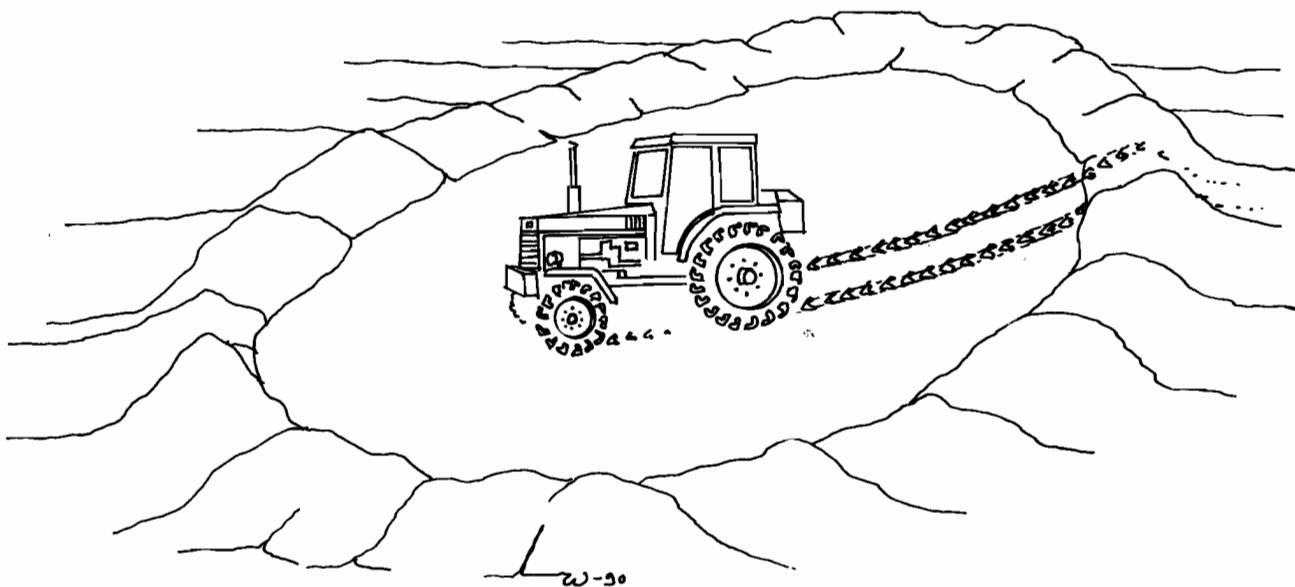




ROUTASTABILOINNIN JÄLKEEN



Pekka Koskela

ROUTASTABILOINNIN VAIKUTUS RUOPPAUSMAAHAN

Pekka Koskela
ROUTASTABILOINNIN VAIKUTUS
RUOPPAUSMASSAAN

Geoteknisen osaston tiedote 52

ALKULAUSE

Tämä työ on tehty jatkeena Ilkka Vähäahon tutkimuksille: Jäädytysmenetelmän käyttö (tiedote, 44/1987) ja Sulamiskonsolidaation vaikutukset savessa (tiedote 50/1989).

Tähän työhön liittyvät laboratoriotutkimukset tehtiin vuoden 1989 aikana Helsingin kaupungin geoteknisellä osastolla ja kenttäkokeet TVH:n toimesta Vaasassa, Joensuussa ja Oulussa.

Ruoppausmassojen routastabilointitutkimuksen seurantaryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt:

- Ilkka Vähäaho Kv/geotekninen osasto (puh.joht.)
- Keijo Kostiainen TVH/Vesitieosasto
- Kyösti Oasmaa KSV/yleiskaavaosasto
- Ora Patoharju Kkansl/ympäristösuojelutoimisto
- Olli Ravaska Oulun yliopisto
- Silja Hyvärinen Kv/metsä- ja maatalousosasto
- Pekka Koskela Kv/geotekninen osasto (siht.)

Työn pohjalta saatuja tuloksia on tarkoitus soveltaa ja testata Viikin-Vanhankaupunginlahden luonnonsuojelualueella talvella 1989 - 1990 tehtävän koeruoppauksen ruoppausmassojen käsittelyssä. Jo nyt voidaan todeta, että luonnollinen roudan aiheuttama jäätyminen ja sitä seuraava sulaminen pienentää ruoppausmassan vesipitoisuutta, parantaa sen vedenläpäisykykyä sekä parantaa lähes kaikkia ruopatun saven geoteknisiä ominaisuuksia. Routastabilointia voidaankin suositella halpana ja ympäristöystävällisenä vaikeasti käsiteltävien savipitoisten ylijäämämassojen stabilointimenetelmänä.

Helsingissä 31. lokakuuta 1989

Ilkka Vähäaho
apul.osastopäällikkö

TIIVISTELMÄ

Laboratoriotutkimukset tehtiin pääasiassa CIUC-kolmiaksaali-, kartio- ja ödometrikokein. Laboratoriokokeiden lisäksi tehtiin siipikairauksia vanhoissa läjitysaltaissa. Laboratoriokokeet tehtiin kahdella eri ruoppausmaalla, jotka erosivat toisistaan lähinnä humuspitoisuudeltaan. Molempien maa-aines oli häiriintynyttä savista liejua. Tutkimuksissa havaittiin jäätymissulamisprosessin muuttavan maa-aineksien raerungon ryynimäiseksi. Raerungon muuttuminen taas aiheutti selviä muutoksia maan mekanisiin ominaisuuksiin:

- jäädytettyjen näytteiden leikkauslujuus kasvoi selvästi käytettäessä pieniä konsolidaatiopaineita. Kartiokokeissa saatu lujeneminen oli suurimmillaan 6,5-kertaista ja kolmiaksaalikokeissa noin 2-kertaista. Siipikairalla tehdyissä kenttäkokeissa oli lujeneminen yli 6-kertaista. Painetta lisättäessä jäi toisella maa-aineksella jäädytetyn maan leikkauslujuus pienemmäksi kuin ei-jäädytetyn.
- jäädytetyn maan häiriintymisherkkyiden todettiin pienenevän ja tehokkaan lujouden kasvavan.
- jäädytetyt näytteet tiivistyivät nopeasti käytettäessä pieniä konsolidaatiopaineita. Jäädytetyn näytteen kokoonpuristuminen väheni huomattavasti painetta nostettaessa ei-jäädytetyn näytteen tiivistyessä edelleen.
- raerungon muuttuminen paransi maan vedenläpäisykykyä huomattavasti etenkin pienissä konsolidaatiopaineissa.
- jäädytetty näyte konsolidoitui pääasiassa sulamisen aikana noin puolessa tunnissa. Ei-jäädytetyn näytteen konsolidoituminen kesti huomattavasti kauemmin.

ABSTRACT

Investigations were made primarily by CIUC-triaxial, cone penetration and oedometer tests. The experiments were carried out by using two different types of materials having a main difference in the content of organic matter. Both of them were remoulded loam. During the researched, freezing-thawing-process was observed that the soil skeleton of the material changed to coarse phase. Furthermore, this phenomenon caused significant changes in the mechanical characters:

- the shear strength increased when using low confining pressures. Rising of the pressure increased more the shear strength of the sample which was unfrozen.
- the sensitivity of frozen soil was found to decrease and at the same time the effective strength increased
- frozen samples compacted faster when using low confining pressure. The compression of frozen sample reduced remarkably when rising the pressure where as the unfrozen one still continued to compress.
- the changing of soil skeleton improved significantly the permeability of the soil, especially when using low confining pressure.
- the frozen sample consolidated primarily during the thawing processes in about half an hour. The consolidation of the unfrozen sample took much longer.

SISÄLLYSLUETTELO	Sivu
ALKULAUSE	2
TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
LIITELUETTELO	6
MERKINNÄT	7
1. JOHDANTO	9
2. KONSOLIDAATIO JA LEIKKAUSLUJUUS	10
2.1 Veden esiintymismuodot maassa	10
2.2 Maassa vallitsevat jännitykset ja konsolidaatio	12
2.3 Leikkauslujuus	17
2.4 Leikkauslujuusparametrien laskeminen	19
3. JÄÄTYMISSULAMISPROSESSI JA SEN ERÄITÄ VAIKUTUKSIA MAAN OMINAISUUKSIIN	22
3.1 Maan jäätymisen ja sulaminen	22
3.2 Hienorakeisen maan vedenläpäisevyyden muuttu- minen jäätymissulamisprosessin vaikutuksesta	24
3.3 Sulamiskonsolidaatio	26
3.4 Leikkauslujuuden kehittyminen maan sulaessa	27
4. LABORATORIOKOKKEET	29
4.1 Koeohjelma	30
4.2 Kokeiden suoritus	32
4.3 Kokeiden tulokset	34
5. KENTÄLLÄ TEHDYT KOKKEET	54
6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	57
7. TULOSTEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN	62
LÄHDELUETTELO	65
LIITTEET	

LIITELUETTELO

- | | |
|---------|---|
| Liite 1 | Kaikkien kolmiaksaalikokeiden jännityspolut kriittisen tilan koordinaatistossa. |
| Liite 2 | Leikkauslujuussuoria laskettuna p-q-koordinaatistossa eri muodonmuutosprosenttien kohdalta. |
| Liite 3 | Leikkauslujuussuoria laskettuna Mohrin ympyröillä eri muodonmuutosprosenttien kohdalta. |
| Liite 4 | Kaikkien kolmiaksaalikokeiden jännityspolut p-q-koordinaatistossa. |
| Liite 5 | Suomessa esiintyviä pakkasmääriä ja routimissyvyyyksiä. |

MERKINNÄT

CIUC	Consolidated, isotropical, undrained, compression test (konsolidoitu, isotroopinen, suljettu, puristuskoe)
CRS	Vakiomuodonmuutoskoe
c	Koheesio [kPa]
c'	Tehokas koheesio [kPa]
e	Huokosluku
e ₀	Alkuhuokosluku
h	Vesisyvyys [m]
i	Hydraulinen gradientti
i ₀	Hydraulisen gradientin raja-arvo
k	Vedenläpäisevyyskerroin [m/s]
mp	Maanpinta [m]
n	Huokoisuus
p	Keskimääräinen jännitys [kPa]
p ₀	Maassa vallitseva keskim. paine ennen 3-aks. kokeen leikkausta [kPa]
q	Deviatorinen jännitys [kPa]
q ₀	Leikkauslujuussuoran ja q-akselin leikkauskohta kriittisen tilan koordinaatistossa [kPa]
t	Aika [s]
u	Huokosvedenpaine [kPa]
v	Veden virtausnopeus [m/s]
w	Vesipitoisuus [%]
z	Konsolidoituvan kerroksen paksuus, syvyys maan pinnasta [m]
wp	Vedenpinta [m]
c _v	Konsolidaatiokerroin [m ² /s]
I _p	Plastisuusluku [%]
M _s	Sekanttimoduuli [kPa]
P _u	Jäätymisvyöhykkeen ja sulan maan välissä oleva huokospaine [kPa]
P _w	Jään reunassa oleva huokosvedenpaine [kPa]
S _r	Kylläisyysaste [%]
T _s	Jäätymisvyöhykkeen ja sulan maan välissä oleva lämpötila [°C]

T_w	Jään reunassa olevan veden lämpötila [°C]
W	Vesimäärä [%]
W_i	Jään määrä [%]
W_l	Juoksuraja [%]
W_p	Kieritysraja [%]
W_u	Jäätymättöman veden määrä [%]
α	Mielivaltaisen tason kaltevuuskulma [ast]
ε	Muodonmuutos [%]
ε_1	Muodonmuutos jännityksen σ_1 suunnassa [%]
ϕ	Kitkakulma [ast]
ϕ'	Tehokas kitkakulma [ast]
γ	Maan tilavuuspaino [kN/m ³]
γ'	Maan tehokas tilavuuspaino [kN/m ³]
γ_d	Kuivatilavuuspaino [kN/m ³]
γ_w	Veden tilavuuspaino [kN/m ³]
ρ_s	Kiintotiheys [t/m ³]
σ	Kokonais(normaali)jännitys [kPa]
σ'	Tehokas jännitys, raepaine [kPa]
σ_c	Esikonsolidaatiojännitys [kPa]
σ_n	Normaalijännitys [kPa]
$\sigma_{1,2,3}$	Pääjännitykset [kPa]
σ_3	Sellipaine (konsolidointipaine) [kPa]
σ_v	Max.pystysuora jännitys [kPa]
τ'	Tehokas leikkausjännitys (raepaine) [kPa]
τ	Leikkausjännitys [kPa]

1. JOHDANTO

Helsingin kaupungilla, kuten monella muullakin rannikkokaupungilla, on edessään suuria maansiirtoprojekteja merenpohjan ruoppauksesta johtuen. Merenpohjasta ruopattava materiaali on tavallisimmin liejua, savea ja silttiä.

Savipitoiset materiaalit häiriintyvät ruopattaessa, jolloin niiden leikkauslujuus pienenee. Näin ollen maan käsiteltävyys ja käyttökelpoisuus rakennusmateriaalina heikkenee huomattavasti. Ruoppausmassat voidaan läjittää joko maalle tai vesialueelle. Merenpohjaan läjitettäessä on haittana veden sameneminen. Ympäristöhaittoja lisää myös pohjaan kertyneiden raskasmetallien ym. haitallisten aineiden vapautuminen ja leviäminen vesistöön. Tästä johtuen tulevaisuudessa ei aina voida läjittää suoraan merenpohjaan. Yhdeksi vaihtoehdoksi jää läjittää maalle.

Maalle läjitettäessä joudutaan ruoppausmassat yleensä sijottamaan erityisille läjitysalueille, jotka tarpeen vaatiessa ympäröidään reunapenkereillä. Kun läjitetään maalle, alueet voivat jäädä pitkäksi aikaa kaikenlaiselle rakentamiselle kelpaamattomaksi. Tämä johtuu siitä, että häiriintyneen hienorakeisen maa-aineksen leikkauslujuuden palautuminen penkereessä on erittäin hidasta. Läjitysmassojen poiskuljettaminen ja alueen käyttäminen muuhun tarkoitukseen on vaikeata. Leikkauslujuuden heikkeneminen aiheuttaa lisäksi sen, että kovin suuria pengerkorkeuksia ei voida käyttää ilman tukipenkereitä.

Jotta ruoppausmassoja voitaisiin läjittää, käsitellä ja käyttää hyödyksi mahdollisimman nopeasti, pitäisi ne jollain menetelmällä saada stabiilimmiksi. Eräs mahdollinen ruoppausmassojen käsittelymenetelmä on routastabilointi. Siinä luodaan olosuhteet, joissa ruoppausmassat saavat jäätyä sekä sulaa kuivattavissa olosuhteissa. Tämä mahdollistaa sulamiskonsolidaation ja sitä kautta maan stabiloitumisen. Tässä työssä on tutkittu jäätymissulamisprosessin vaikutusta ruoppausmassojen lujuus-, vedenläpäisevyys- ja muodonmuutosominaisuuksiin.

2. KONSOLIDAATIO JA LEIKKAUSLUJUUS

2.1 Veden esiintymismuodot maassa

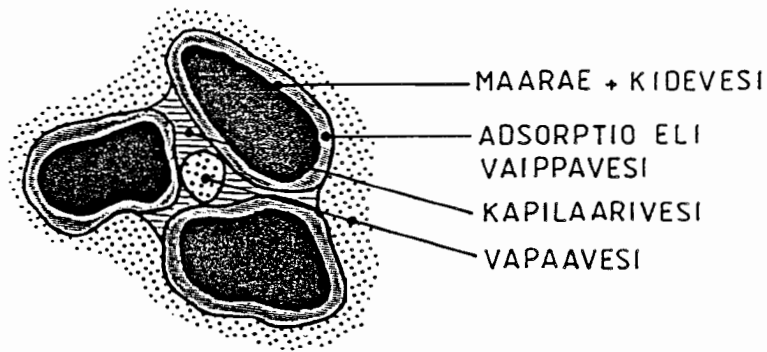
Vesi esiintyy maassa maarakeiden välisissä huokosissa lukuunottamatta kidevettä, joka on maarakeissa olevaa vettä. Tärkeimmät veteen vaikuttavat fysikaaliset voimat ovat painovoima, pintajännitys ja sähköstaattiset voimat. Veden esiintymismuodot voidaan jakaa seuraavasti (M. Rantamäki et al. 1979) /17/:

- vapaa vesi eli gravitaatiovesi
- kapillaarivesi
- adsorptio- eli vaippavesi.

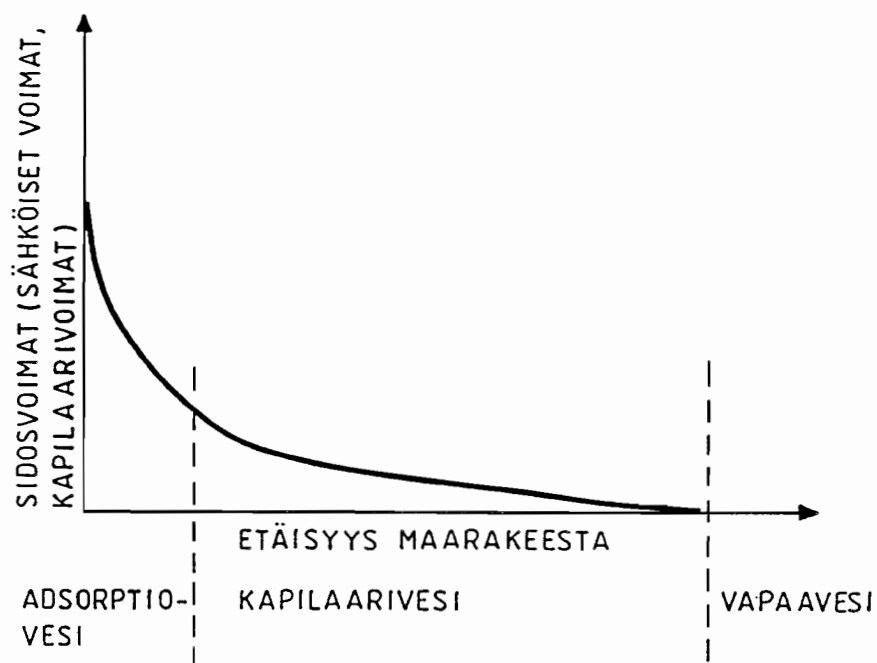
Vapaaseen veteen eli gravitaatioveteen vaikuttaa pelkästään painovoima. Siten gravitaatiovesi pääsee virtaamaan maarakeiden välisissä huokosissa vapaasti.

Kapillaarivesi on pintajännityksen maarakeiden väliin kiinnittämää vettä. Pienet maahuokokset ovat kokonaan kapillaariveden täyttymiä, kun taas suurissa huokosissa sitä on vain maarakeiden kosketuskohtien nurkkauksissa.

Adsorptiovesi on sähköstaattisten kiinnitysvoimien maarakeiden pinnalle sitomaa vettä. Sen paksuus riippuu maarakeiden ja veden välisistä sähköstaattisista voimista. Lähimpänä rakeita oleva adsorptiovesi on lujimmin rakeeseen sitoutunutta vettä. Etäisyyden kasvaessa rakeen pinnasta poispäin muuttuu adsorptiovesi vähitellen gravitaatiovedeksi tai kapillaarivedeksi. Kidevesi on maarakeiden hilaan sitoutunutta vettä, joka ei liiku maahuokosissa. Kuva 10 on havainnollistettu maahuokosissa esiintyvä vesi ja kuvassa 11 on periaatekuva sidosvoimien pienentymisestä etäisyyden kasvaessa maarakeen pinnasta. Kuva 10 on piiretty Jumikisin /5/ kirjassa esitettyjen kapillaarivoima- ja sähköpotentiaali-kaumakuvien perusteella.



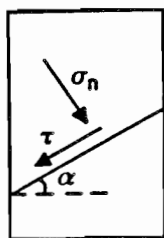
Kuva 10. Maahuokosissa esiintyvä vesi.



Kuva 11. Periaatekuva sidosvoimien muuttumisesta etäisyyden kasvaessa maarakeen pinnasta.

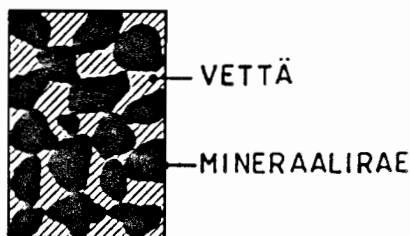
2.2 Maassa vallitsevat jännitykset ja konsolidaatio

Maamassan sisällä mielivaltaisessa tasossa vallitseva jännitys voidaan jakaa kahteen toisiaan vastaan kohtisuorassa suunnassa olevaan komponenttiin. Näistä tason normaalin suuntaista komponenttia kutsutaan normaalijännitykseksi (σ_n) ja tason suuntaista leikkausjännitykseksi (τ), kuva 1. Mikäli nämä kaksi jännityskomponenttia sisältävät kaikki tasossa vaikuttavat voimat, kutsutaan niitä pääjännityksiksi.



Kuva 1. Maassa oleva normaali- ja leikkausjännitys mielivaltaisessa tasossa α .

Maamassa koostuu maarakeiden muodostamasta raerungosta, jonka huokokset ovat veden ja ilman täyttämiä. Pohjaveden alapuolella maan huokokset voidaan olettaa täysin veden kyllästämiksi. Myös pohjaveden yläpuolella olevissa hienorakeisissa maakerroksissa huokokset voidaan olettaa veden täyttämiksi johtuen hienorakeisten maiden suuresta kapillaarisuudesta, esim. tiivissä savessa yli 10 m (M. Rantamäki et al. 1979) /17/. Maakerroksia, joissa maan huokokset ovat täysin veden täyttämiä, kutsutaan veden kyllästämiksi, kuva 2.



Kuva 2. Veden kyllästämän maan rakenne.

Kuormitettaessa veden kyllästämää maata osa ulkoisesta kuormasta siirtyy maarakeiden kosketuskohtien ja osa huukosissa olevan vedenpaineen kautta. Maarakeiden välille syntyvää puristusta

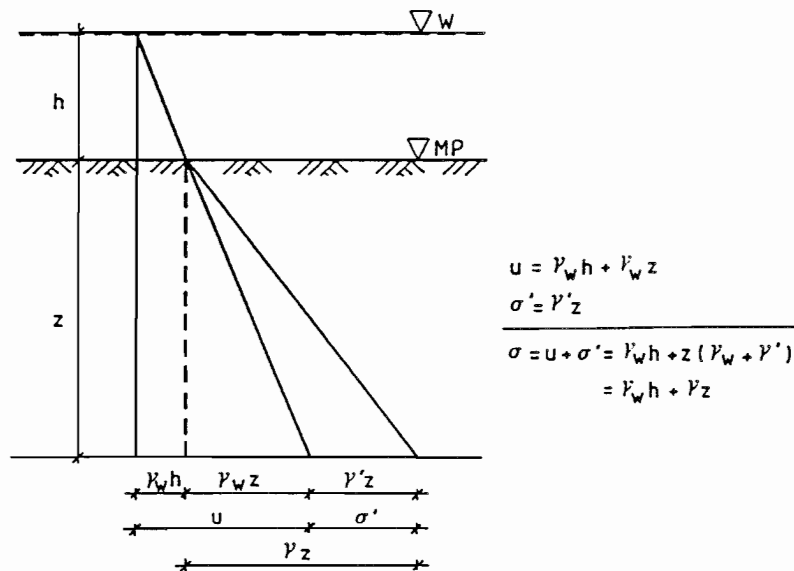
kutsutaan raepaineeksi eli ns. tehokkaaksi (normaali)jännitykseksi (σ'). Raepaine ilmaistaan poikkileikkaukselle laskettuna keskimääräisenä paineena. Todellinen rakeiden kosketuspintojen välinen paine on huomattavasti suurempi kuin poikkileikkaukselle laskettu keskimääräinen paine. Vedenpainetta, joka syntyy maan huokosissa, kutsutaan huokosvedenpaineksi eli neutraali-jännitykseksi (u). Huokosvedenpaine on hydrostaattinen paine tietyssä pisteessä ja vaikuttaa samansuuruisena joka suuntaan (M.Rantamäki et al. 1979) /17/.

Maassa vallitseva kokonaisjännitys (σ) voidaan jakaa tehokkaaseen jännitykseen (σ') ja huokosvedenpaineseen (u). Näiden välinen riippuvuus voidaan ilmaista seuraavilla kaavoilla (1a) ja (1b) (M.Rantamäki et al. 1979) /17/:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1a)$$

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1b)$$

Pystysuora jännitystila ja sen osatekijät tehokas jännitys (raepaine) ja huokosveden paine on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Kaavakuva maan sisällä vallitsevista pystysuorista jännityksistä (E.Kankare 1970) /6/.

Käyttämällä kuvan merkintöjä saadaan:

Pystysuora kokonaisjännitys:

$$\sigma = \gamma_z + \gamma_w \cdot h \quad (2)$$

σ	on pystysuora kok.jänn. [kPa]
t	maan tilavuuspaino [kN/m ³]
γ_w	veden tilavuuspaino [kN/m ³]
z	syvyys maapinnasta [m]
h	vesisyvyys [m]

Huokosvedenpaine:

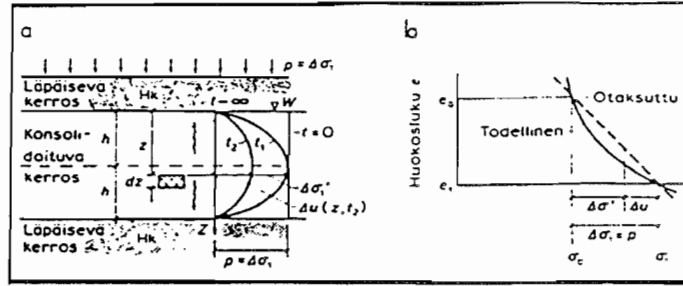
$$u = \gamma_w \cdot (z + h) \quad (3)$$

Tehokas normaalijännitys:

$$\sigma' = \sigma - u = \gamma' \cdot z \quad (4)$$

Huokospaineen jakautuminen ajan suhteen maata kuormitettaessa voidaan esittää Terzaghin konsolidaatioteorian avulla, kuva 4. Teorian reunaehdot ovat (K-H.Korhonen 1985) /10/:

- 1) Maan pinnalla vaikuttavan kuorman ulottuvuus on kaikissa suunnissa äärettömän suuri. Kuormituksen lisäyksestä aiheutuu vain puristusjännityksiä.
- 2) Konsolidoituvan maakerroksen ylä- ja alapinta ovat vaakasuoria.
- 3) Konsolidoituva kerros on homogeeninen ja isotroopinen sekä täysin veden kyllästämä. Maakerroksen huokosissa oleva vesi on hydraulisesti jatkuvassa tilassa. Maa-aines ja vesi ovat kokoonpuristumattomia.
- 4) Darcyn kerroin k pysyy vakiona konsolidoitumisen aikana, katso kaava (9).
- 5) Muodonmuutokset sekä suotovirtaus tapahtuvat pystysuunnassa.
- 6) Jännityksen lisäys siirtyy aluksi kokonaan huokospaineeksi.



Kuva 4. Terzaghin konsolidaatioteoria (K-H.Korhonen 1985) /10/

a) Tasaisen kuorman lisäyksen $p = \Delta\sigma$, johdosta muodostunut huokospaineen ja tehokkaan jännityksen jakauma ajan suhteen.

b) Huokosluvun muutos primaarisen konsolidaatitapahtuman aikana

Terzaghin mukaan huokosvedenpaineen muutos ajan suhteen (muuttumisnopeus) on seuraava (K-H.Korhonen 1985) /10/:

$$\frac{\delta u}{\delta t} = c_v \cdot \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \quad (5)$$

$$c_v = \frac{k \cdot M_s}{\gamma_w} \quad (6)$$

$$M_s = \frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \epsilon_1} \quad (7)$$

$$\Delta \epsilon_1 = \frac{\Delta e}{1 - e_0} \quad (8)$$

$$k = \frac{v}{1 - i_0} \quad (9)$$

u on huokosveden paine [kPa]

t aika [s]

z konsolidoituvan kerroksen paksuus [m]

c_v konsolidaatiokerroin [m^2/s]

k vedenläpäisevyyskerroin [m/s]

M_s sekanttimoduuli [kPa]

γ_w veden tilavuuspaino [kN/m^3]

σ_1 maassa oleva pystysuora jännitys [kPa]

e huokosluku

e_0 alkuhuokosluku

ϵ_1 muodonmuutos [%]

v veden virtausnopeus [m/s]

i hydraulinen gradientti

i_0 hydraulisen gradientin raja-arvo

Veden kyllästämää maata kuormitettaessa riippuu huokosvedenpaineen ja tehokkaan jännityksen jakautuminen ajan suhteen oleellisesti maan vedenläpäisevyydestä, kaavat (5) ja (6). Lisäkuormasta aiheutuva jännitys siirtyy aluksi lähes yksinomaan huokosvedenpaineeksi, kuva 4b. Tämä johtuu siitä, että veden kokoonpuristuvuus on paljon pienempi kuin maan raerungon. Huokosveden ylipaine pyrkii purkautumaan ympäröivään maahan pienimmän virtausvastuksen suuntaan. Ylipaine purkautuu lähes välittömästi karkearakeisissa maa-aineksissa johtuen hyvästä vedenläpäisevyydestä esim. sora $10^{-2} \dots 10^{-4}$ m/s (M.Rantamäki et al. 1979) /17/. Huokosvedenpaineen purkautuessa siirtyy kuormasta aiheutunut jännitys tehokkaaksi jännitykseksi, raepaineeksi.

Huokospaineen purkautuminen tapahtuu hienorakeisessa maassa hitaasti. Tämä johtuu heikosta vedenläpäisevyydestä, esim savi $10^{-8} \dots 10^{-10}$ m/s (M.Rantamäki et al. 1979) /17/. Näin ollen tehokas jännitys kehittyy hitaammin hienorakeisessa maassa kuin karkearakeisessa. Huokospaineen purkautuessa syntyy maan sisällä veden virtausta, joka aiheuttaa virtauspaineen. Virtauspaineen suuruus on (M.Lojander 1985) /14/:

$$p_i = i \cdot \gamma_w \quad (10)$$

p_i on virtauspaine [kPa/m]
 γ_w veden tilavuuspaino [kN/m³]
 i hydraulinen gradientti

Virtauspaine pienentää pystysuoraa tehokasta jännitystä, mikäli se vaikuttaa pystysuoraan ylöspäin tai sillä on pystysuora komponentti. Vastaavasti pystysuora tehokas jännitys kasvaa virtauspaineen vaikuttaessa alaspäin.

Huokospaineen kasvu sekä huokosvedenpaineen purkautuessa syntyvä virtauspaine vaikuttavat tehokkaan jännityksen suuruuteen. Siten kaava (1b) voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\sigma' = \sigma - u \pm p_i \cdot z \quad (11)$$

z on tarkastelupisteen päällä olevan
maakerroksen paksuus [m]

2.3 Leikkauslujuus

Maan leikkauslujuuden arvo murtopinnassa voidaan laskea Coulombin kaavan avulla (M.Rantamäki et al. 1979) /17/.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (12)$$

τ on leikkauslujuus [kPa]
 c koheesio [kPa]
 σ leikkauspinnassa vaikuttava jännitys [kPa]
 ϕ maan kitkakulma [ast]

Kaavassa (12) maan kitkakulma kuvaa maarakeiden välistä kitkaa, joka aiheutuu maarakeiden välisestä hankauksesta. Kitkan suuruus riippuu kitkakulman ja kitkapinnassa vaikuttavan normaalijännityksen suuruudesta. Maan kitkakulman suuruuteen vaikuttavat merkittävimmin maan raekoostumus, rakeiden muoto ja pyöristyneisyys sekä maan rakenteellinen tiiviys. Koheesio aiheutuu maarakeiden keskinäisistä kiinnevoimista sekä rakeiden ja niitä ympäröivien vesivaippojen välisistä sähköstaattisista voimista. Koheesion suuruuteen vaikuttavat eniten maan rakeisuus, vesipitoisuus ja erityisesti maan konsolidaatiotila, kuva 5 (M.Rantamäki et al. 1979) /17/.

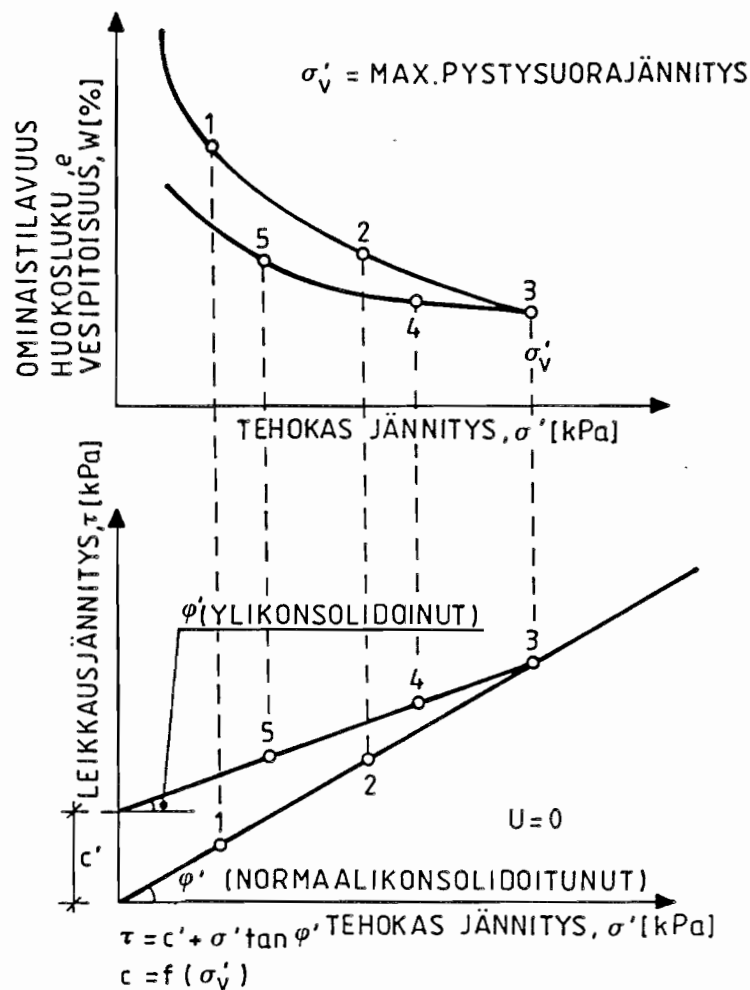
Maarakeiden välinen jännitys riippuu maassa olevasta huokospaineesta ja virtauspaineesta kaavan (11) mukaan. Tämän vuoksi leikkauslujuutta määritettäessä ei yleensä käytetä kokonaisjännitystä vaan tehokasta jännitystä eli raepainetta. Tehokkailla jännityksillä laskettaessa korvataan lujuusparametrit c ja ϕ tehokkailla lujuusparametriellä c' ja ϕ' .

Kaava (12) saa muodon (M.Rantamäki et al. 1979) /17/:

$$\tau = c' + \sigma \cdot \tan \phi' \quad (13)$$

τ	on leikkauslujuus
c'	tehokas koheesio
ϕ'	tehokas kitkakulma
σ'	tehokas jännitys eli raepaine

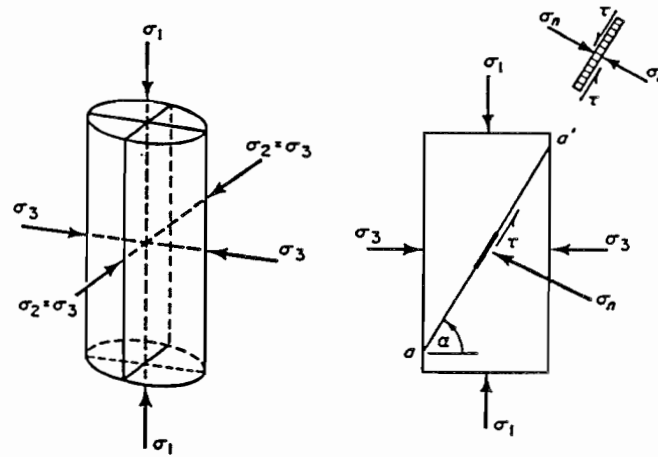
Kuvan 5 mukaan leikkauslujuus kasvaa vesipitoisuuden, huokosluvun ja ominaistilavuuden pienetessä eli maan tiivistyessä. Kuvasta nähdään, että ylikonsolidoitunut maa on tiivimpi kuin normaalikonsolidoitunut. Siten maan ylikonsolidoituminen aiheuttaa myös leikkauslujuuden kasvua. Ylikonsolidoitumisen seurauksena maan kitkakulma pienenee ja koheesio kasvaa. Kun normaalikonsolidoitunut maa saavuttaa saman tiiviyyden kuin ylikonsolidoitunut maa, leikkauslujuussuorat yhtyvät.



Kuva 5. Tehokkaiden lujuusparametrien c' ja σ' merkitystä selvittävä kaavakuva (E.Kankare 1970) /6/.

2.4 Leikkauslujuusparametrien laskeminen

Kuvassa 6 esitetyssä jännitystilassa σ_1 , σ_2 ja σ_3 ovat toisiaan vasten kohtisuorassa olevia pääjännityksiä. Pystysuora jännitys σ_1 oletetaan suurimmaksi ja σ_2 yhtä suureksi kuin σ_3 kolmiakselialikokeen reunaehtojen mukaisesti. Sylinterin muotoisen näytteen sisällä, vaakatasoon nähden kaltevuudessa α olevassa tasossa, vaikuttava normaalijännitys on σ_n ja leikkausjännitys on τ . Statiikan ja trigonometrian säännöillä saadaan seuraavat kaavat (M.Rantamäki et al. 1979) /17/:



Kuva 6. Pääjännitykset ja kaltevuudessa α olevassa tasossa vaikuttava normaali- ja leikkausjännitys (A.R.Jumikis 1962) /5/.

$$\tau = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + 3 \cdot \sin^2 \alpha \quad (14a)$$

$$\sigma_n = (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (15a)$$

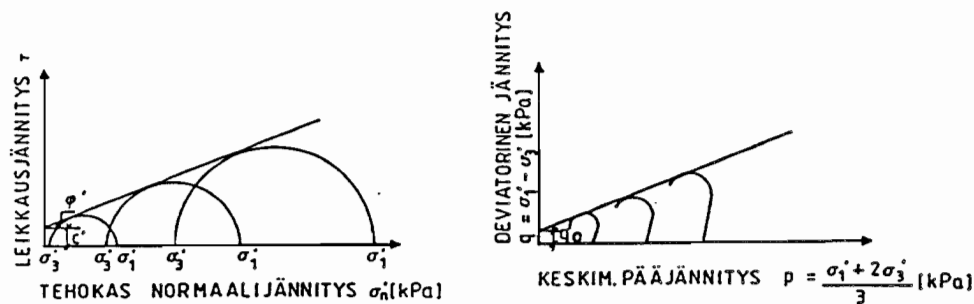
Johtamalla edelleen saadaan lausekkeet seuraavaan muotoon:

$$\tau = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cdot \cos 2\alpha \quad (14b)$$

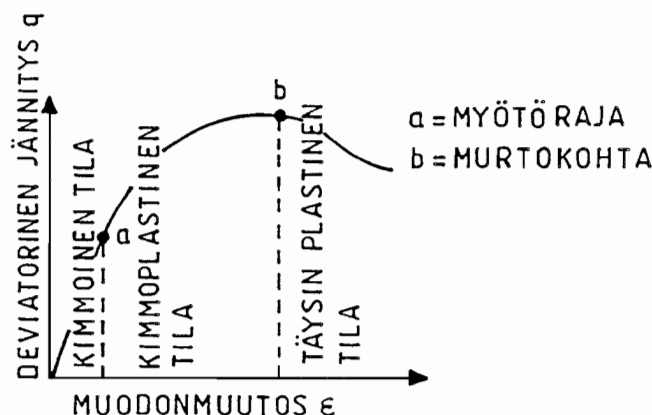
$$\sigma_n = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cdot \sin 2\alpha \quad (15b)$$

q_0	leikkauslujuussuoran ja q-akselin leikkauskohta kriittisen tilan koordinaatistossa [kPa]
p	keskimääräinen jännitys [kPa] (kts. kuva 8.b)

Laskelmissa käytetty jännitystilaa vaikuttaa lujuusparametrien arvojen suuruuteen. Toisin sanoen näiden arvot ovat eri suuruiset kimmoisessa tilassa (ennen myötärajaa), kimmoplastisessa tilassa (ennen murtokohtaa) ja täysin plastisessa tilassa (murtokohdassa), kuva 9. Toisaalta maan muodonmuutokset riippuvat maan jännitystilasta suuruudesta. Lujuusparametrin määrittämiskohdaksi voidaan siten valita myös tietty muodonmuutosprosentin kohta esim. rakenteen suurin sallittu siirtymä, kts. liitet 2-3.



Kuva 8. Maan leikkauslujuussuora a) Mohrin ympyröiden avulla b) jännityspolkujen avulla.



Kuva 9. Maan jännitystila.

3. JÄÄTYMISSULAMISPROSESSI JA SEN VAIKUTUKSET ERÄISIIN MAAN OMINAISUUKSIIN

3.1 Maan jäätyminen ja sulaminen

Kuvassa 12 on periaatekuva maan jäätymisestä. Talvella ja syksyllä kylmä ilmassa aiheuttaa lämpötilaeron maahan, mistä seuraa ylöspäin suuntautuva lämpövirta. Kun maasta on poistunut riittävästi lämpöä, alkaa maa jäätymään pinnasta. Maan jäätyessä yksittäiset jääkiteet alkavat muodostua suurimmissa huokosissa. Maarakeet ja jääkiteet erottuvat toisistaan veden jäätyessä ja niiden välille jää jäätymätön vesikerros. D.Anderssonin (1989) /1/ mukaan jäätymättömän vesikerroksen paksuuteen vaikuttaa jäätyvän maan lämpötila. Jäätymättömän veden osuus on hyvin suuri lämpötilan ollessa lähellä nollaa, mutta sen määrä vähenee nopeasti -10°C alapuolella. Jäätymättömän vesikerroksen paksuus vastaa noin yhden molekyylikerroksen paksuutta $-35^{\circ}\text{C} \dots -50^{\circ}\text{C}$:sen lämpötilassa. Noin -10°C :ssa vesikerroksen paksuus vastaa jo kahden molekyylikerroksen paksuutta. Tämän jälkeen vesikerroksen paksuus kasvaa nopeasti lämpötilan noustessa. Kuvassa 13 on esitetty jääfaasidiagrammilla jäätymättömän veden ja jään määrä eri lämpötiloissa. Faasin muodostumiskäyrä on ominainen jokaiselle maalle. Kuvassa W on kokonaisvesimäärä, W_i on jään määrä ja W_u on jäätymättömän veden määrä.

Jäätyminen maan pinnan läheisyydessä on niin nopeata, ettei jäätyviin huokosiin ehdi kertyä lisää vettä ympäristöstä. Maan jäätyessä syvemmälle jäätymisnopeus laskee johtuen hidastuneesta lämpövirrasta ylöspäin. Tällöin huokosiin muodostuneet jääkiteet ehtivät kerätä ympäristöstä lisää vettä. Jäätymisen jatkuessa jääkiteet kasvavat ja alkavat liittyä yhteen muodostaen jäälinssejä. Jäälinsin kasvaminen tietyllä tasolla riippuu mm. jäätymisvyöhykkeellä vallitsevan imuvoiman ja jäätymättömän vesikerroksen vedenläpäisevyyden välisestä suhteesta. Jäälinssi kasvaa niin kauan kuin jäätymisvyöhykkeellä oleva imuvoima riittää kumoamaan jäätymättömän veden vastuksen. D.Anderssonin (1989) /1/ tutkimuksessa on havaittu, että jäätymätön vesi tulee viskoosimmaksi lämpötilan laskeessa. Siten veden virtaus jäälinssiin loppuu jäätymättömän

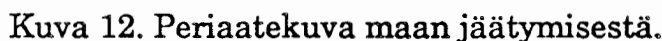
vesikerroksen lämpötilan laskiessa riittävästi. Tämän jälkeen uusi linssi alkaa kehittyä syvemmällä maassa, missä imuvoima riittää kumoamaan jäätymättömän veden vastuksen (Konrad & Morgenstern 1980) /8/.

Lämpötila- ja konsentraatioero jäälinssin pohjan ja sulan maan välillä sekä kapillaarivoimat aiheuttavat imuvoimaa jäätyvässä maassa.

Konradin & Morgensternin (1980) /8/ mukaan jäätyvässä maassa jäälinssin pohjan lämpötila on T_s , mikä on alin lämpötila missä jäätä muodostuu, kuva 12. T_s on alle normaalin veden jäätymislämpötilan $T_w (=0)$. Näiden kahden lämpötilan välille jää vyöhyke, jota kutsutaan jäätymisvyöhykkeeksi (frozen fringe). Clausius-Clapeyronin yhtälön mukaan jäätymisvyöhykkeessä oleva lämpötilaero synnyttää negatiivisen huokospaineen, imuvoiman (Konrad & Morgenstern 1980) /8/. Kuvassa 12 on esitetty lämpötilan jakautuminen jäätymisvyöhykkeessä ja siitä johtuvan negatiivisen paineen jakautuminen. Lämpötiloja T_w ja T_s vastaavat paineet ovat P_w ja P_u .

Eräissä tutkimuksissa on havaittu, että jäätymisvyöhykkeessä oleva vesi sisältää runsaammin ioneja kuin alkuperäinen huokosvesi (K.A.Czurda & R.Schababerle 1988, I.Vähäaho & H.Ryhänen 1989) /4/, /18/. Sulan maan ja jäätymisvyöhykkeen välille syntyy konsentraatioero. Toisaalta, mitä lähemmäksi jään reunaa mennään sitä kylmemmäksi ja jäykemmäksi vesi tulee. Näin ollen voidaan olettaa, että veden liikkuminen jäätymisvyöhykkeeseen päin on helpompaa kuin veden liikkuminen pois jäätymisvyöhykkeestä. Syntynyt konsentraatioero ja veden yksisuuntainen liike aiheuttavat siten osmoottisen imun jäätymisvyöhykkeellä.

Jäätymisvyöhykkeeseen tulee vettä myös kapillaarivoimien vaikutuksesta (B.Ladanyi, M.Shen 1989) /14/. Jatkuva jäälinssin kasvaminen johtaa pystysuuntaisiin siirtymiin. Maan pyrkimys estää liikkettä johtaa nousupaineeseen (routapaineeseen).



Geotekninen osasto julkaisu 52

varaus ja se pyrkii tasapainoon vetämällä puoleensa positiivisia ioneja kuten Ca^{2+} , Mg^{++} , K^{+} , Na^{+} . Vedessä positiiviset ionit hydratoituvat ja liikkuvat pois mineraalin pinnasta. Savipartikkeleiden ympärille muodostuu diffuusiokerä. Kehästä ulospäin savi-partikkeli on sähköisesti neutraali, mutta sen sisällä partikkelilla on sähköinen varaus. Siten savipartikkelit hylkivät toisiaan. Diffuusiokerän kokoon vaikuttaa varaustiheys partikkelin pinnassa, kationitasapainon laatu ja erilaiset ulkoiset olosuhteet kuten huokosissa olevan liuoksen lämpötila ja konsentraatio. Partikkeleiden sähköiset hylkimisvoimat ja vetovoimat ovat tasapainossa saviagregaatien sisällä. Kun ulkoiset voimat muuttuvat, diffuusiokerän koko voi muuttua ja saviagregaatit muuttuvat sen myötä (Kurilka et al. 1989, I.Vähäaho & H.Ryhänen 1989) /12/, /18/.

Useissa tutkimuksissa on todettu jäätymissulamisosprosessin muuttavan saven rakennetta. Maassa olevan veden jäätyminen alkaa suurissa huokosissa. Savimaissa jäätyvän kiteen ympärille syntyy sulan veden vyöhyke, jossa on runsaasti veteen liuenneita ioneja. Tämä vyöhyke aiheuttaa savipartikkeleiden diffuusiokerän pienenemistä ja tätä kautta saviagregaatien kokoonpuristumista. Mekaaniset kontaktit muiden aggregaatien kanssa tulevat heikoiksi ja ne pystyvät liikkumaan vapaasti liuoksessa. Kasvavat jääkiteet aiheuttavat puristusta aggregaateihin, kunnes aggregaatit mekaanisesti koskettavat toisiaan. Puhtaan jään rajapintaan muodostuu uusi rakenne. Sulamisen aikana savipartikkeleita ympäröivät diffuusiokerät kasvavat, mutta rakenne ei palaudu kokonaan. Osa jään muodostamista suurista huokosista sulkeutuu painovoiman vaikutuksesta, osa taas jää avoimeksi aiheuttaen fysikaalisia ja mekaanisia muutoksia maan ominaisuuksissa (Kurilka et al. 1989) /12/.

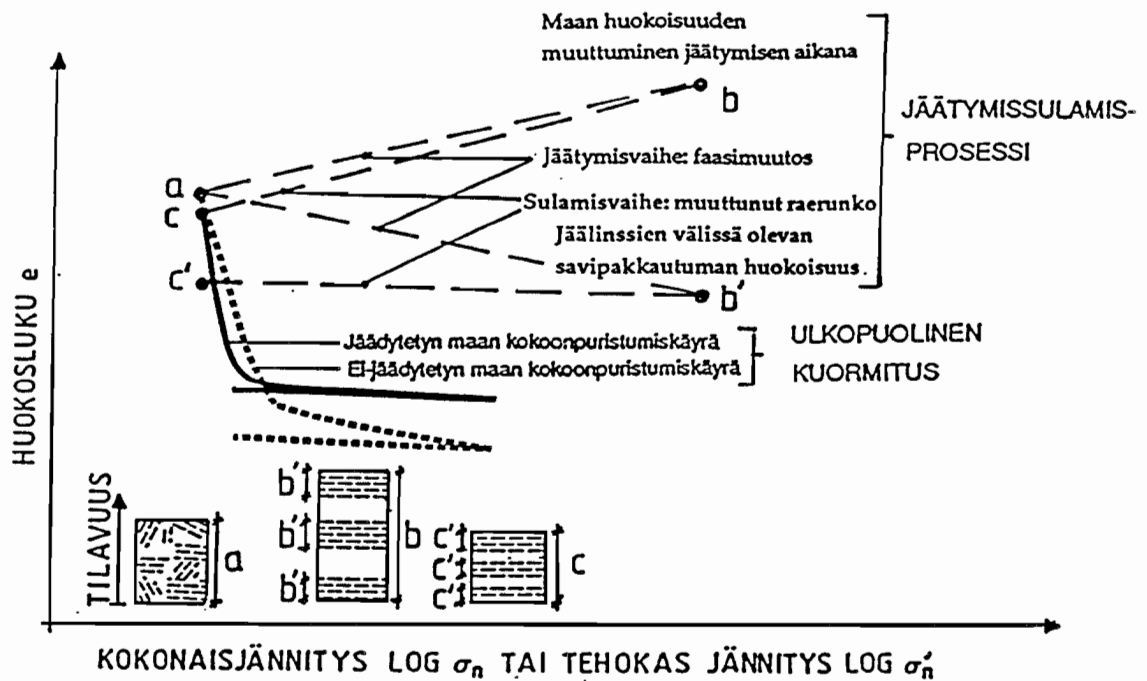
Eräs merkittävä muutos maan ominaisuuksissa on vedenläpäisevyyden muuttuminen. Tätä ovat tutkineet mm. A.S.Kurilka et al. (1989) /12/. Tutkimuksien tulokseksi saatiin mm., että pääasiallinen rakenteen muuttuminen tapahtui ensimmäisessä jäätymissulamissyklissä. Muodostui leveitä kapillaarikanavia ja ylimääräinen vesi poistui niiden kautta. Ensimmäisessä jäätymissulamisosprosessissa vedenläpäisevyys savessa ja saven seoksissa nousi alkuarvosta 10^{-9} - 10^{-8} m/s, arvoon 10^{-6} - 10^{-7} m/s. Siis muu-

tokset olivat 100-1000 kertaisia verrattuna jäätymättömän maan arvoihin. Seuraavat kolme sykliä nostivat kertoimia 3-4 kertaisiksi. Prosessin jälkeisen rakenteen todettiin olevan pysyvä: Vaikka vedenläpäisevyysarvot määritettiin vasta useamman viikon päästä, eivät sen arvot olleet käytännöllisesti katsoen muuttuneet.

3.3 Sulamiskonsolidaatio

E.J.Chamberlain ja S.E.Blouin 1978 /3/ havaitsivat maan huokoisuuden muuttuvan jäätymissulamisosprosessin aikana. Saven jäätyessä sen huokosluku kasvaa pisteestä a pisteeseen b (ks. kuva 14) johtuen jäätyvän veden laajenemisesta ja jäätymiskeskuksen ympäristöstä tulevasta lisävedestä. Jäätymisen aikana savipartikkelit ja vesi järjestyvät uudelleen. Partikkelit ja jää erottuvat toisistaan. Tällöin jääkerrosten väliin syntyy savipakkaumia, joiden partikkelitiheys on suurempi kuin alkuperäisen, täysin konsolidoituneen maan. Savipakkaumien kohdalla saven huokoisuus pienenee pisteeseen b' ja savi ylikonsolidoituu pakkaumien kohdalla. Tämä ilmiö johtuu suurelta osin jäätymisen aikana vaikuttavasta imuvoimasta ja kasvavien jäälinsien, kiteiden aiheuttamasta puristuksesta. Savipartikkeleiden pakkautumista lisää jäälinsien ympärille syntyvä sulan veden vyöhyke, jossa on runsaasti veteen liuenneita ioneja (K.A.Czurda & R.Schababerle 1988, I.Vähäaho & H.Ryhänen 1989) /4/, /18/. Tämä vyöhyke aiheuttaa osmoottisen imun, joka pienentää vesivaippoja savipartikkeleiden ympärillä. Näin ollen savipartikkelit voivat pakkautua lähemmäksi toisiaan kasvavien jäälinsien puristuksessa. Jäätymisen yhteydessä syntyvä konsolidoiva jännitys voi olla jopa 3.8 Mpa (Chamberlain et al. 1978) /2/.

Maan sulaessa purkautuvat jäätymisen yhteydessä syntyneet jännitykset, mutta maan alkuperäinen rakenne palautuu vain osittain. Jännitysten lauetessa kokoonpuristuneet savipakkaumat laajenevat jonkin verran. Pakkaumien huokoisuus kasvaa pisteestä b' pisteeseen c'. Muuttuneessa raerungossa ylimääräinen vesi poistuu savipakkaumien välistä. Siten savipakkaumien muodostaman raerungon huokoisuus pienenee pisteestä a pisteeseen c ja koko maa tavallaan "ylikonsolidoituu".



Kuva 14. Periaatekuva sulamiskonsolidaatiosta.

3.4 Leikkauslujuuden kehittyminen maan sulaessa

Sulavan maan leikkauslujuus riippuu mm. seuraavista tekijöistä: maan jäätymistavasta, sulamisnopeudesta ja sulamisvesien purkautumismahdollisuuksista. Maan jäätymistapa vaikuttaa jäälinsien syntymiseen ja sitä kautta sulamisvesien määrään. Sulamisnopeus taas vaikuttaa sulamisveden vapautumisnopeuteen. Ylimääräistä huokospainetta syntyy, jos sulaminen tapahtuu nopeasti ja maan huokosiin on kertynyt ylimääräistä vettä luonnontilaisiin olosuhteisiin verrattuna. Huokospaineen kasvaessa heikenee maan leikkauslujuus kaavojen (11) ja (13) mukaan. Huokospaineen kehittyminen riippuu sulavan veden määrän lisäksi sulamisveden purkautumismahdollisuuksista.

Purkautumismahdollisuuksiin vaikuttaa sulavan maan ja ympäröivien maamassojen vedenläpäisevyys. Mitä heikompi on vedenläpäisevyys sulavassa maassa ja sen ympärillä, sitä korkeammalle kehittyy huokospaine. Lisäksi huonosti vettä läpäisevässä maassa ylimääräisen huokospaineen purkautuminen hidastuu. Näin ollen sulamisen alkuvaiheessa sulavan maan tehokas leikkauslujuus riippuu viimekädessä sulan maan ja ympäröivän maan vedenläpäisevyydestä. Maakerroksissa, joissa ylimääräisen veden poistu-

minen on estetty tai on hyvin hidasta, tapahtuu niin sanottu sulamisheikkeneminen. Luonteeltaan sulamisheikkeneminen ei ole pysyvä, vaan lujuus palautuu normaalille tasolle ylimääräisen veden poistuessa maakerroksista. Maan konsolidoituminen päättyy, kun huokosveden ylipaine on kokonaan hävinnyt tai hydraulinen gradientti saavuttaa raja-arvon (i_0), kaavat (5) ja (9). Maan jäätyminen aiheuttaa hienorakeisessa maassa "ylikonsolidoitumista" ja rakenteen muuttumista ilman ulkoista kuormitusta. Siten voi leikkauslujuus kasvaa hienorakeisessa maassa sulamisheikkenemisvaiheen jälkeen suuremmaksi kuin ennen jäätymistä (ks.kuvat 22, 24 ja 33).

4. LABORATORIOKOKKEET

Tutkittavana maa-aineksena käytettiin Sompasaaresta ja Herttoniemestä merenpohjasta nostettua savista liejua. Molemmissa paikoissa näytteet otettiin suoraan ruoppauskauhasta. Sompasaarella näytteet laitettiin sankoihin, joista ne jaettiin välittömästi pienemmiksi osiksi muovipusseihin. Herttoniemessä taas näytteet otettiin ST-2 näyteputkiin. Tämän jälkeen näytteet varastoitettiin kylmähuoneeseen n. +10°C:een jatkokäsittelyä varten.

Sompasaaren näytteet nostettiin laivaväylän pohjasta syvyydestä 0-1 m. Vastaavasti Herttoniemessä näytteet otettiin ruoppausalueen pohjasta syvyydeltä 0-1 m. Vesisyvyys oli Sompasaarella n. 8 metriä ja Herttoniemessä n. 10 metriä. Tutkittavan maa-aineksen indeksiominaisuudet on esitetty taulukossa 1. ja rakeisuudet kuvassa 15.

Taulukko 1. Herttoniemen ja Sompasaaren näytteiden indeksiominaisuudet.

Materiaali	Humuspitoisuus [%]	Kiinto- tiheys [kN/m ³]	Vesipitoisuus w [%]	Kylläisyys- aste Sr [%]	Huokos- luku e
Sompasaari	2.4	2.70	77.7	100	1.9
Herttoniemi	10.3	2.58	229.1	100	5.5

	Tilavuus- paino [kN/m ³]	Kuivatila- vuuspaino [kN/m ³]	Juoksu- raja w [%]	Kieritys- raja wp [%]	Plasti- suusluku Ip [%]
Sompasaari	16.2	9.2	58.6	24.3	34.3
Herttoniemi	12.7	3.9	158.8	47.9	110.9



Kuva 15. H = Herttoniemen ja S = Sompasaaren rakeisuuskäyrät.

Näytteenottopaikoiksi valittiin paikat, joissa maa-ainesten humuspitoisuudet poikkesivat toisistaan. Humuspitoisuus määritettiin polttomenetelmällä. Saadusta hehkutushäviöstä vähennettiin kideveden osuus, jonka suuruus arvioitiin maan savilajitteen määrän perusteella. Juoksurajan määrittämisessä käytettiin Casagranden koputuskoetta. Plastisuusraja määritettiin kierityskoella. Näytteen rakeisuudet tutkittiin areometrikokeella ja pesuseulonnan avulla. Areometrikoea varten suoritettiin näytteille vetyperoksidikäsittely humuksen poistamiseksi, koska humuspitoisuus oli molemmissa näytteissä yli 2 %. Savessa oleva mineraaliaineksen tiheys määritettiin pyknometrillä. Maan kokoonpuristuvuusominaisuudet määritettiin ödometrin avulla. Leikkauslujuusarvot taas määritettiin kolmiaksiaalikoehen ja kartiokoehen avulla (K-H.Korhonen et al. 1973) /11/.

4.1 Koeohjelma

Laboratoriokokeet tehtiin jäädytettyillä sekä ei-jäädytettyillä näytteillä. Kaikki näytteet olivat häiriintyneitä. Taulukossa 2 on esitetty koeohjelma. Hajontaa seurattiin toistokokeilla. Jäädytyksessä käytettiin vain yhtä jäädytyssulatussykliä, ja näyte sulatettiin ja leikattiin samassa konsolidaatiopaineessa. Sompasaaren näytteiden kolmiaksiaalikoehen konsolidointipaineena käytettiin 7, 15, 40 ja 80 kPa. Herttoniemessä vastaavat paineet olivat 7, 15, 40, 80 ja 200 kPa. Kolme pienintä painetta pyrittiin valitsemaan käytännön konsolidoitumistilannetta vastaaviksi. Konsolidoitumisen ajateltiin tapahtuvan yhden ja kahden metrin paksuisissa maakerroksissa sekä painopenkereen alla.

Taulukko 2. Koeohjelma

KOLMIAKSIAALIKOE OHJELMA

Materiaali	Konsol.p. (sellipaine) σ_3 [kPa]	Koemäärä [kpl]	Käsittely
SOMPA-SAARI	7	3	Jäädyltetty (1 kpl sulatus jääkaap.)
	15	4	Jäädyltetty (2 kpl sulatus jääkaap.)
	40	3	Jäädyltetty (1 kpl sulatus jääkaap.)
	80	1	Jäädyltetty
	7	2	Ei-jäädyltetty
	15	2	Ei-jäädyltetty
	40	2	Ei-jäädyltetty
	80	1	Ei-jäädyltetty
	7	2	Jäädyltetty
	15	2	Jäädyltetty
HERTTO-NIEMI	40	2	Jäädyltetty
	80	1	Jäädyltetty
	200	1	Jäädyltetty
	7	1	Ei-jäädyltetty
	15	1	Ei-jäädyltetty
	40	2	Ei-jäädyltetty
	80	1	Ei-jäädyltetty
	200	1	Ei-jäädyltetty

* Kaikissa jäädyltettyjen näytteiden 3-aks.kokeissa:

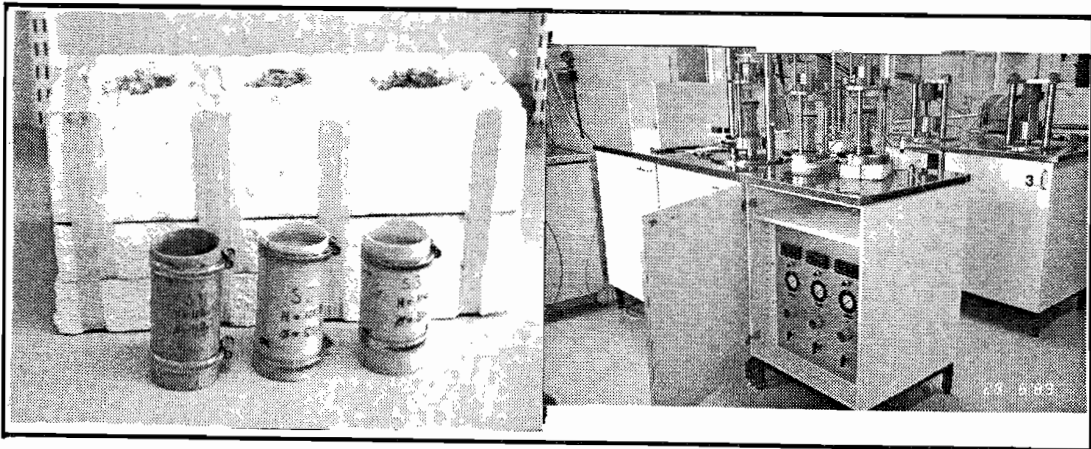
- käytettiin vain yhtä jäätymissulamissykliä
- jäädyltys tapahtui ilman konsolidointipainetta
- näyte sulii konsolidaatiopaineen alaisuudessa
- leikkausaikainen paine oli sama kuin konsolidointipaine.

ÖDOMETRIKOE OHJELMA

Materiaali	Esikons.jännitys σ_c [kPa]	Koemäärä [kpl]	Käsittely
SOMPA-SAARI	0	2	Jäädyltetty
HERTTO-NIEMI	0	2	Ei-jäädylt.
	0	2	Jäädyltetty
	0	2	Ei-jäädylt.

4.2 Kokeiden suoritus

Jäädetyt näytteet valmistettiin asettamalla ne korkeudeltaan n. 110 mm ja halkasijaltaan n. 50 mm oleviin putkiin, kuva 15. Putket täytettiin kahdella eri menetelmällä: sullomalla lastan avulla ja puristamalla suoraan ST-2 putkista. Sompasaaren näytteillä käytettiin ensin mainittua menetelmää ja Herttoniemen näytteillä jälkimmäistä. Näyte jäädetyttiin pakastekaapissa vähintään kahden vuorokauden ajan styroksisessa laatikossa n. -10°C:een lämpötilassa, kuva 16.



Kuva 16. Jäädetyksessä käytetyt välineet ja kolmiaksiaalikoelaitteisto.

Jäätymistä ohjattiin eristeen sisällä siten, että se tapahtui näytteen yläpinnasta alapintaan päin. Tämä tehtiin, jotta prosessi vastaisi luonnonmukaisia olosuhteita. Näytteen jäädetytys tapahtui suljetuissa olosuhteissa, eikä siihen näin ollen jäätymisen aikana pääsyt imeytymään lisää vettä. Jäädetyttämisen jälkeen näyte otettiin pakastekaapista ja sen päät tasattiin kolmiaksiaalisellin asettamista varten. Sen jälkeen säädettiin haluttu konsolidaatiopaine, joka oli sama kuin näytteen leikkauksessa käytetty paine.

Sulava näyte konsolidoitui erittäin nopeasti. Konsolidoitumisen havaittiin tapahtuvan lähes kokonaan jo ensimmäisten tuntien ai-

kana, jonka jälkeen se hidastui huomattavasti. Siten jäädytetyt näytteet voitiin nopeimmillaan leikata jo seuraavana päivänä.

Leikkauksen jälkeen määritettiin näytteen tilavuuspaino ja vesipitoisuus. Lisäksi otettiin pala näytettä kartiokoetta varten. Kartiokoe suoritettiin vaivatulla näytteellä.

Ei-jäädytetyt näytteet asetettiin kolmiaksiaaliselleihin muotin ja ejektorin avulla. Yleensä ei-jäädytetyt näytteet voitiin leikata vasta yli 4 vrk konsolidoinnin jälkeen. Kolmiaksiaalikoemuotona käytettiin CIUC-koetta (consolidated, isotropical, undrained, compression test). Näytteiden koko oli sama kuin jäädytyksessä käytettyjen muottien koko eli korkeus n. 110 mm ja halkaisija 50 mm. Näytteiden leikkausnopeutena käytettiin 0,011 mm/min eli 0.6 %/h. Oikean konsolidaatiopaineen säätäminen tapahtui käsin (laitteisto kuva 16). Itse leikkaus tapahtui tietokoneohjatulla laiteistolla automaattisesti. Tuloksista voitiin ohjelman avulla piirtää Mohrin jännitysympyrät ja jännityspolkukuvaajat.

Näytteitä sulatettiin ensimmäisissä kokeissa sekä huoneenlämmössä n. +20°C että jääkaapissa +5°C. Konsolidoituminen tapahtui hiukan nopeammin näytteen sulaessa huoneenlämmössä kuin näytteen sulaessa jääkaapissa. Leikkauslujuuteen ei sulatustavan todettu vaikuttavan mitenkään.

Ödometriä varten näytteet jäädytettiin kuten kolmiaksiaalikokeesakin. Näytteiden annettiin sulaa jäädytyksen jälkeen huoneenlämmössä ilman kuormaa. Sulamisen jälkeen näytteet asetettiin ödometriselliin, korkeus 15 mm ja halkasija n. 50 mm, ja suoritettiin normaali ödometrikoe. Ödometrikoemuotona käytettiin CRS-koetta eli vakimuodonmuutoskoetta ja muodonmuutoksen nopeutena käytettiin 0,004 mm/min eli 1.6 %/h.

Yhteenveto näytteen valmistuksesta

Jäädytetty näyte:

- näyte pantiin putkeen ja putki eristeen sisälle
- jäädytys vähintään 2 vrk. -10°C:ssa
- jäisen näytteen päät tasattiin, putki halkaistiin ja irroitettiin

- näyte asetettiin selliin ja aloitettiin konsolidointi näytteen ollessa vielä jäässä
- konsolidointi lopetettiin, kun näytteestä poistui vettä vähemmän kuin 0.05 ml/h
- näyte leikattiin nopeudella 0.0011 mm/h
- kolmiakselikokeen lopetus, punnitus, konsolidoinnin jälkeisen vesipit. määrittäminen ja kartiokoe

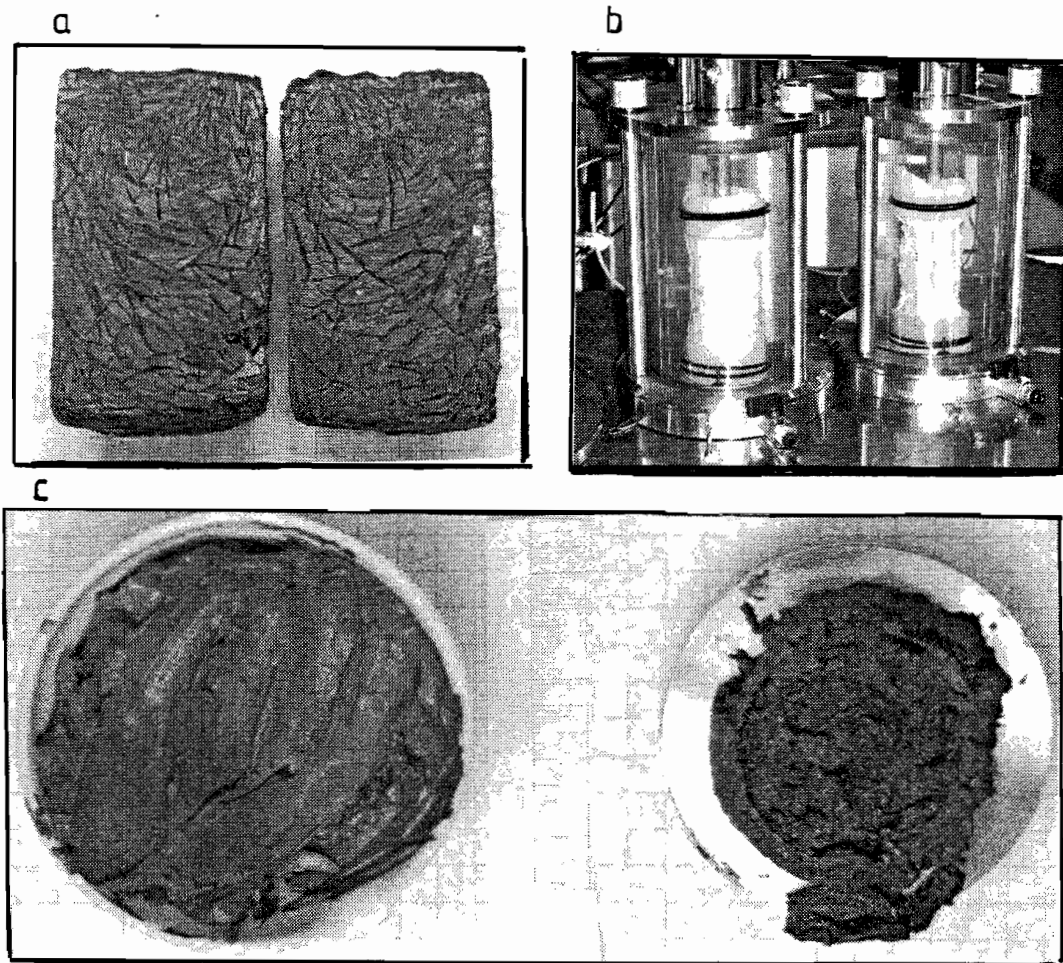
Ei-jäädyltetty näyte:

- näyte asetettiin selliin samalla tekniikalla ja välineistöllä kuin rakennetut hiekkänäytteet
- ejektoripaineena käytettiin alle 7 kPa
- konsolidointi, leikkaus ja loppu samalla tavoin kuin jäädyltettyllä näytteellä

4.3 Kokeiden tulokset

Kun jäätynyt näyte otettiin pois putkesta, voitiin siinä havaita sekä pysty- että vaakasuuntaisia jäälinssejä, kuva 17. Jäädyltettyä näytettä konsolidoitaessa poistui siitä huomattavasti enemmän vettä kuin ei-jäädyltetystä näytteestä. Tämä aiheutti jäädyltetyyn näytteeseen huomattavasti suuremman kutistumisen kuin ei-jäädyltetyyn, kuva 17.

Kun jäädyltetty näyte sulatettiin kokonaan, voitiin paljain silmin nähdä sen olevan rakeisempaa kuin ei-jäädyltetyn, kuva 17.



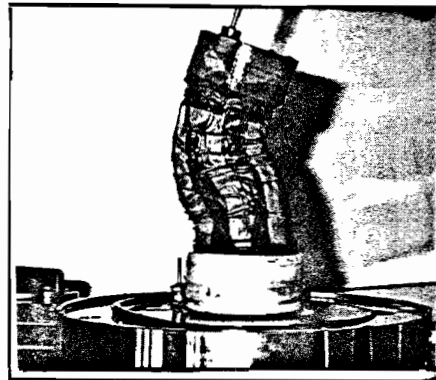
Kuva 17. a) Jäätyneessä näytteessä olevia jäälinssejä (tummat viirut).

b) Näytteen kutistuminen konsolidoinnin aikana. Vasemmalla ei-jäädytetty, oikealla jäädytetty.

c) Näytteen rakenteen muuttuminen jäädytys-sulatusprosessissa. Vasemmalla ei-jäädytetty, oikealla jäädytetty.

Kuvassa 19 on CIUC-kolmiakselialikokeiden maksimileikkausjännityskuvaajat. Sompasaaren jäädytetyillä näytteillä maksimileikkausjännitys oli suurempi kuin ei-jäädytetyillä maalla. Ainoastaan yhdessä kokeessa (15 kPa) jäädytetyillä näytteillä oli pienempi leikkausjännityksen arvo kuin ei-jäädytetyillä näytteellä. Suurin käytetty konsolidointipaine oli Sompasaaren näytteellä 80 kPa. Sompasaaren leikkausjännityskäyrissä ei voida havaita selvää maksimikohtaa, vaan lujuus kasvaa tasaisesti. Käyrien muoto on tyypillinen häiriintyneille, löyhille näytteille (A.R.Jumikis 1962, K-H.Korhonen 1989) /5/, /9/. Herttoniemen jäädytettyjen näytteiden leikkausjännitys oli suurempi pienillä konsolidaatiopaineen arvoilla

kuin ei-jäädetytten. Painetta lisättäessä ei-jäädetytyn maan leikkausjännitys saavutti ja ohitti jäädetytyn maan leikkausjännityksen arvon. Herttoniemen käyrien muoto vastaa alle 40 kPa:ssa häiriintyneen ,löyhän näytteen käyrän muotoa. Yli 40 kPa:ssa käyrien muoto muistuttaa lähinnä häiriintymättömän, tiiviin näytteen käyriä (A.R.Jumikis 1962, K-H.Korhonen 1989) /5/, /9/. Poikkeuksena edelliseen on 40 kPa:n ei-jäädetytyn näytteen käyrä, joka muistuttaa löyhän näytteen käyrää. Herttoniemen 40 kPa jäädetyssä näytteessä sekä 200 kPa jäädetyssä ja ei-jäädetyssä näytteessä tapahtuu jyrkkä leikkausjännityksen pieneneminen niiden saavutettua maksimiarvonsa. Jäädetytten ja ei-jäädetytten näytteiden leikkausjännityskuvaajat muistuttavat toisiaan molemmilla maa-aineksilla. Mitä suurempi oli konsolidaatiopaine, sitä suurempi oli leikkausjännitys. Kaikille näytteille oli leikkauksen edetessä tyypillistä, ettei näyte murtunut paikalleen vaan taipui, kuva 18. Taipuman huomioon ottaminen leikkausjännitystä laskettaessa oli mahdotonta. Niinpä näytteiden kuvaajat on kuvissa 19 ja 20 katkaistu 20 % muodonmuutoksen kohdalta.



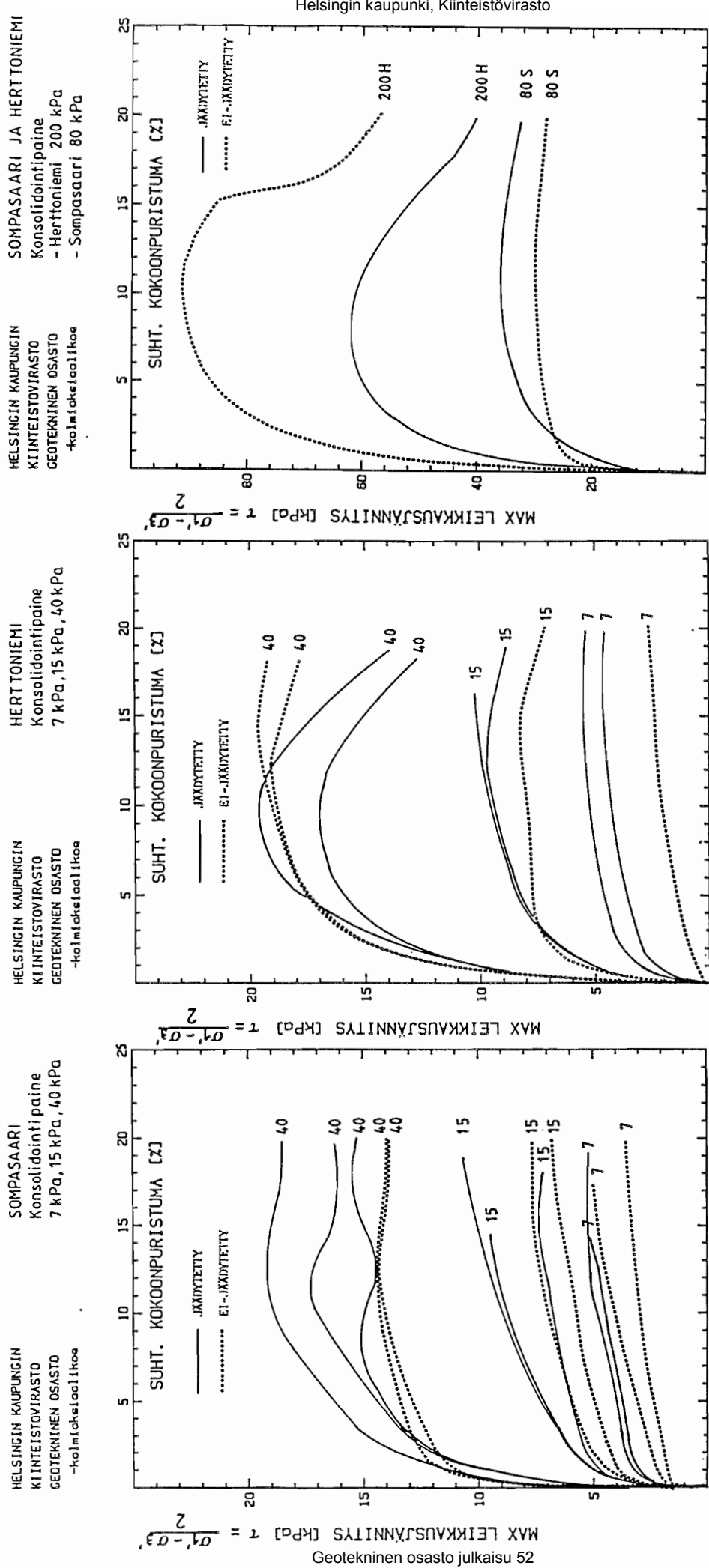
Kuva 18. Näytteen taipuminen leikkauksen aikana.

Huokospaineen kasvaminen leikkaukseen aikana on esitetty kuvassa 20. Jäädetytyn maan huokospaine jäi leikkauksen aikana pienemmäksi kuin ei-jäädetytyn maan. Lähes kaikissa kokeissa jäädetytyn maan kuvaajat saavuttivat leikkauksen aikana maksimiarvon, jonka jälkeen ne alkoivat hitaasti laskea. Ei-jäädetytyn maan kuvaajilla ei ollut selvää maksimikohtaa, vaan huokospaine nousi jatkuvasti. Nousu hidastui muodonmuutoksen lisääntyessä.

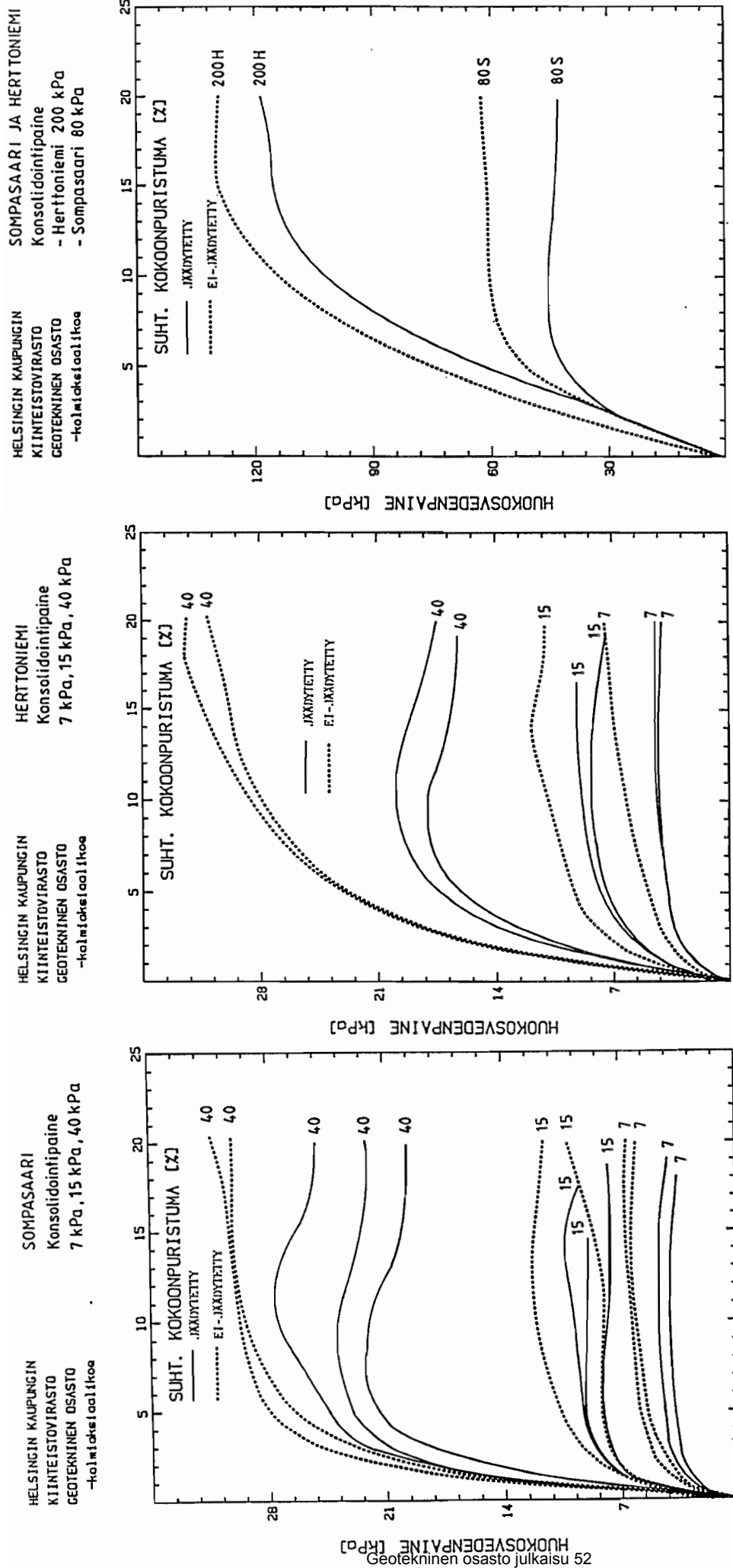
Kuvassa 21 on esitetty CIUC-kolmiaksiaalikokeiden leikkauksessa saadut maksimileikkauslujuudet konsolidaatiopaineen muuttuessa. Sompasaaren jäädytetyn ja ei-jäädytetyn näytteen lujuudet kasvasivat suurin piirtein samalla tavalla. Kuitenkin jäädytetty näyte saavuttaa hieman suuremman lujuuden kuin ei-jäädytetty näyte. Herttoniemen jäädytetyillä näytteillä oli suurempi leikkauslujuus kuin ei-jäädytetyillä näytteillä käytettäessä pieniä konsolidaatiopaineita. Noin 35 kPa jälkeen kasvoi ei-jäädytetyn maan leikkauslujuus suuremmaksi kuin jäädytetyn maan. Kuvassa 22 on esitetty leikkauslujuuden muuttuminen jäädyttämisen vaikutuksesta. Vertailuarvona käytettiin ei-jäädytetyn näytteen leikkauslujuuden arvoa. Kuvan 22 mukaan leikkausjännitys kasvoi hieman Sompasaaren näytteillä jäädytyksen seurauksena. Herttoniemen näytteillä lujuus kasvoi pienellä konsolidaatiopaineen arvolla kaksinkertaiseksi (7 kPa). Tämän jälkeen jäädyttämisen lujuutta kasvattava vaikutus alkoi vähetä konsolidaatiopainetta lisättäessä. Jäädytetyn maan lujuus oli 200 kPa:n paineessa noin 70 % ei-jäädytetyn maan lujuudesta.

Kartiokokeiden tulokset, kuvat 23 ja 24, olivat samansuuntaisia kuin kolmiaksiaalikokeissa saadut tulokset. Kartiokokeessa jäädytetyn maan leikkauslujuuden arvot kasvoivat maksimissaan Sompasaaren näytteillä yli nelinkertaisiksi ja Herttoniemen näytteillä yli 6.5-kertaisiksi verrattuna ei-jäädytettyjen näytteiden arvoihin. Ei-jäädytettyjen ja jäädytettyjen näytteiden leikkauslujuuksien välinen ero oli kartiokokeessa suurempi kuin kolmiaksiaalikokeessa, kuvat 22 ja 24. Virhettä kartiokokeen tuloksiin aiheuttavat seuraavat tekijät:

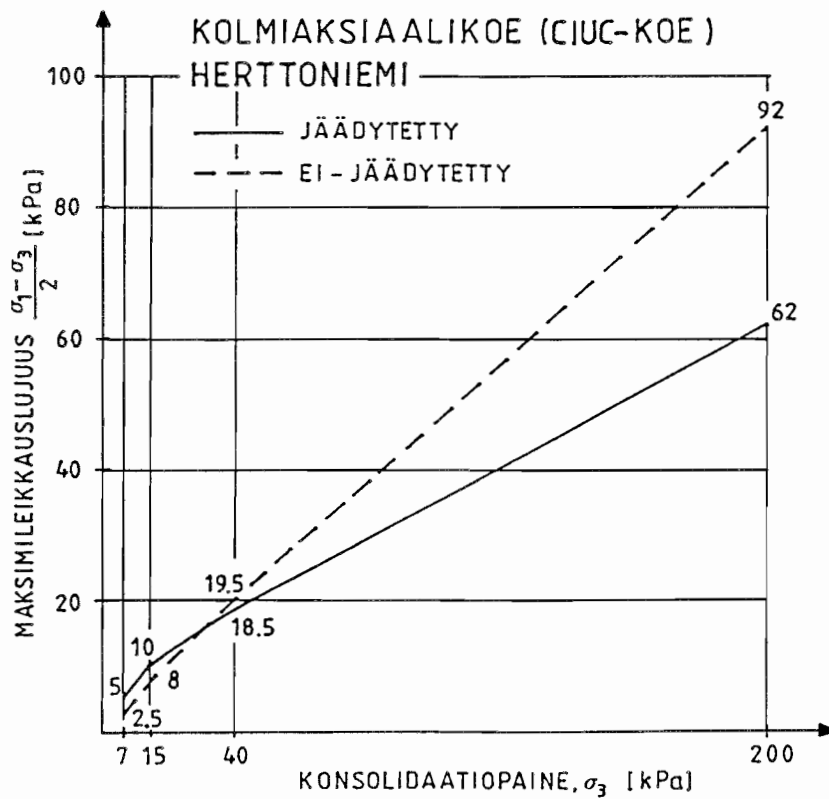
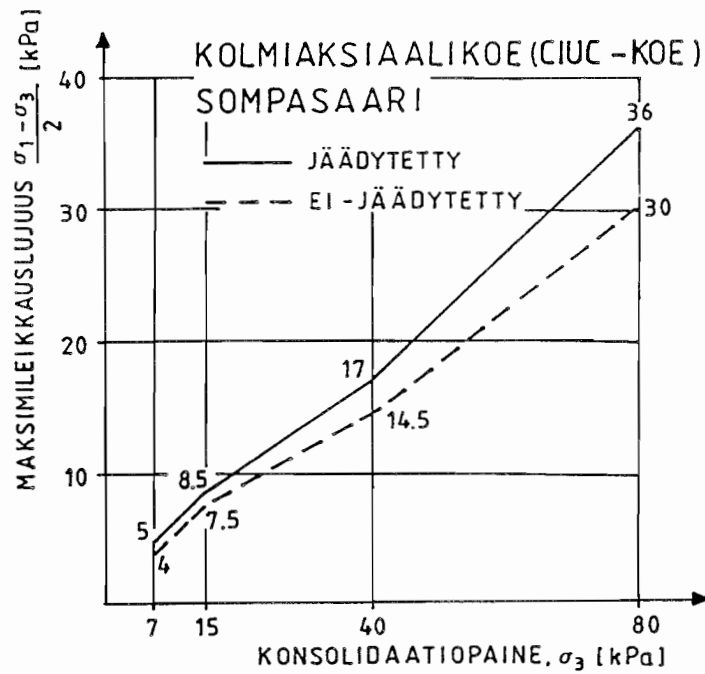
- korkeiden sellipaineiden näytteiden tulokset oli aproksimoitava johtuen taulukoiden loppumisesta
- jäädytetyn näytteen vaivautumisasteen arvioiminen: näyte mureni
- näytteen mahdollinen tiivistyminen tasattaessa etenkin kun näyte oli murentunut vaivattaessa



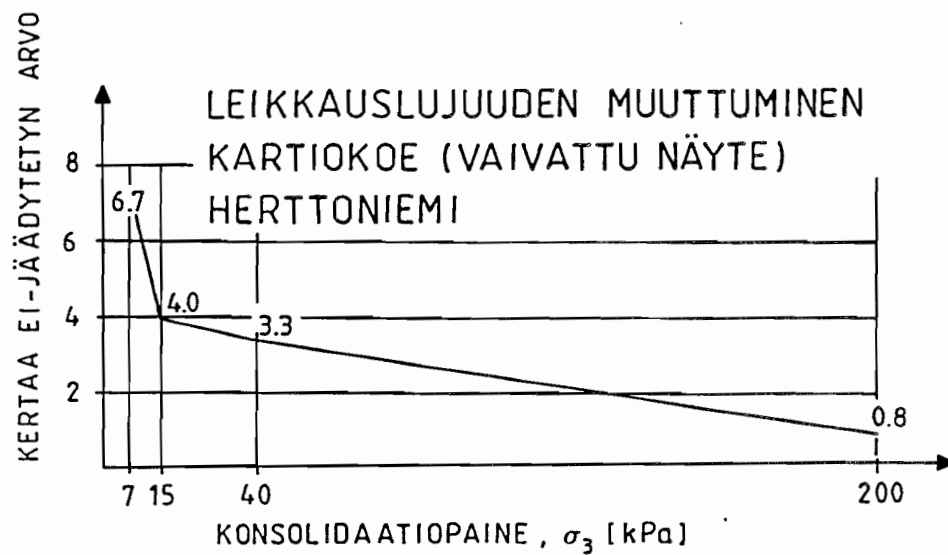
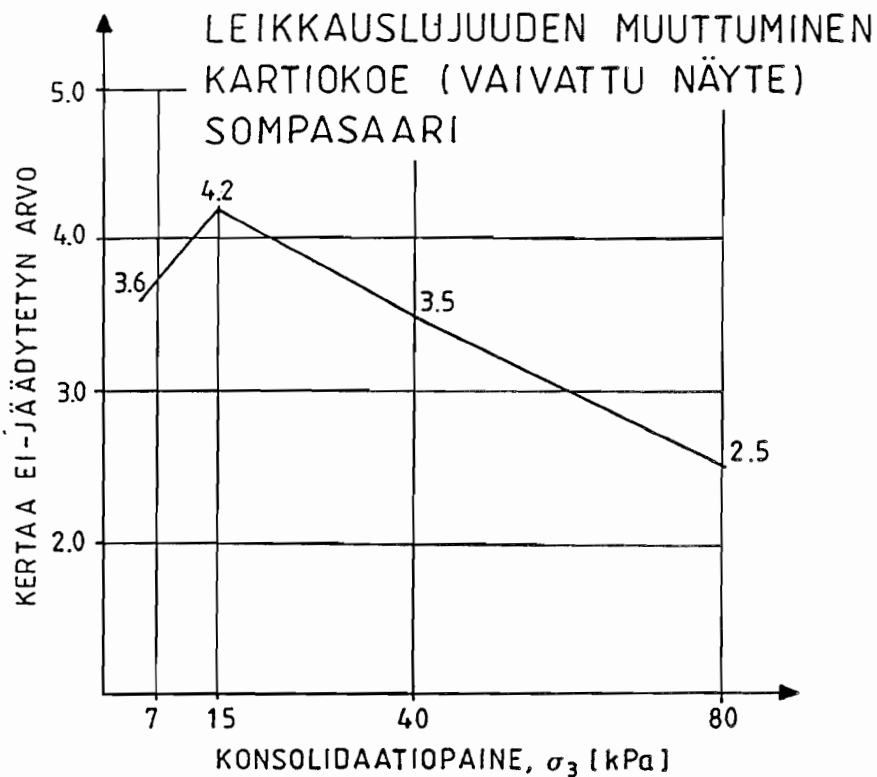
Kuva 19. Sompasaaren ja Herttoniemen leikkausjännityskuvaajat CIUC-kolmiakselialikokeissa.



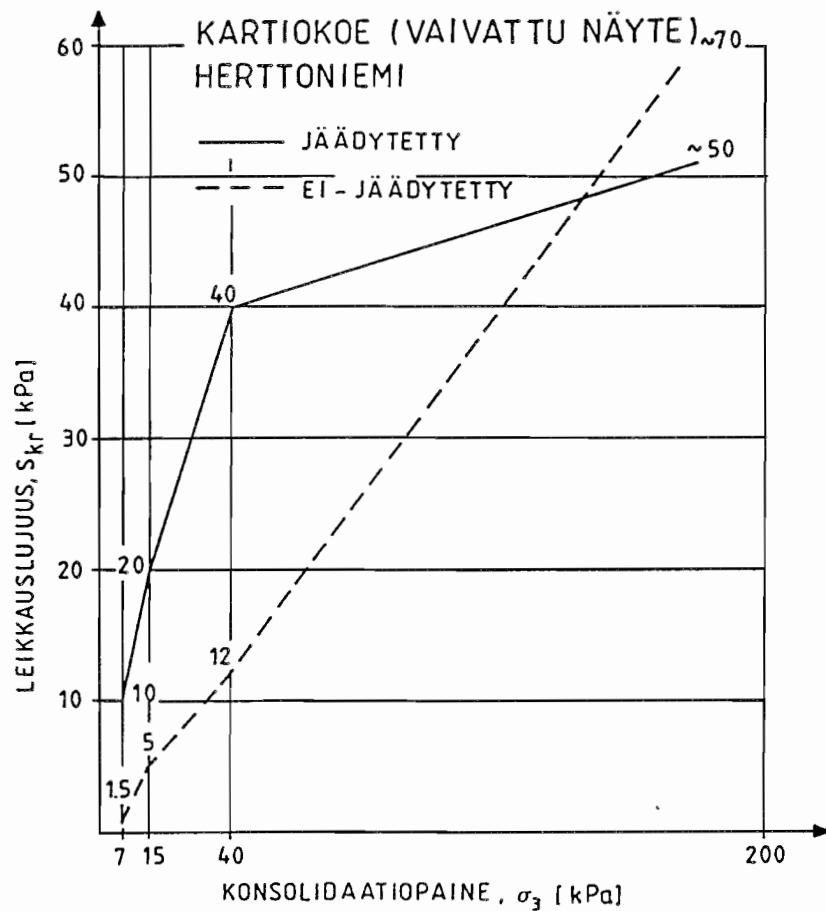
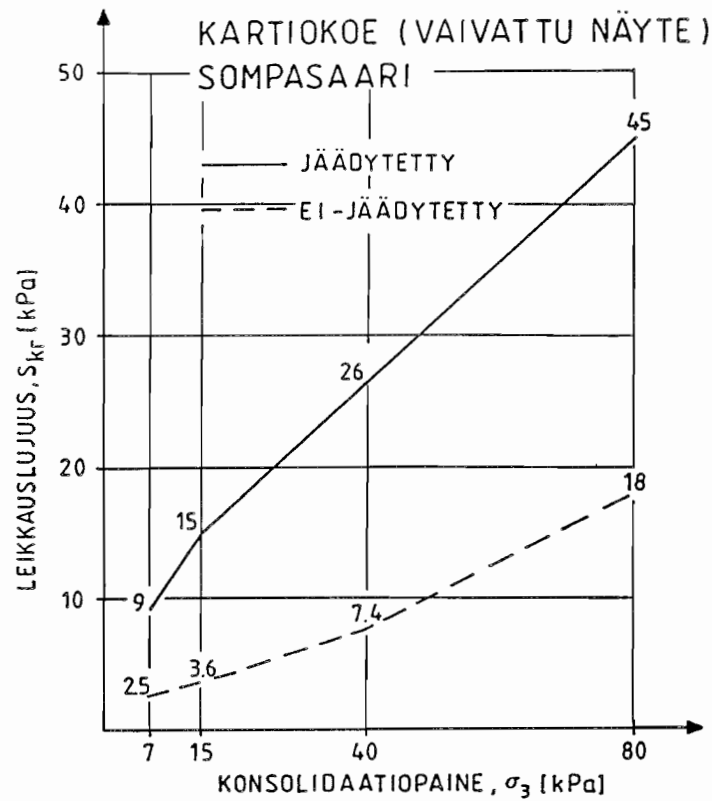
Kuva 20. Sompasaaren ja Herttoniemen huokospainekuvaajat
 CIUC-kolmiakseliallkoaeissa.



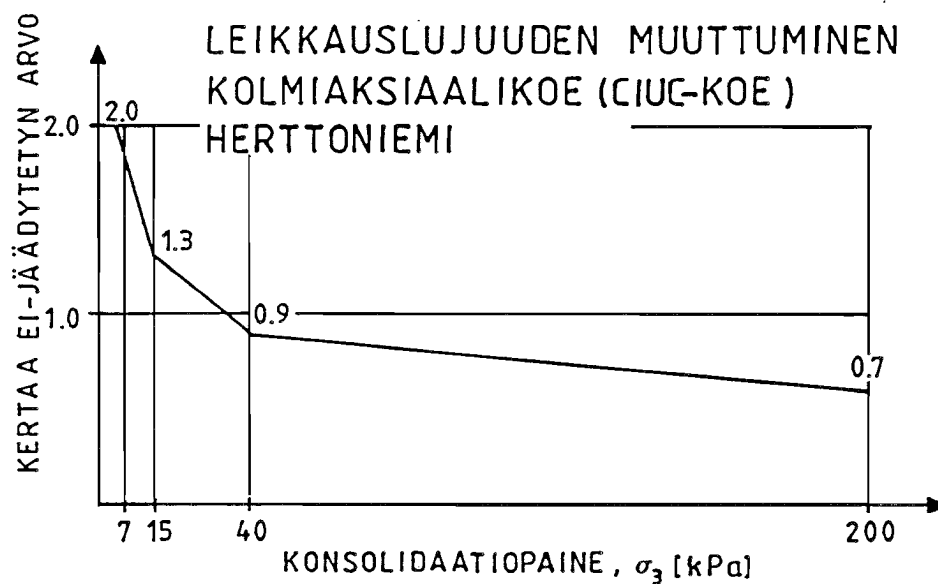
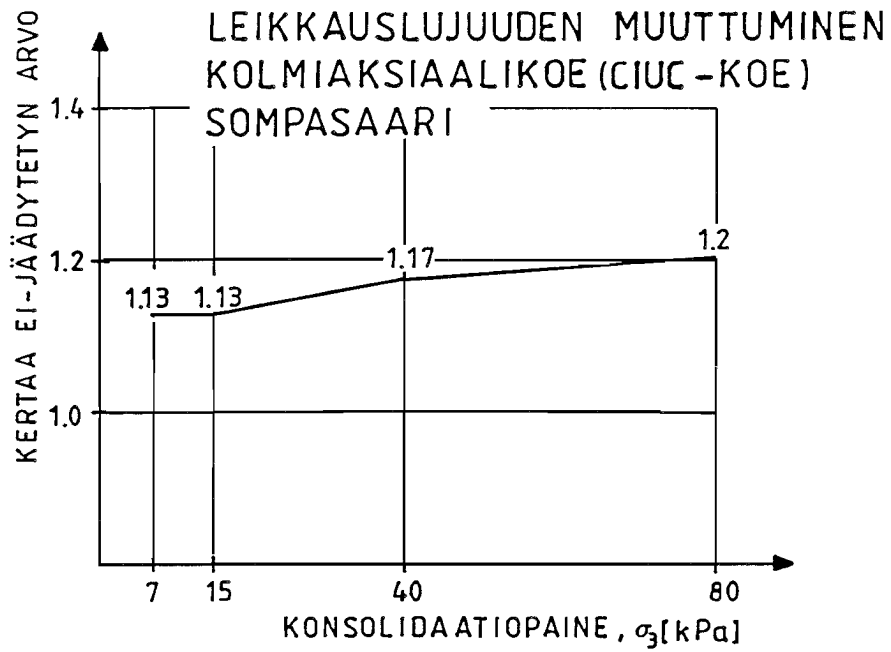
Kuva 21. CIUC-kolmiaksaalikokeiden maksimi leikkauslujuudet Sompasaaren ja Herttoniemen näytteillä.



Kuva 22. CIUC-kolmiaksaalikokeen leikkauslujuuden muuttuminen verrattuna vastaavaan ei-jäädytetyn näytteen arvoon Sompasaaren ja Herttoniemen näytteillä.

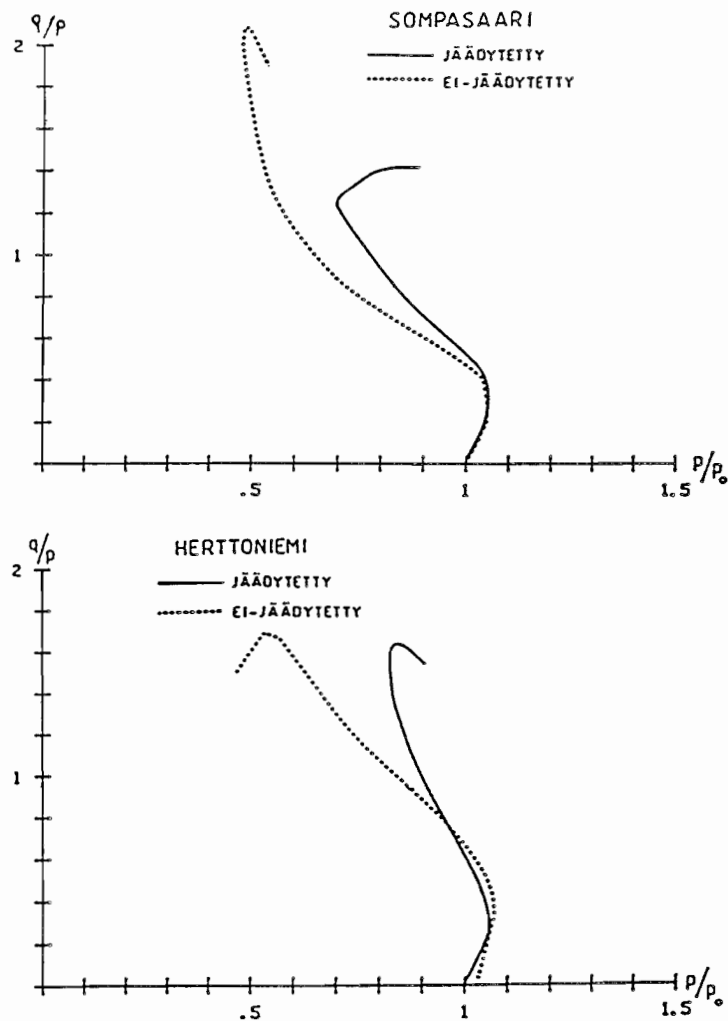


Kuva 23. Leikkauslujuudet kartiokokeissa konsolidoinin jälkeen Sompasaaren ja Herttoniemen näytteillä.



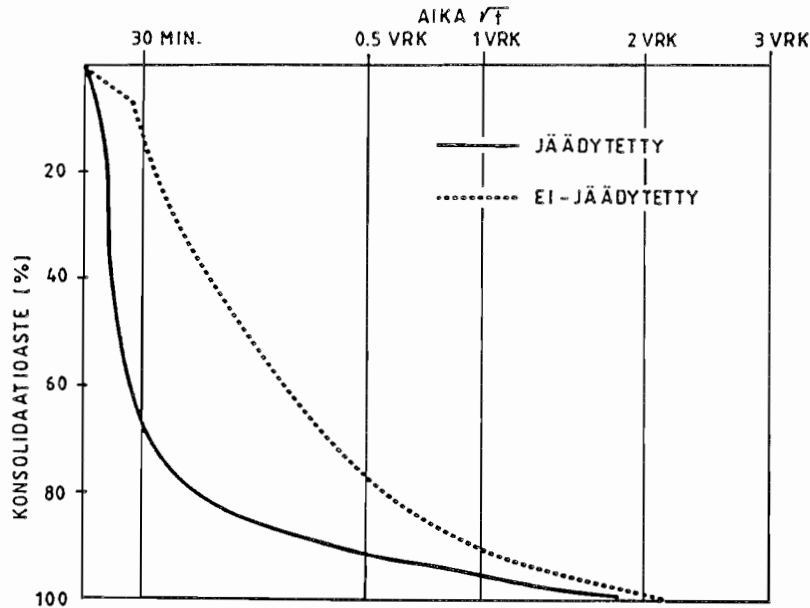
Kuva 24. Leikkauslujuuden muuttuminen verrattuna vastaavaan ei-jäädetytyn näytteen arvoon kartiokokeessa.

Kuvassa 25 on esitetty kolmiakσιαalikokeiden yhdistetyt jännitys-polkukuvaajat. Leikkauksen alussa jäädytetyn ja ei-jäädytetyn maan kokoonpuristumiskäyttäytyminen on samankaltaista. Muodonmuutoksen lisääntyessä käyrät alkavat kuitenkin poiketa toisistaan. Leikkauksen edetessä alkaa ei-jäädytetyn maan käyrä kääntyä yhä enemmän vasemmalle, kun taas jäädytetyn maan käyrä kääntyy oikealle. Siten leikkautuminen jäädytetyssä maassa tapahtuu tiiviin maan tavoin ja ei-jäädytetyssä maassa taas löyhän maan tavoin. Liitteessä 1 on esitetty kaikkien kokeiden käyrät.



Kuva 25. Sompasaaren (a) ja Herttoniemen (b) CIUC-kolmiakσιαalikokeen koetulokset normalisoidussa koordinaatistossa. (Silmämääräisesti määritellyjä jännityspolkujen keskiarvokäyriä).

Kolmiaksiaalikoikeita tehtäessä jäädytetty näyte konsolidoitui nopeimmillaan alle vuorokaudessa. Ei-jäädytetyllä näytteellä leikkaus voitiin yleensä suorittaa vasta neljän vuorokauden päästä. Konsolidointipainetta lisättäessä jäädytetyn näytteen konsolidointiaika jonkin verran piteni. Primaarikonsolidaatioasteen kehittyminen on laskettu konsolidoinnin aikana poistuneen vesimäärän avulla. Olettamuksena oli, että konsolidoinnin päätyttyä saatu vesimäärä vastasi 100 % konsolidaatioastetta. Konsolidoiminen lopetettiin, kun näytteestä poistui vettä alle 0.05 ml/h. Konsolidaatioasteen ajateltiin olevan suoraan riippuvainen poistuneesta vesimäärästä. Kun tiedettiin poistunut vesimäärä ajan funktiona, voitiin piirtää vastaava konsolidaatioasteen kuvaaja. Kuvassa 26 on piirretty erään Herttoniemen jäädytetyn ja ei-jäädytetyn näytteen konsolidaatioasteen kehittyminen ajan funktiona. Konsolidaatiopaine oli 200 kPa. Jäädytetty näyte konsolidoitui pääasiassa sulamisen yhteydessä. Ensimmäisen puolen tunnin jälkeen jäädytetyn näytteen konsolidaatioaste oli jo n. 70 %. Vastaava arvo ei-jäädytetyllä näytteellä oli ainoastaan n. 10 %. Tämän jälkeen jäädytetyn näytteen konsolidoitumisnopeus laski. Konsolidoitumisaste puolen vuorokauden jälkeen oli jäädytetyllä näytteellä n. 90 % ja ei-jäädytetyllä n. 80 %. 100 %:n konsolidaatioaste saavutettiin jäädytetyllä näytteellä toisen vuorokauden aikana ja ei-jäädytetyllä kolmannen vuorokauden aikana.



Kuva 26. Primaarikonsolidaatioasteen kehittyminen eräällä Herttoniemen näytteellä.

Taulukossa 3 on esitetty Mohrin menetelmällä lasketut leikkauslujuusparametrit. Teoriassa, riippumatta siitä, kummalla menetelmällä lasketaan, saadaan leikkauslujuusparametreille samat arvot. Määritettäessä leikkauslujuusparametrejä Mohrin ympyröiden avulla on vaikea huomioda mahdolliset kokeen aikana tapahtuneet huokospainehyppäykset.

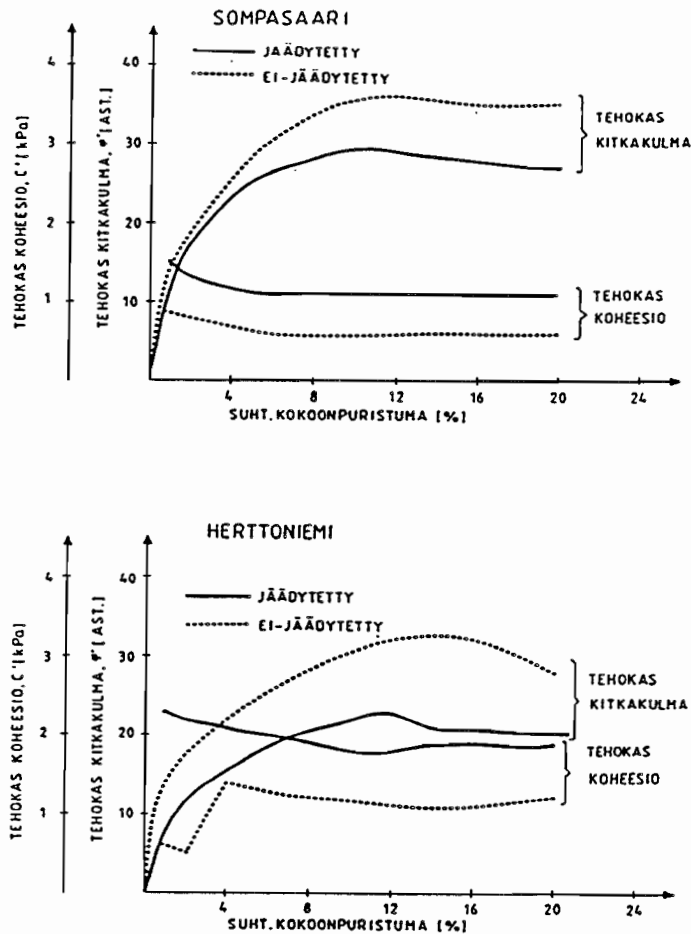
Leikkauslujuusparametrien arvo riippuu siitä, millä muodonmuutoksen arvolla ne määritetään, ks. liitteet 2-3. Liitteessä 4 on esitetty kaikkien kolmiakselialikokeiden jännityspolkukuvaajat. Kuvassa 27 on esitetty Sompasaaren ja Herttoniemen leikkauslujuusparametrien muuttuminen kokoonpuristumisen funktiona. Kuvan arvot on laskettu kriittisen tilan koordinaatistossa. Kuvan 27 mukaan kitkakulma pienenee jäätyksen johdosta. Kitkakulman erotus tulee sitä suuremmaksi, mitä suurempi on näytteen kokoonpuristuma 12 % - 16 %:n kokoonpuristumaan asti. Tämän jälkeen kitkakulmaero vakiintuu, ks. Sompasaaren kuvaaja, tai pienenee, ks. Herttoniemen kuvaaja. Koheesiosta taas voidaan sanoa, että sen arvo kasvaa jäädyttämisen johdosta pienillä paineen arvoilla. Painetta lisättäessä koheesiokero vakiintuu, ks. kuva 27, tai pienenee, ks. taulukko 3.

Taulukko 3. Mohrin ympyröiden avulla lasketut tehokkaat leikkauslujuusparametrit.

J = jäädytetty näyte

E-J = ei-jäädytetty näyte

Kokoon- puristuma [%]	SOMPASAARI				HERTTONIEMI			
	Tehokas koheesio c'		Tehokas kitkakulma ϕ'		Tehokas koheesio c'		Tehokas kitkakulma ϕ'	
	J	E-J	J	E-J	J	E-J	J	E-J
1,5	1,8	0,9	15,8	17,1	2,5	0,7	11,0	16,2
6	0,9	0,6	28,1	31,8	3,9	2,2	18,0	25,5
12	1,6	1,7	29,1	34,5	-	-	-	-
14	-	-	-	-	2,6	2,8	22,1	32,4
20	1,3	1,3	29,1	35,6	4,0	4,0	16,8	25,4



Kuva 27. Leikkauslujuusparametrien muuttuminen jäädytys-
latusprosessin vaikutuksesta. Parametrien arvot laskettu kriittisen
tilan koordinaatistossa.

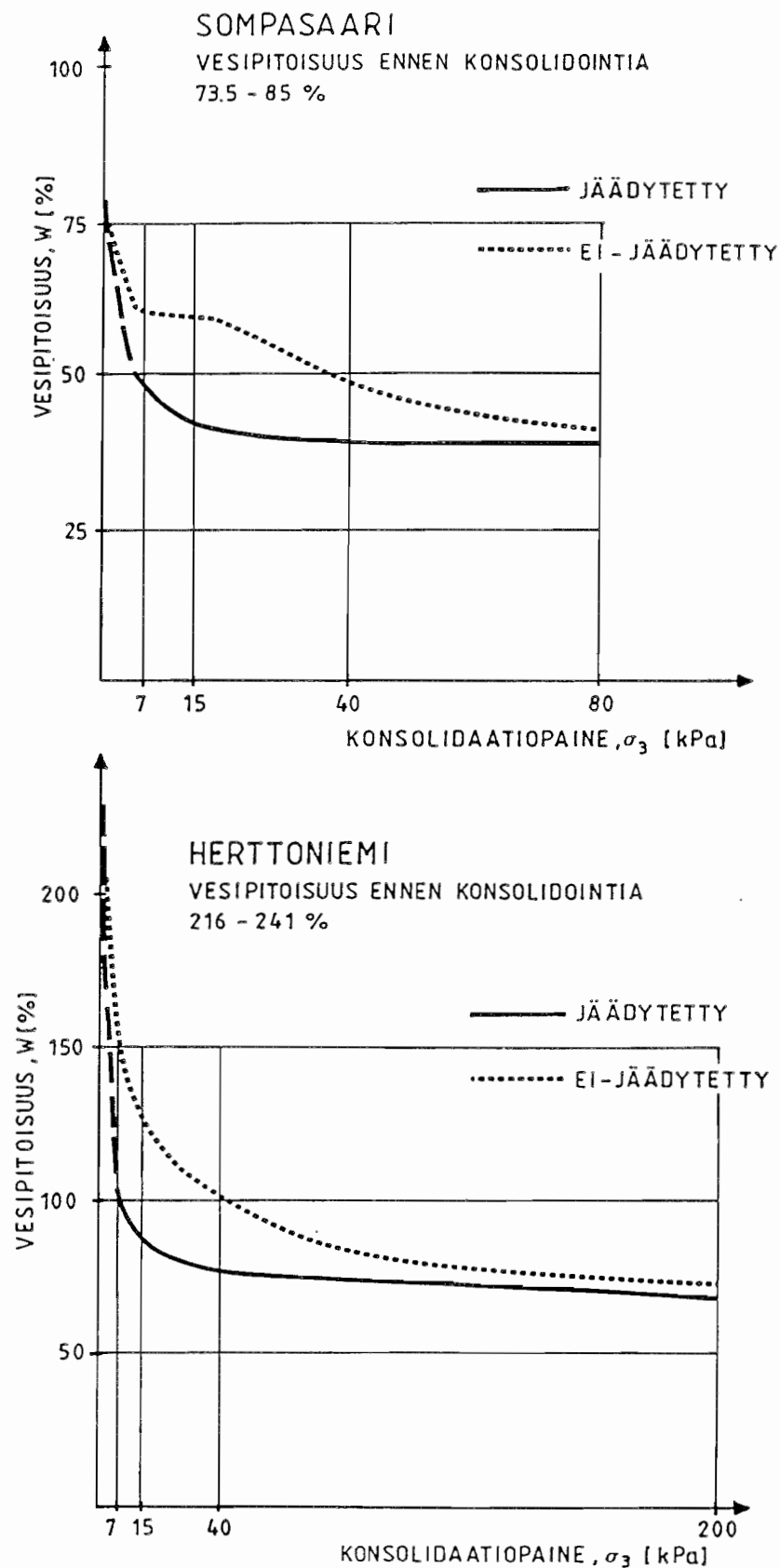
Näytteiden vesipitoisuuden muuttumista eri konsolidointipaineen arvoilla jäädytetyssä ja ei-jäädytetyssä maassa on käsitelty kuvassa 28. Sompasaaren ja Herttoniemen näytteiden vesipitoisuus pieneni jäädytyksen vaikutuksesta. Pienillä konsolidaatiopaineen arvoilla vesipitoisuusero oli suurin (Herttoniemi 7 kPa ero n. 70 %-yks., Sompasaari 15 kPa ero n. 20 %-yks.). Näytteiden konsolidoinnin jälkeiset vesipitoisuudet kuitenkin lähenivät toisiaan painetta lisättäessä.

Kuvan 29 mukaan jäätyminen kasvatti maan huokoslukua. Tämä johtui maassa olevan veden jäätymisestä ja laajenemisesta. Jäädytetyn maan huokoslukuarvot ennen konsolidointia on laskettu jäässä olevasta näytteestä. Näin ollen jäädytetyn maan huokoslukuarvot ennen konsolidointia ovat lähinnä teoreettisia. Tämä johtuu siitä, että näytteen sulaessa huokosluku pienenee, vaikka näytteen sulaminen tapahtuisi normaalissa ilmanpaineessa ilman konsolidaatiopainetta. Pienillä konsolidaatiopaineen arvoilla pieneni sekä jäädytetyn että ei-jäädytetyn maan huokosluku jyrkästi. Lisättäessä edelleen konsolidointipainetta hidastui huokosluvun pieneneminen huomattavasti jäädytetyllä maalla. Huokoisuuden pieneneminen jatkui ei-jäädytetyllä maalla nopeampana kuin jäädytetyllä maalla. Siten jäädytetyn ja ei-jäädytetyn maan huokoslukukäyrät leikkaavat toisensa. Leikkauspiste on n. 30 kPa, jonka jälkeen ei-jäädytetyn maan huokosluku on pienempi kuin jäädytetyn maan. Kuvassa esitetyistä taulukoista nähdään, että pienillä konsolidaatiopaineen arvoilla jäädytetyn maan sekanttimoduuli oli pienempi kuin ei-jäädytetyn. Konsolidaatiopainetta lisättäessä kasvoi jäädytetyn maan sekanttimoduuli huomattavasti nopeammin kuin ei-jäädytetyn arvo. Ero lopussa oli n. 24-kertainen Sompasaaren näytteillä ja noin kolminkertainen Herttoniemen näytteillä.

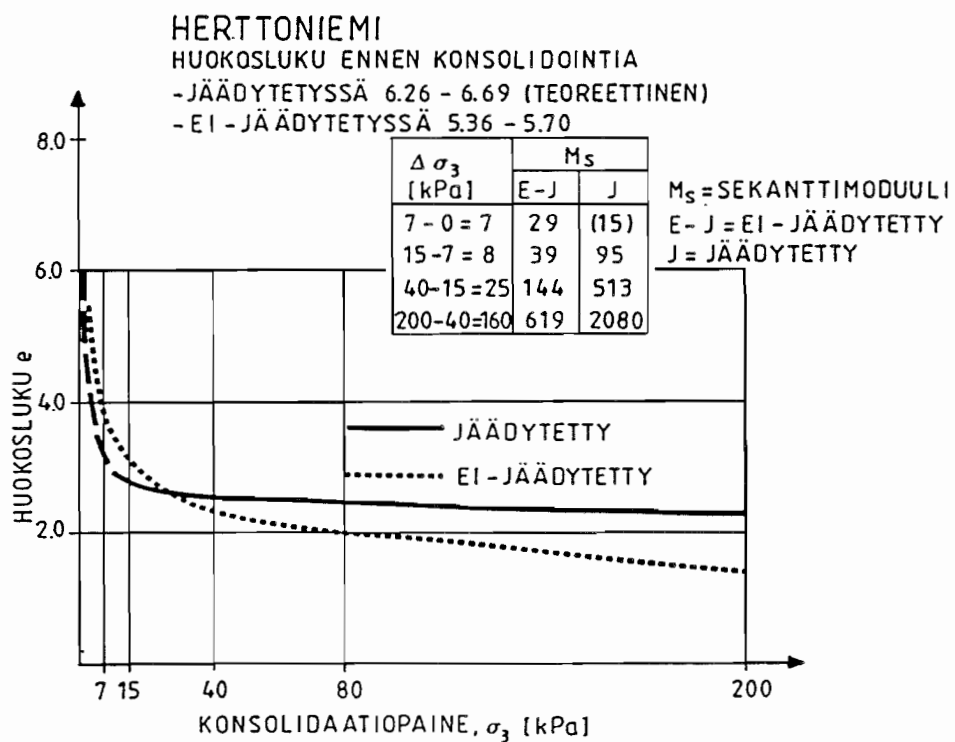
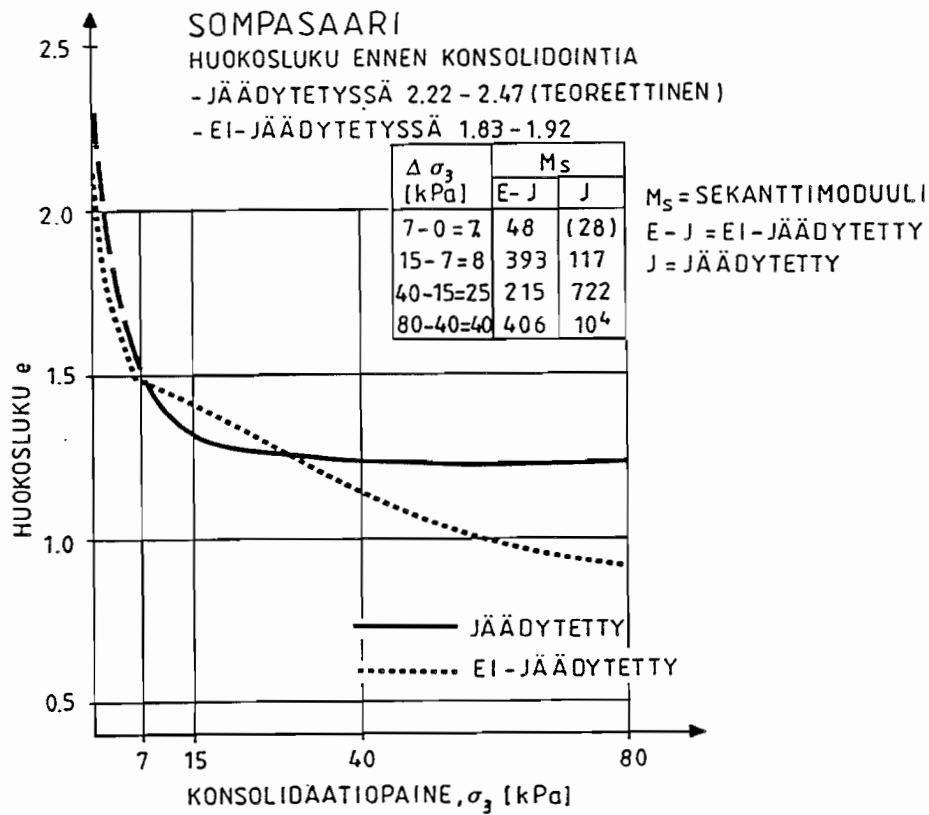
Maan kuivatilavuuspaino pieneni jäätyksen seurauksena, kuva 30. Konsolidaatiopainetta hiukan lisättäessä kasvoi jäädytetyn maan kuivatilavuuspaino nopeammin kuin ei-jäädytetyn maan. Painetta edelleen lisättäessä hidastui jäädytetyn maan kuivatilavuuspainon kasvu merkittävästi. Vastaavanlaista hidastumista ei tapahtunut ei-jäädytetyllä maalla. Siten jäädytetyn ja ei-jäädytetyn maan

kuivatilavuuspainokäyrät leikkaavat toisensa n. 30 kPa. Käyrien leikkauspisteen jälkeen on ei-jäädetytyn maan kuivatilavuuspaino suurempi kuin jäädetytyn maan.

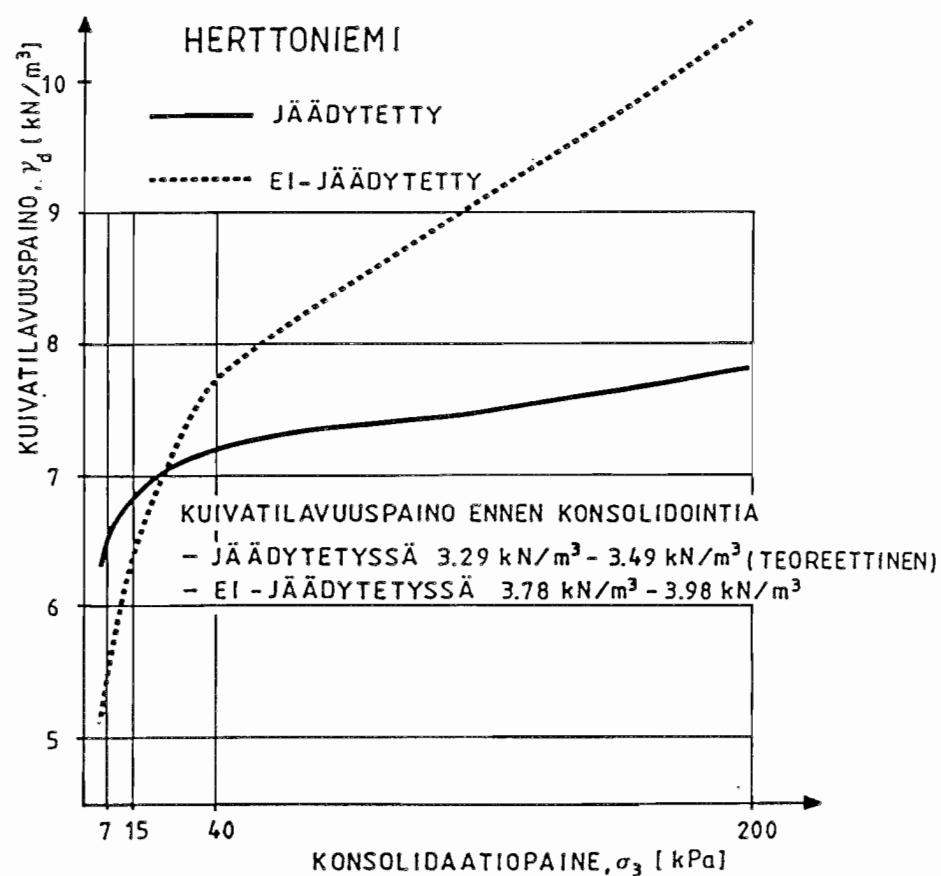
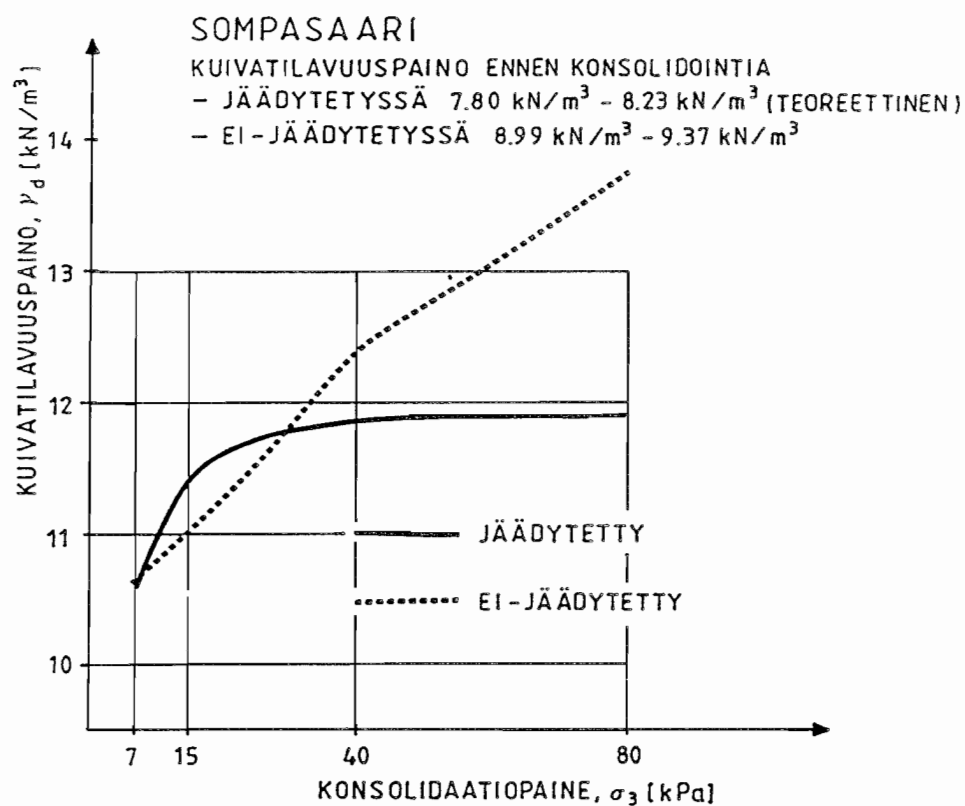
Ödometrikokeiden tulokset ovat kuvassa 31. Herttoniemen näytteillä jäädetty maa painui noin 50 % vähemmän kuin ei-jäädetty maa. Sompasaaren näytteillä ero ei ollut niin suuri. Molemmilla näytteillä jäädetytyn maan kokoonpuristuvuusmoduuli (M) oli suurempi kuin ei-jäädetytyn maan. Jäädetytyn maan konsolidaatiokertoimen arvo pieneni nopeasti maan kokoonpuristuessa. Jäädetytyn maan kertoimen arvo oli kuitenkin koko kokeen ajan suurempi kuin ei-jäädetytyn maan arvo. Ero oli suurin kokeen alkuvaiheessa. Huokosvedenpaine kasvoi jäädetyssä maassa kokeen aikana kuormitusta nostettaessa hitaammin ja jäi pienemmäksi kuin ei-jäädetytyn maan vastaava arvo.



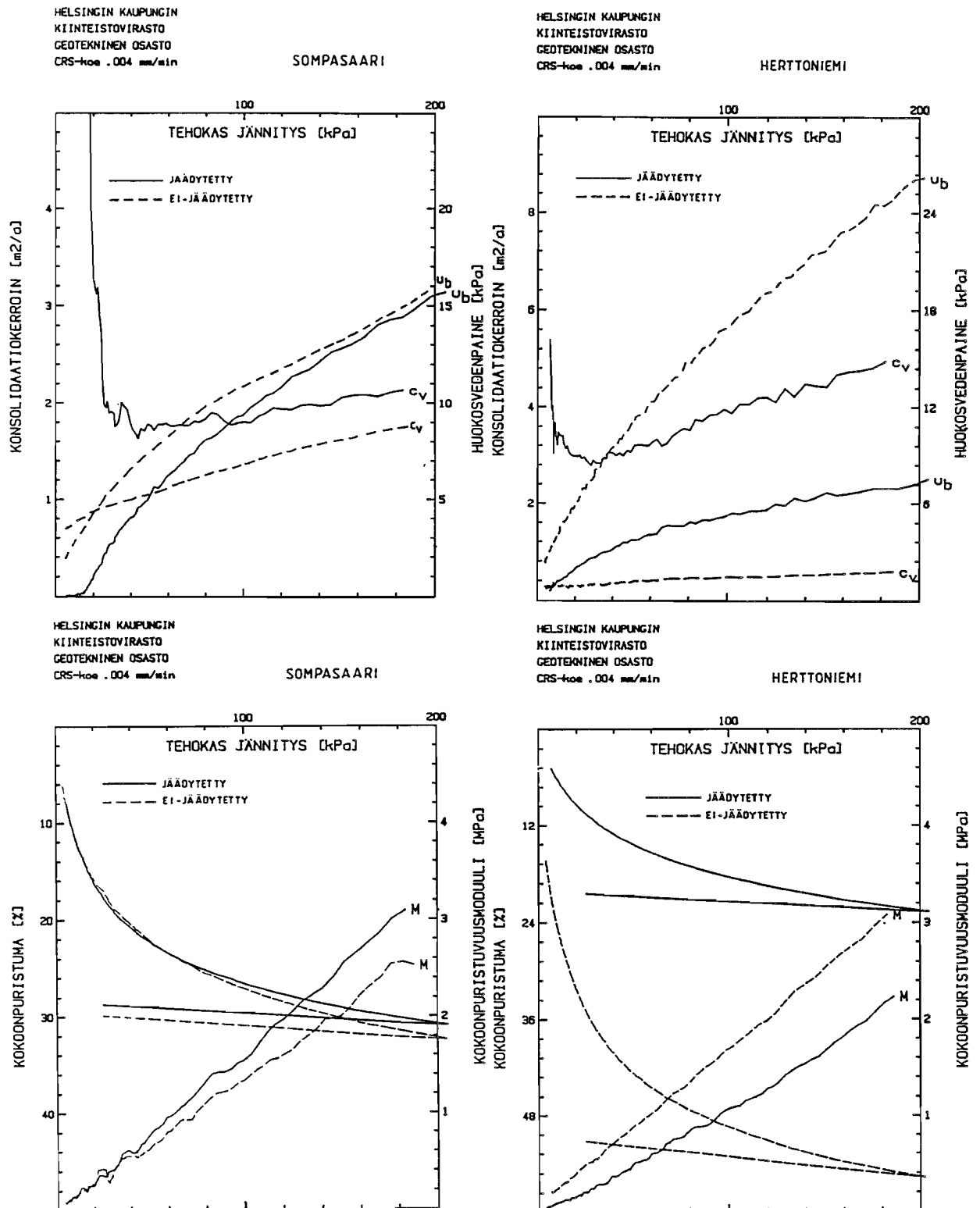
Kuva 28. Jäädityssulatusprosessin vaikutus näytteiden vesipitoisuuteen.



Kuva 29. Jäätymissulamisprosessin vaikutus maan huokoslukuun ja sekanttimoduuliin.



Kuva 30. Jäätymissulamisprosessin vaikutus maan kuivatilavuuspainoon.



Kuva 31. Ödometrikokeiden tulokset Sompasaaren ja Herttoniemen näytteillä.

5. KENTTÄKOKEET

Kenttäkokeilla tutkittiin sulamiskonsolidaation vaikutusta luonnon olosuhteissa. Kohteeksi valittiin imuruoppausalueiden läjitysaltaita. Läjitysaltaista pyrittiin valitsemaan sellaiset, joissa läjitetty maa-aines oli hienorakeista maata, savea tai silttiä. Lisäksi edellytettiin, että maa-aines oli päässyt jäätymään pinnasta talven aikana. Tutkittavaksi kohteeksi valittiin seuraavat kohteet:

- Vaasa, Vaasan väylän läjitysalue, Sundom, 1978-1979
- Joensuu, Kivisalmen väylätyö
- Kempele, Riutunkarin läjitysallas, Oulunsalo

Kussakin kohteessa suoritettiin kolme siipikairausa. Siipikairaukset tehtiin 0.5 m välein maanpinnasta lähtien. Lisäksi otettiin mahdollisuuksien mukaan kaksi kappaletta jatkuvia näytteitä 0-4 metriin. Siipikairaukset ja näytteidenotto pyrittiin tekemään niin lähellä toisiaan, etteivät olosuhteet maassa muuttuneet.

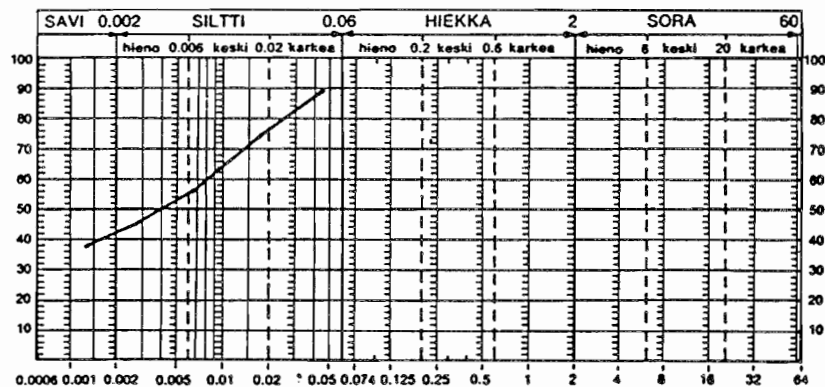
Rakeisuuskäyrien perusteella Vaasan ja Joensuun näytteet täyttivät alussa asetetut ehdot. Kempeleen näytteet sitä vastoin olivat hiekkaa ja soraa. Määritettäessä Joensuun näytteiden maalajia, havaittiin maa-aineksen olevan erittäin epähomogeenista. Tämä johtui siitä, että maahan oli sekoittunut turvetta päällyskerroksissa. Näin ollen jäljelle jäi kohteista vain Vaasa, jonka maa-aines oli alussa asetettujen vaatimusten mukaista.

Kuvassa 32 on esitetty Vaasan näytteiden rakeisuuskäyrä (0-2 m). Vaasan näytteiden vesipitoisuudet ja humuspitoisuudet olivat:

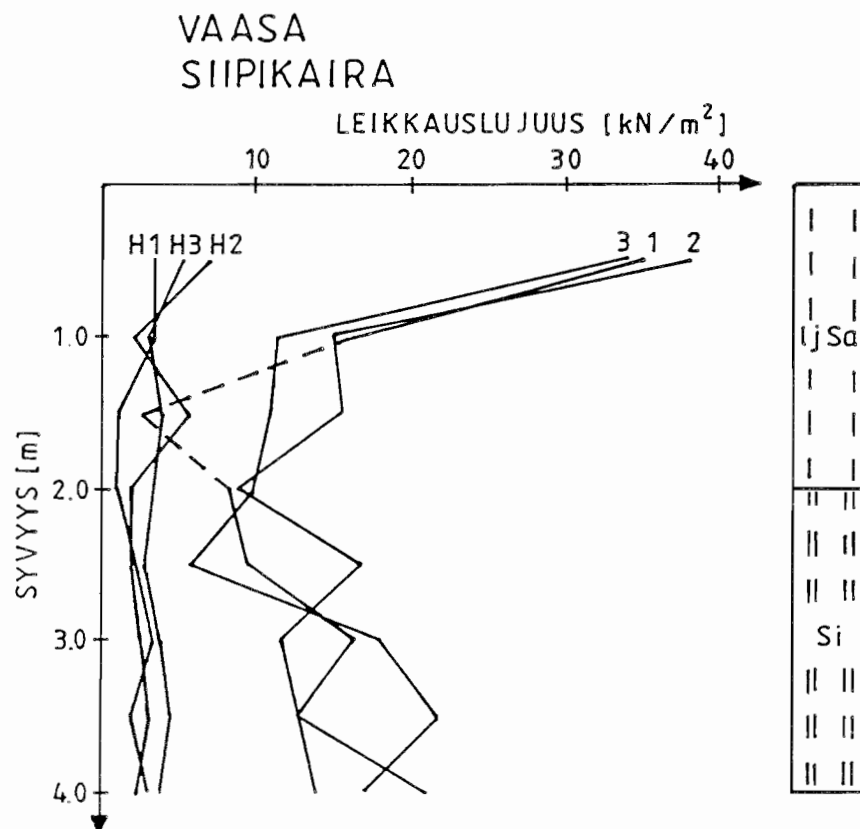
- 0-2 m vesipit. n. 56-75 %, humuspit. n. 4,5 %.
- 2-3 m vesipit. n. 34-47 %, humuspit. n. 1 %.
- 3-4 m vesipit. n. 30-40 %, humuspit. n. 0,5 %.

Hienorakeisessa maassa, Vaasa, maanpinnasta lukien aina yhteen metriin saakka, on leikkauslujuus kasvanut, kuva 33. Lisäksi voidaan havaita, että mitä lähempänä maan pintaa siipikairaus on tehty, sitä suurempi on leikkauslujuus. Suuruusluokaltaan lu-

lujeneminen pinnassa oli yli nelinkertaista (pinta oli niin kovaa, ettei sitä voitu siipikairata). Karkearakeisessa maassa, Kempele, ei vastaavan suuruusluokan lujenemista voitu havaita (lujeneminen vain n. kaksinkertaista). Kuvan merkinnöissä H1, H2 ja H3 tarkoittavat siipikairalla saatuja häirittyjä leikkauslujuuksia ja 1, 2, 3 häiriintymätömiä leikkauslujuuksia. Vaasan alueen routimissyvyudeksi saadaan keskimääräisen pakkassumman avulla n. 0.8 m (H.Kivikoski et al. 1987) /7/, kts. liite 5. Saadusta tuloksesta voidaan todeta routimissyvyyden ja maan lujenemisen välinen yhteys. Voidaan päätellä, että maan lujeneminen on tapahtunut maan jäätymisen ja sulamisen seurauksena.



Kuva 32. Vaasan Sundomin läjitysalueen rakeisuuskäyrä syvyydestä 0-2 m.



Kuva 33. Vaasan Sundomin läjitysalueen siipikairatulokset.

H1, H2, H3 = häiritty leikkauslujuus.

1, 2, 3, = ei-häiritty leikkauslujuus.

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

1) Maan rakenteen muuttuminen

1.1) Jäätymissulamisprosessin vaikutuksesta saven raerunko muuttui ryynimäiseksi, kuva 17. Rungon muuttuminen taas aiheutti muutoksia maan vesipitoisuudessa, huokosluvussa ja kuivatilavuuspainossa.

1.2) Näytteiden vesipitoisuus pieneni jäädyttämisen seurauksena. Kuitenkin konsolidaatiopainetta lisättäessä lähenivät jäädytetyn ja ei-jäädytetyn näytteen vesipitoisuuden arvot toisiaan, kuva 28.

1.3) Jäätyminen kasvatti maan alkuperäistä huokoslukua. Jäädytetyn näytteen huokosluku pieneni erittäin nopeasti jo pienillä konsolidaatiopaineen arvoilla. Tämän jälkeen huokosluvun pieneneminen hidastui huomattavasti. Vastaavaa ilmiötä ei havaittu ei-jäädytetyssä maassa, vaan huokosluku pieneni suhteellisen tasaisesti konsolidaatiopainetta lisättäessä. Jäädytetyn maan huokosluku oli pienempi kuin ei-jäädytetyn maan pienillä konsolidaatiopaineen arvoilla. Konsolidaatiopainetta lisättäessä muuttui huokoslukujen ero päinvastaiseksi, eli jäädytetyn maan huokosluku oli suurempi kuin ei-jäädytetyn maan. Jäädytetyn ja ei-jäädytetyn maan huokoslukukäyrät leikkasivat toisensa n. 30 kPa, kuva 29.

1.4) Kuivatilavuuspainon muuttuminen on analogista huokosluvun muuttumiselle. Kun huokosluku pienenee, maan kuivatilavuuspaino kasvaa. Kuivatilavuuspainon arvo vastaa lähinnä maan tiheyttä. Jäädytetty maa tiivistyi pienillä konsolidaatiopaineen arvoilla paremmin kuin ei-jäädytetty maa. Painetta nostettaessa hidastui jäädytetyn maan tiivistyminen merkittävästi ei-jäädytetyn maan edelleen tiivistyessä. Suurilla konsolidaatiopaineen arvoilla tiivistyi ei-jäädytetty maa paremmin kuin jäädytetty maa. Jäädytetyjen ja ei-jäädytetyjen näytteiden kuivatilavuuspainokäyrät leikkasivat n. 30 kPa, kuva 30.

1.5) Edellisistä kohdista ja kohdista 2.3 sekä 2.7 voidaan päätellä, että jäätymissulamisprosessin aiheuttama tiivistyminen on näyt-

teen konsolidoitumisen kaltaista. Kuitenkin on huomattava, että jäätymissulamisosprosessin aiheuttama konsolidoituminen ei ole aivan samanlaista kuin normaali maan konsolidoituminen. Ei-jäädytetty (normaali) maa ylikonsolidoituu homogeenisesti. Jäädytys-sulatusprosessissa maa taas ylikonsolidoituu jäälinsien välissä. Kun jää sulaa, syntyy maahan ylikonsolidoituneiden savi-partikkelipakkautumien ja sulaneen jään jättämien huokosten muodostama rakenne. Sulamiskonsolidaatiossa maa "ylikonsolidoituu" ryynimäisesti.

2) Leikkauslujuuden muuttuminen

2.1) Kuvien 21 ja 22 mukaan CIUC-kolmiaksaalikokeissa Sompasaaren näytteillä jäädyttäminen paransi maan leikkauslujuutta hieman: n. 1.1-kertaiseksi. Herttoniemen näytteillä leikkauslujuus kasvoi pienessä konsolidaatiopaineessa (7 kPa) kaksinkertaiseksi. Leikkauslujuuden kasvaminen väheni lisättäessä konsolidaatiopainetta. Noin 35 kPa:n jälkeen oli jäädytetyn maan leikkauslujuus pienempi kuin ei-jäädytetyn .

2.2) Kartiokokeen tulokset olivat samansuuntasia kuin kolmiaksaalikokeiden tulokset. Kartiokokeissa suurin leikkauslujuuden kasvu maan jäädyttäminen seurauksena oli Sompasaaren näytteillä yli nelinkertaista (kons.paine 15 kPa) ja Herttoniemen näytteillä yli 6.5-kertaista (kons.paine 7 kPa), kuva 24.

2.3) Jäätymissulamisosprosessin ja maan leikkauslujuuden kasvamisen välinen yhteys havaittiin kenttäkokeiden perusteella . Kentältä saadut tulokset tukivat hyvin laboratoriossa saatuja tuloksia. Siipikairalla tehdyissä kenttäkokeissa havaittu leikkauslujuuden kasvaminen oli yli nelinkertainen maanpinnan läheisyydessä, kuva 33.

2.4) Molempien maa-ainesten kitkakulma pieneni jäätymisen johdosta. Pieneneminen oli sitä voimakkaampaa, mitä suuremmasta muodonmuutoksesta oli kyse 12 % - 16 %:n muodonmuutokseen asti. Tämän jälkeen kitkakulmaero tasaantui (tai alkoi pienetä). Koheesio taas oli aluksi hieman suurempi pienillä muodonmuutoksen arvoilla, mutta ero pieneni (tai vakiintui) muodonmuutoksen kasvaessa, kuva 27 ja taulukko 3. Kuvasta 5 voidaan havaita, että leik-

kauslujuusparametrit muuttuvat samalla tavoin kuin ylikonsolidoituneessa maassa. Käytetyillä konsolidaatiopaineilla ei kuitenkaan saavutettu ylikonsolidoituneen ja normaalikonsolidoituneen maan leikkauskohtaa Sompasaaren näytteillä. Herttoniemen näytteillä taas lujuussuorien leikkauskohdan jälkeen ei-jäädytetyn, normaalikonsolidoituneen maan leikkauslujuus oli suurempi kuin jäädytetyn, "ylikonsolidoituneen" maan.

2.5) Herttoniemen jäädytettyjen näytteiden leikkauslujuus jäi konsolidaatiopaineen arvoilla >35 kPa pienemmäksi kuin ei-jäädytetyn maan lujuus. Tämä johtunee siitä, että jäädytetty maa kokoonpuristuu niin kauan kuin jäädytyssulatusprosessissa syntyneet savipakkaumat koskettavat toisiaan. Tämän jälkeen jäädytetty maa ei kokoonpuristu ennen kuin jäädytyksessä syntyneet savipakkaumat hajoavat. Näin ollen suhteellisen suurilla konsolidaatiopaineen arvoilla, kokeessa suurin käytetty paine oli 200 kPa, jäädytetty maa ei tiivisty yhtä paljon kuin ei-jäädytetty maa. Siten jäädytetty maa ei saavuta yhtä suurta tiiviyyttä kuin ei-jäädytetty ja näin jäädytetyn maan leikkauslujuus jää pienemmäksi kuin ei-jäädytetyn maan.

2.6) Leikkauslujuuden arvojen erot jäädytettyjen ja ei-jäädytettyjen näytteiden välillä olivat kartiokokeessa huomattavasti suuremmat kuin CIUC-kolmiaksokeissa, kts. kuvat 22 ja 24. Näytettä häiritäessä jäädytetyn näytteen lujuus pieneni vähemmän kuin ei-jäädytetyn näytteen. Siten näytteiden häiriintymisherkkyys pieneni jäädytyssulatusprosessin seurauksena.

2.7) Jäädyttäminen muutti maan rakennetta siten, että sen vedenläpäisevyys parani ja jäi pysyvästi korkeammaksi käytetyillä jännityksillä (<200 kPa) kuin ei-jäädytetyssä maassa, kuva 31. Tämän seurauksena maahan kehittynyt huokospaine purkautui nopeammin eikä noussut yhtä korkealle kuin ei-jäädytetyssä maassa, kuvat 20 ja 31. Lisäksi jäädytetty maa konsolidoitui huomattavasti nopeammin kuin ei-jäädytetty. Edellisistä havainnoista voidaan päätellä tehokkaan leikkauslujuuden kehittyvän nopeammin jäädytetyssä maassa kuin ei-jäädytetyssä (vrt kaava. (11)).

2.8) Jäädetytyn maan leikkautuminen tapahtui tiiviin maan tavoin. Vastaavasti ei-jäädetytyn maan leikkautuminen tapahtui löyhän maan tavoin, kuva 25.

2.9) Laboratoriokokeissa jäätyminen tapahtui ilman konsolidatiopainetta. Näin ollen tiivistyminen jäädytyksen aikana oli pienempää kuin jos jäädytys olisi tehty paineen alaisuudessa, mikä vastaisi paremmin luonnonolosuhteita. Siten laboratoriossa saadut leikkauslujuusarvot ovat varmalla puolella.

2.10) N.Ogata et al. 1985 ja I.Vähäaho et al. 1989 /16/, /18/ tutkimustuloksissa voidaan havaita samansuuntaisia muutoksia maan leikkauslujuudessa. Toisin sanoen sulamiskonsolidaation jälkeen maan leikkauslujuus voi olla suurempi kuin ei-jäädetytyn maan leikkauslujuus.

3) Kokoonpuristuvuusominaisuudet ja vedenläpäisevyys

3.1) Konsolidointinopeus kasvoi jäädytetyssä maassa, kuva 26. Leikkaus voitiin nopeimmillaan suorittaa jäädytetyssä maassa yhden vuorokauden kuluttua konsolidoinnista, kun ei-jäädytetyssä maassa se voitiin tehdä yleensä vasta neljän vuorokauden kuluttua.

3.2) Jäädyttämisen seurauksena maan sekanttimoduuli pieneni käytettäessä kokoonpuristamiseen pieniä jännityksiä. Lisättäessä kuormaa, kasvoi jäädytetytyn maan sekanttimoduuli huomattavasti suuremmaksi kuin ei-jäädytetytyn maan, kuva 29. Siten jäädytetty maa kokoonpuristui paremmin pienillä jännityksen arvoilla kuin ei-jäädytetty maa. Lisättäessä jännitystä jäädytetytyn maan kokoonpuristuminen hidastui oleellisesti ei-jäädytetytyn maan kokoonpuristuessa edelleen.

3.3) Maan vedenläpäisevyys kasvoi jäädyttämisen seurauksena, kuva 31. Maan vedenläpäisevyys oli suurinta pieniä paineita käytettäessä. Vedenläpäisevyys pysyi jäädytetyssä maassa koko kokeen ajan suurempana kuormitusta lisättäessä. Käytetty maksimikuorma oli 200 kPa.

4) Jäätymissulamis-prosessin aiheuttamat muutokset ovat sitä voimakkaampia mitä liejuisempi maa on. Tämä johtuu luultavasti siitä, että liejuisemmassa maassa alkuvesipitoisuus on suurempi kuin vähäliejuisessa maassa.

5) Kohdasta 1) voidaan päätellä, että käytettäessä ruoppausmaita kasvien kasvualustana maan kasvuominaisuudet todennäköisesti paranevat jäätymissulamisprosessin vaikutuksesta . Toisin sanoen jäädytetyn maan huokoisuus on suurempi ja vedenläpäisevyys parempi sekä vesipitoisuus pienempi kuin ei-jäädytetyn maan.

7. TULOSTEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN

Jotta sulamiskonsolidaatio olisi mahdollista, tulee seuraavat ehdot täyttyä:

- 1) Maan tulee jäätyä.
- 2) Sulamisen aikana vapautuvalla vedellä tulee olla vapaa poispääsy maasta.

Talven aikana jäätyvän maakerroksen paksuus voidaan likimääräisesti arvioida talonrakennuksen routasuojausohjeiden mukaan (H.Kivikoski et al. 1987) /7/. Ohjeiden mukaan saadaan esim. Helsingissä lumettomalle maalle kerran kahdessa vuodessa esiintyväksi routasyvyudeksi n. 1,0 m, liite 5.

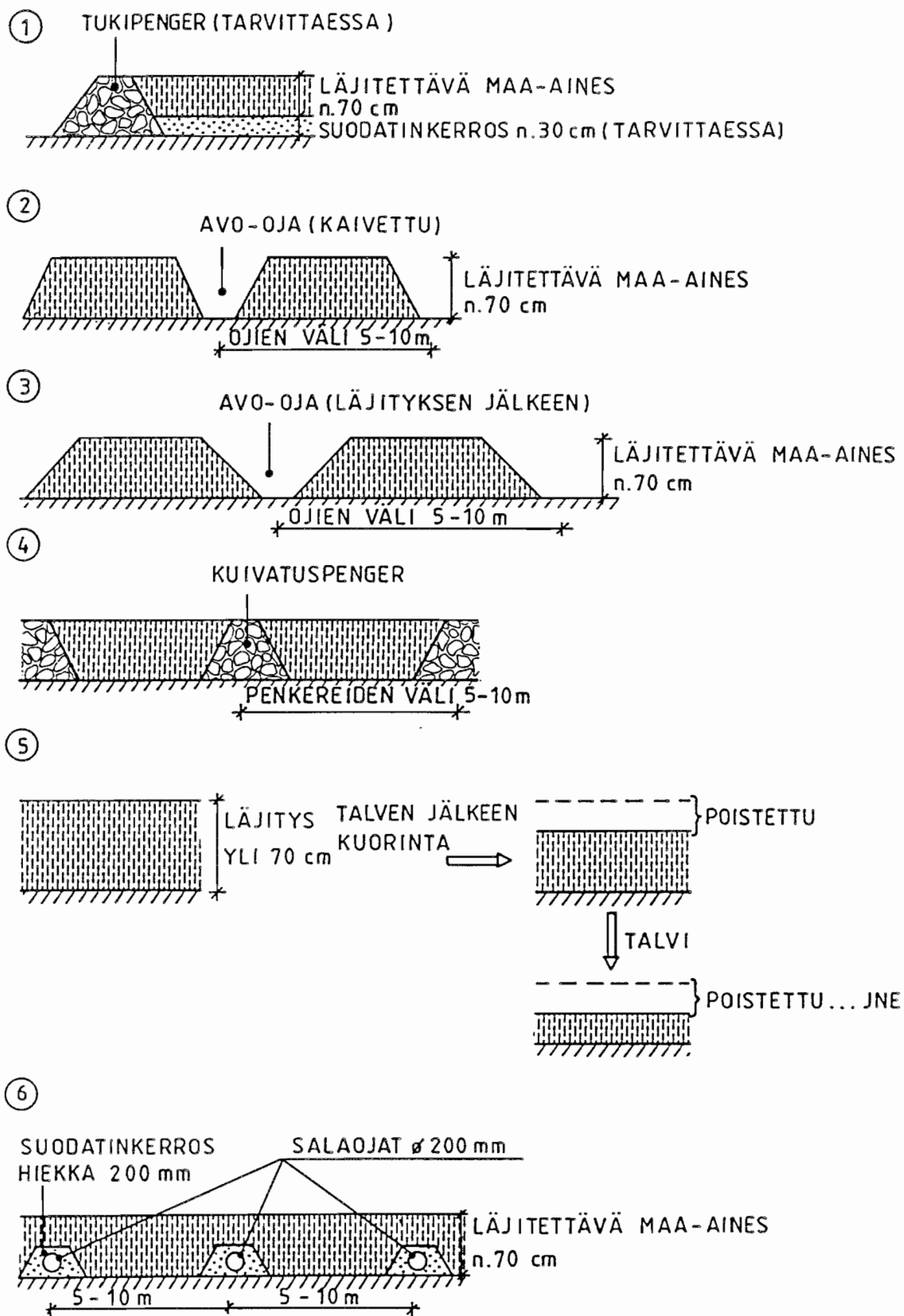
Veden poistamiseksi maasta, voidaan läjitys suorittaa joko vettä hyvin johtavien maa-ainesten päälle tai rakentaa läjitysaltaaseen kuivatusjärjestelmä. Läjitys voidaan tehdä esim. seuraavilla vaihtoehtoisilla tavoilla:

- 1) Läjitetään maa noin 0.7 m paksuiseksi kerrokseksi, hyvin vettä johtavan kerroksen päälle (esim. hiekkamaa tai rakennettu salaojakerros, esim. 0.3 m hiekkaa). Läjitysalue ympäröidään tarpeen vaatiessa tukipenkereellä.
- 2) Läjitetään maa n. 0.7 m paksuiseksi kerrokseksi. Tehdään avo-ojat esim. 5 m välein.
- 3) Suoritetaan maan läjittäminen nauhamaisesti niin, että nauhojen väliin jää avo-ojat.
- 4) Rakennetaan läjitysalueelle penkereitä, jotka toimivat kuivatusjärjestelmänä. Penkereet rakennetaan n. 5 m välein ja ruoppausmassat läjitetään penkereiden väliin n. 0.7 m kerrospaksuutta käyttäen.
- 5) Läjitetään yli 0.7 m paksuisesti. Talven jälkeen kuoritaan stabiloitunut päällyskerros (kuorintapaksuus voi olla korkeintaan

sellainen paksuus, jolloin koneella voidaan vielä liikkua maa-aineksen päällä).

6) Rakennetaan läjitysalueelle salaojaputkista kuivatusjärjestelmä. Putkien välisenä etäisyytenä voitaisiin käyttää 5-10 m.

Kuvassa 34 on esitetty periaatekuvat erilaisille läjitysvaihtoehdoille.



Kuva 34. Esimerkkejä eri läjitysvaihtoehdoista.

LÄHDELUETTELO

/1/ Andersson, D. M., Frost heave properties of soils, Frost in Geotechnical Engineering, volume 1, Int. symposium, Saariselkä, VTT Finland 1989, s. 105-114

/2/ Chamberlain, E. J., Sellmann, P.V., Blouin, S.E., Hopkins, D.M. and Lewellen, R.I., Engineering properties of subsea permafrost in the Prudhoe Bay region of the Beaufort Sea. Proc. 3rd Int. Conf. Permafrost Edmonton, Alta, s. 629-635

/3/ Chamberlain, E. J. ja Blouin, S. E., 1978. Densification by freezing and thawing of fine material dredged from waterways. Proc. 3rd Int. Conf. Permafrost Edmonton, Alta, s. 623-628.

/4/ Czurda, K. A. & Schababerle, Influence of freezing and thawing on the physical and chemical properties on swelling clays, 5th int symposium on Ground Freezing, Balkema Rotterdam 1988, s. 54-56

/5/ Jumikis, A. R., Soil mechanics, D. von Nostrand company (Canada), LTD. 1962, s. 197, 220, 504.

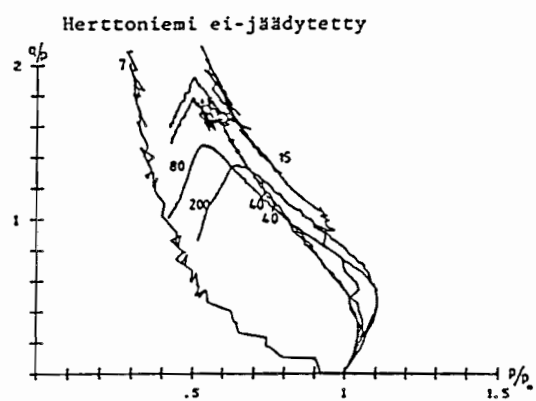
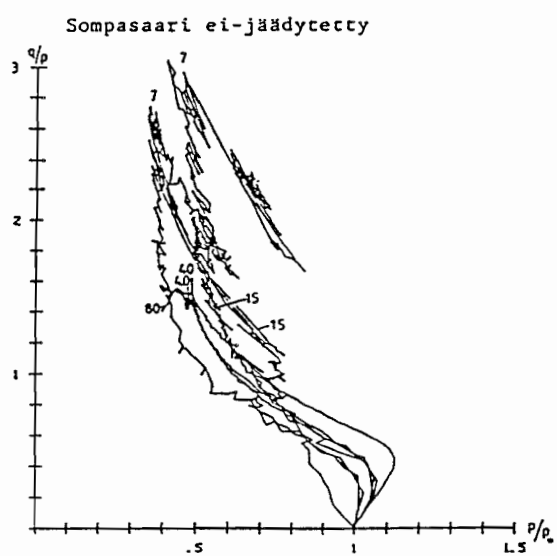
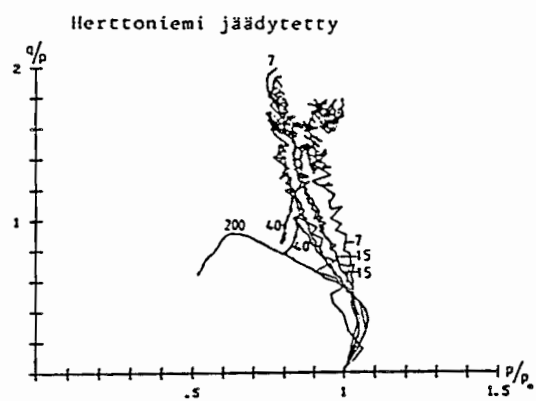
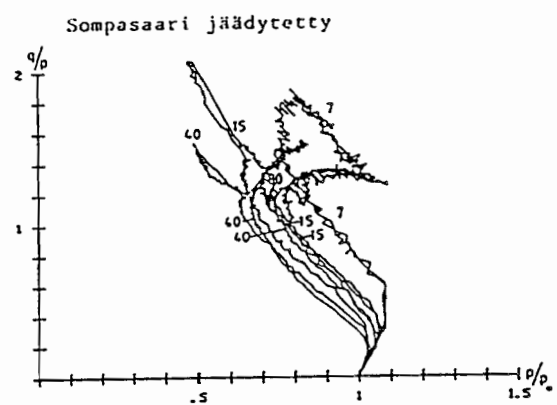
/6/ Kankare, E. Maanrakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita, Osa IV, Luku: Geoteknillinen teoria (1.1...1.4), TVH 1970, s. 10, 12.

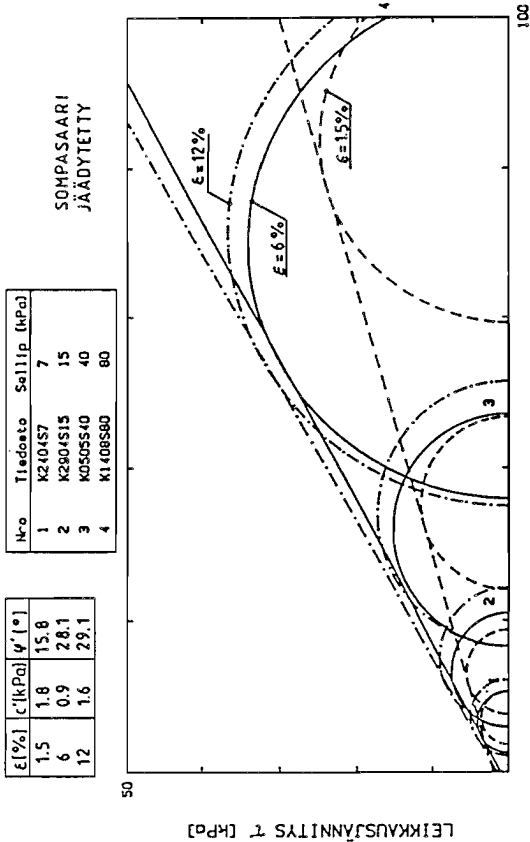
/7/ Kivikoski, H., Saarelainen, S. ja Mäkelä, H. Talonrakennuksen routasuojausohjeet, VTT geotekniikan laboratorio ja Rakentajain kustannus Oy, Mänttä 1987, s. 14-16, 32-34.

/8/ Konrad, J.-M. & Morgenstern, N. R., A mechanistic theory of ice lens formation in finegrained soils, Con, Geotech. J., Vol 7, No 4. 1980, s. 473-486.

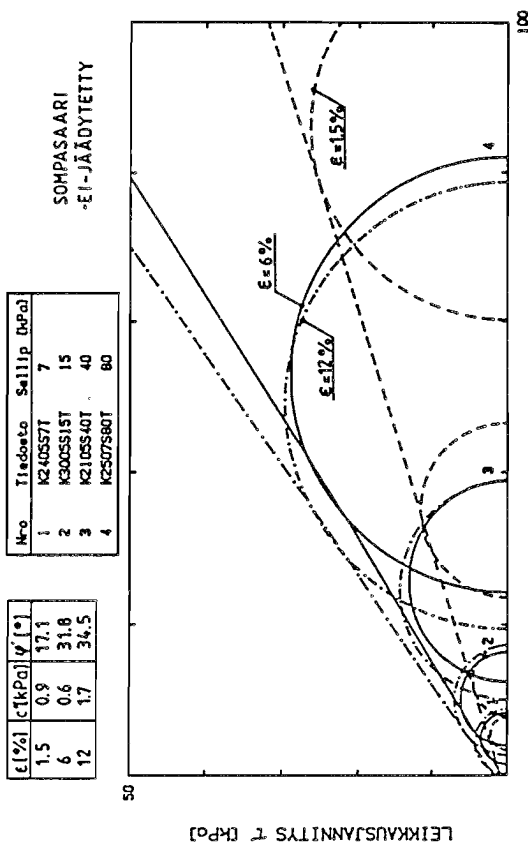
/9/ Korhonen, K.-H., Maamekaniikka I, Otaniemi 1989, 45 s.

- /10/ Korhonen, K-H.** Geomekaniikka 1, Luku: Muodonmuutosominaisuudet, RIL 157, 1985, s. 282-290
- /11/ Korhonen, K-H., Gardenmeister, R, Jääskeläinen, H., Leskelä, A. ja Tammirinne, M.** Maanrakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita, Osa II, Luku: Maalaboratoriotutkimukset, TVH 1973, s. 1-74.
- /12/ Kurilka, A. S., Koavtsova, O. N., Stepanov, A. V., Tinofeev, A. M.,** The effect of freezing-thawing cycles on mass transfer and thermal characteristics, Frost in Geotechnical Engineering, volume 1, Int. symposium, Saariselkä, VTT Finland 1989, s. 311-321
- /13/ Laaksonen, R., Lojander, M.,** Geomekaniikka 2 (käsikirjoitus), Luku 12: Plastisuusteoria maamekaniikassa, RIL 1989
- /14/ Ladanyi, B., Shen, M.,** Mechanics of freezing and thawing in soils, Frost in Geotechnical Engineering, volume 1, Int. symposium, Saariselkä, VTT Finland 1989, s. 75-77.
- /15/ Lojander, M.** Geomekaniikka 1, Luku: Geostaatiset jännitykset, RIL 157, 1985, s.255
- /16/ Ogata, N., Kataoka, T. and Komiya, A.,** Effect of freezing-thawing on the mechanical properties of soil Fourth International Symposium on ground Freezing, Sapporo 1985, s. 201-207
- /17/ Rantamäki, M., Jääskeläinen, R., Tammirinne, M.,** Geotekniikka 464, Otakustantamo 1979, s. 48, 101, 107, 113, 123-128.
- /18/ Vähäaho, I. & Ryhänen, H.,** Sulamiskonsolidaation vaikutukset savessa, Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekninen osasto, Tiedote 50, 1989, 124 s.

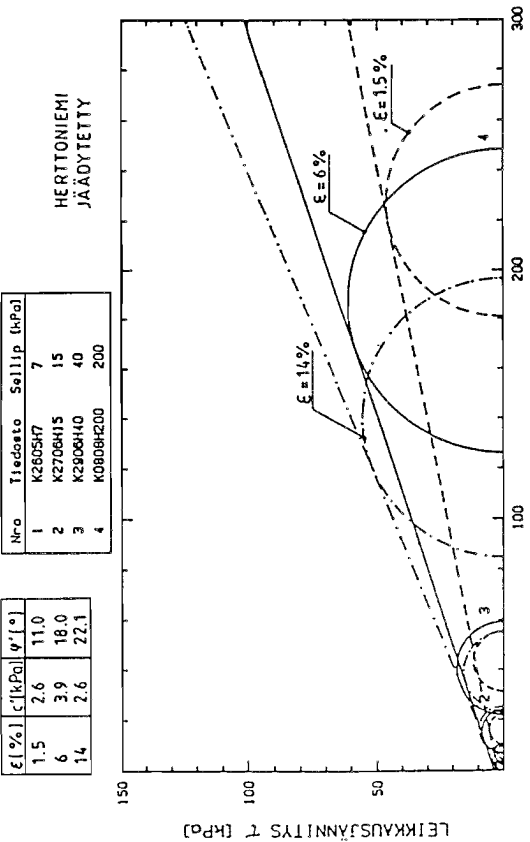




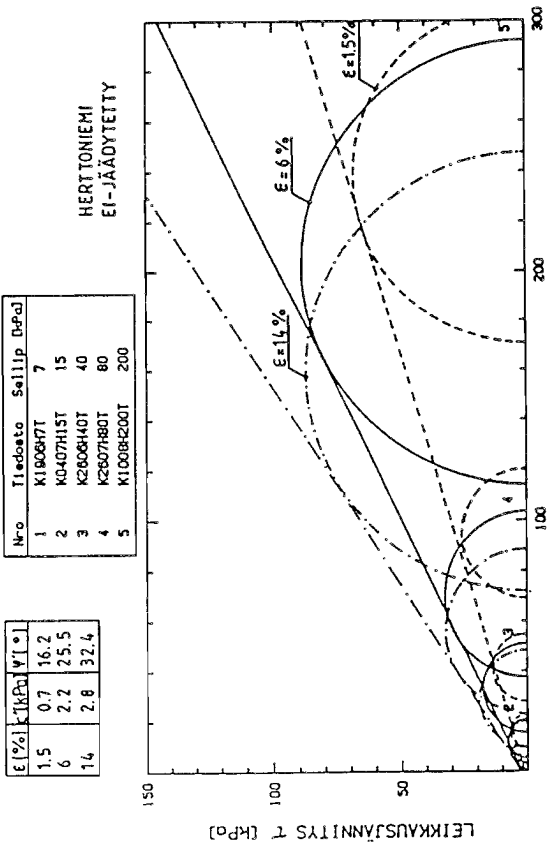
NORMAALIJÄNNITYS σ' [kPa]



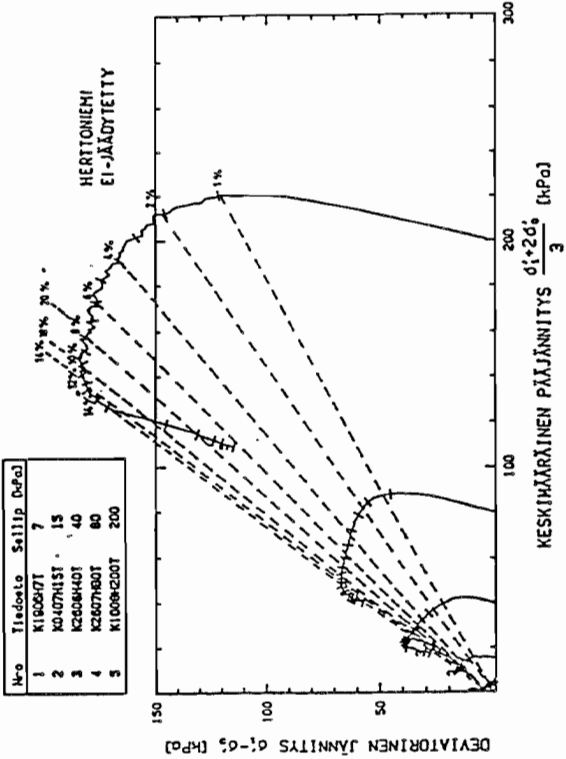
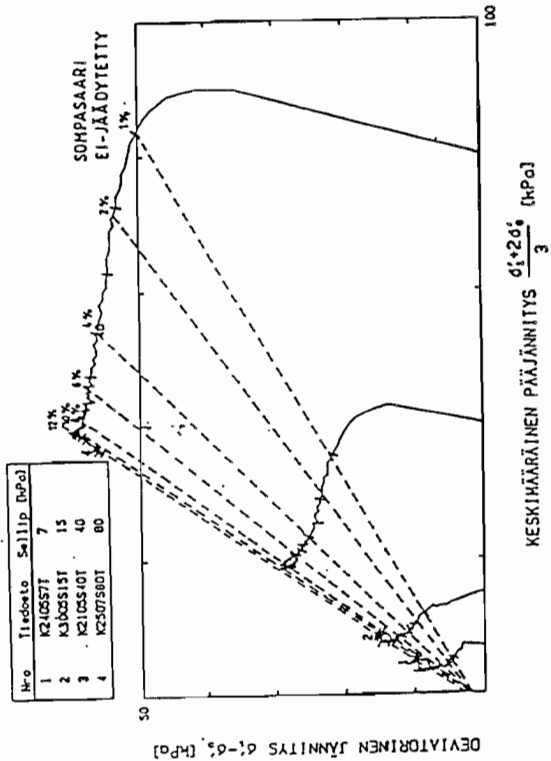
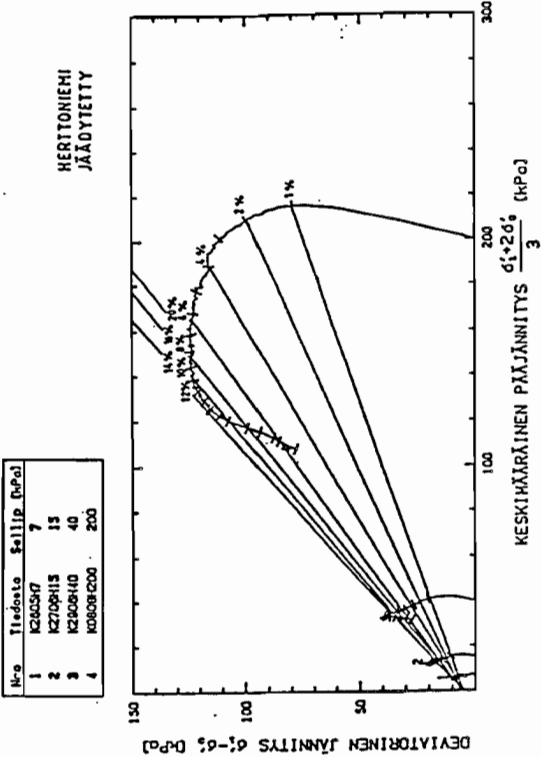
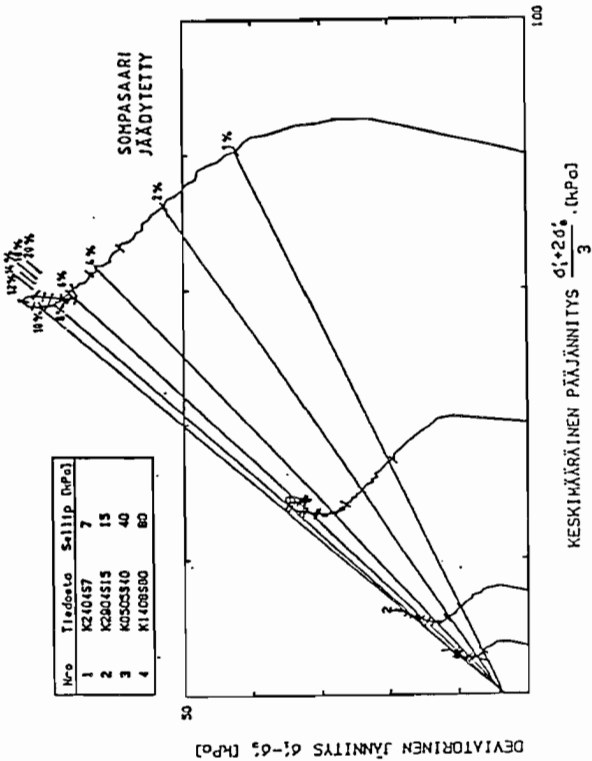
NORMAALIJÄNNITYS σ' [kPa]

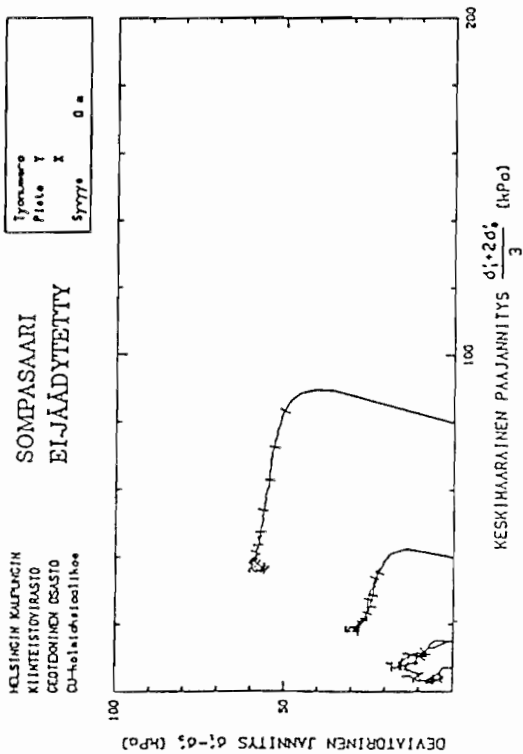
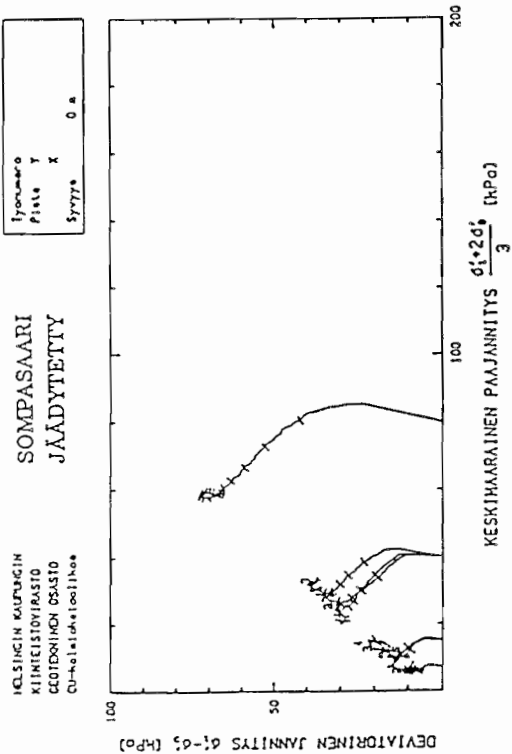
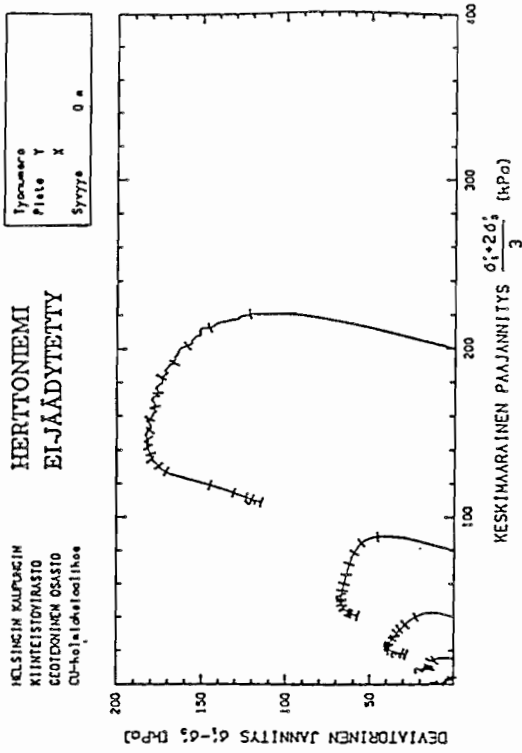
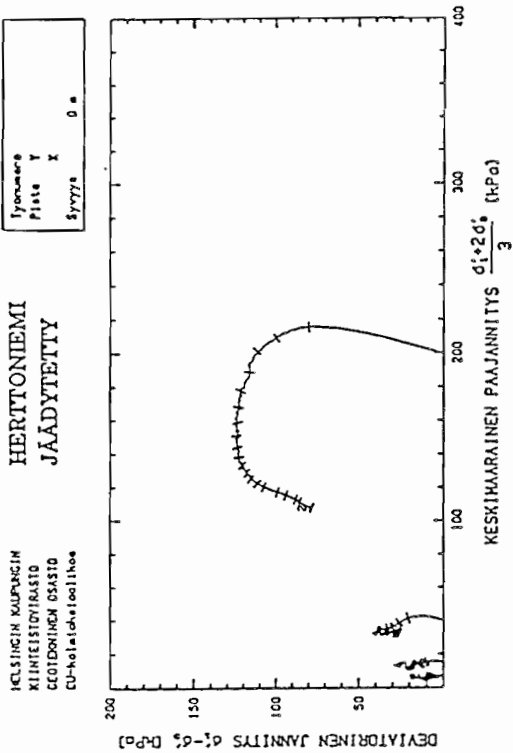


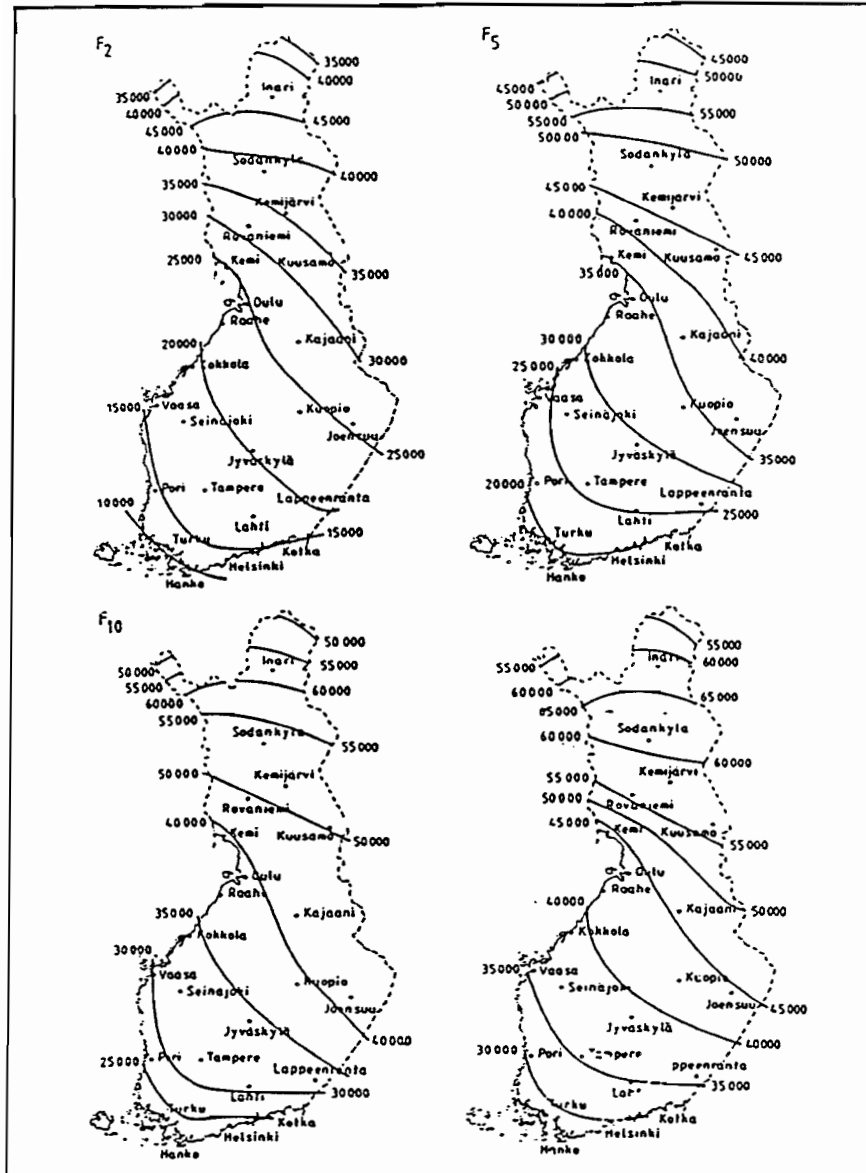
NORMAALIJÄNNITYS σ' [kPa]



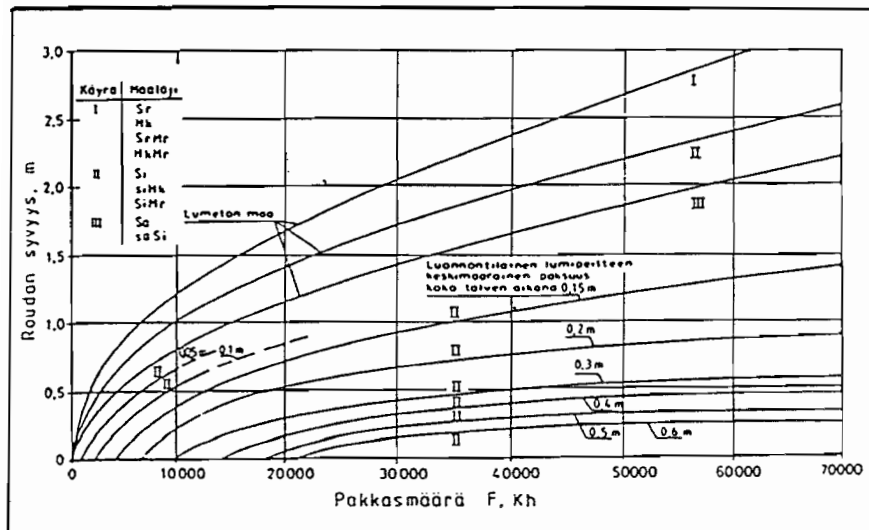
NORMAALIJÄNNITYS σ' [kPa]







- a) kerran 2 vuodessa toistuva pakkasmäärä F_2 , Kh
 b) kerran 5 vuodessa toistuva pakkasmäärä F_5 , Kh
 c) kerran 10 vuodessa toistuva pakkasmäärä F_{10} , Kh
 d) kerran 20 vuodessa toistuva pakkasmäärä F_{20} , Kh



Pakkasmäärän ja lumikerroksen paksuuden vaikutus roudan syvyyteen

23.1.90

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

Hinnat:	1 kpl	80 mk
	2-3 kpl	70 mk
	4-6 kpl	60 mk
	7- kpl	55 mk

*) painos loppuunmyyty