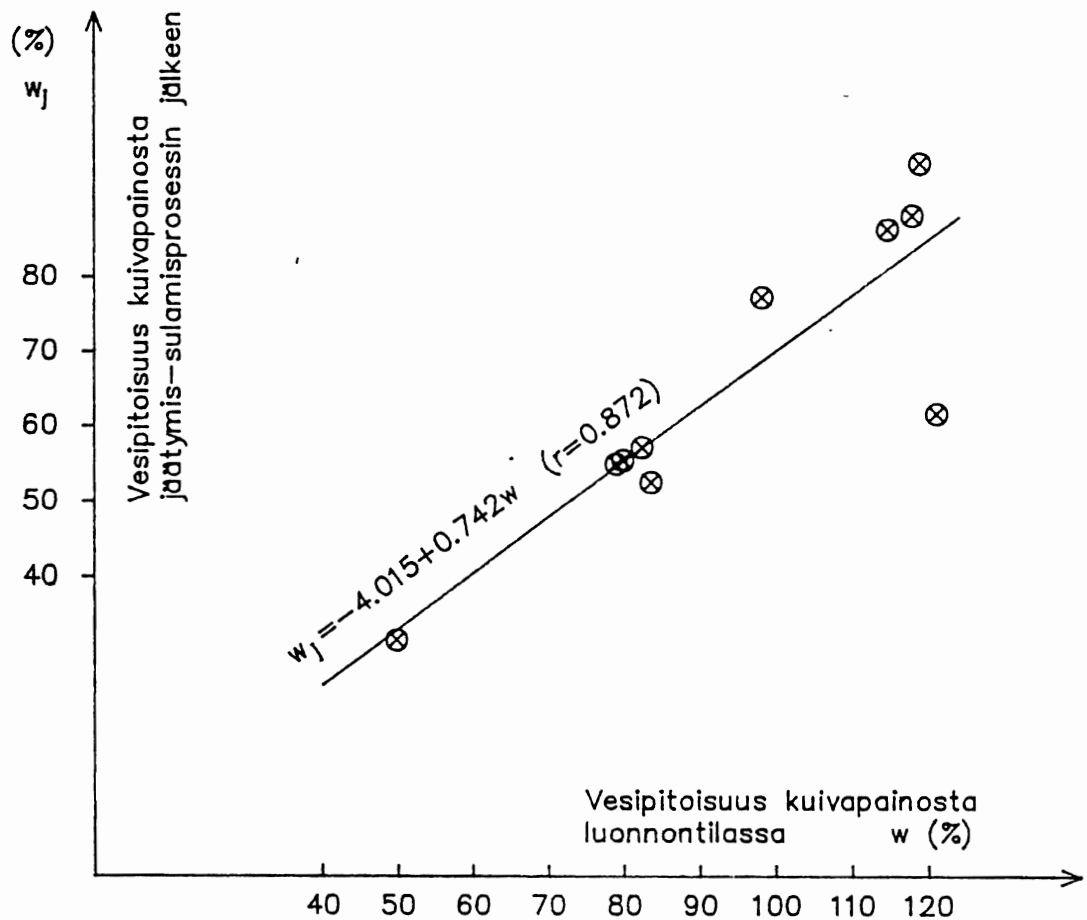
Taulukko 1.

Kolmesta eri kohteesta olevien näytteiden vesipitoisuudet ja kartioleikkauslujuudet ennen (w ja S_{ke}) ja jälkeen (w_j ja S_{kj}) jäädytyksen.

TNo	syv. (m)	w (%)	w_j (%)	S_{ke} (kPa)	S_{kj} (kPa)	S_{kj}/S_{ke}
2709	2,43	121,1	61,7	9,8	35,5	3,622
	3,83	49,9	31,7	15,2	31,4	2,066
2535	2,26	79,9	55,5	13,4	38,4	2,866
	3,26	79,0	55,0	17,5	41,9	2,394
	4,26	83,6	52,6	14,0	24,9	1,779
2390	6,33	117,9	88,3	33,0	40,6	1,230
	8,33	118,9	95,2	37,4	51,0	1,364
	9,33	114,7	86,5	47,8	68,0	1,423
	12,33	98,2	77,4	43,2	57,0	1,319
	16,33	82,4	57,2	31,4	61,4	1,955
k.a. 2,002						

2709 = Mellunkylä, Untamalandie
 2535 = Malminkaari
 2390 = Vanhankaupunginlahden länsiranta

Saven vesipitoisuus pienee tulosten mukaan jäätymissulamisprosessin seurauksena lineaarisesti. Kuvassa 3 esitetään em. vesipitoisuuksien yhteyttä kuvaava regressiosuora.



Kuva 3. Saven vesipitoisuus ennen ja jälkeen jääty-misen.

Kuvan 3 yhteys olisi riittävällä tarkkuudella ilmaistavissa seuraavasti:

$$w_j = k_w \cdot w, \quad (8)$$

jossa $k_w = 2/3$

w = luonnontilaisen saven vesipitoisuus kuivapainosta [%]

w_j = jäädytetyn ja sulaneen saven vesipitoisuus kuivapainosta [%]

k_w = vesipitoisuuden pienenemiskerroin

Mikäli kaavan (8) mukainen yhteys on olemassa, voitaisiin jäädytyksen aiheuttamat "konsolidaatiopainumat" laskea myös tätä kautta.

$$\Delta \epsilon_k = \left(1 - \frac{100 + w_j \cdot 2,65}{100 + w \cdot 2,65} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

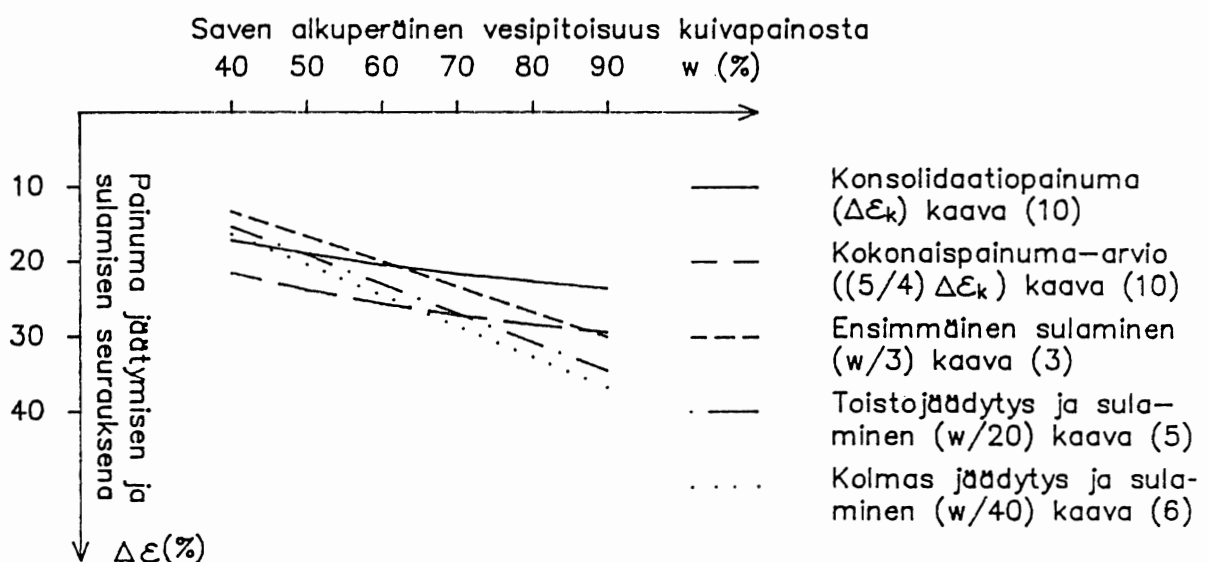
$\Delta \epsilon_k$ = konsolidaation osuus kokoonpuristumasta

Sijoittamalla kaava (8) kaavaan (9) ja olettamalla, että konsolidaation osuus kokonaispainumista on n. 4/5 saadaan seuraavat painuma-arviokaavat

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_k &= \left(1 - \frac{100 + 2/3 \cdot w \cdot 2,65}{100 + w \cdot 2,65} \right) \cdot 100 & (10) \\ \Delta \varepsilon &= 5/4 \Delta \varepsilon_k \\ S &= \frac{\Delta \varepsilon}{100} \cdot d \end{cases}$$

$\Delta \varepsilon$ = kokonaiskoonpuristuma

Nyt on mielenkiintoista verrata kaavan (10) tuloksia aikaisemmin esitetyn kaavan (3) tuloksiin, etenkin kun kaavat perustuvat eri kohteista tehtyihin koesarjoihin. Kuvaan 4 on em. lisäksi yhdistetty vielä toista ja kolmatta jäädytystä kuvaavat funktiot (5 ja 6). Tulokset näyttävät sopivan hyvin yhteen, joskin kirjoittaja pitää suoriin määrittelyihin perustuvaa kaavaa (3) tarkempana kuin epäsuoriin kokeisiin perustuvaa kaavaa (10), johon sisältyy lisäksi oletus konsolidaation osuudesta kokonaispainumista. Molemmat kaavat näyttävät kuitenkin tukevan oletusta, jonka mukaan saven luonnollisissa olosuhteissa (= esikonsolidaatiopaineessa) tapahtuva jäätyminen ja sulaminen saisi aikaan saven konsolidoitumista. Taulukon 1 mukaan leikkauslujuuden kasvu mainitun prosessin tuloksena olisi suuruusluokalleen kaksinkertainen. Tosin sulamisprosessin aikana tapahtuu leikkauslujuuden lyhytaikaista pienenemistä kuten myöhemmin kohdassa 6 esitetyissä kenttäkokeissa kävi ilmi.



Kuva 4. Eri painuma-arviokaavojen vertailua.

5.4

Laskentaesimerkkejä

Esim. 1. Liikennetunnelin rakentamisen yhteydessä joudutaan kahden kallioisen alueen välinen lyhyt "savirotko" läpäisemään. Tuenta olisi mahdollista hoitaa jäädyttämällä tunnelia viuhkamaisesti katon osalta ja estämällä veden sisääntulo ylipaineen avulla.

Kuinka suuria liikkeitä on odotettavissa, kun jäädytettävän "kattolaatan" paksuus olisi enimmillään 2 m ja saven vesipitoisuus kuivapainosta vaihtelee välillä $w = 65...80 \%$?

Vastaus Jäädytyksen aikana on kohdan 5.2 mukaan odotettavissa n. 5 % nousuja eli maanpinnan kohoaminen olisi noin

$$0,05 \cdot 2 \text{ m} = 0,1 \text{ m}.$$

Tämän jälkeen tapahtuvat painumat olisivat kaavan (3) mukaan:

$$S = \frac{0,65...0,80}{3} \cdot 2 \text{ m} = 0,43...0,53 \text{ m}$$

ja kaavan (10) mukaan

$$S = 5/4 \cdot \left(1 - \frac{100 + 2/3 (65...80) 2,65}{100 + (65...80) 2,65} \right) \cdot 2 \text{ m}$$

$$= 0,53...0,57 \text{ m}$$

Vaihtoehtoisesti voidaan tulokset saada myös suoraan kuvasta 4 kertomalla tulokset painuvan kerroksen paksuudella. Tämän esimerkin mukaan ovat eri aineistoista johdettujen painumakaavojen tulokset likipitään samat.

Esim. 2. Kompensaatiotarkoituksessa tehdyn peruskai-
vannon pohja on päässyt jäätymään lämpötilamittausten mukaan 0,95 m syvyyteen, pintalämpötilan oltua useiden viikkojen ajan $-20...-30^{\circ} \text{C}$. Kaiannon pohjalla on n. 0,2 m soraa ja sen alla savea, jonka vesipitoisuus on noin 90 % kuivapainosta. Kuinka suuria painumia on odotettavissa mikäli perustukset valettaisiin jäätyneen pohjan varaan, kun kuormaa peruslaatalle tulee 25 kPa.

Vastaus Aiemmin esitetyt kaavat perustuvat kokeisiin, joissa jäädytyslämpötila oli -10°C . Tämän on katsottu parhaiten vastaavan keinoitekoisesti jäädytettyä ympyrälieriötä, jossa ytimen lämpötila on lähes -24°C ja ulkokuoren $\pm 0^{\circ}\text{C}$. Tuloksia voidaan kuitenkin käyttää riittävällä tarkkuudella myös mainitun kysymyksen arvioimiseen.

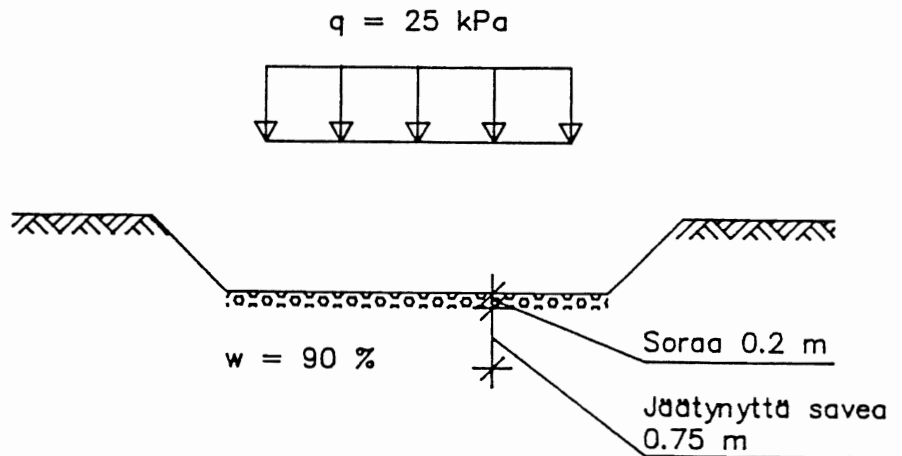
Painumiksi kaavojen (2), (3) ja (4) mukaan saadaan:

$$\Delta \varepsilon = \frac{w}{3} + \frac{(2 \dots 4) \cdot \Delta \sigma}{m_2} \cdot 100$$

$$w = 90 \%$$

$$\Delta \sigma = 25 \text{ kPa}$$

$$m_2 = 4\,000 \text{ kPa (kuvasta 2)}$$



$$\Delta \varepsilon = 30 + (1,25 \dots 2,50) \%$$

$$S = \frac{0,75}{100} (30 + (1,25 \dots 2,50)) \text{ m}$$

$$= 0,225 + (0,009 \dots 0,018) \text{ m}$$

$$= 0,234 \dots 0,255 \text{ m}$$

Esimerkin valossa selviää, että varsinaisilla sulamispainumilla (30 %) on ratkaiseva merkitys verrattuna pohjalaatan aiheuttamiin painumiin jäätyneessä ja sulaneessa kerroksessa (1,25...2,5 %). Lisäksi selviää se, ettei sulaneen saven kokoonpuristuvuusmoduulin tarkkuudella ole yleensä ratkaisevaa merkitystä lopputuloksen kannalta.

Edellä esitetty painumalaskelma ei sisällä jäätyneen kerroksen alapuolisten kerrosten painumia, jotka suoritetaan normaaliin tapaan.

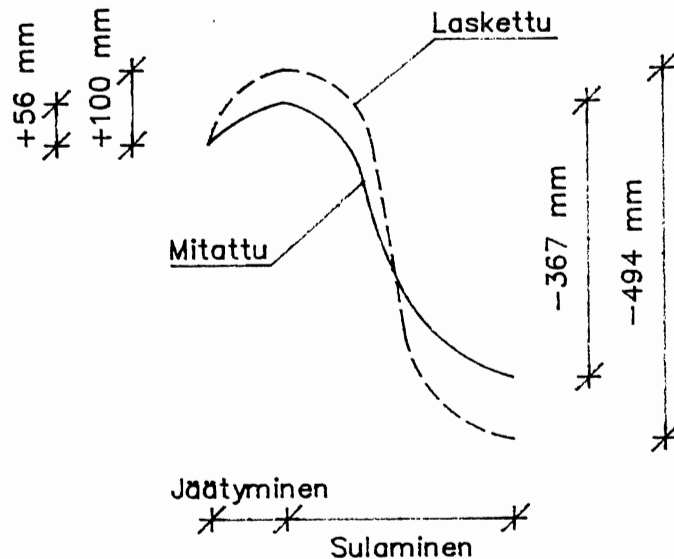
Esim. 3. Arvioi piirustuksissa GEO 2730/6202.201... 214 esitettyjen painumalevyjen 1...7 liikkeet.

Vastaus Haetaan piirustuksista kunkin painumalevyn kohdalla olevien jäädytettujen savikerrosten paksuudet ja vesipitoisuudet (taulukko 2).

Taulukko 2. Koejäädytystulosten ja laskentatulosten vertailua.

Painuma levy	Jäätyneen kerroksen paksuus d (m)	Jäätyneen kerroksen vesipit. w (%)	Jäätymis- nousujen arvio koh- dan 5.2 mukaan (mm)	Mitattu nousu (mm)	Sulamis- painumien arvio koh- dan 5.1 mukaan (mm)	Mitattu painuma (mm)
1	0,80 0,19 0,24 0,03 } 1,26	45 55 90 85	40 9 12 1 } 62	86	120 35 72 8 } 235	354
2	0,80 1,19 1,96 0,24 } 4,19	45 55 90 85	40 59 98 12 } 209	92	120 218 588 68 } 994	609
3	1,04 2,14 } 3,18	85 75	52 107 } 159	43	295 535 } 830	394
4	0,46 1,53 } 1,99	85 75	23 76 } 99	38	130 382 } 512	354
5	0,99	75	49	36	247	309
6	1,93 0,35 } 2,28	90 85	96 17 } 114	41	579 99 } 678	438
7	0,80 0,16 0,18 0,03 } 1,17	45 55 90 85	40 8 9 1 } 58	57	120 29 54 8 } 211	114
k.a.			+100	+56	-494	-367

Havaitut nousut olivat 57...92 mm ja havaitut painumat 114...609 mm. Laskelmien mukaan jäätyminen nousut olisivat 58...209 mm ja sulamispainumat 211...994 mm eli laskennallisesti saatiin tällä kertaa keskimäärin 44 % liian suuret jäätyminenousuarviot ja keskimäärin 26 % liian suuret sulamispainuma-arviot. Tehdyyn kenttäkokeeseen liittyy kuitenkin eräs seikka, jota tässä yksinkertaistetussa laskentamallissa ei otettu huomioon. Laskelmat kuvaavat tilannetta, jossa useita jäädytysputkia on rivissä siten, että ne muodostavat piirustuksen GEO 2203.229 mukaisen kahdesta jäädytetystä seinämästä muodostuvan uran. Mittaustulokset on sen sijaan saatu kenttäkokeesta, jossa jäädytysputkia on ollut piirustusten GEO 2730/6202.201...202 mukaisesti 2 kpl. Ympärillä olevat maakerrokset ovat "tukeneet ja kantaneet" jäätyvää ja sulavaa savisylinteriä, joten tulosten välinen ero on luonnollinen (kuva 5).



Kuva 5. Keskimääräiset jäätyminen ja sulamisen aikaiset liikkeet laskelmien ja mittaustulosten mukaan.

6. JÄÄDYTYSKOE

Jäädytyskokeen aloituskokouksessa 10.11.1982 kirjattiin kokeen tarkoitukseksi seuraavaa:

"Jäädytyskokeella on tarkoitus mm. saada käytännön tuntumaa jäädytyksestä, selvittää jäädytys- ja sulatusajat, saada selville jäädytys- ja sulatusprosessin aiheuttamat liikkeet sekä sulavan maan ominaisuudet ja määrittää tarvittavat jäädytyskaluston tehot ja energiamäärät. Tavoitteena oli saada aikaan jääsylinteri, jonka halkasija olisi vähintään 1 350 mm, antaa sen sulaa ja suorittaa vielä toistojäädytys."

6.1 Instrumentointi

Suunnitellun alikäytävän jatkeelle rakennettiin piirustuksen GEO 2730/6202.201 mukainen tarkkailumittausverkosto jäätymis- ja sulamistapahtumien seurantaan varten.

Ennakkoon oli suoritettu normaalit pohjatutkimustoimenpiteet laboratoriokeineen. Saven lujuusominaisuuksien muutosten analysoimiseksi tehtiin siipikairauksia jäädytysvyöhykkeen kohdalla ennakkoon, ensimmäisen sulamisvaiheen aikana, 9 kuukautta toisen sulamisvaiheen jälkeen sekä vielä yli 2 vuotta toisen sulamisvaiheen jälkeen eli yhteensä leikkauslujuuden muutoksia seurattiin lähes 5 vuoden ajan. Jäätymisvyöhykkeen kehittymisen seurantaan varten asennettiin neljä lämpötilamittauspistettä, joissa oli yhteensä 107 anturia. Lisäksi suoritettiin pistokairauksia jääsylinterin muodon tarkistamiseksi.

Maanpinnan ja eri maakerrosten liikkeiden seuraamiseksi asennettiin 10 painumalevyä ja 3 ns. haitari-letkua sekä vielä liikkeiden muodon selvittämiseksi painumaletku.

Saven jännitystilän kehittymistä seurattiin huokosvedenpainemittauksin.

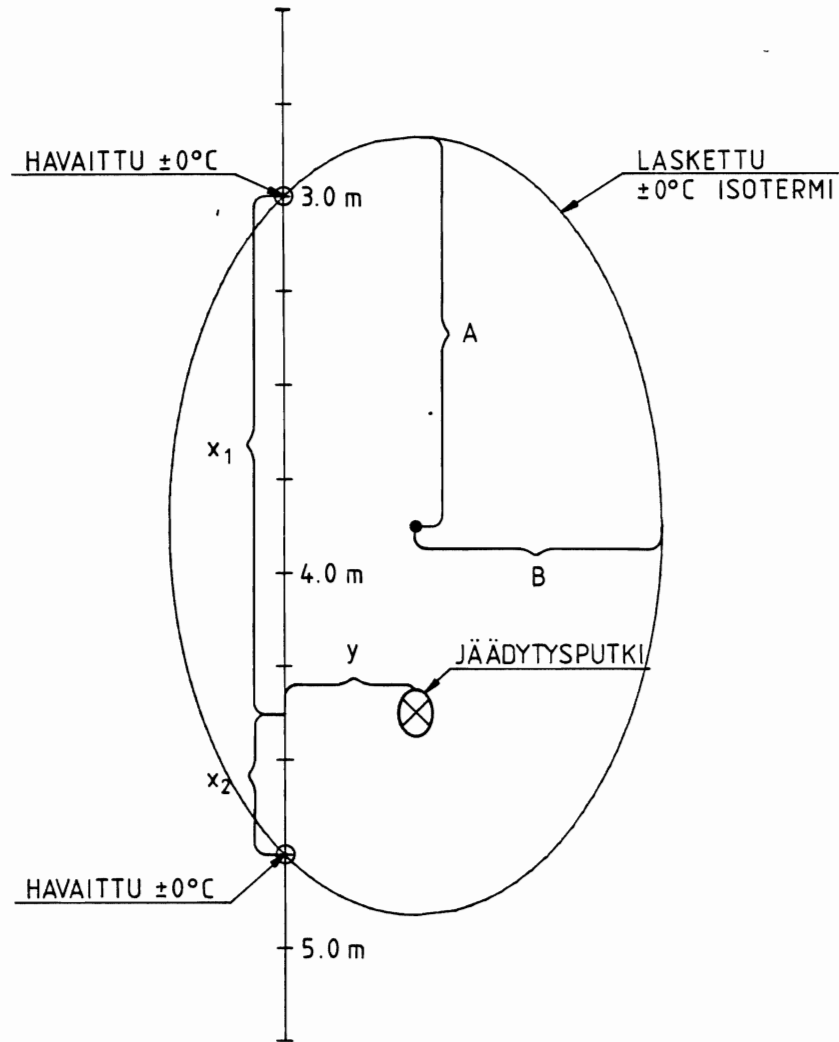
Instrumentointi selviää piirustuksista GEO 2730/6202.201...210.

Samoissa poikkileikkauksissa lasketut suurimmat jääsylinderit aktiivijäädytyksen aikana esitetään taulukossa 4.

Taulukko 4. Suurimmat laskennalliset jääsylinderit aktiivijäädytyksen aikana.

Poikki-leikkaus	Jäädytyskerta 1		Jäädytyskerta 2	
	Korkeus (mm)	Leveys (mm)	Korkeus (mm)	Leveys (mm)
L1	1 080	1 790	3 190	6 870
L2	1 910	3 420	2 540	4 820
L3	900	600	1 440	2 370

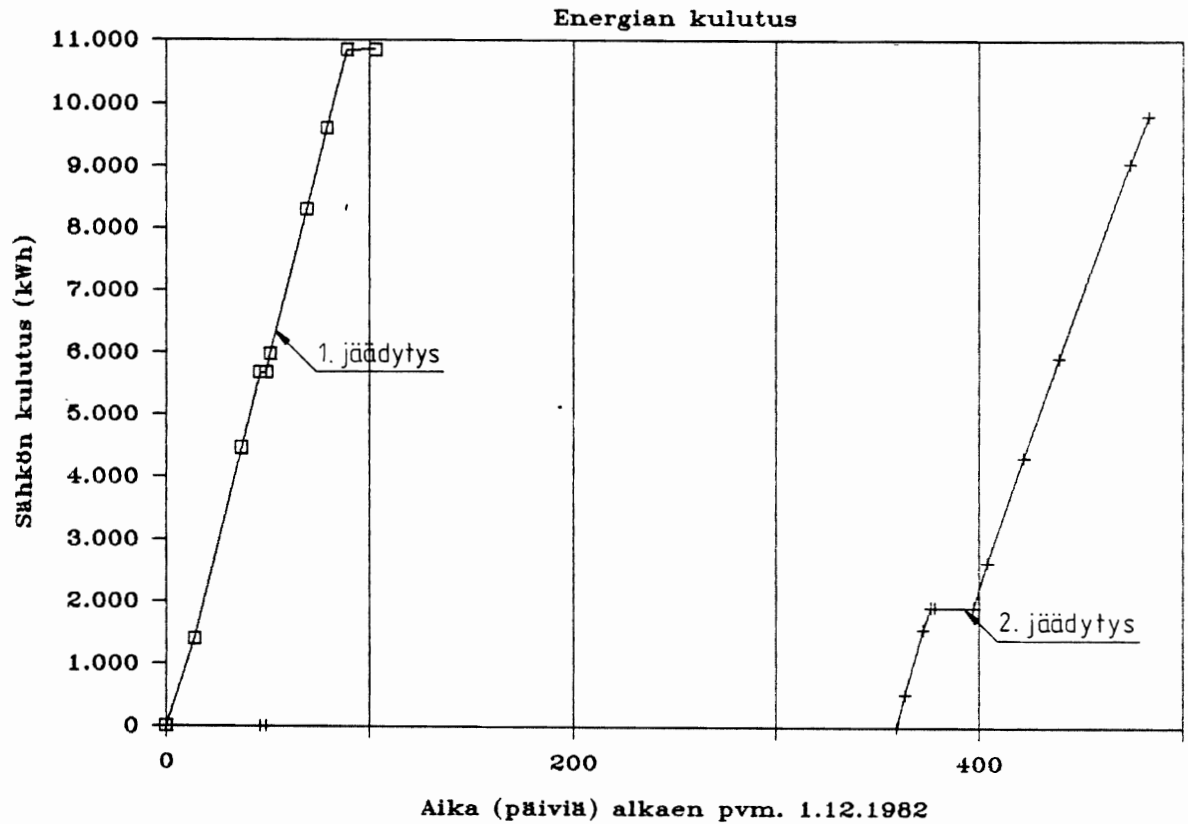
Taulukon 3 arvot ovat osin suuremmat, koska jäärintama etenee vielä lämpenemisvaiheessa ytimen lämpötilan laskiessa. Taulukon 3 arvoilla on merkitystä routanousuihin ja sulamispainumiin, mutta jääkuoren "lujuuslaskelmat" on tehtävä taulukon 4 arvojen perusteella. Jääkuoren lämpötilamittauksiin perustuva laskennallinen asema on määritetty kuvan 6 mukaisesti. Jääkuoren poikkileikkaus on oletettu tässä elliptiseksi.



Kuva 6. Jäädäytysellipsin puoliakselit A ja B on laskettu jäädäytysputken aseman ja lämpötilamittausputken tulosten perusteella.

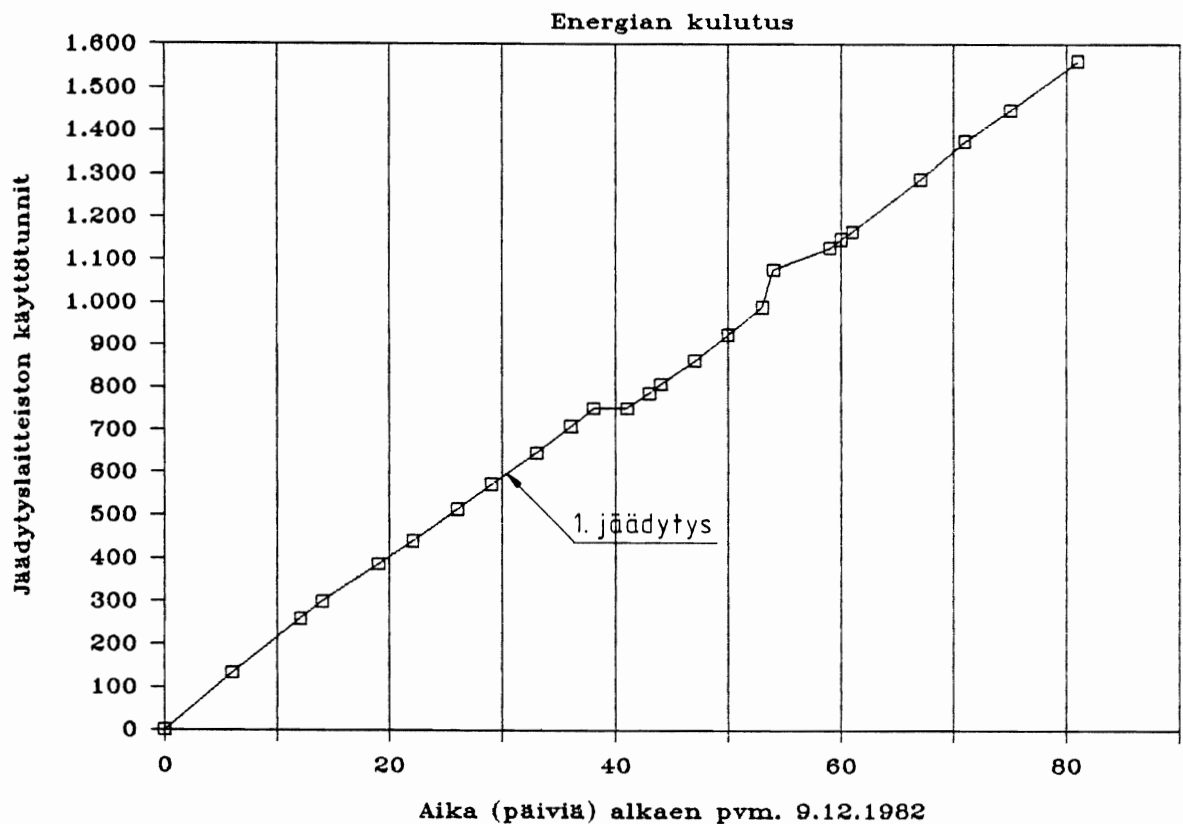
Käytetyn jäädäytyslaitteiston bruttoteho oli 500 kcal/h, jolla pystyttiin pumppaamaan $-20...-25^{\circ}\text{C}$ kalsiumkloridi-liuosta (CaCl_2) 4 000 l/h. Jäädäytysputkien sijainti ja dimensiot selviävät piirustuksista GEO 2730/6202.201...202. Sähkön kulutus oli ensimmäisellä jäädäytyskerralla 10 845 kWh ja toisella kerralla 9 826 kWh. Sähkön kulutuksen kehitys selviää kuvasta 7. Ensimmäisen jäädäyttyksen aikana oli käytössä myös jäädäytyskoneiston käyntiä seurannut käyttötuntimittari, joka rekisteröi kokonaistuntimääräksi 1 561 tuntia. Tämä merkitsee noin 20 käyttötuntia vuorokaudessa. Kylmäkoneiston käyttötuntien kehitys selviää kuvasta 8. Jäädäyttyksen vaatimaksi kokonaisenergiaksi ilman ylläpitoa, saatiin keskimäärin 200 kWh/m^3 savea. Vertailulukuna mainittakoon, että veden jäätymisenergia on teoreettisesti n. 100 kWh/m^3 .

OULUNKYLÄN JÄÄDYTYSKOE



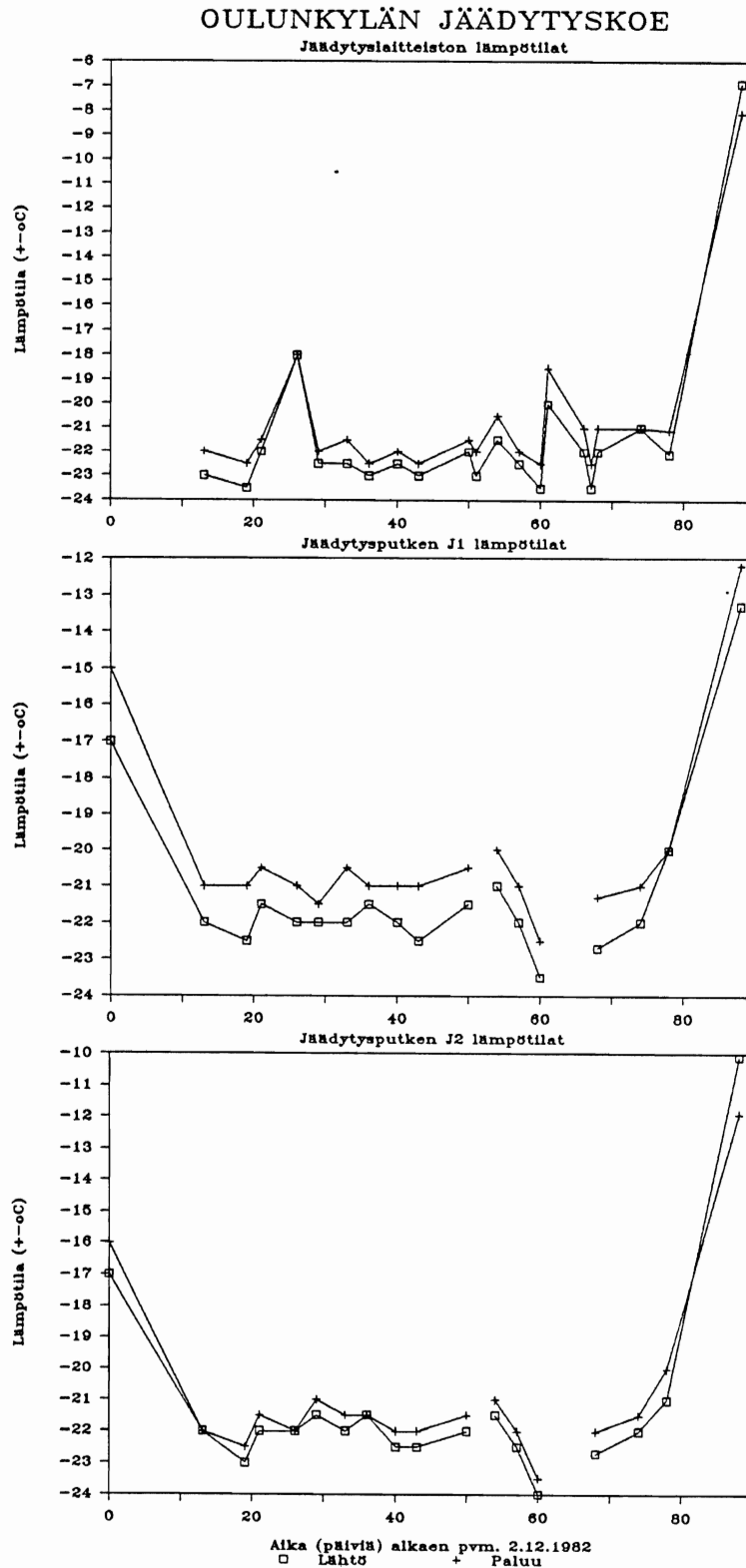
Kuva 7. Jäädytyskoneiston sähkönkulutus.

OULUNKYLÄN JÄÄDYTYSKOE



Kuva 8. Jäädytyskoneiston käyttötunnit 1. jäädytyskerralla.

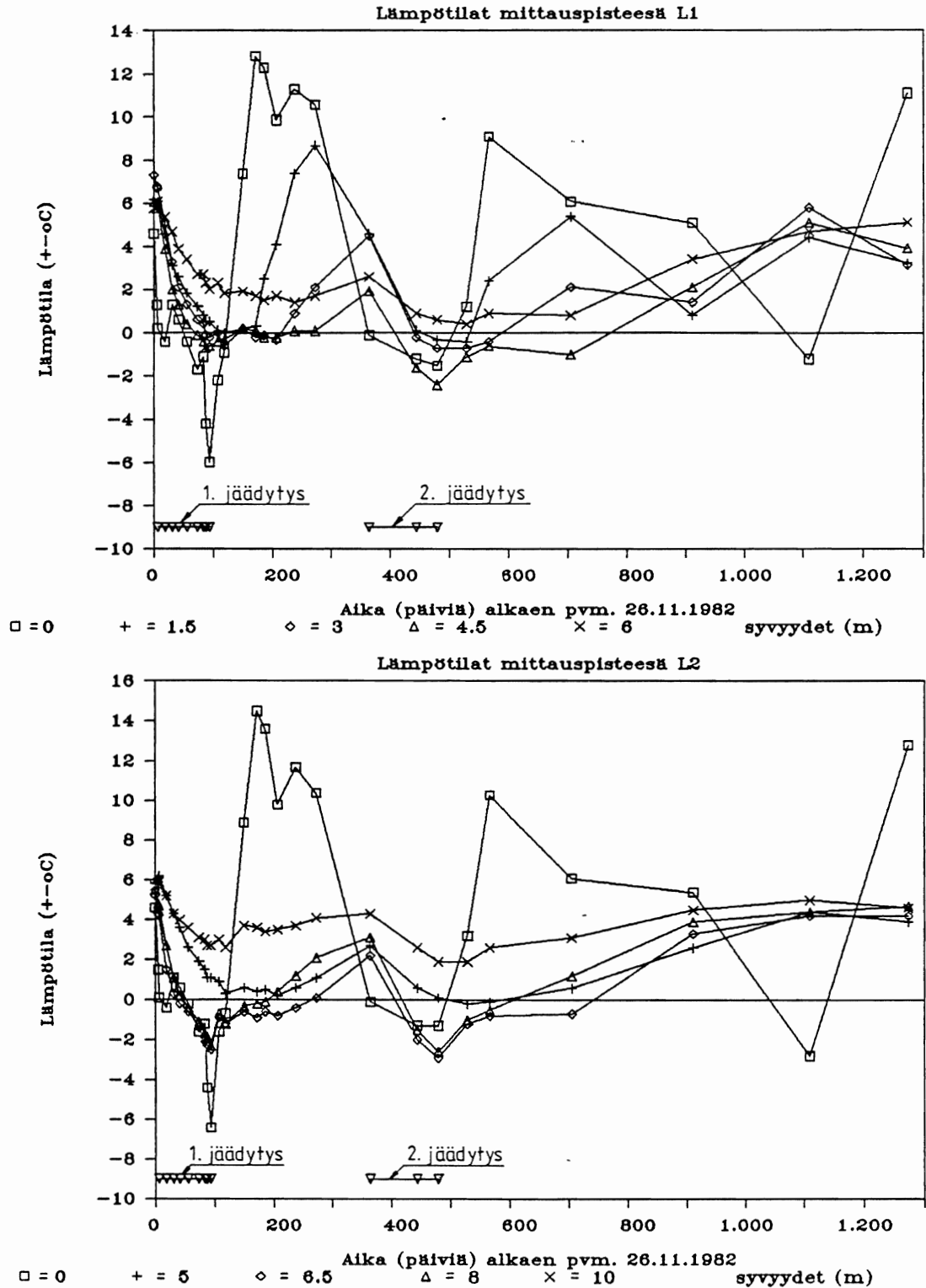
Jäädytyslaitteistosta sekä jäädytysputkista J1 ja J2 mitatut lähtö- ja paluulämpötilat näkyvät kuvassa 9. Putken J1 suurempi jäädytyssteho, joka todettiin jo jääkuoren mittojen osalta (taulukot 3 ja 4), selviää myös vertaamalla kuvassa 9 esitettyjä lähtö- ja paluulämpötilojen eroja.



Kuva 9. Jäädytyslaitteiston ja jäädytysputkien J1 ja J2 lämpötilat ensimmäisellä jäädytyskeralla.

Jäädetyttyjen savikerrosten lämpötilakehityksen havainnollistamiseksi esitetään kuvissa 10 ja 11 kustakin lämpötilamittauspisteestä tulokset 5 edustavalta syvyydeltä.

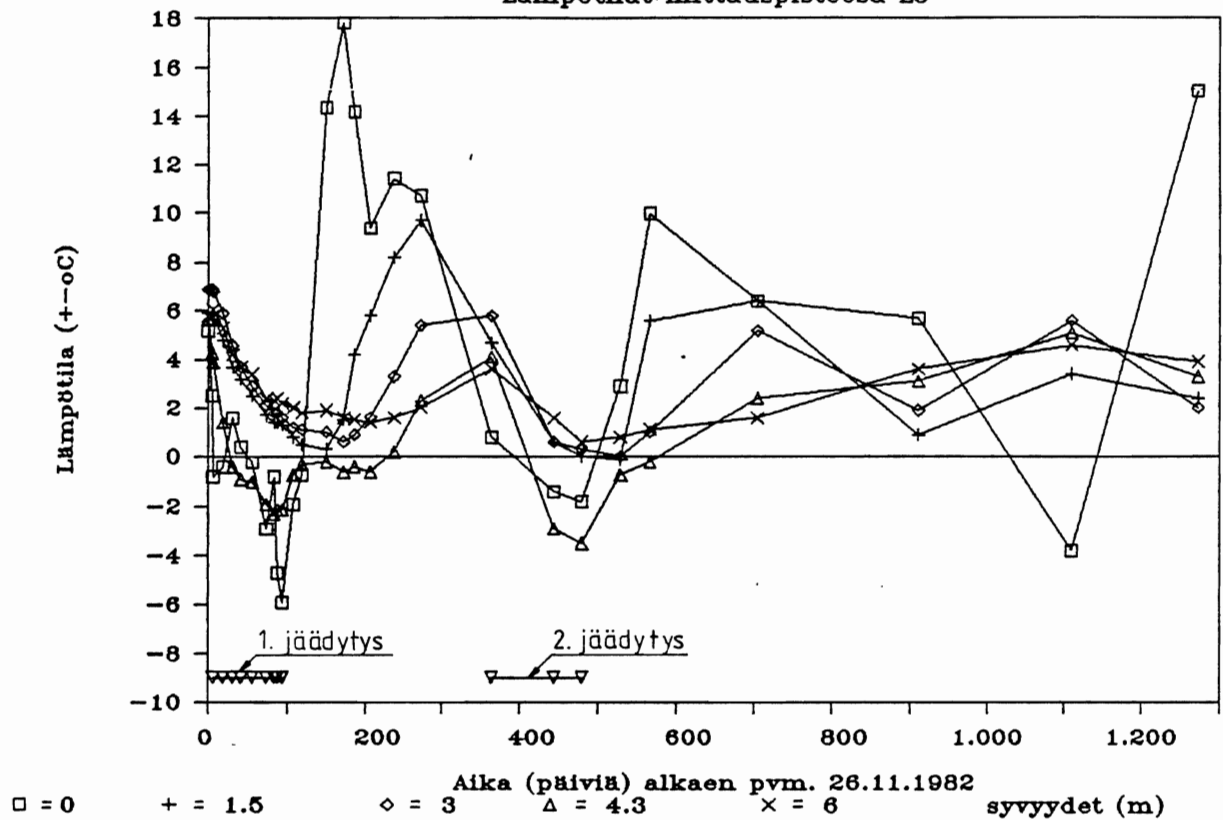
OULUNKYLÄN JÄÄDYTYSKOE



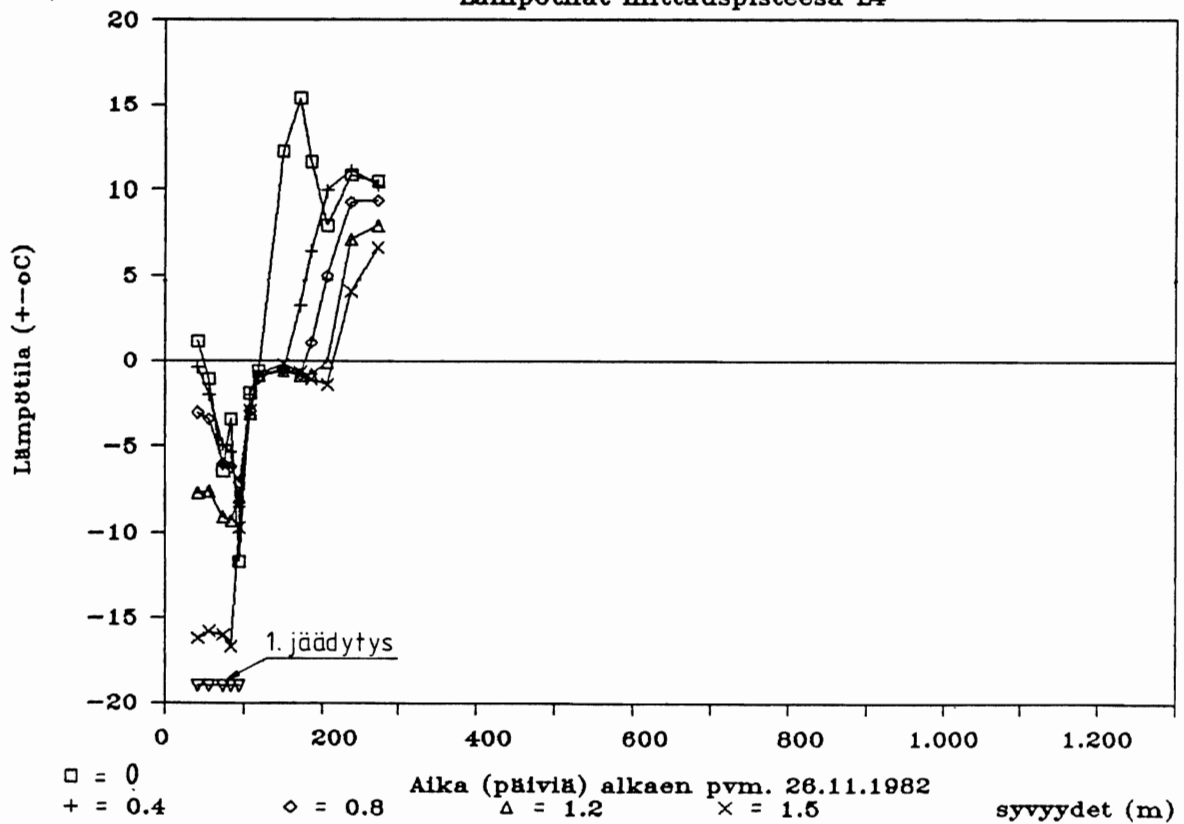
Kuva 10. Lämpötilamittauspisteiden L1 ja L2 lämpötilakehitys viikolta edustavalta syvyydeltä.

OULUNKYLÄN JÄÄDYTYSKOE

Lämpötilat mittauspisteessä L3



Lämpötilat mittauspisteessä L4



Kuva 11. Lämpötilamittauspisteiden L3 ja L4 lämpötilakehitys viideltä edustavalta syvyydeltä.

6.2

Koetulokset

6.2.1

Jäätyminen ja energia

Jääkuoren sijainnin varmistamiseksi tehtyt kairaukset 1. jäädytyksen aikana selviävät piirustuksista GEO 2370/6202.202...210.

Lämpötilamittauksiin perustuvat laskennalliset $\pm 0^{\circ}\text{C}$ isotermien asemat eri ajankohtina esitetään piirustuksissa GEO 2370/6202.211...213. Näistä piirustuksista näkyvät 1. ja 2. jäädytyksen kehittyminen sekä molemmat sulamisvaiheet. Piirustukseen GEO 2370/6202.202 on lisäksi hahmoteltu ensimmäisessä ja toisessa jäädytysvaiheessa saavutetut uloimmat jäätymisrajat. Kuten havaitaan, sai jälkimmäinen jäädytys aikaan huomattavasti paksumman jääkuoren, poikkileikkausalaltaan jopa 6 kertaisen alueen. Merkille pantavaa on lisäksi se, että V-muotoisen jääkuoren sisällä tapahtunut jäätyminen kasvoi 2-vaiheessa suhteessa voimakkaammin. Jäädytysputken J1 suurempi jäädytysteho johtunee siitä, että tässä käytettiin ulompana putkena maahan porattua teräsputkea, kun taas J2:een asennettiin vielä erillinen suojaputki maahan poratun putken sisään ja välitila täytettiin hiekalla.

Poikkileikkauksissa L1, L2 ja L3 lämpötilamittauksista lasketut suurimpien jääsylintereiden sivumitat esitetään taulukossa 3.

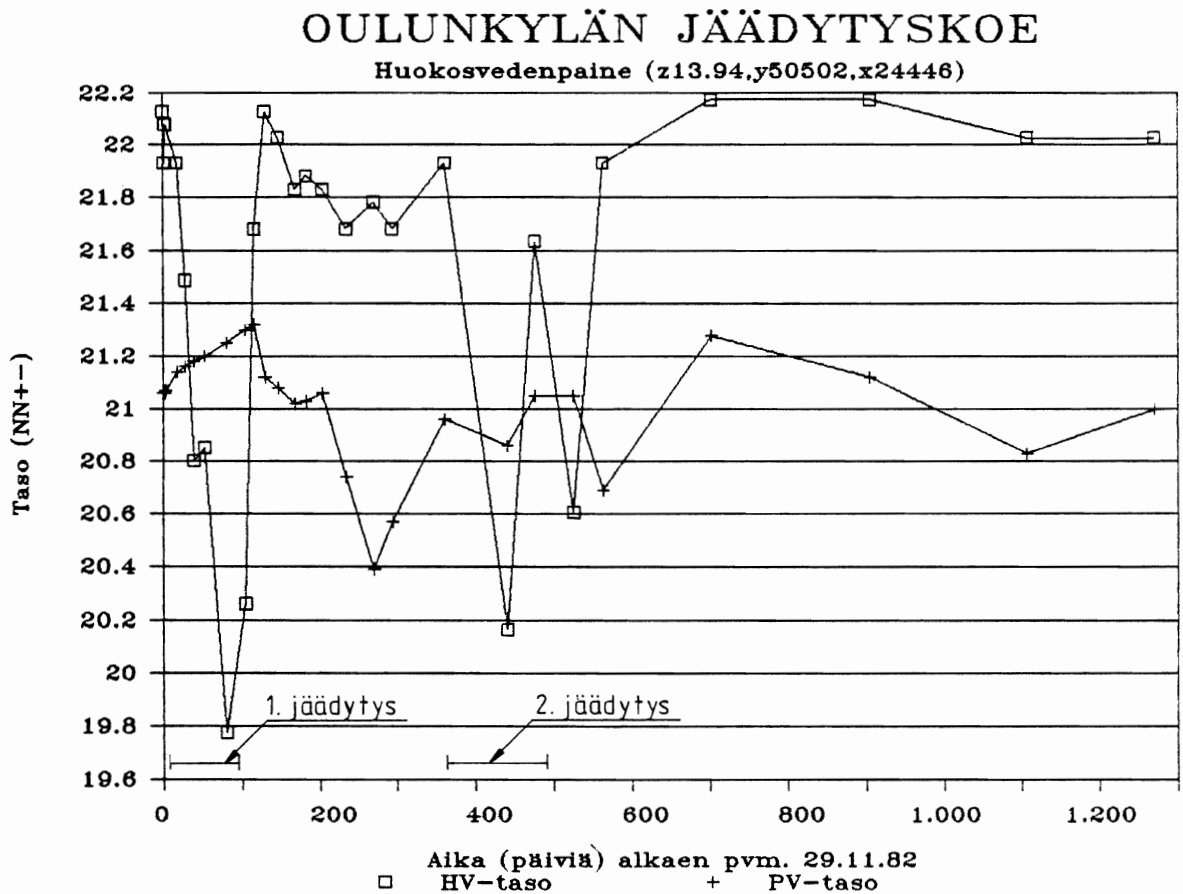
Taulukko 3. Suurimmat laskennalliset jääsylinterit 1. ja 2. jäädytyskerralla.

	Jäädytyskerta 1		Jäädytyskerta 2	
Poikkileikkaus	Korkeus (mm)	Leveys (mm)	Korkeus (mm)	Leveys (mm)
L1	1 350	2 490	3 190	6 870
L2	1 910	3 420	2 540	4 820
L3	900	600	1 440	2 370

6.2.2

Huokosvedenpaine ja painumat

Koejäädädytyksen aikana seurattiin huokosvedenpaineen kehitystä yhdellä anturilla, joka sijaitsi jäädädytysputkien risteyskohdan tasolla n. 0,7 m sivulle lähemmästä jäädädytysputkesta. Tuloksista (kuva 12) voidaan havaita selvä, jopa yli 2 m pudotus huokosvedenpaineessa jäädädytyksen aikana.

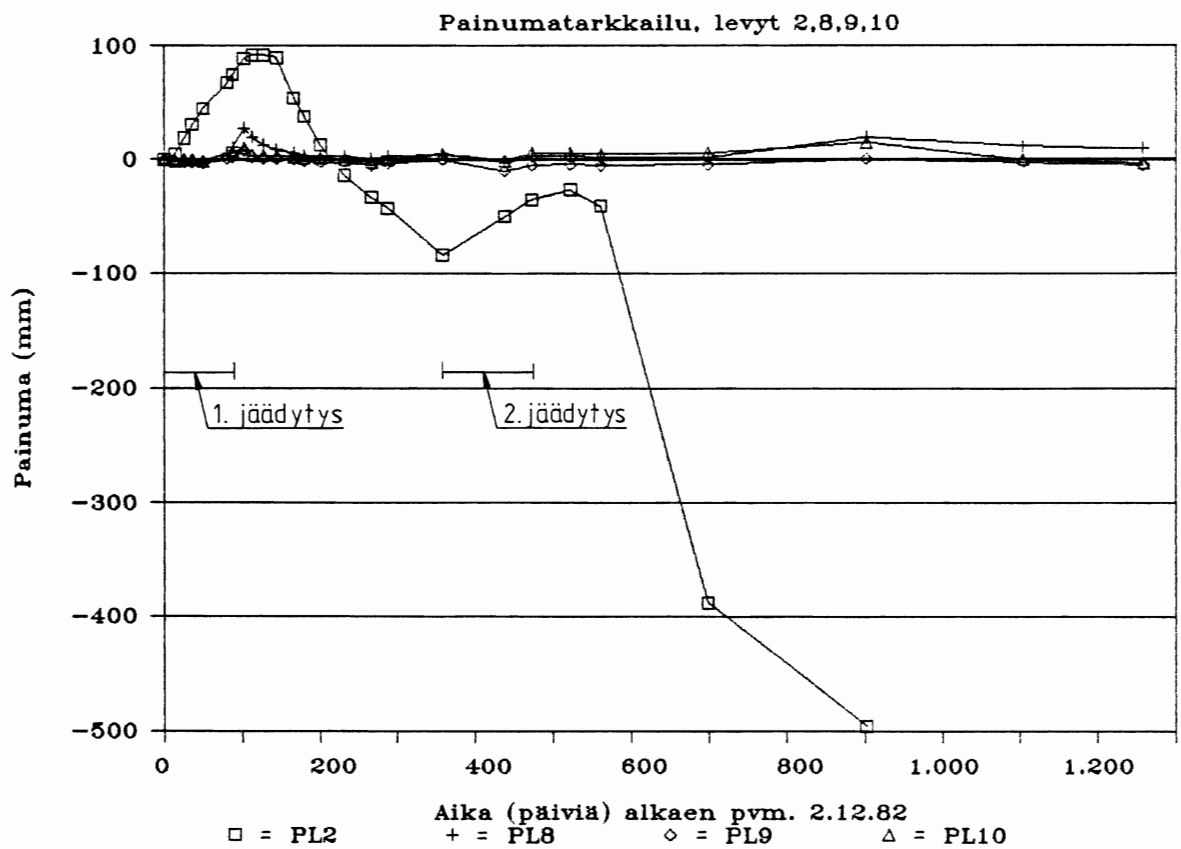
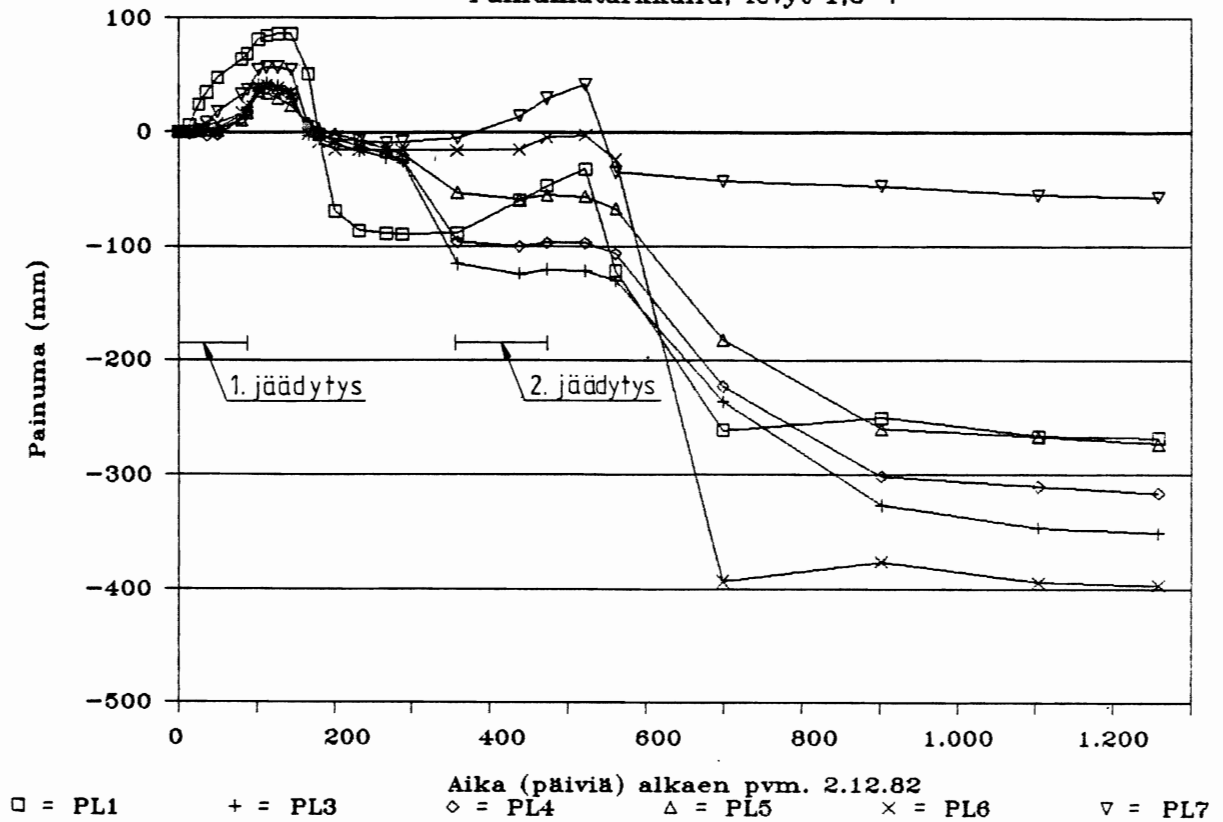


Kuva 12. Huokosveden- ja pohjavedenpaineen kehitys.

Aika-painumaseuranta levyjen 1...10 osalta selviää kuvasta 13. Levyt 1...7 olivat jäädädytyksen vaikutusalueella. Sen sijaan levyt 8...10 olivat mainitun alueen ulkopuolella, toimien vertailupisteinä, jotta mahdolliset maanpinnan luonnolliset routaliikkeet voitaisiin erottaa jäädädytyksen aiheuttamista liikkeistä.

OULUNKYLÄN JÄÄDYTYSKOE

Painumatarkkailu, levyt 1,3-7



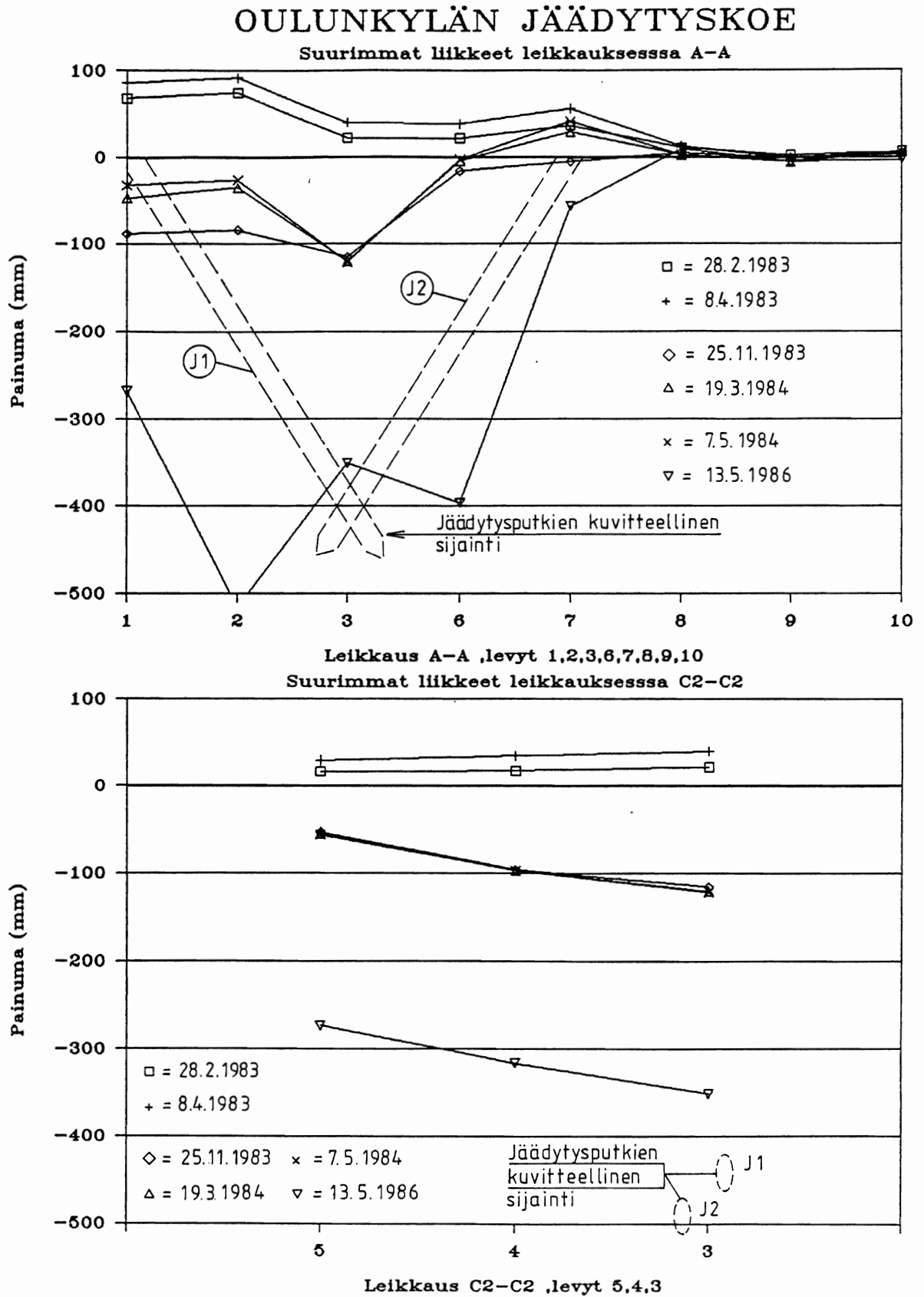
Kuva 13. Painumalevyjen 1...10 aika-painumaseuranta (levyt 8...10 ovat jäädytysalueen ulkopuolisia vertailupisteitä).

Merkille pantavaa on, että jäädytyksen aiheuttamat nousut jatkuvat vielä jonkin aikaa jäädytyksen lopettamisen jälkeen. Tämä johtuu siitä, että jäärintama etenee vielä ytimen lämpötilan laskiessa kuten aikaisemmin lämpötilamittaustenkin analysoinnin yhteydessä kohdassa 6.2.1 todettiin.

Jäädytysputken J2 ympärille asennettiin piirustuksen GEO 2730/6202.202 mukaiset pystyojat, joiden painumia nopeuttavaa vaikutusta pyrittiin myös selvittämään. Aika-painumakehitys selviää kuvasta 13. Ensimmäisen sulamisvaiheen painumakehitys oli kesken kun toistojäädytys aloitettiin. Pystyojien painumia nopeuttava vaikutus oli suhteellisen pieni. Selvimmin ero käy selville vertaamalla levyn PL2 painumisnopeutta levyihin PL3...6. Levyn 2 kohdalla on painuminen tapahtunut ilman pystyojien nopeuttavaa vaikutusta, ja tällä kohtaa painumakehitys on ollut hiirtainta, tosin levyn 2 kohdalla myös jäätyneen vesipitoisen saven määrä oli suurin, joka näkyy suurimpina kokonaispainumina.

Mitatut jäätymisnousut vaihtelivat välillä 36...92 mm eli olivat 2...7 % jäädytetyn kerroksen paksuudesta, keskiarvon ollessa 3,5 %. Kohdassa 5.2 esite-tyissä laboratoriokokeissa saatiin vaihteluväliksi 4...6 % ja keskiarvoksi 5 %, joten laboratorioko-keetkin mahdollistavat suhteellisen hyvien arvioiden laatimisen. Mitatut painumat vaihtelivat välillä S mitattu = 114...609 mm eli kaavan (3) kertoimelle k_1 saadaan kenttäkokeista käänteisesti laskemalla arvoja, jotka vaihtelevat välillä $k_1 = 2...6$, keskiarvon ollessa 4. Näin ollen aiemmin laboratorioko-keista johdettua kaavaa (3) ja sen sulamispainuma-kerrointa $k_1 = 3$ voidaan pitää kenttäkokeidenkin va- lossa varsin hyvänä arviona.

Kuva 14 havainnollistaa pituus- ja poikkileikkauksen muodossa jäädytyksen aiheuttamien liikkeiden ääriarvoja jäätymis- ja sulamisprosessin käännekohtissa.



Kuva 14. Pituus- ja poikkileikkaus jäätymisnousuista ja sulamispainumista eri ajankohtina (28.2.1983 = ensimmäinen jäädäytys päättyy, 8.4.1983 = jäätymisnousut suurimmillaan, 25.11.1983 = toistojäädäytys alkaa, 19.3.1984 = toistojäädäytys päättyy, 7.5.1984 = toistojäädäyttyksen aiheuttamat nousut suurimmillaan, 13.5.1986 = sulamis-painumat päättyneet).

Edelleen sulamispainumien suuruutta voidaan havainnollistaa hakemalla sellainen kuormitusyhdistelmä, joka saa aikaan vastaavat painumat jäädyttämättömälle savelle. Toisin sanoen etsitään korvauskuormayhdistelmä, joka vastaa jäädytyksen ja sulamisen vaikutusta ilman lisäkuormitusta. Jonkinlaisen kuvan saamiseksi siitä, millaisista voimista jäätymisessä on kysymys, tehtiin edellisen mukainen analyysi, joka esitetään piirustuksena GEO 2730/6202.214. Painuvaksi kerrokseksi määritettiin jäätynyt alue laajimmillaan ja kuormitusmalli sijoitettiin jäätyneen kerroksen yläpintaan. Maalajiparametreina käytettiin kohdan 2 mukaisia normaaleihin pohjatutkimuksiin perustuvia määrittelyksiä. Kuormitusten suuruuksia varioimalla löydettiin em. piirustuksen mukainen tulos, jonka mukaan jäädytys koekohteessa vastasi 120...260 kPa kuormituselementeistä muodostettua yhdistelmää.

Periaatteellisia eroja sulamispainumien ja normaalien konsolidaatiopainumien välillä on koetulosten mukaan ainakin kaksi. Huokosvedenpaine ei nouse sulamisvaiheen aikana lähestulkoonkaan vastaavasti: Esimerkiksi korvauskuormalaskelman mukaan huokosvesianturiin (kuva 12) olisi pitänyt kohdistua suurimmillaan n. 12 m ylipaine. Toiseksi sulamispainuminen tapahtuu normaaleja konsolidaatiopainumia huomattavasti nopeammin, vaikkakin aika-painumariippuvuus on kuvattavissa kaavalla, jossa painuma on verrannollinen ajan neliöjuureen.

6.2.3 Siipikairaukset

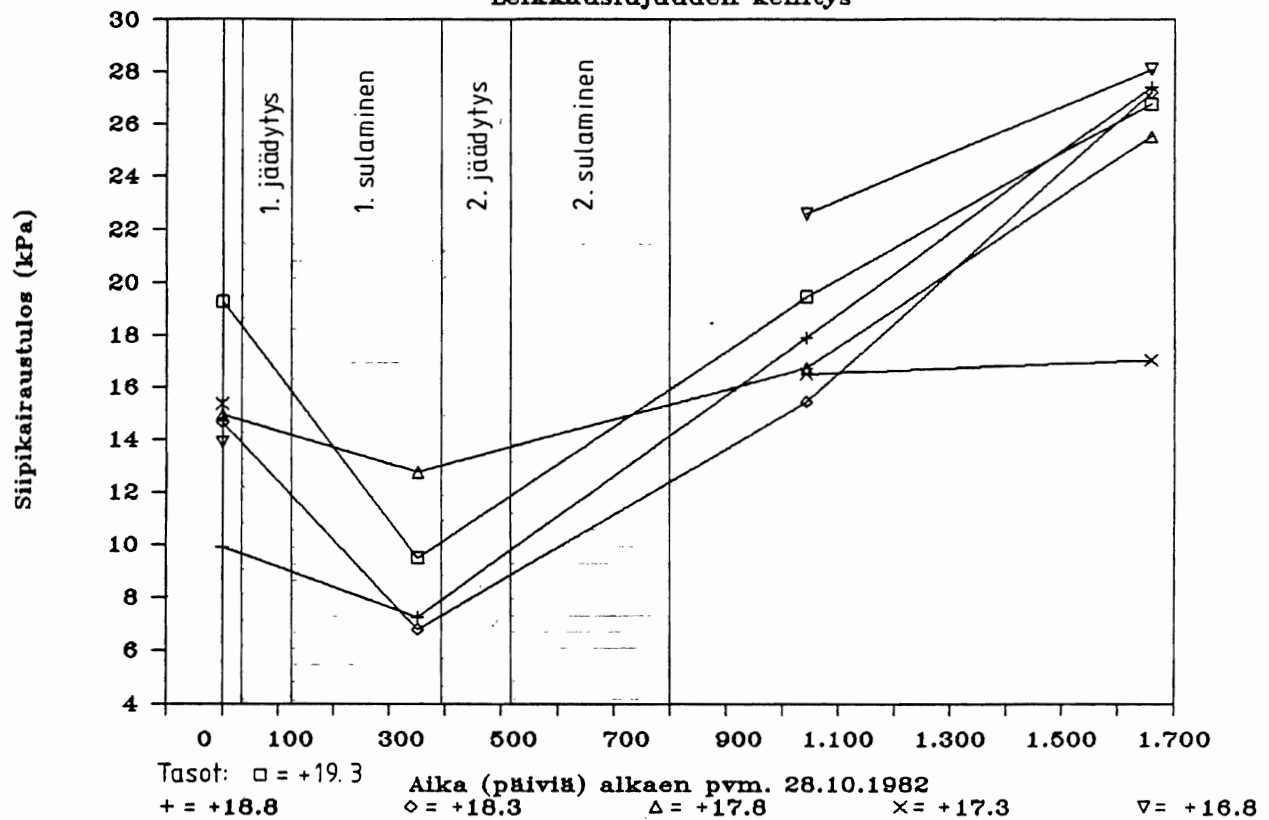
Siipikairauksilla pyrittiin seuraamaan saven leikkauslujuuden muutoksia jäätymis-sulamisprosessin eri vaiheissa. Piirustuksessa GEO 2730/6202.210 on nähtävissä kaikki tulokset, joita neljänä eri ajankohdana suoritettiin.

Tarkempi analyysi tehtiin jäädytyssylinterin sisällä tapahtuneiden muutosten välillä. Kuvassa 15 esitetään sekä häiriintymättömän että häirityn leikkauslujuuden arvot luonnontilassa, sulamisvaiheen aikana ja sulamisvaiheen jälkeen.

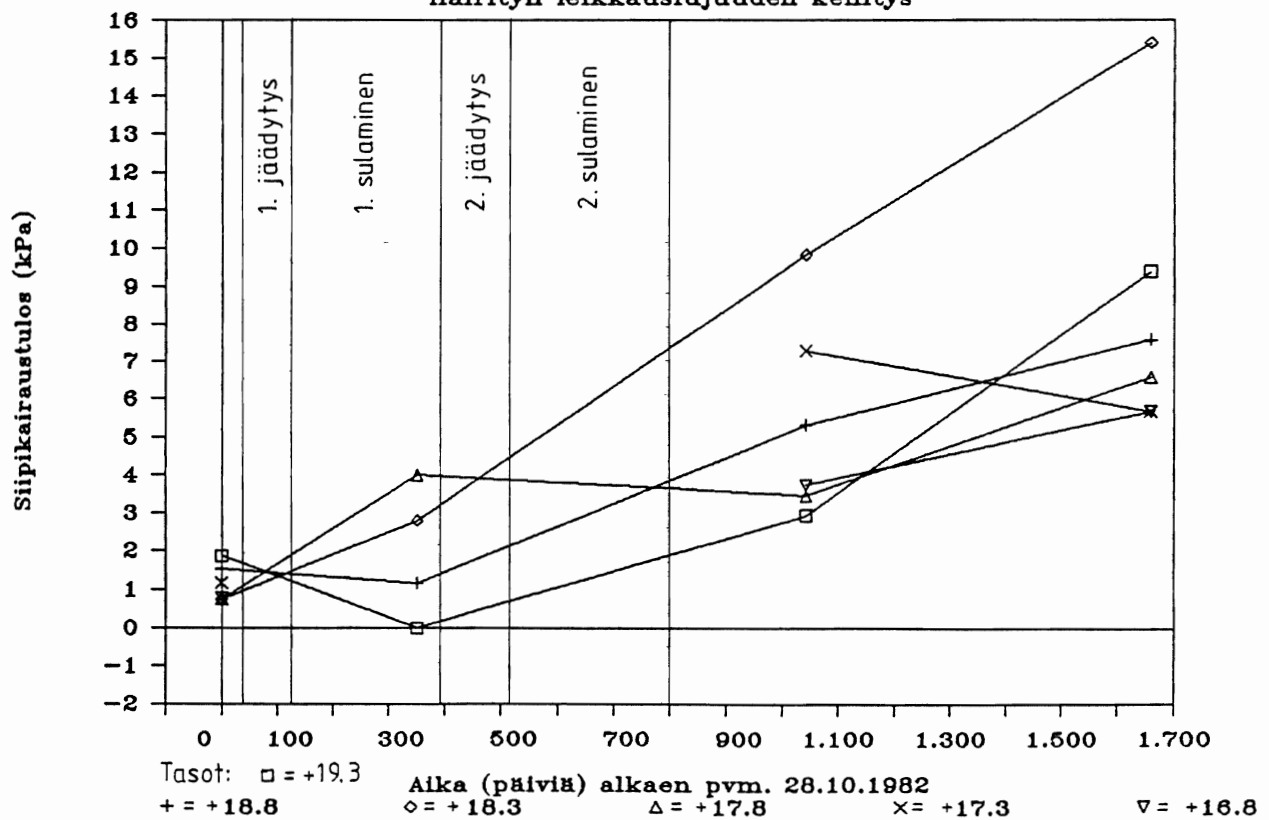
Kuvasta 16 selviää saven sensitiivisyyden kehitys. Kun häiriintymisherkkyys tässä tapauksessa on alunperin ollut välillä $S_t = 7...20$, eli pääosin kohtalaisen herkkää, niin se jäätymisen ja sulamisen seurauksena on pudonnut välille $S_t = 2...7$, joka merkitsee että savi on tämän jälkeen ainoastaan vähän herkkää.

OULUNKYLÄN JÄÄDYTYSKOE

Leikkauslujuuden kehitys



Häirityn leikkauslujuuden kehitys



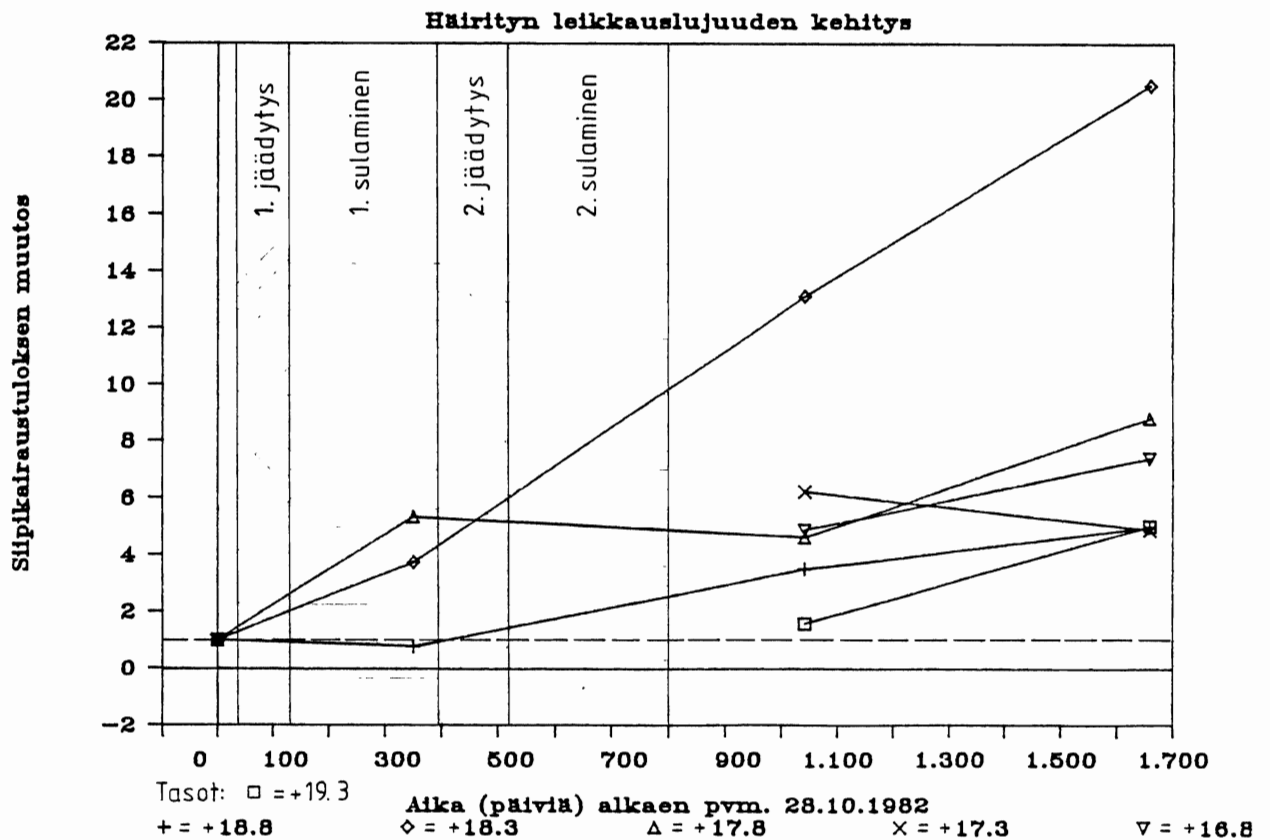
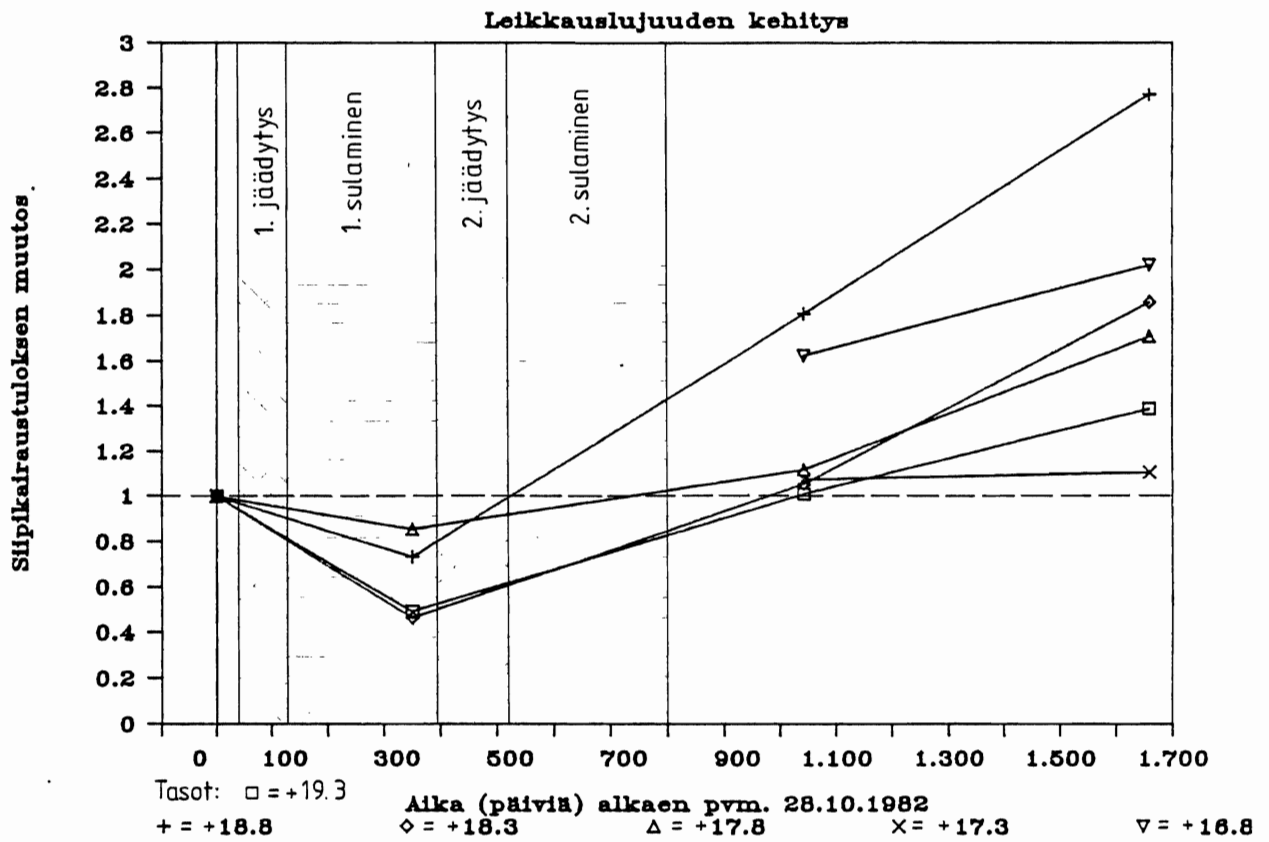
Kuva 15. Häiriintymättömän ja häirityn leikkauslujuuden arvot eri ajankohtina.

Kirjoittaja ehdottaa leikkauslujuudelle otettavaksi käyttöön seuraavan sisältöisen kaavan, joka ottaa huomioon jäätyamisen aiheuttamat muutokset.

$$\begin{cases} S_{sj}(t) = r_t \cdot S_s \\ S_{shj}(t) = 3 \cdot r_t \cdot S_{sh} \\ r_t \quad (\text{sulamisvaiheessa}) \cong 0,5 \\ r_t \quad (\text{sulamispainumien jälkeen}) \cong 1,5 \\ S_s = \text{leikkauslujuus siipikairalla ennen jäädytystä} \\ S_{sj} = \text{leikkauslujuus jäädytyksen jälkeen} \\ S_{sh} = \text{häiritty leikkauslujuus ennen jäädytystä} \\ S_{shj} = \text{häiritty leikkauslujuus jäädytyksen jälkeen} \\ r_t = \text{leikkauslujuuden muutoskerroin} \end{cases}$$

Aikaisemmin on kohdassa 5.3 myös ollut esillä sulamisen jälkeinen leikkauslujuuden kasvu. Taulukon 1 mukaan saatiin eri puolilta Helsinkiä otetuille näytteille kartioleikkauslujuuden kasvuksi keskimäärin 100 %. Lähes yhtä suuri kasvu eli keskimäärin 80 % on saavutettu n. 3 vuotta jäädytyksen päättymisen jälkeen Oulunkylässä tehdyissä siipikairauksissa. Molemmissa koesarjoissa on kuitenkin suhteellisen suuri hajonta, ja mikäli matemaattisesta keskiarvosta vähennetään puolet keskihajonnasta, saadaan molemmissa tapauksissa varovaisesti määritetyksi keskiarvoksi 50 % leikkauslujuuden kasvua jäätyamisen ja sulamisen jälkeen. Sulamisvaiheen aikaiselle leikkauslujuuden pienenemiselle ei ole käytettävissä vertailevia laboratoriokoesarjoja, ja tätä ilmiötä muiden tässä tiedotteessa esitettyjen väittämien ohella olisikin alan tutkimuslaitosten syytä selvittää jatkossa perusteellisemmin.

OULUNKYLÄN JÄÄDYTYSKOE



Kuva 17. Häiriintymättömän ja häirityn leikkauslujuuden muutokset eri ajankohtina suhteessa alkuperäiseen arvoonsa.

7. YHTEENVETO

Tämän työn yhteydessä on tutkittu sekä jäädytetyn että sulaneen saven ominaisuuksia. Laboratorioko-keissa on jäädytys tapahtunut lämpötilassa -10°C . Tämän on katsottu parhaiten vastaavan todellista tilannetta, jossa n. -24°C lämpötilassa olevaa liuosta kierrättämällä muodostetaan jäädytetty maakerros. Kenttäkoe on järjestetty todellisissa mittasuhteissa, ja tilannetta on seurattu ennakkoon, jäädytysten aikana, sulamisvaiheessa ja vielä jälkeenkäin päin yhteensä n. 5 vuoden ajan.

Jäädytetyistä näytteistä havaittiin, että puristusjännitysten huippuarvo saavutetaan vasta suurilla 20 % luokkaa olevilla kokoonpuristuman arvoilla. Murtokuormituksen jälkeen tehdyissä toistokuormituksissa saavutettiin lähes yhtä suuret puristusjännityksen arvot kokoonpuristumien edelleen kasvaessa. Suorien leikkauskokeiden ja puristuskokeiden tuloksia vertailemalla havaittiin, että leikkauslujuus on puolet 10 % kokoonpuristumaa vastaavasta puristusjännityksen arvosta. Sadan tunnin kuormitusta vastaavaksi mitoitusleikkauslujuudeksi saatiin n. 50 kertaa saven alkuperäinen leikkauslujuus.

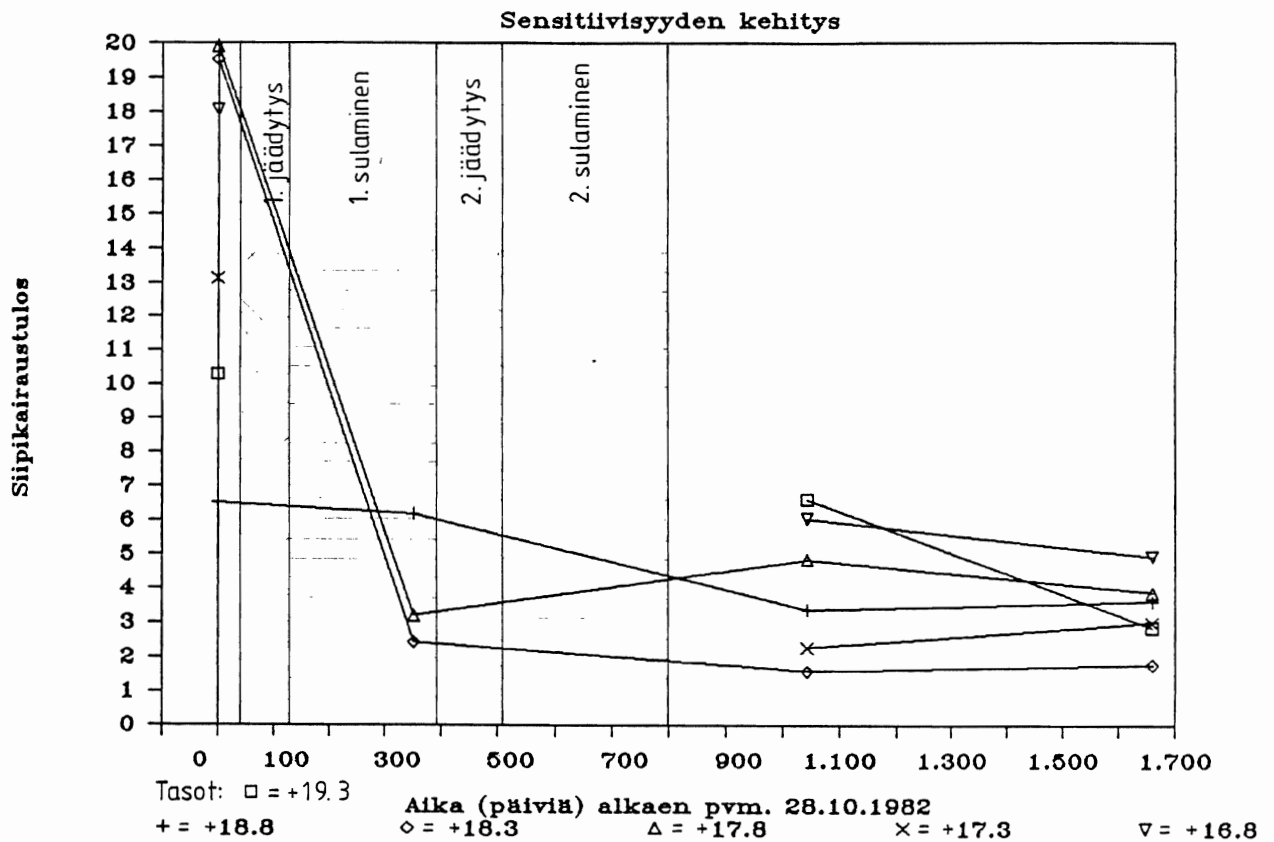
Jäätymisen ja sulamisen aikaisten liikkeiden selvittämiseksi tehtiin ödometrikoesarjoja, joissa todellista tilannetta pyrittiin mahdollisimman pitkälle jäljittämään. Laboratorio- ja kenttätulosten perusteella on kirjoittaja päättänyt esittämään seuraavat aikaisemmin julkaisemattomat riippuvuudet. Merkintöjen täydelliset selitykset löytyvät ao. kohdista.

Sulamisen tai kuormituslisäyksen aiheuttamat kokoonpuristumat voidaan määrittää saven vesipitoisuuteen ja normaaliin palautusmoduuliin perustuen seuraavasti:

$$\Delta \varepsilon = \frac{w}{k_1} + \frac{k_4 \cdot \Delta \sigma \cdot 100}{m_2}$$

Termin k_1 arvo vaihteli kenttäolosuhteissa välillä 2...6, mutta laboratoriotulosten perusteella on suositeltava arvo 3. Termin k_4 vaihteluarvo on 2...4, mutta sen tarkkuudella ei yleensä ole ratkaisevaa merkitystä lopputuloksen kannalta, koska pelkkä sulaminen ilman lisäkuormitusta aiheuttaa yleensä yli 90 % painumista.

OULUNKYLÄN JÄÄDYTYSKOE



Kuva 16. Sensitiivisyyden (= saven häiriintymisherkkyden) arvot eri ajankohtina.

Paremmen kuvan leikkauslujuuden kehityksestä saa kun samoilta tasoilta saadut tulokset jaetaan alkuperäisellä leikkauslujuudella. Näin saadut tulokset sekä häiriintymättömien että häirittyjen lujuuksien osalta esitetään kuvassa 17. Sulamisvaiheen aikana tapahtuu häiriintymättömän leikkauslujuuden kohdalla selvää laskua. Sulamispainumien tapahduttua on lujuus sen sijaan 1...2 kertainen alkuperäiseen verrattuna ja sulamispainumien päättymisen jälkeen lujuuskehitys näyttää edelleen jatkuvan. Häirityn leikkauslujuuden kohdalla lujuuskehitys on vielä huomattavasti suurempaa, eikä edes sulamisvaiheen aikaista lujuuden pienenemistä näytä esiintyvän.

Veden poistumiselle jäätyksen ja sulamisen seurauksena saatiin seuraava yhteys,

$$w_j = k_w \cdot w$$

jossa vesipitoisuuden pienenemiskerroin $k_w = 2/3$. Tästä olettamuksesta saadaan toinen painumakaava, joka ilmoittaa pelkän konsolidaation osuuden.

$$\Delta \varepsilon_k = \left(1 - \frac{100 + 2/3 w \cdot 2,65}{100 + w \cdot 2,65} \right) \cdot 100$$

Kokonaispainuma saadaan suuruusluokalleen kertomalla edellinen tulos arvolla 5/4.

Edellä esitetyt ja eri aineistoihin perustavat kaavat antavat lähellä toisiaan olevia tuloksia.

Toisen ja kolmannen jäädytyksen aiheuttamat kokonaisliikkeet voidaan määrittää seuraavista yhtälöistä:

$$\Delta \varepsilon_2 = \frac{w}{k_2} \text{ ja } \Delta \varepsilon_3 = \frac{w}{k_3}$$

jossa $k_2 \approx 20$ ja $k_3 \approx 40$.

Saven jäädytykselle mitattiin keskimääräiseksi kokonaisenergian tarpeeksi n. 200 kWh/m³, kun teoreettinen veden jäätymisenergia on n. 100 kWh/m³. Näin ollen pelkkä energiakustannus ei tee jäädytysmenetelmän käytöstä kallista ratkaisua.

Huokosvedenpianemittauksissa todettiin jäädytysvaiheiden aikana selvä paineen putoaminen siten, että alkuperäinen ylipaine pohjaveteen nähden muuttui alipaineeksi. Sulamispainumien suuruudesta huolimatta huokosvedenpaine ei noussut normaaleja konsolidaatiopainumia vastaavasti. Lisäksi sulamispainumat tapahtuvat vastaavia kuormituksen aiheuttamia konsolidaatiopainumia nopeammin.

Saven jäätymisnousuksi saatiin suljetuissa laboratoriokeissa keskimäärin 5 % ja vastaavasti kenttäkokeissa keskimäärin 3,5 %. Merkille pantavaa on lisäksi, että jäätymisnousut jatkuvat vielä jonkin aikaa jäädytyksen lopettamisen jälkeen jääsylinterin edelleen kasvaessa ja ytimen lämpötilan noustessa.

Leikkauslujuus pienenee alkuperäisestä sulamisvaiheen aikana ja alkaa sen jälkeen kasvaa. Kasvu on kumma kyllä hitaampaa kuin painumakehitys. Lopullinen leikkauslujuus on alkuperäistä suurempi. Häirityn leikkauslujuuden kasvu on vielä huomattavasti suurempaa, eikä edes sulamisvaiheen aikaista leikkauslujuuden pienenemistä ole havaittu. Edellä oleva voidaan esittää kaavamudossa siipikairaleikkauslujuutena seuraavasti:

$$S_{sj}(t) = r_t \cdot S_s$$

Termi r_t on sulamisvaiheessa n. 0,5 ja myöhemmin n. 1,5.

Häiritty leikkauslujuus on jäätyksen ja sulamisen seurauksena puolestaan:

$$S_{shj}(t) = 3 \cdot r_t \cdot S_{sh}$$

Näin ollen saven häiriintymisherkkyys pienenee selvästi jäätyksilmiön seurauksena ja ajan myötä myös saven leikkauslujuus kasvaa.

Kaikki edellä esitetty viittaa siihen, että jäätyminen muuttaa pysyvästi saven alkuperäisen rakenteen. Maalajimuutos on kirjoittajan mielestä lähinnä saven silttiin päin. Edelleen näiden pohdintojen seurauksena tuntuu kuivakuoren muodostumiselle löytyvän luonnollinen pakkasesta johtuva selitys. Samoin tämän osan kirjoittamisajankohtaa (alkukesä 1987) lähellä oleville saviluiskien sortumisille maassamme näyttäisi olevan ainakin yksi hyvä selitys, nimittäin ennätyspakkasten jälkeen sulaneiden savikerrosten heikentynyt leikkauslujuus.

Kaikki tässä tiedotteessa julkituotu aineisto on tarkoitettu kaikkien tarvitsijoiden käytettäväksi ja kritisoitavaksi. Pienentämättömät piirustukset on lisäksi tilattavissa geotekniseltä osastolta. Useita väittämiä on tietoisesti esitetty tieteellisiä tarkasteluja ajatellen suppeilla aineistoilla, mutta olisi kohtuullista että vastaväittäjät ainakin perustaisivat omat teoriansa tieteellisesti kattaviin aineistoihin. Tärkein tulos ainakin kirjoittajan mielestä on tiettyjen uusien lainalaisuuksien löytyminen. Kaavoissa esitettyjen kertoimien arvoille on sen sijaan tarpeen saada tarkennusta ja kattavuutta.

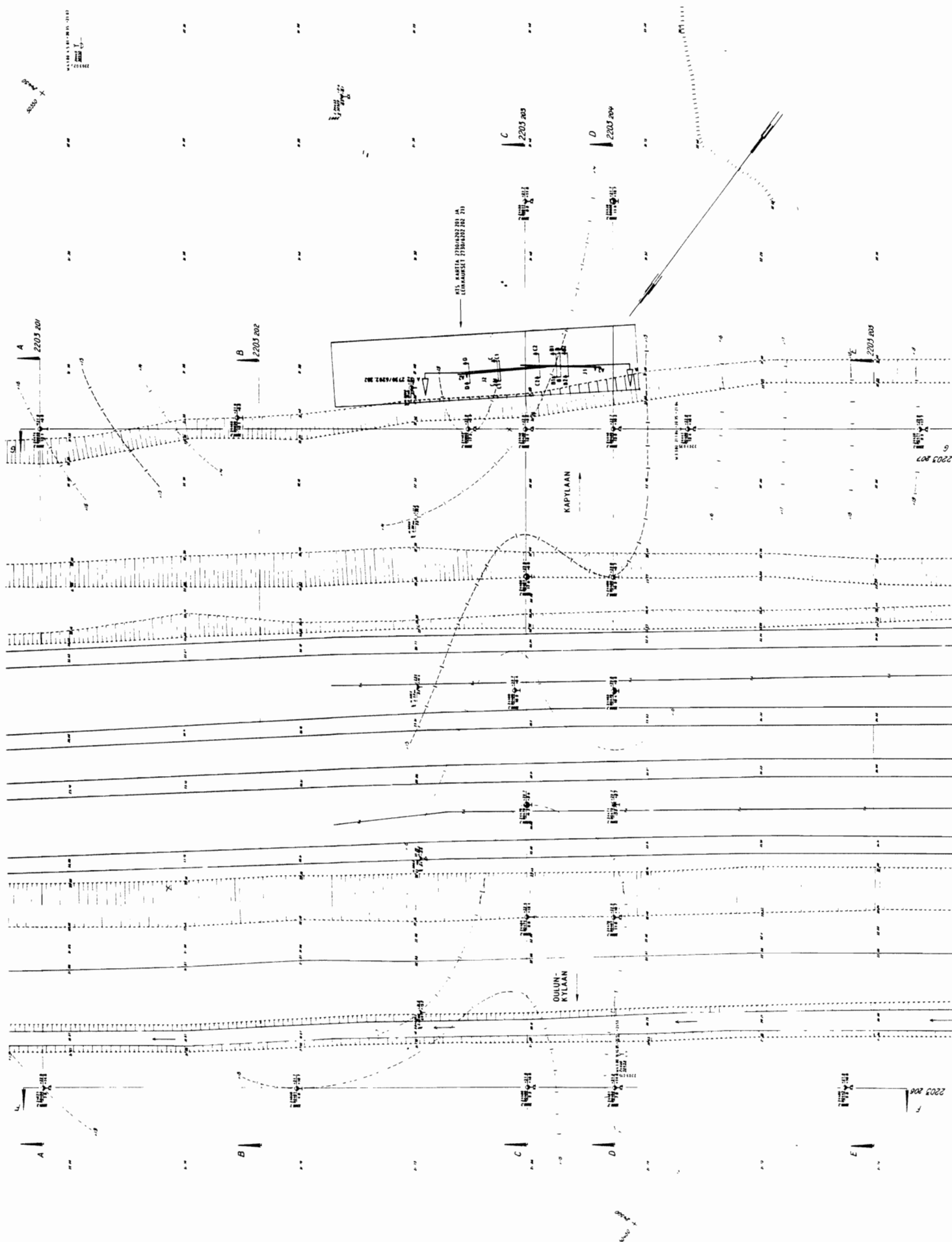
KIRJALLISUUSLUETTELO

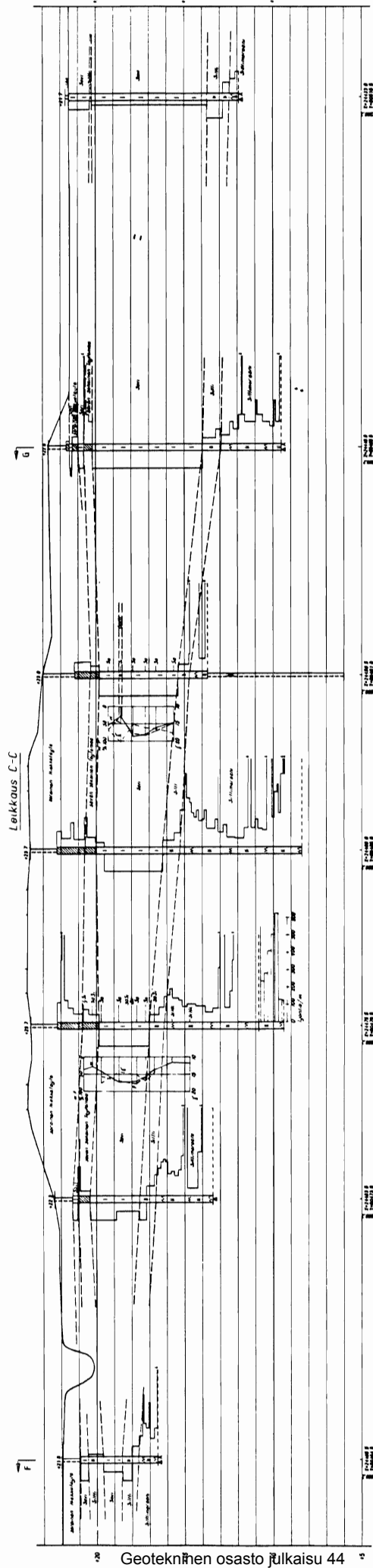
- /1/ Proceedings of the First International Symposium on Ground Freezing, 8. - 10.3.1978, Ruhr-University Bochum, edited by Hans L. Jessberger, Elsevier scientific publishing company, Amsterdam - Oxford - New York 1979, 550 s.
- /2/ Preprints of the 2nd International Symposium on Ground Freezing, 24. - 26.6.1980, Norwegian institute on technology, Trondheim, ISGF'80, 1101 s.
- /3/ Proceedings of the Third International Symposium on Ground Freezing, 22. - 24.6.1982, U.S. army corps on engineerings, Cold regions research and engineering laboratory, Hanover, New Hampshire, USA, ISGF'82, 461 s.
- /4/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry, Pohjarakennusohjeet, RIL-121, SFS-4315, Helsinki 1979.
- /5/ Tsyтовich N.A., The Mechanics of Frozen Ground, McGraw-Hill Book Company 1975, 426 s.
- /6/ Geotekninen osasto, Kylänvanhimmantien alikäytävä, pohjarakennussuunnitelma, TNO 2203.2, Helsinki, 7.8.1981.
- /7/ Rakennuslehti n:o 8, 24.2.1983, Tunneli jäädyttämällä.
- /8/ Andersland, O.B. & Andersson, D.M., Geotechnical Engineering for Cold Regions, McGraw-Hill Book Company 1978, 551 s.
- /9/ Johnston, G.H., Permafrost Engineering Design and Construction, John Wiley & Sons 1981, 540 s.
- /10/ Phukan, A., Frozen Ground Engineering, Prentice-Hall, Inc. 1985, 331 s.
- /11/ Routa rakentamisessa, Insko 26-1985.
- /12/ Routatutkimusseminaari, Suomen ikeiroutatutkimus ja tekniikan kansallinen komitea, SGY, VTT ja Vesihallitus 1986.
- /13/ Proceedings of the Fourth International Symposium on Ground Freezing, 5-7 Aug 1985, Sapporo, edited by Seiitti Kinosita & Masami Fukuda, A.A.Balkema, Rotterdam-Boston 1985, 373 s.
- /14/ Pylkkänen Juhani, Hienorakeisten maalajien painumaoimaisuuksista, VTT Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 7, Otaniemi 1973, 44 s.

LIITELUETTELO PIENENNETYISTÄ PIIRUSTUKSISTA

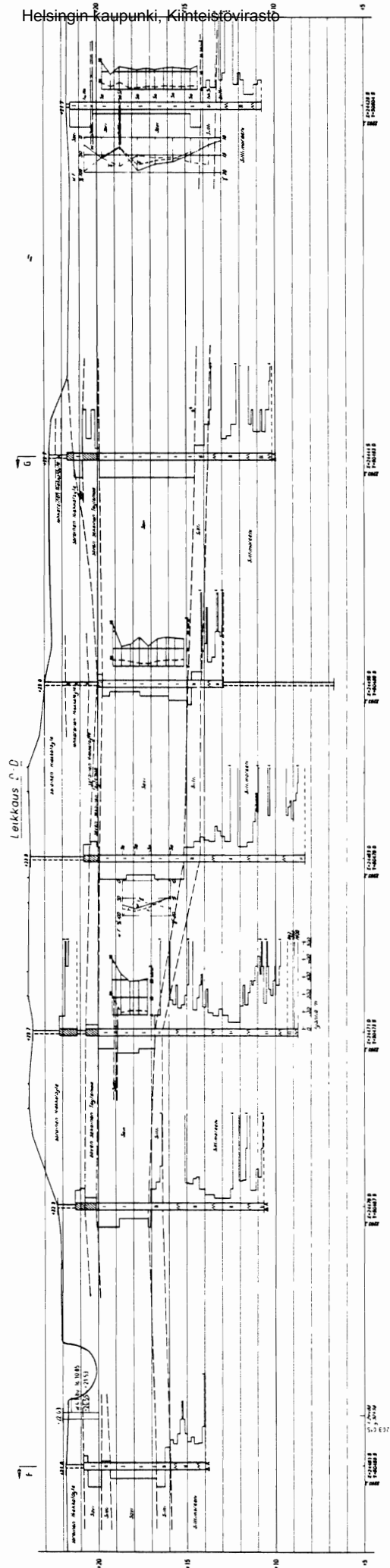
Pienentämättömät piirustukset on tilattavissa osoitteesta Helsingin kaupungin geotekninen osasto, Yrjönkatu 21 b A, 00100 Helsinki tai puhelimitse 60981.

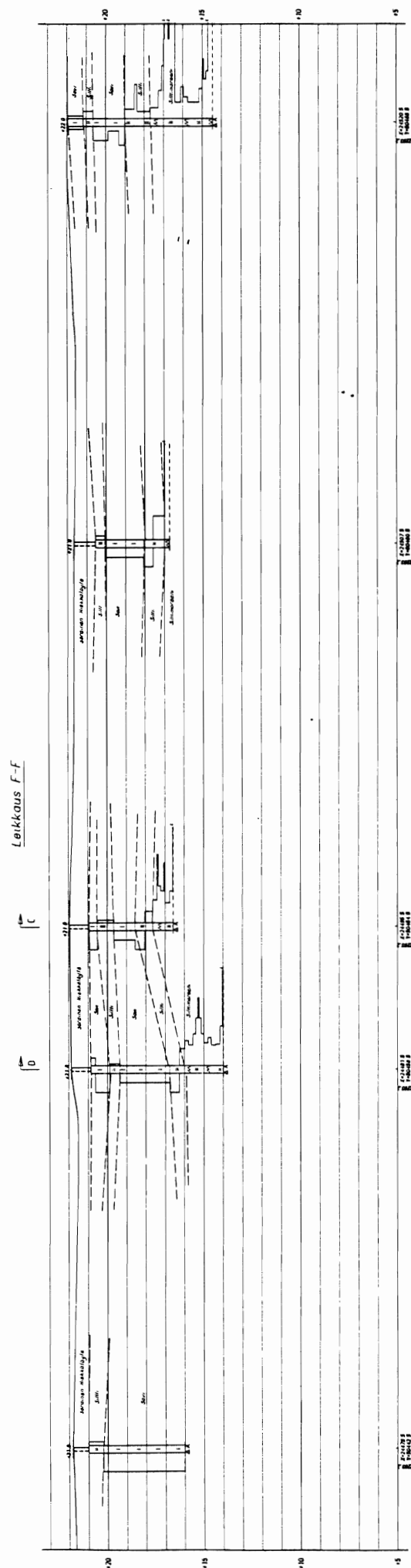
Liite n:o	GEO	Sisältö	Pienent. mittakaava	Pvm.
1	2203.208	Kartta	1:100	7.8.1981
2	.203	Leikkaus C-C	"	"
3	.204	Leikkaus D-D	"	"
4	.206	Leikkaus F-F	"	"
5	.207	Leikkaus G-G	"	"
6	.215	Jäädytetty savi. Tyypillinen kuormitus- kokoonpuristumakäyrä		"
7	.216	Jäädytetty maa. Puristuskokeet pisteessä x 24459.5 y 50491.0		"
8	.217	Jäädytetty maa. Regressioanalyysi näytteille pisteessä x 24459.5 y 50491.0		"
9	.218	Jäädytetty savi. Vertailevat puristus- ja leikkauskokeet		"
10	.219	Jäädytetty maa. Ödometrikokeet pisteissä x 24475 y 50479 ja x 24463 y 50479		"
11	.220	Syklisesti jäädytetty savi. Ödometrikokeet pisteessä x 24463 y 50479		"
12	.229	Jäädytys suunnitelman idea vaiheittain (Vähäaho & Eronen)		23.6.1982
13	2730/6202.201	Kartta	1:20	17.6.1987
14	.202	Leikkaus A-A	"	"
15	.203	Leikkaus B-B	"	"
16	.204	Leikkaus B1-B1	"	"
17	.205	Leikkaus B2-B2	"	"
18	.206	Leikkaus C-C	"	"
19	.207	Leikkaus C1-C1	"	"
20	.208	Leikkaus C2-C2	"	"
21	.209	Leikkaus D-D	"	"
22	.210	Leikkaus A2-A2	"	"
23	.211	$\pm 0^{\circ}$ C-isotermin lasketut sijainnit pysty- suoraan ja kohtisuoraan jäädytysputkea J1 vasten lämpötilamittausputken L1 kohd.	"	"
24	.212	$\pm 0^{\circ}$ C-isotermin lasketut sijainnit pysty- suoraan ja kohtisuoraan jäädytysputkea J2 vasten lämpötilamittausputken L2 kohd.	"	"
25	.213	$\pm 0^{\circ}$ C-isotermin lasketut sijainnit pysty- suoraan ja kohtisuoraan jäädytysputkea J2 vasten lämpötilamittausputken L3 kohd.	"	"
26	.214	Jäädytyksen aiheuttamia sulamispainumia jäljittelyvä kuormitusmalli	1:50	"

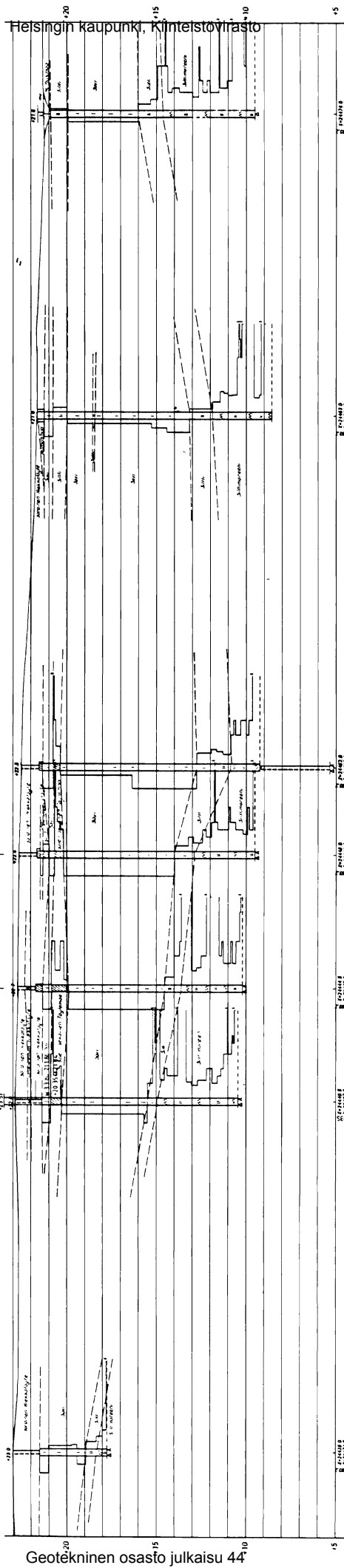


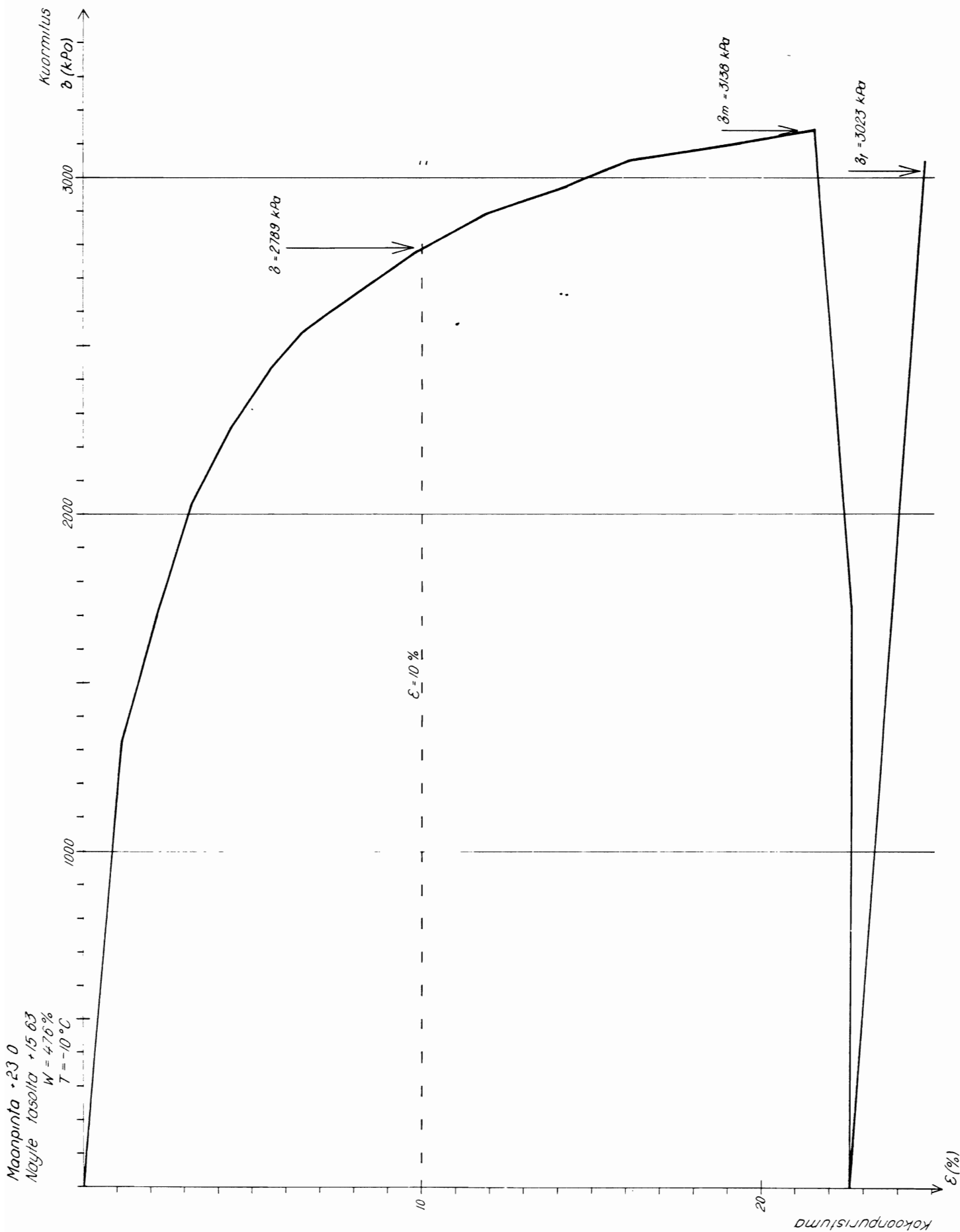


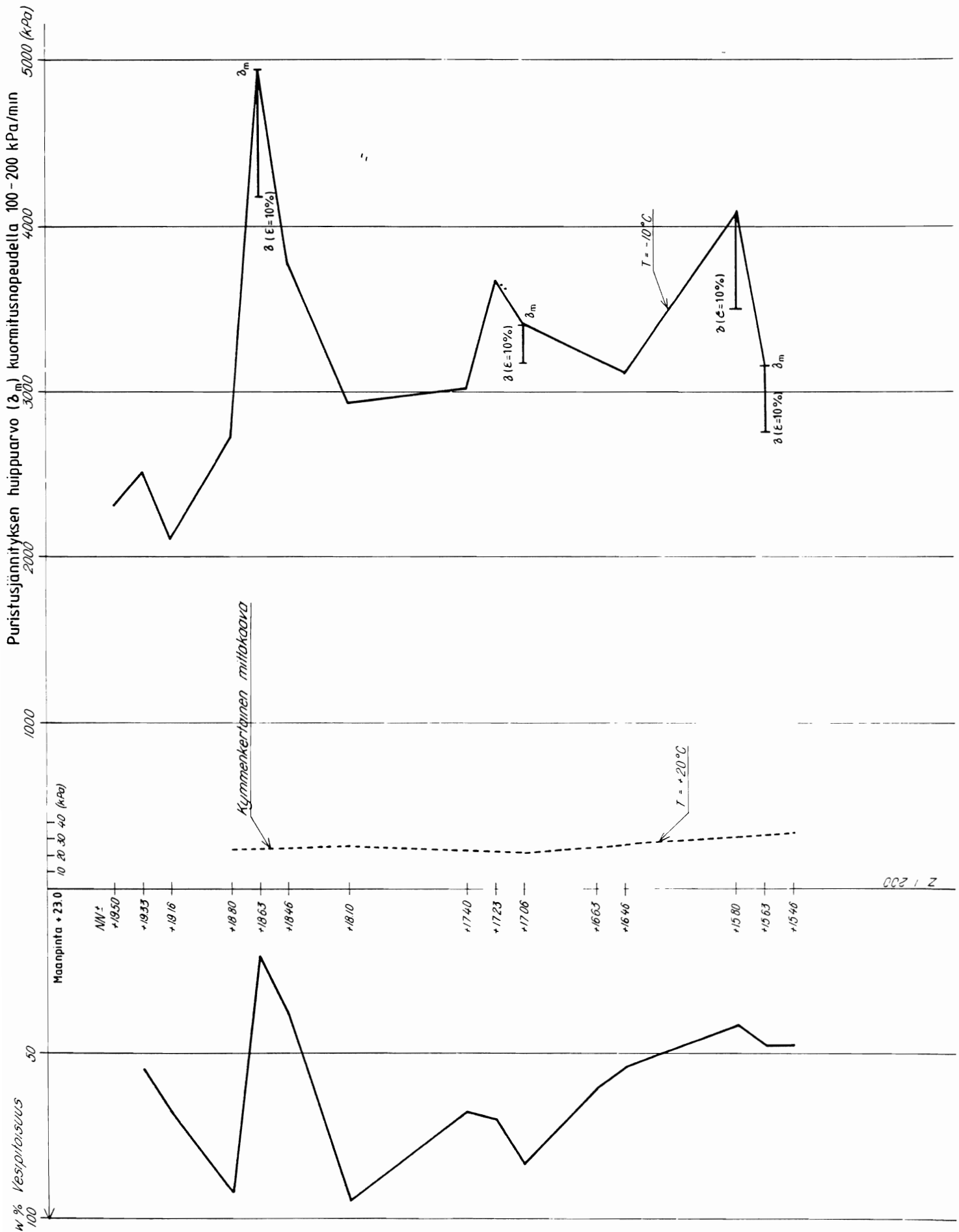
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

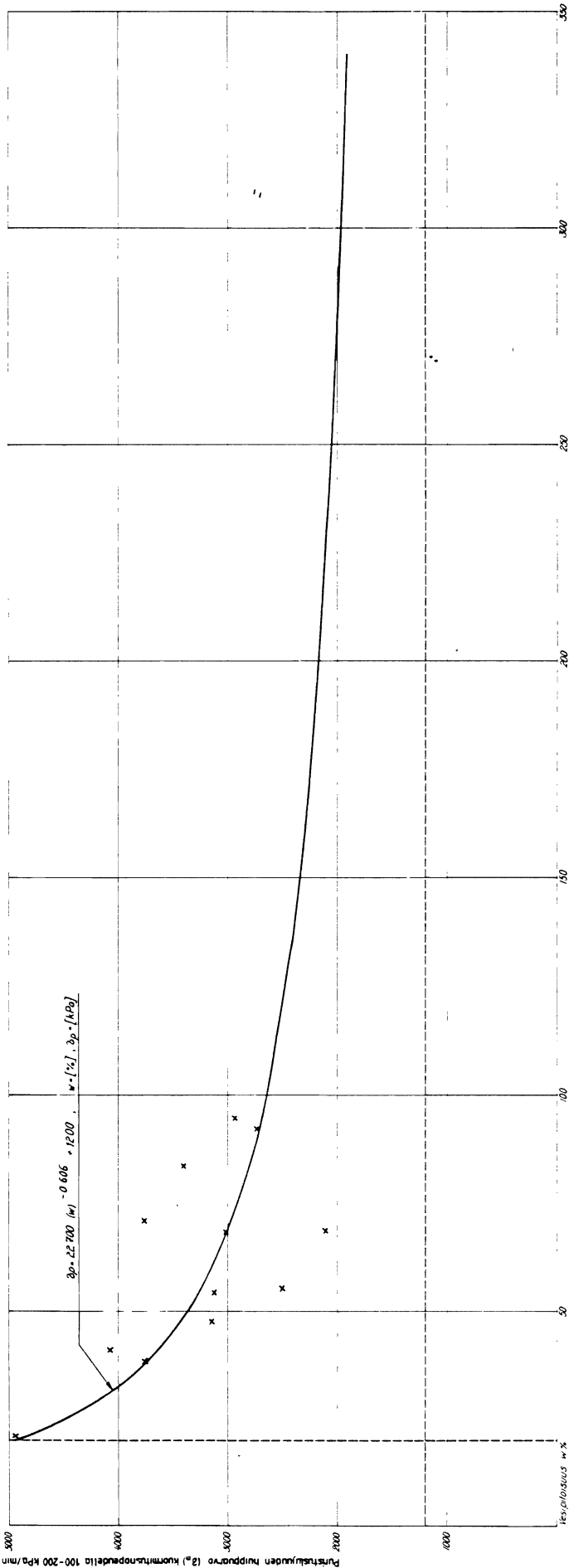




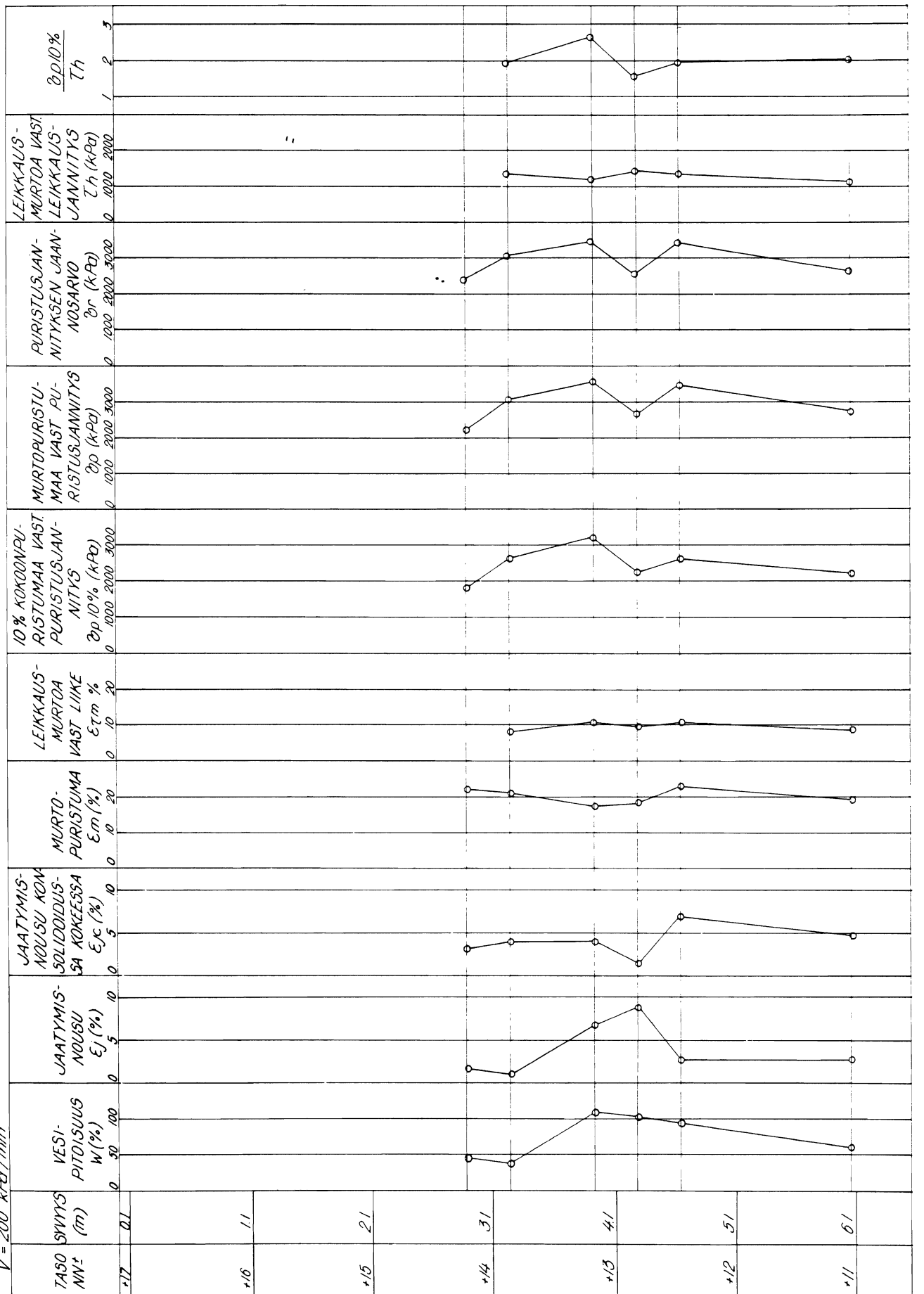


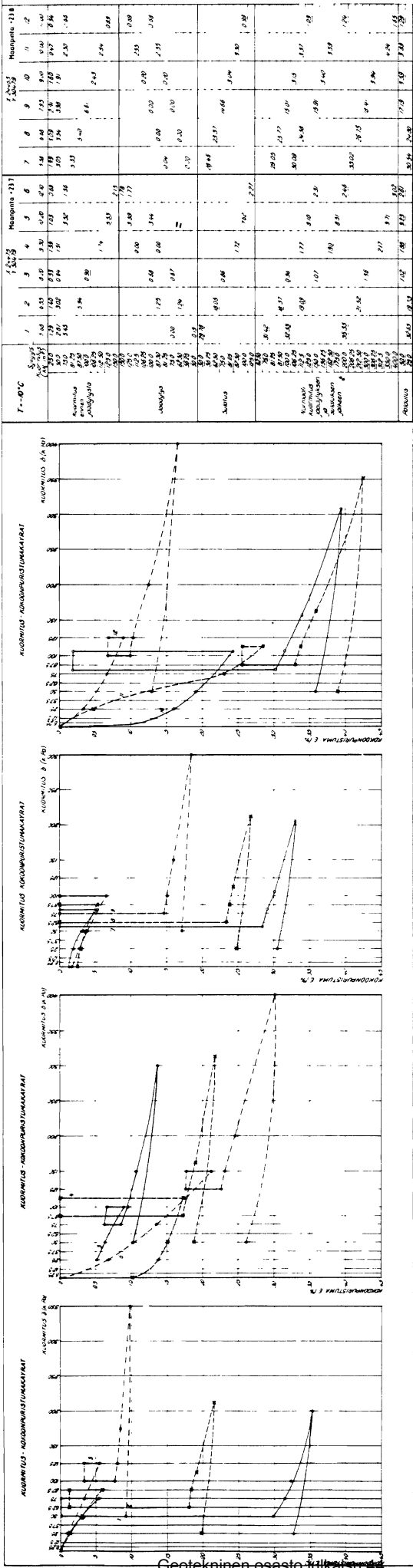






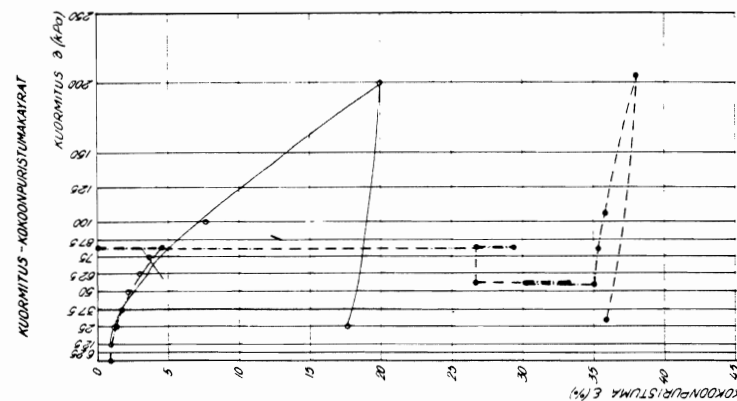
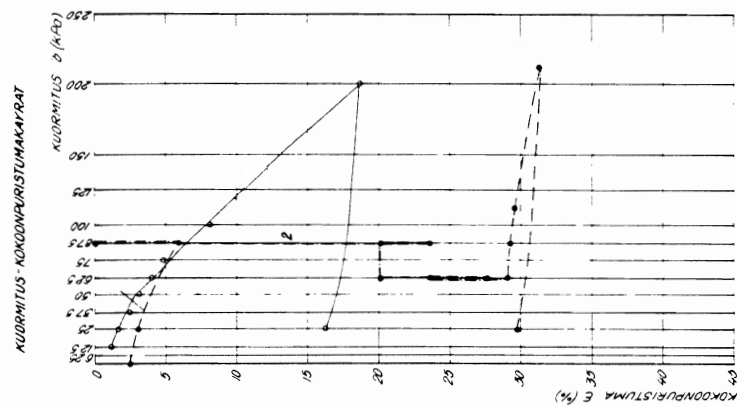
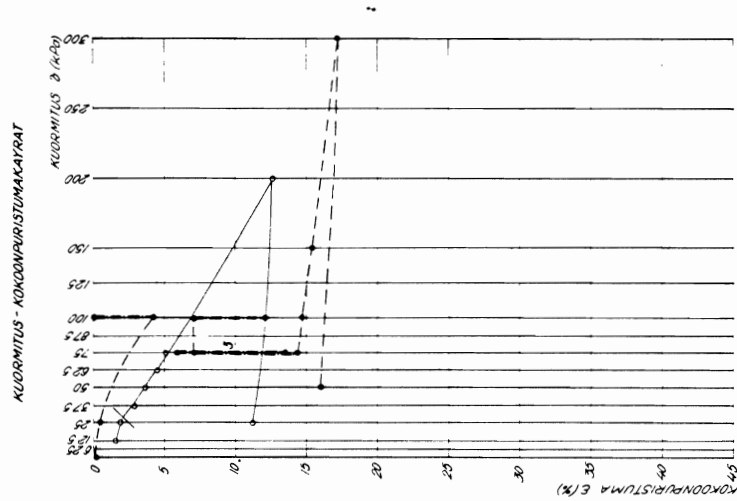
Näytteet (TNO 2310)
 PL 297 / 230 vas
 NN± +17.1
 V = 200 kPa / min

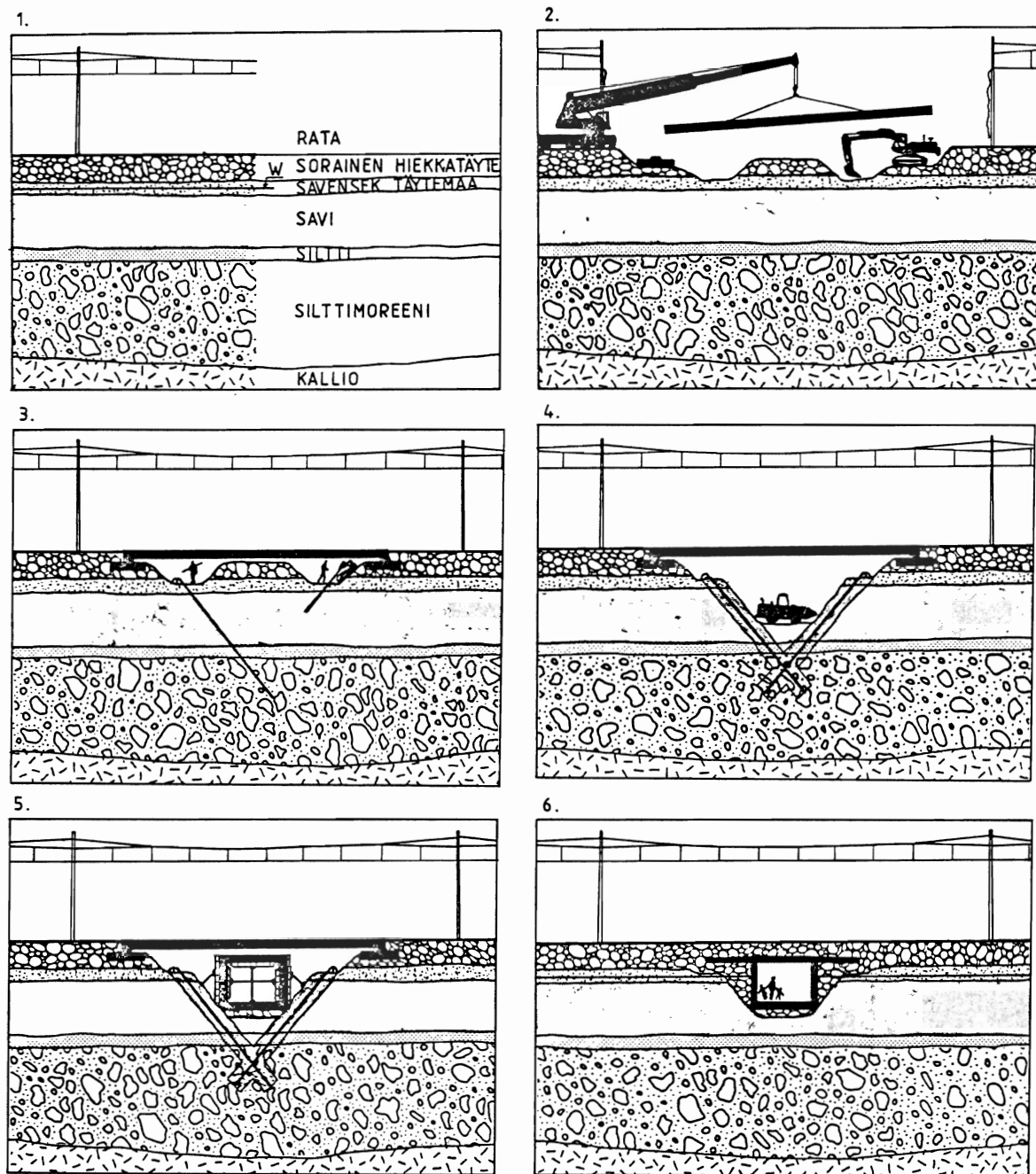




Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Maapinta +23.8		1 244663 9 504 13		
T = -10°C		1	2	3
0	0.975	5.88	0.88	7.93
25	1.002	2.544	0.234	0.234
50	1.029	3.089	0.509	0.509
75	1.056	4.600	1.020	1.020
100	1.083	5.920	1.920	1.920
125	1.110	0.0	0.0	0.0
150	1.137	0.0	0.0	0.0
175	1.164	29.336	23.623	12.128
200	1.191	100	20.183	7.084
225	1.218	87.5	26.649	7.089
250	1.245	0.0	20.183	7.089
275	1.272	33.227	27.497	13.534
300	1.299	75	23.589	5.891
325	1.326	58.75	29.001	14.372
350	1.353	100	28.217	14.627
375	1.380	108.75	35.871	19.343
400	1.407	150	39.636	19.343
425	1.434	200	38.030	31.284
450	1.461	250	29.634	17.186
475	1.488	300	29.634	16.083
500	1.515	350	29.634	16.083



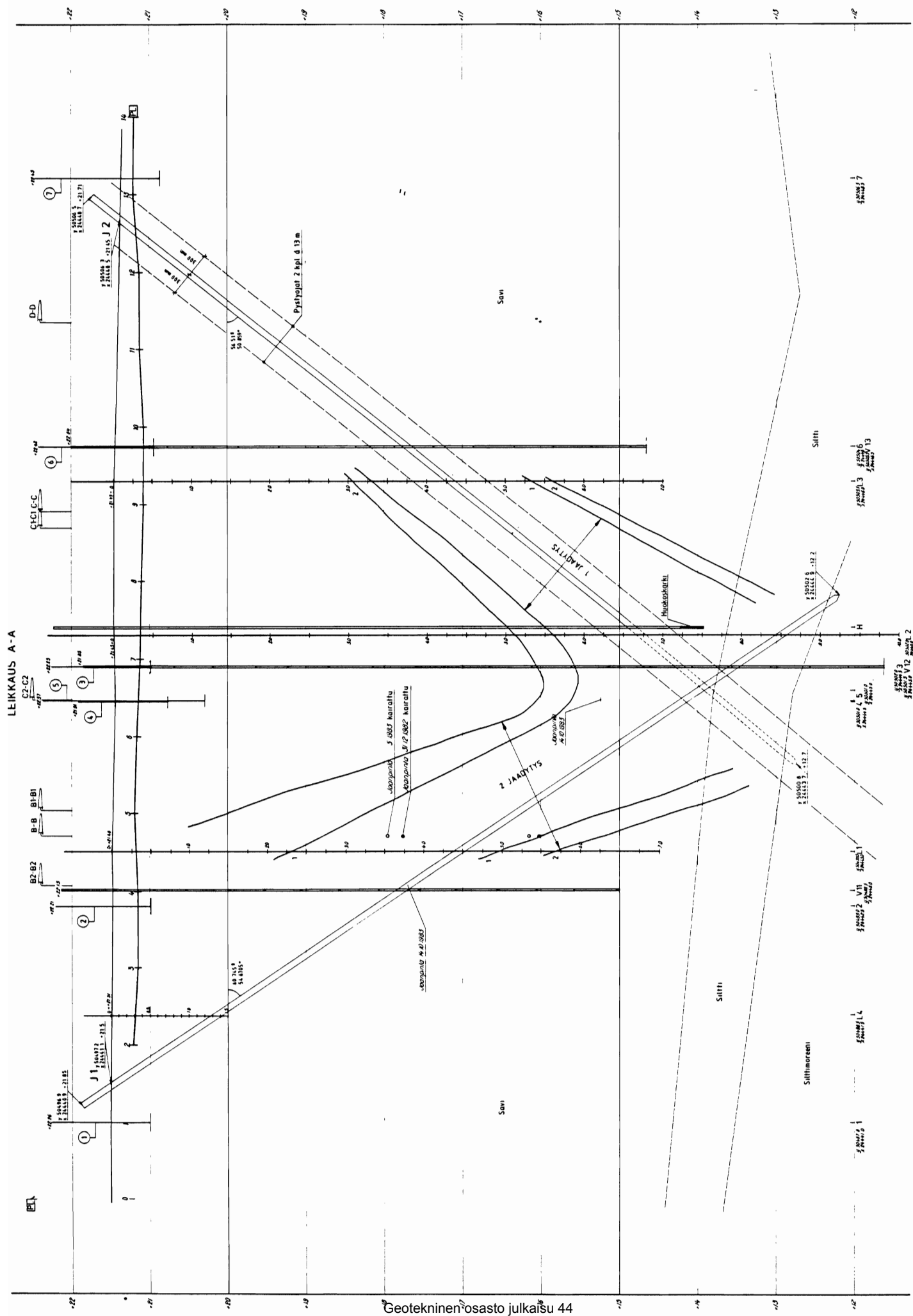


Jäädätyssuunnitelman idea vaiheittain (Vähäaho & Eronen)

- Vaihe 1 alkutilanne
- " - 2 apusiltojen asennus ja "porausojien" kaivu
 - " - 3 jäädätyssputkien poraus sekä jäädätyssulatus-jäädätyssprosessi
 - " - 4 kaivu jäädätyttyjen seinämien suojassa
 - " - 5 betonitunnelin rakentaminen
 - " - 6 lopputulos

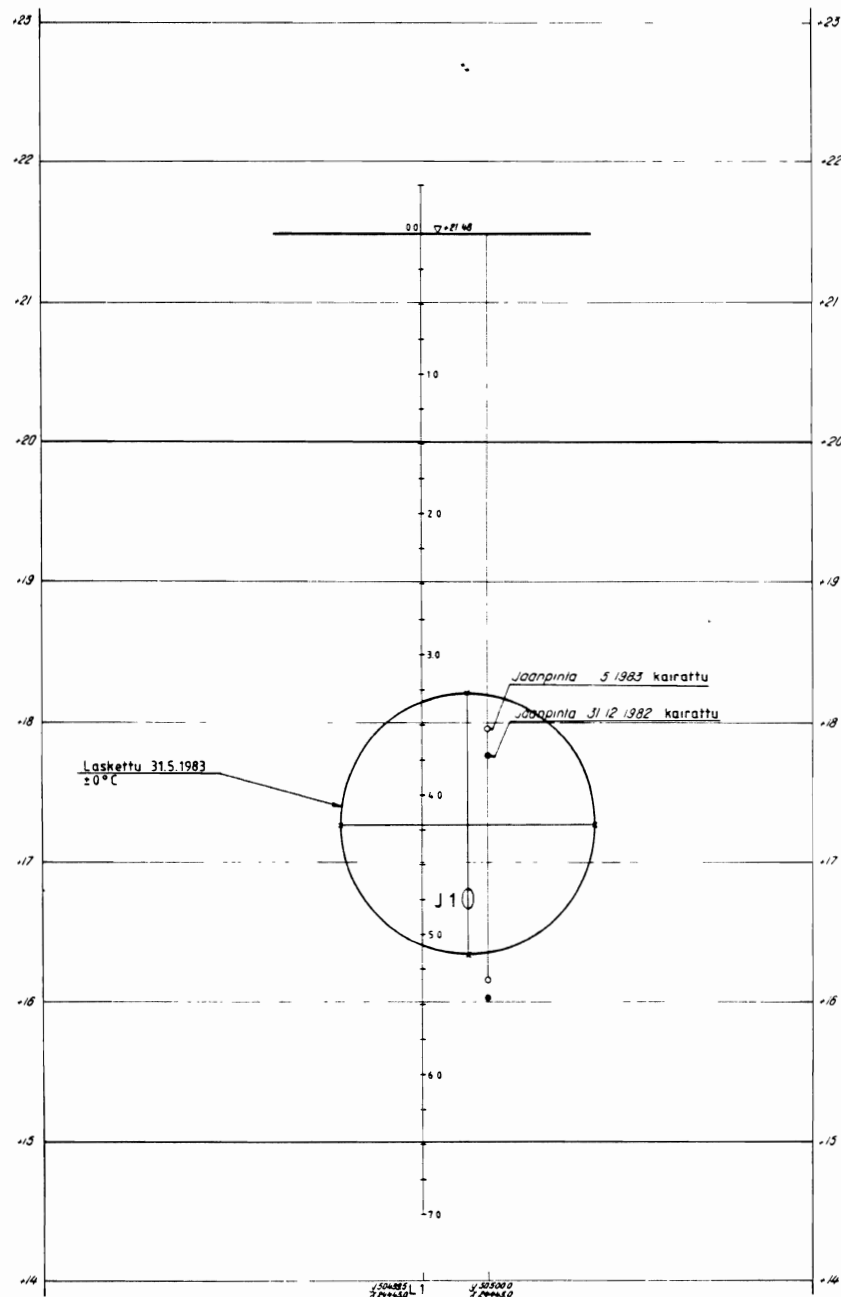
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 1039 104



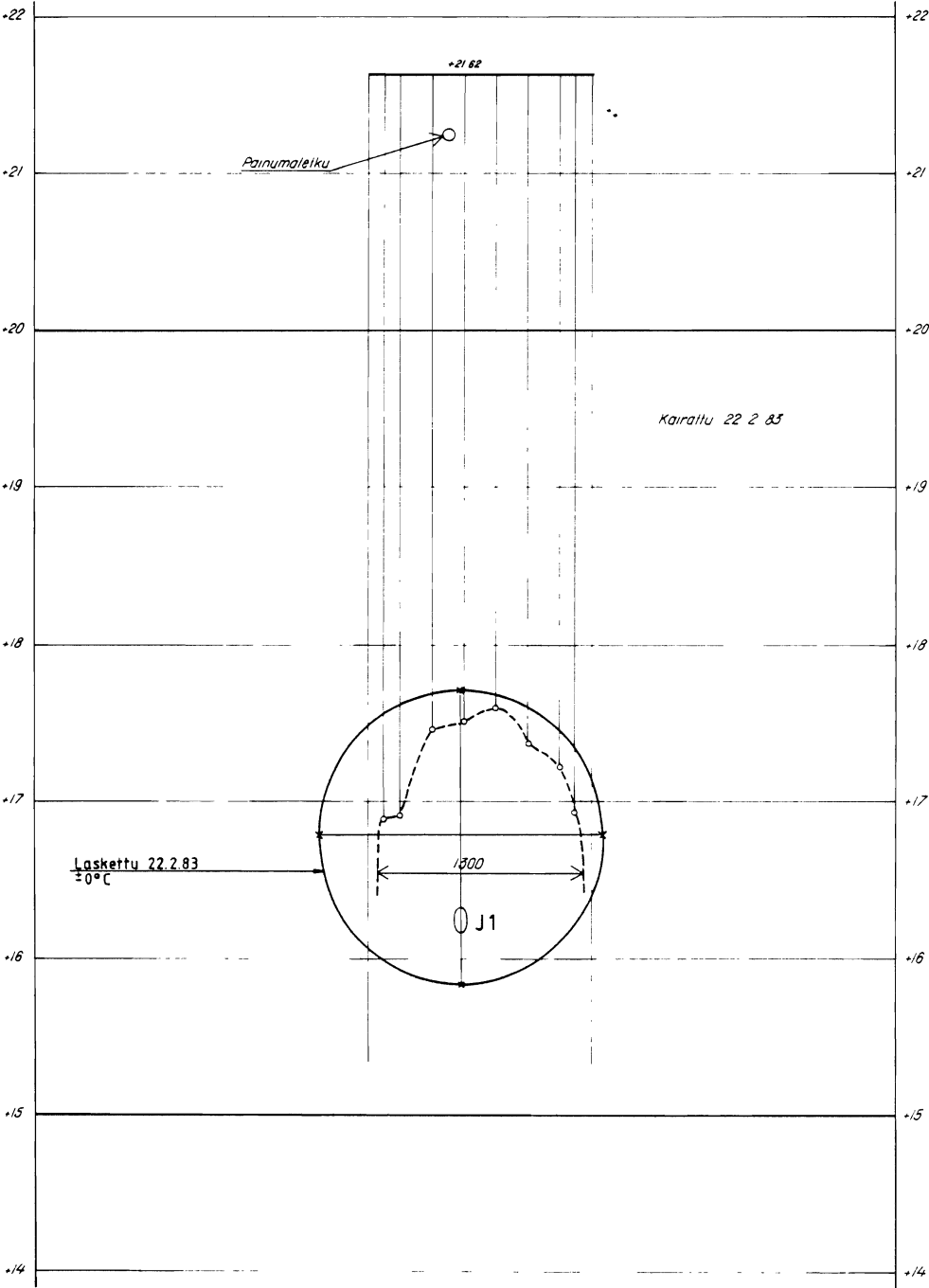


Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

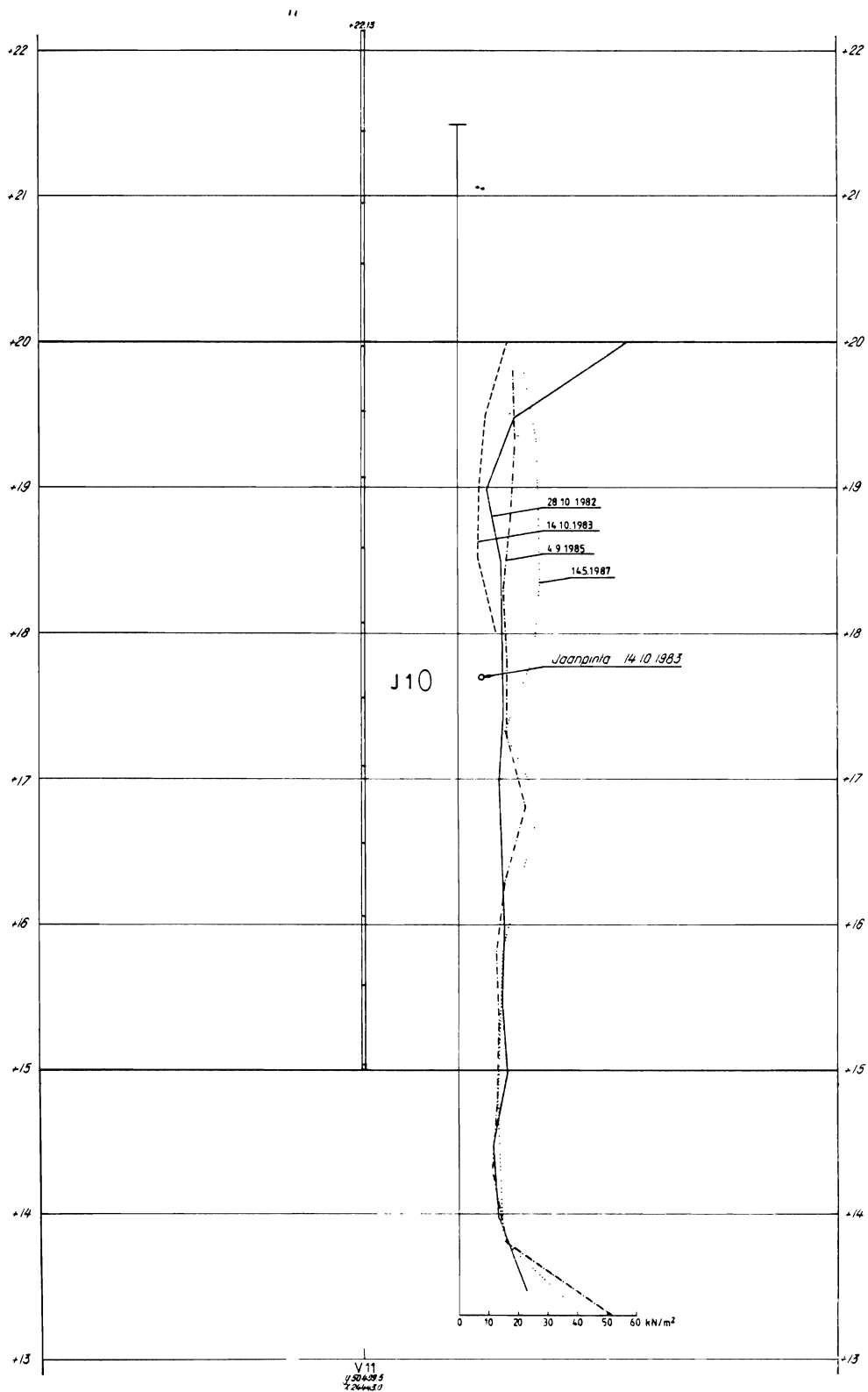
LEIKKAUS B-B



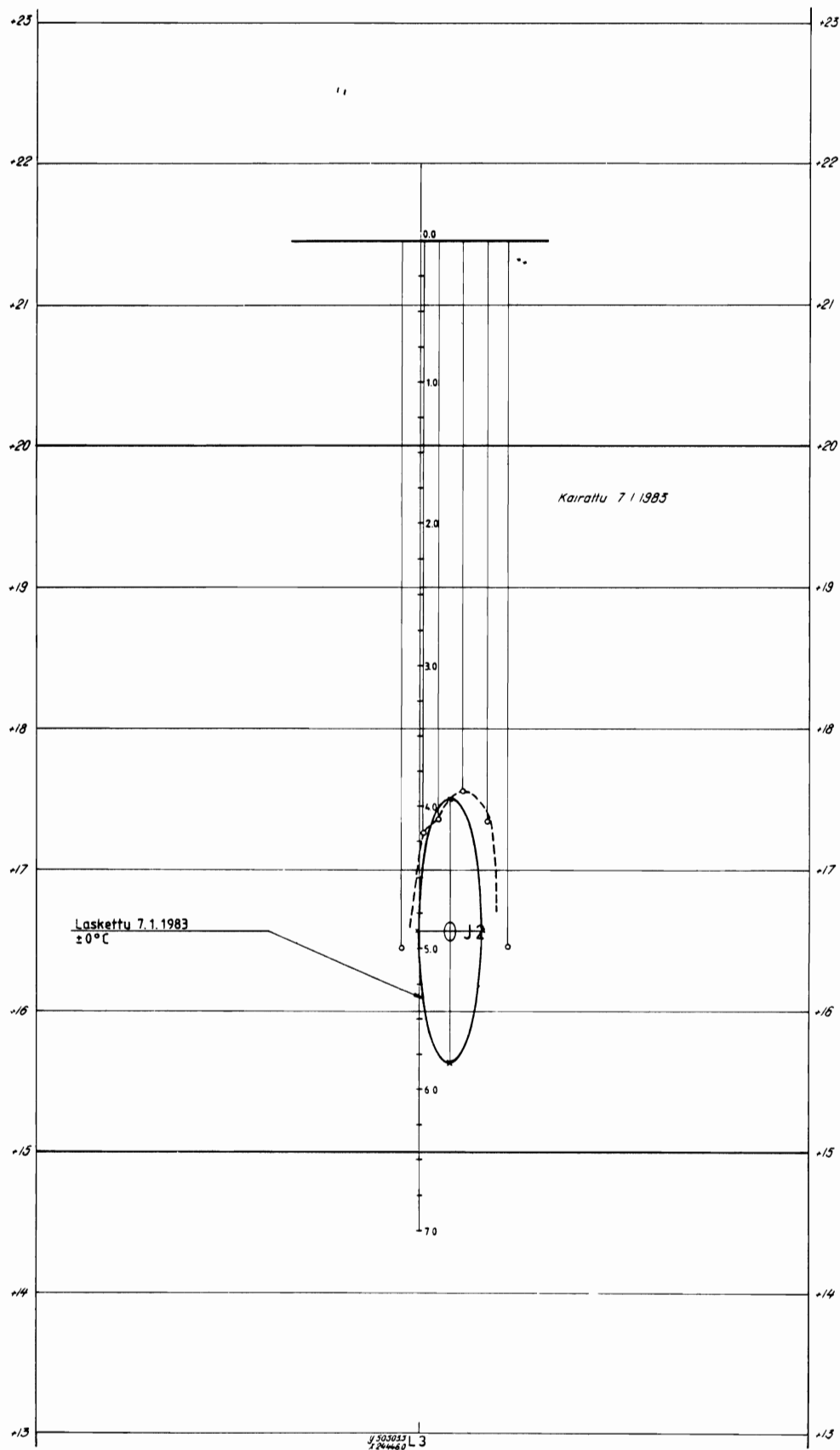
LEIKKAUS B1-B1



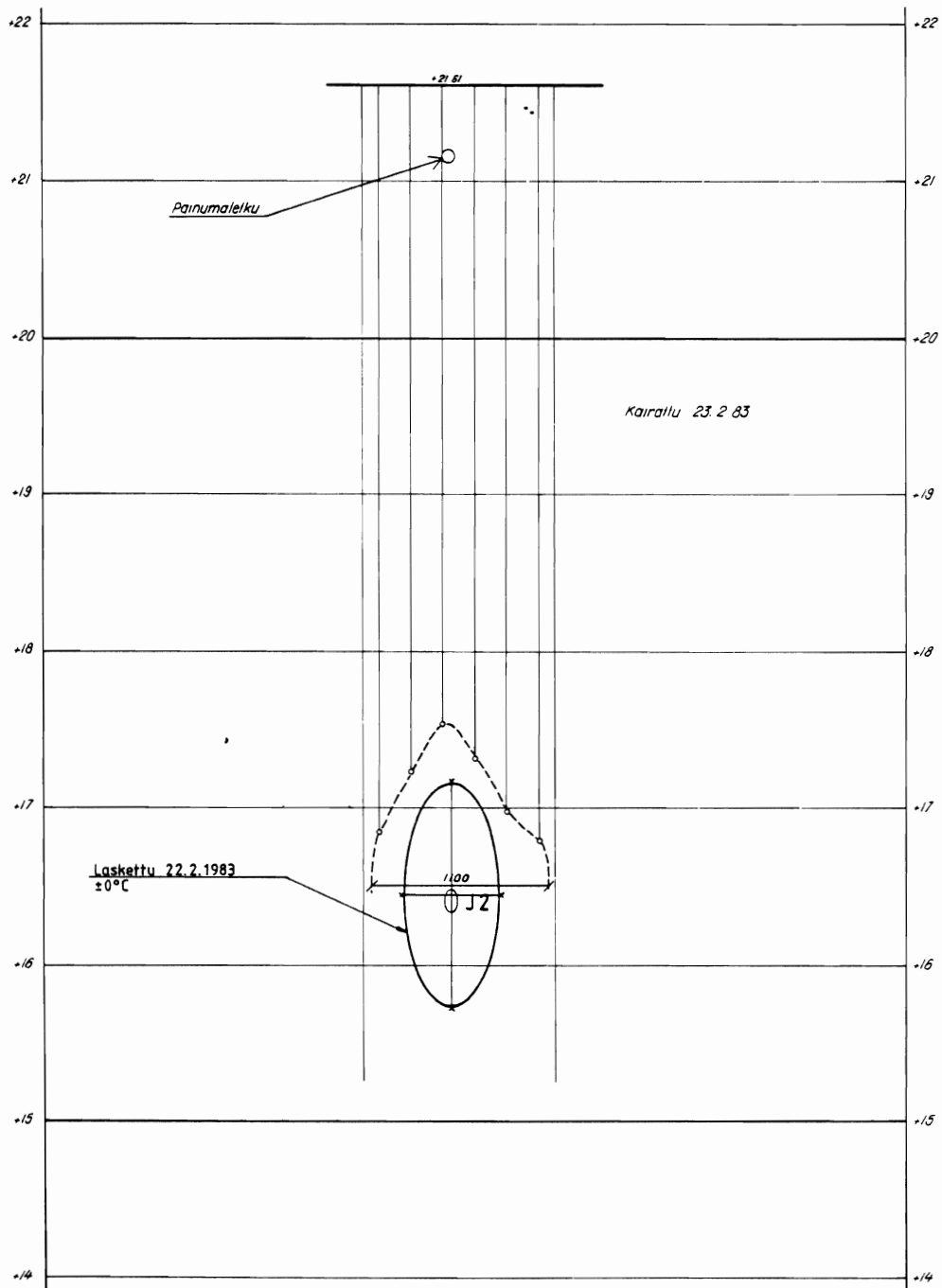
LEIKKAUS B2-B2



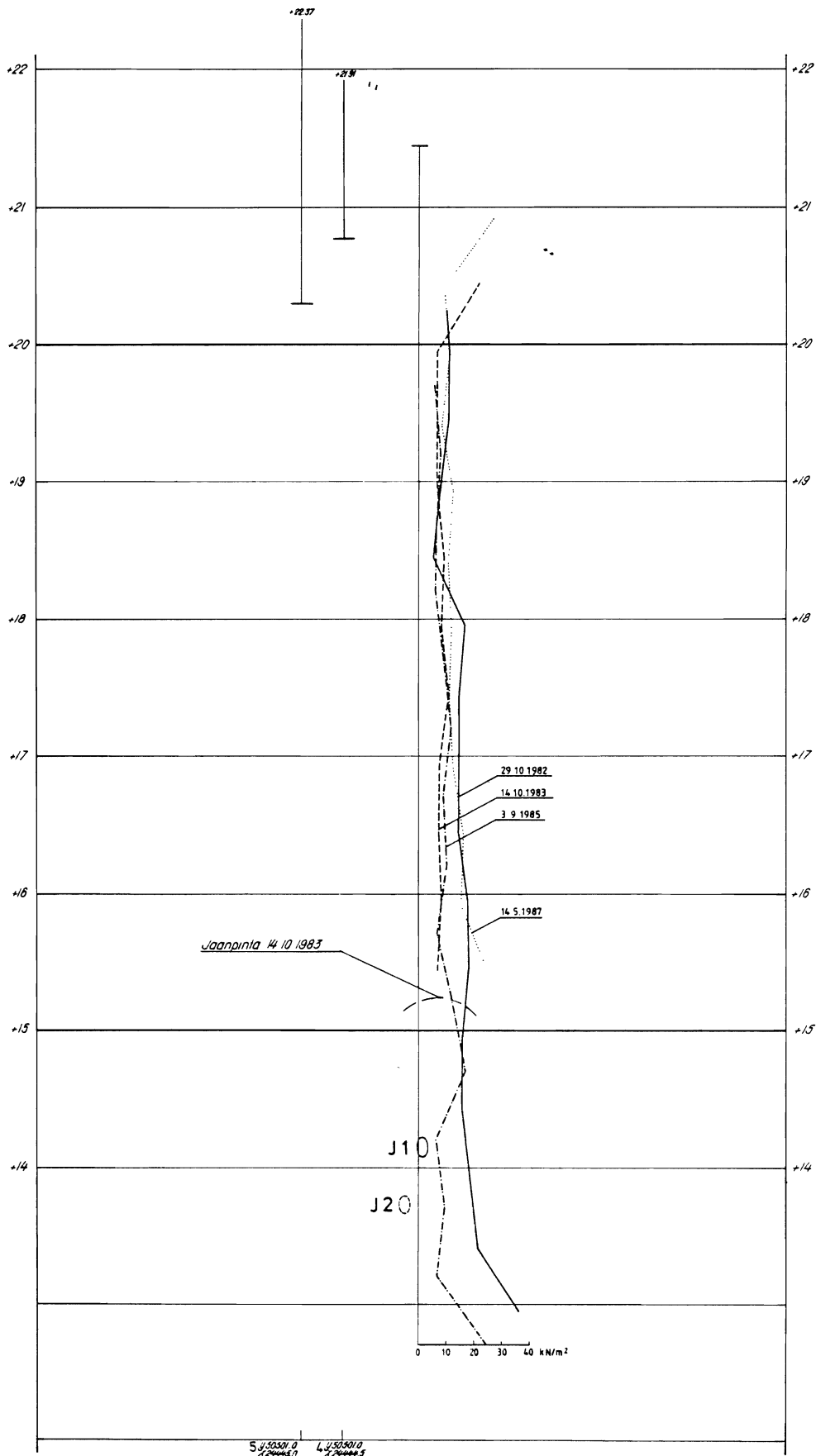
LEIKKAUS C-C



LEIKKAUS C1-C1

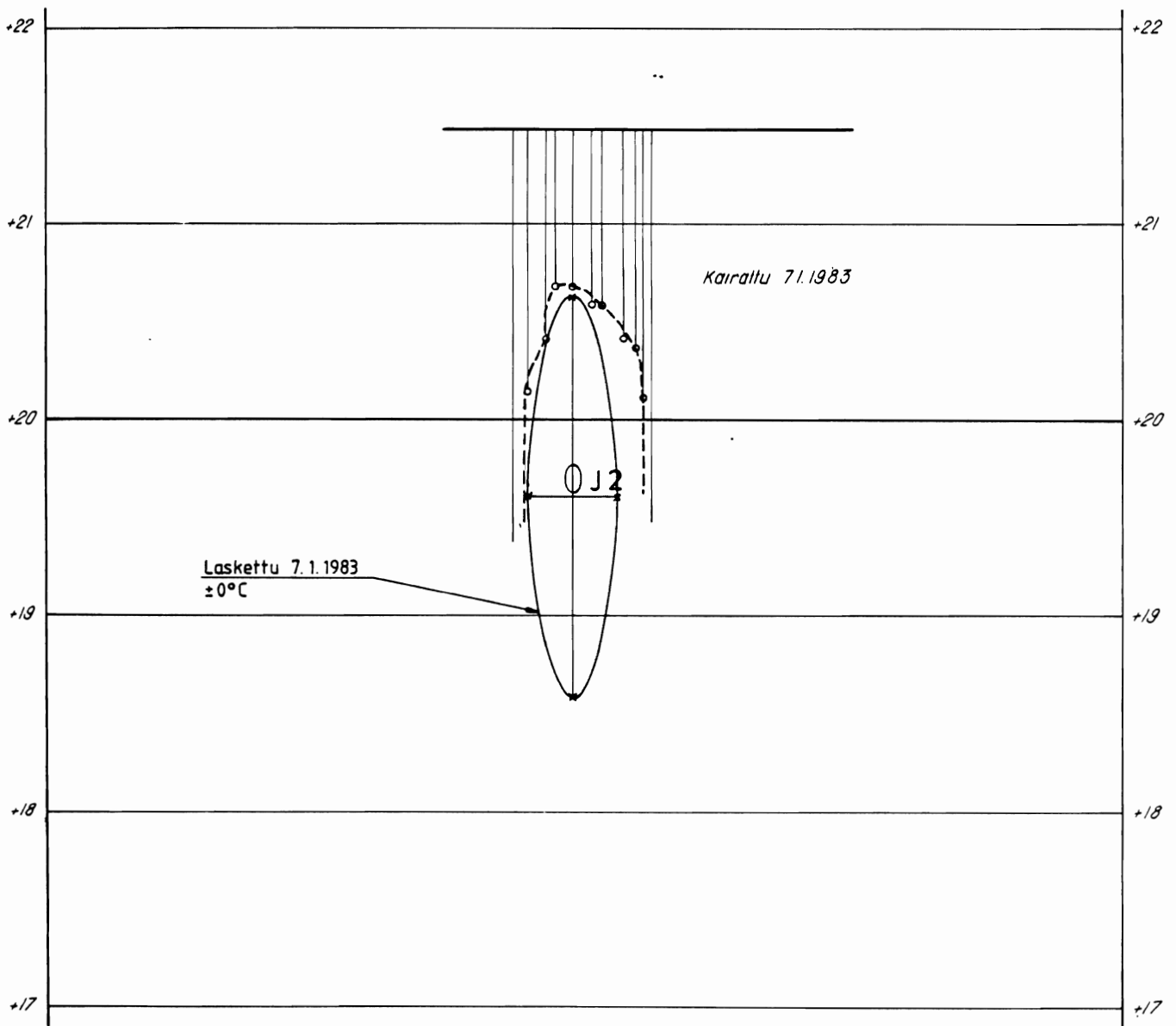


LEIKKAUS C2-C2

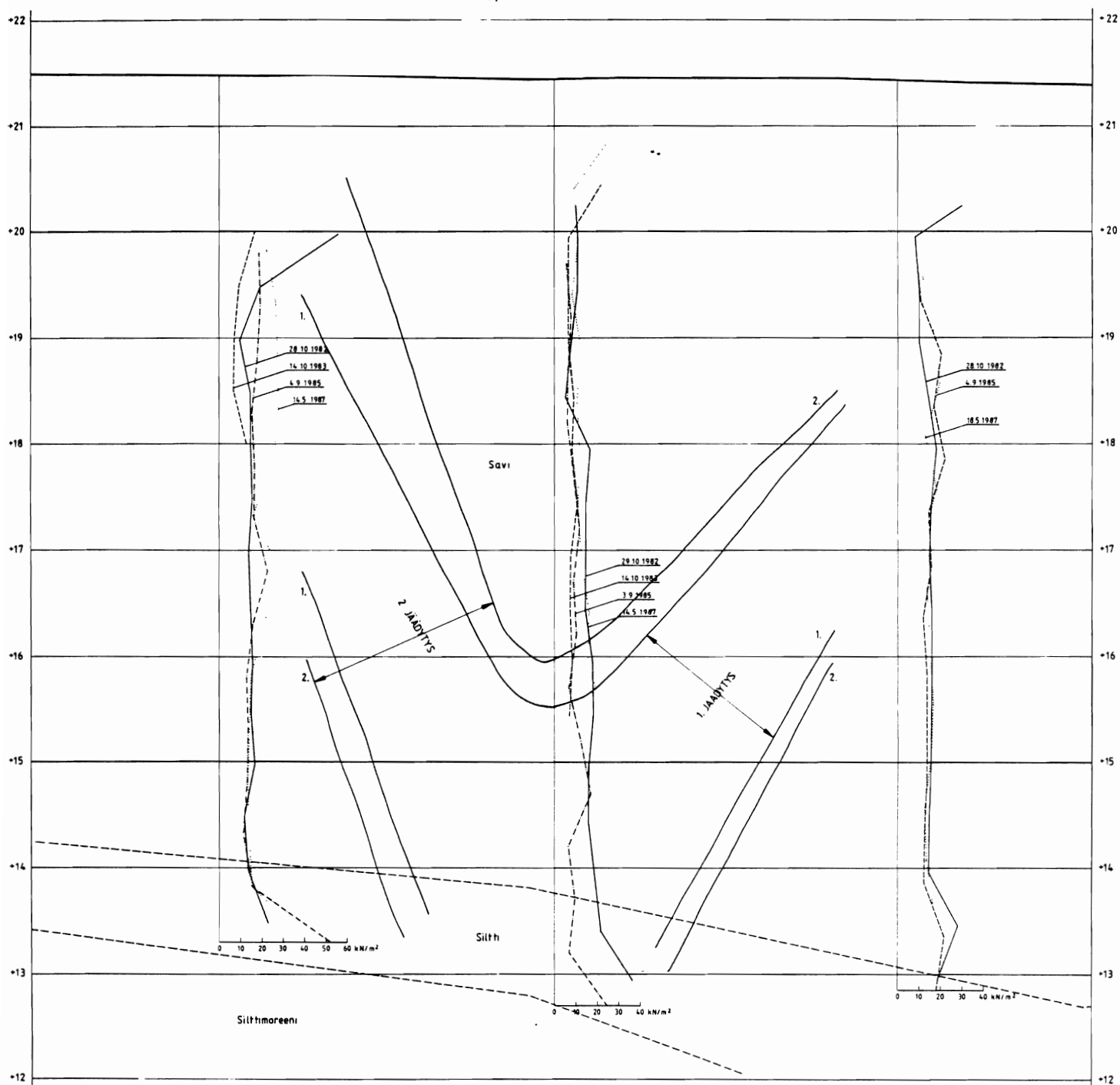


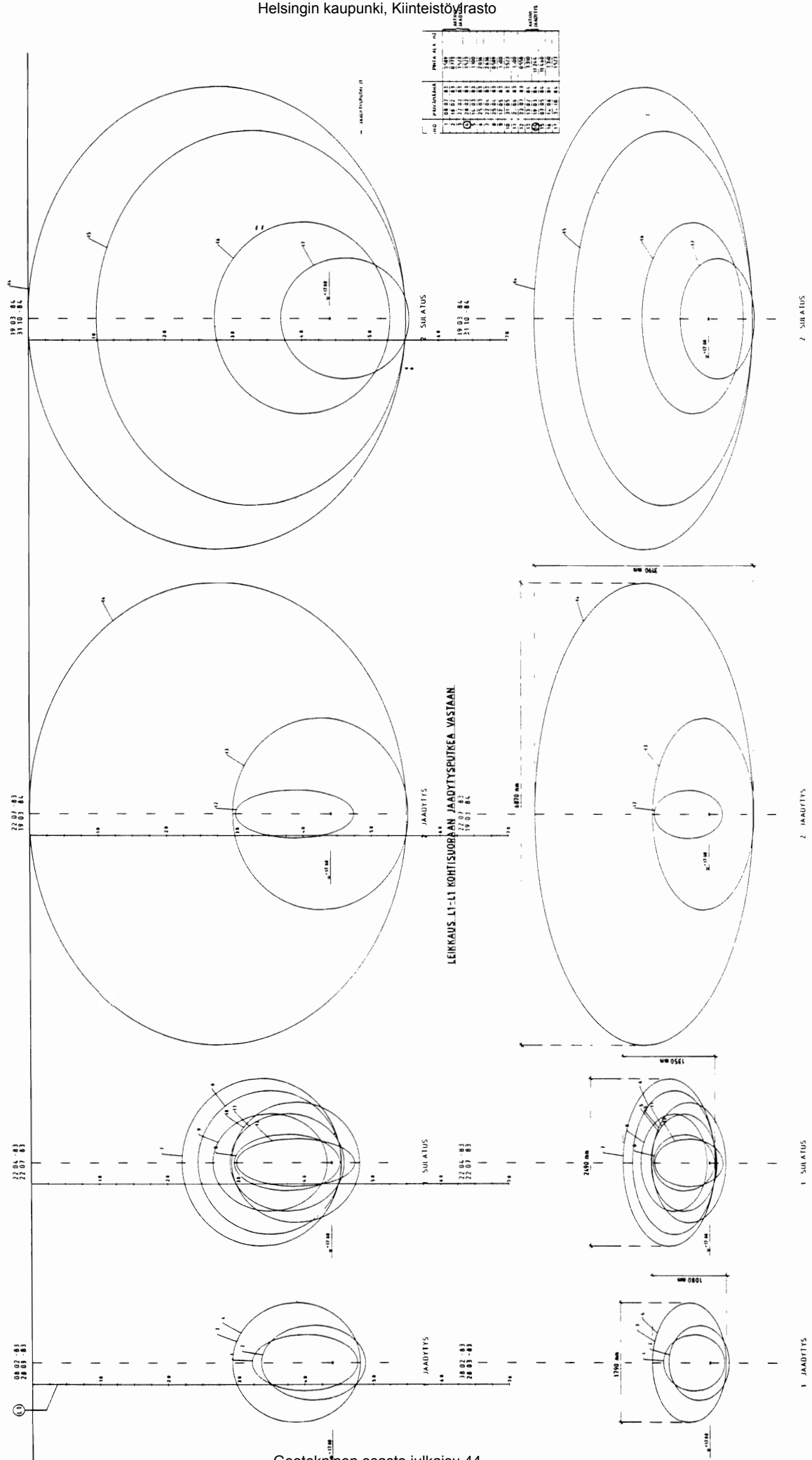
LEIKKAUS D-D

..

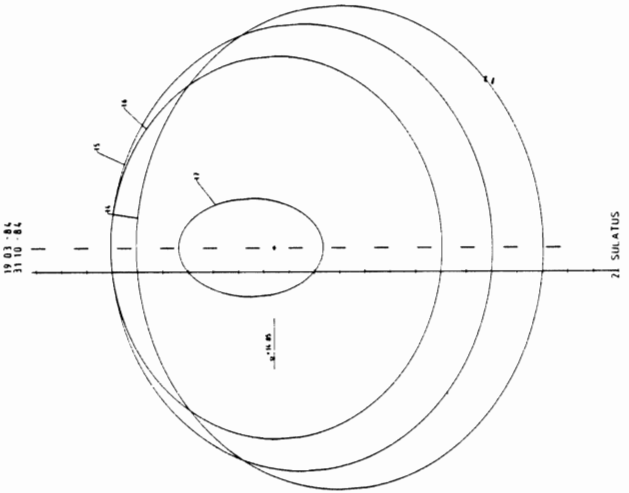
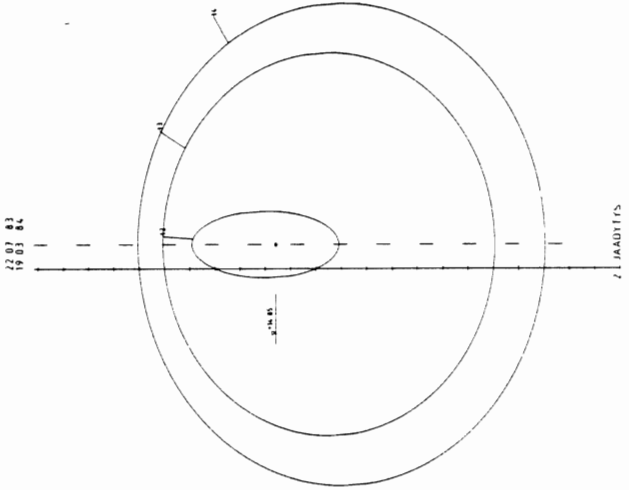
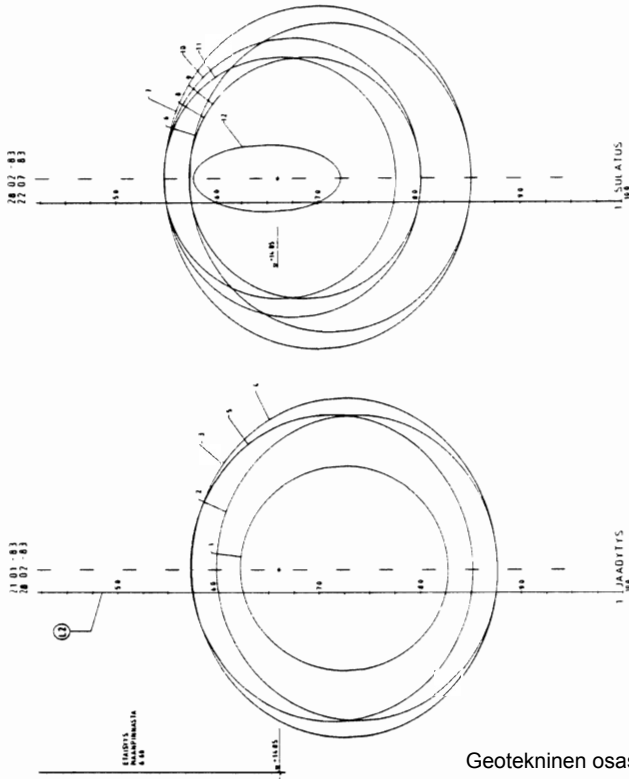


LEIKKAUS A2-A2

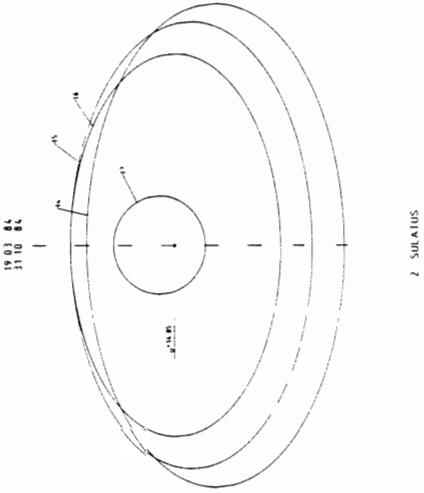
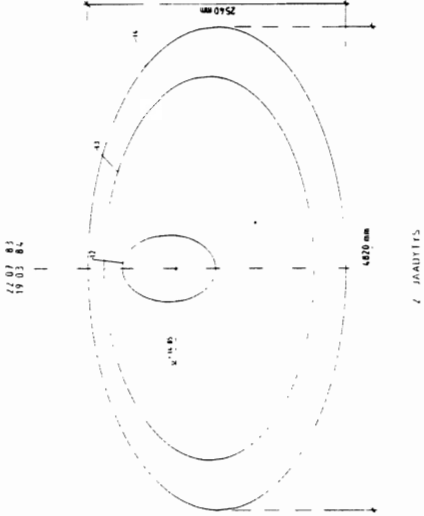
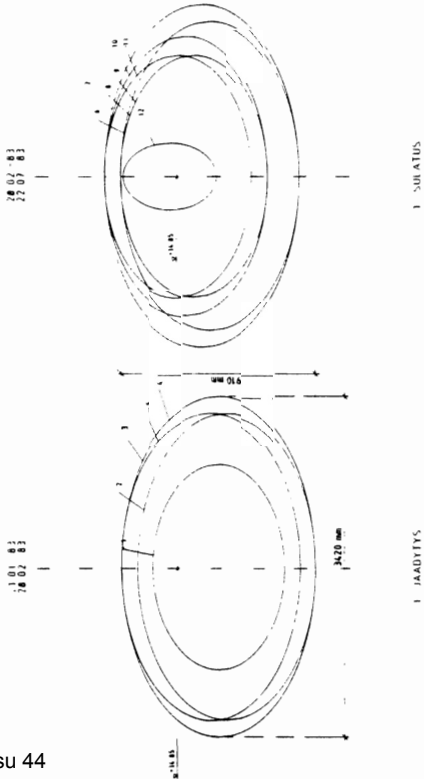




LEIKKAUS L2-L2 PYSTYSUORA



LEIKKAUS L2-L2 KOHTISUORAAN JAADUTYSPUTKEA VASTAAN



Technical drawing of a ship's hull cross-section L3-L3, showing four views: 1. JAADYTYS (Side View), 2. SULATUS (Top View), 3. JAADYTYS (Side View), and 4. SULATUS (Top View). The drawing includes dimensions and a title block.

Dimensions:

- Overall width: 600 mm
- Overall height: 900 mm
- Overall length: 2370 mm
- Overall depth: 1440 mm

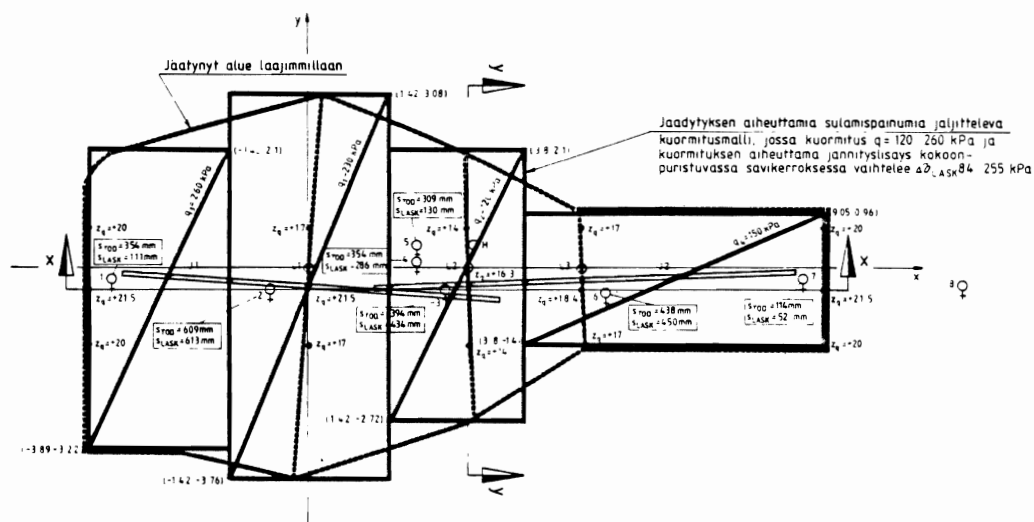
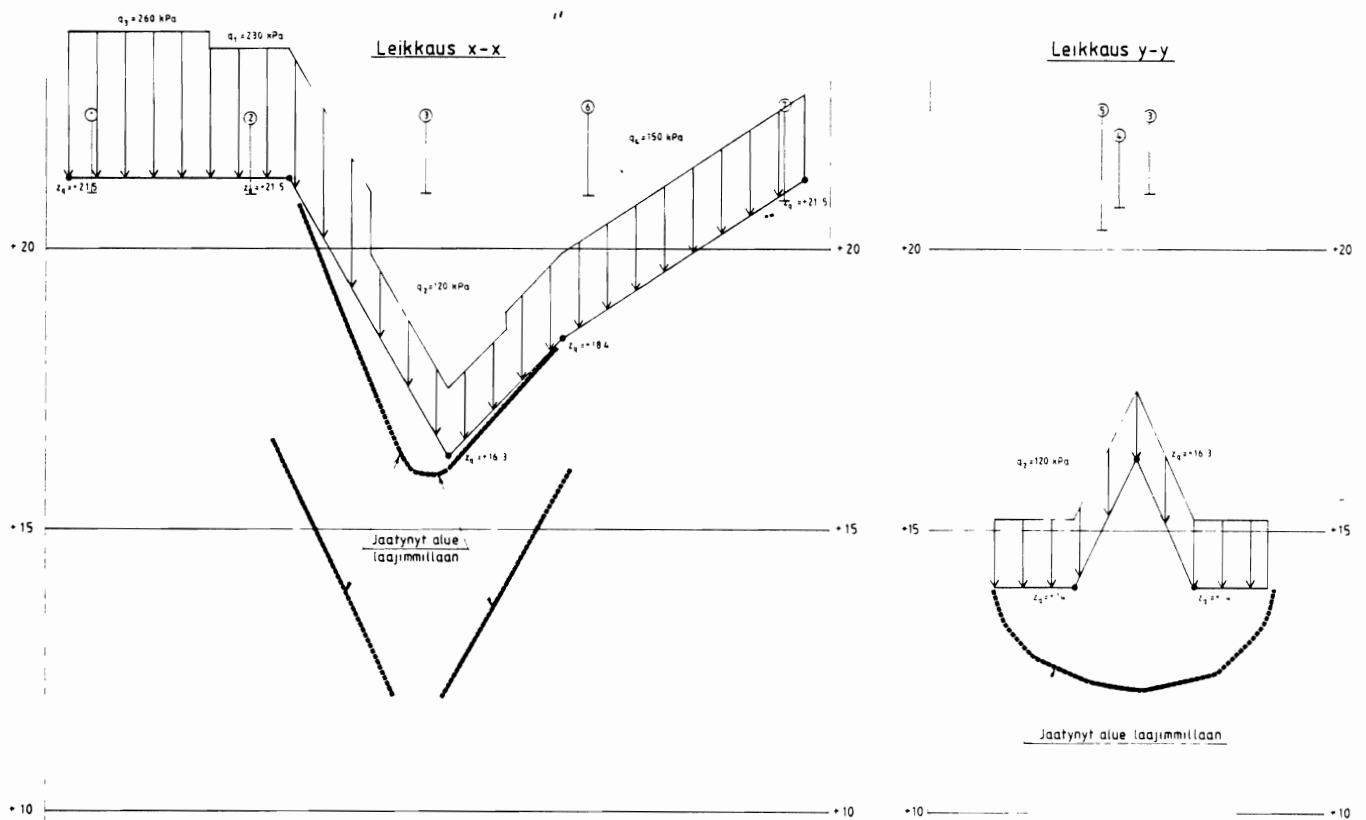
Views:

- 1. JAADYTYS (Side View): Shows the hull profile with dimensions 600 mm and 900 mm.
- 2. SULATUS (Top View): Shows the hull plan with dimensions 2370 mm and 1440 mm.
- 3. JAADYTYS (Side View): Shows the hull profile with dimensions 600 mm and 900 mm.
- 4. SULATUS (Top View): Shows the hull plan with dimensions 2370 mm and 1440 mm.

Title Block:

LEIKKAUS L3-L3 KOHTISUORAAN
JAAQTYSPUTKEA VASTAAN

[illegible]



- Kuormitusmallin era todellisin painumien levyjen 1.7 kohdalla 19 %
- Keskitilajalla olevien levyjen (2,3,6) era todellisin 4 %

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

1. Anttikoski, U., Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen. 1973. 30,-
- * 2. Anttikoski, U., Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1973. 50,-
- * 3. Anttikoski, U., Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1974. 50,-
- * 4. Mäkinen, R., Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella. 1974. 50,-
- * 5. Saarela, M., Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys. 1974. 30,-
6. Saarela, M., Kitkapaalujen kantavuus. 1976. 30,-
7. Petäjä, J., Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen. 1977. 50,-
- * 8. Raudasmaa, P., Metrotunneleiden injektointi. 1977. 120,-
- * 9. Anttikoski, U., Kalliotunnelien käyttö varastointiin. 1977. 50,-
10. Tikkanen, H., Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa. 1978. 70,-
- * 11. Arkima, O., Kluuvien ruuhkeen jäädäytys. 1978. 120,-
12. Raudasmaa, P., Puiset perustusrakenteet. 1979. 50,-
13. Havukainen, J., Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa. 1979. 50,-
14. Vähäaho, I., Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen. 1979. 50,-
15. Raudasmaa, P., Pohjavesitarkkailu -80. 1980. 50,-
- * 16. Anttikoski, U., Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunneli-konferenssin kokemusten perusteella. 1979.
17. Roinisto, J., Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin. 1981. 50,-
- * 18. Havukainen, J., Kivihiili voimalan tuhkan käyttö maarakenteissa. 1981. 50,-
19. Roinisto, J., Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys. 1981. 50,-
20. Vuola, P., Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta. 1981. 50,-
21. Havukainen, J., Korhonen, O., Tonttialueiden maarakenteet. 1981. 30,-
22. Havukainen, J., Esimerkkejä jätteen hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä. 1981.
23. Havukainen, J., Kivihiili voimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa. 1982. 50,-
24. Latvala, A., Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys. 1982. 30,-
25. Havukainen, J., Hämäläinen, A., Sulamäki, A., Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttö-mahdollisuuksista maarakentamisessa. 1982. 30,-
- * 26. Halkola, H., Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä. 1982.
27. Paavola, P., Kunnallistekniikan tunneleiden louhintakustannus selvitys. 1982. 50,-
- * 28. Vähäaho, I., Maarakennusta koskeva mallityöselitys. 1982. 70,-
29. Gulin, K., Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa. 1982. 50,-
30. Halkola, H., Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät. 1982. 50,-
31. Havukainen, J., Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet. 1983. 30,-
32. Havukainen, J., Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar. 1983. 30,-
33. Havukainen, J., The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines. 1983. 30,-
34. Salmelainen, J., Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta. 1983. 50,-
35. Havukainen, J., Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista. 1983.
36. Hytti, P., Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa. 1984. 60,-
37. Leinonen, J., Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa. 1984. 60,-
38. Pirinen, J., Kelluvan rantapenkereen rakentaminen. 1984. 60,-
39. Latvala, A., Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti. 1984. 60,-
40. Korpela, J., Schüller, M., Jäykkien liitosjohtojen pohjarakenneselvitys (Jäli-selvitys). 1984. 80,-
41. Lahtinen, E.-R., Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti). 1985. 30,-
42. Korpi, J., In Situ-kuormituskoe painumien määrittämiseksi. 1985. 60,-
43. Havukainen, J., Esirakentamisen kehittäminen. 1985. 60,-
44. Vähäaho, I., Jäädäytysmenetelmän käyttö. 1987. 60,-

* PAINOS LOPPUUNMYTTY