

# PAALUN VAIPPAVASTUS

PERTTI EKLUND

*Rakenteiden Mekaniikka* Vol. 3 No. 1 1970 ss. 5–23;  
Rakenteiden Mekaniikan Seura, Helsinki

## Johdanto

Paalua käytetään tavallisimmin siirtämään perustuskuormat syvemmällä olevaan kantavaan maakerrostumaan. Suurin huomio paaluperustuksissa on tämän johdosta kiinnitetty paalun kärkivastukseen ja kärkitasossa olevaan maahan. Paalun kantama kuorma siirtyy kuitenkin kokonaan kärkeen vain siinä ideaalitapauksessa, että paalu varrellaan vapaana seisoo kovan pohjakerroksen tai kallion päällä.

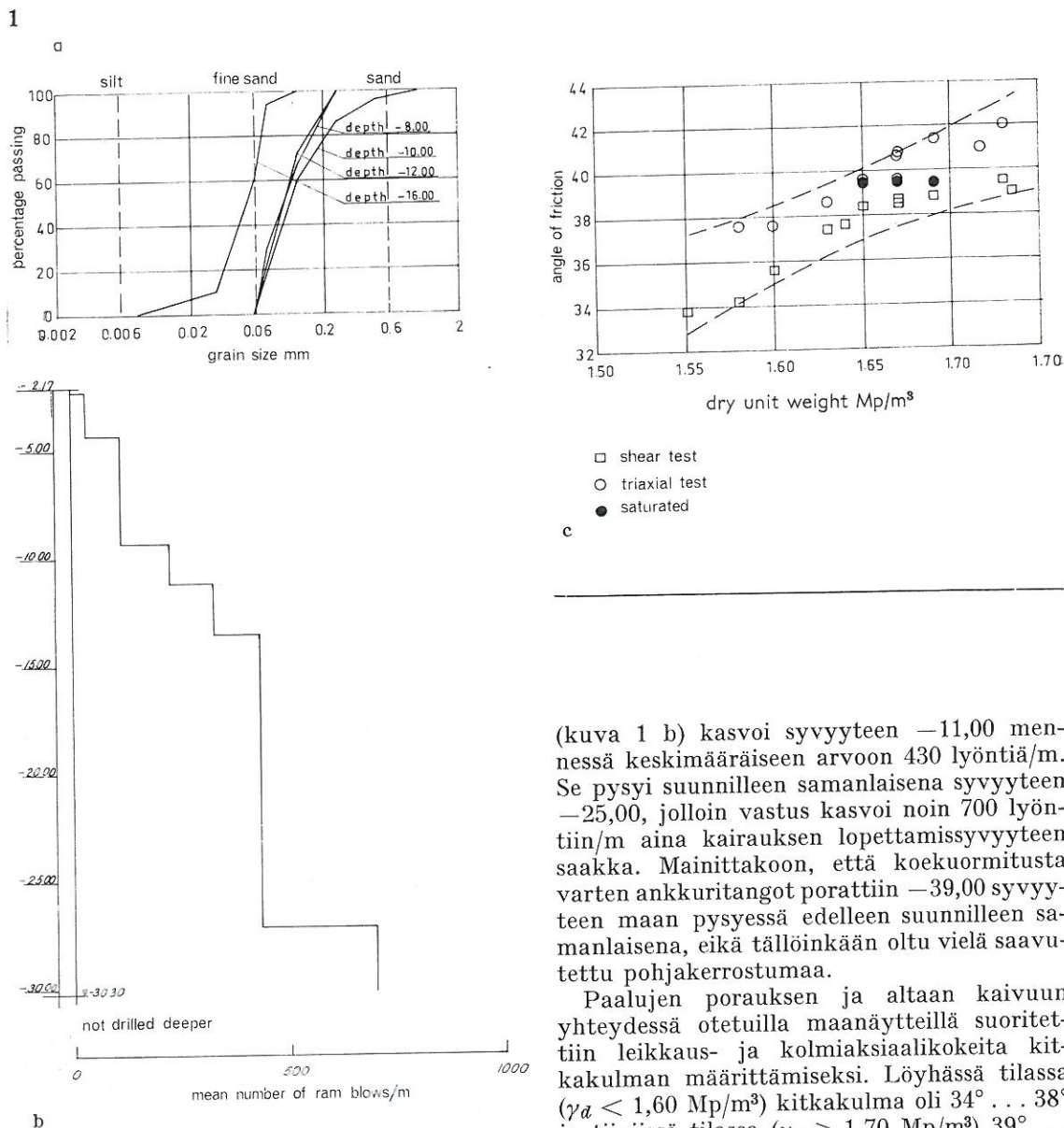
Paalun vaippaa ympäröivät maakerrostumat pienentävät niiden ominaisuuksista riippuen enemmän tai vähemmän kärkeen menevää kuormaa.

Periaatteessa kaikki paalun vaippaa ympäröivät maalajit vastustavat paalun liikettä, jolloin vaipalta siirtyy kuormitusta niiden varaan. Käytännössä kuitenkin pehmeät maalajit, kuten turve, lieju, savi jne., ovat lujuudeltaan niin heikkoja sekä niihin siirtyvän kuormituksen johdosta niin kokoonpuristuvia, että niiden vastaanottama vaippavastus jää pieneksi ja edellyttää paalun tavallista suurempaa painumaa. Hieta-, hiekka- ja sitä karkeampien maalajien vastaanottama vaippavastus on sen sijaan jo merkittävä. Mitä paksummalti näitä maalajeja on paalun kärkitason yläpuolella sitä vähemmän siirtyy kuormaa paalun kärkeen. Monet tutkimukset osoittavat, että tapauksissa, joissa kovan pohjakerroksen yläpuolella on runsaasti vaippavastusta vastaanottavia maakerrostumia tai tapauksissa, joissa paalu on upotettu homogeeniseen kitkamaahan, kärkivastuksen osuus on vain 10...20 % paalun kokonaiskantavuudesta (esim. Haefeli 1961, Kezdi 1964 ja

Skempton 1953). Vaikka vaippavastus siten on monesti ehdottomasti tärkein paalun kantavuusosa, on sen todellisen suuruuden ja sitä vastaavan painuman määrittäminen osoittautunut vaikeaksi tehtäväksi. Ehkä siksi kitkapaaluperustus ei ole kovin suosittu perustamistapa, ja vaippavastuksen osuuteen paalun kantavuudessa on suhtauduttu epäillen. Kone Oy:n satama-alueella Hangossa (Salpausselän harjun jatkeella) oli laiturin rakennuspaikalla runsaasti veteen kerrostuneita, lajittuneita hietamaalajeja. Paaluja ei kannattanut upottaa syvällä olevaan pohjakerrokseen, koska kuorma joka tapauksessa jäisi paalun vaipalle, joten laituri päätettiin perustaa kitkapaaluilla hietakerrosten varaan. Samassa yhteydessä, kesällä 1969, suoritettiin rakennuspaikalla tarkempia vaippavastukseen liittyviä kokeita Benoto-paaluilla, joiden varaan myös laituri perustettiin.

## Maaperä

Irtomaakerrosten paksuus on rakennuspaikalla hyvin suuri, eikä niiden kokonaispaksumutta ole tarkemmin selvitetty. Paalujen po-raustöiden yhteydessä otettujen näytteiden seulontatulosten mukaan maalaji on aluksi karkeaa hietaa hienontuen alaspäin mentäessä paalujen kärkitasossa –16,00 hienoksi hiedaksi (kuva 1 a). Paikalla suoritettiin muutamasta pisteestä paino- ja heijarikairauksia tasoon –31,00 saakka. Kairausten mukaan on hietä muutaman metrin syvyydestä lähtien tiivistä tai hyvin tiivistä. Painokaira tunkeutui 25 puolikierröksellä 3...5 cm, syvemmällä toisinaan enää 1 cm vaippahankauksen ilmeisesti lisääntyessä. Heijarikairausvastus



Kuva 1. Maaperän ominaisuudet

- a) paalun kaivun yhteydessä otettujen näytteiden rakeisuuskäyrät  
 b) heijarikairauksen tasoitettu vastuskuvio  
 c) maalajin kitkakulma  $\varphi^\circ$  ja kuivatilavuuspaino  $\gamma_d$   $\text{Mp/m}^3$ .

Fig. 1. Soil characteristics

- a) grading curves of samples taken in connection with excavating for pile  
 b) mean resistance diagram of Borro Penetration Test  
 c) angle of friction  $\varphi^\circ$  and dry unit weight  $\gamma_d$   $\text{Mp/m}^3$ .

(kuva 1 b) kasvoi syvyyteen -11,00 mennessä keskimääräiseen arvoon 430 lyöntiä/m. Se pysyi suunnilleen samanlaisena syvyyteen -25,00, jolloin vastus kasvoi noin 700 lyöntiin/m aina kairauksen lopettamissyvyyteen saakka. Mainittakoon, että koekuormitusta varten ankkuritangot porattiin -39,00 syvyyteen maan pysyessä edelleen suunnilleen samanlaisena, eikä tällöinkään oltu vielä saavutettu pohjakerrostumaa.

Paalujen porauksen ja altaan kaivuun yhteydessä otetuilla maanäytteillä suoritettiin leikkaus- ja kolmiakiaalikoiteita kitkakulman määrittämiseksi. Löyhässä tilassa ( $\gamma_d < 1,60 \text{ Mp/m}^3$ ) kitkakulma oli  $34^\circ \dots 38^\circ$  ja tiiviissä tilassa ( $\gamma_d > 1,70 \text{ Mp/m}^3$ )  $39^\circ \dots 42^\circ$ . Keskimääräinen kitkakulma on noin  $38,5^\circ$  vastaten kuivatilavuuspainoa  $1,65 \text{ Mp/m}^3$  (kuva 1 c). Saadut kitkakulman arvot ovat maan rakeisuuteen nähden melko korkeita. Tavallisesti hiedan kitkakulma on noin  $5^\circ$  pienempi (Eklund 1961). Kitkakulman suuruus johtunee rakeiden muodosta, sillä mikroskooppilla voidaan todeta kvartsihiekan rakeet kulmikkaiksi sekä seassa olevat tummat mineraalit teräväsärmäisiksi.

### Kokeiden suoritus

Kokeissa pyrittiin vaippa- ja kärkivastuksien toisistaan erottamisen lisäksi selvittämään vaippavastuksen mobilisointumista ja jakaantumista paalun vaipalla. Pääasiallisena tehtävänä oli siten tutkia voiman siirtymistä paalussa ylhäältä alas. Tätä varten suoritettiin koekuormitus Benoto-paalulla, jonka läpimitta oli 70 cm ja kokonaispituus 17,0 m (kärjen syvyys -16,00). Paaluun asennettiin tasoihin -5,00, -11,00 ja -16,00 (kärkeen) Glötzlin painerasiat, joilla voidaan suoraan mitata paalun pystysuora puristusjännitys mainitussa kohdassa (kuva 2 a). Koepaalussa oli siten kolme mittauselintä, joista kaksi

suunnilleen paalun kolmannespisteissä ja yksi pohjassa.

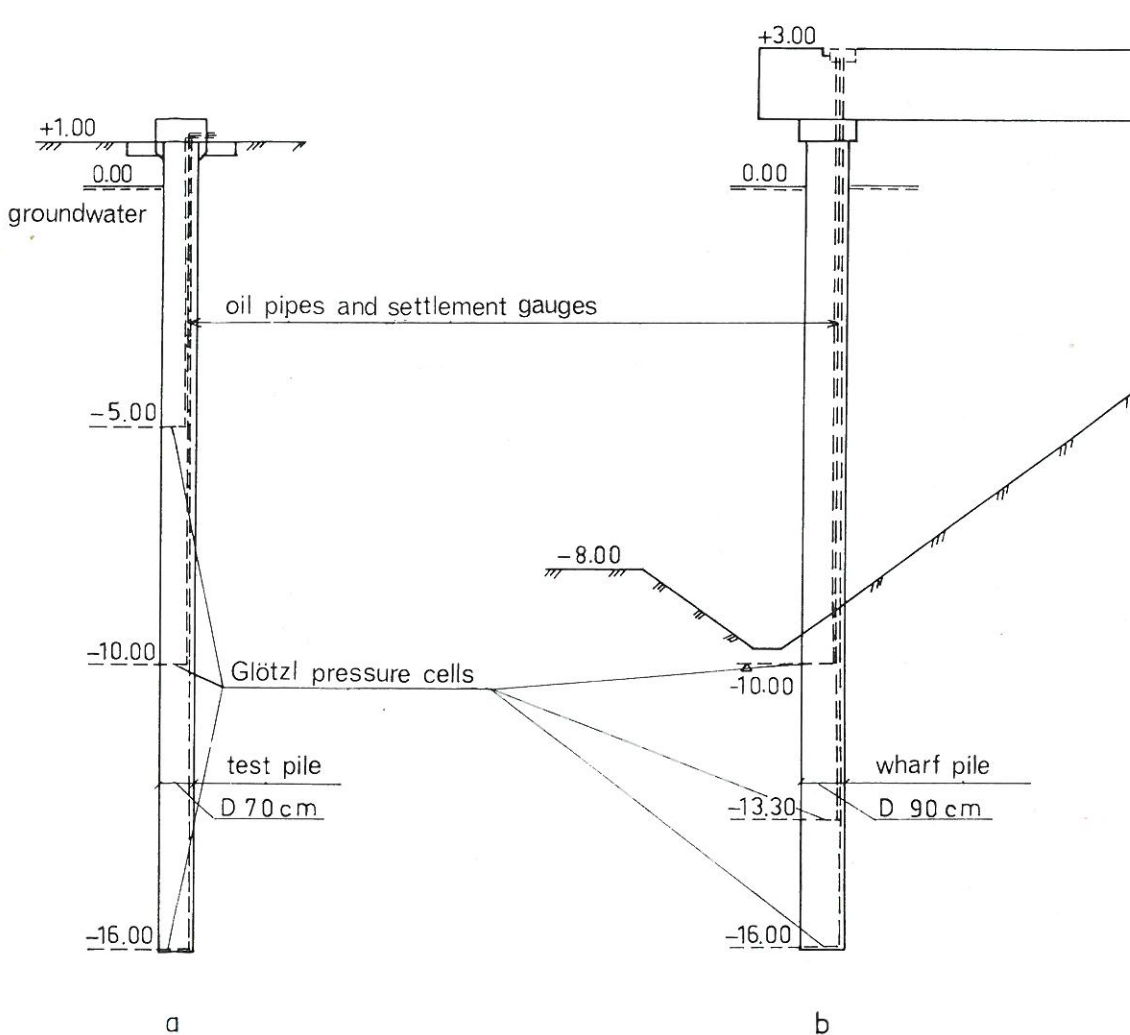
Kuormitusten siirtyminen paalun kärkeä kohti haluttiin mitata myös todellisessa rakenteessa, minkä vuoksi vastaavat mittarit asennettiin yhteen laiturin alla olevaan paaluun (kuva 2 b). Kuormitus- ja mittauslaitteet sekä koekuormituksen yleisiä periaatteita on tarkemmin selostettu artikkelissa (Eklund 1969 b).

Kuva 2. Paaluissa olevien painemittarien sijainti

- a) koepaalu  
b) laituripaalu.

Fig. 2. Location of pressure cells

- a) test pile  
b) wharf pile.



Koekuormitus suoritettiin useana sarjana, joiden perustana oli laituripaalulle tulevat kuormat: oma paino 50 Mp, useimmin esiintyvä oma paino + hyötykuorma 90... 130 Mp ja maksimikuorma 190 Mp. Kuormitussarjat olivat 70... 130... 190... 275... 390... 510 Mp. Maksimikuorma oli noin 550 Mp, jolloin kuormitus lopetettiin paalun painuman ollessa yli 80 mm, ja koekuormituslaitteiden jouduttua kestokykynsä rajoille. Kuormitusta lisättiin ja vähennettiin kussakin sarjassa noin 30 Mp portaissa 5 min. välein. Joka kerralla mitattiin mittauselinten painelukemat käsiikäyttöisellä pumpulla ja painuma-arvot mittakelloista. Koska tarkoituksena oli selvittää etenkin vaippa- ja kärkekuorman vaihtelut toistettiin kuormitussarja useita kertoja. Kun painuman lisääntyminen kuormitussarjassa osoitti selvästi pienenevää suuntaa, siirryttiin ylöspäin seuraavaan kuormitussarjaan. Tämä tapahtui yleensä 6... 8 kuormituskerran jälkeen.

Laituripaalussa suoritettiin paine- ja painumamittauksia sen valmistumisesta kevästä 1969 lähtien. Oma paino kokonaisuudessaan 50 Mp oli paalun kuormana laiturin valmistumisesta elokuussa 1969 lähtien. Tämän jälkeen merkittävin lisäkuorma paalulle tulee suuren pukkinosturin liikkumisesta laiturin päällä. Tämän nosturin oma paino on noin 330 Mp sekä nostokyky 200 Mp. Tyhjästä nosturista tulee laiturin alla olevalle paalulle sen jalan ollessa paalun kohdalla 35... 45 Mp eli 55... 70 Mp/m<sup>2</sup> kuormitus laituriin oman painon 80 Mp/m<sup>2</sup> lisäksi. Täysin kuormitettu nosturi antaa paalulle 130 Mp/m<sup>2</sup> lisäkuorman eli yhteensä 210 Mp/m<sup>2</sup> kuorman. Tätä suurempi kuorma saadaan laiturilla olevasta tasaisesta kuormasta, joka on melko harvinainen, eikä tällaisia kokeita laiturilla ole voitu järjestää. Tarkempia havaintoja pystyjännityksen vaihtelusta paalussa nosturin liikkua laiturin päällä on tähän mennessä tehty kaksi kertaa: lokakuussa 1969 ja helmikuussa 1970, jolloin paalulle tuleva kuorma on vaihdellut välillä 80... 190 Mp/m<sup>2</sup>.

## Vaippavastus

Vaippavastus saadaan paalun vaipalle syntyvän vaippajännityksen ja paalun vaippapinta-alan tulona. Vaippajännitys  $f$  käsite-

tään paalun ja maan välisen vaakasuoran jännityksen  $p_h$  ja kitkakulman (= maan sisäisen kitkakulman  $\varphi$ ) tangentin tulona sekä vaipan ja maan välisenä adheesiona (= maan koheesio  $c$ ):

$$f = p_h \tan \varphi + c \quad [1]$$

Tässä tapauksessa, kun paalu on upotettu hietamaahan,  $c = 0$ .

### Vaippavastuksen kasvu syvyyden funktiona

Paalun ja maan välinen vaakasuora jännitys = maanpaine kasvaa klassillisen maanpainetoerian mukaan suoraviivaisesti syvyyden kasvaessa. Kokonaisvaippavastus on silloin:

$$P_m = \pi D L \frac{\bar{\gamma} L}{2} K_o \tan \varphi \quad [2]$$

missä

$D$  = paalun halkaisija

$L$  = paalun pituus

$\bar{\gamma}$  = maan keskimääräinen tilavuuspaino

$K_o$  = maanpaine kerroin (vaakasuoran jännityksen  $p_h$  suhde pystysuoraan jännitykseen  $p_v$ )

Kaavan (2) mukaan vaippavastus kasvaa toisessa potenssissa paalun pituuteen nähden. Näyttää kuitenkin siltä, että yläpuolisten maamassojen aiheuttama paine eli esikuormitus ei kasvaisikaan maassa syvemmällä suoraviivaisesti syvyyden funktiona. Tämä johtuu maahan muodostuvista holvi- ja siilomaisista jännityksestä, jotka tuntuvat etenkin pyöreän reiän ympärillä. Radiaalisymmetrinen maanpaine (Berezantzev 1961) lähenee kitkamaassa melko pian syvyyden kasvaessa maksimiarvoon (kuva 3).

Maanpaine-kerroin  $K_o$  oletetaan tavallisesti 1... 2 paalun tekotavasta riippuen. Kaivinpaalussa ei työputken ympärillä voi esiintyä passiivista maanpainetilaa, mutta betonotaessa kasvaa yleensä betonin aiheuttama valupaine suuremmaksi kuin paaluun kohdistuva aktiivimaanpaine. Tällöin myös kaivinpaalussa  $K_o \approx 1,0$ . Myöskään betonin valupaine ei enää kasva määrätyn syvyyden jälkeen, joka esim. Bucherin (1961) mukaan on 10,0 m, vaan pysyy vakiona. Siten tälläkin tavalla laskettuna vaippajännitys ei kasva jatkuvasti syvyyden funktiona.

Viimeaikaiset kokeet (esim. Tcheng 1966 ja Fellenius 1969) osoittavat, että tietyn raja-syvyyden jälkeen paalun vaippajännitys pysyy vakiona. Tchengin kokeissa vaippajännitys on aluksi kasvanut melko voimakkaasti, sen jälkeen vaihtelevasti pienentynyt ja kasvanut jonkin verran saavuttaen viimeistään noin 7,0 metrin syvyydessä lähes vakioarvon. Tämä vaippajännityksen arvo on myös melkein sama, noin 3...4 Mp/m<sup>2</sup>, kaikilla koe-paaluilla riippumatta niiden läpimitasta.

Felleniuksen tulosten mukaan on vaippajännitys pysynyt samana, noin 3 Mp/m<sup>2</sup>, hiekan yläpinnasta lähtien, mihin paalu on upotettu 3 m pituuseroin aina 16 metrin syvyyteen. Mainittu hiekkakerros on noin 5 m paksuisen sepeletäytekerroksen alla. Molemmissa mainituissa tapauksissa ei ole määritetty vaippajännityksen jakaantumista paalun pituudelle, vaan em. vaippajännitysarvot on saatu olettaen vaippajännitys tasaisesti jakaantuneeksi eli vaippavastus on aina jaettu vaipan toimivalla pinta-alalla (keskimääräinen vaippajännitys).

#### Vaippajännityksen kehittyminen

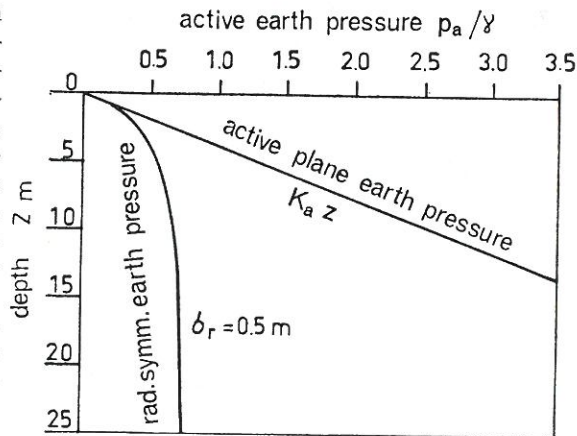
Vaippajännityksen kehittyminen noudattaa samoja lakeja kuin maa-aineksen leikkausjännityksen kehittyminen. Sen edellytyksenä on suhteellinen liike eli tässä tapauksessa paalun ja maan välinen liike. Leikkausjännitys kasvaa aluksi lähes suoraviivaisesti siirtymän funktiona. Vähitellen muodonmuutos-leikkausjännityskuvaaja kaartuu ja tietyllä siirtymän arvolla  $s_{kr}$  saavuttaa leikkausjännitys maksiminsa. Kezdin (1964) mukaan on leikkausjännitys  $\tau$  siirtymän  $s$  funktiona:

$$\tau = \sigma \tan \varphi \left( 1 - e^{-\frac{ks}{s_{kr}-s}} \right) \quad [3 a]$$

Kun  $s = s_{kr}$  saavuttaa  $\tau$  maksimi-arvon =  $\sigma \tan \varphi$  (Coulombin lauseke). Alkuosalla leikkausmuodonmuutosta, kun  $s$  on selvästi pienempi kuin  $s_{kr}$ , oletetaan monesti, että leikkausjännitys kasvaa suoraviivaisesti siirtymään nähden:

$$\tau = \sigma \tan \varphi \frac{s}{s_{kr}} \quad [3 b]$$

Vaippajännityksen mobilisaatioliike eli paalun ja sitä ympäröivän maan välinen liike



Kuva 3. Aktiivinen tasomaanpaine ja radiaalisymmetrinen maanpaine syvyyden funktiona. ( $\varphi = 36^\circ$ ).

Fig. 3. Active plane earth pressure and radial-symmetric earth pressure as a function of depth. ( $\varphi = 36^\circ$ ).

koostuu kahdesta osasta: paaluvaipan kokoonpuristumasta ja paalun kärjen painumasta. Mitä pidempi paalu on sitä suurempi merkitys vaippavastuksen kehittymiselle on paalun omalla kokoonpuristumalla. Paalun täyden vaippavastuksen kehittymiseen tarvittava liike ei ole siten kovin helposti määrättävissä, koska itse asiassa kokoonpuristuvan paalun jokaisessa pisteessä on liike erisuuri. Paalun ympärille muodostuvan leikkausvyöhykkeen laajuus riippuu lisäksi maan tiiveydestä ja paalun läpimitasta. Kaivinpaaluilla, jotka ovat suuriläpimitaisia, tarvitaan vaippavastuksen maksimin saavuttamiseksi yleensä useiden senttimetrin painuma (toisinaan aina 10 senttimetriin saakka).

#### Vaippavastuksen jakaantuminen

Edellä olevan mukaan saattavat paalun vaippajännityskuvio ja sivupainekuvio olla erilaiset paalun eri pisteiden liikkeestä riippuen. Jos esimerkiksi paalun kärki ei painu ollenkaan, vaan yläpään painuma muodostuu vain paalun kokoonpuristumasta, pienenee vaippavastus arvoon 0 kärkeä lähestyttäessä. Mutta myös silloin kun paalun kärki liikkuu alaspäin, on saatu tuloksia, jotka poikkeavat huomattavasti maanpaineteorioiden edellyttämistä sivupainekuvioista. Esim. Schenkin (1951) ja Zweckin (1953) tulosten mukaan vaippajännitys kasvaa aluksi nopeasti, saa-

uttaen maksimin yleensä jonkin verran tai toisinaan selvästikin ylempänä kuin paalun keskikohta. Tämän jälkeen vaippajännitys pienenee paalun kärkeä lähestyttäessä (kuva 4)

Kokeellisesti voidaan vaippavastuksen jakaantuminen parhaiten määrittää mittaamalla paalussa vaikuttava pystysuora jännitys eri syvyyksillä. Paalun yläpäähän vaikuttaa kuormitus  $P_o$ . Tämän jälkeen mitataan kuormitus  $P_z$  eri kohdista paalua ja lopuksi kärkeen saakka siirtynyt kuorma  $P_s$ . Erotus  $P_o - P_s = P_m$  on kokonaisvaippavastus. Sen jakaantuminen pintayksikköä kohti eli vaippajännitys  $f$  saadaan paalussa vaikuttavan pystyjännityksen muuttumisesta syvyyden funktiona (kuva 5):

$$\pi D f_z = \frac{\pi D^2}{4} \frac{d(P_o - P_z)}{dz} \quad [4 a]$$

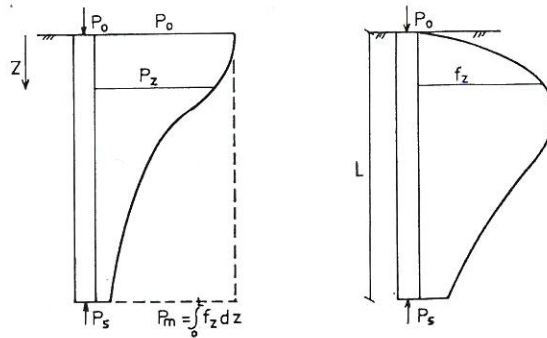
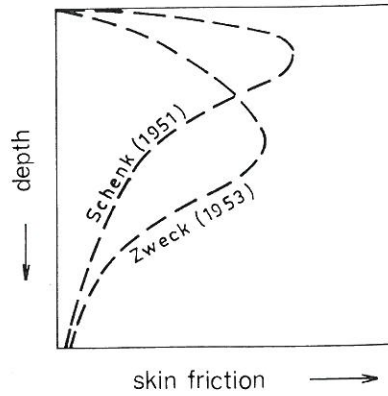
$$P_m = \pi D \int_0^L f_z dz \quad [4 b]$$

Kun maanpinnassa maanpaine = 0, seuraa tästä, että myös  $f_o = 0$  ja  $P_z$ -kuvaajalla on maanpinnassa reunaehto  $\frac{dP_z}{dz} = 0$  eli mainittu kuvaaja on maanpinnassa pystysuora. Yksinkertaisin tapa  $P_z$ -käyrän määrittämiseksi olisi käyttää polynomia, jonka aste-luku olisi siten yhtäsuuri kuin havaintopisteiden lukumäärä. Polynomilauseke ei kuitenkaan luonteeltaan sovi siksi, että siinä vuorottelevat maksimi ja minimikohdat toisiaan. Jokaisen minimikohdan jälkeen muuttuisi vaippajännitys negatiiviseksi ja  $f$ -käyrän muoto vuorotellen positiiviselle ja negatiiviselle puolelle siirtyen saattaisi poiketa huomattavasti sen todellisesta kulusta. Mikäli pisteitä  $P_z$ -käyrällä on tarpeeksi saadaan luotettavin kuva  $f$ -käyrästä derivoimalla  $P_z$ -käyrä graafisesti eli piirtämällä sen kulmakertoimen suuruudet syvyyden funktiona.

### Vaippavastuksen jakaantuminen koetulosten mukaan

#### Koepaalu

Koekuormituksessa todettiin paaluun kohdistuvan kuorman vähenevän yläpäältä läh-



Kuva 4. Periaatekuva kokeellisesti saaduista vaippajännityksen jakaantumistavoista.

Fig. 4. Diagram of experimental distributions of skin friction.

Kuva 5. Paalussa vaikuttava pystysuora jännitys ja vaippajännitys.

Fig. 5. Vertical pressure and skin friction in the pile.

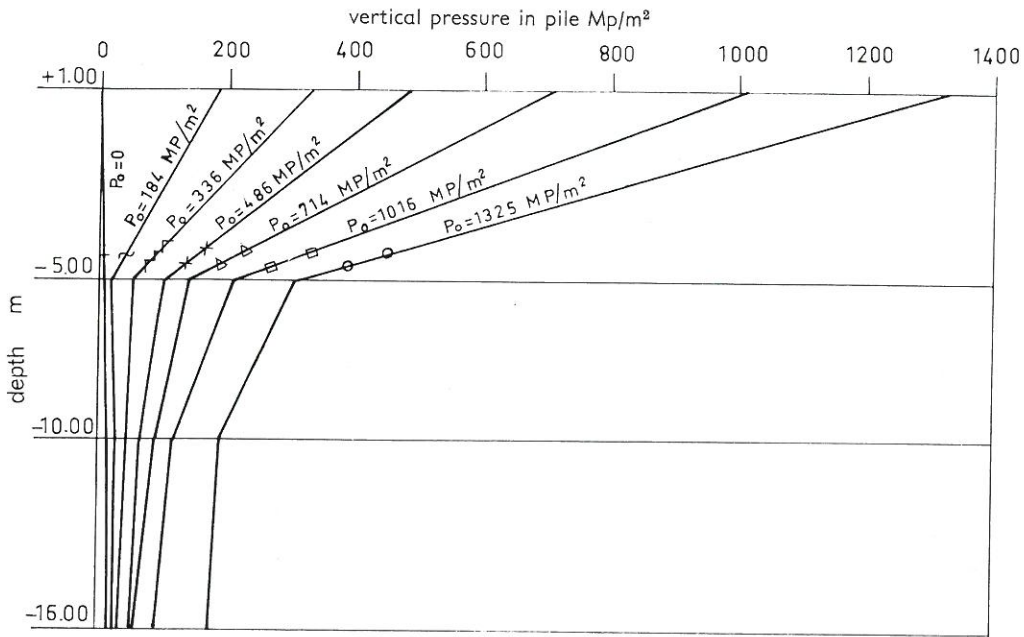
tien aluksi erittäin voimakkaasti, kun taas syvemmällä olivat muutokset pienempiä. Koetulosten tarkastelussa todettiin  $P_z$ -kuvaajan muistuttavan lähinnä eksponenttifunktiota tai hyperbelia. Tulosten käsittelyssä osoittautui parhaimmaksi kuvaaja:

Kuva 6. Koepaalu. Pystysuoran jännityksen muuttuminen paalussa sekä ekvivalenttinen vaippajännitys paalun ylimmässä ( $f_1$ ), keskimmaisessä ( $f_2$ ) ja alaosassa ( $f_3$ ).

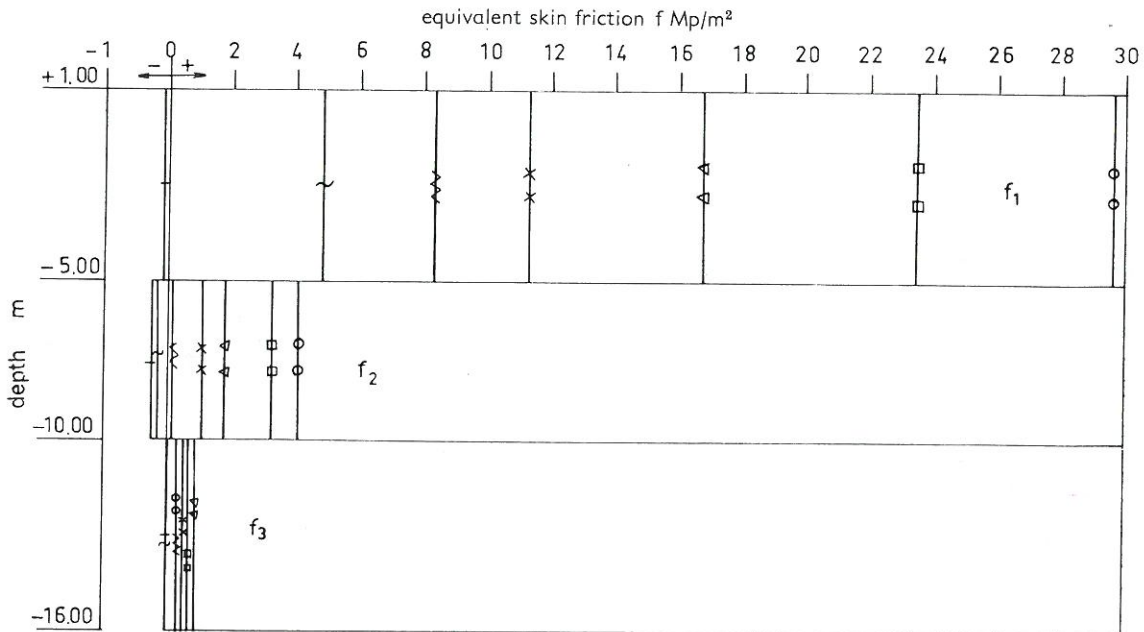
Fig. 6. Test pile. Variation of vertical pressure in the pile and the equivalent skin friction in the upmost ( $f_1$ ), middle ( $f_2$ ) and the lowest part ( $f_3$ ).

RAKENTEIDEN MEKANIikka

6 a



6 b



$$P_z = a + \frac{b}{c + z^2} \quad [5]$$

joka lisäksi täyttää edellä mainitun reunaehdon  $P'_{z=0} = 0$ . Tuloksissa  $a$  kasvoi kuormituksen mukana 20 . . . 130, keskimäärin se oli  $\approx 50$ ,  $b$  vaihteli samoin kuormituksen mukaan 1 500 . . . 6 000 ja  $c$  oli  $\approx 5$ . Tällöin  $f$ :lle saadaan erittäin suuri maksimiarvo, suurimmilla kuormilla lähes 50 Mp/m<sup>2</sup>, joka esiintyy jo noin 2 metrin syvyydellä maanpinnasta.  $f$ -käyrän kulku on kuitenkin epävarmaa etenkin paalun yläosassa, missä suurimmat muutokset tapahtuvat, sillä havaintopisteitä oli kaikkiaan vain neljä, joista ensimmäinen yhden kolmanneksen verran paalun yläpäästä alaspäin. Mainittu toisen asteen hyperbeli ei myöskään sovi tilanteeseen, jossa paalun alaosassa esiintyy negatiivista vaippahankausta kuten kuormitusta runsaammin vähennettäessä tapahtui. Lisäksi  $f$  kasvoi niin voimakkaasti maanpinnasta lähtien, ettei edes reunaehto  $f = 0$  maanpinnassa tuntunut aina oikealta. Tämän vuoksi kirjoittajan käsityksen mukaan saadaan, varsinkin tässä tapauksessa, kun mittauspisteitä on vähän, yhtä tarkka tulos yhdistämällä  $P_z$ -havainnot suoraviivaisesti. Tällöin tulee paalun vaipalle vakiovaippajännitys, joka muuttuu hyppäyksittäin havaintopisteiden kohdalla. Silti saadaan hyvä kuva vaippajännityksen vaihteiluista paalun vaipalla suunnilleen kullekin kolmasosalle jaettuna.

Kuvassa 6 ovat kuormitustulokset em. tavalla suoraviivaisesti käsiteltyinä. Ratkaisevasti suurin osa vaippajännityksestä on paalun ylimmällä kolmanneksella. Siinä vaippajännitys kasvaa koko ajan kuormitusta lisättäessä. Tasoitettunakin se saavuttaa suuren maksimiarvon 30 Mp/m<sup>2</sup>. Teoreettisesti tavanomaisin laskumenetelmin ei ole mahdollista päästä näin suureen arvoon. Kaavassa [2] pitäisi esim.  $K_0$  olla 7 . . . 10, mikä ei aina ole mahdollista edes täysin passiivisessa maanpainetilassa. Seuraavalla kolmanneksella on vaippajännitys selvästi pienempi saavuttaen lopulta arvon 4 Mp/m<sup>2</sup>. Tämä on jo alle klassillisesti lasketun arvon tai edellyttää hyvin pientä kitkakulmaa (kaava [2]:  $8,5 \cdot 1,1 K_0 \tan \varphi = 4,0$ , esim.  $K_0$ :n arvolla  $1 \varphi = 22^\circ$ ).

Viimeisellä kolmanneksella on vaippajännitys vielä pienempi ja selvästi laskettua pienempi. Koko kuormitusalueella se pysyy lähes

vakiona. Se on jatkuvasti  $< 1,0$  Mp/m<sup>2</sup>, keskimäärin vain 0,5 Mp/m<sup>2</sup>.

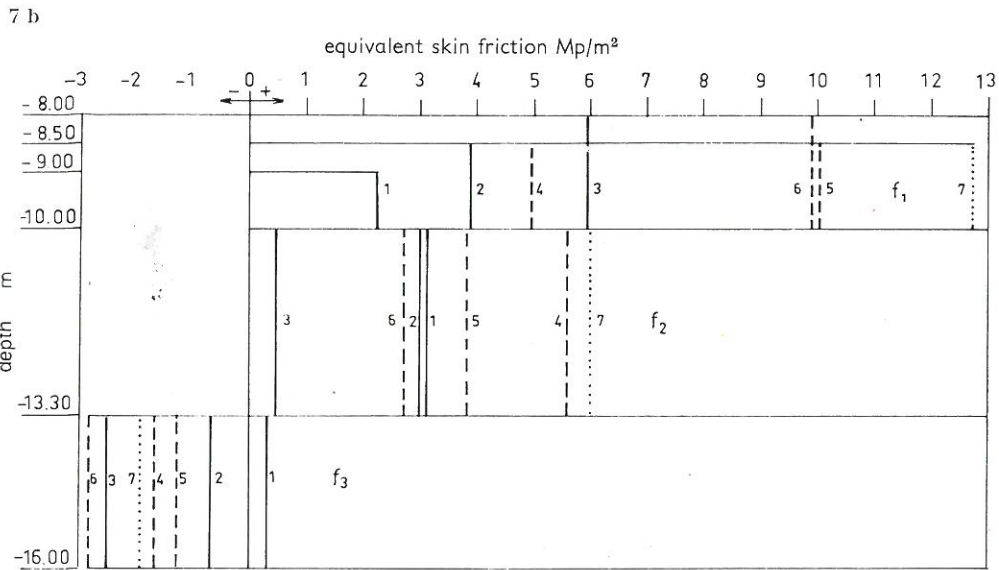
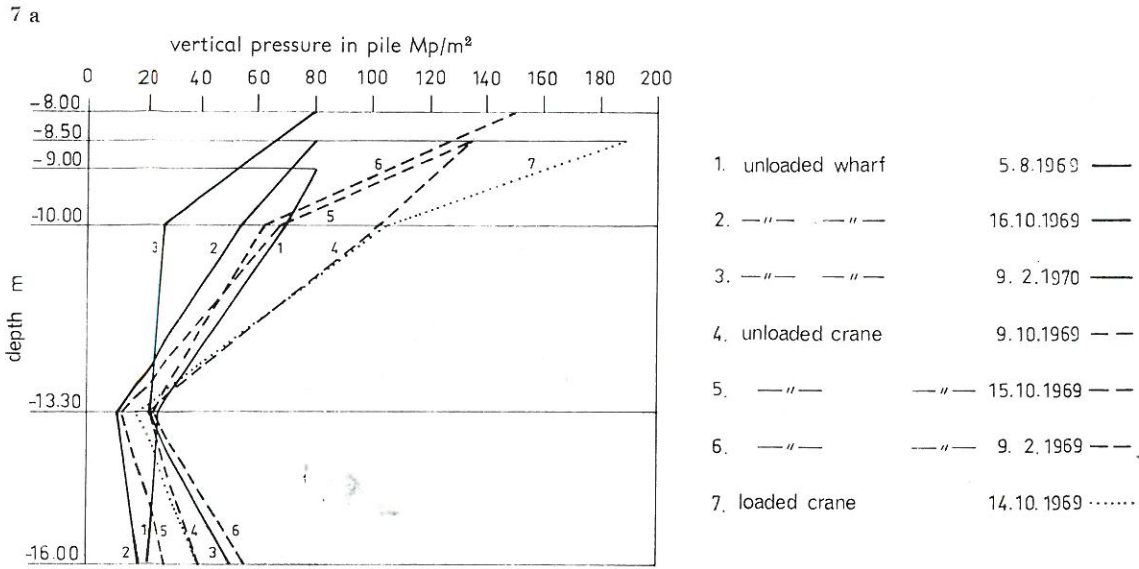
Tulokset tuntuvat hieman yllättäviltä esimaanpaineteorioihin verrattuina. Painemittarit näyttivät joka tapauksessa toimineen normaalisti. Esimerkiksi kuorma kärjessä kasvoi tasaisesti, mutta lukemaerot kahden viimeisen mittauskohdan välillä eivät muuttuneet kovin paljoa.

#### Laituripaalu

Pystysuoran jännityksen ja vaippajännityksen vaihtelut laskettuina edellä selostetulla tavalla on esitetty kuvassa 7. Tuloksissa on sama suunta kuin koekuormituspaalussa. Suurin osa vaippavastuksesta on paalun yläosassa. Korkeimmillaan se on lähes 13 Mp/m<sup>2</sup>, kun laiturilla on suurin mitattu kuorma. Kuormittamattomalla nosturilla se on viimeisissä mitauksissa ollut noin 10 Mp/m<sup>2</sup>. Mielenkiintoista on todeta, miten vaippajännitys on lisääntynyt paalun yläosassa ajan funktiona. Tilanteesta 1 tilanteeseen 3 on vaippajännitys yläosassa kasvanut noin kolminkertaiseksi. Samoin laiturin runsas käyttö muutaman päivän aikana tilanteissa 4 ja 5 on siirtänyt vaippajännitystä ylöspäin. Tässä yhteydessä on syytä mainita, että vesisyvyys, joka alunperin oli paalun kohdalla noin  $-9,50$  on jonkin verran pienentynyt. Vesisyvyys satama-altaassa on  $-8,00$  ja koska paalusta siten lähtee luiska ylöspäin sekä eteen että taakse, on sen varrelle lisääntynyt maata, joka on siinä vähitellen tiivistynyt.

Alempana paalua on tilanne päinvastainen kuin paalun yläosassa. Vaippajännitys on vähitellen pienentynyt. Suurin arvo 6,0 Mp/m<sup>2</sup> vastaa kuitenkin edelleen suurinta mitattua laiturikuormaa.

Alimmassa osassa paalua vaippajännitys on pienentynyt niin paljon, että se on muuttunut negatiiviseksi. Vaikka vaippajännitys yläosassa on kasvanut on samanaikaisesti myös kärkevää kasvanut jonkin verran. Tämän seurauksena syntyy alaosaan negatiivinen eli paalua kuormittava vaippajännitys. Se syntyy lähinnä viimeistä edellisen, syvyydessä  $-13,30$  olevan painerasian mittaustuloksista, jotka vaihtelevat vähiten. Jos tämän mittarin toiminta katsottaisiin puutteelliseksi ja sen antamat tulokset jätettäisiin pois, saadaan välillä  $-10,00$  . . .  $-16,00$  edelleen sama



Kuva 7. Laituripaalu. Pystysuoran jännityksen muuttuminen paalussa sekä ekvivalenttinen vaippajännitys paalun yläosassa ( $f_1$ ), keskiosassa ( $f_2$ ) ja alaosassa ( $f_3$ ).

Fig. 7. Wharf pile. Variation of vertical pressure in the pile and the equivalent skin friction in the upmost ( $f_1$ ), middle ( $f_2$ ) and the lowest part ( $f_3$ ).

tulos: tasoitettu vaippajännitys siinä pienenee ja viimeisessä mittauksessa saadaan kuormittamattomalla laiturilla paalun alaosaan myös tällöin negatiivinen vaippahankaus. Sitä on edistänyt paalun varrelle kasaantunut ja tiivistynyt maa, joka ensimmäiseksi vastaanottaa vaippavastusta. Samanaikaisesti se kuormittaa painollaan alapuolisia maakerroksia.

### Koeolosuhteiden vaikutus tuloksiin

Kokeissa saatuun suureen vaippajännitykseen paalun yläosassa lienee osaltaan vaikuttanut koekuormitusjärjestelyistä johtuva maan tiivistyminen maanpinnassa. Paalun kaivun johdosta vaikuttaa maahan työputken pohjassa ylöspäin nostava paine. Ilmeisesti sen suureneminen on taas osaltaan vaikuttanut pienen vaippajännitykseen paalun alaosassa.

#### *Maan tiivistyminen maanpinnassa*

Koepaalun ensimmäiselle kolmannekselle tasaiseksi jaettu vaippajännitys kasvoi kokeen aikana suunnilleen arvoon  $30 \text{ Mp/m}^2$  ja olisi ilmeisesti kasvanut vielä tästäkin jonkin verran, jos koetta olisi jatkettu. Kuten jo edellä todettiin, teoreettisesti tavanomaisin laskumenetelmin ei voida saada näin suurta vaippajännityksen arvoa. Se edellyttää joko erittäin suurta passiivipainetta maassa tai suurta lisäkuormitusta maanpinnassa.

Kaivinpaalussa ei voida normaalisesti ajatella paalua ympäröivään maahan ainakaan suurta passiivista maanpainetta. Maanpainekerroin  $K_o$  (kaavassa [2]) oletetaan tavallisesti  $= 1,0$ . Koekuormitusjärjestelyistä saatua johtua, että maassa vaakasuora jännitys kasvaa ja  $K_o > 1,0$  (esim. Fellenius 1969). Tässä tapauksessa suuri vaippajännitys ainakin osaksi johtunee koekuormituksen alussa suoritettusta ankkuritankojen esijännittämisestä. Käytännöllisistä syistä valettiin paalun ympärille maanpintaan teräsbetonilaatta  $2,20 \times 11,00 \text{ m}^2$ , johon mm. koekuormituspalkit tuettiin. Samasta laatasta ponnistaen suoritettiin ankkurivaijereiden kiristäminen, jonka seurauksena maa laatan alapuolella tiivistyi ja siihen jäi kuormituskokeen alkaessa

tietty esikuormitus, ehkä noin  $10 \text{ Mp/m}^2$ , joka sitten kokeen aikana melko nopeasti poistui tunkkien alkaessa nostaa palkkeja ylöspäin.

Ankkurien esijännitysvoiman siirtymisellä laatan välityksellä maahan ja maan tiivistymisellä näyttää olevan huomattava merkitys vaippajännityksen kasvuun paalun yläosassa. Ilmeisesti maa paalun ympärillä ylhäällä on joutunut sellaiseen suljettuun tilaan, missä sen leikkausvastus voi kasvaa hyvinkin pitkälle.

Tämä ei liene kuitenkaan ainoa syy suureen vaippajännitykseen paalun yläosassa, sillä myös muissa kokeissa on saatu vastaavia tuloksia. Esimerkiksi Keriselin (1958) kokeissa on saatu paalun ensimmäiselle kolmelle metrille myös erittäin suuri  $30 \text{ Mp/m}^2$  suuruinen vaippajännitys. Samoin muissa kokeissa (esim. Haefeli 1961, Kezdi 1964 ja Simons 1967) on saatu vaippajännitykselle huippuarvoja, jotka ovat lähes  $20 \text{ Mp/m}^2$ . Muita vaippajännityksen jakaantumiseen vaikuttavia tekijöitä käsitellään seuraavassa tarkemmin.

#### *Maan löyhtyminen paalun pohjatasossa*

Tiivistävä vaikutus ei ulotu enää paalun alaosaan. Päinvastoin siellä on saattanut tapahtua maan löyhtymistä. Paalun teon yhteydessä maata avonaisen putken sisältä kaivettaessa saattaa syntyä vaara, että työputkea ympäröivän maan paino ylittää maan kantavuuden reiän pohjassa. Tällöin tapahtuu ns. pohjamurtuma ja pohjatasossa oleva maa pyrkii nousemaan putkessa ylöspäin ja samalla löyhtymään. Kirjoittaja on laskenut uudella tavalla tämän murtumisvaaran käyttäen apunaan Berezantzevin radiaalsymmetristä maanpainetta (Eklund 1969 a). Varmuus murtumista vastaan saadaan paalun syvyys-suhteen  $L/D$  ja maan kitkakulman  $\varphi$  funktiona. Tulos riippuu myös siitä, miten laajaksi oletetaan alapäin liikkuva maakappale työputken ympärillä. Kuvassa 8 esitetään var-

Kuva 8. Varmuus pohjan murtumista vastaan kitkamaassa. Varmuuskerroin  $n = P/aG$ .

*Fig. 8. Safety against failure in cohesionless soil. Factor of safety  $n = P/aG$ .*

muuskerroin siinä tapauksessa kuin mainittu sylinteri ulottuu etäisyydelle  $D/2$  tai  $\frac{D\sqrt{2}}{2}$

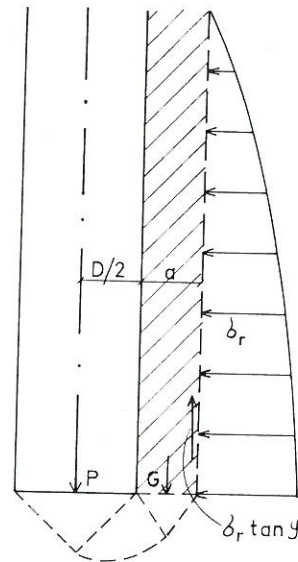
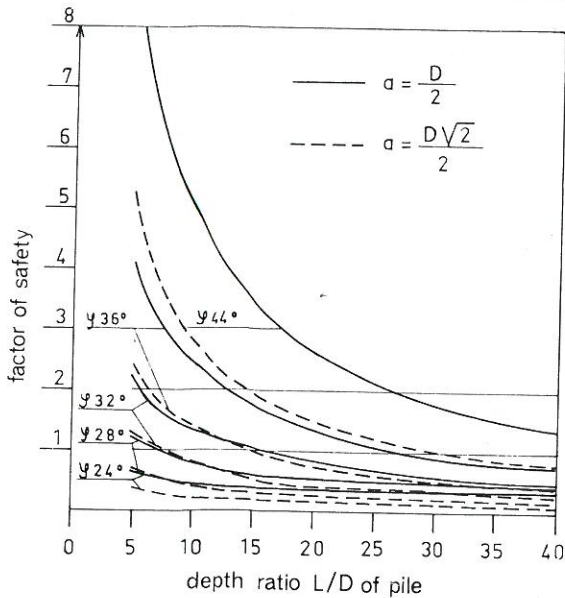
reiän seinämästä. Tulosten mukaan saattaa laituripaalun syvyysuhteella  $L/D = 18$  ja koekuormituspaalun syvyysuhteella  $L/D = 25$  vielä helpommin esiintyä vaara maan löyhtymisestä paalun kärkitasossa ja varren alaosan ympärillä, mistä maata työntyy putkeen. Tähän viittaavat myös työputkesta suoritettavat muutamat kairaukset, joiden mukaan maa on pohjassa löyhempää tiivistyen noin 1 metrin matkalla suunnilleen alkuperäiseen tiiveyteensä.

Pohjamaan löyhtyminen aiheuttaa sen, että kärjessä tarvitaan tavallista suurempi liike kärkivastuksen mobilisoitumiseksi. Vaippavastus mobilisoi myös heikosti. Eniten maan alhaisempi tiiveys paalun alaosassa vaikuttaa kuitenkin yhdessä kuormituksen maahan siirtymismekanismin kanssa: Kuormitus siirtyy ensin paalun vaippaa yläosassa ympäröivän tiiviimmän maan varaan. Näin siirtyneen kuormituksen johdosta yläpuoliset maakerrokset tukeutuvat alempana olevaan maakerrokseen jne. Alempana alkavat maakerrokset liikkua paalun mukana, eikä vaip-

pajännitys pysty mobilisoitumaan kovin suureksi. Maan tiiveydestä paalun alaosassa riippuen ne saattavat ilmeisesti painua yläpuolisen kuormituksen johdosta enemmän alaspäin kuin paalun kärki. Tällöin syntyy paalun alaosaan paalua kuormittava lisäkuorma, negatiivinen vaippahankaus. Myöhemmin todetaan vielä, miten jatkuvat kuormitusvaihtelut edistävät tätä tilannetta, sillä tämä kuormitus pyrkii jäämään paalun kärkeen. Todetakaan vielä tässä yhteydessä, ettei alapuolisten maakerrostumien painuminen alaspäin yhdessä paalun kanssa kuitenkaan riipu välttämättä maan löyhyydestä. Esim. lyöntipaaluissa on todettu vastaavanlainen tilanne, jolloin Schenkin (1951) mukaan syntyy, juuri kuvassa 4 saatu pieni vaippajännitys paalun alaosassa.

### Kuorman siirtyminen paalusta maahan

Paalun yläpäätä kuormitettaessa alkaa paalun liike ylhäältä. Tämän seurauksena kehittyy vaipan ja maan välille leikkausvastus ja kuormitus siirtyy vaippaa ympäröivään maahan. Kuormituksen kasvaessa liike suurenee ja siirtyy alaspäin ja vaippavastus mobilisoi-



tuu koko paalun pituudella. Liikkeen ulottuessa paalun kärkeen siirtyy se osa kuormasta, joka ei ole siirtynyt vaipalta maahan, paalun kärjen kautta maahan. Kuormitus siirtyy siis aluksi vaipalta maahan ja vasta kuormituksen kasvaessa siirtyy yhä suurempi osa kuormasta paalun kärkeen.

Kun kuormitus poistetaan tai vähennetään paalun yläpäästä, on tilanne samanlainen. Kuormitus alkaa pienetä ylhäältä lähtien ja ensin paalun vaipalta. Koekuormituksessa todettiin kuitenkin, että kuormitus ei poistu kokonaan alas asti, vaan kuormitusta jäi paalun alaosaan ja kärkeen. Pienemmällä kuormilla noin 200 Mp saakka kävi samaa kuormitus-sarjaa toistettaessa niin, että kärkivastus, vastaten kuormitusalueen ylärajaa, pysyi koko ajan vakiona. Kuormituksen vähennys ja lisäys ilmeni siten yksinomaan vaippavastuksen pienemisenä ja uudelleen mobilisointumisenä.

Kuormituksen kasvaessa ilmiö pysyi suunnilleen samana. Erona oli se, että kun kärki kuormitusta toistettaessa painui suunnilleen kuormituskertojen logaritmin suhteessa, kasvoi myös kärkivastus jonkin verran. Tämä merkitsee vastaavaa vaippavastuksen vähenemistä eli vaippavastus ei mobilisoidu enää entiseen arvoonsa. Kuvassa 9 a . . . c on esitetty esimerkkinä vaippavastuksen vaihtelut vaipan eri osilla ja kärkivastuksen muuttuminen, kun yläpään kuormitusta toistetaan välillä 275 . . . 390 Mp. Suurin osa kuormituksen muutoksesta näkyy vaipan yläosassa. Kuormituskertojen lukumäärästä riippumatta pysyy vaippavastus suunnilleen vakiona. Ensimmäisellä ja toisella kolmanneksella ylhäältä lukien on vaippajännitys siten hyvin stabiili, pikemmin ehkä jonkin verran lisääntyen.

Vaipan alimmalla kolmanneksella sen sijaan vaippajännitys pienenee koko ajan. Toistokuormituksen aikana tämän osan vaippavastus on pienentynyt 8 . . . 10 Mp. Vastaavana aikana on kärkivastus kasvanut 6 . . . 8 Mp eli lähes vastaavan määrän.

Tutkimuksen kohteena olevalla kuormitusalueella on vaipan yläosalla kuormituksesta noin 80 %, keskiosalla noin 9 %, alaosalla 4—0 % ja paalun kärjessä 8—11 %. Kuormituksen muutoksesta tapahtuu vaipan yläosalla

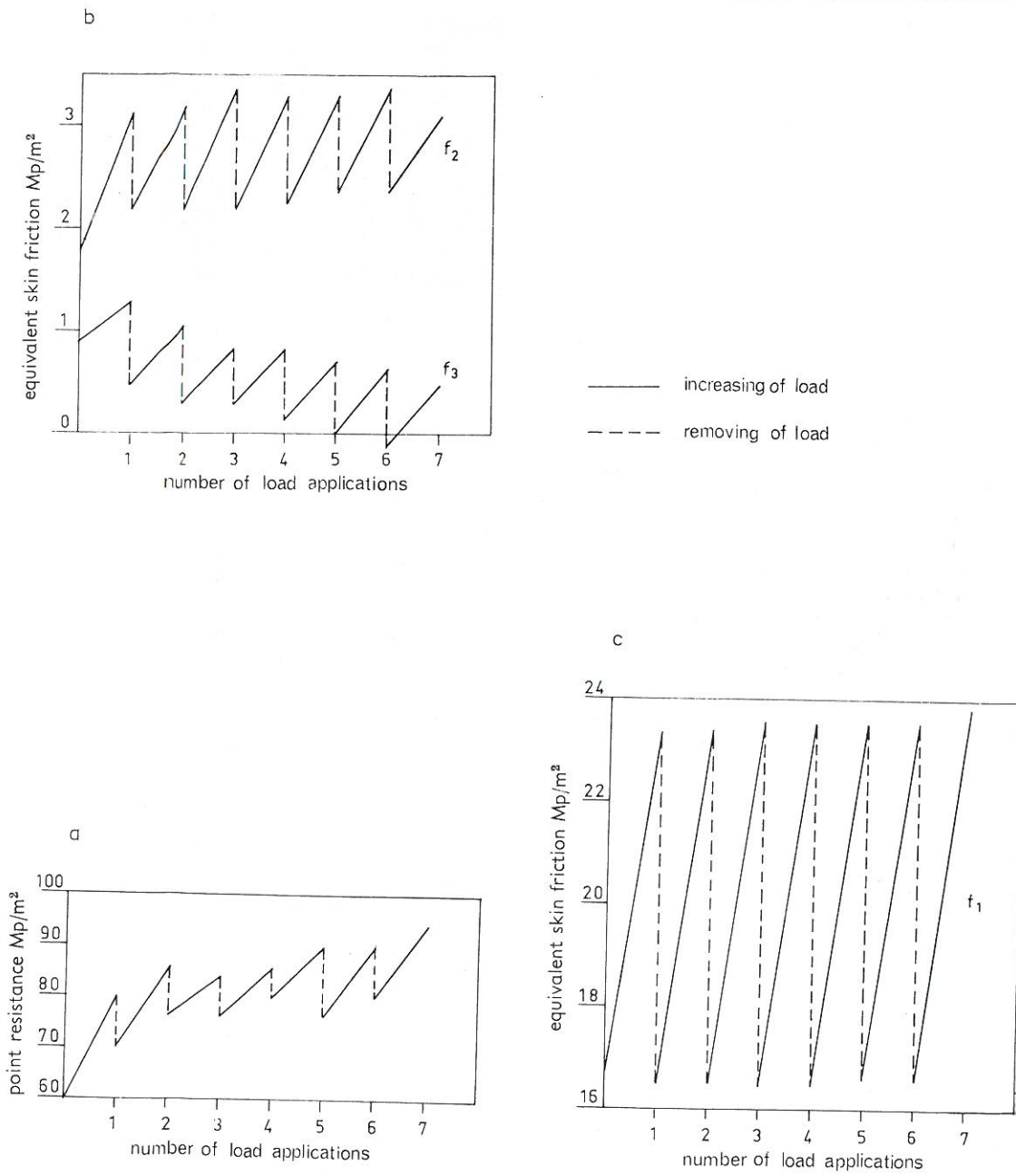
samoin 80 %, mutta kärjessä vain 3—4 % ja loppu vaipan keski- ja alaosalla. Kuormitus ei poistu paalun kärjestä yläpään kuormitusvähennyistä edellyttävällä määrällä. Se aiheuttaa suunnilleen vastaavan pienenemisen paalun alaosaan vaippavastuksessa, joka pienee jatkuvasti kuormituskertojen lisääntyessä. Kuvan mukaan kärkeen jää lopulta niin suuri kuorma, että osa siitä aiheutuu paalun vaipan alaosaan syntyneestä lisäkuormasta eli vaippavastus sillä osalla muuttuu negatiiviseksi. Sama ilmiö todettiin jo edellä kuvassa 7, kun myös laituripaalun alaosaan oli ajan mittaan muodostunut vielä suurempi negatiivinen vaippavastus.

Kuormituksen paalusta maahan siirtymismekanismi tulee havainnollisesti esille toistokuormituksessa kuormitusta vähennettäessä ja lisättäessä. Se vaikuttaa eniten paalun alaosassa, missä kärkivastus kasvaa ja vastaavasti vaippavastus pienenee muuttuen lopulta negatiiviseksi, paalua kuormittavaksi, vaippavastukseksi. Yläosassa vaippajännitys säilyy hyvin. Tulosten mukaan se päinvastoin lisääntyy toistuvien kuormitusvaihtelujen aikana. Selvimmin tämä näkyy laituripaalussa.

### Kärkivastuksen vaikutus vaippavastukseen

Paalun kärki- ja vaippavastus eivät ole riippumattomia toisistaan. Kuorman siirtymässä paalun kärjestä maahan syntyy paalua ympäröivään maahan jännitystila, jonka seurauksena paalun vaippaan kohdistuva vaakasuora jännitys lisääntyy. Paalun vaippavastus on pienempi silloin kun kärki ei toimi tai vetokokeessa. Esim. Cambefort (1947) on sellaisissa tapauksissa saanut vaippavastukseksi keskimäärin vain 1/5 siitä vaippavastuksesta, kun puristuskokeessa kärki toimii normaaliin tapaan.

Ilmeisesti kärkivastus vaikuttaa myös vaippavastuksen jakaantumiseen. Kärjestä maahan siirtyvää kuormitusta vastustamaan syntyy maahan leikkausjännityksiä, jotka lopulta mobilisoituvat spiraalin muotoisiin liukupintoihin alkaen paalun kärjestä ja kääntymien paalun vaippaa kohti. Kuvassa 10 (Keri-



Kuva 9. Toistokuormituksen vaikutus.

Fig. 9. Effect of repeated loading.

sel 1958) nähdään havainnollisesti koepaalun ympärille syntyneet muodonmuutokset.

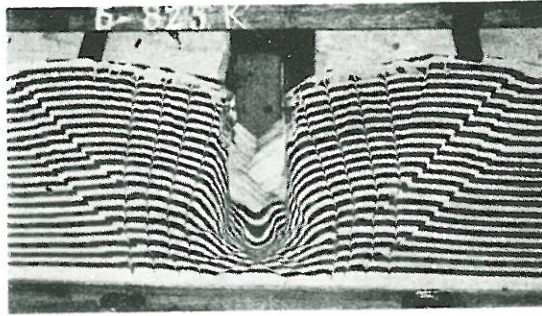
Liukupinnat suuntautuvat logaritmisien spiraalin tapaan ylöspäin kohdaten paalun vaipan yläosassa. Siellä liukupinnat lisäävät paalun vaippaan kohdistuvaa jännitystä ja suurentavat vaippajännitystä. Paalun alaosassa sen sijaan näyttävät liukupinnat vaippaa kohti lähestyessään kaartuvan alaspäin. Kärkivastus aiheuttaa siten alaosassa jännitystilaa, joka pienentää vaippajännitystä. Edellä olevan mukaan kärkivastuksen vaikutus vaippajännitykseen olisi kuvan 11 tapainen. Kärkivastus saattaisi tuntuvasti vaikuttaa vaippavastuksen jakaantumiseen paalun vaipalla juuri siten kuin nyt suoritetuissa kokeissa on saatu eli suurentanut vaippajännitystä paalun yläosassa ja pienentänyt sitä paalun alaosassa.

Kuvassa 12 esitetään vielä ylimmän kolmanneksen tasoitetun vaippajännityksen  $f_1$  ja kärkivastuksen välinen riippuvuus. Tämän vaippajännityksen kehitymisessä on kolme vaihetta: 1. vaihe noin  $8 \text{ Mp/m}^2$  saakka, jolloin kärkivastuksella ei tunnu olevan siihen vaikutusta, 2. vaihe  $8 \dots 23 \text{ Mp/m}^2$ , jolloin kärkivastus alkaa vähitellen vaikuttaa vaippajännitykseen ja 3. vaihe  $> 23 \text{ Mp/m}^2$ , jolloin yläosan vaippajännitys kasvaa selvästi kärkivastuksen funktiona. Edellä olevan tarkastelun mukaan, mikäli oletetaan kärkivastuksen koko kuormitusalueella vaikuttaneen vaippajännitykseen samoin kuin kokeen loppuosalla, näyttäisi siten mahdolliselta, että noin 50 % yläosan vaippajännityksestä olisi kärkivastuksen aiheuttamaa.

### Paalun kantavuuden kehittyminen ja painuma

Molemmissa paaluissa mitattiin yläpään painuman lisäksi kärjen painuma pohjasta lähtevän tangon avulla, joka oli asennettu suoja-putkeen. Seuraavassa käsiteltäessä vaipan painumaa tarkoitetaan paalun yläpään ja kärjen painuman keskiarvoa eli paalun keskimääräistä painumaa.

Koepaalun vaippajännitys (koko paalun pituudelle tasaisesti jaettu) ja kärkivastus on esitetty kuvassa 13. Ratkaisevin merkitys paalun kantavuuteen on vaippavastuksen suuruudella. Kärkivastuksen osuus kokonaiskantavuudesta on koko kokeen aikana vain



Kuva 10. Maan muodonmuutokset koepaalun ympärillä (Kerisel 1958).

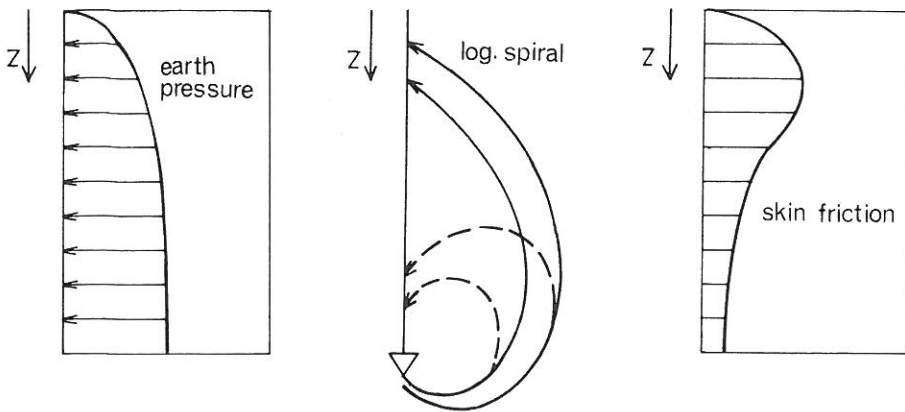
*Fig. 10. Deformations around the test pile (Kerisel 1958).*

$10 \dots 15 \%$ . Kärkivastuksen pienuus käy ilmi myös keskimääräisen vaippajännityksen suhteesta kärkivastukseen. Yleensä tämä suhdeluksi oletetaan noin  $1/100$  (Thyrolf 1968), mutta nyt se on suurimmalla osaa kuormitus-alueetta noin  $1/10$  lähestyksen kokeen lopussa lukua  $1/20$ .

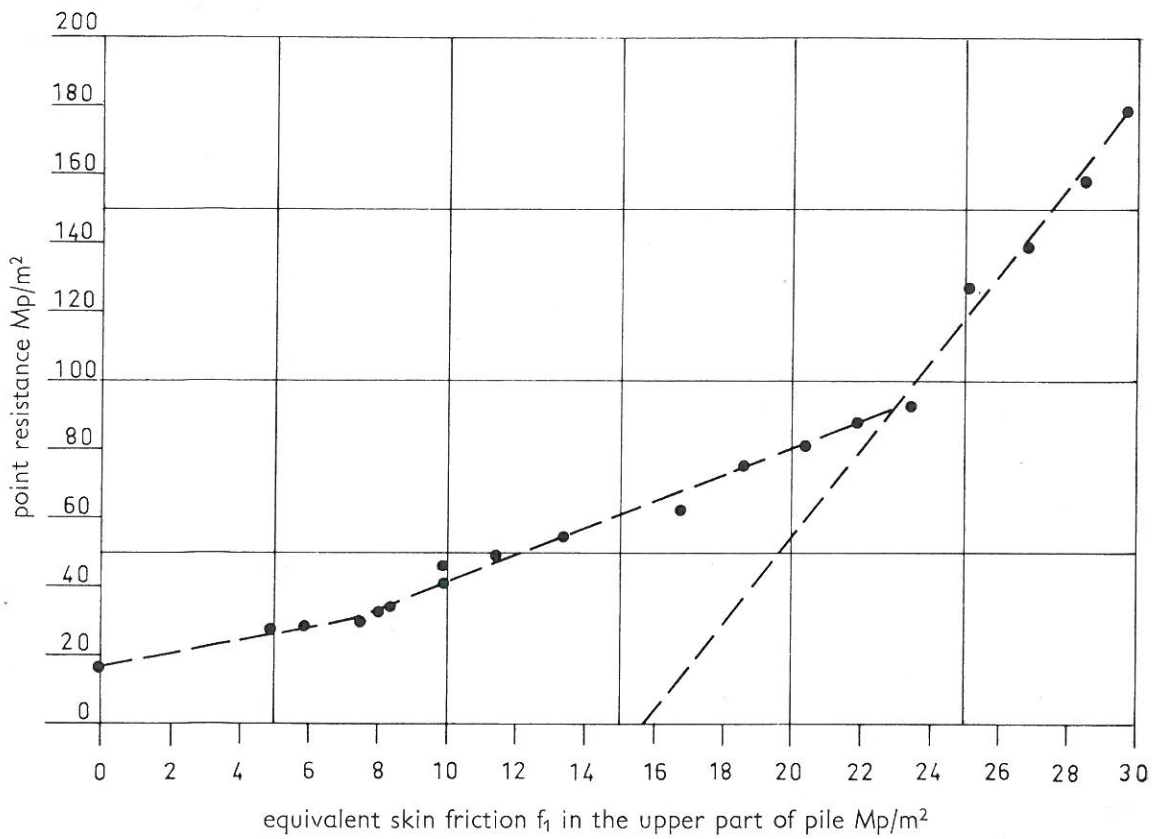
Kärkivastus kasvaa lähes suoraviivaisesti painuman funktiona. Vaippavastuskuvaaja kaartuu muutaman millimetrin painumasta lähtien tasaisesti alaspäin eikä ole vielä kokeen lopussa saavuttanut maksimiaan.

Kuvassa 14 on vaippavastuksen kehittyminen tarkemmin painuman funktiona eri paalun osilla. Kuten jo aikaisemmin on mainittu suurin huomio kiintyy paalun yläosan vaippajännitykseen. Se kasvaa melko nopeasti arvoon  $8,5 \text{ Mp/m}^2$ , joka kuvan 12 mukaan oli muuten se raja, johon mennessä kärkivastus ei vielä ehdi sanottavasti vaikuttaa siihen. Tämän jälkeen yläosan vaippajännitys kasvaa jatkuvasti saavuttaen kokeen lopussa maksimiarvonsa noin  $82 \text{ mm}$  painumalla. Ilmeisesti yläosan vaippajännityksen täyteen kehittymiseen tarvittava liike olisi vielä tätäkin kokeessa saavutettua loppupainumaa suurempi. Yläosan vaippavastuksen kehittymiseen tarvittava vaipan painuma ( $> 80 \text{ mm}$ ) on melko suuri. Tavallisestihan tämä kriittinen siirtymä hietä- ja hiekkamaalajeissa oletetaan olevan  $\leq 50 \text{ mm}$  (Cambefort 1964). Ehkä edellä mainitut koejärjestelyihin liittyvät seikat ovat antaneet mahdollisuuden maan leikkausvastuksen kehittymisen vielä näinkin suuren muodonmuutoksen jälkeen.

Laituri ja laituri-paalu ovat tähän mennessä



11



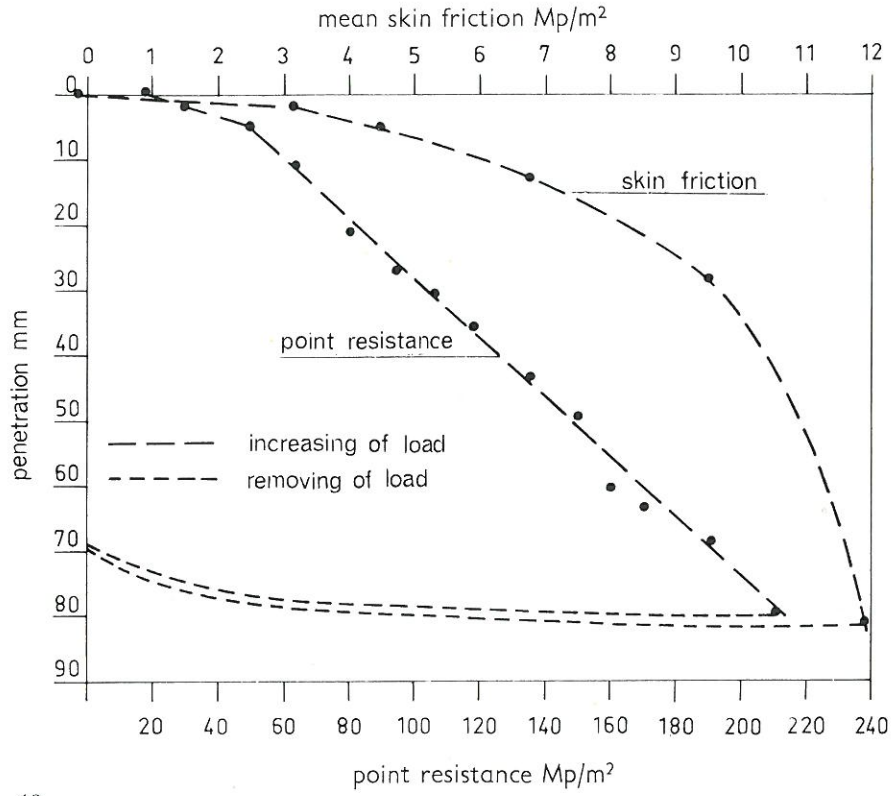
12

Kuva 11. Paalun vaippajännityksen muuttuminen kärkivastuksen vaikutuksesta.

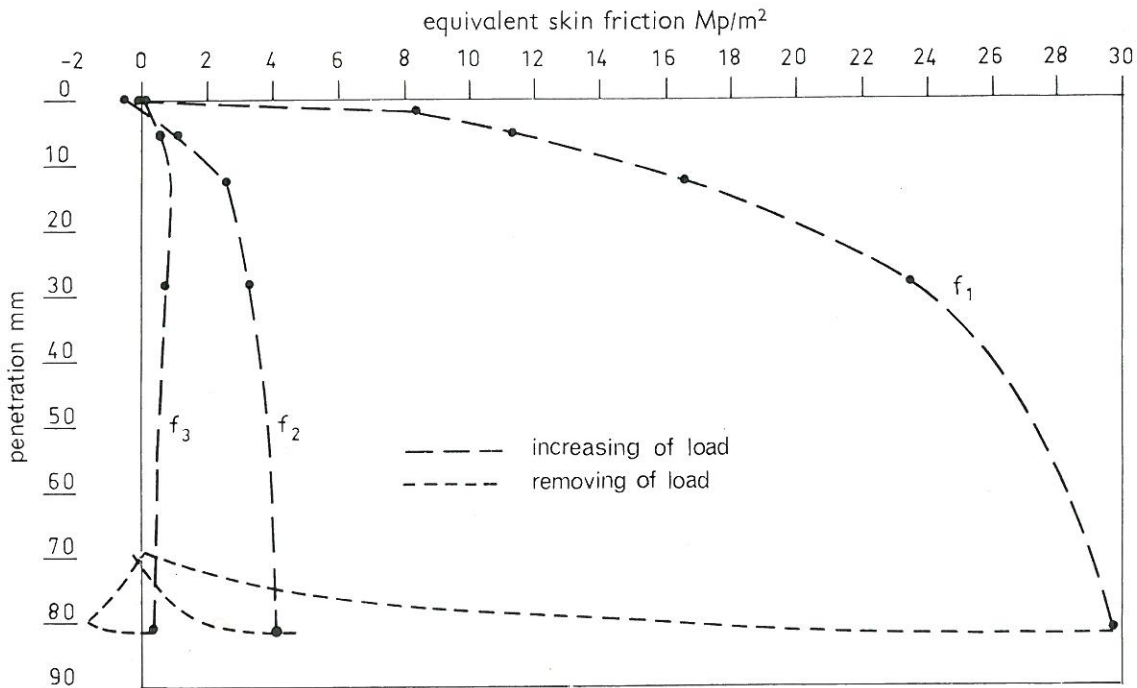
Fig. 11. Changing of skin friction owing to point resistance.

Kuva 12. Koepaalu. Vaippajännityksen  $f_1$  (paalun yläosassa) riippuvuus kärkivastuksesta.

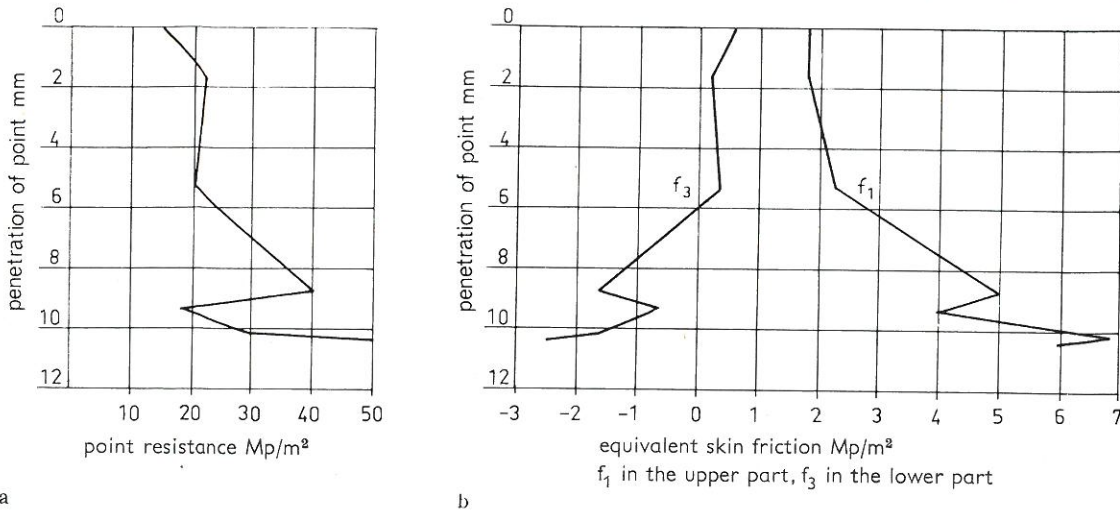
Fig. 12. Test pile. Dependence of skin friction  $f_1$  (in the upper part) on point resistance.



13



14



15

Kuva 13. Koepaalu. Kärkivastuksen ja keskimääräisen vaippajännityksen kehittyminen paalun painuman funktiona.

Fig. 13. Test pile. Development of point resistance and mean skin friction as a function of penetration.

Kuva 14. Koepaalu. Paalun eri osien ekvivalenttisten vaippajännitysten kehittyminen painuman funktiona.

Fig. 14. Test pile. Development of the equivalent skin friction of various pile parts as a function of penetration.

Kuva 15. Laituripaalu. Kärjen painuman vaikutus

- a) paalun kärkivastukseen  
b) paalun ylä- ja alaosan vaippajännitykseen.

Fig. 15. Wharf pile. Effect of point penetration

- a) on point resistance  
b) on skin friction in the upper and lower pile parts.

koepaalun kärkivastuksen olevan suunnilleen paalujen läpimitan suhteen verran suurempi. Esimerkiksi laituripaalun kärkivastusta 40  $\text{Mp/m}^2$  vastaa koepaalussa 57  $\text{Mp/m}^2$  ja 50  $\text{Mp/m}^2$  laituripaalussa vastaa koepaalussa kärkivastus 64  $\text{Mp/m}^2$ . Tilanne olisi tämän mukaan sama kuin tavallisessa laattaperustuksessa, jossa saman pohjarasituksen omaavat laatat painuvat suunnilleen laatan säteen suhteessa eli samalla painumalla on suuremmalla laamalla pienempi pohjajännitys.

Laituripaalussa yläosan ja alaosan ekvivalenttinen vaippajännitys ovat ikäänkuin toistensa peilikuvia (kuva 15 b). Yläosan vaippajännityksen kasvaessa painuman kasvaessa pienenee vastaavasti alaosan vaippajännitys. Samanlaista riippuvuutta vaippavastuksen ja painuman välillä ei näytä olevan kuin kärkivastuksen ja painuman kesken. Tämä johtuu siitä, että kuormitusvaihteluiden aikana vaippavastus pystyy mobilisoitumaan uudelleen. Vaippavastuksen ja paalun painumalla ei siten tunnu olevan välitöntä yhteyttä toisiinsa. Välittömimmin paalun painuma riippuu kärkeen siirtyneestä kuormasta. Vaippavastus vaikuttaa ikäänkuin välillisesti paalun painumaan, koska se ratkaisee ensin miten suuri kuormitus siirtyy paalun kärkeen, joka sitten lopulta kuormittaa kärkitasossa olevaa maata aiheuttaen sen kokoonpuristuman.

puolen vuoden käytön jälkeen painuneet noin 10 mm. Kuvan 15 a mukaan on tällöinkin todellisissa olosuhteissa nähtävissä samantapainen yhteys painuman ja kärkivastuksen välillä kuten koepaalussa vaikkakaan ei niin selvästi. Verrattaessa laituripaalun ja koepaalun kärkivastusta samalla painumalla todetaan

## Yhteenvedo

Hangossa satamalaituria perustettaessa jouduttiin tilanteeseen, missä kova pohjakerros oli niin syvällä (yli 40 m) ja sen yläpuolella niin runsaasti lajittuneita hietamaalajeja, ettei paaluja kannattanut upottaa kovaan pohjaan saakka. Rakennuspaikalla suoritettiin koe-kuormitus Benoto-paalulla, jonka läpimitta oli 70 cm ja pituus 17,0 m. Paaluun asennettiin eri syvyyksille pystysuoran jännityksen mittaamista varten painelevyt. Samanlaiset paineenmittauslevyt asennettiin myös yhteen laiturin alla olevaan paaluun, jonka läpimitta oli 90 cm ja joka upotettiin samoin kuin koepaalu syvyyteen  $-16,00$ . Kokeissa erotettiin vaippa- ja kärkivastus toisistaan sekä tutkittiin vaippavastuksen jakaantumista paalun pituudelle.

Vaippavastus osoittautui selvästi suuremmaksi kuin kärkivastus. Vaippavastuksen osuus kokonaiskantavuudesta oli koepaalussa 85 . . . 90 % ja laiturihaalussa se vaihteli 60 % molemmin puolin.

Kärkivastus kasvoi koepaalussa lähes suoraan painuman funktiona suunnilleen arvoon  $200 \text{ Mp/m}^2$  saakka. Laiturihaalussa on kärkivastus korkeimmillaan vasta ollut lähes  $60 \text{ Mp/m}^2$ . Laiturihaalussa samaan painumaan kuin koepaalussa tarvittava kärkijännitys on suunnilleen paalujen läpimitan suhteen verran ( $90 \text{ cm}/70 \text{ cm}$ ) pienempi aivan kuten anturaperustuksissakin on todettu.

Vaippavastuksella ei tunnu olevan välitöntä yhteyttä paalun painumaan. Se vähentää paalun kärkeen menevää kuormitusta ja siten välillisesti paalun painumaa. Kun vaippavastus on suuri ei paalun painuma pääse muodostumaan kovin suureksi pienen kärkivastuksen takia riippumatta maan tiiveydestä paalun kärkitasossa.

Koetulokset osoittavat, että klassilliseen maanpaineteorian mukaan saatava vaippavastuksen lisääntyminen syvyyden toisessa potenssissa ei ole oikea. Tulos oli melkein päinvastainen. Paalun yläosassa oli vaippajännitys erittäin suuri. Se saavutti maksimiarvonsa noin  $30 \text{ Mp/m}^2$  hiukan yli 80 mm painumalla ja olisi ilmeisesti vieläkin kasvanut mikäli koetta olisi voitu jatkaa eteenpäin. Alaspäin siirryttäessä vaippajännitys pieneni, koepaalussa se oli keskiosalla paalua korkeimmillaan noin  $4 \text{ Mp/m}^2$  ja alaosassa se pysyi koko ajan

alle  $1 \text{ Mp/m}^2$ . Laiturihaalussa oli tilanne samanlainen. Lisäksi todettiin, että kuormitusvaihtelujen mukana ajan lisääntyessä vaippajännitystä siirtyy paalun alaosaan yläosaan. Alaosan vaippajännitys muuttuu lopulta negatiiviseksi, mikä merkitsee sitä, että paalun alaosa ympäröiviin maakerrostumiin jää ylhäältä päin kohdistuva lisäkuorma, niin että ne painuvat alaspäin enemmän kuin paalu.

Yhteenvedona suureen vaippajännitykseen paalun yläosassa ja pieneen paalun alaosassa vaikuttaneista seikoista voidaan mainita seuraavat:

- maan tiivistyminen maanpinnassa. Käytännöllisistä syistä valettiin maanpintaan paalun ympärille teräsbetoni-laatta, josta ponnistaen esijännitettiin koe-kuormitus-ankkurit. Tämän seurauksena maa tiivistyi ylhäällä ja saattoi joutua tilaan, missä sen leikkausjännitys kasvoi hyvin pitkälle.
- paalun kaivuun vaikutus. Työputkea maahan kaivettaessa ylitti ilmeisesti ympäröivän maan paino maan kantavuuden putken pohjassa. Tällöin alkaa työputken ympäriltä nousta pohjasta maata ylöspäin ja paalun alaosa ympäröivä maa löyhtyy ja sen kyky vastaanottaa vaippavastusta pienenee. Yläpuolisten maakerrosten painosta johtuen tällainen alempana oleva maakerros saattaa painua alaspäin jopa enemmän kuin paalu.
- toistokuormituksen vaikutus. Kuormitusvaihteluiden aikana vähenee ja kasvaa selvimmin yläosan vaippajännitys yläpään kuormitusmuutosta vastaavalla määrällä. Kuormituksen kasvun aiheuttama kärkivastuksen lisäys ei poistu yhtä helposti. Kuormitusta uudelleen lisättäessä saattaa kärkivastus kasvaa lisää ja vaippajännitys alaosassa pienenee. Paalun kärkeen jäävä lisäjännitys yhdessä alaosa ympäröivään maakerrokseen ylhäältä kohdistuvan kuormituksen kanssa saattavat lopulta muuttaa alaosan vaippajännityksen negatiiviseksi.
- kärkivastuksen vaikutus. Paalun kärjestä maahan siirtyvä kuorma synnyttää maahan leikkausjännityksiä, jotka liukupintoja pitkin kohdistuvat paalun vaippaa kohti ja suurentavat vaippavastusta. Mutta tämän seurauksena vaippavastuksen jakaantuminen muuttuu. Paalun yläosassa vaippajännitys kasvaa. Alaosassa sen si-

jaan liukupinnat saattavat kaartua alaspäin ja pienentää vaippajännitystä. Näissä kokeissa ei ollut mahdollista mitata erikseen kärkivastuksen vaikutusta vaippavastuksen suuruuteen tai jakautumiseen, mutta jos oletetaan kärkivastuksen vaikuttaneen yläosan vaippajännitykseen samoin kuin kokeen lopussa, voidaan arvioida suuresta vaippajännityksestä ehkä noin 50 % olevan kärkivastuksen aiheuttamaa.

## Loppusanat

Kokeet on suoritettu laiturin rakentaneen työyhtymän ja Benoto-paalujen valmistajan Insinööritoimisto Vesto Oy:n kustannuksella. Mainitun yhtiön henkilökunta on avustanut kirjoittajaa koekuormituksiin ja mittauksiin liittyvissä tehtävissä.

Valmiin laiturin kuormittaminen on ollut mahdollista Kone Oy:n nosturin avulla.

Em. yhtiöille ja kaikille kokeisiin osallistuneille henkilöille esittää kirjoittaja täten parhaimmat kiitoksensa.

## Kirjallisuusluettelo

- Berezantzev, V. G., Kristoforov, V. S. & Golubkov, V. N.*, (1961) Load Bearing Capacity and Determination of Piled Foundations. Proc. V Int. Conf. Soil Mech. Found, Engg. Vol. 2, Paris.
- Bucher, H.*, (1961): Bohrpfähle und Pfahlwände System »Benoto«. Schweizerische Bauzeitung 5/1961.
- Cambefort, H.*, (1947): Étude expérimentale de la force portante d'un pieu foré. Travaux Juillet-Aout 1947.
- Cambefort, H.*, (1964): Essai sur le comportement en terrain homogène des pieux isolés et des groupes de pieux. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics N:o 204. Decembre 1964.
- Eklund, P.*, (1961): Kitkamaalajien leikkauslujuuteen vaikuttavat tekijät. TKK diplomityö, ei julkaistu.
- Eklund, P.*, (1969 a): Lyönti- vai kaivinpaalu. Tielehti 9-10/1969.
- Eklund, P.*, (1969 b): Paalujen nykyaikaisesta koekuormituksesta. Rakennustaito 22/1969.
- Fellenius, B. H.*, (1969): Friktionspälars bärförmåga. Resultat av fältförsök i Kanada, Ingeniörsvetenskapsakademien, Särtryck och preliminära rapporter nr 22, Stockholm.
- Haefeli, R.*, (1961): Neuere Untersuchungen und Erkenntnisse über das Verhalten von Pfählen und deren Anwendung in der Praxis der Pfahlfundation. Schweizerische Bauzeitung 25/1961.
- Kézi, Á.*, (1964): Bodenmechanik. Band II, Budapest.
- Kerisel, J.*, (1958): Fondations profondes en terrains médiocres. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, N:o 122 Février 1958.
- Schenk, W.*, (1951): Der Rammpfahl. Berlin.
- Simons, H.*, (1967): Tragfähigkeit von Pfählen VDI-Z 8/1967.
- Skempton, A. W., Yassin, A. A. & Gibson, R. E.*, (1953): Theorie de la force portante des pieux. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n:o 63-64 Mars-Avril 1953.
- Tcheng, Y.*, (1966): Fondations profondes en milieu pulverulent a diverses compacités. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics N:o 219-220 Mars-Avril 1966.
- Thyrolf, G.*, (1968): Bestimmung der Tragkraft von Rammpfählen durch empirische Beiwerte. Bauplanung- Bautechnik 9/1968.
- Zweck, H.*, (1953): Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen. Mitteilung der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe 2/1953 ja 3-4/1954.
- Eklund Pertti, tekn. lis., Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi*