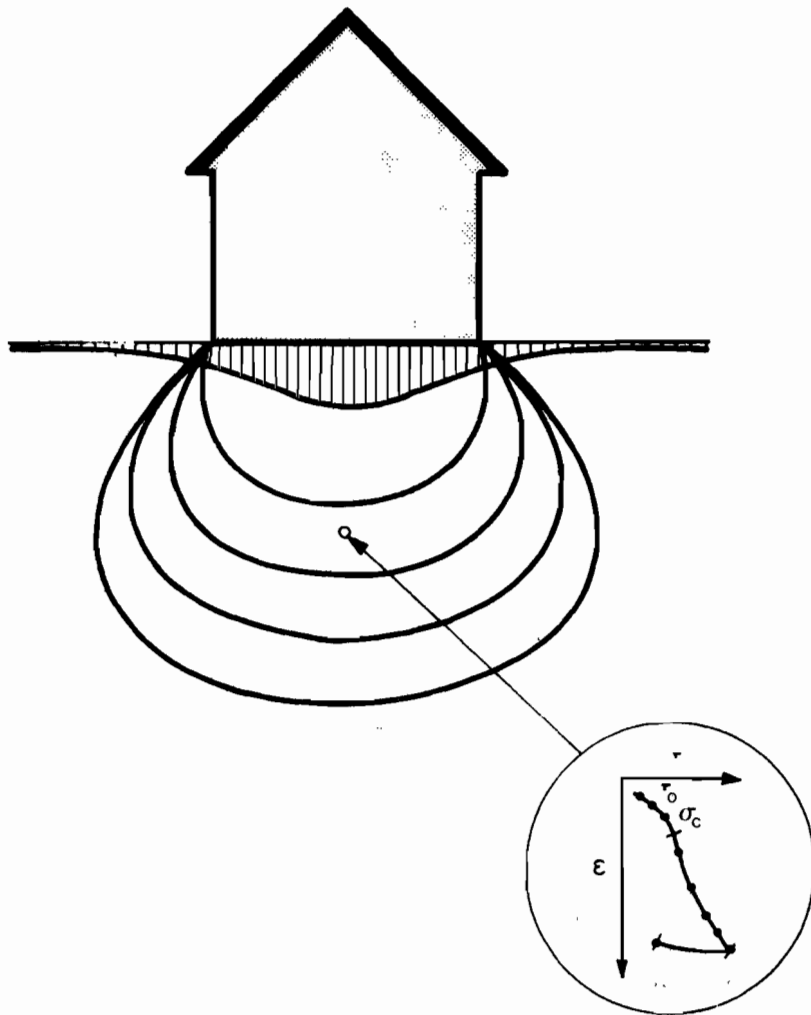


HELSINGIN KAUPUNGIN
GEOTEKNILLINEN TOIMISTO



Ilkka Vähäaho

**PEHMEIKÖLLE PERUS-
TETTAVAN PIENTALON
PAINUMIEN LASKEMINEN**

Geoteknillisen toimiston
tiedote 14 1.6.1979

Ilkka Vähäaho

P E H M E I K Ö L L E P E R U S T E T T A V A N P I E N -
T A L O N P A I N U M I E N L A S K E M I N E N

Geoteknillisen toimiston tiedote 14

Helsinki, 1.6.1979.

ALKULAUSE

Rakennuksen perustustavan valinta alkaa perustuskuormien aiheuttamien ja rakenteiden sietämien painumien yhteensovittamisesta, kuten keväällä 1979 ilmestyneet Pohjarakennusohjeetkin (RIL 121) edellyttävät. Geoteknilliseltä suunnittelijalta kysytään usein voidaanko rakennus perustaa maan varaan ja siten välttää paalutus. Vaikkakaan paalutuksessa säästäminen ei välttämättä ole viisainta säästämistä, on geoteknillisen suunnittelijan kuitenkin perusteltava kantansa teknisillä ja taloudellisilla tosiasioilla eikä mielipiteillä.

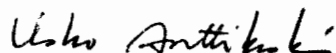
Jos suoraan maan varaan perustaminen antaa liian suuret painumat, tulisi ennen paalutusvaihtoehtoa vielä tutkia mahdollisuuksia maapohjan esikuormittamiseksi tai vahvistamiseksi esimerkiksi kalkkipilareilla. Nämä teknisesti käyttökelpoiset menetelmät edellyttävät pitkäjänteistä suunnittelua, jotta niiden toteutukseen jäisi riittävästi aikaa ja rahoitus pohjan rakentamiseen voitaisiin järjestää ennen varsinaisen rakennustoiminnan aloittamista.

Tällä tutkimuksella pyritään kehittämään geoteknillistä mitoitusta esittämällä menettelytavat painumalaskelmien suorittamiseksi pientalojen maanvaraisia perustamistapoja käytettäessä. Maanvaraiseen perustamiseen sisällytetään myöskin perustaminen esikuormitetun tai vahvistetun maan varaan. Tutkimus käsittää siten perusteista lähtien maanvaraisesti pehmeikölle perustettavien pientalojen geoteknillisen mitoituksen keskeiset kysymykset.

Tutkimus perustuu DI Ilkka Vähäahon diplomityöhön, joka on tehty geoteknillisessä toimistossa tekn.tri Jorma Hartikaisen valvonnassa. Asuntotuotantotoimisto on osallistunut geoteknillisen toimiston lisäksi tutkimuksen rahoitukseen.

Helsingissä 30.6.1979

Geoteknillinen asiantuntija



Usko Anttikoski

SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
MERKINNÄT	IV-VI
1. JOHDANTO	1
2. JÄNNITYKSEN JAKAUTUMINEN MAAPOHJASSA	3
2.1 <u>Likimääräinen menetelmä</u>	3
2.2 <u>Boussinesq'in menetelmä</u>	5
2.3 <u>Boussinesq'in menetelmän ja 2:1-menetelmän ver-</u> <u>tailu</u>	8
3. PAINUMIEN LASKEMINEN	11
3.1 <u>Tangenttimoduulimenetelmä</u>	11
3.11 Tangenttimoduuli	11
3.12 Kokoonpuristuvuusfunktiot	12
3.13 Kokoonpuristuvuusfunktiot normaali- ja ylikonso-	
lidoituneella alueella	14
3.14 Maan kuormitus-kokoonpuristumakäyrän matemaat-	
tinen ratkaisu	17
3.141 Normaalikonsolidoituneen alueen parametrien mää-	
rittäminen	17
3.142 Ylikonsolidoituneen alueen parametrien määrittä-	
minen	20
3.143 Konsolidaatiojännityksen määrittäminen	21
3.1431 Kotziaksen menetelmä	21
3.1432 Korrelaatioteorian pohjalta kehitetty mene-	
telmä sellaisia ödometrikokeita varten,	
joissa kuormituslisäysten suuruus on mie-	
livaltainen	26
3.2 <u>Sekanttimoduulimenetelmä</u>	30
3.3 <u>Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä</u>	32
3.4 <u>Kalkkipilarien huomioon ottaminen painumissa</u> ..	36
3.41 Kalkkipilarien toimintatapa	36
3.42 Kuormituksen jakautuminen maalle ja kalkkipila-	
reille	37
3.43 Kalkkipilarien kuormitusten laskeminen	38
3.44 Kriittinen kuormitus	40
3.45 Painumien laskeminen ja tasoittaminen	42

	sivu
4.	TIETOKONESOVELLUTUS PAINUMIEN LASKEMISEKSI 45
4.1	<u>Kuormitus-kokoonpuristumakäyrän ratkaisemi-</u> <u>seksi laadittu ohjelma</u> 45
4.11	Ohjelman yleiskuvaus 45
4.12	Ohjelman toimintaperiaatteet 45
4.13	Yleisohjeet käyttäjälle 48
4.2	<u>Painumien laskemiseksi laadittu ohjelma</u> 50
4.21	Ohjelman yleiskuvaus 50
4.22	Ohjelman toimintaperiaatteet 50
4.23	Yleisohjeet käyttäjälle 54
4.3	<u>Laskentaesimerkkejä</u> 60
4.31	Kuormitus-kokoonpuristumakäyrä 60
4.32	Painumien laskeminen 64
4.33	Maapohjan vahvistaminen ylipengermenetelmää käyttämällä 68
4.34	Maapohjan vahvistaminen kalkkipilarimenetelmäl- mää käyttämällä 69
5.	KOKEMUKSIA PAINUMISTA ERÄIDEN PERUSTAMISTAPOJEN YHTEYDESSÄ 72
5.1	<u>Perustaminen pehmeikölle ilman maapohjan vah-</u> <u>vistamista</u> 72
5.11	Esimerkkikohteen pohjasuhteet ja perustamista- pa 72
5.12	Laskelmat 72
5.13	Mittaukset 74
5.14	Laskettujen ja havaittujen painumien suhde .. 76
5.2	<u>Ylipengermenetelmä</u> 77
5.21	Esimerkkikohteen pohjasuhteet ja perustamista- pa..... 77
5.22	Laskelmat 79
5.23	Mittaukset 80
5.24	Laskettujen ja havaittujen painumien suhde .. 82
5.3	<u>Kalkkipilarimenetelmä</u> 83
5.31	Esimerkkikohteen pohjasuhteet ja perustamista- pa 83
5.32	Laskelmat 85

	sivu
5.33	Mittaukset 87
5.34	Laskettujen ja havaittujen painumien suhde 87
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET 90
6.1	<u>Maanvaraisten perustusten suunnitteluperus-</u> <u>teista</u> 90
6.2	<u>Painumien laskentamenetelmät</u> 90
6.3	<u>Kalkkipilareilla stabiloidun maapohjan painu-</u> <u>mien laskenta</u> 91
6.4	<u>Maanvaraisen perustamisen suunnittelusta</u> .. 92
6.5	<u>Kalkkipilarimenetelmän taloudellisuudesta</u> 94
7.	YHTEENVETO 95
	ENGLISH SUMMARY 96
	KIRJALLISUUSLUETTELO 97
	LIITTEET

IV.

MERKINNÄT

A'	poikkileikkauspinta-ala (m^2)
A_m	maan pinta-ala poikkileikkauksessa (m^2)
A_p	kalkkipilarien pinta-ala poikkileikkauksessa (m^2)
A_z	pinta-ala syvyydessä z (m^2)
a	pilarisuhde A_p/A'
a_{kr}	kriittinen pilarisuhde
B	taipuisan laatan leveys (m)
C	vakio
C_2	vakio
C_I	vakio
C_{II}	vakio
C_c	kokoonpuristuvuusindeksi
E	kimmokerroin (kPa)
E_i	sekanttimoduuli $i = 1 \dots n$ (kPa)
E_k	korotettu kimmokerroin (kPa)
E_p	kalkkipilarien kimmokerroin (kPa)
e_o	alkuperäinen luonnollinen huokosluku
F	funktio
k_1	suoran 1 kulmakerroin
k_2	suoran 2 kulmakerroin
L	taipuisan laatan pituus (m)
M	maan kokoonpuristuvuusmoduuli (kPa)
M_t	tangenttimoduuli
m	normaalikonsolidoituneen osan moduuliluku
m_2	ylikonsolidoituneen osan moduuliluku
m_I	käyrän I moduuliluku
m_{II}	käyrän II moduuliluku
n	paineenkeskityskerroin
n_1	suoran 1 tai käyrän I havaintopisteiden lukumäärä
n_2	suoran 2 tai käyrän II havaintopisteiden lukumäärä
P	pistekuorma (kN)
p	jännitys jaettuna vertailujännityksellä
Q_p	pilarikuorma (kN)
q	tasainen kuormitus (kPa)
q_1	suoran 1 leikkauspiste ε_σ - akselilla

q_2	suoran 2 leikkauspiste ε_σ -akselilla
q_{kr}	kriittinen kuormitus (kPa)
r	korrelaatiokerroin
r_1	suoran 1 tai käyrän I korrelaatiokerroin
r_2	suoran 2 tai käyrän II korrelaatiokerroin
r_{kok}	kokonaiskorrelaatiokerroin
t	taipuisan laatan leveys jatkettuna tarkasteltavan pisteen etäisyydellä maanpinnasta
u	taipuisan laatan pituus jaettuna tarkasteltavan pisteen etäisyydellä maanpinnasta
w	vesipitoisuus (%/100)
z	syvyys maanpinnasta (m)
α	kulma
β	normaalikonsolidoituneen osan jännityseksponentti
β_2	yliekonsolidoituneen osan jännityseksponentti; yleensä oletetaan $\beta_2 = 0$
β_I	käyrän I jännityseksponentti
β_{II}	käyrän II jännityseksponentti
γ_s	ominaispaino (kN/m^3)
γ_w	huokosveden tilavuuspaino (kN/m^3)
Δe	huokosluvun muutos
$\Delta \varepsilon$	suhteellisen kokoonpuristuman muutos (%/100)
$\Delta \varepsilon_1$	suhteellisen kokoonpuristuman muutos normaalikonsolidoituneella alueella (%/100)
$\Delta \varepsilon_2$	suhteellisen kokoonpuristuman muutos yliekonsolidoituneella alueella (%/100)
$\Delta \sigma_z$	pystysuora lisäjännitys (kPa)
ε	suhteellinen kokoonpuristuma (%/100)
$\hat{\varepsilon}$	havaittu kokoonpuristuman arvo
$\bar{\varepsilon}$	havaittujen kokoonpuristuman arvojen keskiarvo
ε_c	konsolidaatiojännitystä (σ_c) vastaava kokoonpuristuman arvo
ε_{est}	laskettu kokoonpuristuman arvo
ε_σ	kokoonpuristuma jännityksellä σ
$\varepsilon_{2\sigma}$	kokoonpuristuma jännityksellä 2σ

VI.

Σ	neliösumma
σ	jännitys (kPa)
σ_o	yläpuolella olevien maamassojen paino (kPa)
σ_1	jännitys ennen kuormituslisäystä (kPa)
σ_2	jännitys kuormituslisäyksen jälkeen (kPa)
σ_c	konsolidaatiojännitys (kPa)
σ_m	jännitys maassa (kPa)
σ_p	jännitys kalkkipilarissa (kPa)
σ_v	vertailujännitys = 100 kPa
σ_y	kalkkipilarien myötöjännitys (kPa)
σ_{yl}	ylipengerkuorma (kPa)
σ_z	kuormitus syvyydessä z (kPa)
\emptyset	halkaisija (m)

1. JOHDANTO

Tärkein maanvaraisten perustusten geoteknisessä suunnittelussa huomioon otettava seikka on maapohjan kokoonpuristumisesta johtuva rakenteiden painuminen. Tämä aiheuttaa vaikeuksia etenkin pehmeiköillä. Pientalotuotannon osuuden kasvaessa ja rakentamisen sijoittuessa, etenkin rannikkoalueella, yhä enemmän heikosti kantaville maapohjille kohdistuu kehittämistarve pientalon painumien laskemiseen. Tämä on tärkeää toisaalta siksi, ettei turhaan käytettäisi maanvaraista perustamistapaa kalliimpaa paaluilla perustamista, ja toisaalta ennen kaikkea siksi, etteivät painumat muodostuisi haitallisiksi, jos ei niitä ole osattu ottaa huomioon rakenteiden suunnittelussa. Perustusten korjaaminen jälkeen päin on tunnetusti kalliimpaa kuin niiden tekeminen kerralla kunnollisiksi asiallisten pohjarakennussuunnitelmien mukaan.

Pientalon kuormituksen aiheuttamista painumista muodostavat konsolidaatiopainumat yleensä merkittävimmän osan. Tässä työssä onkin keskitytty konsolidaatiopainumien laskentamenetelmien tarkentamiseen. Painumien riippuvuutta ajasta ei ole sisällytetty tämän työn aihepiiriin. Kehitettävät menetelmät perustuvat kuormitus-kokoonpuristumafunktion määrittämiseen ödometrikokeen perusteella tai likimääräiseen ratkaisemiseen näytteen vesipitoisuuden perusteella. Tässä esityksessä käsitellään lähinnä laaja-alaisia laattaperustuksia, joiden painumia yksiaksiaaliseen konsolidaatioon perustuvan ödometrikokeen voidaan olettaa kuvaavan riittävän tarkasti.

Painumien laskemisessa on lukuisia joukko tekijöitä, jotka on otettava huomioon. Näistä käsinlaskennan kannalta hankalimpia ovat kuormitus-kokoonpuristumakäyrän määrittäminen, monimutkaisen kuormituskaavion vaikutusten laskeminen eri pisteissä sekä luonnollisen maapohjan kolmiulotteisuuden ja kerroksellisuuden

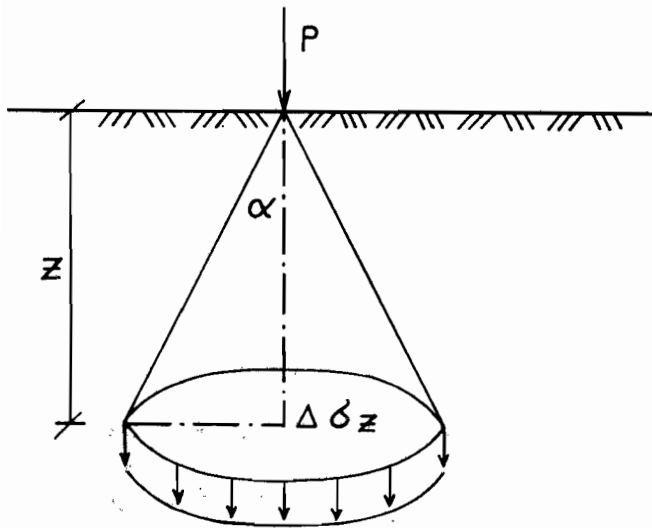
2.

huomioon ottaminen. Edellä luetellut seikat ovat lisäksi sellaisia, että niitä liiaksi yksinkertaistamalla menetetään myös laskelmien tarkkuus. Tämän vuoksi on kehitettävät menetelmät saatettu ohjelmoitavaan matemaattiseen muotoon. Sen jälkeen on laadittu tietokoneohjelmat, joiden avulla painumat voidaan ratkaista tekemättä liiaksi yksinkertaistuksia.

2. JÄNNITYKSEN JAKAUTUMINEN MAAPOHJASSA

2.1 Likimääräinen menetelmä

Pistekuorman tai tasaisen kuorman aiheuttama pystysuora lisäjännitys voidaan likimääräisesti arvioida otaksumalla paineen leviävän sivulle päin suoraviivaisesti tietyssä kulmassa (kuva 1). Tällöin pistekuorman alapuolelle syntyy kartio, jonka si-



Kuva 1. Paineen jakautuminen pistekuorman alapuolella.

säpuolella jännitys pienee kartion pohjan pinta-alan kasvaessa. Jännitys $\Delta\sigma_z$ on näin ollen pistekuorman jaettuna kartion pohjan pinta-alalla syvyydessä z:

$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{A_z} = \frac{P}{\pi(z \tan\alpha)^2}$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{\pi z^2 \tan^2\alpha} \quad (1)$$

$\Delta\sigma_z$ = pystysuora lisäjännitys

z = syvyys maanpinnasta

P = pistekuorma

A_z = pinta-ala syvyydessä z

α = kulma

Kulman α oletetaan yleensä olevan välillä $25^\circ - 45^\circ$ maaperästä riippuen. Yleisimmin käytetty α arvo lienee 26.6° , jolloin $\tan\alpha$ on 0.5. Menetelmästä käytetään tällöin nimitystä 2:1-menetelmä.

Tasaisen kuormituksen aiheuttamalle lisäjännitykselle maassa voidaan johtaa vastaava kaava kuin pistekuorman tapauksessa. Mikäli $\tan\alpha = 0.5$ (kuva 2) niin saadaan:

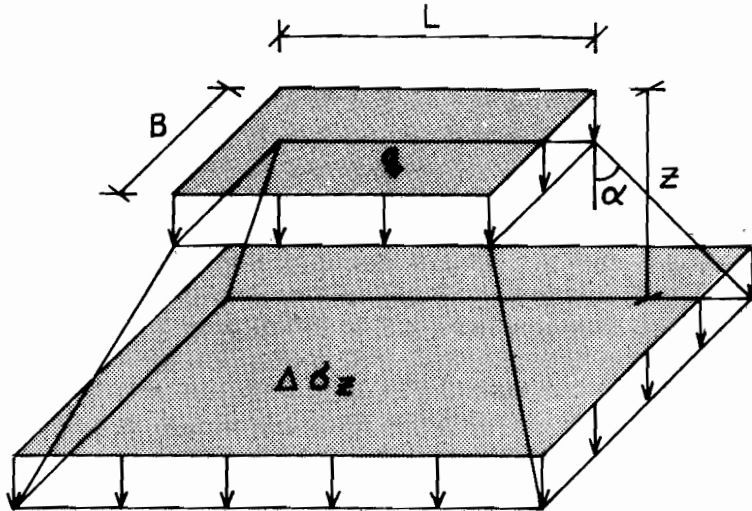
$$\Delta\sigma_z = \frac{q B L}{(B+Z)(L+Z)} \quad (2)$$

q = tasainen kuormitus

B = laatan leveys

L = laatan pituus

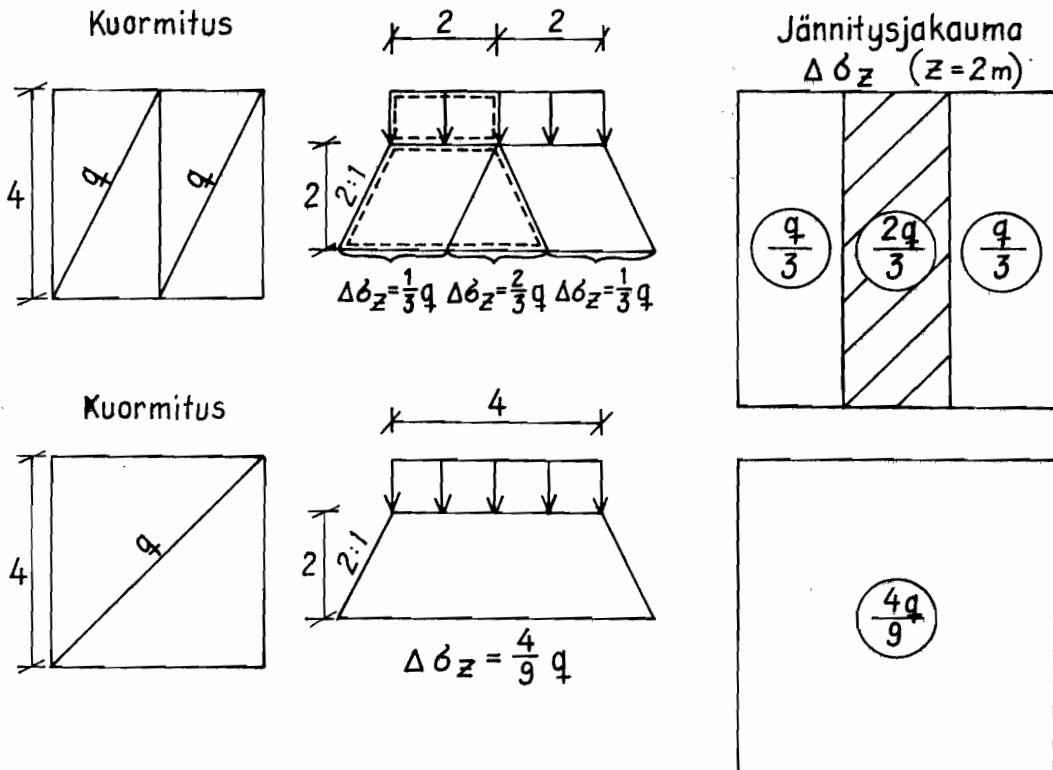
4.



Kuva 2. Paineen jakautuminen 2:1-menetelmassa.

Yksinkertainen 2:1-menetelmä ei sovellu käytettäväksi tietokoneohjelmien pohjana, koska menetelmässä ei toteudu ns. superpositioperiaate.

Seuraava esimerkki valaisee sitä, miksei superpositioperiaate sovellu käytettäväksi 2:1-menetelmässä.



Kuva 3. Jännitys jakauma 2:1-menetelmän mukaan kahdessa periaatteessa samanlaisessa kuormitustapauksessa.

Kuvassa 3 esiintyy kaksi kuormitustapausta, jotka ovat periaatteessa samanlaiset, kuitenkin jännitysjakautuma näissä muodostuu erilaiseksi.

2:1-menetelmällä voidaan laskea ainoastaan sellaisia jännityksiä, jotka aiheutuvat yhdestä tasaisesta kuormasta tai pistekuormasta. Tällöinkin saadaan vain eräänlainen keskimääräinen jännitys, eikä samassa tasossa esiintyvien jännityserojen määrittäminen ole mahdollista.

2.2 Boussinesq'in menetelmä

Tarkemmin jännityksen jakautuminen maapohjassa määritetään usein Boussinesq'in kaavoilla.

Pistekuorman aiheuttama pystysuora lisäjännitys on Boussinesq'in mukaan laskettavissa kaavasta (3a).

$$\Delta\sigma_z = \frac{3 P}{2\pi z^2} \cos^5 \alpha \quad (3a)$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{n P}{2\pi z^2} \cos^{n+2} \alpha \quad (3b)$$

Kaavassa (3a) esiintyvä α ei ole mikään maaperästä riippuva vakio, kuten kaavassa (1), vaan riippuu tarkasteltavan pisteen asemasta pistekuorman nähden. Pistekuorman alapuolella α saa arvon 0° ja kasvaa arvoon 90° saakka siirryttäessä sivulle päin.

Kokeellisesti on havaittu, että jännitykset homogeenisessa maassa yleensä ovat suunnilleen vastanneet Boussinesq'in kaavalla laskettuja arvoja. Epähomogeenisessa maassa on kaava (3a) parempi saattaa Fröhlich'in esittämään muotoon (3b). Paineenkertyskertoimelle n voidaan eri olosuhteissa antaa arvoja, jotka parhaiten vastaavat näissä olosuhteissa kokeellisesti saatuja tuloksia. Kun $n = 3$ on Fröhlich'in kaava identtinen Boussinesq'in kaavan kanssa. Arvo $n = 4$ vastaa maapohjaa, jossa kimmomoduli kasvaa suoraviivaisesti syvyyden kasvaessa $1/3$.

Tasaisesti kuormitetun suorakulmaisen laatan aiheuttama lisä-

6.

jännitys nurkkapisteen alapuolella on Boussinesq'in mukaan:

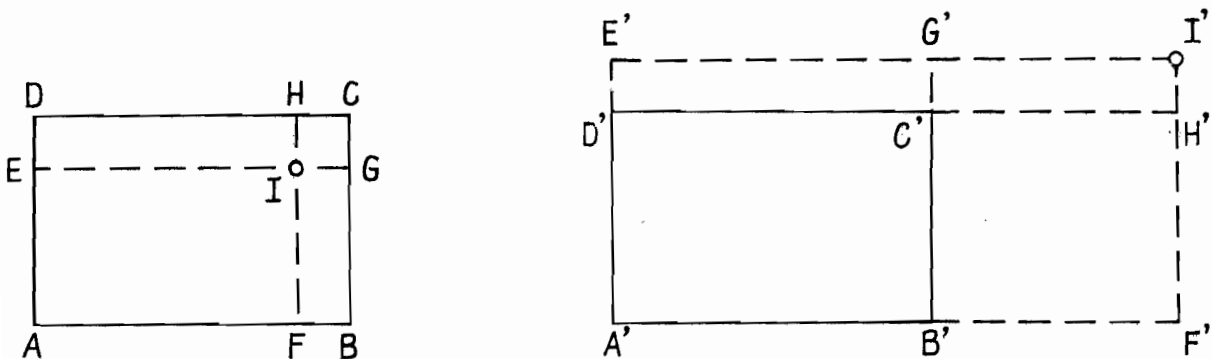
$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{4\pi} \left(\frac{2tu\sqrt{t^2+u^2+1}}{t^2+u^2+1+t^2\cdot u^2} \cdot \frac{t^2+u^2+2}{t^2+u^2+1} + \arcsin \frac{2tu\sqrt{t^2+u^2+1}}{t^2+u^2+1+t^2\cdot u^2} \right) \quad (4)$$

$$t = B/z$$

$$u = L/z$$

Suluissa olevista termeistä jälkimmäinen on kulma ja sen yksikkö on radiaani. Tämä termi on vähemmän kuin $\pi/2$ kun t^2+u^2+1 on suurempi kuin $t^2\cdot u^2$; muuten se on $\pi/2$ ja π välillä /10/.

Kaavasta (4) saadaan lisäjännityksen arvo suorakaiteen muotoisen laatan nurkkapisteen alapuolella, mutta koska kaavaa voidaan soveltaa myös usean yhtäaikaisen kuormituksen tapauksessa, voidaan jännitys määrittää mielivaltaisen pisteen alapuolella ns. superpositiomenetelmää noudattamalla (kuva 4).

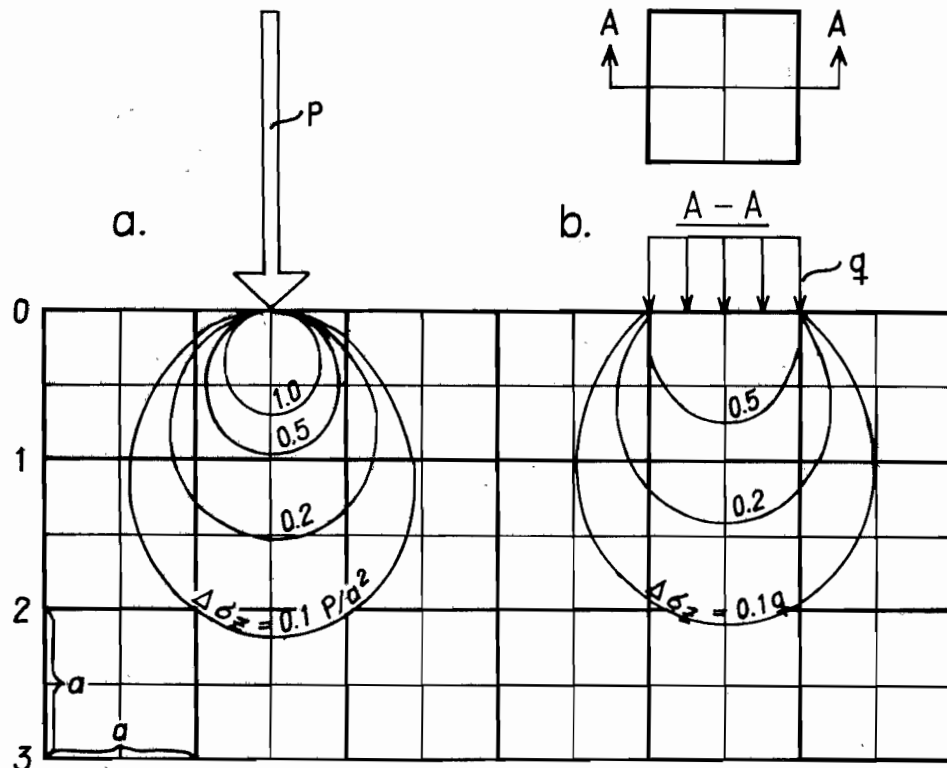


Kuva 4. Mielivaltaisen pisteen alapuolella vaikuttavan pystysuoran jännityksen määrittäminen nurkkapisteen jännityksen perusteella.

Tasaisen kuorman aiheuttama jännitys $\Delta\sigma_z$ laatan sisäpuolisen pisteen I alapuolella on laattojen A F I E, I G C H, F B G I ja E I H D nurkkapisteen alla vaikuttavien lisäjännitysten summa. Laatan ulkopuolisen pisteen I' alapuolella vaikuttava lisäjännitys on puolestaan laattojen A' F' I' E' ja C' H' I' G' nurkkapisteen alapuolella vaikuttavien lisäjännitysten summa vä-

hennettynä laattojen B'F'I'G' ja D'H'I'E' nurkkapisteiden alapuolella vaikuttavien lisäjännitysten summalla.

Kuvassa 5 olevat isobaarit on laskettu kaavoilla (3a) ja (4). Kuormituksen aiheuttama lisäjännitys pienenee mitä syvemmälle maanpinnasta siirrytään. Samoin käy myös silloin, kun siirrytään kuormituspisteestä tai kuormituspinnan keskipisteestä sivulle päin.



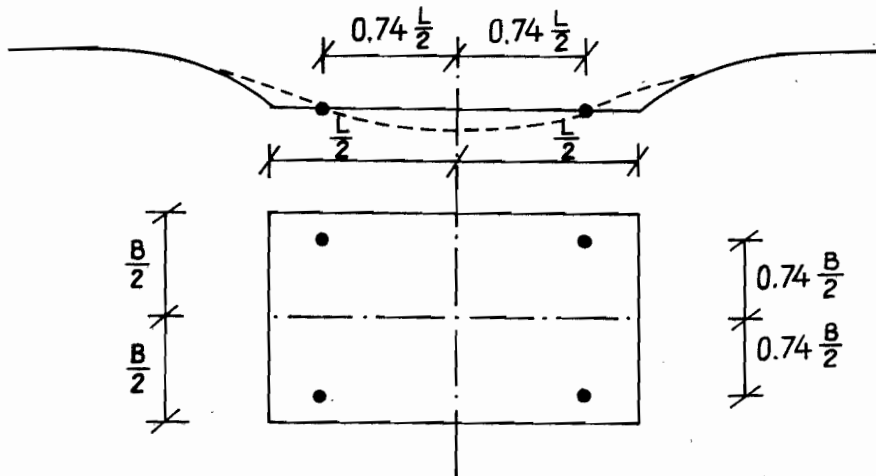
Kuva 5. Paineen jakautuminen laskettuna Boussinesq'in kaavoilla a) pistekuorman ja b) tasaisesti kuormitetun neliön muotoisen laatan alapuolella.

Em. superpositiomenetelmä tekee Boussinesq'in kaavat käyttökelpoisiksi myös mutkikkaammassa tapauksissa. Käytännössä on yleensä useita kuormituskenttiä, joiden yhteisvaikutus voidaan ottaa huomioon tällä periaatteella.

Boussinesq'in kaavatkin käyttökelpoisuudestaan huolimatta pätevät tarkasti vain täysin taipuisille laatoille. Tarkasteltaessa samankokoista keskisesti kuormitettua jäykkää ja tasaisesti kuormitettua täysin taipuisaa laattaa kokonaiskuorman ollessa yhtä suuri (kuva 6) havaitaan, että näillä on 4 symmetris-

8.

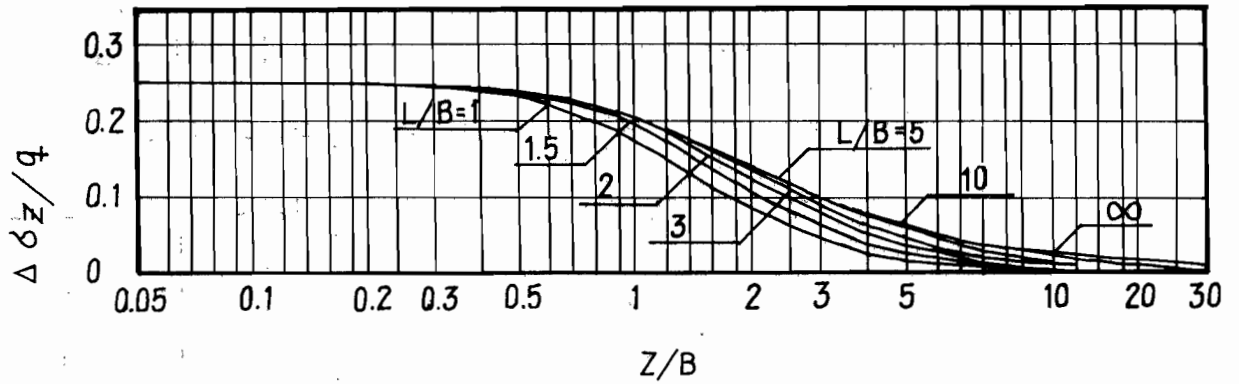
ti sijaitsevaa pistettä, joissa painumat ovat yhtä suuret. Tästä pisteestä käytetään nimitystä tunnus piste tai merkitseva piste. Myös jännitys tämän pisteen alapuolella on yhtä suuri olipa kysymyksessä sitten taipuisa tai jäykkä laatta.



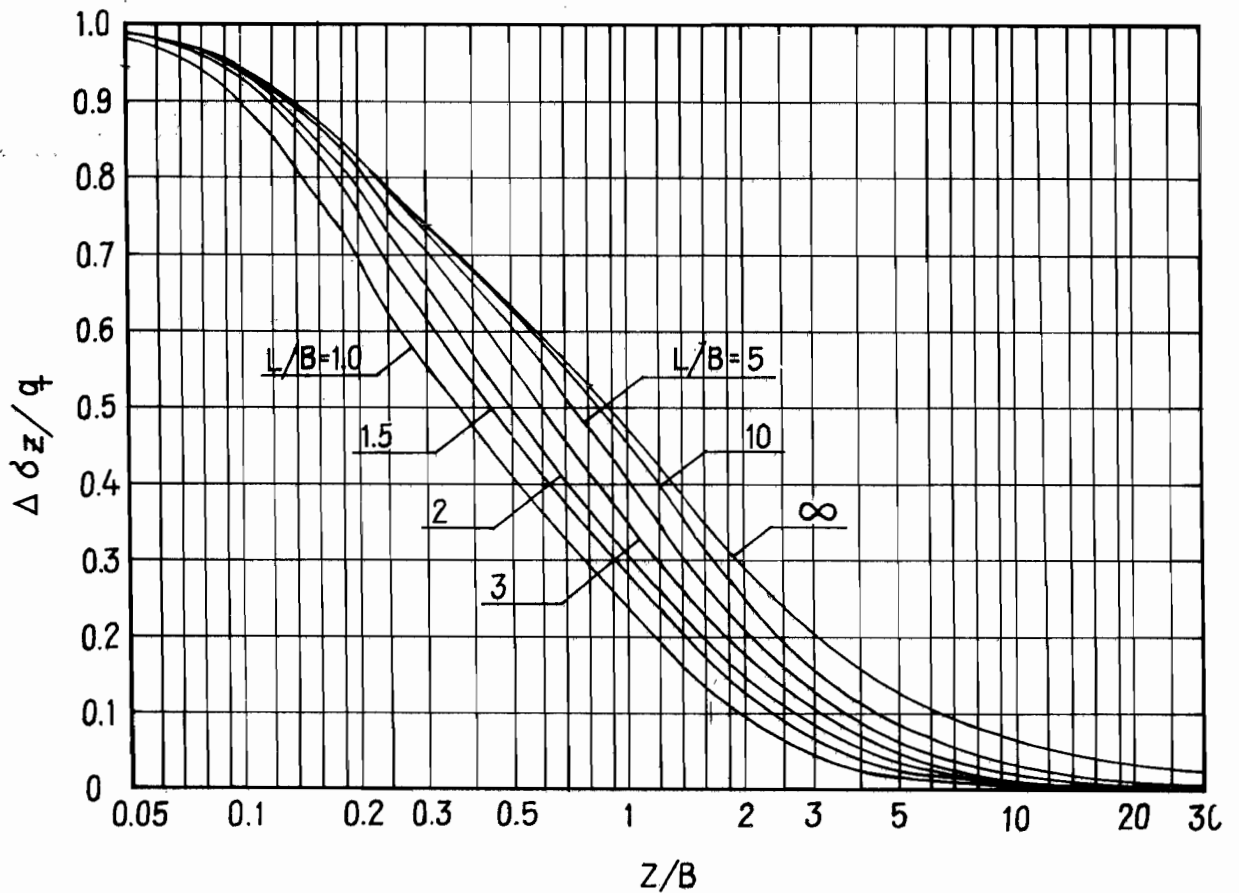
Kuva 6. Painumat jäykän ja taipuisan laatan alla ovat yhtä suuret tunnus pisteiden alapuolella.

2.3 Boussinesq'in menetelmän ja 2:1-menetelmän vertailu

Boussinesq'in kaavan (4) mukaan lasketut käyrästöt on esitetty kuvina 7 ja 8. Kuvassa 7 on pystysuora jännitys $\Delta\sigma_z$ nurkkapisteen alapuolella ja kuvassa 8 tunnus pisteen alapuolella. Kuvassa 9 oleva käyrästö on laskettu 2:1-menetelmällä kaavan (2) mukaan. Voidaan havaita, että kuvat 8 ja 9 muistuttavat toisiinsa. Käyrästöjen samankaltaisuuteen perustuen voidaan tehdä se johtopäätös, että 2:1-menetelmä on approksimaatio yhden tasaisen kuorman aiheuttamasta lisäjännityksestä jäykän peruslaatan alla. Tässä rajatussa tapauksessa se on helppokäyttöinen kun laskelmat tehdään käsin. Menetelmän käytölle asetetaan kuitenkin liian suuret rajoitukset, joten myöhemmin esille tulevassa tietokonesovellutuksessa lisäjännitys määritetään Boussinesq'in kaavalla (4) superpositiomenetelmää noudattaen.

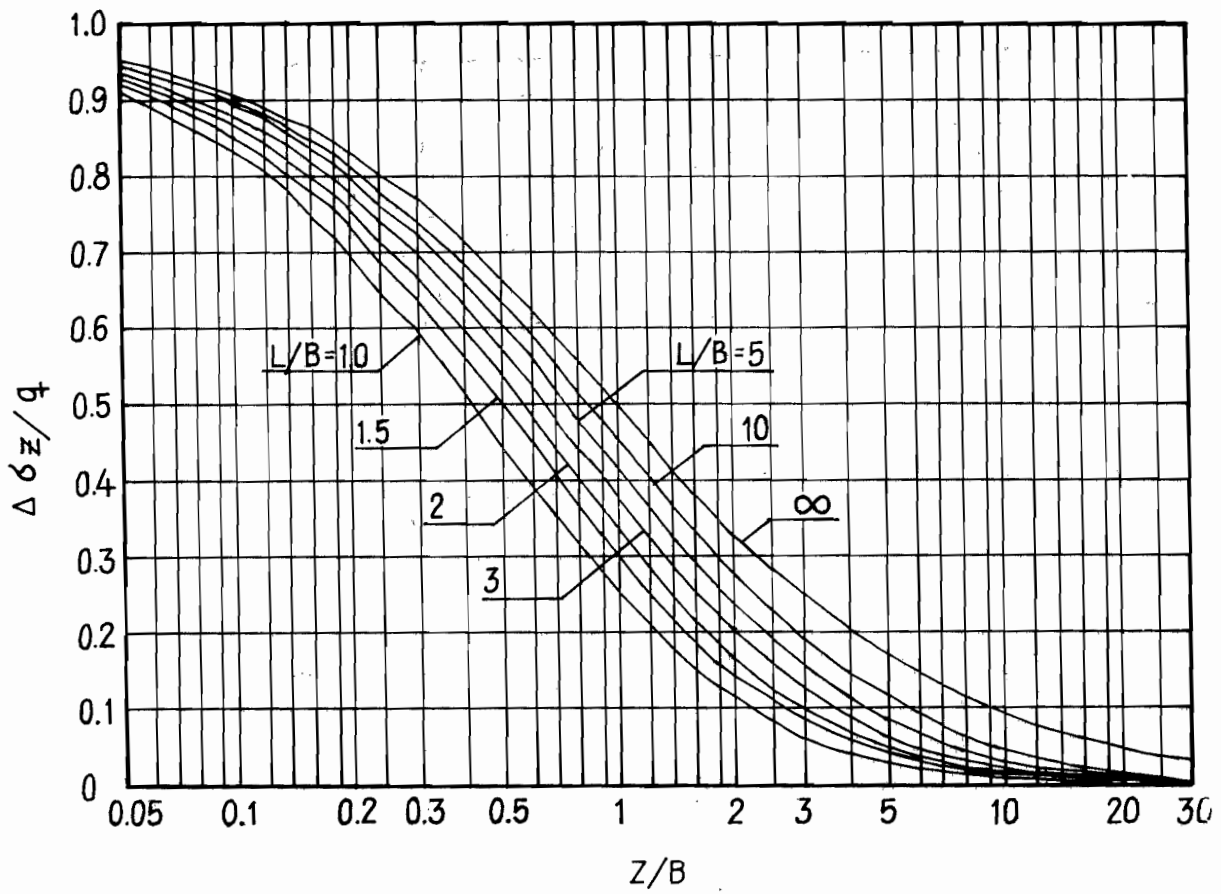


Kuva 7. Suorakulmaisen laatan nurkkapisteen alapuolella esiintyvä pystysuora lisäjännitys Boussinesq'in kaavalla laskettuna.



Kuva 8. Suorakulmaisen laatan tunnuspuolella esiintyvä pystysuora lisäjännitys Boussinesq'in kaavalla laskettuna.

10.



Kuva 9. Suorakulmaisen laatan alla esiintyvä pystysuora lisäjännitys 2:1-menetelmän mukaan laskettuna.

3. PAINUMIEN LASKEMINEN
 3.1 Tangenttimoduulimenetelmä
 3.11 Tangenttimoduuli

Painumien laskentaan käytettävät kaavat perustuvat Hooken lakiin:

$$\sigma = \epsilon E \quad (5)$$

σ = jännitys (kPa)

ϵ = suhteellinen kokoonpuristuma (%/100)

E = kimmomoduuli (kPa)

Vaikeutena kaavan käytölle on kuitenkin se, ettei maassa kimmomoduuli ole vakio. Tämä seikka pyritään ratkaisemaan siten, että kaavassa käytetään jännitystilasta riippuvaa kokoonpuristuvuusmoduulia. Eräs tapa esittää tällainen moduuli on /4/:

$$M_t = m \sigma_v \left(\frac{\sigma}{\sigma_v} \right)^{1-\beta} \quad (6)$$

m = moduuliluku

β = jännityseksponentti

σ_v = vertailujännitys = 100 kPa

M_t = tangenttimoduuli (kPa)

Tällöin moduulista käytetään nimitystä tangenttimoduuli. Kaavassa esiintyvät termit m ja β ovat kuormitus-kokoonpuristumakäyrän muodosta riippuvia parametrejä. Jännityseksponentti vaihtelee yleensä rajoissa -0,5...1,0. Moduuliluku sen sijaan vaihtelee huomattavasti laajemmalla alueella, ollen kuitenkin aina positiivinen.

Vertailujännitys on vakio, jolla otetaan huomioon kaavassa (6) esiintyvien suureiden laatu. SI-yksiköitä käytettäessä σ_v :n arvo on 100 kPa ja vanhoja yksiköitä käytettäessä vastaavasti 1 kp/cm².

Taulukko 1 havainnollistaa jännityseksponentin vaikutusta tangenttimoduulin arvoon.

Taulukko 1. Tangenttimoduulin arvot jännityseksponentin arvoilla $\beta = -0,5, 0, 0,5$ ja 1 .
(m = moduuliluku)

JÄNNITYS- EKSPONENT- TI β	TANGENTTIMODUULI M_t (kPa)				
	K U O R M I T U S (kPa)				
	12,5	25	50	100	200
-0,5	4,42 m	12,5 m	35,4 m	100 m	283 m
0	12,5 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,5	35,4 m	50 m	70,7 m	100 m	141 m
1	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m

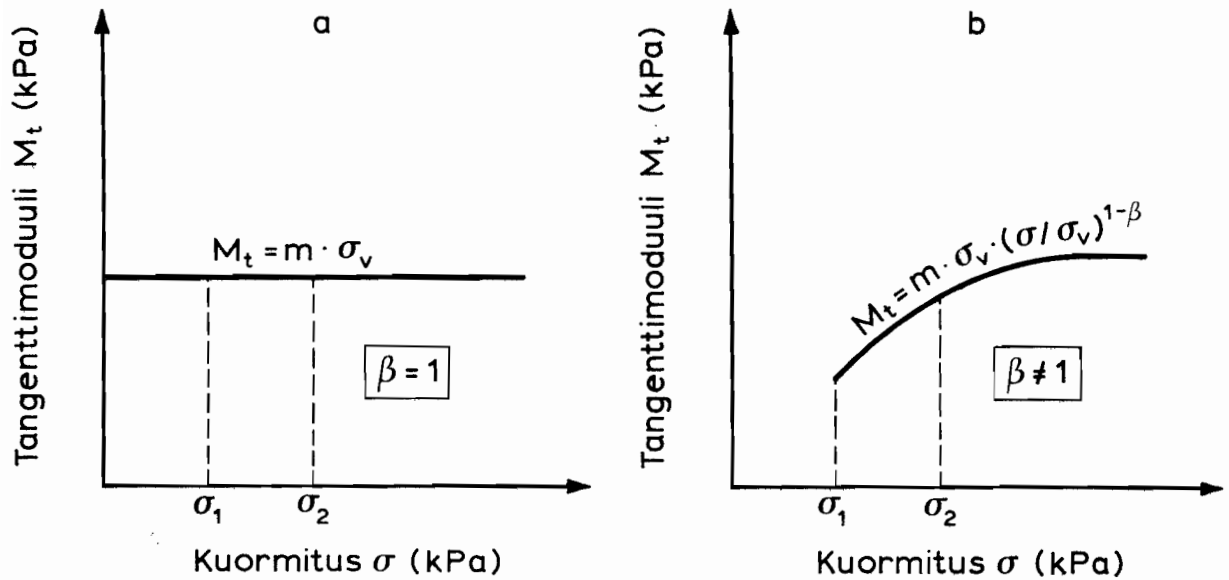
3.12 Kokoonpuristuvuusfunktiot

Suhteellisen kokoonpuristuman muutos ($\Delta\varepsilon$) voidaan M_t :n avulla ilmaista muodossa

$$\Delta\varepsilon = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{M_t} \quad (7),$$

kun σ_2 on pystysuora lisäjännitys kuormituslisäyksen jälkeen ja σ_1 lisäjännitys ennen kuormituslisäystä.

Kuvassa 10 on kahden erilaisen materiaalin tangenttimoduulikäyrä. Materiaalilla voi olla vakio moduuliarvo (kuva 10 a) tai se voi riippua jännitystilasta $\beta \neq 1$ (kuva 10 b).



Kuva 10. Tangenttimoduuli on a) vakio ja b) riippuvainen jännitystilasta.

Sovelletaan kaavaa (7) näihin kahteen tapaukseen. Kun $\beta = 1$, kaava pelkistyy muotoon $\Delta \epsilon = (\sigma_2 - \sigma_1) / M_t$, eli kaava muuttuu takaisin muotoon (5). Tällöin jännitysmuodonmuutoskäyrä on lineaarinen eikä tangenttimoduuli tässä erikoistapauksessa riipu jännitystilasta. Kun $\beta \neq 1$, päädytään integroinnin tuloksena kaavoihin (8a ja b).

Kun $\beta \neq 0$

$$\Delta \epsilon = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{m\sigma_v} \left(\frac{\sigma}{\sigma_v} \right)^{1-\beta} = \frac{1}{m\sigma_v} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \left(\frac{\sigma}{\sigma_v} \right)^{\beta-1} d\sigma$$

$$\Delta \epsilon = \frac{1}{m\sigma_v} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \left[\frac{\sigma_v}{\beta} \left(\frac{\sigma}{\sigma_v} \right)^{\beta} + c \right]$$

$$\Delta \epsilon = \frac{1}{m\beta} \left[\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_v} \right)^{\beta} - \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_v} \right)^{\beta} \right] \quad (8a)$$

14.

Kun $\beta = 0$

$$\Delta \varepsilon = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{m\sigma_V \left(\frac{\sigma}{\sigma_V}\right)} = \frac{1}{m\sigma_V} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{1}{\left(\frac{\sigma}{\sigma_V}\right)} d\sigma$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{m\sigma_V} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \left[\sigma_V \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_V} \right) + C \right]$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{m} \ln \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) \quad (8b)$$

Kaavasta (8 b) nähdään, että jännityseksponentin arvolla 0 jännitysmuodonmuutoskäyrä on puolilogaritmisessa koordinaatissa suoraviivainen.

3.13 Kokoonpuristuvuusfunktiot normaali- ja ylikonsolidoituneella alueella

Maan kimmomoduuli riippuu jännitystilasta ($\beta \neq 1$). Lisäksi tämän moduulin esittämiseen tarvitaan kaksi funktiota. Yksi funktio määrittelee tangenttimoduulin esikonsolidaatiopaineeseen (σ_c) asti - myöhemmin tästä paineesta käytetään nimitystä konsolidaatiojännitys. Silloin kun aikaisemmin vallinnut jännitys on nykyistä suurempi, on myös konsolidaatiojännitys suurempi kuin tarkasteltavan pisteen yläpuolella olevien maamassojen paino (σ_o). Jos $\sigma_c > \sigma_o$ kutsutaan maata ylikonsolidoituneeksi ja jos $\sigma_c = \sigma_o$ normaalikonsolidoituneeksi.

Ylikonsolidoituminen voi olla aikaisempien geologisten kausien seurausta tai se voidaan saada aikaan myös keinotekoisesti. Konsolidaatiojännityksen keinotekoisesta nostamisesta käytetään nimitystä ylipengermetelmä.

Lähteen /7/ mukaan ylikonsolidoituneella alueella ($\sigma < \sigma_c$) voidaan savimaille käyttää arvoa $\beta_2 = 0$, jolloin jännitysmuodonmuutosfunktio tulee puolilogaritmisessa asteikossa suoraviivai-

seksi (kaava 9a). Todellisuudessa jännityseksponentilla voi olla mielivaltainen arvo, mutta koska kokoonpuristuminen ylikonsolidoituneella alueella on suhteellisen pientä, niin edellä esitettyä approksimaatiota voidaan yleensä pitää riittävänä (kuva 11).

Toinen funktio tarvitaan kuvaamaan maan käyttäytymistä silloin, kun jännitys nousee sellaisen tason yläpuolelle ($\sigma \geq \sigma_c$), jolla se ei aikaisemmin ole ollut. Tällöin liikutaan ns. normaalikonsolidoituneella alueella, jolloin parametrien m ja β määrittämiseksi havaintotuloksiin sovitetaan mahdollisimman hyvin vastaava, kaavan (9b) muotoa oleva potenssifunktio (kuva 11).

$$\varepsilon = \frac{1}{m_2} \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_v} \right) + C_2 \quad (9a)$$

m_2 = ylikonsolidoituneen osan moduuliluku

C_2 = vakio

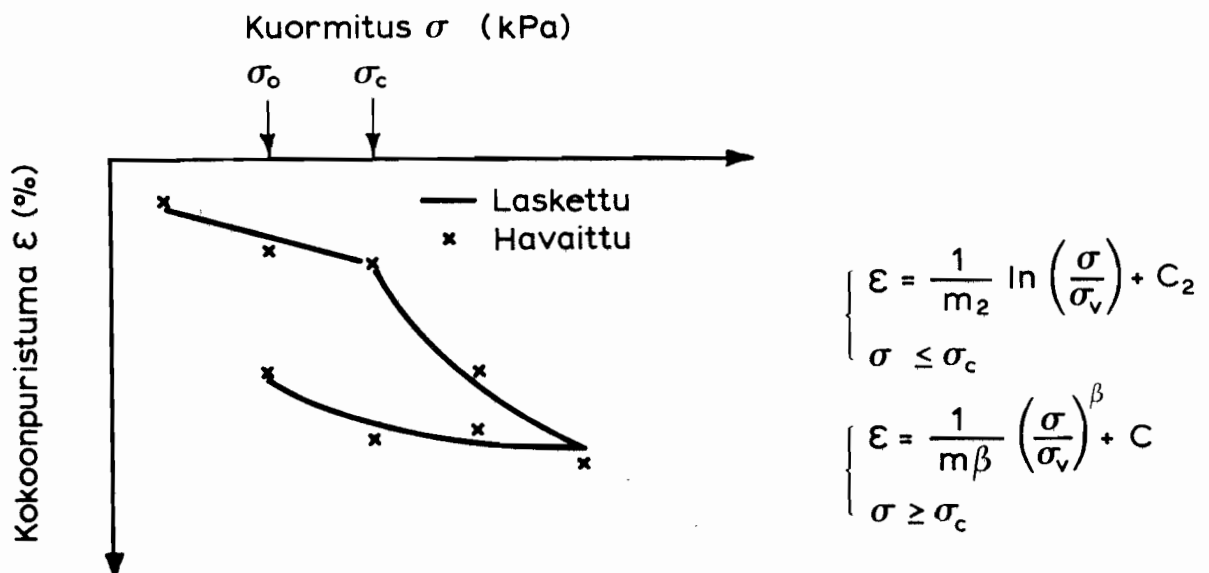
$$\varepsilon = \frac{1}{m\beta} \left(\frac{\sigma}{\sigma_v} \right)^\beta + C \quad (9b)$$

$\beta \neq 0$

m = normaalikonsolidoituneen osan moduuliluku

β = normaalikonsolidoituneen osan jännityseksponentti

C = vakio



Kuva 11. Kuormitus-kokoonpuristumakäyrä approksimoidaan kahdella funktiolla.

Kun painumalaskelmissa käytetään tangenttimoduulimenetelmää, on jokaisesta ödometrikokeesta laskettava kolme parametriä, nimittäin m ja β normaalikonsolidoituneelle osalle ja ylikonsolidoituneelle osalle moduuliluku m_2 . Parametrit m ja β määritetään käyttämällä havaintoarvoja, joissa $\sigma \geq \sigma_c$. Parametri m_2 puolestaan ratkaistaan yleensä käyrän palautusosan perusteella. Käyrän alkuosan pisteitä ei tavallisesti käytetä, koska näyte saattaa tällä alueella olla häiriintynyt. Mikäli ylikonsolidoituneen osan käsittelyssä kuitenkin käytetään ödometrikokeen alkuosan pisteitä - so. sellaisia havaintoarvoja, joissa kuormitus on alle konsolidaatiojännityksen arvon - voi olla paikallaan luopua otaksumasta $\beta_2 = 0$ ja käyttää Janbun /4/ esittämää oletusta, jonka mukaan ylikonsolidoituneessa sassa kokoonpuristuvuusmoduuli oletetaan vakioksi eli $\beta_2 = 1$.

Painumien laskeminen tapahtuu parametrien m , β ja m_2 sekä konsolidaatiojännityksen (σ_c) määrittämisen jälkeen soveltamalla kaavaa (8). Sijoittamalla σ_1 :lle ja σ_2 :lle oikeat arvot saadaan kun m_2 määritetään palautuskäyrältä ja oletetaan, että $\beta_2 = 0$:

kun $\sigma_z > \sigma_c$

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_2 + \Delta \varepsilon_1$$

$$\Delta \varepsilon_2 = \frac{1}{m_2} \ln \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_o} \right) \quad (10a)$$

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{1}{m\beta} \left[\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_v} \right)^\beta - \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_v} \right)^\beta \right]$$

kun $\sigma_z \leq \sigma_c$

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_2 = \frac{1}{m_2} \ln \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_o} \right) \quad (10b)$$

σ_o = yläpuolella olevien maamassojen paino (kPa)

$\Delta \sigma_z$ = lisäkuorma (kPa)

$\sigma_z = \sigma_o + \Delta \sigma_z$ = kuormitus syvyydessä z

σ_c = konsolidaatiojännitys (kPa)

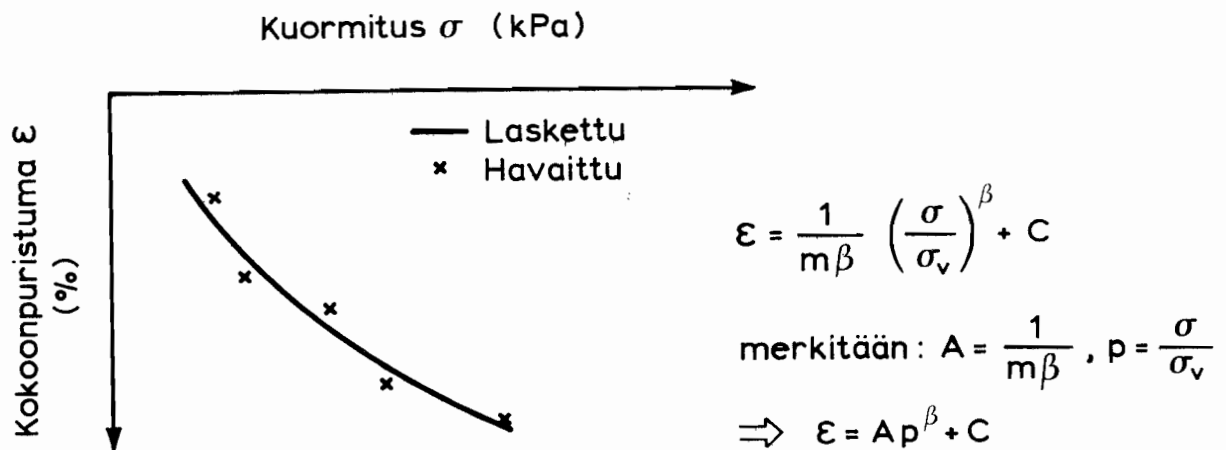
$\Delta \varepsilon$ = suhteellisen kokoonpuristuman muutos (%/100)

$\Delta \varepsilon_2$ = suht.kokoonpuristuman muutos ylikons. alueella (%/100)

$\Delta \varepsilon_1$ = suht.kokoonpuristuman muutos normaalikonsolidoituneella alueella (%/100)

- 3.14 Maan kuormitus-kokoonpuristumakäyrän matemaattinen ratkaisu
- 3.141 Normaalikonsolidoituneen alueen parametrien määrittäminen

Johdetaan kaavat parametrien m ja β ratkaisemiseksi normaalikonsolidoituneella alueella (kuva 12).



Kuva 12. Potenssifunktion kuvaaja.

Käytetään pienimmän neliösumman menetelmää ja merkitään minimoitavaa neliösummaa Σ :lla (kaava 11), kun haettu funktio on muotoa $\epsilon = Ap^\beta + C$.

$$\Sigma = \sum_{i=1}^n (Ap_i^\beta + C - \epsilon_i)^2 \quad (11)$$

Suureiden A , β ja C ratkaisemiseksi derivoidaan kaava (11) erikseen A :n, β :n ja C :n suhteen ja merkitään näin saadut yhtälöt nolliksi. Tämän jälkeen on kolmen tuntemattoman määrittämiseksi kolme yhtälöä (12, 13 ja 14).

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial A} = \sum \left[2 (Ap_i^\beta + C - \epsilon_i) (p_i^\beta) \right] = 0$$

$$A \sum p_i^{2\beta} + C \sum p_i^\beta - \sum p_i^\beta \epsilon_i = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial \beta} = \Sigma \left[2 (A p_i^\beta + C - \epsilon_i) (A p_i^\beta \ln p_i) \right] = 0$$

$$A \Sigma p_i^{2\beta} \ln p_i + C \Sigma p_i^\beta \ln p_i - \Sigma p_i^\beta \epsilon_i \ln p_i = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial C} = \Sigma \left[2 (A p_i^\beta + C - \epsilon_i) (1) \right] = 0$$

$$A \Sigma p_i^\beta + n C - \Sigma \epsilon_i = 0 \quad (14)$$

n = havaintopisteiden lukumäärä

$$\left\{ \begin{array}{l} A \Sigma p_i^{2\beta} + C \Sigma p_i^\beta - \Sigma p_i^\beta \epsilon_i = 0 \\ A \Sigma p_i^{2\beta} \ln p_i + C \Sigma p_i^\beta \ln p_i - \Sigma p_i^\beta \epsilon_i \ln p_i = 0 \\ A \Sigma p_i^\beta + n C - \Sigma \epsilon_i = 0 \end{array} \right.$$

Yhtälöstä (14) saadaan kaava (15).

$$C = \frac{\Sigma \epsilon_i - A \Sigma p_i^\beta}{n} \quad (15)$$

Sijoittamalla kaava (15) yhtälöön (12) saadaan kaava (16).

$$A = \frac{n \Sigma p_i^\beta \epsilon_i - \Sigma p_i^\beta \Sigma \epsilon_i}{n \Sigma p_i^{2\beta} - (\Sigma p_i^\beta)^2} \quad (16)$$

Kun vielä sijoitetaan kaavat (15) ja (16) yhtälöön (13) saadaan β :n ratkaisemiseksi kaava (17).

$$F = \left(\frac{n \Sigma p_i^\beta \epsilon_i - \Sigma p_i^\beta \Sigma \epsilon_i}{n \Sigma p_i^{2\beta} - (\Sigma p_i^\beta)^2} \right) (n \Sigma p_i^{2\beta} \ln p_i - \Sigma p_i^\beta \Sigma p_i^\beta \ln p_i)$$

$$- n \Sigma p_i^\beta \epsilon_i \ln p_i + \Sigma p_i^\beta \ln p_i \Sigma \epsilon_i = 0 \quad (17)$$

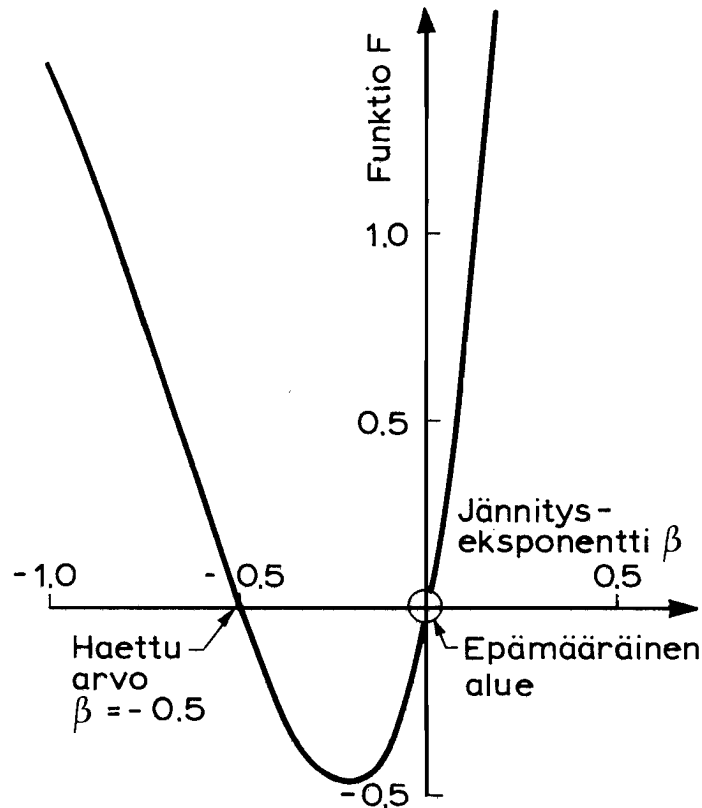
Yhtälön (17) ratkaisu suoritetaan tietokonetta apuna käyttäen iteratiivisesti, ts. etsitään sellainen β :n arvo, joka toteuttaa yhtälön (17). Kun β :n arvo on ratkaistu, saadaan A :n arvo kaavasta (16) ja C :n arvo edelleen β :n ja A :n avulla kaavasta (15). Moduuliluku m on kuvan 12 merkintöjä käyttäen $1/(A \cdot \beta)$ ja jännityseksponentti suoraan β .

Tarkastellaan jännityseksponentin arvon etsimistä esimerkin avulla. Lasketaan riittävä määrä pisteitä käyrältä $\epsilon = -6 p^{-0,5} + 5$.

Taulukko 2. Käyrältä $\epsilon = -6 p^{-0,5} + 5$ laskettuja pisteitä.

p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϵ	-1,00	0,76	1,54	2,00	2,32	2,55	2,73	2,88	3,00	3,10

Haetaan nyt käyrä, joka parhaiten vastaa taulukon 2 mukaisia pisteitä. Kuva 13 esittää funktion F kuvaajaa, joka on laskettu kaavan (17) avulla käyttämällä lähtötietoina taulukon 2 mukaisia pisteitä.



Kuva 13. Iteroitavan funktion F (kaava 17) kuvaaja kun haettu kuormitus-kokoonpuristumakäyrä on

$$\epsilon = -6 \left(\frac{\sigma}{\sigma_v} \right)^{-0,5} + 5.$$

Kuvasta nähdään, että funktio F on nolla kun $\beta = -0,5$. Kun $\beta = 0$ kaavan (17) ensimmäisen termin nimittäjä saa arvon nolla, joten funktion arvoa ei voi määrittellä kun $\beta = 0$.

Ainoa β -arvo, joka toteuttaa yhtälön $F = 0$ on $-0,5$. Kaava (16) antaa arvon $A = -6$, ja kaavasta (15) saadaan $C = 5$, joten kaavojen (15), (16) ja (17) perusteella päädytään takaisin funktioon $\varepsilon = -6 p^{-0,5} + 5$.

Kuvan 13 mukaisten kuvaajien piirtäminen ei yleensä ole tarpeellista. Tässä se on esitetty esimerkin havainnollistamiseksi. Funktion F nollakohta löytyy tuhannesosan tarkkuudella nopeasti, kun käytetään esimerkiksi haarukointia.

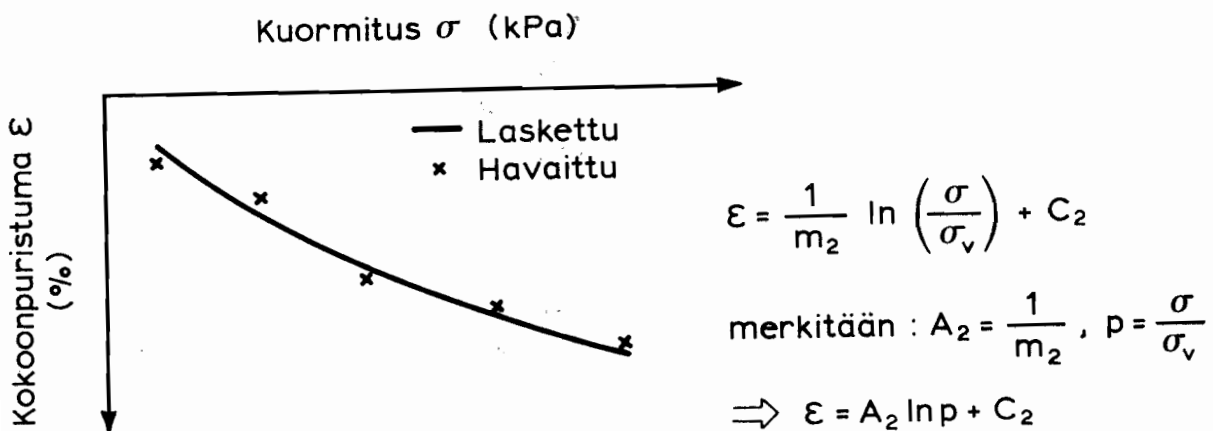
Funktion F kuvaajasta voidaan vielä todeta, että se muistuttaa aina epäsymmetristä paraabelia, joka aukeaa ylös päin. Funktio F leikkaa β -akselin ainoastaan yhdessä pisteessä ja lisäksi lähestyy molemmista suunnista origoa, mutta ei ole määritelty arvolla $\beta = 0$.

Tietokoneelle ohjelmoituna tällä menetelmällä saadaan minkä tahansa kuormitus-kokoonpuristumakäyrän parametrit syöttämällä koneeseen ödometrikokeen kuormitukset ja niitä vastaavat kokoonpuristumat. Erityisesti se seikka, että kuormitusportaatta saa valita mielivaltaisesti tekee menetelmästä käyttökelpoisen.

3.142 Ylikonsolidoituneen alueen parametrien määrittäminen

Ylikonsolidoituneen osan regressioanalyysi on hieman yksinkertaisempi, koska β -termillä on nyt vakioarvo 0. Haetaan muotoa

$\varepsilon = \frac{1}{m_2} \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_v} \right) + C_2$ olevan funktion parametrit (kuva 14).



Kuva 14. Logaritmisien funktion kuvaaja.

Minimoitava neliösumma on tällä kertaa:

$$\Sigma = \sum_{i=1}^n (A_2 \ln p_i + C_2 - \epsilon_i)^2 \quad (18)$$

Merkitsemällä derivaatat A_2 :n ja C_2 :n suhteen nolliksi, saadaan näiden tuntemattomien ratkaisemiseksi vaaditut kaksi yhtälöä (19 ja 20).

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial A_2} = \Sigma \left[2 (A_2 \ln p_i + C_2 - \epsilon_i) (\ln p_i) \right] = 0$$

$$A_2 \Sigma (\ln p_i)^2 + C_2 \Sigma \ln p_i - \Sigma \ln p_i \epsilon_i = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial C_2} = \Sigma \left[2 (A_2 \ln p_i + C_2 - \epsilon_i) (1) \right] = 0$$

$$A_2 \Sigma \ln p_i + n C_2 - \Sigma \epsilon_i = 0 \quad (20)$$

$$C_2 = \frac{\Sigma \epsilon_i - A_2 \Sigma \ln p_i}{n} \quad (21)$$

Sijoittamalla kaava (21) yhtälöön (19) saadaan A_2 :n ratkaisuksi kaava (22).

$$A_2 = \frac{n \Sigma \ln p_i \epsilon_i - \Sigma \ln p_i \Sigma \epsilon_i}{n \Sigma (\ln p_i)^2 - (\Sigma \ln p_i)^2} \quad (22)$$

Kun A_2 on ratkaistu saadaan C_2 :n arvo kaavasta (21). Moduuliluku m_2 on kuvan 14 merkintöjä käyttäen $1/A_2$.

3.143 Konsolidaatiojännityksen määrittäminen

3.1431 Kotziaksen menetelmä

Maan kuormitus-kokoonpuristumakäyrän kuvaamiseen tarvitaan kaksi funktiota. Näissä funktioissa esiintyvien parametrien ratkaisukaavojen johtamisen jälkeen on ratkaistava vielä rajakohta näiden kahden funktion välillä, eli määritettävä ns. konsolidaatiojännitys.

Tätä varten on olemassa useita graafisia menetelmiä. Tässä esityksessä on valittu Kotziaksen /9/ menetelmä, joka seuraavassa saatetaan ohjelmoitavaan muotoon. Kotziaksen menetelmä perustuu kaavaan (9b) ja sellaiseen ödometrikokeeseen, jossa kuormituslisäys on aina kaksinkertainen edelliseen verrattuna.

Käyttäen merkintöjä $A = \frac{1}{m\beta}$ ja $p = \frac{\sigma}{\sigma_v}$ saadaan:

$$\epsilon_{\sigma} = A p^{\beta} + C \quad (23a)$$

$$\epsilon_{2\sigma} = A (2p)^{\beta} + C \quad (23b)$$

ϵ_{σ} = kokoonpuristuma jännityksellä σ

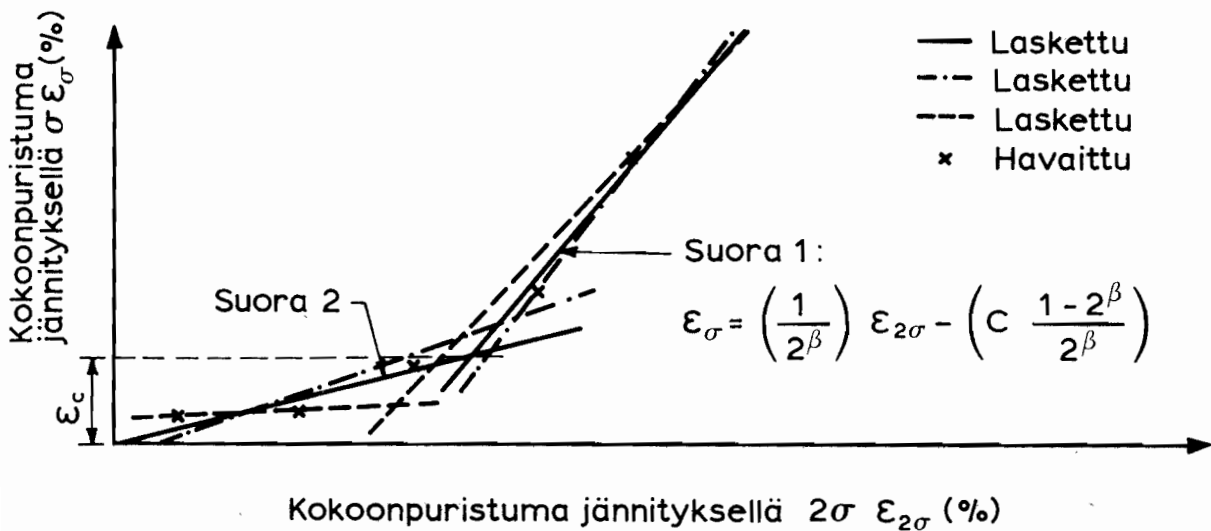
$\epsilon_{2\sigma}$ = kokoonpuristuma jännityksellä 2σ

Ratkaistaan A kaavasta (23b) ja sijoitetaan se kaavaan (23a).

$$A = \frac{\epsilon_{2\sigma} - C}{2^{\beta} p^{\beta}} \quad \epsilon_{\sigma} = \left(\frac{\epsilon_{2\sigma} - C}{2^{\beta} p^{\beta}} \right) p^{\beta} + C$$

$$\epsilon_{\sigma} = \left(\frac{1}{2^{\beta}} \right) \epsilon_{2\sigma} - \left(C \frac{1 - 2^{\beta}}{2^{\beta}} \right) \quad (24)$$

Kaavasta (24) voidaan tehdä se johtopäätös, että ϵ_{σ} ja $\epsilon_{2\sigma}$ välillä on lineaarinen riippuvuus (kuva 15).



Kuva 15. Kotziaksen menetelmä.

Koska kuormitus-kokoonpuristumakäyrän alku- ja loppuosalla on eri $m:t$ ja $\beta:t$, niin havaintopisteet asettuvat kahdelle suoralle. Lasketaan kaavan (25) mukaiset korrelaatiokertoimet r_1

ja r_2 suorille 1 ja 2 käyttämällä suoralle 1 ensin kahta viimeistä havaintopistettä ja suoralle 2 loppuja (kuva 15).

$$r = \frac{n \sum (\varepsilon_{2\sigma} \varepsilon_{\sigma}) - (\sum \varepsilon_{2\sigma}) (\sum \varepsilon_{\sigma})}{\sqrt{[n \sum (\varepsilon_{2\sigma}^2) - (\sum \varepsilon_{2\sigma})^2] [n \sum (\varepsilon_{\sigma}^2) - (\sum \varepsilon_{\sigma})^2]}} \quad (25)$$

Seuraavassa laskentatapauksessa käytetään r_1 :n laskemiseen kolmea viimeistä havaintopistettä ja r_2 :n laskemiseen loppuja. Näin menetellään kunnes r_2 :n määrittämiseen on enää kaksi pistettä.

Kustakin laskentatapauksesta saadaan kaksi korrelaatiokerrointa (r_1 ja r_2), jotka voidaan yhdistää kaavan (26) avulla laskentatapauksen kokonaiskorrelaatiokertoimeksi (r_{kok}).

$$r_{\text{kok}} = \frac{n_1 \cdot r_1 + n_2 \cdot r_2}{(n_1 + n_2)} \quad (26)$$

n_1 = havaintopisteiden lukumäärä suoralla 1 (käyrällä 1)

r_1 = suoran 1 (käyrän 1) korrelaatiokerroin

n_2 = havaintopisteiden lukumäärä suoralla 2 (käyrällä 2)

r_2 = suoran 2 (käyrän 2) korrelaatiokerroin

r_{kok} = kokonaiskorrelaatiokerroin.

Kun kokonaiskorrelaatiokerroin on suurimmillaan, kuvaavat suorat 1 ja 2 parhaiten koko havaintopistejoukkoa. Valitaan laskentatapauksista se, jossa kokonaiskorrelaatiokerroin on suurin ja lasketaan suorille 1 ja 2 kulmakertoimet (k) ja ε_{σ} -akselin leikkauspisteet (q) kaavoista (27) ja (28).

$$k = \frac{n \sum \varepsilon_{2\sigma} \varepsilon_{\sigma} - \sum \varepsilon_{2\sigma} \sum \varepsilon_{\sigma}}{n \sum \varepsilon_{2\sigma}^2 - (\sum \varepsilon_{2\sigma})^2} \quad (27)$$

$$q = \frac{\sum \varepsilon_{\sigma} - k \sum \varepsilon_{2\sigma}}{n} \quad (28)$$

Suorat 1 ja 2 voidaan nyt esittää muodossa:

24.

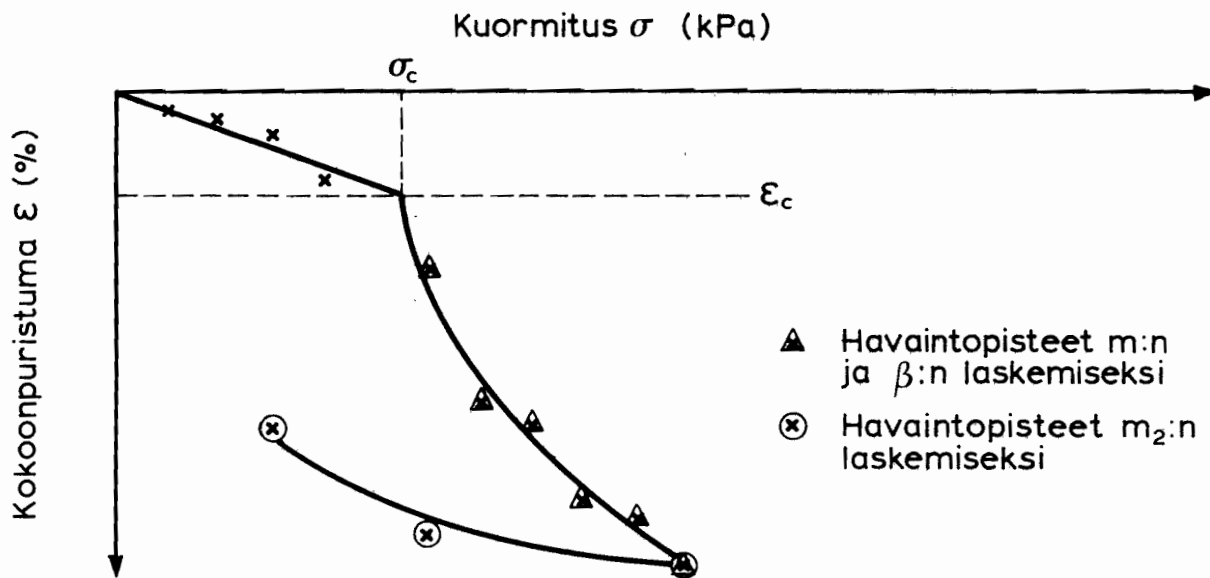
$$s_1: \epsilon_\sigma = k_1 \cdot \epsilon_{2\sigma} + q_1 \quad (29a)$$

$$s_2: \epsilon_\sigma = k_2 \cdot \epsilon_{2\sigma} + q_2 \quad (29b)$$

Haettu konsolidaatiojännitystä vastaava kokoonpuristuma ϵ_c on nyt suorien s_1 ja s_2 leikkauspisteen ordinaatta:

$$\epsilon_c = \frac{q_1 k_2 - q_2 k_1}{k_2 - k_1} \quad (30)$$

Määrittäessä normaalikonsolidoituneen osan parametrejä m ja β voidaan käyttää kaikkia niitä havaintoarvoja, joissa kokoonpuristuma on suurempi tai yhtä suuri kuin edellä johdettu konsolidaatiojännitystä vastaava kokoonpuristuma ϵ_c . Ylikonsolidoituneen osan parametri m_2 määritetään palautuskäyrältä (kuva 16).



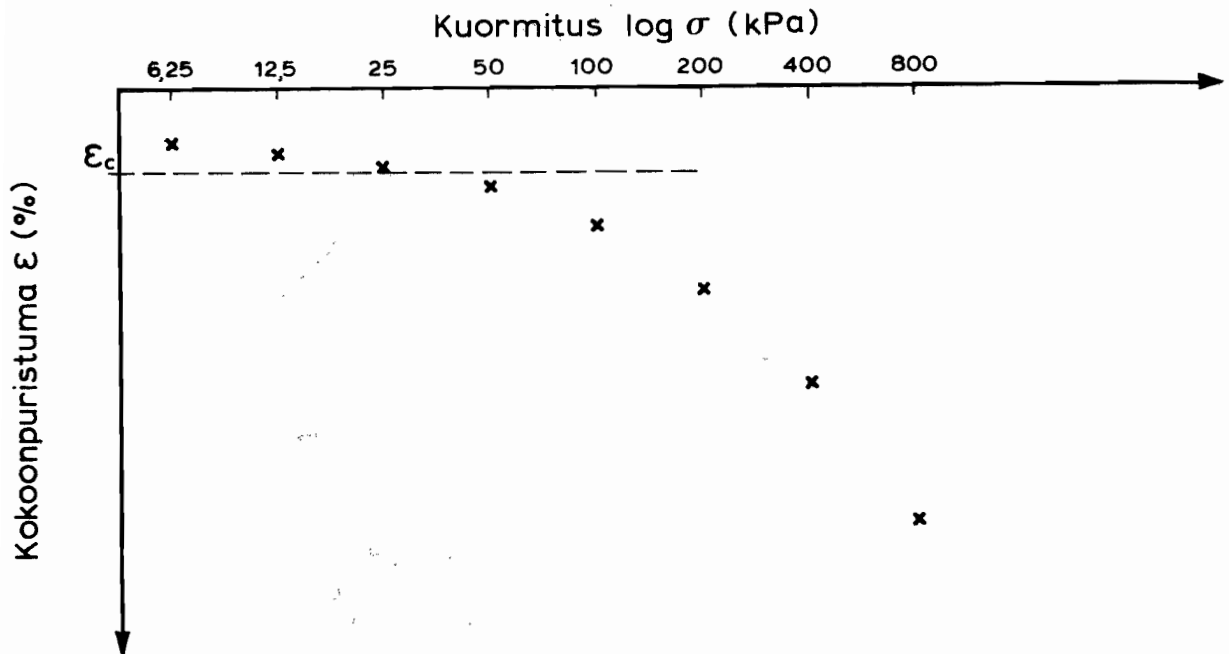
Kuva 16. Parametrien m , β ja m_2 määrittäminen.

Konsolidaatiojännitys σ_c saadaan sijoittamalla kaavaan (9) kokoonpuristuman paikalle ϵ_c ja ratkaisemalla jännitys:

$$\text{Kun } \beta \neq 0 \quad \sigma_c = \sigma_v \cdot \frac{m\beta (\epsilon_c - C) - \frac{1}{\beta}}{-} \quad (31a)$$

$$\text{kun } \beta = 0 \quad \sigma_c = \sigma_v \cdot e^{m_2 (\epsilon_c - C_2)} \quad (31b)$$

Edellä esitettyssä kuormitus-kokoonpuristumakäyrän ratkaisumetelmässä voidaan konsolidaatiojännitystä vastaavaa kokoonpuristumaa (ϵ_c) laskettaessa käyttää sellaisia ödometrikokeen havaintopisteitä, joissa jännitys on kaksinkertainen edelliseen verrattuna (kuva 17).

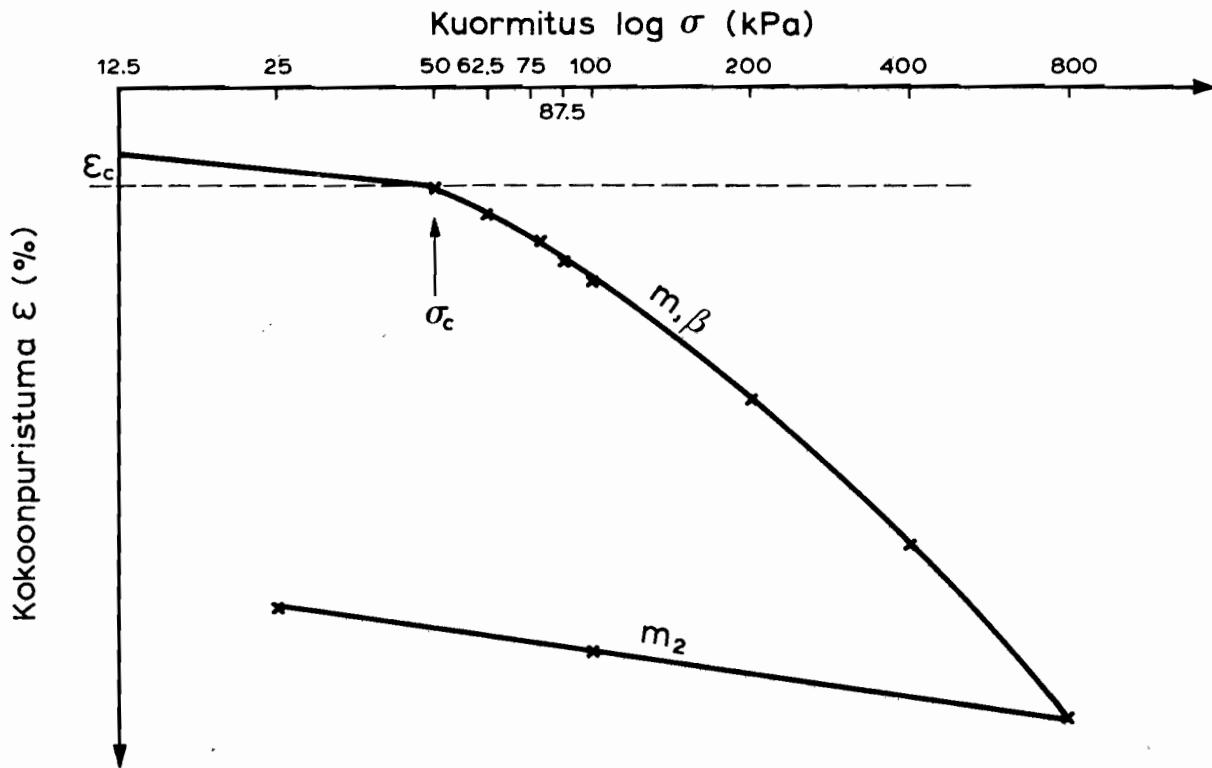


Kuva 17. Konsolidaatiojännitystä vastaavan kokoonpuristuman (ϵ_c) laskemisessa käytettävät pisteet.

Tämän jälkeen moduulilukuja (m ja m_2), jännityseksponenttia (β) ja konsolidaatiojännitystä (σ_c) määritettäessä voidaan käyttää kaikkia havaintopisteitä, joissa kokoonpuristuma on suurempi tai yhtä suuri kuin edellä mainittu arvo ϵ_c (kuva 18).

Tangenttimoduulimenetelmän käyttö edellyttää melko suurta kuormitusportaiden lukumäärää sekä lisäksi palautusvaiheen suorittamista. Suotavaa olisi lisäksi, että lähellä ennakoitua konsolidaatiojännityksen arvoa olisi kuormitusportaita.

Näin voidaan esim. väli 50 kPa - 100 kPa jakaa kuormitusportaisiin 50 kPa - 75 kPa - 100 kPa tai 50 kPa - 62,5 kPa - 75 kPa - 87,5 kPa - 100 kPa tai mihin tahansa hyväksi katsottuihin kuormitusportaisiin, jolloin lopputulos tarkentuu huomattavasti.



Kuva 18. Parametrien m, β ja m_2 sekä konsolidaatiojännityksen (σ_c) laskemisessa voidaan käyttää kaikkia havaintotuloksia, joissa kokoonpuristuma on suurempi kuin arvo ϵ_c .

3.1432 Korrelaatioteorian pohjalta kehitetty menetelmä sellaisia ödometrikokeita varten, joissa kuormituslisäysten suuruus on mielivaltainen

Jotta edellisessä kappaleessa selostetulla menetelmällä päästäisiin tarkkoihin tuloksiin, tarvitaan kaksinkertaisen jännityksen arvoja (200, 400, 800 kPa), jotka ovat paljon suurempia kuin todelliset maapohjalle tulevat kuormitukset. Riittävä määrä kaksinkertaisen jännityksen pisteitä on edellytyksenä konsolidaatiojännitystä vastaavan kokoonpuristuman (ϵ_c) määrittämiseksi Kotziaksen menetelmällä. Jotta tällaisista "ylisuurista" kuormitusportaista päästäisiin eroon, on konsolidaatiojännitys määritettävä jollakin muulla menetelmällä.

Tässä esityksessä on päädytty menetelmään, joka perustuu korrelaatioteoriaan, jossa korrelaatiokertoimen yleinen lauseke on /8/:

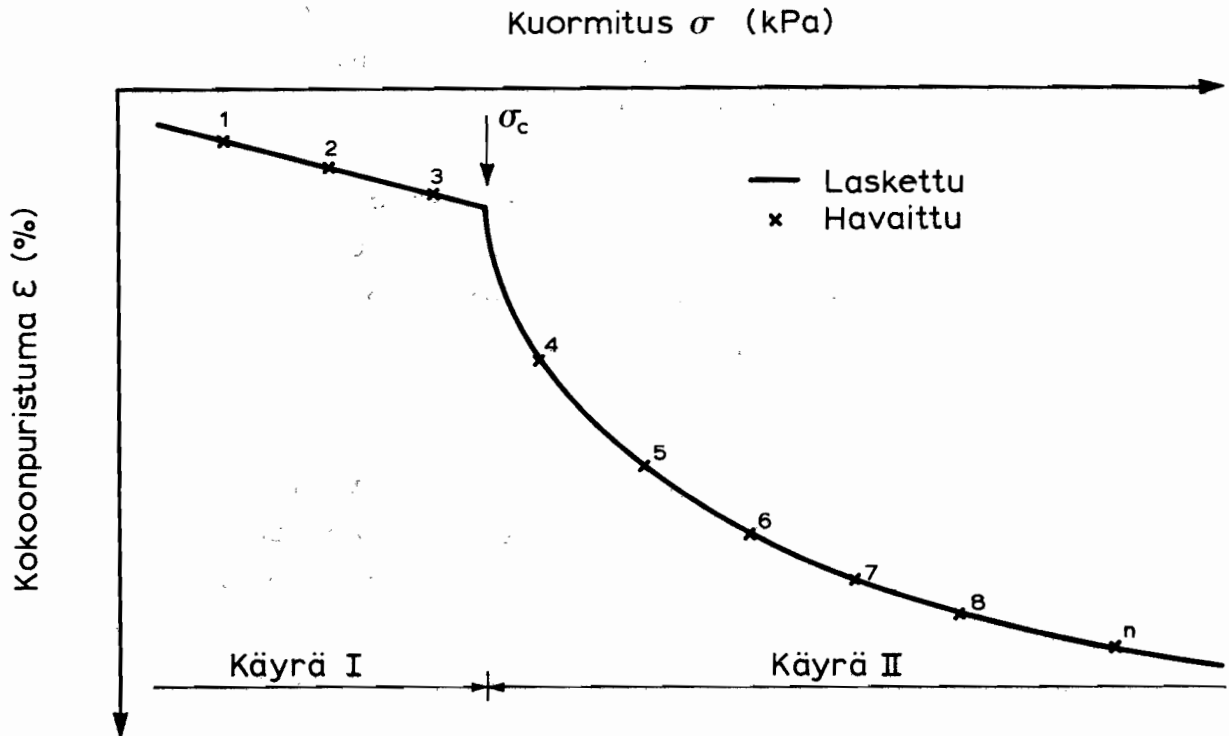
$$r = \frac{\sum (\varepsilon_{\text{est}} - \bar{\varepsilon})^2}{\sum (\hat{\varepsilon} - \bar{\varepsilon})^2} \quad (32)$$

r = korrelaatiokerroin

ε_{est} = laskettu kokoonpuristuman arvo

$\hat{\varepsilon}$ = havaittu kokoonpuristuman arvo

$\bar{\varepsilon}$ = havaittujen kokoonpuristuma-arvojen keskiarvo



Kuva 19. Konsolidaatiojännityksen σ_c määrittäminen.

Ratkaistaan kaavan (9b) muotoa olevat funktiot erikseen pisteille $1 \rightarrow 2$ ja $3 \rightarrow n$. Kun käyrällä on vain kaksi pistettä, niin oletetaan, että $\beta = 1$, eli pisteet yhdistetään niiden kautta kulkevalla suoralla. Kun havaintopisteitä on 3 tai enemmän ratkaistaan funktio pienimmän neliösumman menetelmällä aiemmin esitetyllä tavalla (kaavat 15, 16 ja 17).

Kaavan (32) avulla ratkaistaan korrelaatiokertoimet erikseen alku- ja loppuosan käyrille. Yhdistetyn eli kokonaiskorrelaatiokertoimen laskemisessa käytetään kaavaa (26). Termit r_1 ja r_2 ovat tällä kertaa kuitenkin epälineaarisia korrelaatioker-toimia.

Seuraavassa laskentatapauksessa käyrä I ratkaistaan pisteiden $1 \rightarrow 3$ ja käyrä II pisteiden $4 \rightarrow n$ avulla. Kokonaiskorrelaatiokerroin lasketaan kuten ensimmäisessäkin laskentatapauksessa. Kolmannessa laskentatapauksessa havaintopisteet jaetaan osiin $1 \rightarrow 4$ ja $5 \rightarrow n$. Näin menetellen jatketaan kunnes käyrällä II on enää kaksi pistettä.

Eri laskentatapauksista valitaan se, jossa kokonaiskorrelaatiokerroin on suurin. Käyrät I ja II kuvaavat nyt parhaiten koko havaintopistejoukkoa (kuva 19).

Erilaisia tapoja jakaa havaintopisteet kahdelle käyrälle on $n - 3$ kappaletta ($n =$ havaintopisteiden lukumäärä) ja ratkaistavia käyriä on kaksi kertaa tämä määrä. Jos kuormitusportaita on esim. 9 kpl niin laskentatapauksia on tällöin 6 ja erilaisia käyriä 12.

Yleensä käy kuitenkin niin, että kokonaiskorrelaatiokerroin laskentatapauksittain edettäessä ensin kasvaa saavuttaen huipparvonsa ja sen jälkeen tasaisesti pienenee, joten kaikkien mahdollisten laskentatapauksien laskeminen ei liene tarpeellista. Paras korrelaatio ja samalla havaintotuloksia parhaiten vastaavat käyrät on ilmeisesti löydetty silloin, kun kokonaiskorrelaatiokerroin seuraavassa laskentatapauksessa pienenee.

Konsolidaatiojännitys saadaan tämän jälkeen suoraan ratkaisemalla käyrien I ja II leikkauspiste.

Yleisessä tapauksessa konsolidaatiojännitys (σ_c) voidaan ratkaista iteroimalla.

Käytetään merkintöjä:

$$A_I = \frac{1}{m_I \beta_I} \quad A_{II} = \frac{1}{m_{II} \beta_{II}} \quad p = \frac{\sigma}{\sigma_v} \quad , \quad \text{jolloin}$$

kuormitus-kokoonpuristumakäyrän alku- ja loppuosa ovat:

$$\epsilon = A_I p^{\beta_I} + C_I$$

$$\epsilon = A_{II} p^{\beta_{II}} + C_{II}$$

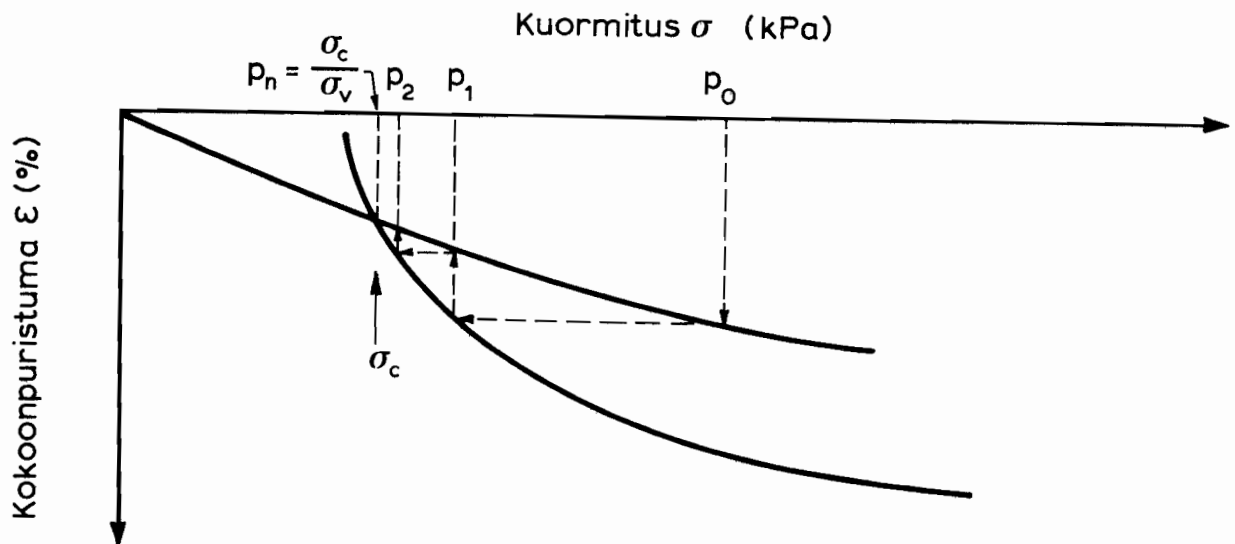
⇒

$$0 = A_I p^{\beta_I} - A_{II} p^{\beta_{II}} + C_I - C_{II}$$

Yhtälöparin ratkaisuksi saadaan:

$$\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_v} \right) = p = \left(\frac{A_I p^{\beta_I} + C_I - C_{II}}{A_{II}} \right)^{\frac{1}{\beta_{II}}} \quad (33)$$

Koska kaavassa (33) p esiintyy molemmilla puolilla yhtälöä, tapahtuu ratkaisu siten, että annetaan p :lle arvo (p_0). Kaavan (33) avulla ratkaistaan p :lle uusi arvo (p_1), joka sijoitetaan kaavaan p :n arvoksi. Ratkaistaan p :lle uusi arvo (p_2), joka sijoitetaan p :n paikalle, kunnes p :n ja samalla konsolidaatiojännityksen (σ_c) arvo on ratkaistu riittävän tarkasti. Yksittäistapauksessa voidaan ratkaisu suorittaa myös ilman iteraatioprosessia, mutta tietokonesovelluksena kaavan (33) muotoa olevan menetelmän käyttö on nopeaa ja vaivatonta.



Kuva 20. Iteraatioprosessin kulku konsolidaatiojännitystä σ_c määrittäessä.

Kuvasta 20 käy ilmi iteraatioprosessin kulku, kun ratkaistaan konsolidaatiojännitys (σ_c) kaavan (33) avulla.

3.2 Sekanttimoduulimenetelmä

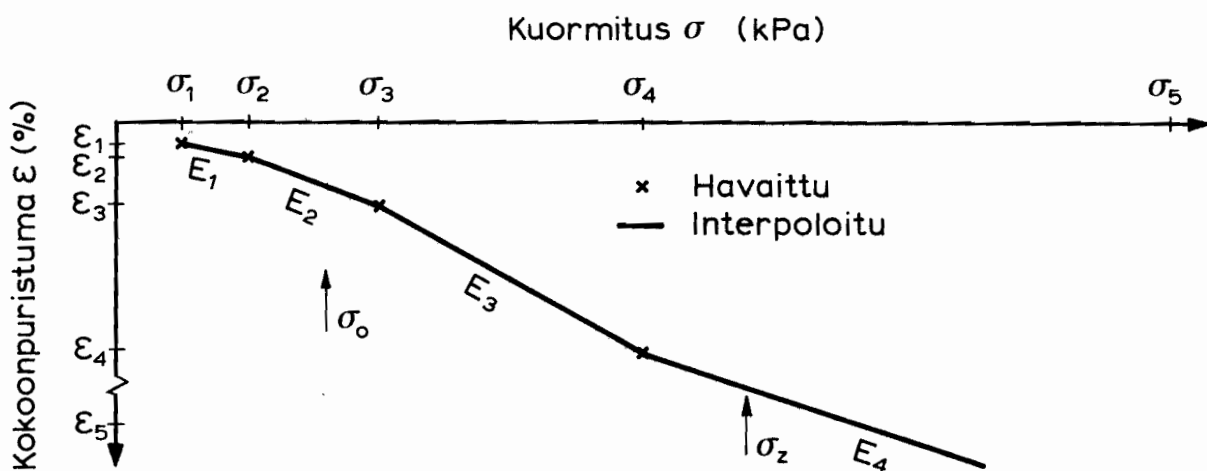
Seuraavassa esitetään yksinkertainen menetelmä, jossa ödometrikokeen havaintopisteitä käytetään suoraan painumien laske-
misessa. Tämän lisäksi väliarvot interpoloidaan tai ääritapauk-
sessa ekstrapoloidaan suoraviivaisesti (kuva 21). Myös logarit-
minen interpolaatio on mahdollinen. Menetelmästä käytetään täl-
löin nimitystä sekanttimoduulimenetelmä. Kun kuormitusportai-
den lukumäärä on pieni on tämän menetelmän käyttö perusteltua,
koska ero laboratoriokokeiden mukaisten havaittujen painumien
ja regressioanalyttisesti laskettujen painumien välillä saat-
taa muodostua suureksi. Lisäksi konsolidaatiojännityksen määrittäminen
joka saattaa olla erittäin ratkaiseva painumalaskelmissa, on
epätarkka kun havaintopisteitä on vähän. Sekanttimoduulimenetel-
mässä ei konsolidaatiojännitystä tarvitse määrittellä. Kaavamuo-
dossa asia voidaan esittää:

$$\Delta \varepsilon = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \sigma_i}{E_i} \quad (34)$$

$\Delta \varepsilon$ = suhteellisen kokoonpuristuman muutos (%/100)

$\Delta \sigma_i$ = kuormitusväli (kPa)

$$E_i = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i} = \text{sekanttimoduuli (kPa)}$$



Kuva 21. Sekanttimoduulimenetelmän mukainen kuormitus-kokoonpuristumakäyrä.

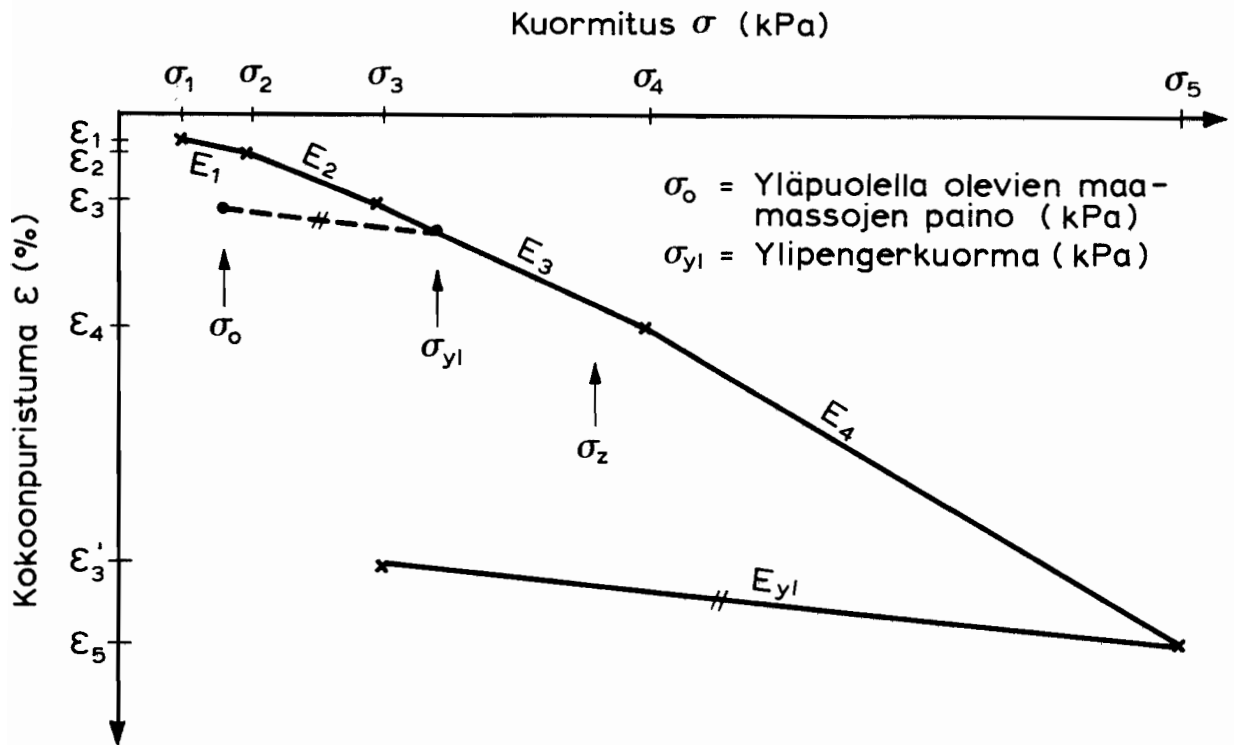
Kuvan 21 tapauksessa suhteelliseksi painumaksi tulee:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\sigma_3 - \sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma_4 - \sigma_3}{E_3} + \frac{\sigma_z - \sigma_4}{E_4}$$

$$E_2 = \frac{\sigma_3 - \sigma_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_2} \quad E_3 = \frac{\sigma_4 - \sigma_3}{\varepsilon_4 - \varepsilon_3}$$

$$E_4 = \frac{\sigma_5 - \sigma_4}{\varepsilon_5 - \varepsilon_4}$$

Kritiikkinä tätä menetelmää vastaan voidaan esittää, että ödometrikäyrän alkuosan pisteitä ei pitäisi käyttää, koska näyte on yleensä tällä alueella häiriintynyt. Toisaalta maapohja häiriintyy myös rakennusvaiheessa ja tämä vaikuttaa painumiskäyttäytymiseen. Menetelmää voidaan lisäksi laajentaa siten, että mahdollinen ylipengervaikutus voidaan ottaa laskelmissa huomioon. Tällöin tarvitaan myös palautuskuormitus (kuva 22).



Kuva 22. Ylipengervaikutuksen huomioon ottaminen sekanttimo-
duulimenetelmää käytettäessä.

Kuva 22 esittää tilannetta, jossa maapohjaa on esikuormitettu rakennuspaikalle tehdyllä sorakerroksella, jonka kuormitusvaikutus on ollut σ_{y1} . Kun ylimääräinen sora poistetaan, on jäljelle jäävän kuormituksen suuruus σ_0 . Jos maapohjaa esikuormituksen jälkeen kuormitaan arvoon σ_z , on painuma $\Delta\varepsilon$ kuvan 22 merkintöjä käyttäen.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sigma_{y1} - \sigma_0}{E_{y1}} + \frac{\sigma_z - \sigma_{y1}}{E_3}$$

$$E_{y1} = \frac{\sigma_5 - \sigma_3}{\varepsilon_5 - \varepsilon_3} \quad E_3 = \frac{\sigma_4 - \sigma_3}{\varepsilon_4 - \varepsilon_3}$$

Sekanttimoduulimenetelmässä käytetään ainoastaan ödometrikokeessa havaittuja kokoonpuristuman arvoja, joten se soveltuu rinnakkaiseksi laskentamenetelmäksi myös silloin kun lasketaan tangenttimoduulimenetelmällä.

3.3 Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä

Suhteellisen kokoonpuristuman muutos voidaan huokosluvun avulla ilmaista muodossa:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (35)$$

e_0 = alkuperäinen luonnollinen huokosluku

Δe = huokosluvun muutos

Toisaalta $\Delta\varepsilon$ voidaan ilmaista kuten aikaisemmin:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{M} \quad (36)$$

$\Delta\sigma$ = jännityksen muutos

M = kokoonpuristuvuusmoduuli

Kaavoista (35) ja (36) saadaan:

$$M = \frac{\Delta\sigma (1 + e_0)}{\Delta e} \quad (37)$$

Aikaisemmin on jo todettu, ettei kimmokerroin maassa ole vakio. Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä perustuu siihen ajatukseen, että kuormitus-huokoslukukäyrä puolilogaritmisessa

koordinaatistossa ($\log \sigma - e$) muuttuu suoraviivaiseksi, kun kuormitus on suurempi kuin esikuorma ($\sigma_z > \sigma_o$). Lisäksi oletetaan yleensä, että maa on normaalisti konsolidoitunut ($\sigma_c = \sigma_o$). Huokosluku voidaan näiden olettamustan perusteella kirjoittaa muotoon:

$$e = e_o - C_c \left[\log \sigma_z - \log \sigma_o \right]$$

$$e = e_o - C_c \log \frac{\sigma_z}{\sigma_o} \quad (38)$$

Huokosluku siis pienenee puolilogaritmisessa koordinaatistossa lineaarisesti. Tämän suoran "kulmakerroin", kokoonpuristuvuusindeksi C_c , on jännitystilasta riippumaton vakio.

Huokosluvun muutos voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\Delta e = e_o - e = C_c \log \frac{\sigma_z}{\sigma_o} \quad (39)$$

Sijoitetaan kaava (39) kaavaan (37), jolloin saadaan:

$$M = \frac{\Delta \sigma (1 + e_o)}{C_c \log \frac{\sigma_z}{\sigma_o}} \quad (40)$$

Sijoitetaan vielä kaava (40) kaavaan (36), jolloin painumat voidaan laskea kaavasta:

$$\Delta \varepsilon = \frac{C_c \log \frac{\sigma_z}{\sigma_o}}{(1 + e_o)} \quad (41)$$

Meikäläisiä koheesiomaalajeja silmällä pitäen Helenelund /3/ on kehittänyt C_c arvioimiseksi kaavan:

$$C_c = 0.85 \sqrt{w^3} \quad (42)$$

w = vesipitoisuus (%/100)

Jos vielä oletetaan, että maa on vedellä kyllästetty, jolloin $e_o = w \gamma_s / \gamma_w$, saadaan painumien arvioimiseen kaava (43), jossa maaperästä tarvitsee tietää ainoastaan vesipitoisuus sekä

jännityksen σ_o laskemiseksi maalajin tilavuuspaino.

$$\Delta \varepsilon = \frac{0,85 \sqrt{\frac{\sigma_o}{w^3}} \log \frac{\sigma_z}{\sigma_o}}{1 + \frac{w \gamma_s}{\gamma_w}}$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{0,85 \sqrt{w} \log \frac{\sigma_z}{\sigma_o}}{\frac{1}{w} + \frac{\gamma_s}{\gamma_w}}$$

γ_s = ominaispaino, jonka eloperäisiä maalajeja lukuun ottamatta voidaan olettaa olevan 26.5 kN/m^3

γ_w = huokosveden tilavuuspaino (= 10 kN/m^3)

$$\Delta \varepsilon = \frac{0,85 \sqrt{w} \log \frac{\sigma_z}{\sigma_o}}{\frac{1}{w} + 2.65} \quad (43)$$

w = vesipitoisuus (%/100)

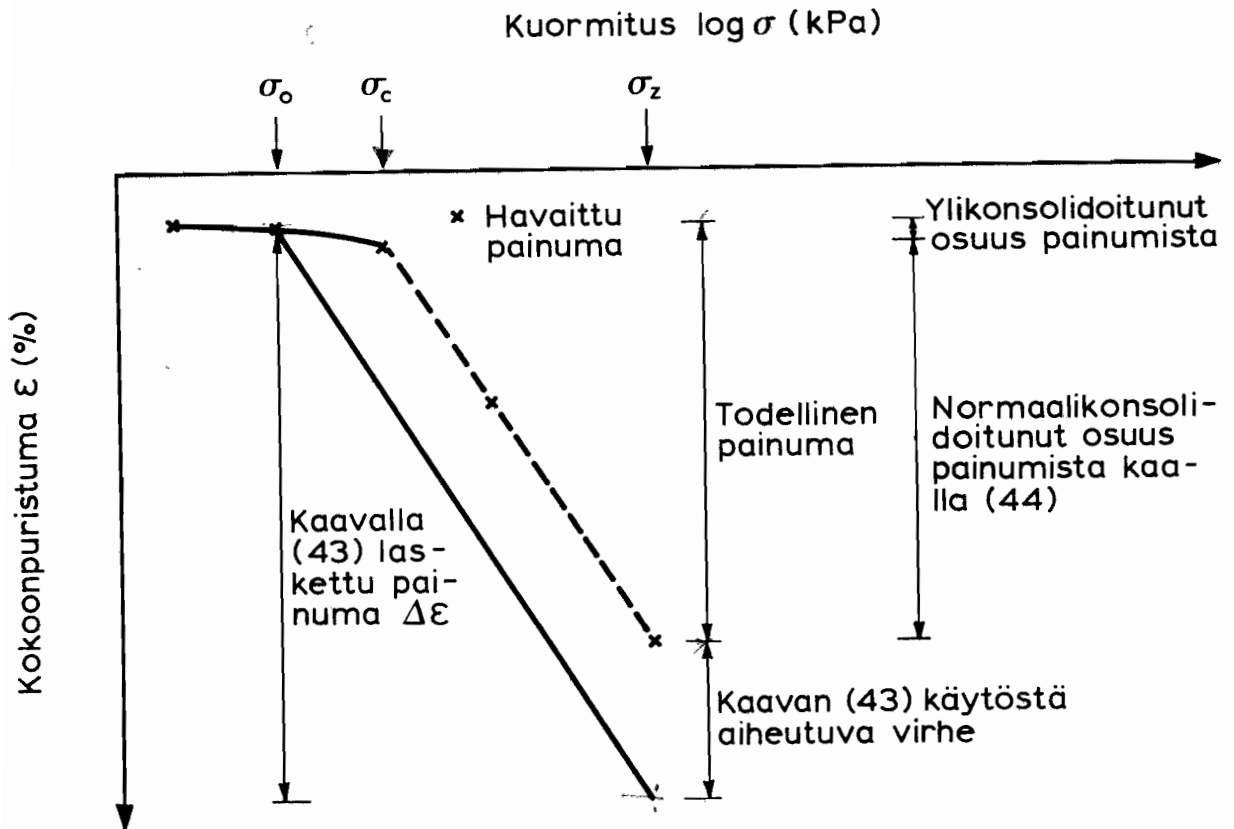
Kaavan (43) tuloksiin on kuitenkin suhtauduttava varauksellisesti kaavan johtamisessa tehtyjen yksinkertaistuksien vuoksi.

Ylikonsolidoituneessa maassa saadaan kaavalla (43) laskien liian suuret painumat, joten pyritään vielä tarkentamaan kaavaa.

Kuvasta 23 käy ilmi se virhe, mikä aiheutuu, jos kaavaa (43) sovelletaan ylikonsolidoituneeseen maahan.

Jotta tällä menetelmällä päästäisiin tarkempiin tuloksiin ylikonsolidoituneessa maassa, niin saatetaan kaava (43) muotoon (44):

$$\Delta \varepsilon = \frac{0,85 \sqrt{w} \log \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_c} \right)}{\frac{1}{w} + 2.65} \quad (44)$$



Kuva 23. Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän aiheuttama systemaattinen virhe ylikonsolidoituneessa maassa

Kaavalla (44) saadaan ns. normaalikonsolidoituneen alueen painuma. Tämä on yleensä riittävä arvio kokonaispainumista, sillä kokoonpuristuminen normaalikonsolidoituneella alueella on useimmiten huomattavasti suurempaa kuin ylikonsolidoituneella alueella. Lisäksi ylikonsolidoitunut osuus painumista tapahtuu yleensä jo rakennusaikana, jolloin painumista ei aiheudu vahinkoa.

Kaavalla (44) voidaan näin ollen arvioida myös ylipengerretyn maan painumia jättämällä ylikonsolidoitunut osuus painumista huomioon ottamatta.

3.4 Kalkkipilarien huomioon ottaminen painumissa

3.4.1 Kalkkipilarien toimintatapa

Kalkkipilareita ei harhaanjohtavasta nimestään huolimatta käsitellä pilareina, vaan niiden katsotaan toimivan kuten teräsket betonissa. Kalkkipilarit vahvistavat maata saven ja kalkkipilarien kimmokertoimien ja pinta-alojen suhteessa. Yksinkertaisimmassa tapauksessa voidaan stabiloinnin vaikutusta ottaa huomioon pelkästään maan kimmokertoimen muutoksena, jolloin korjatusta kimmokertoimesta käytetään nimitystä korotettu kimmokerroin. Kun tietty osa poikkileikkausta vahvistetaan kalkkipilareilla ja kun lisäksi tunnetaan maan ja kalkkipilarien kimmokertoimet, voidaan korotettu kimmokerroin laskea kaavasta (45). Tämän jälkeen painumat lasketaan tätä kimmokerrointa käyttäen samalla tavalla kuin ilman kalkkipilareita.

$$E_k = M \frac{A_m}{A'} + E_p \frac{A_p}{A'} \quad (45)$$

E_k = korotettu kimmokerroin (kPa)

M = maan kokoonpuristuvuusmoduuli (kPa)

E_p = kalkkipilarien kimmokerroin (kPa)

A' = poikkileikkauspinta-ala (m^2)

A_p = kalkkipilarien pinta-ala poikkileikkauksessa (m^2)

A_m = maan pinta-ala poikkileikkauksessa (m^2)

$$(A' = A_m + A_p)$$

Jos esimerkiksi kolmasosa poikkileikkauspinta-alasta vahvistetaan kalkkipilareilla, joiden kimmokerroin on kymmenkertainen maan vastaavaan kertoimeen verrattuna, niin kaavasta (45) saadaan korotetun kimmokertoimen arvoksi neljä kertaa alkuperäinen kimmokerroin. Mikäli maan ja kalkkipilarien kimmokertoimet ovat vakioita, niin edellä kuvattu stabilointi pienentäisi painumat neljänteen osaan.

Kalkkipilareilla ei siis saada perustuksia painumattomiksi, mutta niillä voidaan pienentää painumia sekä painumaeroja. Lisäksi kalkkipilarit hyvän vedenjohtavuutensa vuoksi toimivat tehokkaasti pystyjojina ja näin ollen myös nopeuttavat konsolidaatiopainumia. /1, 2/.

3.42 Kuormituksen jakautuminen maalle ja kalkkipilareille

Varsinainen painumien laskenta aloitetaan jakamalla tasainen kuormitus kalkkipilareille ja maalle:

$$q = \sigma_m \frac{A_m}{A'} + \sigma_p \frac{A_p}{A'} \quad (46)$$

q = tasainen kuormitus (kPa)

σ_m = jännitys maassa (kPa)

σ_p = jännitys kalkkipilareissa (kPa)

Käytetään merkintää $a = \frac{A_p}{A'}$ ja ratkaistaan maassa vallitseva jännitys:

$$q = \sigma_m \left((1-a) + \frac{\sigma_p}{\sigma_m} \cdot a \right)$$

$$q = \sigma_m \left((1-a) + \frac{E_p}{M} \cdot a \right)$$

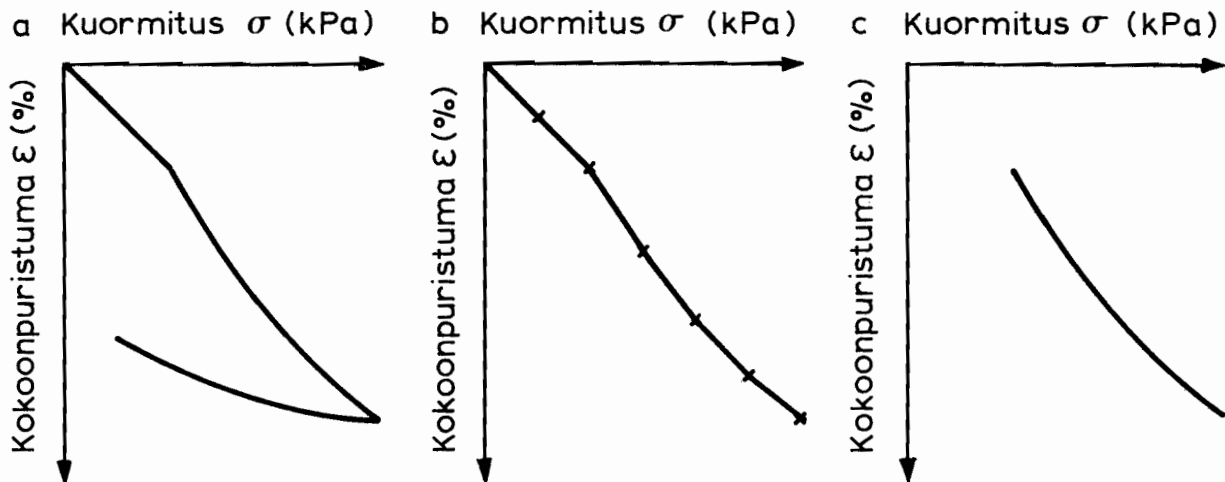
$$q = \sigma_m \left(1 + a \left(\frac{E_p}{M} - 1 \right) \right)$$

$$\sigma_m = \frac{q}{1 + a \left(\frac{E_p}{M} - 1 \right)} \quad (47)$$

Kaava (47) on vastaava kuin kaava (45), nyt vain on ratkaistu se kuormitus, joka jää maahan kun kalkkipilareihin on keskitynyt osa kuormituksesta.

Mikäli sovelletaan samaa esimerkkiä kuin aikaisemmin kaavaan (45), niin saadaan kuormitukseksi (σ_m) 1/4 luonnontilaisen maapohjan kuormituksesta, joka on vastaava kuin aikaisempi tulos.

Kaavan (47) käyttö ei ole kuitenkaan aivan näin yksinkertaista, koska moduulit M ja E_p eivät todellisuudessa ole vakioita. Maan kimmokertoimena voidaan käyttää kaavan (6) mukaista tangenttimoduulia, kaavan (34) mukaista sekanttimoduulia tai kaavan (40) mukaista kokoonpuristuvuusindeksiin perustuvaa moduulia. Kaikki edellä luetellut moduulit ovat jännitystilasta riippuvia muuttujia ja ne voidaan laskea halutulla kuormitusvälillä. Eri moduulien mukaiset kuormitus-kokoonpuristumakäyrät on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Maan kuormitus-kokoonpuristumakäyrä a. tangenttimoduuliin, b. sekanttimoduuliin ja c. kokoonpuristuvuusindeksiin perustuvan menetelmän mukaan.

3.43 Kalkkipilarien kuormitusten laskeminen

Lähdettäessä tarkastelemaan kalkkipilarien käyttäytymistä ratkaistaan pilarijännityksen (σ_p) arvo vastaavasti kuin maassa vallitseva jännitys (σ_m) tai suoraan kertomalla kaavan (47) mukainen maassa vallitseva jännitys kimmokertoimen suhteella (E_p/M):

$$\sigma_p = \sigma_m \cdot \frac{E_p}{M}$$

$$\sigma_p = \frac{q \cdot \frac{E_p}{M}}{1 + a \frac{E_p}{M} - a} \quad \sigma_p = \frac{q}{\frac{M}{E_p} (1-a) + a} \quad (48)$$

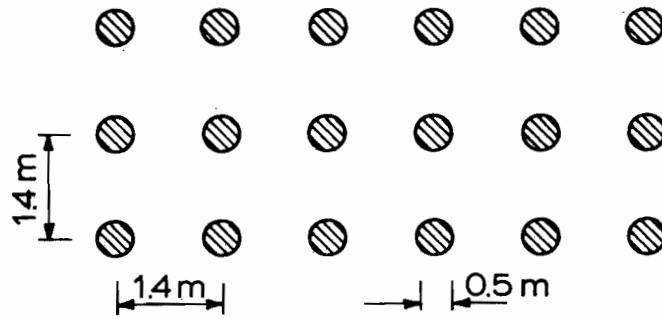
Lasketaan pilarijännityksen arvot kuvan 25 esimerkin tapauksessa.

Kun kalkkipilarien keskeltä keskelle väli on 1,4 m ja halkaisija 0,5 m, saadaan pilarisuhteen (a) arvoksi:

$$a = \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4 \cdot 1,4^2} = 0,10$$

Sijoitetaan myös moduulien M ja E arvot kaavaan (48), jolloin saadaan

$$\sigma_p = \frac{q}{0,05 (1 - 0,1) + 0,1} = \frac{q}{0,145}$$



$$M = 1000 \text{ kPa}$$

$$E_p = 20\,000 \text{ kPa}$$

$$q = 20, 25, 30, 35, 40 \text{ kPa}$$

Kalkkipilarikenttä

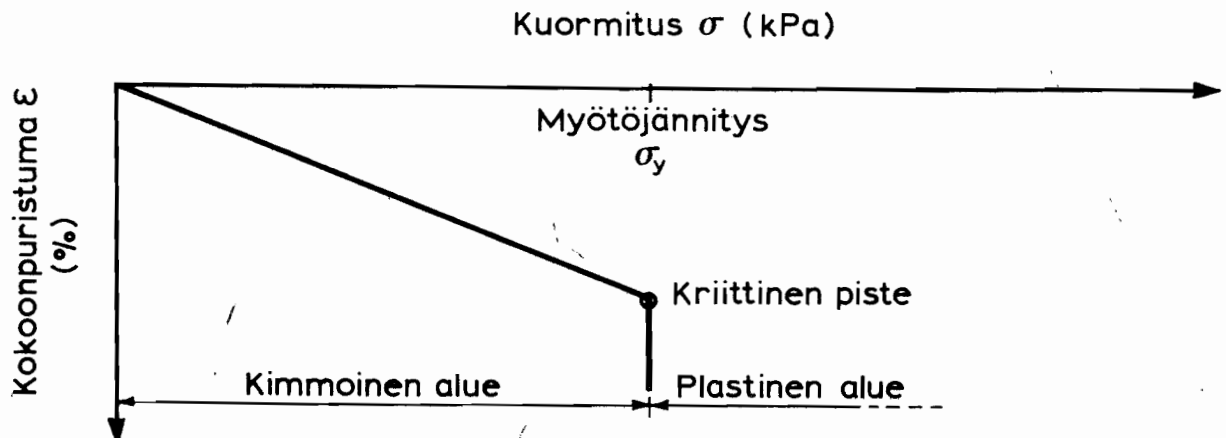
Kuva 25. Pilarikuormitusten laskemisesimerkki.

Pilarijännitysten ja edelleen pilarikuormien arvoksi saadaan erisuurilla kuormilla:

Taulukko 3. Laskentaesimerkin mukaiset pilarijännitykset ja kuormat laskettuna kaavalla (48).

q (kPa)	σ_p (kPa)	Q_p (kN)
20	138	27
25	172	34
30	207	41
35	241	47
40	270	54

Esimerkin mukaan pilarikuormat kasvaisivat jatkuvasti kokonaiskuorman kasvaessa. Muun muassa Suomessa tehtyjen kenttäkokeiden /5/ perusteella voidaan kuitenkin havaita, että pilarijännitys ei sanottavasti kasva tietyn suuruisen muodonmuutoksen tapahduttua. Tässä esityksessä kalkkipilarien kuormitus-koonpuristumakäyrä oletetaan kuvan 26 mukaiseksi.



Kuva 26. Kalkkipilarien oletettu kuormitus-kokoonpuristumakäyrä.

Kalkkipilarien oletetaan käyttäytyvän täysin kimmoisesti tiettyyn rajaan, nk. myötörajaan asti. Tämän jälkeen muodonmuutokset oletetaan täysin plastisiksi. Plastisessa tilassa pilarit ottavat vastaan vakiosuuruisen osan kokonaiskuormituksesta ja loppu jää maan kannettavaksi. Plastisessa tilassa olevaa kalkkipilarikenttää varten johdetaan kaava lähtemällä liikkeelle kaavasta (46). Nyt kuitenkin pilarijännityksellä (σ_p) on vakioarvo - myötöjännitys - josta käytetään merkintää σ_y .

$$q = \sigma_m \frac{A_m}{A'} + \sigma_y \frac{A_p}{A'} \quad (49)$$

σ_y = myötöjännitys (kPa)

Ratkaistaan maassa vallitseva jännitys (σ_m) kaavasta (49):

$$q = \sigma_m (1 - a) + \sigma_y a$$

$$\sigma_m = \frac{q - \sigma_y a}{1 - a} \quad (50)$$

Lasketaan maassa vallitseva jännitys kuvan 25 esimerkin tapauksessa sekä kaavalla (47) että kaavalla (50). Käytetään kalkkipilarien myötöjännitykselle (σ_y) arvoa 200 kPa.

Taulukko 4. Laskentaesimerkin mukaiset jännitykset maassa laskettuina kaavoilla (47) ja (50).

q (kPa)	σ_m (kPa)	
	kaava 44	kaava 47
20	7 *	0
25	9 *	6
30	10	11 *
35	12	17 *
40	14	22 *

3.44 Kriittinen kuormitus

Kun ratkaistaan kaavasta (48) tasainen kuormitus (q) ja merkitään $\sigma_p = \sigma_y$ saadaan:

$$q_{kr} = \sigma_y \left(\frac{M}{E_p} (1 - a) + a \right) \quad (51)$$

Tätä kuorman arvoa voidaan kutsua vaikka kriittiseksi kuormitukseksi, ja sillä tarkoitetaan sellaista kuormituksen arvoa, jolla kalkkipilareihin aiheutuu myötöjännitys.

Esimerkin tapauksessa saadaan tuoksi kriittiseksi kuormituksen arvoksi:

$$q_{kr} = 200 \left[0,05 (1 - 0,1) + 0,1 \right] = 29 \text{ kPa}$$

Näin ollen esimerkin tapaus on mitoitettava kimmoista tilaa vastaavalla kaavalla, kun kokonaiskuormitus on alle 29 kPa ja plastista tilaa vastaavalla kaavalla, kun tasainen kuormitus on suurempi kuin 29 kPa. Mikäli kuormituksen (q) suuruus on juuri tuo kriittinen 29 kPa, antavat molemmat kaavat saman tuloksen.

Edellä olevasta voidaan yhteenvedona todeta, että kalkkipilareilla stabiloitua maapohjaa mitoitettaessa on aina tiedettävä missä tilassa ko. kalkkipilarit ovat. Nk. myötörajamitotusta, jossa kalkkipilarien oletetaan ottavan vakiosuuruisen kuormituksen, voidaan käyttää vain mikäli olosuhteet ovat sellaiset, että pilareille voi kasautua tällainen kuormitus. Yksinkertaisimmin asia voidaan sanoa niin, että maalle jää kuormitus, jonka suuruus on kaavoilla (47) ja (50) saaduista arvoista suurempi.

Yleensä taloudelliseen mitoitukseen pyrittäessä käytetään kalkkipilareita mahdollisimman vähän. Olisi sen vuoksi mielenkiintoista tietää kuinka paljon kalkkipilareita olisi käytettävä, jotta niille saataisiin juuri ja juuri myötöjännitys. Näin on asian laita silloin, kun kaavoilla (47) ja (50) laskettu maalle jäävä jännitys on yhtä suuri (kuva 26).

$$\frac{q}{1 + a \left(\frac{E_p}{M} - 1 \right)} = \frac{q - \sigma_y a}{1 - a}$$

Kun yhtälöstä ratkaistaan a , saadaan ratkaisun $a = 0$ lisäksi arvo:

$$a_{kr} = \frac{\frac{q E_p}{M} - \sigma_y}{\sigma_y \left(\frac{E_p}{M} - 1 \right)} \quad (52)$$

Kaavalla (52) saadaan se pilarisuhteen arvo, jolla kalkkipilareihin aiheutuu juuri ja juuri myötökuormitus. Mikäli pilarisuhde on pienempi kuin kriittisen pilarisuhteen arvo, on mitoitus suoritettava plastista tilaa vastaavalla kaavalla ja kriittistä pilarisuhdetta suuremmalla a -arvolla puolestaan kimmoisen tilan kaavalla.

Otetaan esimerkki, jossa käytetään seuraavia alkuarvoja:

$$\begin{aligned} q &= 20 \text{ kPa} \\ E &= 20\,000 \text{ kPa} \\ p & \\ M &= 1000 \text{ kPa} \\ \sigma_y &= 200 \text{ kPa} \\ \emptyset &= 0,5 \text{ m} \end{aligned}$$

$$a_{kr} = \frac{20 \cdot 20 - 200}{200 \cdot 20 - 200} = 0,05$$

Tulos vastaa sellaista kalkkipilarikenttää, jossa pilarit on sijoitettu 2 m välein

Mikäli kalkkipilareita on tiheämmin kuin 2 m välein, niin myötörajamitoituksen eli plastista tilaa vastaavan mitoituksen käyttö on virheellistä.

Lasketaan a_{kr} arvo vielä sellaiselle tapaukselle, jossa alkuarvot ovat muuten samat kuin edellä, mutta maan kimmoduulilla on arvo 2000 kPa.

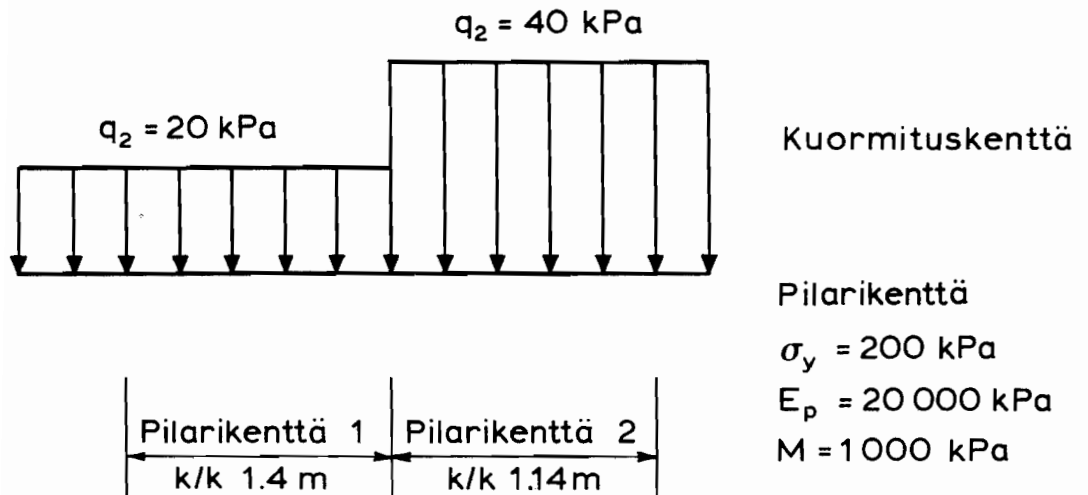
$$a_{kr} = \frac{20 \cdot 10 - 200}{200 \cdot 10 - 200} = 0$$

Tässä tapauksessa pilareille ei millään pilarivälillä saada myötökuormaa, joten mitoitus tapahtuu aina kimmoisen tilan kaavalla.

3.45 Painumien laskeminen ja tasoittaminen

Edellä esitetyn teorian soveltaminen käy helposti myös usein yhtäaikaisen erisuuruisen kuorman tapaukseen, jossa maapohjaa on lisäksi stabiloitu erilaisilla pilaritiheyksillä.

Tarkastellaan jälleen esimerkkiä (kuva 27).



Kuva 27. Esimerkki kahden yhtäaikaisen kuorman kuormittamasta maapohjasta, jossa on kahta pilaritiheyttä.

Ratkaistaan kriittinen pilarikuorma:

$$a_{kr1} = 0.05 \quad (\text{kaava } 52)$$

$$a_{kr2} = 0.16 \quad (\text{kaava } 52)$$

$$a_1 = \frac{(0.25)^2 \pi}{1.4^2} = 0.10 > a_{kr1} \quad \Rightarrow \text{elastinen}$$

$$a_2 = \frac{(0.25)^2 \pi}{1.14^2} = 0.15 < a_{kr2} \quad \Rightarrow \text{plastinen}$$

Pilarikentän 1 alueella maahan tuleva jännitys lasketaan kaavasta (47):

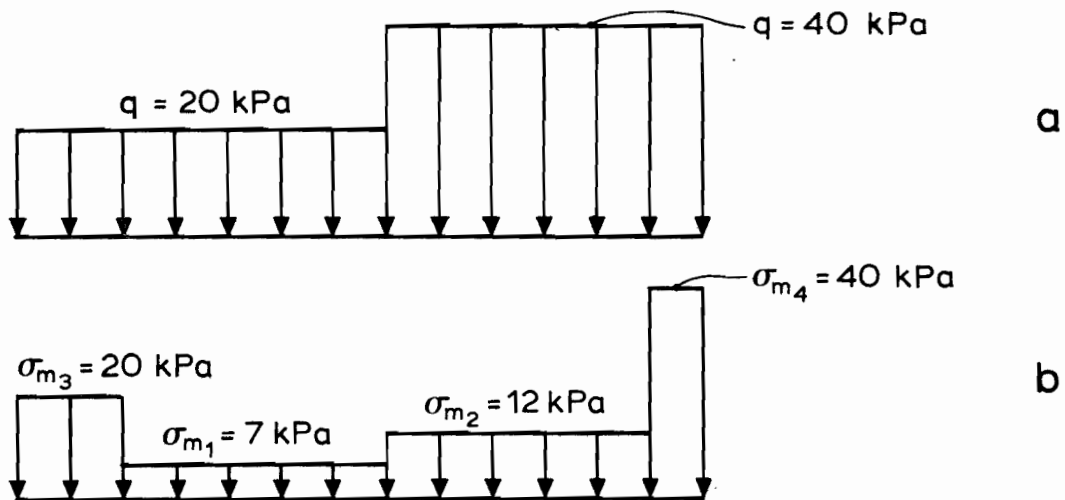
$$\sigma_{m1} = 7 \text{ kPa}$$

Pilarikentän 2 alueella maahan tuleva jännitys lasketaan kaavasta (50):

$$\sigma_{m2} = 12 \text{ kPa}$$

Kenttien reuna-alueita ei ollut stabiloitu, joten sinne jää alkuperäinen kuormitus. Painumien laskeminen tapahtuu tämän jälkeen, kuten stabiloimattomalle maapohjalle. Kuvan 28 a mukainen kuormituskenttä vain korvataan kuvan 28 b mukaisella.

Kuvan 28b mukainen kuormitus ei kuitenkaan ole painumia ajatellen edullisin mahdollinen. Kalkkipilarien sijoitus on iteratiivinen prosessi, joka on paras aloittaa sijoittamalla kalkkipilareita kriittistä pilarisuhdetta vastaava määrä.



Kuva 28. a. Alkuperäinen kuormituskaavio ja b. kalkkipilaristabiloinnin tuloksena maan kannettavaksi jäävä kuormitus.

Lasketaan kuvan 27 esimerkki uudestaan käyttämällä a_{kr} vastaavaa pilarimäärää.

$$a_1 = a_{kr1} = 0.05 \text{ (k/k = 1.93)} \Rightarrow \sigma_{m1} = 10 \text{ kPa}$$

$$a_2 = a_{kr2} = 0.16 \text{ (k/k = 1.12 m)} \Rightarrow \sigma_{m2} = 10 \text{ kPa}$$

Käyttämällä 20 kPa kuorman alueella pilarivälinä 1.93 m ja 40 kPa kuorman alueella 1.12 m jää maalle tasainen 10 kPa kuorma, joka on jo paljon edullisempi kuormitus. Taipuisa laatta pyrkii kuitenkin jännityksen jakautumisesta johtuen painumaan keskeltä enemmän kuin reunoilta. Seuraava vaihe iteraatiossa onkin painumien laskeminen eri pisteissä. Tämän jälkeen pilariväliä tiennetään siellä missä painumat ovat suurimmat tai vaihtoehtoisesti, mikäli kokonaispainumat eivät muodostu liian suuriksi, harvennetaan pilariväliä pienimpien painumien alueelta, jolloin painumaerot pienenevät.

- 4. TIETOKONESOVELLUTUS PAINUMIEN LASKEMISEKSI
- 4.1 Kuormitus-kokoonpuristumakäyrän ratkaisemiseksi laadittu ohjelma
- 4.11 Ohjelman yleiskuvaus

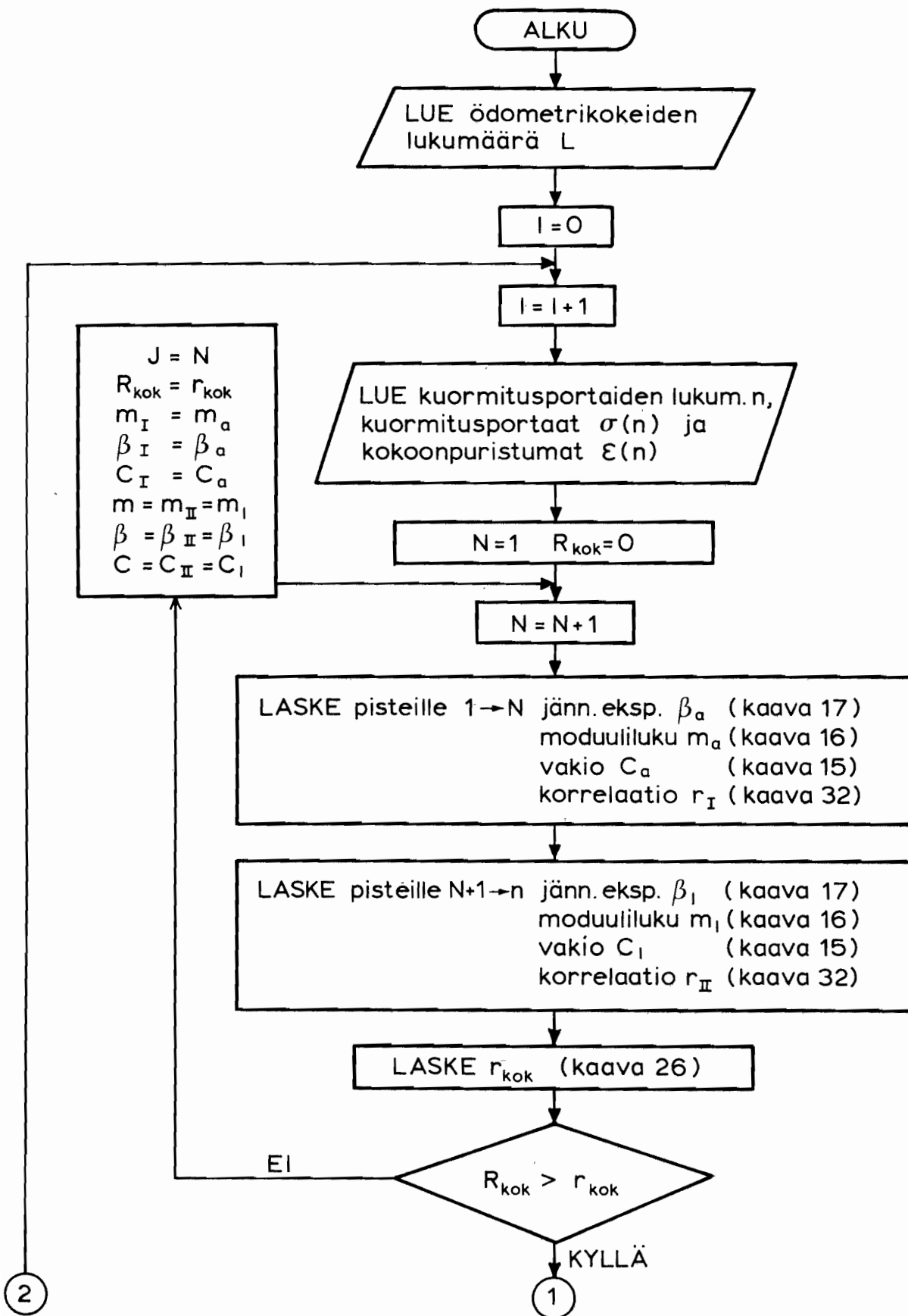
Laadittu tietokoneohjelma ratkaisee ödometrikokeen havaintopisteiden perusteella saven kuormitus-kokoonpuristumakäyttämisen kuvaamiseksi tarvittavat funktiot. Parametrien laskeminen suoritetaan kohdassa 3.141 ja 3.142 selostetulla menetelmällä. Konsolidaatiojännitys ratkaistaan kohdan 3.1432 periaatteiden mukaisesti.

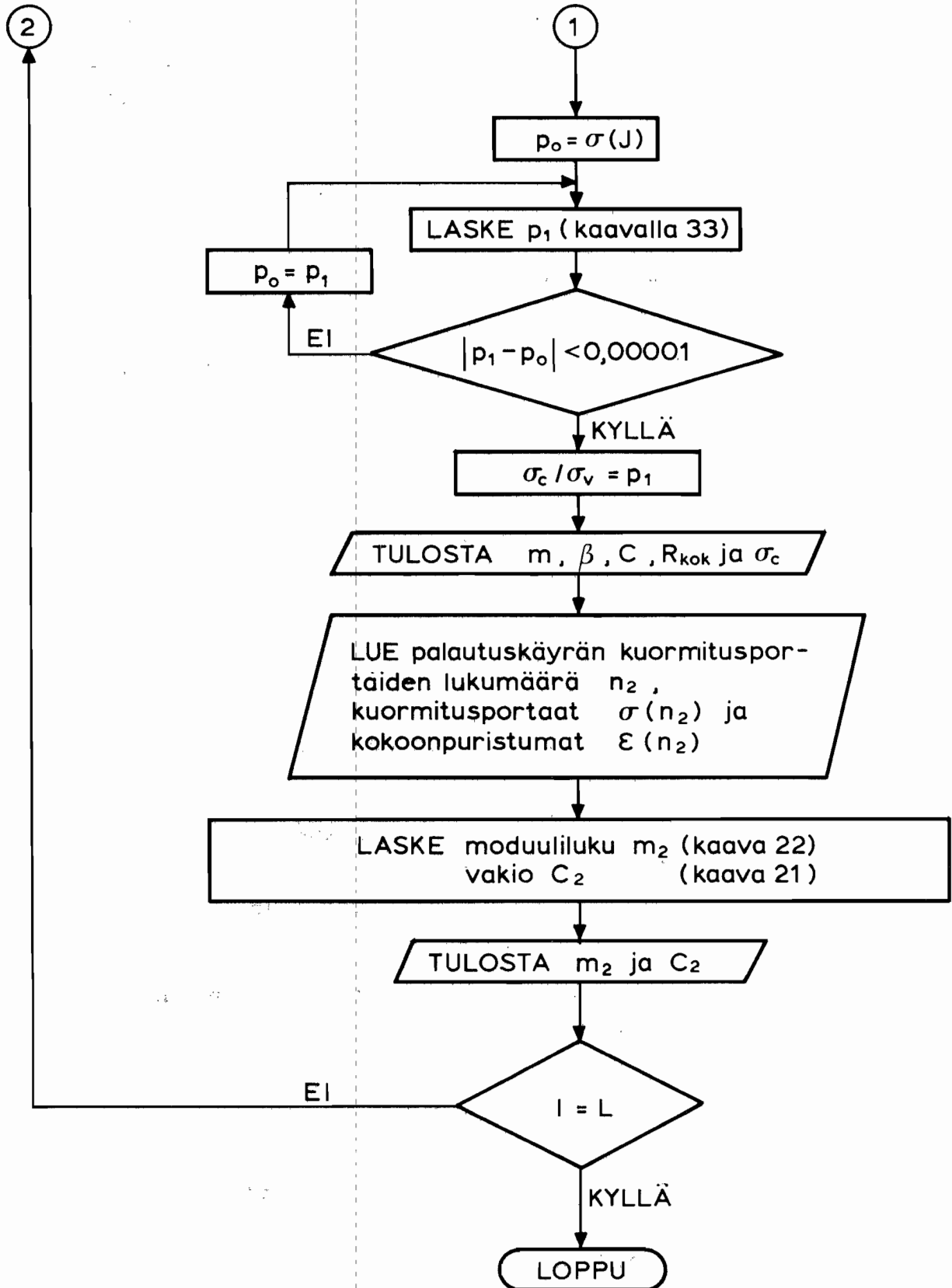
4.12 Ohjelman toimintaperiaatteet

Ohjelma ei ole niin sanottu keskusteleva ohjelma, vaan lähtötiedot annetaan DATA-lauseina. Ohjelma lukee kuormitusportaiden lukumäärän n , kuormitusportaat ja niitä vastaavat kokoonpuristumat, jonka jälkeen se jakaa havaintopisteet ensin osiin $1 \rightarrow 2$ ja $3 \rightarrow n$. Suureet m , β , C ja r lasketaan erikseen alku- ja loppuosan pisteille. Alku- ja loppuosan korrelaatiokerroimet yhdistää arvo r_{kok} . Tätä vaihetta toistetaan jakamalla pisteet seuraavaksi osiin $1 \rightarrow 3$ ja $4 \rightarrow n$ tämän jälkeen osiin $1 \rightarrow 4$ ja $5 \rightarrow n$ kunnes löydetään pistejoukkoa parhaiten kuvaavat käyrät.

Konsolidaatiojännitys löytyy näiden kahden käyrän leikkauspisteestä. Laskettujen arvojen tulostuksen jälkeen luetaan palautuskäyrän kuormitusportaat ja niitä vastaavat kokoonpuristumat. Lasketaan suureet m_2 ja C_2 . Kun edelliset on tulostettu palataan ohjelman alkuun niin monta kertaa, että kaikki lähtötietoina olevat ödometrikokeet on laskettu.

Ohjelman kulkua voidaan havainnollistaa kuvan 29 mukaisella lohkokaaviolla.





Kuva 29. Kuormitus-kokoonpuristumakäyrän ratkaisemiseksi laaditun ohjelman lohkoakaavio.

4.13 Yleisohjeet käyttäjälle

Alkuarvot annetaan DATA-lauseina. Tämä tapahtuu helpommin kun käytetään kuvan 30 mukaista alkuarvokaavaketta. Lauseiden numerot voi valita vapaasti 1 ja 2999 väliltä, kunhan vain järjestys säilyy seuraavana:

- 10 DATA Työn nimi (korkeintaan 8 merkkiä)
- 20 DATA Ödometrikokeiden lukumäärä
- 100 DATA Ensikuormitusvaiheen kuormitusportaiden lukumäärä ödometrikokeessa No 1
- 110 DATA Ensikuormitusvaiheen kuormitusportaot pienimmästä suurimpaan (kPa)
- 120 DATA Edellisiä vastaavat kokoonpuristumat (%)
- 130 DATA Palautusvaiheen kuormitusportaiden lukumäärä (sisältää ensimmäistä varsinaista palautuskuormitusta edeltävän kuormitusportaan)
- 140 DATA Palautusvaiheen kuormitusportaot suurimmasta pienimpään (kPa) (ensin se kuorma, josta palautus alkaa, sitten ensimmäinen varsinainen palautuskuormitus jne.)
- 150 DATA Edellisiä vastaavat kokoonpuristumat (%)
- 160 DATA Lasketun kuormitus-kokoonpuristumakäyrän pisteiden tulostusväli (kPa). Kuormitus-kokoonpuristumakäyrän pisteet tulostuvat halutulla välillä. Mikäli annetaan arvo, joka on pienempi tai yhtä suuri kuin 0 niin tämä vaihe sivutetaan.
- 200 DATA Ensikuormitusvaiheen kuormitusportaiden lukumäärä ödometrikokeessa No 2
- o
- o
- o

Kun edellä selostetut DATA-lauseet on kirjoitettu, haetaan ohjelma levymuistista komennolla:

```
LOAD DCF "ODOMETRI" return
```

10 DATA	Työn nimi	" [] [] [] [] [] [] [] [] "							
20 DATA	Ödometrikoikeita (kpl)	[]							
100 DATA	Kuormitusportaiden lukum.	[]							
110 DATA	Kuormitusportaot (kPa)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
120 DATA	Kokoonpuristumat (%)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
130 DATA	Palautusportaiden lukum.	[]							
140 DATA	Palautuskuormat (kPa)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
150 DATA	Palautusvaiheen kokoonp. (%)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
160 DATA	Tulostusväli (kPa)	[]							
200 DATA	Kuormitusportaiden lukum.	[]							
210 DATA	Kuormitusportaot (kPa)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
220 DATA	Kokoonpuristumat (%)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
230 DATA	Palautusportaiden lukum.	[]							
240 DATA	Palautuskuormat (kPa)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
250 DATA	Palautusvaiheen kokoonp. (%)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
260 DATA	Tulostusväli (kPa)	[]							
300 DATA	Kuormitusportaiden lukum.	[]							
310 DATA	Kuormitusportaot (kPa)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
320 DATA	Kokoonpuristumat (%)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
330 DATA	Palautusportaiden lukum.	[]							
340 DATA	Palautuskuormat (kPa)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
350 DATA	Palautusvaiheen kokoonp. (%)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
360 DATA	Tulostusväli (kPa)	[]							

Kuva 30. Alkuarvokaavake "ODOMETRI"-ohjelmaa varten.

Ohjelman toiminta alkaa käskyllä:

RUN return

Ohjelma toimii tämän jälkeen ilman ohjausta loppuun asti. Tulostuksena saadaan kohdassa 4.31 esille tulevan laskentaesimerkin mukainen listaus.

4.2 Painumien laskemiseksi laadittu ohjelma

4.21 Ohjelman yleiskuvaus

Laadittu tietokoneohjelma laskee pehmeiköille perustettavien rakenteiden konsolidaatiopainumat. Kuormituskenttien aiheuttama jännitysjakautuma ratkaistaan kohdassa 2.2 esitetyn teorian mukaan. Maapohja kuvataan kolmiulotteisella maastomallilla, jossa pohjasuhteet annetaan kairauspisteittäin. Laskentapistteiden kerrosrajat interpoloidaan tai ääritapauksessa ekstrapoloidaan neljästä lähimmästä kairauspisteestä. Painumat lasketaan joko yhdellä tai useammalla kohdissa 3.1, 3.2, 3.3 ja 3.4 esitetyistä menetelmistä.

4.22 Ohjelman toimintaperiaatteet

Ohjelman lähtötiedot annetaan suurimmalta osin DATA-lauseina. Ajon aikana ohjelma tekee lisäksi kysymyksiä, joihin vastataan kuvaputkelle tulevan ohjeen mukaisesti. Näissä INPUT-lauseissa vastataan ohjelman tulostustapaa (kuvaruutu/lämpökirjoitin), interpolaation suoritustapaa (suoraviivainen/logaritminen) sekä kalkkipilarikenttien rajoja ja tiheyksiä koskeviin kysymyksiin.

Ohjelman alussa luetaan alkuarvoina olevat DATA-lauseet. Nämä tiedot tulostetaan sanallisilla selityksillä varustettuina.

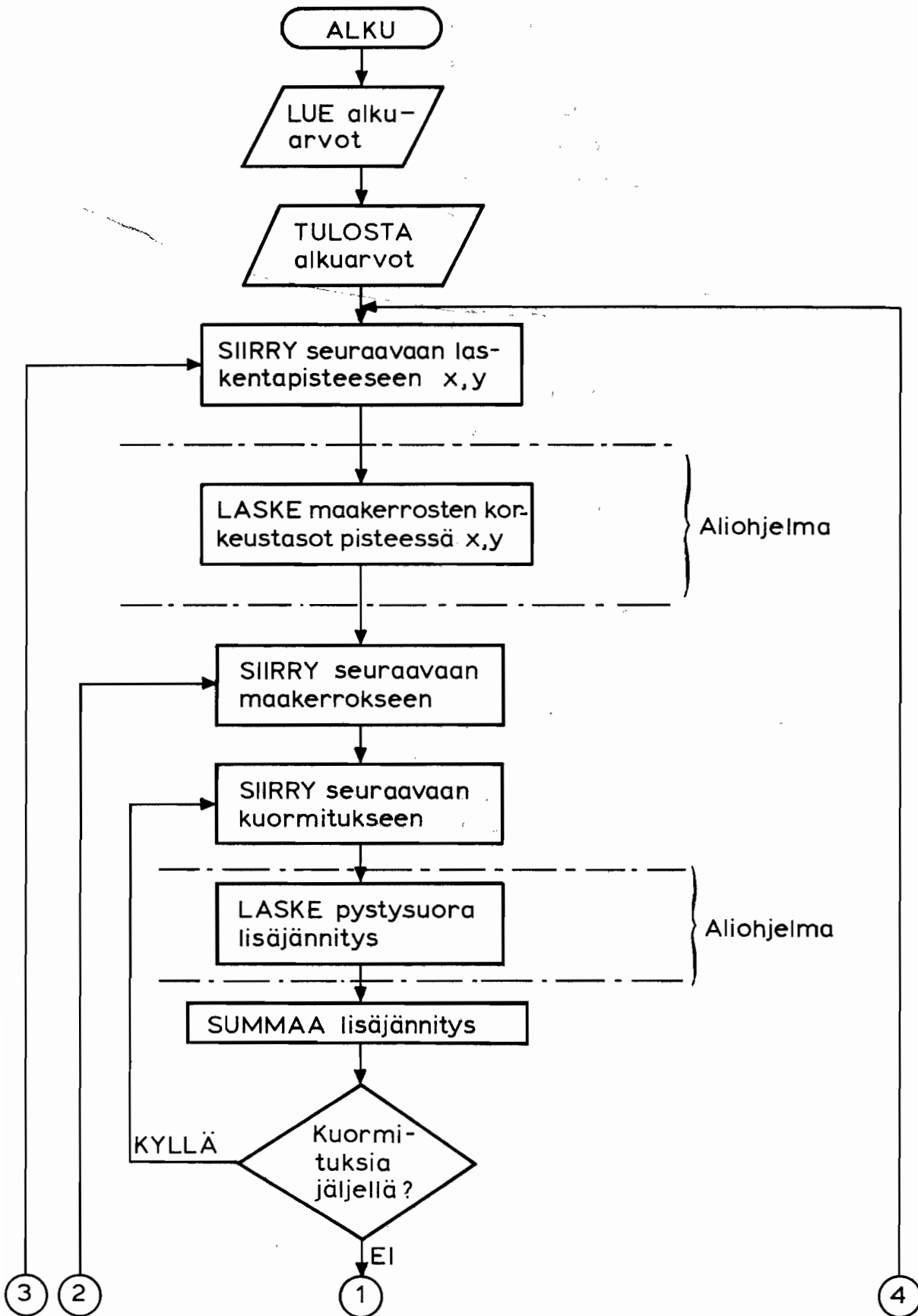
Ohjelma etenee laskentapistteittäin. Ensin määritetään maakerrosten korkeustasot laskentapistteessä. Näitä tietoja tarvitaan kerrospaksuuksien ja kerrosten sijainnin määrittämisessä. Painumat lasketaan kerroksittain. Kaikkien kuormien yhteisvaikutus so. lisäjännitys $\Delta\sigma_z$ lasketaan lamellin keskikorkeudella, kuten myös yläpuolisten maamassojen paino σ_o .

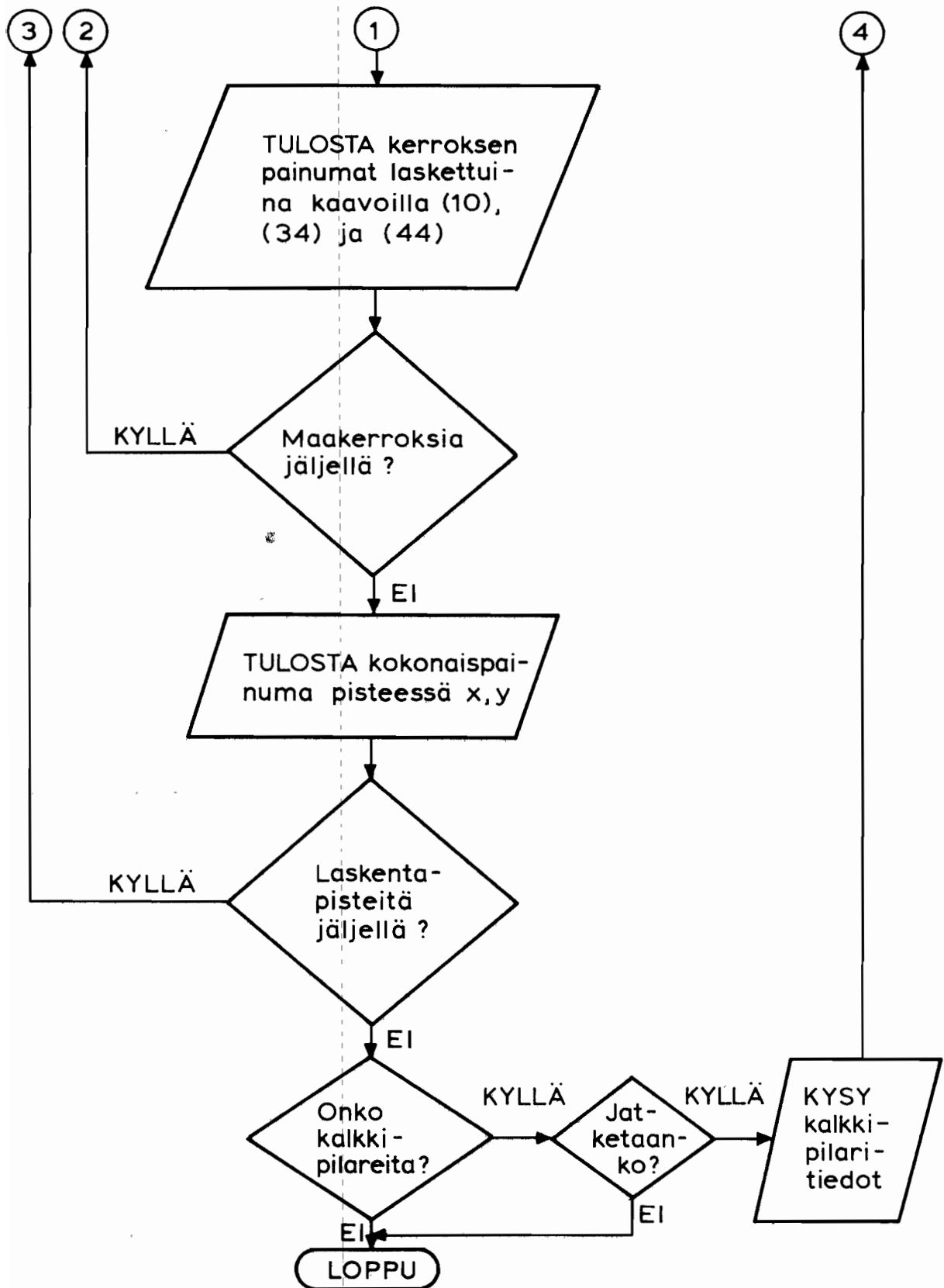
Lähtötietojen mukaan painuman suuruus lasketaan joko yhdellä tai useammalla seuraavista menetelmistä:

- tangenttimoduulimenetelmä
- sekanttimoduulimenetelmä
- kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä
- menetelmällä, joka ottaa huomioon kalkkipilarien vaikutuksen.

Laskenta suoritetaan kuitenkin aina ensin jollakin tai joillakin kolmesta ensin mainitusta menetelmästä.

Tämän jälkeen, mikäli lähtötiedoissa on kalkkipilarien käyttöä osoittava tunnus, ohjelma laskee painumat myös ottamalla kalkkipilarien vaikutuksen huomioon. Tämä prosessi alkaa siten, että ohjelma laskee kullekin kuormituskentälle kriittistä pilarisuhdetta vastaavat kalkkipilarimäärät ellei kalkkipilaritietoja haluta heti määrätä käsin, ja laskee painumat annetuissa pisteissä uudestaan. Tämän jälkeen ohjelma kysyy käyttäjältä, haluaako tämä muuttaa ohjelman laskemia tai käyttäjän itsensä antamia kalkkipilarikenttien rajoja ja tiheyksiä. Käyttäjän antamien tietojen mukaan lasketaan painumat uudestaan ja jatketaan tätä iteraatiomenettelyä, kunnes päästään haluttuihin painumiin ja painumaeroihin. Painumaohjelman kulkua voidaan havainnollistaa kuvan 31 mukaisella karkean tason lohkokaaaviolla.





Kuva 31. Painumien laskemiseksi laaditun ohjelman lohkokaavio.

4.23 Yleisohjeet käyttäjälle

Myös painumien laskemista varten on laadittu alkuarvokaavake (kuva 34), johon DATA-tiedot on helppo kirjoittaa oikeassa järjestyksessä. DATA-lauseille on varattu rivinumerot 1 → 2999.

Alkuarvojen sisältö, sikäli kun se ei käy ilmi alkuarvokaavakkeesta, selvitetään seuraavassa:

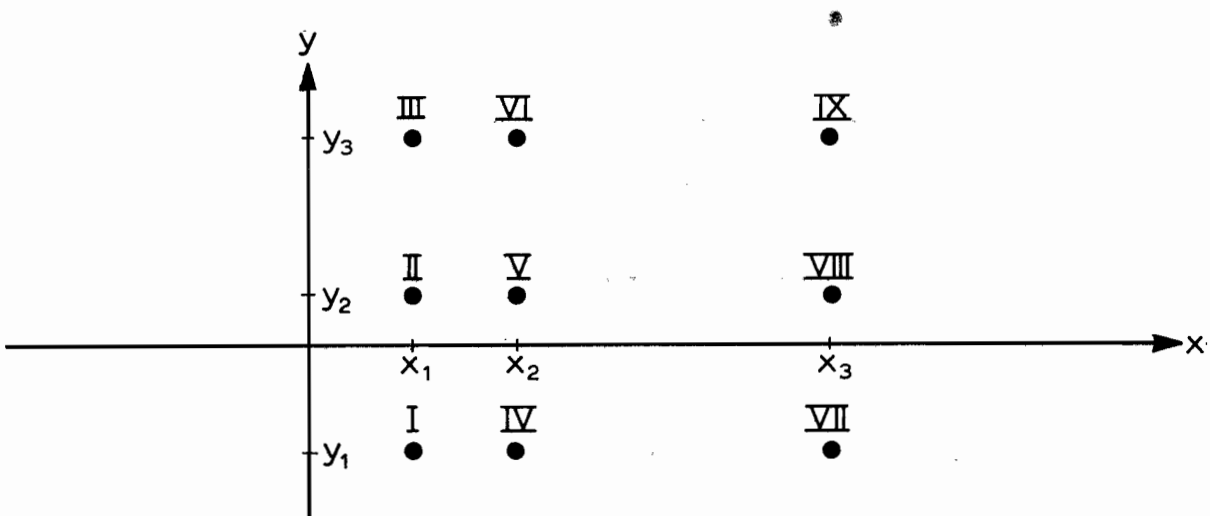
10 DATA Työn nimi (korkeintaan 8 merkkiä)

20 DATA Maastomallin x-koordinaattien lukumäärä

30 DATA x-koordinaatit pienimmästä suurimpaan (kuva 32)

40 DATA Maastomallin y-koordinaattien lukumäärä

50 DATA y-koordinaatit pienimmästä suurimpaan (kuva 32)



Kuva 32. Koordinaattien sekä kairauspistetietojen antamisjärjestys.

60 DATA Maakerrosten lukumäärä (N)

70 - Maakerrosrajat ylhäältä alaspäin (N + 2 kpl) Ensimmäinen

150 DATA maanpinta, sitten ylimmän kerroksen alapinta ... alimman kerroksen alapinta ja viimeisenä kuormituseli perustamistaso. HUOM. yläpuolisten maamassojen paino (σ_0) lasketaan maanpinnasta, mutta lisäjännityksen ($\Delta\sigma_z$) suuruus lasketaan kuormitustasosta lähtien. Maakerrosrajat annetaan pisteittäin kuvan 32

mukaisessa järjestyksessä (I, II, III ...). Rivillä 70 annetaan maakerros- ja kuormitustasot pisteestä I, rivillä 80 pisteestä II ...

160 DATA Maakerrosten tehokkaat tilavuuspainot (kN/m^3). Tilavuuspainot, kuten myös kaikki muut maakerrosominaisuudet annetaan aina ylhäältä alaspäin.

170 DATA Tällä rivillä annetaan tiedot siitä, millä menetelmällä tai menetelmillä painumat lasketaan. Eri menetelmien symbolit ovat:

$M \hat{=}$ tangenttimoduulimenetelmä

$O \hat{=}$ sekanttimoduulimenetelmä, jossa painumat lasketaan suoraan ödometrikokeessa havaittujen kokoonpuristumien perusteella

$V \hat{=}$ kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä, jossa käytetään vesipitoisuuteen perustuvaa likiarvokaavaa

$k \hat{=}$ kalkkipilareiden vaikutuksen huomioon ottava menetelmä.

Ödometrikokeessa havaittujen pisteiden väli on mahdollista interpoloida joko suoraviivaisesti tai logaritmisesti, joten mikäli tällä rivillä on tunnus sekanttimoduulimenetelmän käytöstä, niin kuvaputkelle ilmestyy kysymys: "SUORAVIIIVAINEN VAI LOGARITMINEN INTERPOLAATIO ?" Tähän kuten kaikkiin muihinkin ohjelman esittämiin kysymyksiin vastataan kirjoittamalla sana, jonka ensimmäinen kirjain on sama kuin halutussa vaihtoehdossa, siis esimerkiksi joku seuraavista:

SUORAVIIIVAINEN return

SUORAV return

S return

180 - Seuraavat ominaisuudet maakerroksittain, mikäli rivillä 170 on tunnus M: $m, \beta, m_2, \beta_2, \sigma_c$ (kPa)

230 DATA

240 - Mikäli on käytetty tunnusta 0, niin annetaan maaker-
410 DATA roksittain:

- kuormitusportaiden lukumäärä
- kuormitusportaot (kPa) ja
- kokoonpuristumat (%)

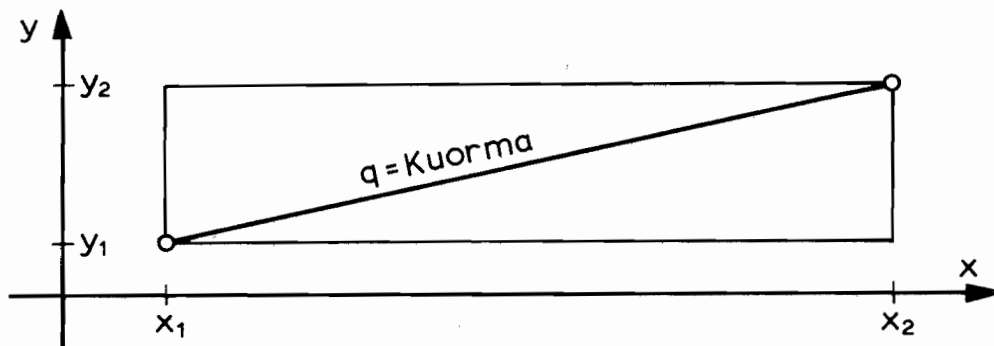
420 - Mikäli on käytetty tunnusta V, niin annetaan maaker-
470 DATA roksittain:

- vesipitoisuus (%) ja mahdollinen ylikonsolidoi-
 tuminen so. $(\sigma_c - \sigma_o)$ kPa, vrt. kaavat (43) ja (44).

480 DATA Kuormien lukumäärä

490 - Kustakin kuormasta annetaan kuvan 33 mukaiset tiedot:

680 DATA x_1, y_1, x_2, y_2, q (kPa)



Kuva 33. Kuormista annetaan positiivisen halkaisijan päätepisteet ja kuorman suuruus.

690 DATA Laskentapisteiden lukumäärä

700 - Laskentapisteiden koordinaatit (x,y) , joissa painumat

790 DATA halutaan laskea

Ohjelma haetaan levymuistista komennolla:

```
LOAD DCF "PAINUMAT" return
```

Ohjelman toiminta alkaa käskyllä:

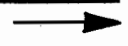
```
RUN return
```

Alkuarvojen tulostus määräytyy sen mukaan mitä ohjelman esittä-
 tämään kysymykseen - LAMPOKIRJOITIN VAI KUVARUUTU ?" - vasta-
 taan. Laskelmat sen sijaan tulostuvat aina lämpökirjoittimelle.

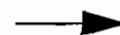
ALKUARVOT PAINUMIEN LASKEMISEKSI LAADITTUUN OHJELMAAN

1 (3)

10 DATA	Työn nimi	" [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] "										
20 DATA	Maastomallin x-koordinaat- tien lukumäärä	[]										
30 DATA	x-koordinaatit (pienimäs- tä suurimpaan)	[]	[]	[]	[]							
40 DATA	y-koord. lukumäärä	[]										
50 DATA	y-koordinaatit (pienimäs- tä suurimpaan)	[]	[]	[]	[]							
60 DATA	Maakerrosten lukumäärä	[]	Maan- pinta	Kerr. 1 alap.	Kerr. 2 alap.	Kerr. 3 alap.	Kerr. 4 alap.	Kerr. 5 alap.	Kerr. 6 alap.	Kuormitus- pinta		
70 DATA	Maakerrosrajat + per. t.											
80 DATA	_____ " _____											
90 DATA	_____ " _____											
100 DATA	_____ " _____											
110 DATA	_____ " _____											
120 DATA	_____ " _____											
130 DATA	_____ " _____											
140 DATA	_____ " _____											
150 DATA	_____ " _____											
160 DATA	Tilavuuspainot (kN/m ³)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
170 DATA	Painumisominaisuudet	" M O V K "				RENGASTA OIKEAT VAIHTOEHDOT						
180 DATA	$m, \beta, m_2, \beta_2, \sigma_c$ (kPa)	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
190 DATA	_____ " _____											
200 DATA	_____ " _____											
210 DATA	_____ " _____											
220 DATA	_____ " _____											
230 DATA	_____ " _____											



240 DATA	Kuormitusportaiden lukum.	<input type="checkbox"/>	Maakerros no 1							
250 DATA	Kuormitusportaati (kPa)									
260 DATA	Kokoonpuristumat (%)									
270 DATA	Kuormitusportaiden lukum.	<input type="checkbox"/>	Maakerros no 2							
280 DATA	Kuormitusportaati (kPa)									
290 DATA	Kokoonpuristumat (%)									
300 DATA	Kuormitusportaiden lukum.	<input type="checkbox"/>	Maakerros no 3							
310 DATA	Kuormitusportaati (kPa)									
320 DATA	Kokoonpuristumat (%)									
330 DATA	Kuormitusportaiden lukum.	<input type="checkbox"/>	Maakerros no 4							
340 DATA	Kuormitusportaati (kPa)									
350 DATA	Kokoonpuristumat (%)									
360 DATA	Kuormitusportaiden lukum.	<input type="checkbox"/>	Maakerros no 5							
370 DATA	Kuormitusportaati (kPa)									
380 DATA	Kokoonpuristumat (%)									
390 DATA	Kuormitusportaiden lukum.	<input type="checkbox"/>	Maakerros no 6							
400 DATA	Kuormitusportaati (kPa)									
410 DATA	Kokoonpuristumat (%)									
420 DATA	Vesipit. (%), $\sigma_c - \sigma_o$ (kPa)									
430 DATA	— " — — " —									
440 DATA	— " — — " —									
450 DATA	— " — — " —									
460 DATA	— " — — " —									
470 DATA	— " — — " —									



3(3)

480 DATA	Kuormien lukumäärä		x ₁	y ₁	x ₂	y ₂	q (kPa)
490 DATA	Kuorma 1						
500 DATA	— " — 2						
510 DATA	— " — 3						
520 DATA	— " — 4						
530 DATA	— " — 5						
540 DATA	— " — 6						
550 DATA	— " — 7						
560 DATA	— " — 8						
570 DATA	— " — 9						
580 DATA	— " — 10						
590 DATA	— " — 11						
600 DATA	— " — 12						
610 DATA	— " — 13						
620 DATA	— " — 14						
630 DATA	— " — 15						
640 DATA	— " — 16						
650 DATA	— " — 17						
660 DATA	— " — 18						
670 DATA	— " — 19						
680 DATA	— " — 20						
690 DATA	Laskentapisteiden lukum.		x	y			
700 DATA	Laskentapiste 1						
710 DATA	— " — 2						
720 DATA	— " — 3						
730 DATA	— " — 4						
740 DATA	— " — 5						
750 DATA	— " — 6						
760 DATA	— " — 7						
770 DATA	— " — 8						
780 DATA	— " — 9						
790 DATA	— " — 10						

Kuva 34. Alkuarvokaavake "PAINUMAT"-ohjelmaa varten.

Mikäli laskentapiste sijaitsee maastomallin ulkopuolella, niin tämän pisteen maakerrosrajat ekstrapoloidaan neljästä lähimmästä pohjatietopisteestä. Tästä huolimatta ohjelma antaa huomautuksen joka kerran kun laskentapiste on maastomallin ulkopuolella, jottei tämä johtuisi ohjelman käyttäjän tekemästä virheestä koordinaattien määrittämisessä. Huomautuksen jälkeen ohjelma jatkaa laskemista normaaliin tapaan.

4.3 Laskentaesimerkkejä

4.31 Kuormitus-kokoonpuristumakäyrä

Seuraavassa esitetään erään ödometrikokeen kuormitus-kokoonpuristumakäyrän määrittäminen. Tämä näyte on otettu Helsingistä, Malmin kaupunginosasta. Kuvassa 35 on esitetty tämän koesarjan mukaiset kuormitukset ja niitä vastaavat kokoonpuristumat. Ne näkyvät myös ohjelman tulosliuskassa (kuva 36).

10 DATA	Työn nimi	" 0 2 0 - 2 0 1 1 "							
20 DATA	Ödometrikokeita (kpl)	/							
100 DATA	Kuormitusportaiden lukum.	8							
110 DATA	Kuormitusportaat (kPa)	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	100
120 DATA	Kokoonpuristumat (%)	1,05	1,80	3,25	6,53	10,5	13,18	15,33	17,10
130 DATA	Palautusportaiden lukum.	2							
140 DATA	Palautuskuormat (kPa)	100	25						
150 DATA	Palautusvaiheen kokoonp. (%)	17,10	16,15						
160 DATA	Tulostusväli (kPa)	10							

Kuva 35. Esimerkkiajon alkuarvot.

Tietokoneohjelma toimii aikaisemmin esitetyllä periaatteella siten, että havaintotulokset jaetaan kahteen osaan ja sovitaan kumpaankin pistejoukkoon niitä parhaiten kuvaava kaavan (9^b)muotoa oleva käyrä pienimmän neliösumman menetelmällä (kaavat 15, 16 ja 17). Paras kokonaiskorrelaatio (0,999) on saavu-

tettu, kun pisteet 12.5 → 37.5 on otettu alkuosalle ja loput 50 → 100 varsinaiselle normaalikonsolidoituneelle käyrän osalle. Tulosliuskassa tästä jaosta on merkinä katkoviiva. Korrelaatiot on laskettu kaavalla (32) ja kokonaiskorrelaatio kaavalla (26).

Konsolidaatiojännitys (σ_c) ja sitä vastaava kokoonpuristuma (ϵ_c) on tämän jälkeen määritetty laskemalla kuormitus-kokoonpuristumakäyrän alku- ja loppuosan käyrien leikkauspiste kaavalla (33).

Palautuskäyrän tunnusluvut saadaan kaavoista (21) ja (22).

Ohjelma laskee lisäksi halutun määrän pisteitä eri käyriltä piirtämistä varten. Kuvaan 37 on piirretty sekä havaitut kokoonpuristuman arvot että niiden perusteella laskettujen käyrien kuvaajat.

Yhteenveto tämän kokeen antamista tuloksista on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Konsolidaatiopainuman laskemista varten selvitetävät tiedot.

Normaalikons. (NK)		Ylikons. (YK) m_2	Yläpuolisten maamassojen paino σ_0 (kPa)	Kons. jänn. σ_c (kPa)
m	β			
8.704	-0.777	145.925	25.68	45.51

 GEOMETRIKOE NO 1

TYÖN NIMI : ODO-2011

M= 8.704 BEETTA=-0.777 C= 0.3183

KALKUOSA M= 1.907 BEETTA= 2.299 C= 0.0085

SIGMA(KPA)	EPSILON TOD. (%)	EPSILON LASK. (%)
12.50	1.05	1.04
25.00	1.80	1.79
37.50	3.25	3.24

50.00	6.53	6.50
62.50	10.50	10.54
75.00	13.48	13.35
87.50	15.33	15.44
100.00	17.10	17.06

KORPELAATIO=0.999

SIGMA C= 45.51 KPA
 EPSILON C= 4.58 %

PALAUTUS M2=145.925 (BEETTA2= 0) C2= 0.1710

SIGMA(KPA)	EPSILON TOD. (%)	EPSILON LASK. (%)
100.00	17.10	17.10
25.00	16.15	16.15

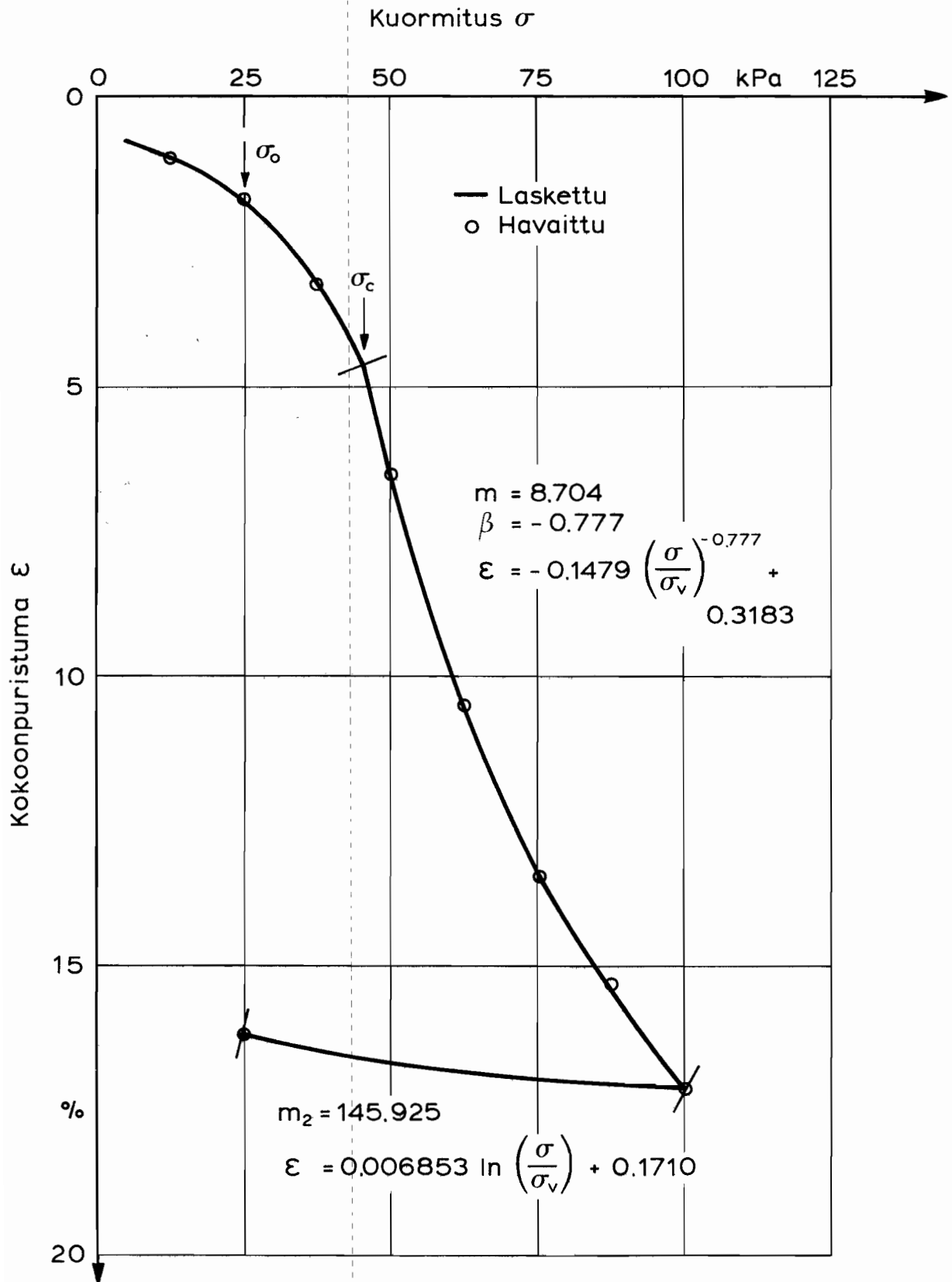
KUORMITUS-KOKOONPURISTUMAKÄYRÄ

SIGMA(KPA)	EPSILON LASK. (%)
10.00	0.97
20.00	1.42
30.00	2.28
40.00	3.62

50.00	6.50
60.00	9.85
70.00	12.33
80.00	14.26
90.00	15.79
100.00	17.06

100.00	17.10
80.00	16.94
60.00	16.74
40.00	16.47

Kuva 36. Esimerkkiajon tulosliuska.



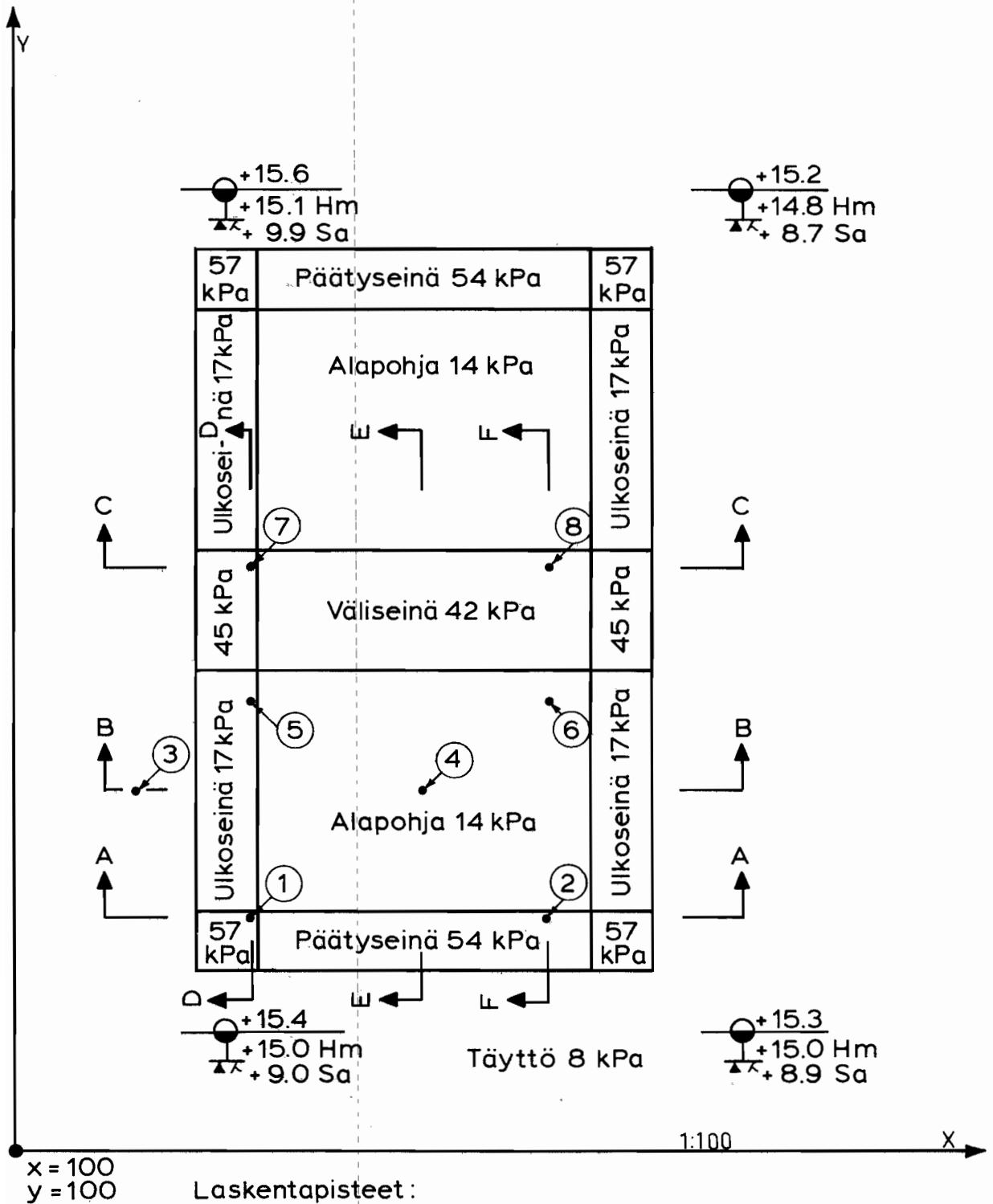
Kuva 37. Helsingin Malmilta otetun ödometrinäytteen kuormitus-kokoonpuristumakäyrä.

4.32 Painumien laskeminen

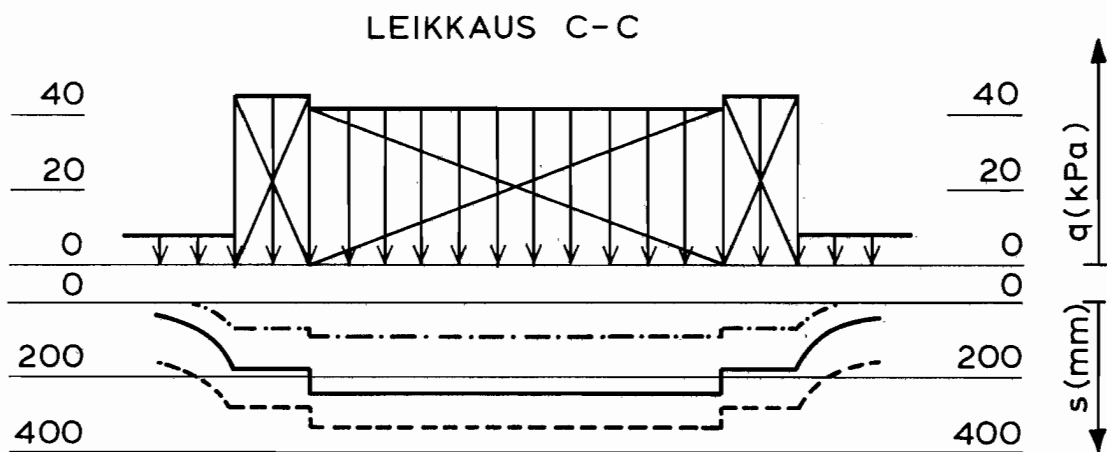
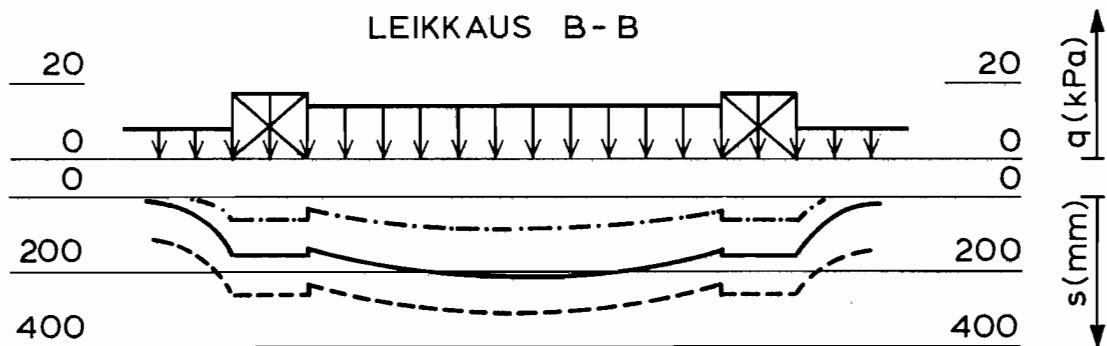
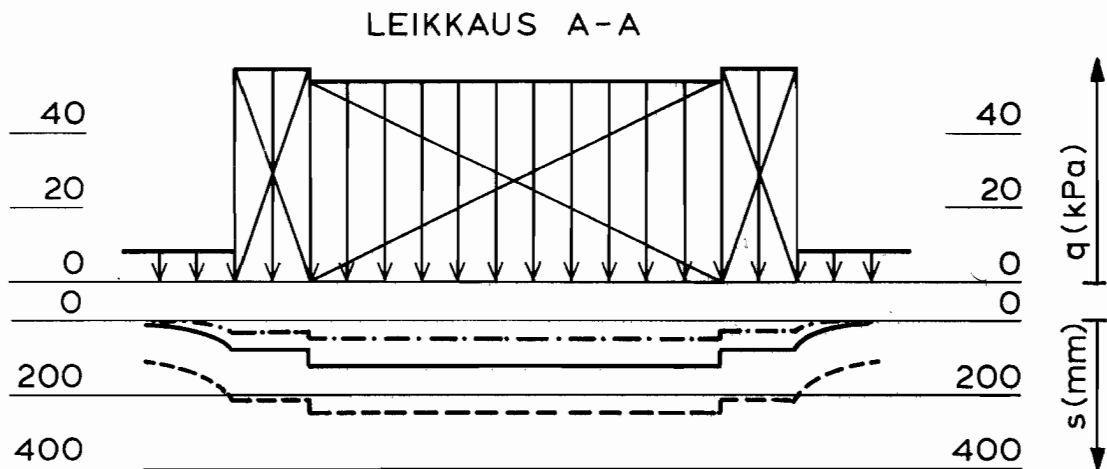
Talotyyppiä tähän laskentaan on valittu kuvan 38 mukainen 2-asuntoinen 2-kerroksinen paritalo, jonka seinäelementtejä voidaan pitää jäykkänä. Kuormituskaavio samoin kuin pohjasuhteet on tarkoituksellisesti valittu yksinkertaisiksi, jotta esimerkiksi muodostuisi havainnollinen. Maanpinnassa on noin 0,4 m vahvuinen humuskerros ja tämän alla noin 6 m savea. Käytetään saveen ominaisuuksien kuvaamiseen edellisen laskentaesimerkin mukaisia parametrejä (tangenttimoduulimenetelmä), ödometrikokeen havaintopisteitä (sekanttimoduulimenetelmä) sekä näytteen vesipitoisuutta (kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä). Rakentamisen yhteydessä humuskerros poistetaan ja korvataan soralla. Merkitsemällä humuksen parametrit nolliksi saadaan ohjelma sivuttamaan tämän kerroksen painumien laskeminen ja tulostamaan kerroksen painumat nolliksi.


Täytetty alkuarvokaavake tietokoneajoa varten on esitetty liitteessä 1. Näitä alkuarvoja käyttämällä saadaan liitteen 2 mukainen listaus. Graafinen yhteenveto laskelmista on kuvissa 39 ja 40.

Kuten havaitaan, poikkeavat eri laskentamenetelmien tulokset varsin paljon toisistaan. Esimerkki onkin tässä suhteessa käristetty. Selvän ylikonsolidoitumisen (kts. kuva 37) johdosta antaa sekanttimoduulimenetelmä, jossa käytetään ödometrikokeen havaintopisteitä sellaisinaan, liian suuret painumat. Tämä johtuu käyrän alkuosan häiriintymisestä. Kokoonpuristuvuusindeksiin perustuvassa likiarvomenetelmässä on otettu huomioon saveen ylikonsolidoituminen (kts. liite 1 DATA 430) siten, että on laskettu vain ns. normaalikonsolidoitunut osuus painumista. Tässä tapauksessa on suuri osa painumista kuitenkin juuri ylikonsolidoituneella osalla tapahtuvaa, joten tämä menetelmä antaa selvästi liian pienet painumat. Edellä mainittujen syiden vuoksi voidaankin tässä tapauksessa ainoastaan tangenttimoduulimenetelmän antamia tuloksia pitää luotettavina. Häiriintyminen

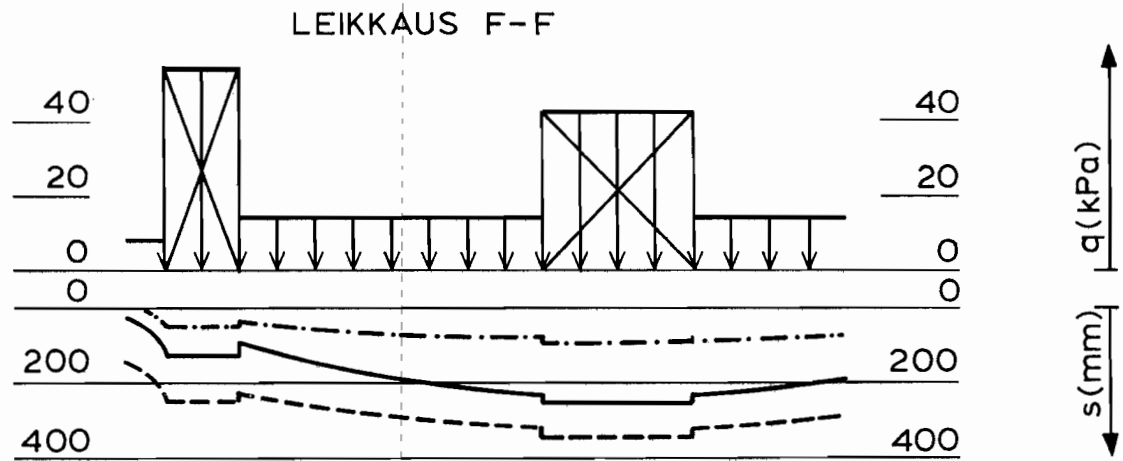
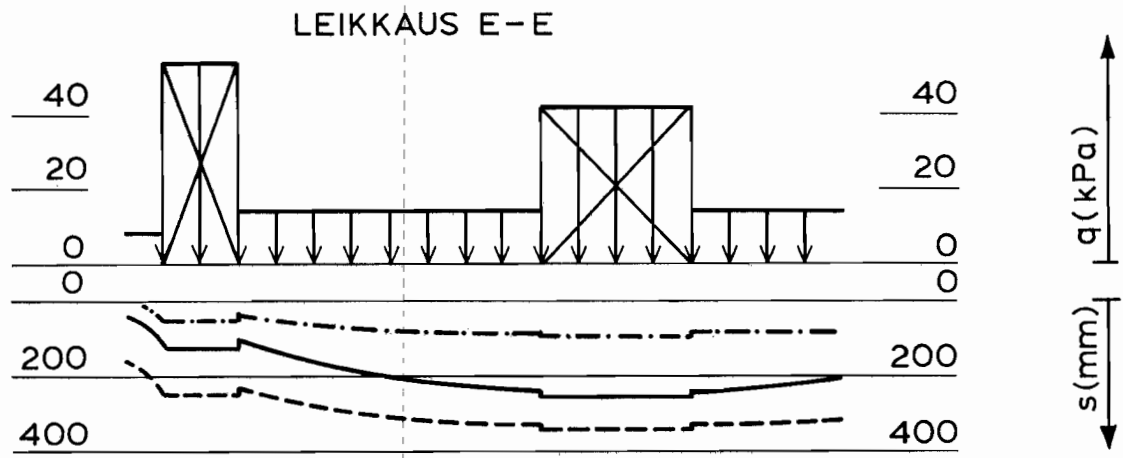
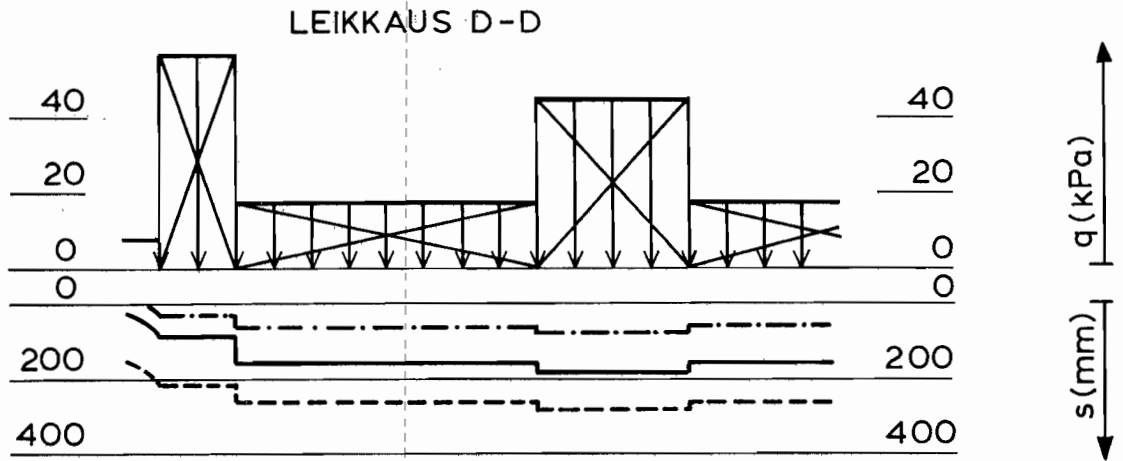


Kuva 38. Laskentaesimerkin kuormituskaavio.



— = Tangentti m. (M) - - - = Sekantti m. (o) - · - · - = Kok. p. ind. (v)
 q = Kuormitus  = Jäykkä kuorma s = Painumat

Kuva 39. Laskentaesimerkin mukaisen paritalon painumat talon poikittaissuuntaan.



— = Tangentti m. (M) - - - = Sekantti m. (o) - · - · = Kok. p.ind. (v)
 q = Kuormitus = Jäykkä kuorma s = Painumat

Kuva 40. Laskentaesimerkin mukaisen paritalon painumat talon pitkittäissuuntaan.

ei maanvaraisesti perustettaessa ulotu syvälle. Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän tulokset puolestaan kuvaavat sitä osaa painumasta, joka tapahtuu hitaasti. Kuvissa 39 ja 40 tangenttimoduulimenetelmän ja kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän tuloksia kuvaavien käyrien väliin jäävä osuus on ylikonsolidoitunutta ja tämä osuus painumista tapahtuu suhteellisen nopeasti.

Uusien pohjarakennusohjeiden /6/ mukaan koheesiomaalle perustettaessa tasaisten kokonaispainumien raja-arvo teräsbetonielementtirakenteille on 40... 80 mm ja kulmakiertymien raja-arvo $\frac{1}{1000}$... $\frac{1}{500}$. Esimerkin mukaisen paritalon maksimipainumaa noin 250 mm ja suurinta kulmakiertymää noin 1/40 ei voida pitää hyväksyttävänä, joten perustaminen saven varaan ilman maapohjan vahvistamista ei voi tulla kysymykseen. Seuraavissa esimerkeissä tarkastellaan eräitä vaihtoehtoja maapohjan vahvistamiseksi.

4.33 Maapohjan vahvistaminen ylipengermenetelmää käyttämällä

Liitteen 2 tuloksista käy selville, että suurin savikerroksessa vallitseva kuormituslisäys on 26.1 kPa. Tämän suuruinen lisäys on pisteen 8 ($x = 108.79$, $y = 109.74$) alapuolella, sillä jännitysten σ_z (=54.7 kPa) ja σ_o (=28.6 kPa) erotus on juuri tuo em. 26.1 kPa. Kohottamalla konsolidaatiojännitys arvoon 55 kPa saadaan painumat tapahtumaan kokonaan ylikonsolidoituneella alueella. Laskennassa tämä muutos otetaan huomioon seuraavasti: 1) Tangenttimoduulimenetelmässä saven luonnollinen konsolidaatiojännitys korvataan arvolla 55 kPa (DATA 190). 2) Sekanttimoduulimenetelmän mukaista ödometrikäyrää korjataan kuvan 22 periaatteen mukaisesti (DATAT 270 ... 290). 3) Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmässä korvataan saven luonnollinen ylikonsolidoituminen arvolla 27 kPa (DATA 430). Tulokseksi saadaan liitteessä 3 esitetty listaus.

Tangentti- ja sekanttimoduulimenetelmien antamien tulosten ero johtuu siitä, että jälkimmäisessä on käytetty suoraviivaista in-

terpolaatiota ja edellisessä on oletettu alkuosan jännitys-eksponentin (β_2) olevan nolla, joka vastaa logaritmista käyrää. Ohjelma laskee haluttaessa myös logaritmisella interpolaatiolla tai suoraviivaista interpolaatiota vastaavasti jännityseksponentin (β_2) arvolla yksi, joten tulokset voidaan saada identtisiksi. Kokoonpuristuvuusindeksin antamat tulokset, joissa painumien lukuarvot ovat nollia, ovat osoituksena siitä, että painumia ei tapahdu normaalikonsolidoituneella alueella, kuten oli tarkoituskin. Tangenttimoduulimenetelmällä laskettu esikuormitetun maapohjan suurin painuma on noin 25 mm ja suurin kulmakiertymä noin 1/1100. Maksimipainuma on saatu putoamaan noin kymmenenteen osaan alkuperäisestä, ja suurin kulmakiertymä lähes kolmanteenkymmenenteen osaan. Näin ollen painumat on onnistuttu pienentämään, tai oikeastaan ajoittamaan ennen rakentamista tapahtuviksi, jolloin niistä ei ole rakennukselle haittaa.

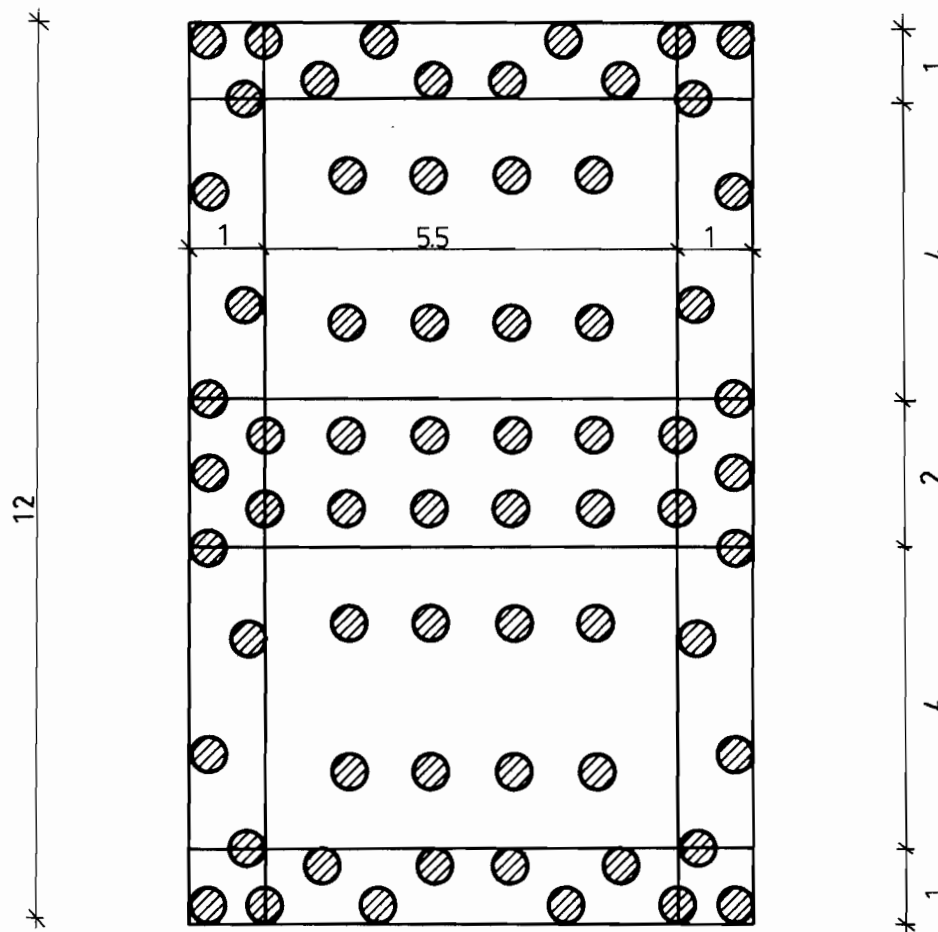
Edellä mainittu konsolidaatiojännityksen arvon nostaminen arvoon 55 kPa vaatii 27 kPa ylikuorman, joka saadaan esim. noin 1,35 m sorakerroksella. Tässä noin 6 m savikerroksessa tarvittaisiin kuitenkin suhteellisen pitkä esikuormitusaika, jotta vaadittu 100 % konsolidaatioaste saavutettaisiin. Esikuormitusaikaa voidaan tuntuvasti lyhentää täytekerroksen paksuutta nostamalla, unohtamatta kuitenkin tarkistaa maapohjan stabiiliteettia liukumalla tapahtuvaa sortumista vastaan.

4.34 Maapohjan vahvistaminen kalkkipilarimenetelmää käyttämällä

Laskennan alkuarvot ovat muuten samat kuin liitteessä 1, mutta rivillä 170 on tunnuksena kalkkipilareiden käytöstä "K".

Mikäli ohjelman annetaan valita kalkkipilarikentät, niin valinta tapahtuu siten, että kullekin kuormitusalueelle sijoitetaan sen kriittistä pilarisuhdetta (a_{kr}) vastaava määrä pilareita.

Näin on menetelty tässä laskennassa, ja tulokseksi on saatu liitteen 4 mukaiset pilarikentät ja edelleen painumat, joissa on otettu kalkkipilarien vaikutus huomioon. Kuvassa 41 on laskennan mukainen kalkkipilarikartta. Kuten liitteestä 4 havaitaan, on savelle jäävän kokonaisjännityksen maksimiarvo saatu putoamaan arvoon 36.4 kPa (piste 4, $x = 106.75$, $y = 106$), joka on alle luonnollisen konsolidaatiojännityksen ($\sigma_c = 45.51$ kPa).



Kuva 41. Laskentaesimerkin mukaisen paritalon kalkkipilarikartta.

Maan kimmokertoimen arvosta riippuen on saatu toisistaan poikkeavia tuloksia. Tangenttimoduuliin perustuvassa laskennassa on saatu pienimmät painumat. Sekanttmoduuliin perustuvassa laskennassa ödometrikäyrän alkuosa oli korjaamaton, joten painumat ovat edellisiä suurempia. Kokoonpuristuvuusindeksiin perustuvissa painumien arvoissa on saatu vieläkin suuremmat

painumat, mutta tämä johtuu siitä, että alkuarvojen rivillä 430 (liite 1) on ylikonsolidoitumiseksi annettu todellisuutta vastaamaton arvo nolla.

Tällä kertaa on sekanttimoduulimenetelmän tuloksia pidettävä luotettavimpina, koska maapohja kalkkipilarien teon yhteydessä häiriintyy. Kalkkipilareilla vahvistetun maapohjan suurin painuma on noin 50 mm (viidesosa alkuperäisestä) ja suurin kulmakiertymä noin 1/800 (kahdeskymmenesosa alkuperäisestä), joten esimerkkikohde voidaan perustaa myös kalkkipilareilla vahvistetulle maapohjalle.

Kalkkipilarien ominaisuuksista on tässä esimerkissä käytetty hyväksi vain niiden savea suurempi kimmokertoimen arvo ja tätä kautta painumia ja painumaeroja pienentävä vaikutus. Toinen merkittävä ominaisuus kalkkipilareilla on niiden toiminta pysty-
ojina. Tätä voitaisiin hyödyntää siten, että yhdistetään yli-
penger- ja kalkkipilarimenetelmät. Pilareita tarvittaisiin vähemmän, koska konsolidaatiojännityksen nostaminen pienentäisi omalta osaltaan painumia, eikä konsolidaatioaikakaan muodostuisi pysty-
ojien ansiosta pitkäksi.

- 5. KOKEMUKSIA PAINUMISTA ERÄIDEN PERUSTAMISTAPOJEN YHTEYDESSÄ
- 5.1 Perustaminen pehmeikölle ilman maapohjan vahvistamista
- 5.11 Esimerkkikohteen pohjasuhteet ja perustamistapa

Puistolantien Käsityöläisentie 9:ssä sijaitseva lasten päiväkoti rakennettiin vuoden 1976 aikana. Geoteknillinen toimisto teki tontilla pohjatutkimukset aikoina 1.-29.8.1973 ja 8.-9.5.1975 sekä otti 24.1.1979 häiriintymättömiä näytteitä tiheämmällä kuormitusporrasvälillä suoritettavia ödometrikokeita varten.

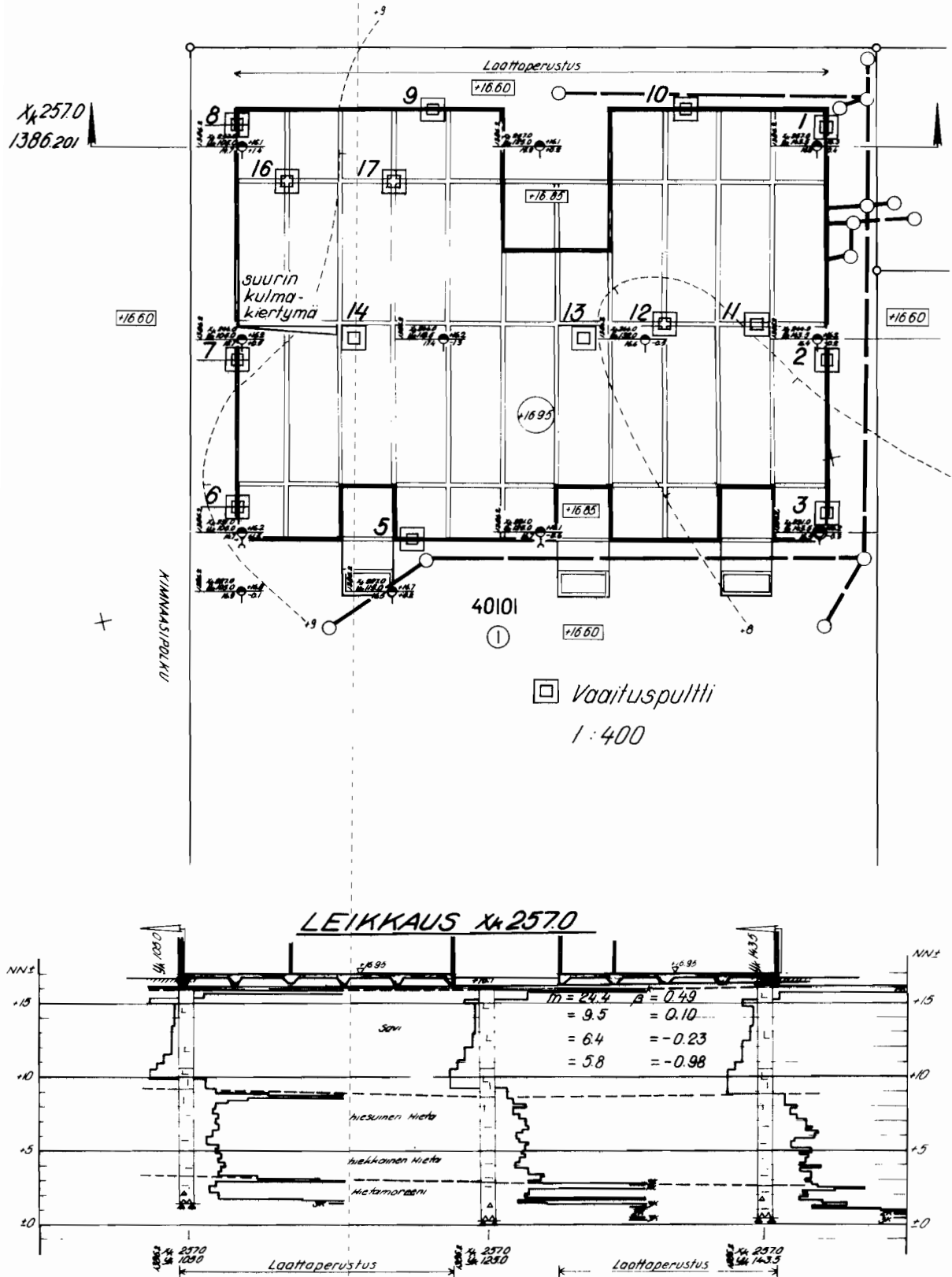
Maanpinnan korkeus vaihtelee rakennuspaikalla rajoissa +16,1 - +16,3. Maanpinnassa olevan 0,2 - 0,3 m paksun humusmaakerroksen alla on savea 6 - 7 m. Savikerroksen yläpinnassa on 0,4 - 0,8 m kuivakuorikerros. Saven alla on löyhänä kerroksena silttiä ja hiekkaa 6 - 10 m. Alin maakerros on moreenia (kuva 42). Pohjavedenpinta vaihteli tutkimusaikana välillä +14,0 - +15,1.

Päiväkoti on 1-kerroksinen puurakenteinen rakennus, jonka keveys ja toisaalta kyky sietää painumia vaikuttivat siihen, että se perustettiin yhtenäisellä laatalla saven varaan.

5.12 Laskelmat

Painumat laskettiin kohdassa 4.2 esitetyllä tietokoneohjelmalla. Maastomallissa käytetyt painokairauspisteet samoin kuin painumien mittauksessa käytetyt vaaituspultit näkyvät kuvassa 42. Laboratoriomääritysten tulokset ja "ODOMETRI"-ohjelmalla lasketut kuormitus-kokoonpuristumakäyrät on esitetty liitteessä 5.

Rakennuksen lasketut painumat eri menetelmillä vaaituspulttien kohdalla on esitetty taulukossa 6.



Kuva 42. Kartta ja leikkaus Puistolan päiväkodin rakennus-alueesta.

Taulukko 6. Rakennuksen lasketut painumat (M = tangenttimoduulim., O = sekanttimoduulim., V = kokoonpuristuvuusindeksim.)

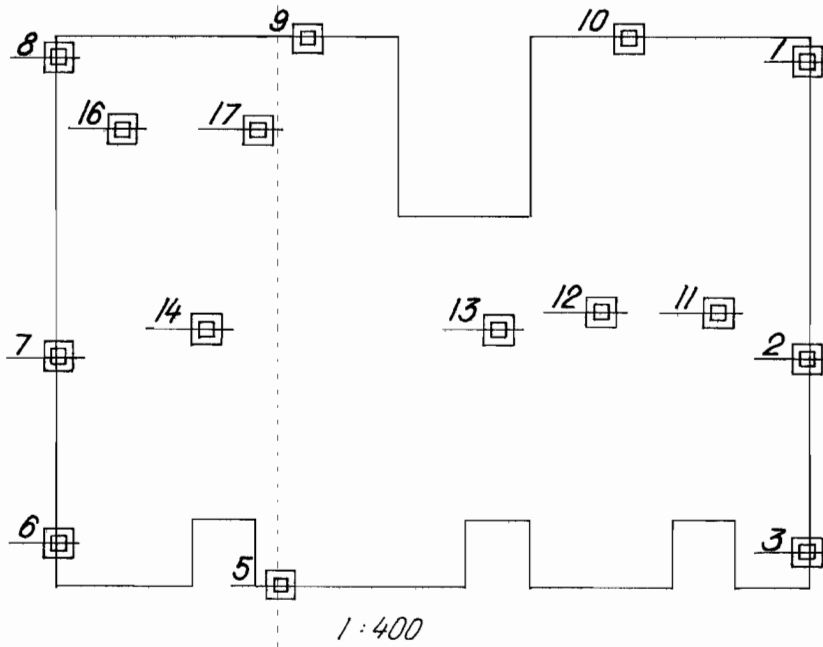
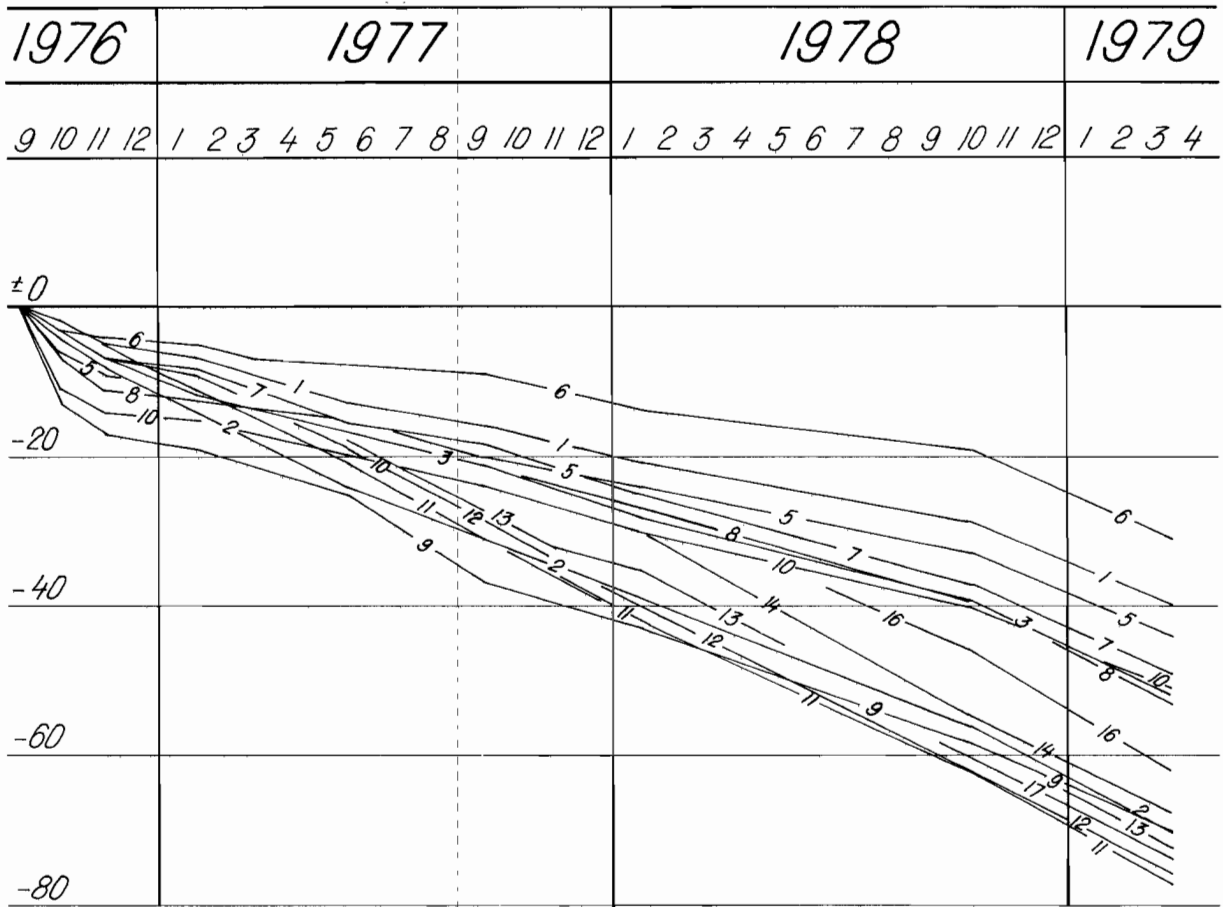
piste	PAINUMAT (mm)		
	M	O	V
1	76	91	119
2	86	109	132
3	68	92	120
5	81	104	133
6	70	85	121
7	76	96	131
8	58	77	119
9	78	96	130
10	86	102	130
11	120	147	170
12	121	151	174
13	120	149	174
14	115	142	173
16	106	128	165
17	112	136	169

Suurin odotettavissa oleva painuma on noin 120 mm ja suurin kulmakiertymä noin 1/200. Normin /6/ mukaan kokonaispainumien raja-arvo puurakenteille on 100 - 150 mm ja kulmakiertymien raja-arvo 1/300 - 1/200.

5.13 Mittaukset

Painumien mittaukset aloitettiin 7.9.1976 ja niitä jatketaan edelleen. Graafinen esitys painumista on kuvassa 43. Suurimmat havaitut painumat 23.3.1979 mennessä on esitetty taulukossa 7.

Suurin havaittu kulmakiertymä toistaiseksi on pisteiden 7 ja 14 välillä, jossa se on noin 1/400 (kuva 42).



Kuva 43. Rakennuksen painumamittaustuloksia.

Taulukko 7. Rakennuksen suurimmat havaitut painumat 23.3.1979 mennessä.

PISTE	Painumat mm
1	40
2	70
3	52
5	44
6	31
7	49
8	53
9	70
10	51
11	77
12	76
13	72
14	68
16	62
17	72

5.14 Laskettujen ja havaittujen painumien suhde

Puolet painumista saatiin laskelmin tapahtuvaksi 2 v 8 kk kuluessa eli toukokuuhun 1979 mennessä. Taulukossa 8 on esitetty tangenttimoduulimenetelmän mukaiset lasketut painumat sekä 23.3.1979 mennessä havaitut painumat. Lisäksi on laskettu näiden painumien suhde.

Taulukko 8. Havaitut ja lasketut painumat.

PISTE	Havaitut painumat 23.3.1979 (mm)	Lasketut kokonais- painumat (mm)	Suhde
1	40	76	0.53
2	70	86	0.81
3	52	68	0.76
5	44	81	0.54
6	31	70	0.44
7	49	76	0.64
8	53	58	0.91
9	70	78	0.90
10	51	86	0.59
11	77	120	0.64
12	76	121	0.63
13	72	120	0.60
14	68	115	0.59
16	62	106	0.58
17	72	112	0.64
			ka.0.66

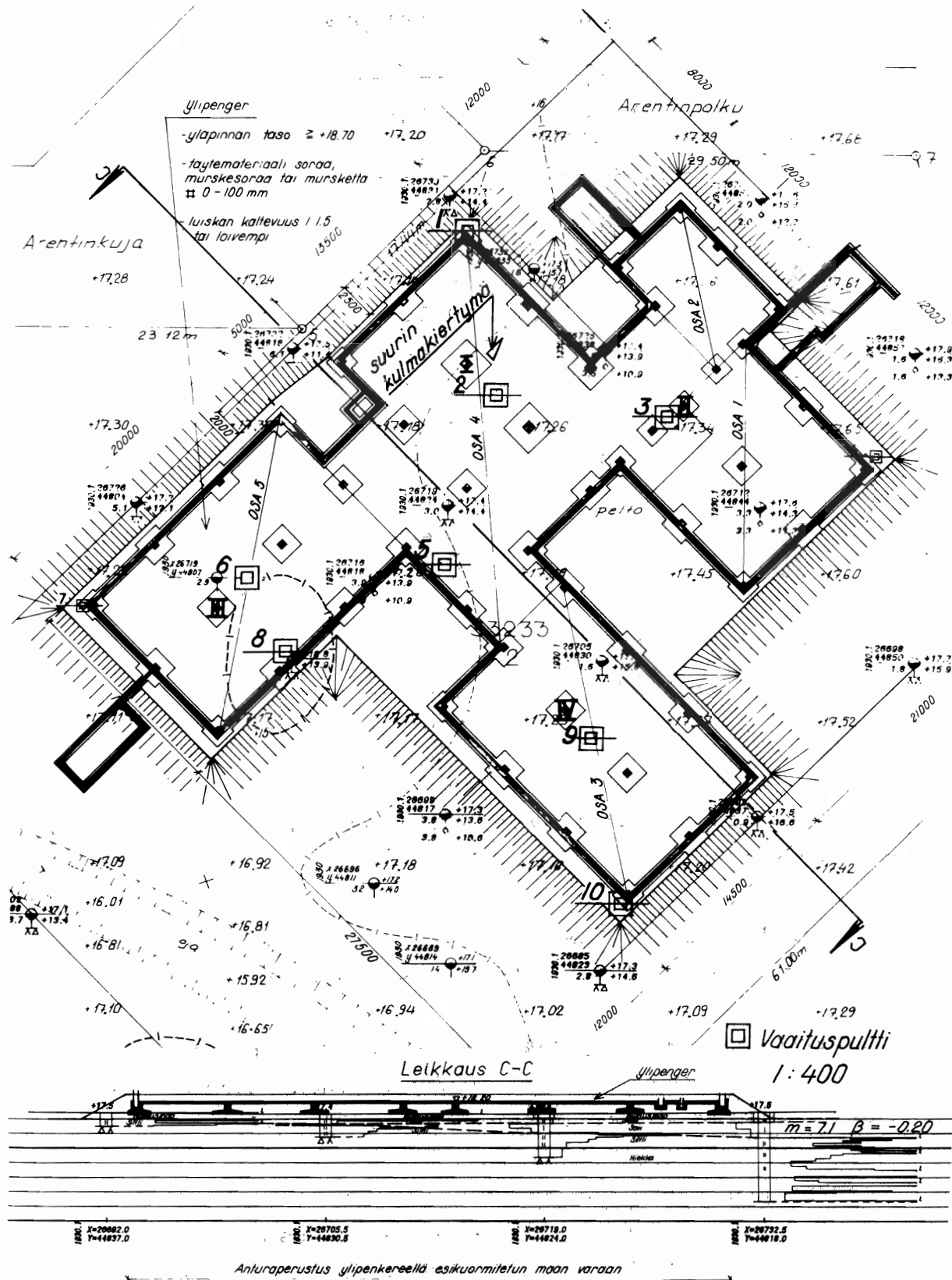
Taulukon mukaan painumat ovat kehittyneet keskimäärin hieman laskettua nopeammin.

5.2 Ylipengermetelmä

5.21 Esimerkkikohteen pohjasuhteet ja perustamistapa

Malminkarton II lasten päiväkodin ylipenkereen rakentaminen aloitettiin lokakuussa 1978. Geoteknillinen toimisto suoritti pohjatutkimukset alueella aikana 23.2.-24.4.1978.

Rakennuspaikan maanpinta vaihtelee rajoissa +17,1 - +17,9. Päällimmäisenä on noin 0,4 m vahvuinen humusmaakerros, jonka alla on 0 - 0,5 m paksu silttikerros. Siltin alla on savea, jonka paksuus vaihtelee 0 - 1,3 m. Alimpana on maakerros, joka vaihtuu siltistä asteittain hiekaksi ja moreeniksi. Tämän kerroksen vahvuus on yleensä 1 - 2 m, mutta on paikoin yli 4 m (kuva 44).



Kuva 44. Kartta ja leikkaus Malminkartanon II lasten päiväkodin rakennuskohteesta.

Pohjavedenpinta on havaintoaikana vaihdellut välillä +16,0 - +16,6.

Koska irtomaakerros rakennuspaikalla on ohut, ei paalutusvaihtoehto voinut tulla kysymykseen. Toisaalta savikerroksen vaihteleva paksuus ei sallinut perustamista suoraan maan varaan etenkin kun rakennuksen seinämateriaaliksi valittiin halkeilulle arka tiili. Pohjarakennusvaihtoehtona päädyttiin ylipengermenetelmään, koska riittävän pitkä esikuormitus aika oli mahdollinen, ja koska esikuormitetun maan painumat voidaan rajoittaa riittävän pieniksi myös tiilirakenteisia seiniä ajatellen.

5.22 Laskelmat

Painumat laskettiin kohdassa 4.2 esitetyllä tietokoneohjelmalla. Maapohja kuvattiin maastomallilla, joka koostuu painokairauspisteistä, joissa maakerrosrajat määriteltiin (kuva 44). Maakerrosten ominaisuudet perustuvat laboratoriomäärittelyihin sekä "ODOMETRI"-ohjelman laskemiin kuormitus-kokoonpuristumäkäyriin (liite 6).

Esikuormituksen aiheuttamiksi kuvaan 44 merkittyjen painumalevyjen painumiksi saatiin eri menetelmillä taulukon 9 mukaiset arvot.

Taulukko 9. Esikuormituksen aiheuttamat lasketut painumat.

PISTE	PAINUMAT (mm)		
	M	O	V
1	50	46	59
2	45	43	60
3	27	23	22
5	51	48	65
6	65	94	66
8	72	106	76
9	12	12	16
10	16	16	19

Esikuormitus saatiin aikaan soratäytöllä, jonka paksuus vaihtelee 1,3 - 2,2 m. Kun perustusten rakentaminen alkaa, poistetaan penkereestä lattiataso yläpuolinen osuus (0,5 - 0,7 m). Rakennus perustetaan pilarianturoilla, joiden koko vaihtelee välillä 1600 x 1600 - 2650 x 2650 ja jotka aiheuttavat noin 50 kPa pohjapaineen. Jäljelle jäävää painumaa laskettaessa otettiin huomioon esikuormituksen konsolidaatiojännitystä kasvattava vaikutus (taulukko 10).

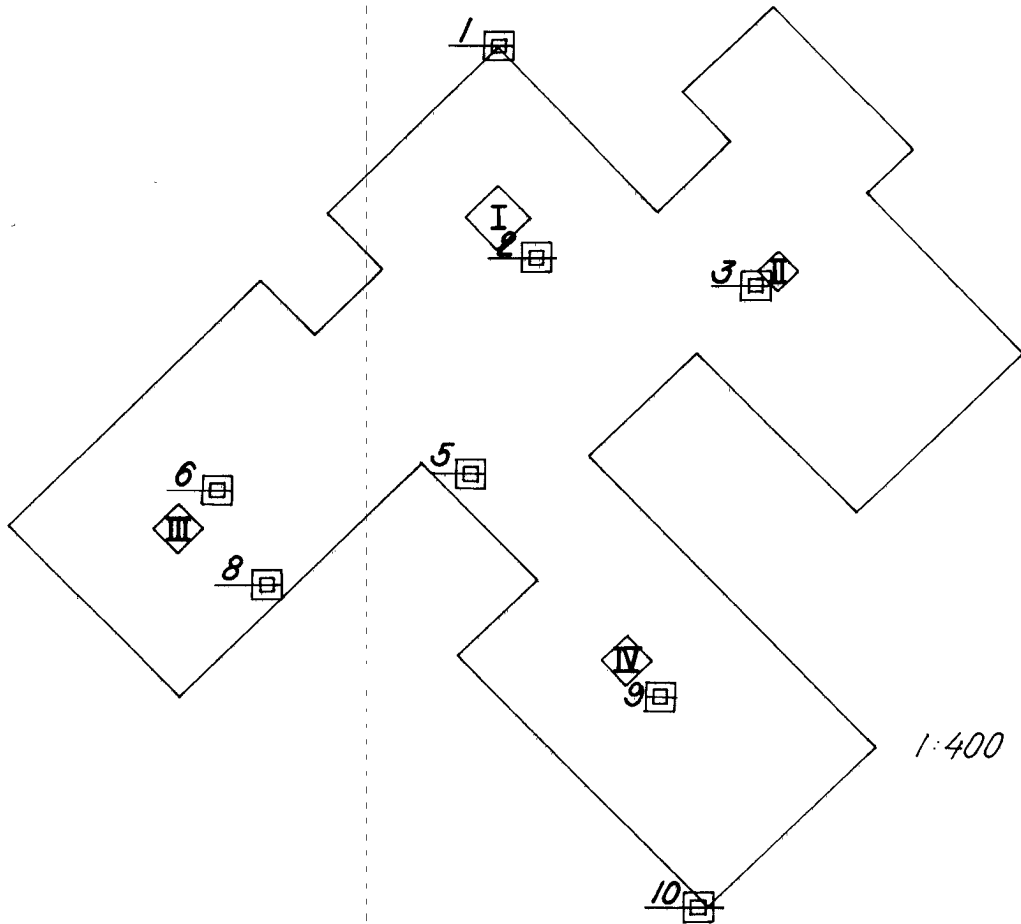
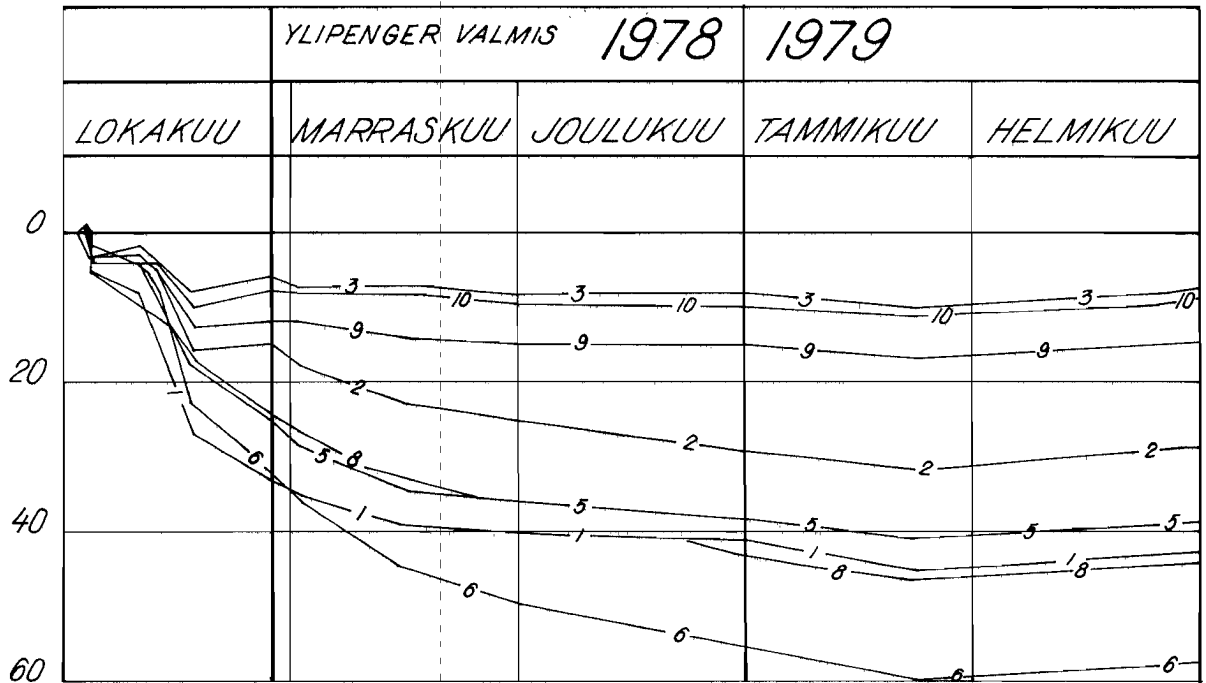
Taulukko 10. Rakennuksen lasketut painumat neljän pilarianturan kohdalla

Pilariantura	Ilman esik. (mm)	Esik.jälkeen (mm)	Pienennystä ¹
I	74	19	74 %
II	42	12	71 %
III	95	15	84 %
IV	20	6	70 %

Esikuormittamalla maapohjaa etukäteen onnistutaan suurinta painumaa (noin 95 mm) pienentämään noin 84 %. Jäljelle jäävä maksimipainuma on vain noin 20 mm. Muuratuille rakenteille kokonaispainuman raja-arvo on 40 - 80 mm /6/. Koska pilarianturoiden väliin jäävät alueet eivät kuitenkaan painu juuri lainkaan, muodostuisivat kulmakiertymät väliseinissä suurimmillaan noin 1/150 suuruiseksi (kuva 44), kun ne saisivat olla vain 1/800 - 1/400 /6/. Tämä ongelma on ratkaistu siten, että väliseinien muuraus aloitetaan aikaisintaan 2 kk sen jälkeen, kun pilarianturat ja katto on asennettu. Rakennuksen painumat tapahtuvat suurimmaksi osaksi ennen väliseinien tekoa ja suurin kulmakiertymä jää noin arvoon 1/600.

5.23 Mittaukset

Ylipenkereen rakentaminen aloitettiin 2.10.1978 ja penger saatiin valmiiksi 27.10.1978. Esikuormituksen painumatarkkailu on edelleen kesken, mutta kuten kuvasta 45 havaitaan on painumien kehitys lähes pysähtynyt. Suurimmat havaitut painumat 22.3.1979 mennessä on esitetty taulukossa 11.



Kuva 45. Esikuormituksen painumamittaustuloksia.

Taulukko 11. Esikuorman aiheuttamat suurimmat havaitut painumat 22.3.1979 mennessä

PISTE	Painumat (mm)
1	45
2	32
3	10
5	41
6	60
8	46
9	17
10	11

5.24 Laskettujen ja havaittujen painumien suhde

Esikuormitusajan laskeminen ei kuulu tämän työn aihepiiriin, joten ainoastaan todetaan, että ko. kohteessa laskettiin esikuormituksen aiheuttamista painumista 99 % tapahtuvan 6 kk kuluessa. Koska painumatarkkailu on vielä kesken, ei ole mahdollista tehdä lopullisia johtopäätöksiä painumalaskelmien tarkkuudesta. Tangenttimoduulimenetelmän mukaiset painumat joka tapauksessa vaikuttavat parhaiten vastaavan havaittuja painumia.

Taulukkoon 12 on kerätty tangenttimoduulimenetelmän mukaiset lasketut painumat sekä toistaiseksi suurimmat havaitut painumat. Lisäksi on laskettu näiden painumien suhde.

Taulukko 12. Havaitut ja lasketut painumat.

Piste	Havaitut painumat (mm) 22.3.1979 mennessä	Lasketut kok.painumat (mm)	Suhde
1	45	50	0.90
2	32	45	0.71
3	10	27	0.37
5	41	51	0.80
6	60	65	0.92
8	46	72	0.64
9	17	12	1.42
10	11	16	0.69
			k.a. 0.81

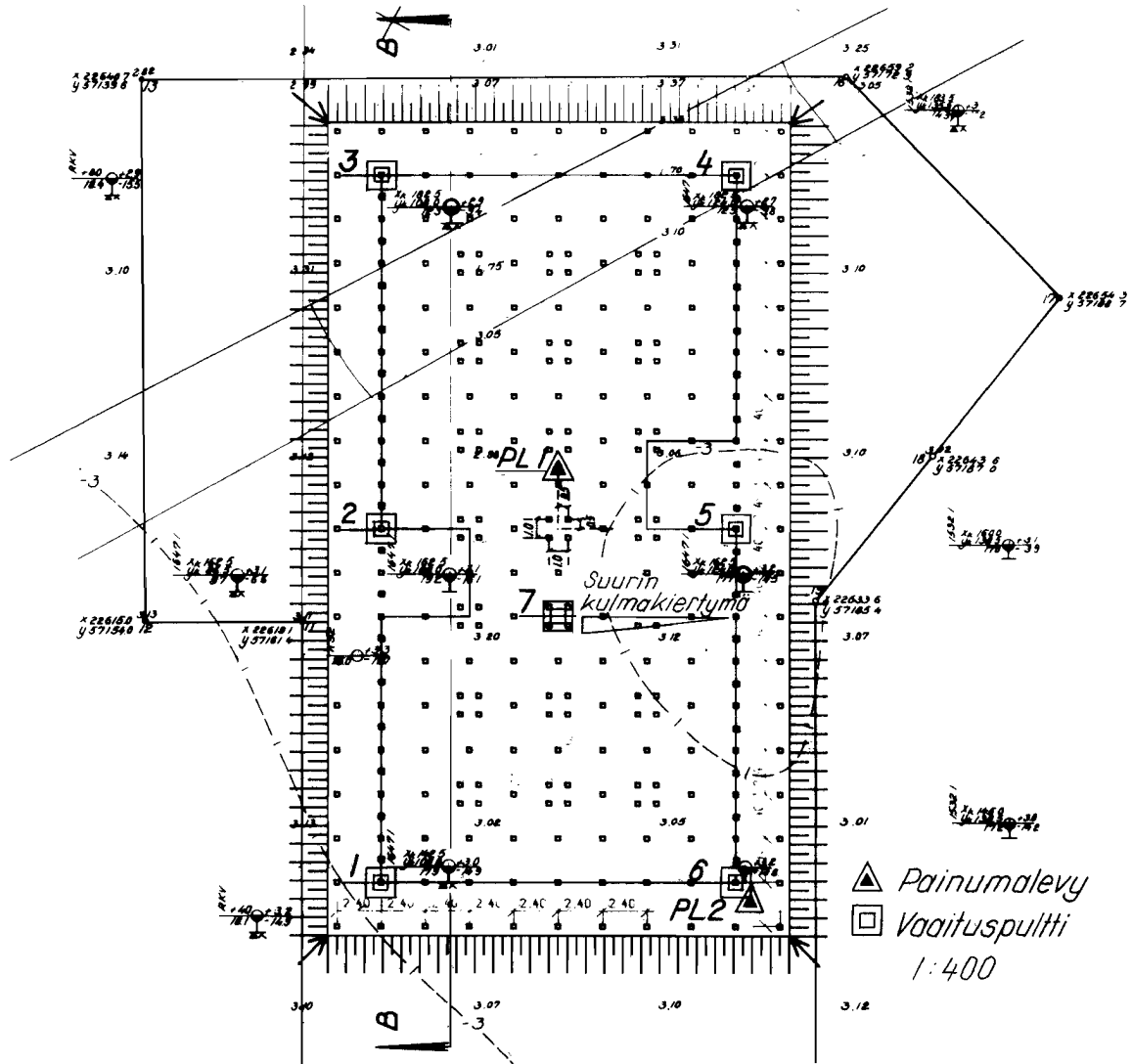
5.3 Kalkkipilarimenetelmä

5.31 Esimerkkikohteen pohjasuhteet ja perustamistapa

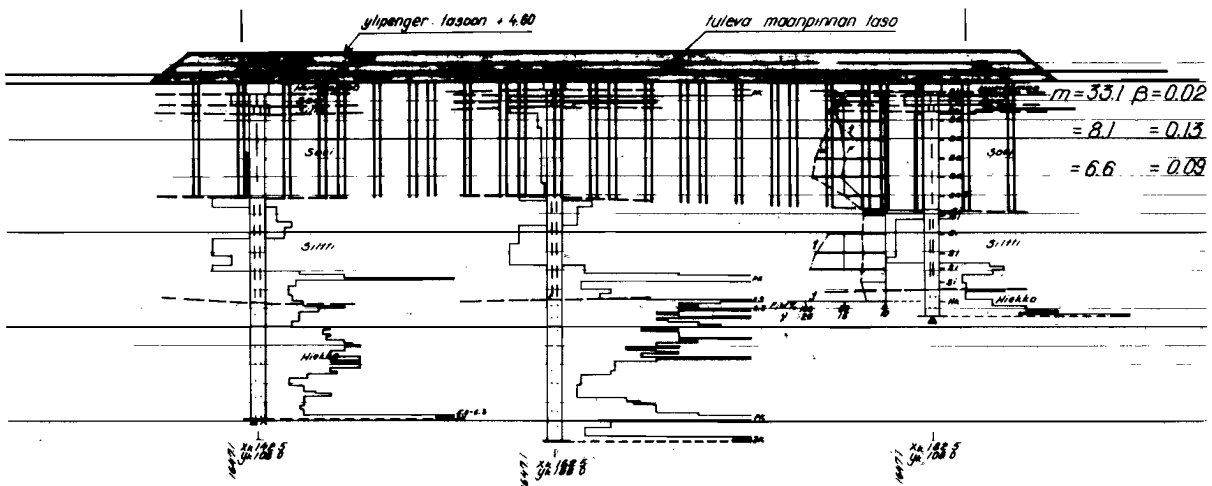
Esimerkkinä kalkkipilarimenetelmän käytöstä pientalon perustamisessa on Itäkeskuksen III lasten päiväkoti, jonka ensimmäiset kalkkipilarit saatiin aikaan 17.11.1976.

Geoteknillinen toimisto tutki kohteen pohjasuhteet ja totesi mm. seuraavaa: Alueen pohjasuhteet ovat varsin tasaiset. Maanpinnan korkeus vaihtelee rajoissa +2,7 - +3,2. Päällimmäisenä koko alueella on noin 0,3 m vahvuinen humusmaakerros, jonka alla on savea noin 5,5 - 6 m. Savikerroksen leikkauslujuus vaihtelee rajoissa $s = 8 - 16$ kPa ja vesipitoisuus rajoissa $w = 50 - 120$ % kuiva-aineksen painosta. Alimpana on maakerros, joka vaihtuu asteittain siltistä hiekaksi ja edelleen moreeniksi (kuva 46). Pohjavedenpinta oli tutkimusaikana lähellä maanpintaa, noin tasossa +2,7 - +3,0.

Traditionaalinen perustamistapa ko. kohteessa olisi ollut paaluperustus. Tällä kertaa päädyttiin kuitenkin perustamiseen kalkkipilareilla stabiloidun maan varaan sekä jäljelle jäävien



Leikkaus B-B



Kuva 46. Kartta ja leikkaus Itäkeskuksen III lasten päiväkodin rakennusalueesta.

painumien nopeuttamiseksi ylipenkereen käyttöön lähinnä seuraavista syistä:

- rakennus on kevyt ja puurakenteinen
- stabiloitavan kerroksen paksuus (noin 6 m) oli sopiva
- paalujen pituus olisi ollut noin 15 - 20 m ja tästä syystä paalutusvaihtoehdon kustannukset arvioitiin kalkkipilarivaihtoehtoa kalliimmiksi
- tarpeeksi pitkä esikuormitusaika oli mahdollinen
- painumat oli mahdollista saada riittävän pieniksi valittua kalkkipilari + ylipengermetelmää käytettäessä.

5.32 Laskelmat

Kuormitus-kokoonpuristumakäyrät (liite 7) sekä painumat laskettiin kohdan 4.1 ja 4.2 mukaisilla tietokoneohjelmilla. Maastomallissa käytetyt kairauspisteet näkyvät kuvassa 46.

Esikuormituksen aiheuttamiksi kuvaan 46 merkittyjen painumalevyjen (Pl.) 1 ja 2 kokonaispainumiksi ja 11 kk painumiksi saatiin taulukon 13 mukaiset arvot.

Taulukko 13. Esikuormituksen aiheuttamat lasketut kokonaispainumat sekä 11 kk tapahtuvat painumat.

Pl.	PAINUMAT (mm)				Kasvua 11 kk painumissa
	Ilman kalkkipil.		Kalkkipil. kanssa		
	Kokonais	11 kk	Kokonais	11 kk	
1	316	79	234	117	48 %
2	247	62	176	88	42 %

Esikuormitus on luonnollisesti sitä "parempi" mitä suuremmat painumat sillä saadaan aikaan. Esikuormituksen aiheuttamat kokonaispainumat ilman kalkkipilareita olisivat suuremmat kuin kalkkipilaristabiloidun maapohjan. Koska kuitenkin käytettävissä ollut esikuormitusaika oli rajallinen (noin 11 kk), saatiin stabiloidulla kentällä tässä tapauksessa noin 45 % suuremmat painumat. Kalkkipilarien hyvän vedenjohtavuuden vuoksi ehtii

noin 50 % kokonaispainumista tapahtua tässä ajassa. Tällä tavoin saatiin noin 1,85 m soratäytöllä nostettua saven luonnollista konsolidaatiojännitystä puolella tuon täytteen painosta, eli ylikuormitukseksi muodostui 18,5 kPa. Esikuormituksen yhteydessä kalkkipilareilla olikin lähinnä pystyjojien tehtävä.

Kuvaan 46 merkittyjen rakennuksessa olevien pulttien painumiksi saatiin taulukon 14 mukaiset arvot.

Taulukko 14. Rakennuksen lasketut painumat pulttien 1 - 7 kohdalla eri tavoin vahvistetulle maapohjalle

Pultti	PAINUMAT (mm)			
	Ei vahvistettu	Ylipengerll kk ei kalkkipil.	Kalkkipilarit ei ylipengertä	Kalkkipilarit ja ylipenger
1	153	110	65	38
2	188	146	97	32
3	150	107	60	25
4	132	89	60	48
5	180	139	98	32
6	163	121	83	38
7	263	222	179	66

Eri vahvistusmenetelmien vaikutusta painumiin voidaan tarkastella seuraavien arvojen valossa (taulukko 15):

Taulukko 15. Rakennusten lasketut suurimmat painumat ja kulmakiertymät.

	Ei vahvistettu	Ylipengerll kk ei kalkkipil.	Kalkkipilarit ei ylipengertä	Kalkkipilarit ja ylipengerll kk
Suurin painuma (mm)	263	222	179	66
	—	16 %	32 %	75 %
Suurin kulmakiertymä	$\frac{1}{130}$	$\frac{1}{130}$	$\frac{1}{133}$	$\frac{1}{317}$
	—	0 %	2 %	59 %
	Pienennystä	Pienennystä	Pienennystä	Pienennystä

Puurakennuksen kokonaispainumien raja-arvo on 100 - 150 mm ja kulmakiertymien $\frac{1}{300}$ - $\frac{1}{200}$ /6/, joten laskelmien mukaan painumat saadaan kalkkipilareita ja ylipengertä käytettäessä pienennettyä sallittuihin arvoihin.

5.33 Mittaukset

Esikuormituksen painumatarkkailu aloitettiin 15.12.1976 ja sitä jatkettiin ylipenkereen poistamiseen asti. Perustustöiden edistymisen myötä tarkkailua jatkettiin peruspilareihin sijoitettujen pulttien avulla (kuva 46). Painumien graafinen esitys on kuvassa 47. Suurimmat havaitut painumat 27.3.1979 mennessä on esitetty taulukossa 16.

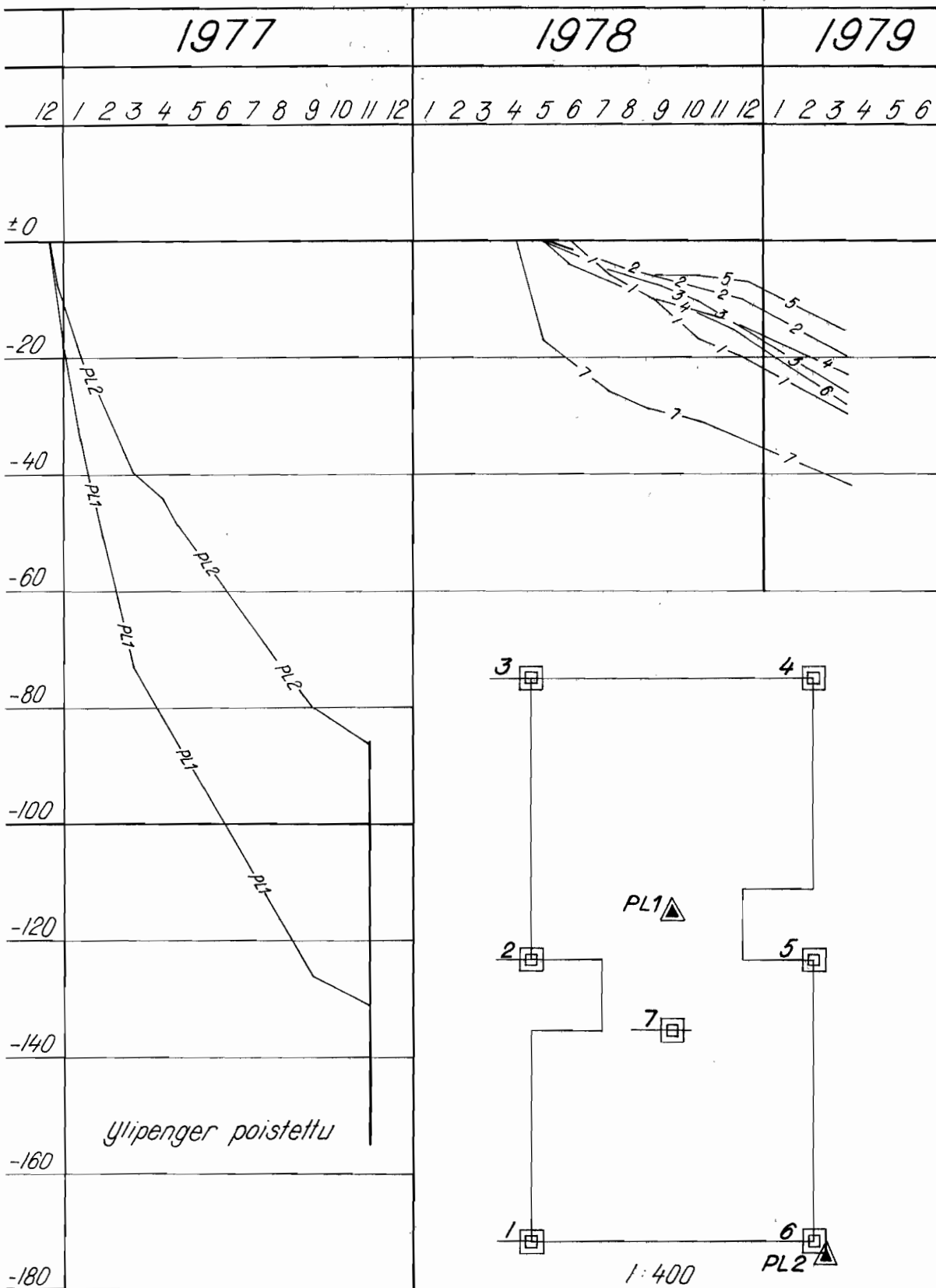
Taulukko 16. Esikuorman ja rakennuksen suurimmat havaitut painumat 27.3.1979 mennessä

ESI-KUORMA	P1	Painumat (mm)
	1	131
2	86	
RAKENNUS	Pultti	Painumat (mm)
	1	30
	2	20
	3	26
	4	23
	5	16
	6	28
7	42	

Suurin toistaiseksi havaittu kulmakiertymä (kuva 46) on noin 1/400.

5.34 Laskettujen ja havaittujen painumien suhde

Esikuormituksen aiheuttamista painumista ennakoitiin ehtivän tapahtua noin 50 %. Taulukossa 17 on esitetty lasketut ja havaitut painumat sekä näiden painumien suhde.



Kuva 47. Ylipenkereen ja rakennuksen painumamittaustuloksia.

Taulukko 17. Esikuormituksen havaitut suurimmat painumat sekä lasketut 11 kk painumat.

Painuma- levy	Havaitut painumat 14.11.1977 (mm)	Lasketut 11 kk painumat (mm)	Suhde
1	131	117	1.12
2	86	88	0.98
			k.a. 1.05

Rakennuksen havaitut ja lasketut painumat sekä näiden suhteet on esitetty taulukossa 18. Esikuormitetun ja kalkkipilarista-biloidun maan painumisnopeutta ei ole arvioitu.

Taulukko 18. Rakennuksen havaitut suurimmat painumat sekä lasketut kokonaispainumat.

Pultti	Havaitut painumat 27.3.1979 (mm)	Lasketut kokonais- painumat (mm)	Suhde
1	30	38	0.79
2	20	32	0.63
3	26	25	1.04
4	23	48	0.48
5	16	32	0.50
6	28	38	0.74
7	42	66	0.64
			k.a. 0.69

Graafisen esityksen (kuva 47) mukaan voidaan päätellä konsolidaation vielä olevan kesken. Havaittavissa kuitenkin on keskipisteen reuna-alueita suurempi painuma, joskin painumat ovat verraten tasaisia eikä painumavaurioiden syntyminen näytä todennäköiseltä.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Maanvaraisten perustusten suunnitteluperusteista

Talorakenteille ei yleensä ole haittaa muutamien senttimetrien painumista. Sen sijaan mikäli lyhyellä välillä syntyy senttimetrien painumaeroja voi seurauksena olla rakenteiden halkeilua. Tämän vuoksi ei ole aina mielekästä pyrkiä saamaan rakenteita painumattomiksi, vaan saamaan painumat tapahtumaan tasaisesti. Kulmakiertymän raja-arvona voidaan puurakenteille pitää väliä $\frac{1}{300} - \frac{1}{200}$ ja muuratuille rakenteille väliä $\frac{1}{800} - \frac{1}{400}$ /6/. Usein riittää pelkkä painumien nopeuttaminen ja ajoittaminen ennen varsinaista rakentamista tapahtuviksi.

6.2 Painumien laskentamenetelmät

Edellä esitetyistä painumien laskentamenetelmistä voidaan todeta, että tangenttimoduulimenetelmällä pystytään ottamaan huomioon maan kuormitus-kokoonpuristumakäyttäytymisen epälineaarisuus sekä näytteenoton yhteydessä tapahtuva häiriintyminen, joka näkyy konsolidaatiojännitystä pienemmillä kuormilla todellisuutta suurempina kokoonpuristumien arvoina. Lisäksi on keinotekoisien konsolidaatiojännityksen kohottamisen, so. ylipengertämisen, vaikutuksen huomioon ottaminen vaivatonta. Muutetaan ainoastaan maan luonnollisen konsolidaatiojännityksen lukuarvo vastaamaan ylipengertämisen jälkeen vallitsevaa konsolidaatiojännityksen arvoa. Muutenkin pystytään tällä menetelmällä suuri määrä tietoa tiivistämään neljään parametriin, jotka ovat:

- normaalikonsolidoituneen osan parametrit m ja β ,
- ylikonsolidoituneen alueen parametri m_2 sekä
- rajakohta näiden parametrien käytön välillä eli jännitys σ_c .

Menetelmällä päästään tarkkoihin tuloksiin, mutta tämä edellyttää myös sellaisten ödometrikokeiden suorittamista, joissa kuormitusportaita on runsaasti. Tangenttimoduulimenetelmän mukaisten parametrien määrittäminen ilman tietokoneen apua on kuitenkin

erittäin työlästä, mikäli kuormituslisäysten suuruus ei ole aina kaksinkertainen edelliseen verrattuna. Tässä työssä kehitetyllä kohdan 4.1 mukaisella tietokoneohjelmalla saadaan em. parametrit ratkaistua myös muulla tavoin kuormitettujen ödometrinäytteiden perusteella. Kuormitusportaiden tihennys voidaan tällöin sijoittaa sille alueelle, jolla todellisuudessakin liikutaan.

Sekanttimoduulimenetelmässä jää koetulosten tulkinta pois, koska painumien laskemisessa käytetään suoraan ödometrikokeista saatuja kokoonpuristumien arvoja. Tiheä kuormitusportaiden väli parantaa myös tällä menetelmällä saatujen tulosten tarkkuutta.

Koheesiomaalajeille johdettu laskentakaava, jossa kokoonpuristuvuusindeksi lasketaan Helenelundin likiarvokaavalla on ainoa, jossa ei tarvita kuormituskokeita. Tästä syystä se sopiikin erityisesti alustavassa suunnittelussa käytettäväksi, kun maaperätietoja on vielä niukasti.

Esitetyt menetelmät eivät ole toisiaan pois sulkevia. Mikäli tietokonelaskennassa käytetään tangenttimoduulimenetelmää, ei sekanttimoduuli- ja kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän käyttö tämän rinnalla aiheuta paljon lisätyötä.

6.3 Kalkkipilareilla stabiloidun maapohjan painumien laskenta

Kalkkipilareilla stabiloidun maapohjan painumien laskemista voidaan pitää painumalaskentatapauksista vaikeimpana. Painumaerojen ja epähomogeenisten pilarikenttien tarkemmaksi analysoimiseksi on tässä työssä kehitetty uusi laskentamenetelmä. Menetelmä on lyhyesti seuraava:

Lasketaan kriittisen pilarisuhteen (a_{kr}) arvot kenttäkohtaisesti. Verrataan kussakin kentässä olevien pilarien määrää (a) saman kentän kriittisen pilarisuhteen arvoon. Mikäli pilareita on yli kriittisen pilarisuhteen, lasketaan maapohjalle jäävät

kuormat kimmoisen tilan kaavalla. Päinvastaisessa tapauksessa laskeminen suoritetaan plastisen tilan kaavalla. Näin pilarien tiheys voi vaihdella tarkasteltavassa kohteessa, koska kentässä voi olla $0 - \infty$ kappaletta kalkkipilareita.

Painumaerot maapohjassa johtuvat:

- jännityksen jakautumisesta, jolloin samankin kuormituspinnan alueella lähinnä kuormituspistettä tai kuormituspinnan keskispistettä olevat osat painuvat reuna-alueita enemmän
- eroista eri alueiden kuormissa
- maapohjan epähomogeenisuudesta

Nämä seikat voidaan ottaa huomioon myös kalkkipilareilla vahvistetun maapohjan painumaeroja laskettaessa.

Vaikka tässä työssä onkin käsitelty vain kalkkipilareita maapohjan stabiloinnin yhteydessä, voidaan esitettyä teoriaa soveltaa painumien laskemiseen myös muunlaisten pilarien ollessa kyseessä. Edellytyksenä teorian käytölle on vain se, että pilareille voidaan määritellä suuret kimmokerroin eli kuormituskokoonpuristumakäyrän kulmakerroin ja myötöjännitys, tässä tapauksessa suurin ajateltavissa oleva jännitys, jonka pilarit voivat ottaa.

6.4 Maanvaraisen perustamisen suunnittelusta

Harkittaessa maanvaraista perustamista pehmeikölle on aina laskettava maapohjan painumat. Mikäli painuma laatalla perustettaessa ylittää tunnuspuiteen kohdalla suurimmalle kokonaispainumalle asetetun raja-arvon, ei perustuksen jäykistämisestä ole hyötyä, vaan joudutaan turvautumaan muihin menetelmiin.

Mikäli aikatauluseikat eivät tule esteeksi on ylipengermenetelmä yleensä edullinen, jos koheesiomaakerros on ohut. Tämä perustuu siihen, että pengerrystyössä käytettävät massat voidaan myöhemmin käyttää pihojen ja liikennealueiden tekoon, eikä ylimääräisiä materiaalikustannuksia näin ollen synny. Ylipengeren rakentaminen onkin lähinnä materiaalin siirtämistä paikas-

ta toiseen. Halutun suuruinen konsolidaatiotilan muutos voidaan saada aikaan eri paksuisilla ylitäytöillä. Pienempi kuorma vaatii pitemmän esikuormitusajan ja päin vastoin. Aikataulu-seikat ovat työjärjestelyyn ja siten kustannuksiinkin vaikuttavia tekijöitä ja tämän vuoksi ylipengermenetelmän käyttö vaatii taloudellisesti onnistuakseen pitkäjännitteistä suunnittelua, jossa ylipenkereen rakentaminen voidaan tarvittaessa aloittaa paljon ennen varsinaista rakentamista.

Kalkkipilarimenetelmä perustuu siihen ajatukseen, että maapohjasta tehdään alkuperäistä vähemmän kokoonpuristuva. Tämä tapahtuu siten, että kuormitusten alueelle sijoitetaan saveen verrattuna moninkertaisen kimmokertoimen omaavia kalkkipilareita. Kalkkipilarit olisi lisäksi pystyttävä sijoittamaan mahdollisimman edullisesti kuormien ja maapohjan vaihtelujen mukaisesti. Tässä työssä esitetään seuraava menettelytapa:

Sijoitetaan aluksi kunkin kuormituksen alueelle sen verran pilareita, että ne saadaan juuri ja juuri myötäämään. Tämän seurauksena maapohjaan kohdistuu alkuperäisistä epätasaisista kuormista huolimatta tasainen kuorma. Lasketaan seuraavaksi tämän tasaisen kuorman aiheuttamat painumat samalla tavoin kuin stabiloimattomalle maalle. Tämän vaiheen suorittaa kohdan 4.2 mukainen tietokoneohjelma automaattisesti. Mikäli painumat ja painumaerot ovat vieläkin liian suuret, niin suurimmasta sallitusta kokonaispainumasta riippuen joko pelkästään harvennetaan pilarikenttää pienimpien painumien alueella tai myös samanaikaisesti tihennetään pilarikenttää suurimpien painumien alueella. Prosessi on iteratiivinen ja sitä jatketaan muuttamalla pilaritiheyksiä kunnes painumat ja painumaerot on supistettu hyväksytyihin rajoihin. Periaatteessa pilarit voidaan sijoittaa siten, että rakennus painuu tasaisesti.

Kalkkipilareilla on savea suuremman kimmokertoimen lisäksi myös savea huomattavasti suurempi vedenläpäisevyys. Tästä on hyötyä painumien nopeuttamisessa jo rakennusaikana tapahtuviksi sekä erityisesti ylipengertyön yhteydessä esikuormitusajan lyhentämisessä.

6.5 Kalkkipilarimenetelmän taloudellisuudesta

Kalkkipilarien kustannusten vertaaminen esim. paalutusvaihtoehtoon ei ole aivan yksiselitteistä. Vaikka kalkkipilarien kantokyky on vain noin 1/8 ~~1/8~~ 250 mm teräsbetonipaalun kantokyvystä, niin kalkkipilareita käytettäessä on aina otettava huomioon, että savi kantaa osan kuormista. Pientalokohteissa ei myöskään paalujen kantokykyä pystytä läheskään aina täysin käyttämään hyväksi. Jottei palkeista muodostuisi kohtuuttomia saatetaan joutua tyytymään paalujen kantokyvyn hyväksikäytössä 50 %:in. Tämänkin jälkeen mikäli saven kantama osuus kuormista on pieni on paalujen lukumäärä vain runsas neljännes kalkkipilarien lukumäärästä. Kalkkipilarien käytön kannalta edullisin lienee noin 6 m paksu savikko, jonka alla on vielä ainakin saman verran löyhää kitkamaata. Paalut jouduttaisiin tällöin lyömään kovaan pohjaan, kun kalkkipilarit ulotettaisiin vain saven paksuuden edellyttämään syvyyteen. Paalumetrit olisivat tämän jälkeen jo runsas puolet kalkkipilarimetreistä ja nykyhintojen mukaan tämä merkitsee 2-kerroksisen rivitalon perustamisessa noin 20 mk/asuntoneliö etua kalkkipilarien hyväksi paaluihin nähden. Jos lisäksi alapohjan osalta voidaan arvioida säästökseksi 10 mk/asuntoneliö käytettäessä maanvaraista laattaa kantavan alapohjan asemesta, saadaan tavoiteltavan säästön suuruudeksi noin 30 mk/asuntoneliö. Tämä edustanee tällä hetkellä suurinta ajateltavissa olevaa kalkkipilarien käytön tuomaa taloudellista hyötyä paalutusvaihtoehtoon nähden 2-kerroksista rivitaloa ajatellen, mutta edellyttää samalla kalkkipilarien kannalta ihanteellisia olosuhteita ja tiukkaa mitoitusta.

Perustamistavan valinnan ei tulisi olla itsestään selvää, vaan perustua usean vaihtoehtoisen tavan suunnitteluun. Käytettävissä olevat vaihtoehdot on suunniteltava siten, että niiden perusteella rakennus painumavaurioita kärsimättä ja perustuksia korjaamatta säilyy käyttökelpoisena. Paras vaihtoehto tulisi valita vasta sen jälkeen, kun useampia käyttökelpoisia ratkaisuja on suunniteltu.

7. YHTEENVETO

Painumien laskeminen on pehmeikölle pientaloja perustettaessa lähtökohta perustamistavan valinnalle. Jotta arvioista muodostuisi riittävän tarkkoja, on laskennassa pystyttävä jäljittämään todellista tilannetta tekemättä liiaksi yksinkertaistuksia. Ensimmäinen esiin tuleva kysymys on kuormituskaavion muodostaminen. Painumia käsin laskettaessa yleisintä lienee kuormituksen olettaminen yhdeksi tasaiseksi kuormaksi. Kuormituksen suuruus, pinta-ala, muoto ja korkeusasema vaikuttavat kuitenkin ratkaisevasti jännityksen jakautumiseen syvemmällä maapohjassa. Eri kuormitusten yhteisvaikutuksen huomioon ottamiseksi suositellaan tämän työn perusteella mahdollisimman tarkoin todellisuutta vastaavan kuormituskaavion käyttöä, jossa kuormien yhteisvaikutus lasketaan Boussinesq'in kaavoilla superpositiomenetelmää noudattamalla. Painuma-arvioiden perustuksessa ödometrikokeen tuloksiin on koejärjestelyihin ja kokeen analysointiin kiinnitettävä riittävästi huomiota. Konsolidaatiojännityksen määrittäminen lienee tärkein yksittäinen toimenpide lopputulosten kannalta ja edellyttää tiheää kuormitusportaiden väliä. Tässä työssä esitetyn teorian ja tietokonesovellutuksen avulla voidaan konsolidaatiojännitys määrittää analyttisesti myös muulla tavalla kuin kaksinkertaisia kuormia käyttämällä. Huomattavasti todellisia kuormituksia suurempien kuormitusportaiden käyttö on tällöin tarpeetonta.

Kolmen esimerkkikohteena olleen 1-kerroksisen päiväkodin perusteella voidaan todeta, ettei perustamistavan valinta saa olla itsestään selvää. Laskemalla ko. kohteiden painumat kehitettyjen tietokoneohjelmien avulla on voitu turvautua edulliseen perustamistapavaihtoehtoon. Laskettuja painumia todellisiin vertaamalla on saatu palautetta laskentatarkkuudesta sekä varmistus esikuormituksella saavutetusta konsolidaatiotilan muutoksesta.

ENGLISH SUMMARY

The choice of a foundation method should be based on settlement calculation when small houses are founded on weak soils. It is important for the accuracy of calculation to simulate the real situation without too many simplifications. The first concern is to form the load pattern. By manual settlement analysis the most common assumption obviously is that the pattern consists of one equally loaded surface area. The size, area, shape and level of the load, however, decisively affect the stress distribution in the ground. In order to take the influence of different loads into consideration, it can be recommended on the basis of the present study to use a pattern of loads which corresponds the real situation as much as possible and in which the influence of loads is calculated with the Boussinesq equations following the superposition method. When the settlement estimates are based on the results of the oedometer test, enough attention must be paid to the arrangements and analysing of the test. The determination of the pre-consolidation pressure obviously is the most important separate measure when the results are considered and implies the use of minor load increments. By using the theory and computer application given in this study, the pre-consolidation pressure can be determined analytically also by using arbitrary load increments. Thus it is unnecessary to use load increments significantly bigger than the real stresses directed to the soil.

On the basis of the three one-storey nurseries chosen as examples, it can be considered that the choice of a foundation method is not self-evident. By calculating the settlements of the above-mentioned buildings using developed computer programmes, it has been possible to choose economical foundation methods. By comparing the calculated settlements with the measured ones, the accuracy of the calculation has been tested and the change in pre-consolidation pressure gained by preloading has been ascertained.

KIRJALLISUUSLUETTELO

1. ASSARSON K., BROMS, B., GRANHOLM S., PAUS, K.:
Deep Stabilization of Soft Cohesive Soils.
Skellefteå 1974.
2. BROMS, B., BOMAN, P.:
Stabilisering av jord med kalkpelare.
Stockholm 1977.
3. HELENELUND, K.V.:
Maarakennusmekaniikka.
Otaniemi 1974. TKY, moniste 137.
4. JANBU., N.:
Grunnlag i geoteknikk.
Trondheim 1970.
5. LEMINEN, K., RATHMAYER, H.:
Pystyjoituskokeilu Helsinki-Itäkeskus.
VTT, Geotekniikan laboratorio, Loppuraportti 1978.
6. Pohjarakennusohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto,
julkaisu RIL 121. Helsinki 1979.
7. PYLKKÄNEN, J.:
Hienorakeisten maalajien painumisominaisuuksista.
Otaniemi 1973. VTT, Geotekniikan laboratorio. Tiedonanto 7.
8. SPIEGEL, M.:
Statistics.
Bristol 1972.
9. TAMMIRINNE, M.:
Rakennusten perustaminen maanvaraan. Painuman laskeminen.
Otaniemi 1975. VTT, Geotekniikan laboratorio. Tiedonanto 21.
10. TAYLOR, D.W.:
Fundamentals of Soil Mechanics.
New York 1954.

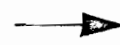
ALKUARVOT PAINUMIEN LASKEMISEKSI LAADITTUUN OHJELMAAN

10 DATA	Työn nimi	" P A I - 2 0 1 1 "										
20 DATA	Maastomallin x-koordinaat- tien lukumäärä	2										
30 DATA	x-koordinaatit (pienimäs- tä suurimpaan)	103.5	112									
40 DATA	y-koord. lukumäärä	2										
50 DATA	y-koordinaatit (pienimäs- tä suurimpaan)	102	116									
60 DATA	Maakerrosten lukumäärä	2										
70 DATA	Maakerrosrajat + per. t.	Maan- pinta	Kerr. 1 alap.	Kerr. 2 alap.	Kerr. 3 alap.	Kerr. 4 alap.	Kerr. 5 alap.	Kerr. 6 alap.	Kuormitus- pinta			
80 DATA	_____ " _____	15.4	15.0	9.0						15.4		
90 DATA	_____ " _____	15.6	15.1	9.9						15.4		
100 DATA	_____ " _____	15.3	15.0	8.9						15.4		
110 DATA	_____ " _____	15.2	14.8	8.7						15.4		
120 DATA	_____ " _____											
130 DATA	_____ " _____											
140 DATA	_____ " _____											
150 DATA	_____ " _____											
160 DATA	Tilavuuspainot (kN/m ³)	13	8									
170 DATA	Painumisominaisuudet	" (M) (O) (V) K " RENGASTA OIKEAT VAIHTOEHDOT										
		↑ (Suoraviivainen) / logaritminen										
180 DATA	$m, \beta, m_2, \beta_2, \sigma_c$ (kPa)	0	0	0	0	0						
190 DATA	_____ " _____	8.074	-0.777	45.988	0	45.51						
200 DATA	_____ " _____											
210 DATA	_____ " _____											
220 DATA	_____ " _____											
230 DATA	_____ " _____											

LIITE 1.

2(3)

240 DATA	Kuormitusportaiden lukum.	1	Maakerros no 1							
250 DATA	Kuormitusportaati (kPa)	0								
260 DATA	Kokoonpuristumat (%)	0								
270 DATA	Kuormitusportaiden lukum.	8	Maakerros no 2							
280 DATA	Kuormitusportaati (kPa)	12.5	25	37.5	50	62.5	75	87.5	100	
290 DATA	Kokoonpuristumat (%)	1.05	1.80	3.25	6.53	10.5	13.78	15.8	17.1	
300 DATA	Kuormitusportaiden lukum.		Maakerros no 3							
310 DATA	Kuormitusportaati (kPa)									
320 DATA	Kokoonpuristumat (%)									
330 DATA	Kuormitusportaiden lukum.		Maakerros no 4							
340 DATA	Kuormitusportaati (kPa)									
350 DATA	Kokoonpuristumat (%)									
360 DATA	Kuormitusportaiden lukum.		Maakerros no 5							
370 DATA	Kuormitusportaati (kPa)									
380 DATA	Kokoonpuristumat (%)									
390 DATA	Kuormitusportaiden lukum.		Maakerros no 6							
400 DATA	Kuormitusportaati (kPa)									
410 DATA	Kokoonpuristumat (%)									
420 DATA	Vesipit. (%), $\sigma_c - \sigma_o$ (kPa)	0	0							
430 DATA	— " — " —	61.3	15							
440 DATA	— " — " —									
450 DATA	— " — " —									
460 DATA	— " — " —									
470 DATA	— " — " —									



480 DATA	Kuormien lukumäärä	16	x ₁	y ₁	x ₂	y ₂	q (kPa)
490 DATA	Kuorma 1		100	100	113,5	118	0
500 DATA	— " — 2		103	103	104	104	57
510 DATA	— " — 3		103	104	104	108	17
520 DATA	— " — 4		103	108	104	110	45
530 DATA	— " — 5		103	110	104	114	17
540 DATA	— " — 6		103	114	104	115	57
550 DATA	— " — 7		104	103	109,5	104	54
560 DATA	— " — 8		104	104	109,5	108	14
570 DATA	— " — 9		104	108	109,5	110	42
580 DATA	— " — 10		104	110	109,5	114	14
590 DATA	— " — 11		104	114	109,5	115	57
600 DATA	— " — 12		109,5	103	110,5	104	57
610 DATA	— " — 13		109,5	104	110,5	108	17
620 DATA	— " — 14		109,5	108	110,5	110	10
630 DATA	— " — 15		109,5	110	110,5	114	17
640 DATA	— " — 16		109,5	114	110,5	115	57
650 DATA	— " — 17						
660 DATA	— " — 18						
670 DATA	— " — 19						
680 DATA	— " — 20						
690 DATA	Laskentapisteiden lukum.	8	x	y			
700 DATA	Laskentapiste 1		103,87	103,87			
710 DATA	— " — 2		108,79	103,87			
720 DATA	— " — 3		102	106			
730 DATA	— " — 4		106,75	106			
740 DATA	— " — 5		103,87	107,48			
750 DATA	— " — 6		108,79	107,48			
760 DATA	— " — 7		103,87	109,74			
770 DATA	— " — 8		108,79	109,74			
780 DATA	— " — 9						
790 DATA	— " — 10						

P A I - 2 0 1 1

ALKUARVOT:

X-KOORDINAATTEJA 2 : 103.5 112.0
 Y-KOORDINAATTEJA 2 : 102.0 116.0

MAAKERROKSIA 2 :

15.4	15.0	9.0	15.4
15.6	15.1	9.9	15.4
15.3	15.0	8.9	15.4
15.2	14.8	8.7	15.4

(MAAKERROKSET ON NUMEROITU YLHAALTA ALASPAIN)

MAAKERROS GAMMA* (KN/M³)

1	13.00
2	8.00

PAINUMISOMINAISUUDET: MDV

TANGENTTIMODUULIMENETELMA:

MAAKERROS	M	BEETTA	M2	BEETTA 2	SIGMA C
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
2	8.074	-0.777	145.925	0.000	45.51

SEKANTTIMODUULIMENETELMA:

MAAKERROS	KUORMIA	SIGMA(KPA)	EPSILON(%)
1	1	0.00	0.00
2	8	12.50	1.05
		25.00	1.80
		37.50	3.25
		50.00	6.53
		62.50	10.50
		75.00	13.48
		87.50	15.33
		100.00	17.10

(VALIARVOT INTERPOLOIDAAN SUORAVIIVAISESTI)

KOKKONPURISTUVUUSINDEKSIMENETELMA:

MAAKERROS	VESIPITOISUUS(%)	YLIKONSOLIDOITUMINEN(KPA)
1	0.00	0.00
2	61.30	15.00

LIITE 2.

2(4)

KUORMIA 16 :					
X1	Y1	X2	Y2	Ø (KPA)	KUORMITUSALUEEN MITAT (M*2)
100.0	100.0	113.5	118.0	8.0	18.0 * 13.5
103.0	103.0	104.0	104.0	57.0	1.0 * 1.0
103.0	104.0	104.0	108.0	17.0	4.0 * 1.0
103.0	108.0	104.0	110.0	45.0	2.0 * 1.0
103.0	110.0	104.0	114.0	17.0	4.0 * 1.0
103.0	114.0	104.0	115.0	57.0	1.0 * 1.0
104.0	103.0	109.5	104.0	54.0	1.0 * 5.5
104.0	104.0	109.5	108.0	14.0	4.0 * 5.5
104.0	108.0	109.5	110.0	42.0	2.0 * 5.5
104.0	110.0	109.5	114.0	14.0	4.0 * 5.5
104.0	114.0	109.5	115.0	54.0	1.0 * 5.5
109.5	103.0	110.5	104.0	57.0	1.0 * 1.0
109.5	104.0	110.5	108.0	17.0	4.0 * 1.0
109.5	108.0	110.5	110.0	45.0	2.0 * 1.0
109.5	110.0	110.5	114.0	17.0	4.0 * 1.0
109.5	114.0	110.5	115.0	57.0	1.0 * 1.0

LASKENTAPISTEITA 8 :

X	Y
103.8	103.8
108.7	103.8
102.0	106.0
106.7	106.0
103.8	107.4
108.7	107.4
103.8	109.7
108.7	109.7

LASKELMAT:

PISTEESSÄ X= 103.87 Y= 103.87

Z	SIGMA KOK. (KPA)	SIGMA ESIK. (KPA)	*****PAINUMAT*****		
(M)	(KPA)	(KPA)	M (MM)	Ø (MM)	V (MM)
15.2	60.4	2.7	0.0	0.0	0.0
12.0	47.7	28.9	81.5	217.2	33.1
PAINUMAT YHTEENSÄ			81.5	217.2	33.1

PISTEESSÄ X= 108.79 Y= 103.87

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	Q	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.1	55.8	2.2	0.0	0.0	0.0
11.9	49.3	28.6	126.6	248.8	49.7
PAINUMAT YHTEENSA			126.6	248.8	49.7

AINDASTAAN HUOMAUTUS :

TUTKITTAVA PISTE X= 102.0 Y= 106.0 ON MAASTOMALLIN ULKOPUOLELLA. KERROSPAKSUUDET ON EKSTRAPOLOITU NELJASTA LAHIMMASTA POHJATIETOPISTEESTA.

PISTEESSÄ X= 102 Y= 106

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	Q	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.2	11.5	3.4	0.0	0.0	0.0
12.1	41.2	28.6	14.2	115.1	0.0
PAINUMAT YHTEENSA			14.2	115.1	0.0

PISTEESSÄ X= 106.75 Y= 106

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	Q	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.1	24.5	2.5	0.0	0.0	0.0
12.0	52.8	28.6	209.4	307.8	76.2
PAINUMAT YHTEENSA			209.4	307.8	76.2

PISTEESSÄ X= 103.87 Y= 107.48

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	Q	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.2	27.9	3.2	0.0	0.0	0.0
12.1	50.8	28.4	155.9	261.6	60.1
PAINUMAT YHTEENSA			155.9	261.6	60.1

LIITE 2.

4(4)

PISTEESSÄ X= 108.79 Y= 107.48

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	Q	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.1	24.9	2.4	0.0	0.0	0.0
11.9	53.2	28.6	218.4	316.3	79.1
PAINUMAT YHTEENSÄ			218.4	316.3	79.1

PISTEESSÄ X= 103.87 Y= 109.74

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	Q	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.2	54.9	3.5	0.0	0.0	0.0
12.2	52.2	28.1	184.3	282.5	71.4
PAINUMAT YHTEENSÄ			184.3	282.5	71.4

PISTEESSÄ X= 108.79 Y= 109.74

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	Q	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.1	50.1	2.5	0.0	0.0	0.0
12.0	54.7	28.6	249.8	342.0	89.6
PAINUMAT YHTEENSÄ			249.8	342.0	89.6

P A I - 2 0 1 1

ALKUARVOT:

X-KOORDINAATTEJA 2 : 103.5 112.0
 Y-KOORDINAATTEJA 2 : 102.0 116.0

MAAKERROKSIA 2 :
 15.4 15.0 9.0 15.4
 15.6 15.1 9.9 15.4
 15.3 15.0 8.9 15.4
 15.2 14.8 8.7 15.4

(MAAKERROKSET ON NUMEROITU YLHAALTA ALASPAIN)

MAAKERROS	GAMMA* (KN/M ³)
1	13.00
2	8.00

PAINUMISOMINAISUUDET: MOV

TANGENTTIMODUULIMENETELMA:

MAAKERROS	M	BEETTA	M2	BEETTA 2	SIGMA C
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
2	8.074	-0.777	145.925	0.000	55.00

SEKANTTIMODUULIMENETELMA:

MAAKERROS	KUORMIA	SIGMA(KPA)	EPSILON(%)
1	1	0.00	0.00
2	6	25.00	7.74
		55.00	8.12
		62.50	10.50
		75.00	13.48
		87.50	15.33
		100.00	17.10

(VALIARVOT INTERPOLOIDAAN SUORAVIIVAISESTI)

KOKOONPURISTUVUUSINDEKSIMENETELMA:

MAAKERROS	VESIPITOISUUS(%)	YLIKONSOLIDITUMINEN(KPA)
1	0.00	0.00
2	61.30	27.00

LIITE 3.

2(4)

KUORMIA 16 :

X1	Y1	X2	Y2	Q (KPA)	KUORMITUSALUEEN MITAT (M ²)
100.0	100.0	113.5	118.0	8.0	18.0 * 13.5
103.0	103.0	104.0	104.0	57.0	1.0 * 1.0
103.0	104.0	104.0	108.0	17.0	4.0 * 1.0
103.0	108.0	104.0	110.0	45.0	2.0 * 1.0
103.0	110.0	104.0	114.0	17.0	4.0 * 1.0
103.0	114.0	104.0	115.0	57.0	1.0 * 1.0
104.0	103.0	109.5	104.0	54.0	1.0 * 5.5
104.0	104.0	109.5	108.0	14.0	4.0 * 5.5
104.0	108.0	109.5	110.0	42.0	2.0 * 5.5
104.0	110.0	109.5	114.0	14.0	4.0 * 5.5
104.0	114.0	109.5	115.0	54.0	1.0 * 5.5
109.5	103.0	110.5	104.0	57.0	1.0 * 1.0
109.5	104.0	110.5	108.0	17.0	4.0 * 1.0
109.5	108.0	110.5	110.0	45.0	2.0 * 1.0
109.5	110.0	110.5	114.0	17.0	4.0 * 1.0
109.5	114.0	110.5	115.0	57.0	1.0 * 1.0

LASKENTAPISTEITA 8 :

X	Y
103.8	103.8
108.7	103.8
102.0	106.0
106.7	106.0
103.8	107.4
108.7	107.4
103.8	109.7
108.7	109.7

LASKELMAT:

PISTEESSÄ X= 103.87 Y= 103.87

Z	SIGMA KOK. (KPA)	SIGMA ESIK. (KPA)	*****PAINUMAT*****		
(M)	(KPA)	(KPA)	M (MM)	D (MM)	V (MM)
15.2	60.4	2.7	0.0	0.0	0.0
12.0	47.7	28.9	20.2	14.0	0.0
PAINUMAT YHTEENSÄ			20.2	14.0	0.0

PISTEESSÄ X= 108.79 Y= 103.87

Z	SIGMA		*****PAINUMAT*****		
	KOK.	ESIK.	M	Q	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.1	55.8	2.2	0.0	0.0	0.0
11.9	49.3	28.6	22.4	15.7	0.0
PAINUMAT YHTEENSA			22.4	15.7	0.0

AINDASTAAN HUOMAUTUS :

TUTKITTAVA PISTE X= 102.0 Y= 106.0 ON MAASTOMALLIN ULKOPUOLELLA. KERROSPAKSUUDET ON EKSTRAPOLOITU NELJÄSTÄ LAHIMMASTA POHJATIETOPISTEESTÄ.

PISTEESSÄ X= 102 Y= 106

Z	SIGMA		*****PAINUMAT*****		
	KOK.	ESIK.	M	Q	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.2	11.5	3.4	0.0	0.0	0.0
12.1	41.2	28.6	14.2	9.1	0.0
PAINUMAT YHTEENSA			14.2	9.1	0.0

PISTEESSÄ X= 106.75 Y= 106

Z	SIGMA		*****PAINUMAT*****		
	KOK.	ESIK.	M	Q	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.1	24.5	2.5	0.0	0.0	0.0
12.0	52.8	28.6	24.7	18.0	0.0
PAINUMAT YHTEENSA			24.7	18.0	0.0

PISTEESSÄ X= 103.87 Y= 107.48

Z	SIGMA		*****PAINUMAT*****		
	KOK.	ESIK.	M	Q	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.2	27.9	3.2	0.0	0.0	0.0
12.1	50.8	28.4	22.6	16.1	0.0
PAINUMAT YHTEENSA			22.6	16.1	0.0

4(4)

PISTEESSÄ X= 108.79 Y= 107.48

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	□	V
	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.1	24.9	2.4	0.0	0.0	0.0
11.9	53.2	28.6	25.1	18.4	0.0
PAINUMAT YHTEENSA			25.1	18.4	0.0

PISTEESSÄ X= 103.87 Y= 109.74

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	□	V
	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.2	54.9	3.5	0.0	0.0	0.0
12.2	52.2	28.1	23.5	16.9	0.0
PAINUMAT YHTEENSA			23.5	16.9	0.0

PISTEESSÄ X= 108.79 Y= 109.74

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	□	V
	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.1	50.1	2.5	0.0	0.0	0.0
12.0	54.7	28.6	26.0	19.4	0.0
PAINUMAT YHTEENSA			26.0	19.4	0.0

< KALKKIPILARIT >

KALKKIPILARIEN KIMMOKERROIN (KPA)= 20000
 KALKKIPILARIEN MYÖTOKUORMA (KN)= 40
 KALKKIPILARIEN HALKAISIJA (M)= .5

PILARIKENTTA	X1	Y1	X2	Y2	KPL	A(KR.)
1	100.0	100.0	103.0	118.0	0	0.000
2	103.0	103.0	104.0	104.0	2	0.290
3	103.0	104.0	104.0	108.0	2	0.085
4	103.0	108.0	104.0	110.0	3	0.228
5	103.0	110.0	104.0	114.0	2	0.085
6	103.0	114.0	104.0	115.0	2	0.290
7	104.0	103.0	109.5	104.0	8	0.274
8	104.0	104.0	109.5	108.0	8	0.070
9	104.0	108.0	109.5	110.0	12	0.213
10	104.0	110.0	109.5	114.0	8	0.070
11	104.0	114.0	109.5	115.0	8	0.274
12	109.5	103.0	110.5	104.0	2	0.290
13	109.5	104.0	110.5	108.0	2	0.085
14	109.5	108.0	110.5	110.0	3	0.228
15	109.5	110.0	110.5	114.0	2	0.085
16	109.5	114.0	110.5	115.0	2	0.290
17	110.5	100.0	113.5	118.0	0	0.000
18	103.0	100.0	110.5	103.0	0	0.000
19	103.0	115.0	110.5	118.0	0	0.000

PISTEESSA X= 103.87 Y= 103.87

Z	SIGMA KOK. (M)	SIGMA ESIK. (KPA)	*****PAINUMAT*****		
	(KPA)	(KPA)	M (MM)	D (MM)	V (MM)
15.2	11.1	2.7	0.0	0.0	0.0
12.0	35.9	28.9	8.8	48.3	87.0
PAINUMAT YHTEENSA			8.8	48.3	87.0

2(3)

PISTEESSA X= 108.79 Y= 103.87

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	Ø	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.1	10.5	2.2	0.0	0.0	0.0
11.9	35.8	28.6	9.2	50.2	90.9
PAINUMAT YHTEENSA			9.2	50.2	90.9

AINOASTAAN HUOMAUTUS :

TUTKITTAVA PISTE X= 102.0 Y= 106.0 ON MAASTOMALLIN ULKOPUOLELLA. KERROSPAKSUUDET ON EKSTRAPOLOITU NELJASTA LAHIMMASTA POHJATIETOPISTEESTA.

PISTEESSA X= 102 Y= 106

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	Ø	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.2	11.4	3.4	0.0	0.0	0.0
12.1	35.1	28.6	7.9	42.9	78.5
PAINUMAT YHTEENSA			7.9	42.9	78.5

PISTEESSA X= 106.75 Y= 106

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	Ø	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.1	10.8	2.5	0.0	0.0	0.0
12.0	36.4	28.6	9.6	52.9	95.1
PAINUMAT YHTEENSA			9.6	52.9	95.1

PISTEESSA X= 103.87 Y= 107.48

Z	SIGMA	SIGMA	*****PAINUMAT*****		
(M)	KOK.	ESIK.	M	Ø	V
(M)	(KPA)	(KPA)	(MM)	(MM)	(MM)
15.2	11.5	3.2	0.0	0.0	0.0
12.1	35.9	28.4	9.1	49.7	90.3
PAINUMAT YHTEENSA			9.1	49.7	90.3

PISTEESSA X= 108.79 Y= 107.48

Z	SIGMA KOK.	SIGMA ESIK.	*****PAINUMAT*****		
(M)	(KPA)	(KPA)	M	□	V
			(MM)	(MM)	(MM)
15.1	10.7	2.4	0.0	0.0	0.0
11.9	36.3	28.6	9.6	52.6	94.7
PAINUMAT YHTEENSA			9.6	52.6	94.7

PISTEESSA X= 103.87 Y= 109.74

Z	SIGMA KOK.	SIGMA ESIK.	*****PAINUMAT*****		
(M)	(KPA)	(KPA)	M	□	V
			(MM)	(MM)	(MM)
15.2	11.8	3.5	0.0	0.0	0.0
12.2	35.7	28.1	9.1	49.0	89.6
PAINUMAT YHTEENSA			9.1	49.0	89.6

PISTEESSA X= 108.79 Y= 109.74

Z	SIGMA KOK.	SIGMA ESIK.	*****PAINUMAT*****		
(M)	(KPA)	(KPA)	M	□	V
			(MM)	(MM)	(MM)
15.1	10.8	2.5	0.0	0.0	0.0
12.0	36.3	28.6	9.5	52.3	94.1
PAINUMAT YHTEENSA			9.5	52.3	94.1

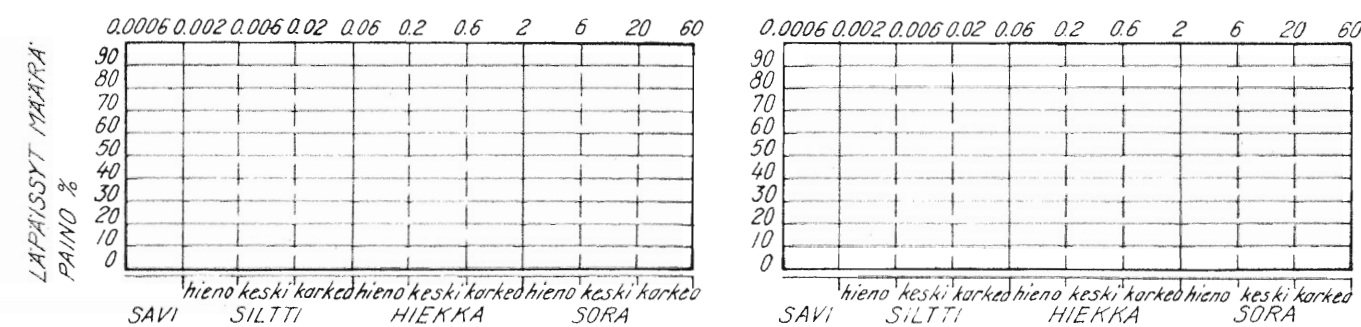
MAAKERROKSET

GEOTEKNISET OMINAISUUDET

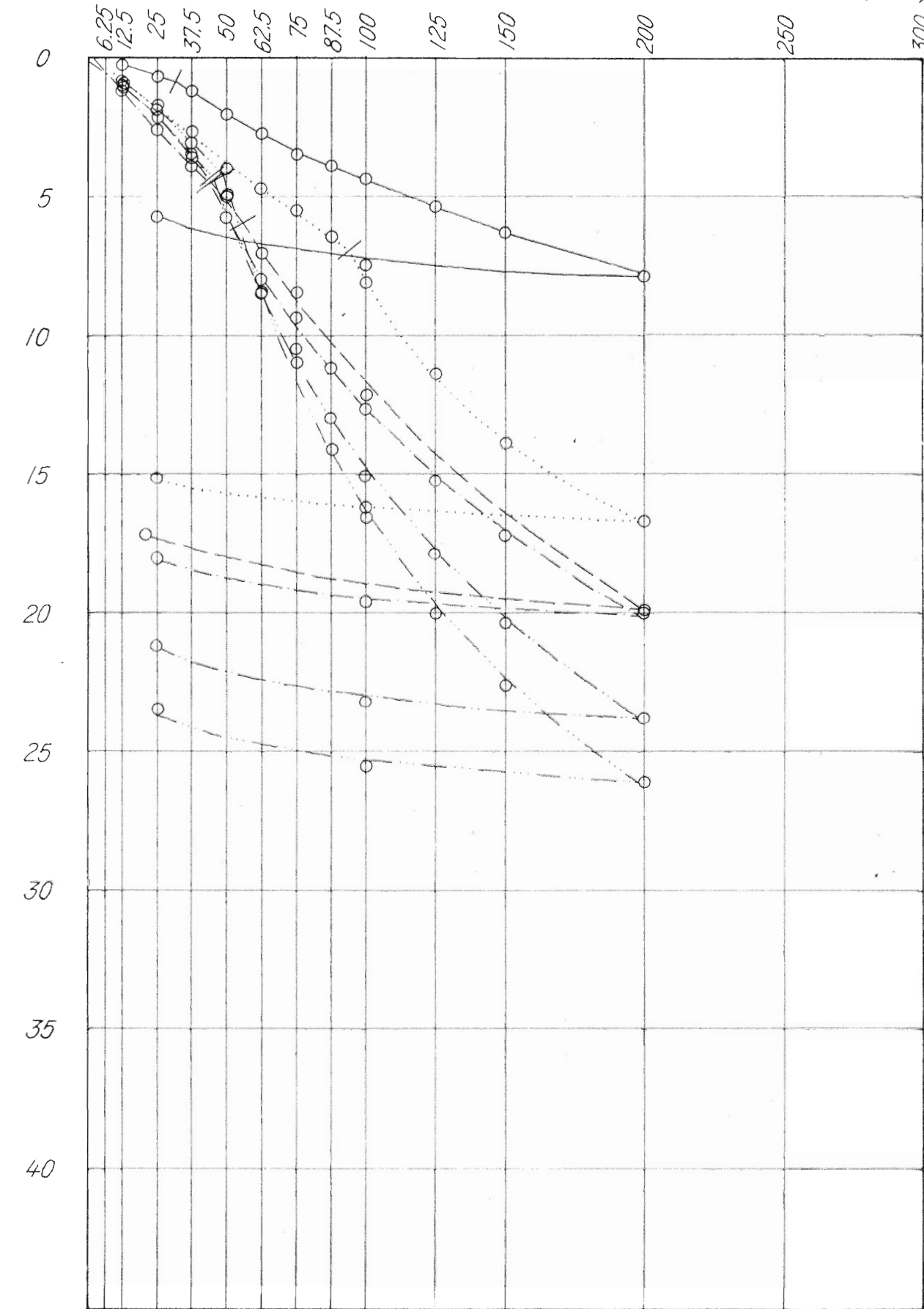
KOKOONPURISTUVUUS

KOKOONPURISTUVUUS

RAKEISUUSKAYRÄT



KUORMITUS-KOKOONPURISTUMAKAYRÄT



KOKOONPURISTUMAT E(%)

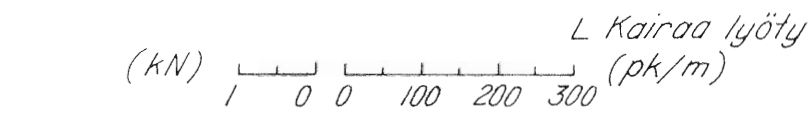
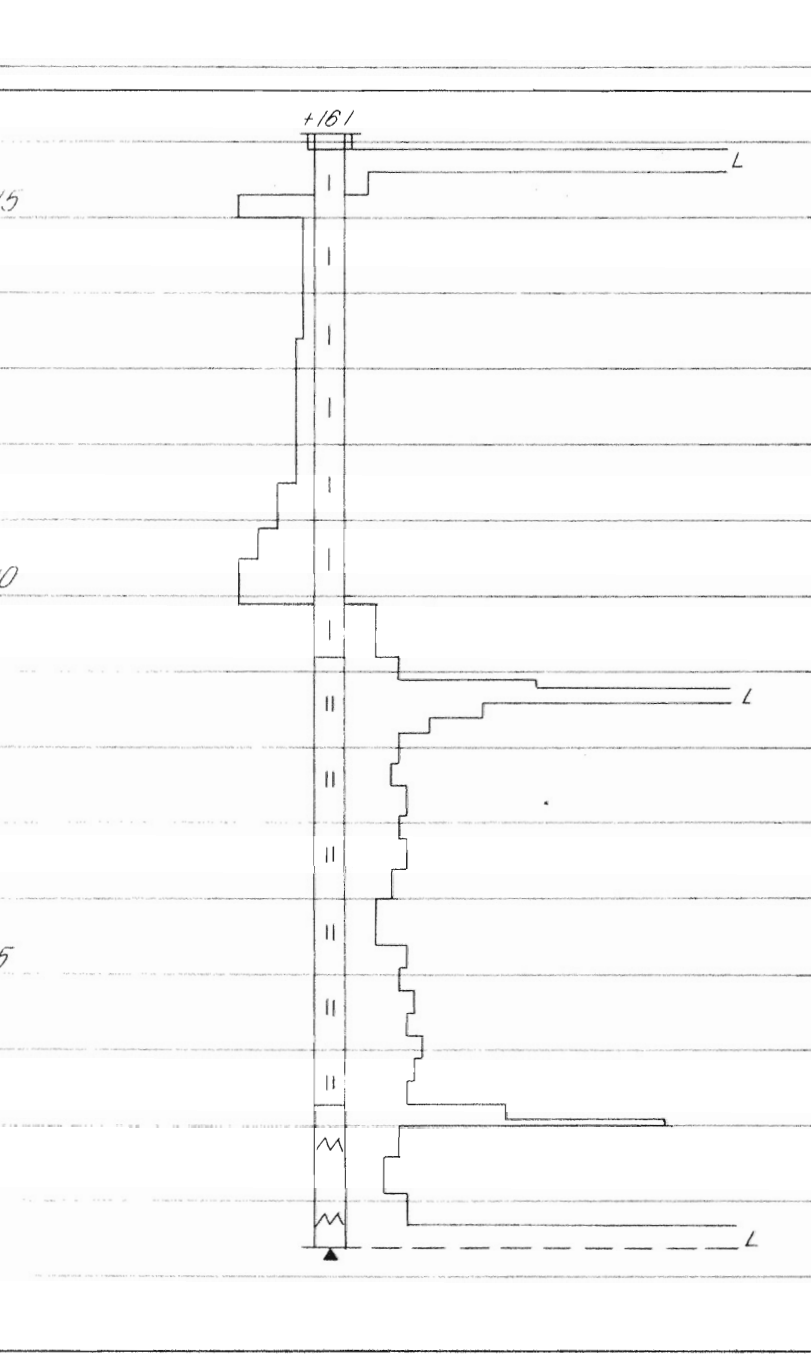
KUORMITUS δ (kPa)	SYVYYS (m)					
	1.33	2.03	2.73	3.43	4.13	4.83
12.5	0.20	1.07	1.18	1.00	0.90	0.83
25.0	0.60	2.15	2.55	2.15	1.85	1.75
37.5	1.15	3.65	3.83	3.43	3.03	2.65
50.0	2.00	5.00	5.78	5.78	4.98	4.00
62.5	2.73	7.05	8.00	8.55	8.43	4.73
75.0	3.48	8.45	9.40	10.50	11.00	5.48
87.5	3.83		11.20	13.00	14.13	6.50
100.0	4.35	12.17	12.75	15.10	16.60	8.08
125.0	5.30		15.23	17.90	20.10	11.40
150.0	6.25		17.23	20.40	22.65	13.88
200.0	7.85	19.85	20.05	23.80	25.98	16.65
250.0	5.60	17.20	18.00	21.15	23.65	15.15

TUNNUSLUVUT

SYVYYS	MODUULILUVUT		JÄNNITYSEKSPONENTIT		ESIKONSOLIDAATIO	
	m	m ₂	B	B ₂	δ_c (kPa)	E _c (%)
1.33	24.360	89.603	0.491	0	31.87	0.81
2.03	9.312	78.469	0.202	0	55.88	5.96
2.73	9.551	99.223	0.100	0	44.23	4.49
3.43	7.531	76.409	-0.010	0	45.31	4.27
4.13	6.438	86.643	-0.227	0	48.91	4.26
4.83	5.841	143.127	-0.979	0	93.81	6.92

KAIRAUSPISTE	X _k 257.0 y _k 105.0 maapinta +16.1	NÄYTTEENOTTOTAPA:
NÄYTTEENOTTOPISTE	X _k 257.0 y _k 105.0 maapinta +16.66	NÄYTTEENOTTOTAPA:
NÄYTTEENOTTOPISTE	X _k y _k maapinta	NÄYTTEENOTTOTAPA:

PAINOKAIRAUS	TILAVUUS-PAINO γ (kN/m ³) VESIPITOISUUS w JA HIENOUSLUKU F (%)	LEIKKAUSLUJUUS S (kPa)	SENSITIIVISYYS S _f	ESIKUORMA δ_0 JA ESIKONS. JÄNNÄ δ_c (kPa)	KONSOLIDAATIO-KERROIN C _v (m ² /v)
--------------	--	------------------------	-------------------------------	---	--



○ γ	× F W w _p l _p w _L	+ Siipikairaus, maasto ○ Puristusko ▽ Kartiokoe	• S _f	○ δ_c ○ δ_0	+ C _v
-----	--	---	------------------	------------------------------	------------------

KAUP. OSA	KORTTELI	TONTTI	ALUE	VIRANOM. ARKISTOMERK.
RAKENNUSTOIMENPIDE				PIIRUSTUSLAJI Pohjarakennus
TYÖN NIMI PUUSTOLA K OY KÄSITYÖLÄISEN TIE 9 LASTEN PÄIVÄKOTI				PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ Laboratoriotutkimustulokset pisteessä X _k 257.0 y _k 105.0
HELSINGIN KAUPUNGIN KIIESTEISTÖVIRASTO GEOTEKNILLINEN TOIMISTO				TILAAJA ASUNTOTUOTANTOTOIMISTO
PVM 27.4.1979	TUTK. Sami Savelle	PIIRT. Sami Savelle	TYÖNUMERO GEO 1386.2	JUOKS. NO MITTA- KAAVA PIIR. NO

MAAKERROKSET

GEOTEKNISET OMINAISUUDET

RAKEISUUSKAYRAT

KOKOONPURISTUVUUS

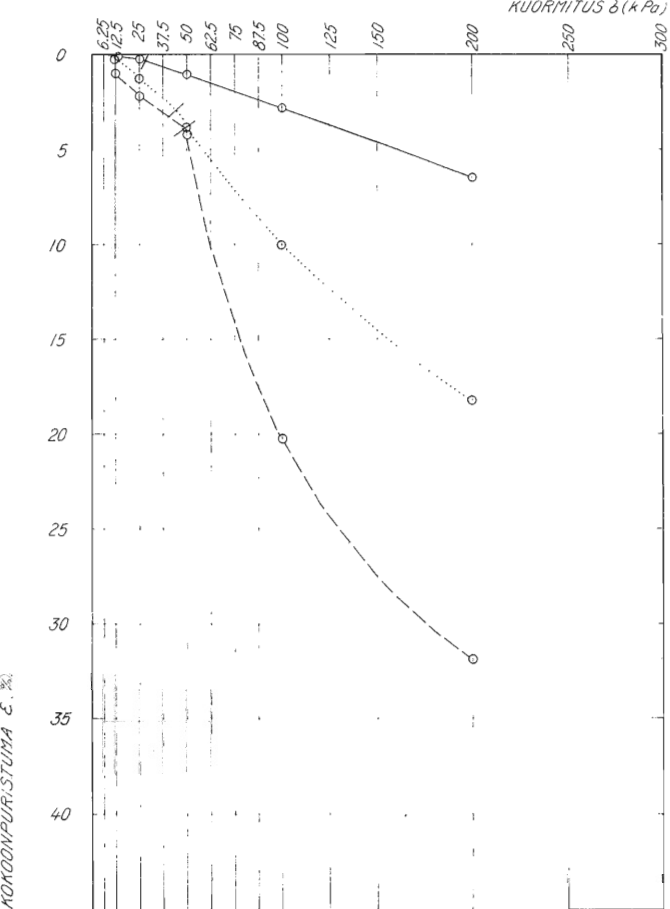
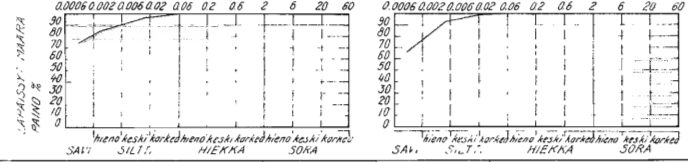
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

KUORMITUS-KOKOONPURISTUMAKAYRAT

KOKOONPURISTUVUUS

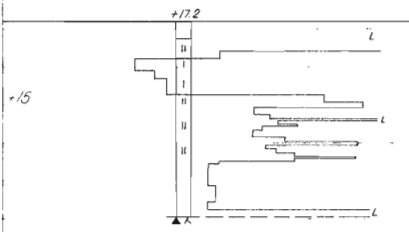
KOKOONPURISTUMAT ϵ (%)

KAIRAUSPISTE	X_k	153	NÄYTTEENOTTOTAPA: L
	U_k	125	
NÄYTTEENOTTOPISTE 1	X_k	145.5	NÄYTTEENOTTOTAPA: ST-II
	U_k	155.0	
NÄYTTEENOTTOPISTE 2	X_k	145.5	NÄYTTEENOTTOTAPA: ST-II
	U_k	125.0	

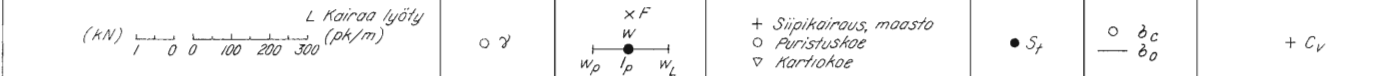


KUORMITUS δ (kPa)	SYVYYS (m)		
	1	2	2
12.5	0.10	0.25	1.15
25	0.35	1.30	2.10
50	1.10	3.80	4.25
100	2.80	9.90	20.25
200	6.50	18.30	32.00

PAINOKAIRAUS	TILAVUUS-PAINO γ (kN/m ³)	VESIPITOISUUS w JA HIENOSUURUUS F (%)	LEIKKAUSLUJUUS S (kPa)	SENSITIIVISYYS S_f	ESIKUORMA δ_0 JA ESIKONSOLIDATIIONIN δ_c (kPa)	KONSOLIDAATIOKERROIN C_v (m ² /v)
	10 15 20	0 50 100 150	0 10 20 30 40 50 60	0 10 20	0 20 40 80	0.5 1.0 1.5 2.0 2.5



γ	w	S_f	δ_c	δ_0	C_v
----------	-----	-------	------------	------------	-------



TUNNUSLUVUT

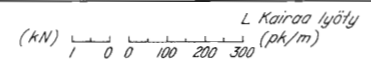
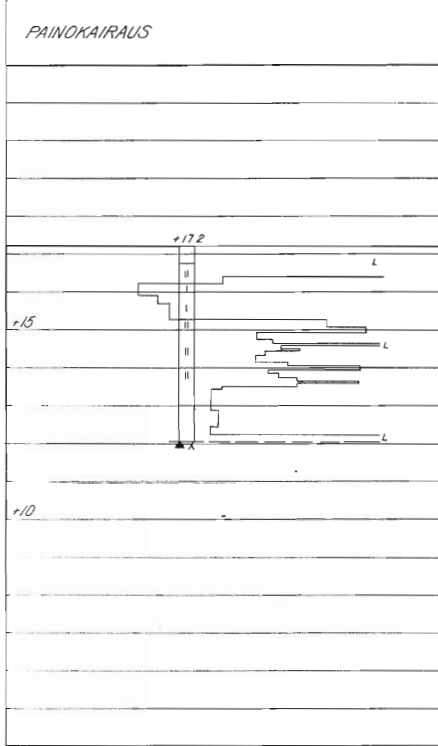
SYVYYS	MODUULILUVUT		JÄNNITYSEKSPONENTIT		ESIKONSOLIDAATIO	
	m	m_2	β	β_2	δ_c (kPa)	ϵ_c (%)
1.14	28.370		1.122		27.89	0.40
1.48	9.704		0.461		44.47	2.93
1.65	5.085		-0.445		49.38	3.95

Geotekninen osasto julkaisu 14

KAUP. OSA 33	KORTTELI 33233	TONTTI 2	ALUE	VIRANOM. ARKISTOMERK.
RAKENNUSOIMENPIDE: Uudisrakennus				PIIRUSTUSLAJI: Pohjarakennus
TYÖN NIMI: MALMINKARTANON II LASTEN PAIVAKOTI "APILA" TSO 2139				PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ: Laboratoriotutkimustulokset pisteissä 1 X_k 145.5 U_k 155.0, 2 X_k 145.5 U_k 125.0
HELSINGIN KAUPUNGIN KIIENTEISTÖVIRASTO				TILAAJA: HKR / TSO
GEOTEKNILLINEN TOIMISTO				TYÖNUMERO: 1930.2/II
PVM. 23.4.1979	TUTK. Pentti	PIIRIT. Pentti	TARK. Pentti	PIIRI NO. 07
SUUNN. Pentti				GEO

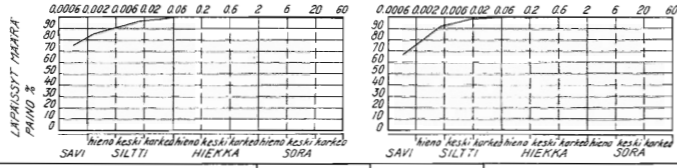
MAAKERROKSET

KAIRAUSPISTE	X _k	153	NÄYTEENOTTOPISTE:
	Y _k	125	
	maapinta	+17.2	
NÄYTEENOTTOPISTE 3	X _k	155.5	NÄYTEENOTTOPISTE ST-II
	Y _k	118.0	
	maapinta	+17.1	
NÄYTEENOTTOPISTE 4	X _k	157.5	NÄYTEENOTTOPISTE ST-II
	Y _k	129	
	maapinta	+17.3	



GEOTEKNISET OMINAISUUDET

RAKEISUUSKÄYRÄT

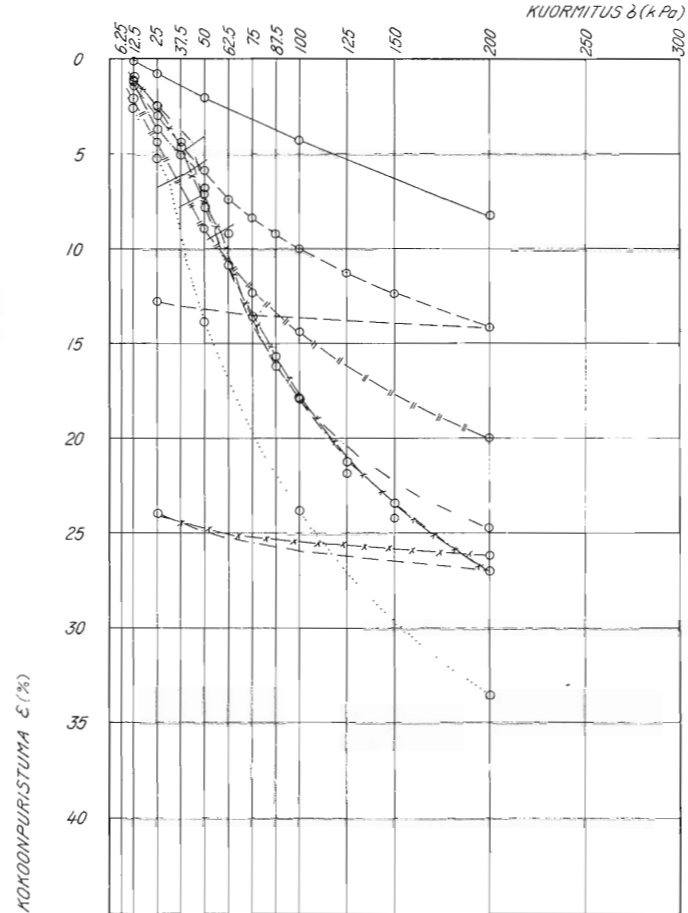


TILAVUUS-PAINO γ (kN/m³)	VESIPITOISUUS w JA HIEKUSLUKU F (%)	LEIKKAUSLUJUUS S (kPa)	SENSITIIVISYYS S _f	ESIKUORMA δ ₀ JA ESIKONSOLIDATIIONIN δ _c (kPa)	KONSOLIDAATIOKERTOIN C _v (m²/v)



KOKOONPURISTUVUUS

KUORMITUS-KOKOONPURISTUMAKÄYRÄT



KOKOONPURISTUMA ε (%)

Geotekninen osasto julkaisu 14

KOKOONPURISTUVUUS

KOKOONPURISTUMAT ε (%)

KUORMITUS δ (kPa)	SYVYYS (m)						
	1.05	1.16	1.16	1.33	1.53	1.50	1.50
12.5	0.15	1.37	2.65	1.10	1.15	1.50	2.10
25	0.75	3.62	5.35	2.57	2.47	3.00	4.40
37.5		5.10		4.75		4.40	
50	2.00	7.75	13.85	6.75	7.02	5.82	8.87
62.5		10.70		9.25		7.40	
75		13.65		12.32		8.25	
87.5		16.20		15.55		9.22	
100	4.20	17.90	23.87	17.92	17.82	9.95	14.42
125		21.77		21.80		11.30	
150		23.40		24.30		12.37	
200	8.25	26.90	33.60	26.17	24.77	14.07	20.05
25		23.95		24.07		12.85	
Kayra							
Piste	3	4	4	4	4	4	4

TUNNUSLUVUT

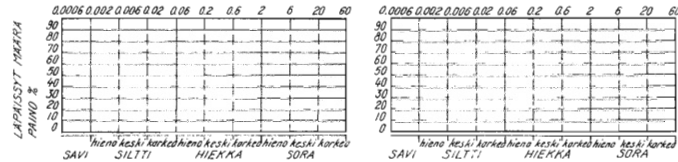
SYVYYS	MODUULILUVUT		JÄNNITYSEKSPONENTIT		ESIKONSOLIDAATIO	
	m	m ₂	B	B ₂	δ _c (kPa)	ε _c (%)
1.05	23 553		0.879		12.61	0.15
1.16	7 110	70 489	-0.197	0	45.11	5.80
1.16	7 020		-0.040		30.48	6.53
1.33	6 646	99 021	-0.346	0	59.30	9.12
1.33	8 076		-0.635		43.99	4.47
1.50	17 105	170 446	0.040	0	47.16	5.64
1.50	12 400		0.020		43.06	7.68

KAUPUNSIKORTTELI 33 33253	TONTTI 2	ALUE	VIRANOM. ARKISTOMERK.
RAKENNUSTOIMENPIDE Uudisrakennus			PIIRUSTUSLAJI Pohjarakennus
TYÖN NIMI MALMINKARTANON II LASTEN PAIVAKOTI "APILA" TSO 2139			PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ Laboratorioluokitusluokset pisteissa 3 X _k 155.5 Y _k 118.0, 4 X _k 157.5 Y _k 129.0
HELSINGIN KAUPUNGIN KIIHTEISTÖVIRASTO GEOTEKNILLINEN TOIMISTO			TILAAJA HKR/TSO
EVM: 23 4 1979	TUTK. PIIRIT: [signature]	TYÖNUMERO: GEO 1930.2/II	PIIRI NO: 08
SUUNN. [signature]	TARK. [signature]		

MAAKERROKSET

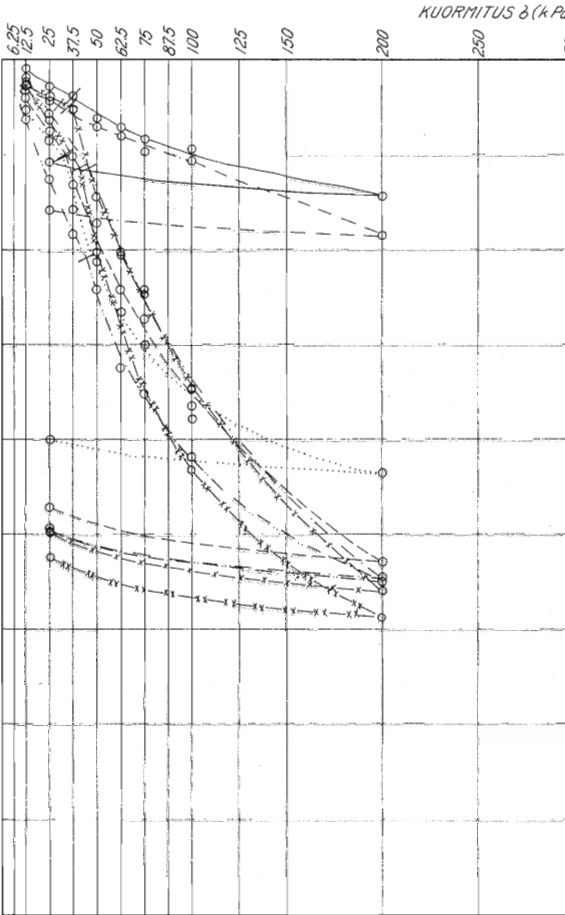
GEOTEKNISET OMINAISUUDET

RAKEISUUSKAYRAT



KOKOONPURISTUVUUS

HELSINGIN KAUPUNKI, KIINTEISTÖVIRASTO



KOKOONPURISTUVUUS

KOKOONPURISTUMAT E (%)

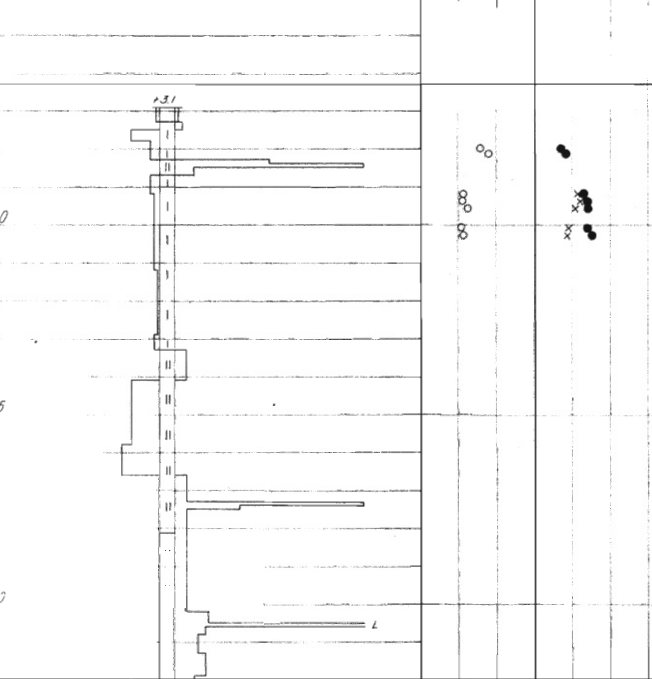
KUORMITUS δ (kPa)	SYVYYS (m)							
	1.63	1.80	2.86	3.03	3.20	3.79	3.90	3.90
12.5	0.55	0.92	3.25	2.07	1.62	2.76	1.36	1.26
25.0	1.50	2.25	6.30	3.80	2.80	4.30	1.99	3.21
37.5	1.90	2.65	9.05	6.61	5.11	7.83	2.77	
50.0	3.10	3.50	12.02	8.62	7.22	10.60	7.27	10.10
62.5	3.60	3.95	16.20	12.05	10.15	13.27	10.30	
75.0	4.22	4.80	17.50	13.72	12.05	14.90	12.30	
100.0	4.72	5.30	20.85	18.27	17.42	18.85	17.36	21.60
200.0	7.15	9.22	27.45	26.50	27.37	21.72	28.00	29.44
250.0	5.45	7.95	24.74	23.61	24.80	19.95	24.90	26.26

TUNNUSLUVUT

SYVYYS	MODUULILUVUT		JÄNNITYSEKSPONENTIT		ESIKONSOLIDAATIO	
	m	m_2	β	β_2	δ_c (kPa)	ϵ_c (%)
1.63	33 104	122 320	0.020	0	37.48	2.04
1.80	26 435	163 735	0.069	0	29.68	2.44
2.86	9 359	76 732	-0.464	0	44.10	10.41
3.03	8 079	71 952	0.132	0	33.35	4.95
3.20	6 796	80 912	0.100	0	45.34	5.69
3.73	13 050	117 482	-0.603	0	32.01	5.18
3.90	6 590	67 078	0.090	0	36.62	2.57
3.90	7 332	65 391	-0.552	0	40.54	5.63

KAIRAUSPISTE	X_k 130.0	NÄYTEENOTTOTAPA:
	Y_k 126.5	
	maapinta +3.1	
NÄYTEENOTTOPISTE	X_k 127.5	NÄYTEENOTTOTAPA: ST-2
	Y_k 122.0	
	maapinta +3.65	
NÄYTEENOTTOPISTE	X_k	NÄYTEENOTTOTAPA:
	Y_k	
	maapinta	

PAINOKAIRAUS	TILAVUUS- PAINO γ (kN/m ³)	VESIPITOISUUS w JA HIENOUSLUKU F (%)	LEIKKAUSLUJUUS S (kPa)	SENSITIIVI- SIYYS S_f	ESIKUORMA δ_0 JA ESIKONSOLIDATI- ON δ_c (kPa)	KONSOLIDAATIO- KERROIN C_v (m ² /v)
	10 15 20	0 50 100 150	0 10 20 30 40 50 60	0 10 20	0 20 40 60	0.5 1.0 1.5 2.0 2.5



γ	w	F	S_f	δ_c	δ_0	C_v
○	●	+	●	○	○	+

+ Siipikairaus, maasto
○ Puristuskoje
▽ Kartiokoje

KAUP OSA	KORTTELI	TONTTI	ALUE	VIRANOM. ARKISTOMERK.
			5422	
RAKENNUSOIMENPIDE				PIIRUSTUSLAJI
				Pohjarakennus
TYÖN NIMI				PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ
ITÄKESKUKSEN III LASTEN PÄIVÄKOTI "HERUKKA" TSO 1911				Laboratoriotutkimustulokset pisleessä X_k 127.5 Y_k 122.0
HELSINGIN KAUPUNGIN KIINTEISTÖVIRASTO				TILAAJA
GEOTEKNILLINEN TOIMISTO				HKRI/TALOSUUNNITTELUOSASTO
PVM:	27.4.1979	TUTK	PIIRI	TYÖNUMERO
SUUNNITTELIJA	M. V. V. V.	PIIRI		PIIR. NO
TARKK.				GEO 1647.2