

HELSINGIN KAUPUNGIN GEOTEKNILLINEN TOIMISTO

KITKAPAALUJEN KANTAVUUS

**Geoteknillisen toimiston
tiedote 6 12. 1. 1976**

LYÖNTIPAALUJEN KANTAVUUSSELVITYS

Kitkapaalujen koekuormituksista ja suunnittelusta

Tämä tutkimus on suoritettu
Unkarin Kulttuuri-instituutin
apurahalla Budapestissa Helsingin kaupungin suorittamien
koekuormitusten perusteella

Sisällysluettelo:

	sivu
1. SUOMESSA YLEISESTI KÄYTETTÄVÄT PAALUTYYPIT	1
2. PROBLEEMAT KITKAPAALUJEN KÄYTÖSSÄ JA TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	1
3. SUORITETUT KOEKUORMITUKSET	3
3.1 <u>Mualla suoritettut koekuormitukset</u>	3
3.2 <u>Itäväylä Roihupellon kohdalla</u>	3
3.3 <u>Vuosaaren kansakoulu</u>	6
3.4 <u>Nurmijärventien Haagan rampit</u>	8
3.5 <u>Koskelan risteyssilta</u>	8
4. TULOSTEN ANALYSOINTI	10
4.1 <u>Kitkapaalun kantavuus</u>	10
4.2 <u>Murtokuormat koekuormitustulosten perusteella</u>	11
4.3 <u>Kantavuuden arviointi kairaustulosten perusteella</u>	16
4.31 Laskentamenetelmä	16
4.32 Painokairauksen perusteella	18
4.33 Heijarikairauksen perusteella	21
4.34 Puristinkairauksen perusteella	22
4.4 <u>Kantavuuden arviointi paalun lyönnin perusteella</u>	23
4.5 <u>Kantavuuden arvioiminen kantavuuskaavoilla tai -laskennoilla</u>	27
5. TUTKIMUKSET KITKAPAALUTUSTA VARTEN	29
5.1 <u>Pohjatutkimukset</u>	29
5.2 <u>Koepaalutukset ja koekuormitukset</u>	30
6. KITKAPAALUTUKSEN SUUNNITTELU	31
7. YHTEENVETO	32
Kirjallisuutta	35



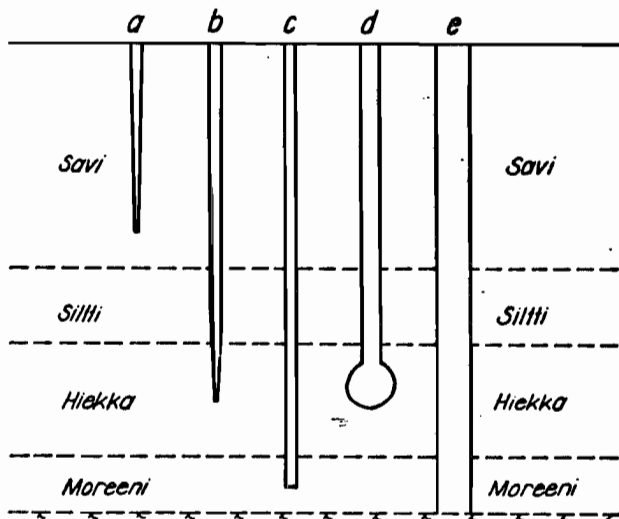
HELSINGIN KAUPUNGIN KIIINTEISTÖVIRASTO
GEOTEKNILLINEN TOIMISTO

Helsinki 12.1.1976 Hartikainen/em
 TNo 6109.7
 Kohde: LYÖNTIPAALUJEN KANTAVUUSSELVITYS

Asia: KITKAPAALUJEN KOEKUORMITUKSISTA JA SUUNNITTELUSTA

1. SUOMESSA YLEISESTI KÄYTETTÄVÄT PAALUTYYPIT

Rakennusten perustamiseen heikosti kantavalla maapohjalla käytetään Suomessa yleisimmin teräsbetonisia lyöntipaaluja. Nämä lyöddään useimmiten tukipaaluiksi. Jos kitkamaakerrokset ovat paksut, voi olla edullista käyttää kitkapaaluja. Usein kitkapaalujen käyttöä on rajoittanut niiden kantavuuden määrittämisessä esiintyvät vaikeudet. Tästä syystä kitkapaalujen käyttö on paljon vähäisempää kuin sen tulisi olla. Koheesiopaaluja käytetään rakennusten



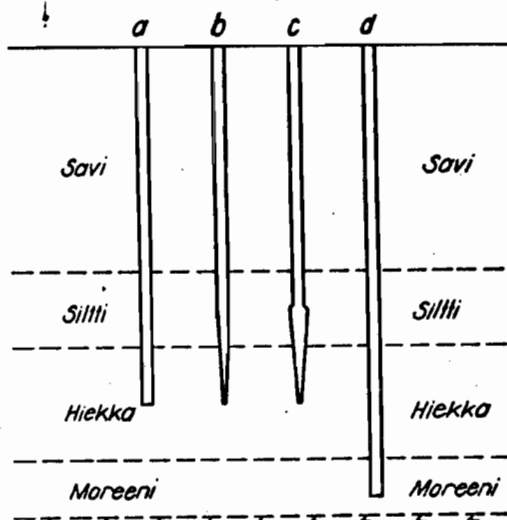
perustamiseen vain poikkeustapauksissa. Jos perustuskueormat ovat suuret tai jos pohjasuhteet eivät salli lyöntipaalujen käyttöä, suoritetaan paalutus Franki- tai kaivinpaaluja käyttäen. Kuvassa 1. on esitetty yleisesti käytettävät paalutyytit sijoitettui-
 na tyyppillisiin pohjasuhteisiin.

Kuva 1. Suomessa yleisesti käytettävät paalutyytit. a) Koheesiopaaletti, b) kitkapaaletti, c) tukipaaletti, d) Frankipaaletti ja e) kaivinpaaletti.

2. PROBLEEMAT KITKAPAALUJEN KÄYTÖSSÄ JA TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Kitkapaalujen kantavuuden ja painumien arviointi pohjatutkimusten perusteella on varsin vaikeaa. Tästä syystä käytetään usein tarpeettomastikin tukipaaluja kitkapaalujen sijasta. Kitkapaalutusta

suunniteltaessa pitäisi pystyä alustavasti määrittämään paalujen tavoitesyvyys ja edullisin muoto sekä saavutettava kantavuus ja tulevat painumat. Useimmiten tähän on käytettävissä vain painokairaustulokset. Kun kitkapaalujen kantavuus on yleensä pienempi kuin tukipaalujen, pitää säästön paalupituudessa korvata kantavuuden väheneminen. Kitkapaalujen käyttö on näin ollen taloudellisesti mielekäästä vain, jos saven alapuoliset kitkamaakerrokset ovat varsin paksut. Kitkapaalun kiilamainen muotoilu kasvattaa vaippahankausta kiilamaisella osalla vähintään 2-3-kertaiseksi /7 ja 18/. Näin ollen kitkapaalujen muotoilulla on varsin tärkeä merkitys. Kuitenkin toisaalta poikkeuksellinen muotoilu johtaa erikoistilauksesta valmistettaviin paaluihin, mikä nostaa tietenkin hintaa. Yleisimmät kitkapaalutyypit on esitetty kuvassa 2. Tukipaalutukseen



verrattuna kitkapaalutuksella aikaansaadaan säästöä paalutustyössä. Paalutus aiheuttaa etenkin kiilamaisia paaluja käytettäessä maan tiivistymistä, jonka vaikutus itse paalutustyöhön sekä paalujen kantavuuteen ja painumiin on vaikeasti arvioitavissa.

Kuva 2. a) Suora kitkapaalu, b) kiilamainen kitkapaalu, c) klunssimainen kitkapaalu ja d) tukipaalu.

Tässä artikkelissa pyritään käsittelemään em. probleemoja Helsingin kaupungin geoteknillisen toimiston töiden yhteydessä suoritettujen koekuormitusten perusteella. Koekuormitukset käsittävät 4 eri kohdetta ja yhteensä 28 kitkapaalua. Koekuormitusten suunnittelu ja suoritus on tehty kahdessa kohteessa Insinööri-toimisto Maa ja Vesi Oy:n, yhdessä kohteessa Insinööri-toimisto Viatek Oy:n ja yhdessä kohteessa geoteknillisen toimiston toimesta. Tulosten käsittely on suoritettu Unkarin ja Suomen tieteellistekniseen yhteistyösopimukseen perustuvan Unkarin Kulttuuri-

instituutin apurahan turvin Budapestin teknillisessä korkeakoulussa prof. Kézdin ja dr. Biczók'in ohjauksessa.

Tässä tutkimuksessa pyritään vertaamaan norjalaisten ohjeiden /14/ mukaisesti yleisessä käytössä olevien kairausmenetelmien tulosten perusteella saatavia kantavuusarvoja koekuormituksissa mitattuihin tuloksiin. Tällä tavoin pyritään arvostelemaan kairaus-tulosten pohjalta suoritettun kantavuuden arvioinnin luotettavuutta. Lisäksi käsitellään paalun lyöntityön perusteella saatavia kantavuusarvoja. Painuma- ja kustannuskysymyksiä ei käytettävissä olleen aineiston perusteella ole voitu tarkastella. Kuitenkin kantavuuden arviointi on taloudellisuusvertailussakin tärkein perustieto.

3. SUORITETUT KOEKUORMITUKSET

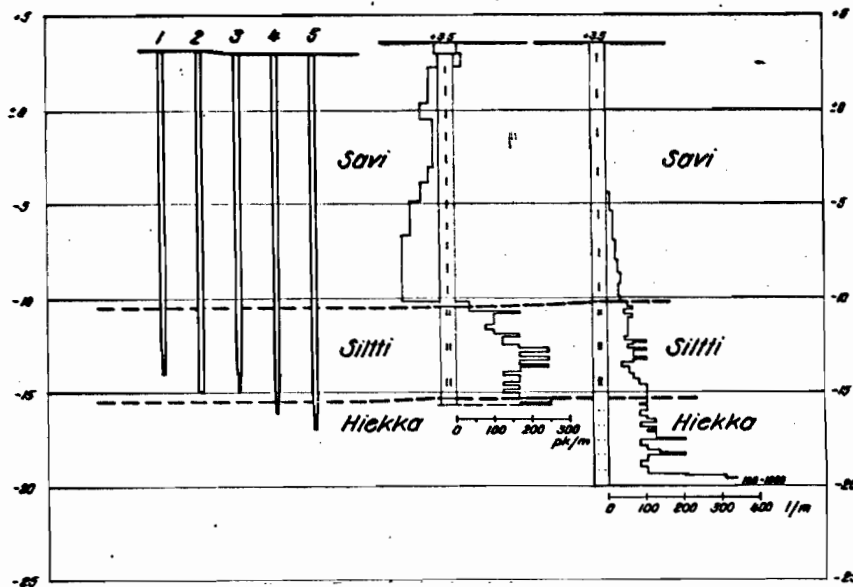
3.1 Mualla suoritettut koekuormitukset

Ilmeisesti suurin osa koko maailmassa tehtävistä paaluista on eri tyyppisiä kitkapaaluja. Näin ollen myöskin koekuormitustuloksia on valtavasti. Näistä Suomen olosuhteita ajatellen on eniten hyötyä Ruotsissa /3,8 ja 13/ ja Norjassa /6/ suoritetuista koekuormituksista. Käytettävissä olisi ollut mm. noin 200 koekuormituksia käsittävä japanilainen aineisto. Tässä yhteydessä ei kuitenkaan ole mahdollista käsitellä muualla suoritettujen koekuormitusten tuloksia.

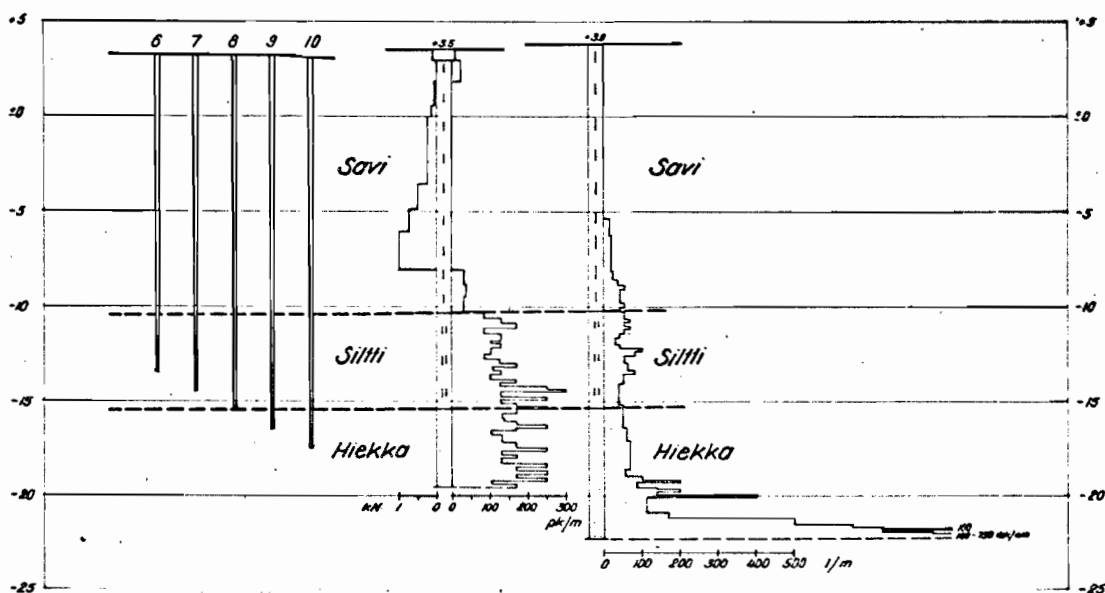
3.2 Itäväylä Roihupellon kohdalla

Tulosten analysointia varten täytyy pohjasuhteet yksinkertaistaa. Koepaikalla on ylinnä 13,5 m savea, jonka leikkauslujuus kasvaa alaspäin ollen rajoissa 10 - 20 kN/ m² (1-2 Mp/ m²). Tämän alla on 5 m silttiä ja sen alla silttistä hiekkaa.

Kitkapaalujen kantavuuden arvioimiseksi koepaikalla on suoritettu paino- ja heijarikairauksia ennen paalutusta. Koekuormitukset suoritettiin 10 kitkapaalulla, joista 5 oli betonipaaluja ja 5 puupaaluja. Neljä betonipaalua oli kiilamaisia. Betonipaalut yksinkertaistettuihin pohjasuhteisiin sijoitettuina sekä edustavat kairausdiagrammit on esitetty kuvassa 3. ja puupaalut vas-



Kuva 3. Koepaikan I A (Itäväylän) betonipaalut sijoitettuna yksinkertaistettuihin, edustavilla kairausdiagrammeilla varustettuihin pohjasuhteisiin.



Kuva 4. Koepaikan I B (Itäväylän) puupaalut sijoitettuna yksinkertaistettuihin, edustavilla kairausdiagrammeilla varustettuihin pohjasuhteisiin.

TAULUKKO 1. KOEKUORMITETTUIJEN PAALUJEN MITAT

Koe - paikka	Paalu- no	Paalu- aine	Paalun muoto	Pituus		Läpimitta		Koe- paikka	Paalu no	Paalu- aine	Paalun muoto	Paalun Kok. Koh. Kitka		Läpimitta	
				Kok.	Koh.	Kitka	Kiila					Kok.	Koh.	Kitka	Kiila
I A	1	Bet.	Kiila	17.2	13.7	3.5	2.0	25x25	10....25x25	Bet.	Kiila	13.4	10.4	3.6	2.5
	2	"	Suora	18.2	13.7	4.5	"	"	"	"	Kiila	15.4	10.4	5.0	2.5
	3	"	Kiila	18.0	13.5	4.5	2.0	"	10....25x25	"	Kiila	17.3	10.3	7.0	2.5
	4	"	Kiila	19.0	13.5	5.5	2.0	"	10....25x25	"	Suora	13.3	10.3	3.0	30x30
	5	"	Kiila	20.0	13.5	6.5	2.0	"	10....25x25	"	Klunssi	13.2	10.2	3.0	25x30
I B	6	Puu		16.7	13.7	3.0	Ø 6"			Bet	Suora	9.5	6.5	3.0	25x25
	7	"		17.7	13.7	4.0	"			"	Suora	11.6	6.6	5.0	25x25
	8	"		18.7	13.7	5.0	"		III B	"	Suora	13.8	6.8	7.0	25x25
	9	"		19.7	13.7	6.0	"		29	"	Kiila	9.7	6.7	3.0	25x30
	10			20.5	13.5	7.0	"		30	"	Klunssi	9.9	6.9	3.0	25x30
II	11	Bet.	Suora	9.0	6.0	3.0	25x30			Bet.	Suora	16.0	6.0	10.0	30x30
	12	"	Kiila	9.0	6.0	3.0	2.5			"	Suora	16.0	6.0	10.0	"
	13	"	Kiila	9.0	6.0	3.0	2.5								
	14	"	Kiila	9.0	6.0	3.0	2.5								
	15	"	Klunssi	9.0	6.0	3.0	2.5								
	16	"	Klunssi	9.0	6.0	3.0	2.5								

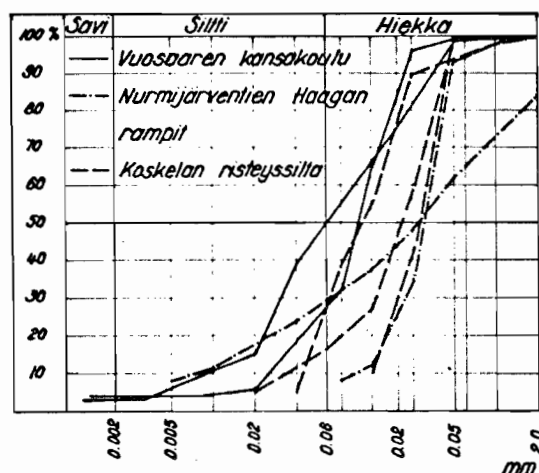
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

taavasti kuvassa 4. Paalujen mitat on esitetty taulukossa 1. Koe-
kuormitettujen paalujen väli oli 2 m. Niiden väliin sijoituivat
ankkuripaalut, jotka ulottuivat vain koheesiomaakerrokseen.

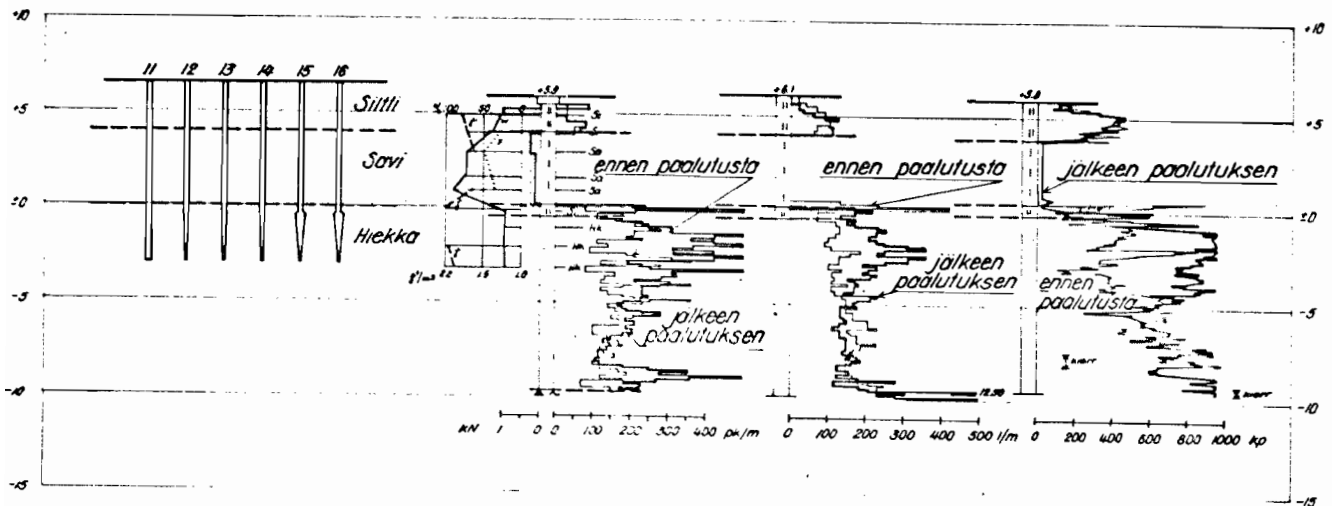
3.3 Vuosaaren kansakoulu

Koepaikan pohjasuhteet voidaan yksinkertaistaa siten, että maa-
kerroksista ylimpänä on 2 m paksu silttikerros. Tämän alla on 4 m
paksu savikerros, jonka leikkauslujuus on noin 10 kN/m^2 (1 Mp/m^2).
Tämän alla on yli 10 m paksu karkea silttinen hiekkakerros, jon-
ka rakeisuuskäyriä on esitetty kuvassa 5.

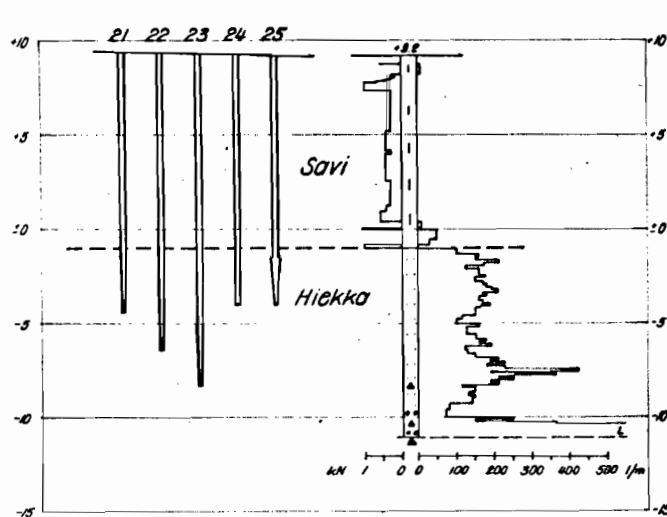
Kitkapaalujen kantavuuden arvioimiseen soveltuvia pohjatutkimuk-
sia tehtiin koepaikalla sekä ennen että jälkeen paalutuksen. Poh-
jatutkimukset tehtiin paino-, heijari- ja puristinkairauksina.
Koekuormitukset tehtiin kuudella betonisella kitkapaalulla, jois-
ta 1 oli suora, 3 kiilamaisia ja 2 klunssimaisia. Paalut ja kai-
rausdiagrammit on esitetty kuvassa 6. ja paalujen mitat taulukos-
sa 1. Koekuormitettujen paalujen väli oli 2 m. Niiden välillä oli
kuitenkin ankkuripaaluja, jotka ulottuivat kitkamaakerrokseen
aiheuttaen tiivistymistä.



Kuva 5. Paalujen kitkaosalla olevan silttisen hiekkakerroksen rakeisuuskäyriä.



Kuva 6. Koepaikan II (Vuosaaren kansakoulun) betonipaalut sijoitettuna yksinkertaistettuihin, edustavilla kairausdiagrammeilla varustettuihin pohjasuhteisiin. Kairaukset on tehty sekä ennen että jälkeen paalutuksen.



Kuva 7. Koepaikan III A (Nurmijärventien) betonipaalut sijoitettuna yksinkertaistettuihin, edustavilla kairausdiagrammilla varustettuihin pohjasuhteisiin.

3.4 Nurmijärventien Haagan rampit

Koekuormitukset suoritettiin kahdessa paikassa sekä rampin 1 että 2 kohdalla.

Rampin 2 kohdalla on ylinnä 10 m paksu savikerros, jonka leikkauslujuus on keskimäärin 15 kN/m^2 ($1,5 \text{ Mp/m}^2$). Tämän alla on 8 m silttistä hiekkaa, jonka rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 5. Pohjatutkimukset rampin 2 kohdalla tehtiin painokairauksina ennen paalutusta. Koekuormitukset täällä paikalla tehtiin 5 betonipaalulla, joista 3 oli kiilamaisia, 1 klunssimainen ja 1 suora. Paalut ja kairausdiagrammi on esitetty kuvassa 7. ja paalujen mitat taulukossa 1.

Rampin 1 kohdalla ylimpänä maakerroksena on noin 6,5 m savea, jonka leikkauslujuus on keskimäärin 15 kN/m^2 ($1,5 \text{ Mp/m}^2$). Tämän kerroksen alla on 12 m silttistä hiekkaa. Pohjatutkimukset rampin kohdalla tehtiin paino- ja puristinkairauksina. Koekuormitukset suoritettiin 5 betonipaalulla, joista 3 oli suoria ja 1 kiilamainen ja 1 klunssimainen. Paalut ja kairausdiagrammit on esitetty kuvassa 8. ja paalujen mitat taulukossa 1.

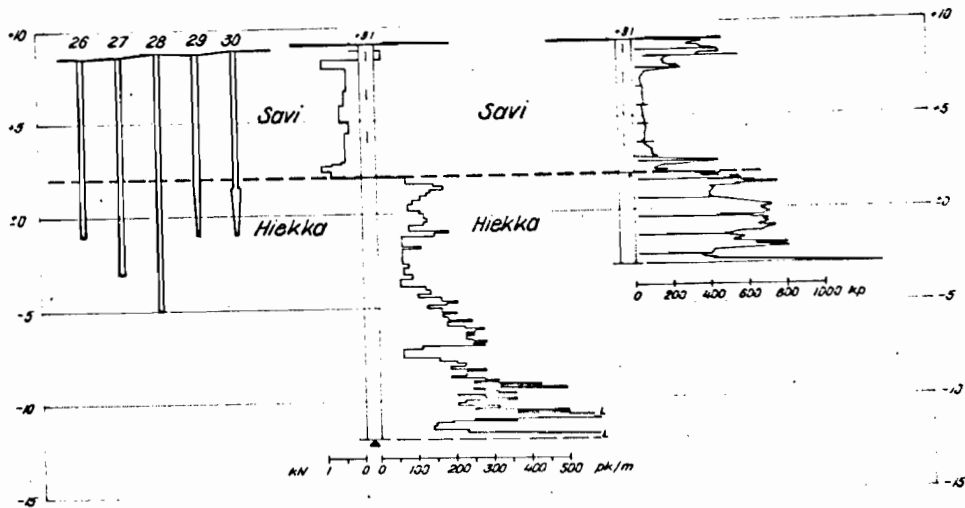
Molemmilla koepaikoilla sekä koekuormitettavat paalut että ankkuripaalut sijoitettiin 1,8 m ruudukkoon. Tällöin koekuormitettujen paalujen keskietäisyys oli 2,5 m. Ankkuripaalut ulottuivat kitkamaakerrokseen.

3.5 Koskelan risteyssilta

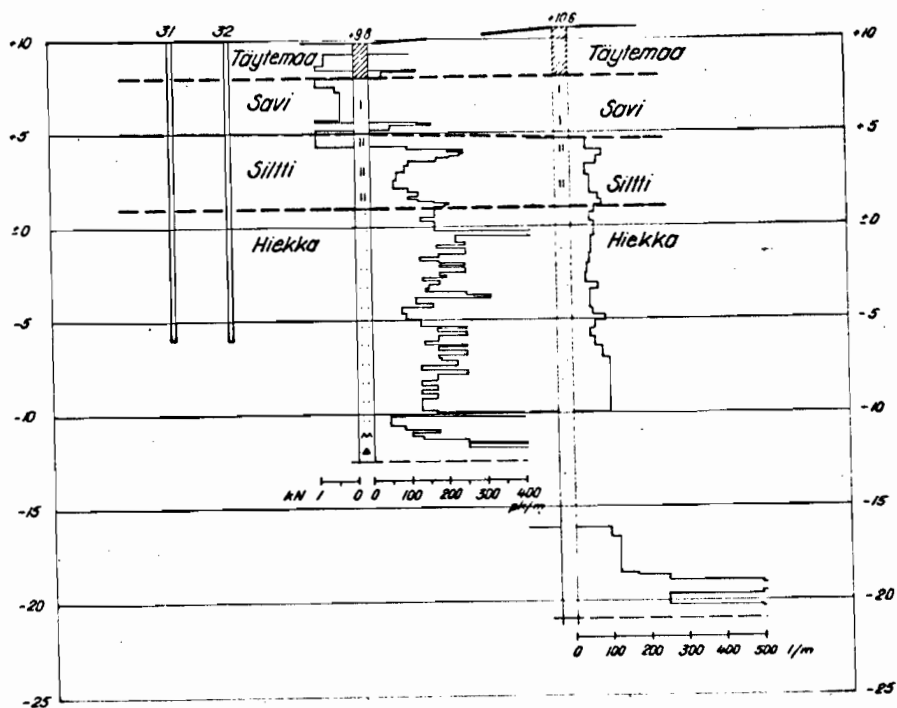
Koekuormitukset suoritettiin sillan läntisen maatuen kohdalla. Koepaikalla oli ylimpänä 2 m paksu kitkamaatäyte. Tämän alla on 4 m paksu savikerros. Saven leikkauslujuus on keskimäärin 10 kN/m^2 (1 Mp/m^2). Saven alapuolella on 3 m paksultti silttiä ja tämän alla 12 m silttistä hiekkaa, jonka rakeisuuskäyriä on esitetty kuvassa 5.

Pohjatutkimukset koekuormituspaikalla tehtiin paino- ja heijarikairauksina. Koekuormitukset suoritettiin kahdella suoralla betonipaalulla. Paalut ja kairausdiagrammit on esitetty kuvassa 9. ja paalujen mitat taulukossa 1.

Koekuormitettavat paalut ja ankkuripaalut sijoitettiin 1,7 m ruudukkoon. Ankkuripaalut ulottuivat kitkamaakerroksen läpi. Koepaalujen väliksi ruudukossa tuli 2,8 m.



Kuva 8. Koepaikan III B (Nurmijärventien) betonipaalut sijoitettuna yksinkertaistettuihin, edustavilla kairausdiagrammeilla varustettuihin pohjasuhteisiin.

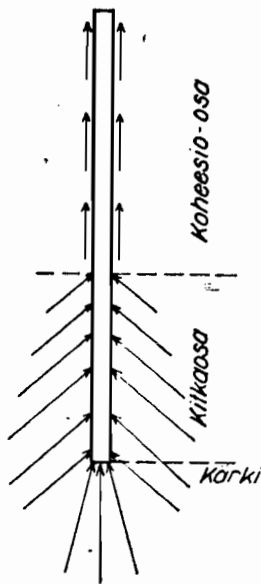


Kuva 9. Koepaikan IV (Koskelan risteys sillan) betonipaalut sijoitettuna yksinkertaistettuihin, edustavilla kairausdiagrammeilla varustettuihin pohjasuhteisiin.

4. TULOSTEN ANALYSOINTI

4.1 Kitkapaalun kantavuus

Kitkapaalun kantavuus muodostuu vaippa- ja kärkivastuksesta. Useimmiten etenkin Helsingin olosuhteissa, kitkapaalu läpäisee ensin koheesiomaakerroksen, jolloin vaippavastus jakaantuu sekä



koheesio- että kitkaosille (kuva 10.). Kantavuuden arviointia vaikeuttaa, että eri osien vastukset mobilisoituvat erilaisilla siirtymillä. Tämä voidaan käytännössä vain harvoin ottaa huomioon. Tässäkään yhteydessä ei ollut käytettävissä soveltuvia mittauksia, vaan arviot jouduttiin suorittamaan maksimiarvojen mukaan.

Kuva 10. Kitkapaalun kantavuuden muodostuminen koheesio- ja kitkaosan vaippavastuksesta sekä kärkivastuksesta.

Kitkapaalujen kantavuuden määrittäminen voidaan suorittaa periaatteessa neljällä eri tavalla:

- Kairausvastustulosten perusteella muuntamalla ne aikaisemmista tutkimuksista saatujen kertoimien tai käyrien perusteella paalun vaippa- ja kärkivastuksiksi.
- Teoreettisilla maakerrosten geoteknillisiin ominaisuuksiin perustuvilla laskelmilla.
- Paalun lyöntivastuksen mukaan joko kaavojen tai mittausten avulla.
- Koekuormitusten perusteella.

Käytännön töissä on aluksi käytettävissä vain ensimmäiseen tapaukseen soveltuvia tietoja. Niiden perusteella pitää pystyä ratkaisemaan ainakin, kannattaako kitkapaalutusta ryhtyä lähemmin suunnittelemaan. Näin ollen tähän ryhmään kuuluvilla tutkimuksilla on tärkein merkitys kitkapaalun käytön yleistymiselle.

Toiseen tapaukseen tarvittavien tietojen hankkiminen on käytännössä varsin hankalaa ja kallista. Näitä menetelmiä käytettäessä joudutaan tarvittavat parametrit, lähinnä kitkakulma, yleensä arvaamaan. Näin ollen tämän ryhmän tarkastelulla on lähinnä teoreettista merkitystä paalujen käyttäytymistä selvitetessä.

Lyöntityöstä saadaan tuloksia vasta paalujen lyönnin yhteydessä, jolloin suunnittelemisen on yleensä liian myöhäistä. Jos paalujen lyöntikokeita järjestetään erikseen, olisi syytä suorittaa myös koekuormituksia.

Koekuormituksilla saadaan todellisinta tietoa paalujen kantavuudesta. Kuitenkin koekuormitusten aikaansaamiseksi täytyy käytännössä olla jo ennakolta varsin vakuuttunut menestyksellisestä lopputuloksesta, sillä kukaan rakennuttaja ei teetä mielellään kalliita koekuormituksia, jos lopputulos on negatiivinen. Näin ollen koekuormituksella tarkistetaan sallittu paalukuorma, mutta käyttömahdollisuus pitää jo sitä ennen olla lähes varma ja myöskin paalutuskustannukset melko tarkoin arvioitu.

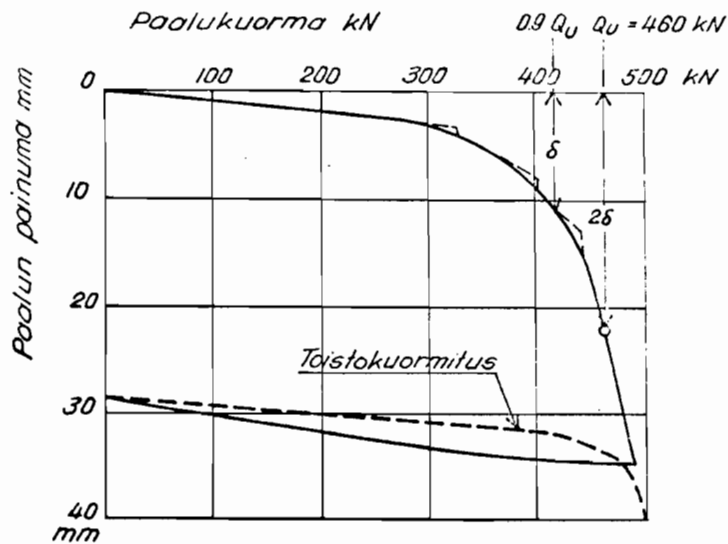
Tässä tutkimuksessa analysointi perustuu lähinnä ensimmäiseen tapaukseen eli kairaustuloksiin. Saatuja kantavuuksia verrataan koekuormituksissa saatuihin murtokuormiin. Muita tapauksia tarkastellaan lyhyesti.

4.2 Murtokuormat koekuormitustulosten perusteella

Kitkapaalun murtokuorma ei ole yksiselitteinen, koska painuman lisääntyessä kantavuus yleensä kasvaa. Näin ollen kuormituspainuma-käyrä ei saavuta pystysuoraa asymtoottia. Tällöin puhutaankin useimmiten rajakuormasta. Rajakuormalla tarkoitetaan yleensä kuormaa, jolla paalu alkaa huomattavasti painua. Rajakuorma on siten murtokuormaa pienempi. Raja- tai murtokuorman määrittämiseen onkin olemassa lukuisasti menetelmiä /10,11 ja 14/. Näiden arvojen määrittäminen perustuu joko:

- Kuormitus-painumakäyrän muotoon.
- Tiettyyn kokonaispainumaan.
- Tiettyyn painumaan suhteessa paalun halkaisijaan.
- Elastisen ja plastisen painuman suhteeseen.

Tässä yhteydessä ei tarkastella eri menetelmiä. Tutkimuksessa on käytetty norjalaisissa /14/ ja ruotsalaisissa ohjeissa /9/ suositeltua menetelmää murtokuorman määrittämiseksi. Tällöin murtokuormalla tarkoitetaan kuormaa, joka antaa kaksi kertaa

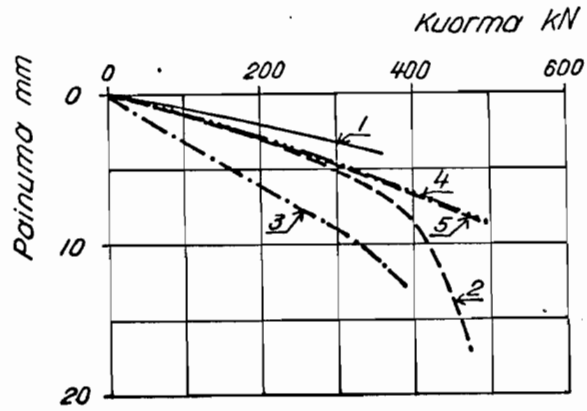


niin suuren painuman kuin 90 % tästä kuormasta (kuva 11.). Menetelmä perustuu siten kuormitus-painumakäyrän muotoon. Tällöin voitaisiin rajakuorman katsoa olevan 90 % murtokuormasta.

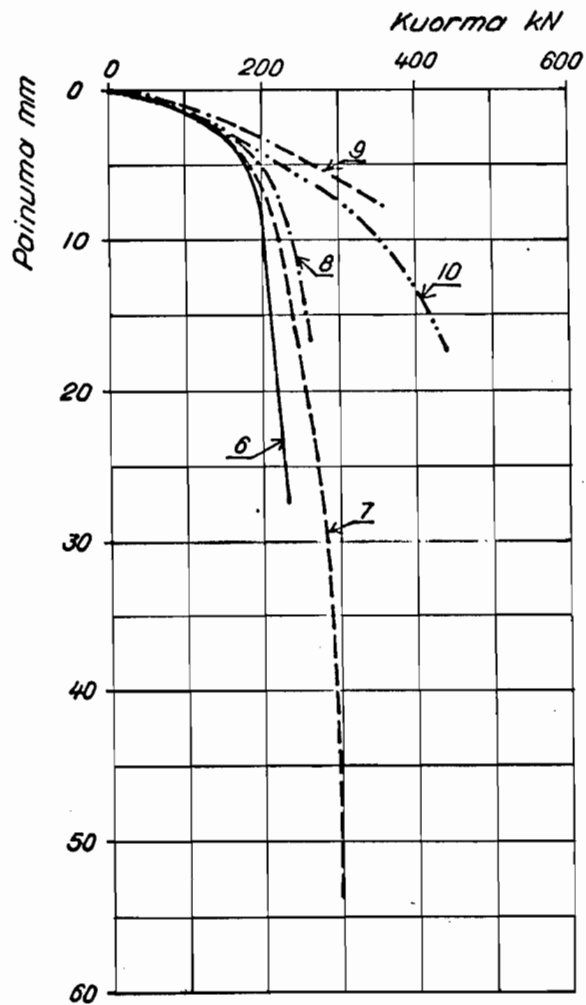
Kuva 11. Murtokuorman määrittäminen /14/.

Suoritetuissa koekuormituksissa oli kuormituslaitteiden kapasiteetistä johtuen jääty valitettavan usein murtokuorman alapuolelle. Näissä tapauksissa murtokuorma on jouduttu extrapoloimaan samalla paikalla samantyyppisillä paaluilla murtokuormaan asti suoritettujen koekuormitusten mukaan kuormitus-painumakäyrien alkuosia vertaamalla. Harvoissa tapauksissa, kun paalun kantavuus on ollut hyvin pieni, ei käyrältä löydy riittävän jyrkkää taitetta ko. menetelmän soveltamiseksi.

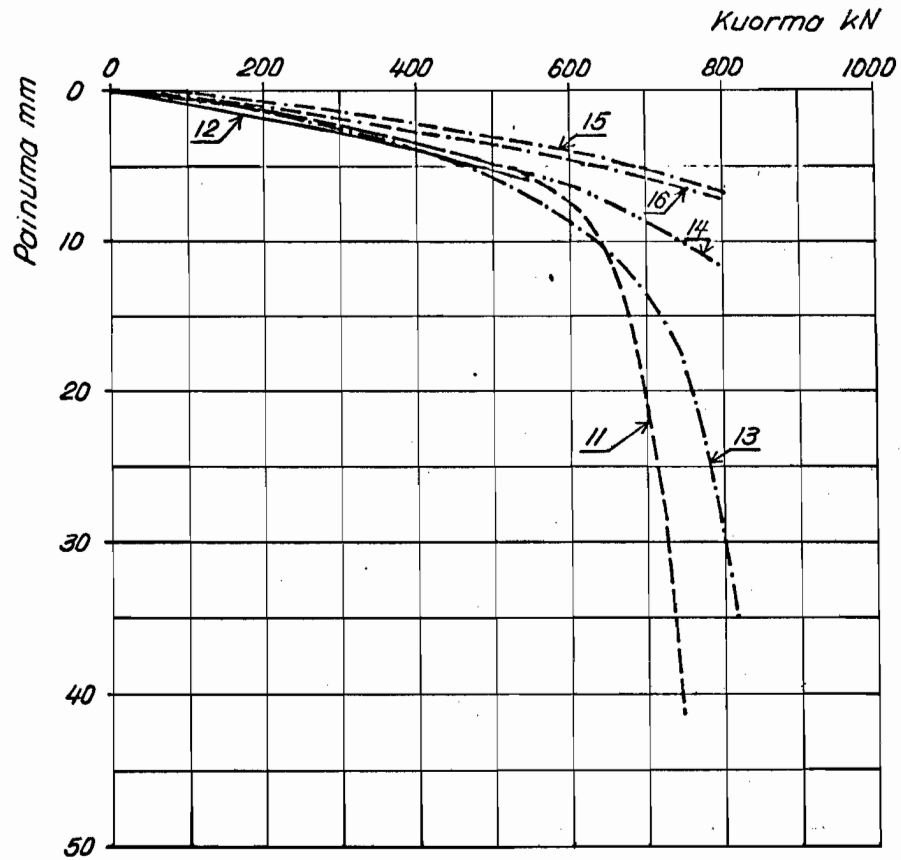
Kuormitus-painumakäyrät on esitetty piirustuksissa 12 ... 17.



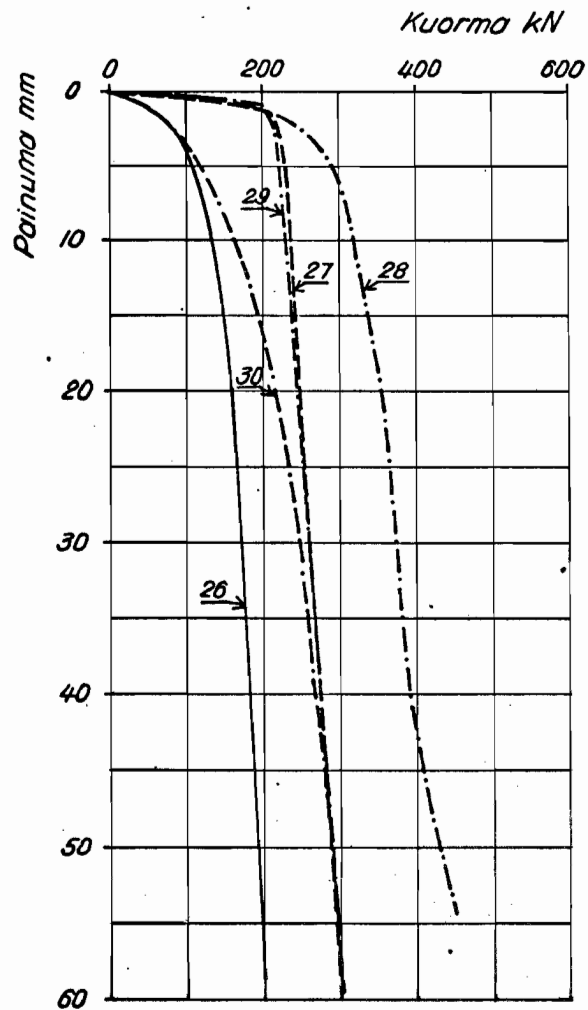
Kuva 12. Kuormituspainumakäyrät koepaikalla I A.



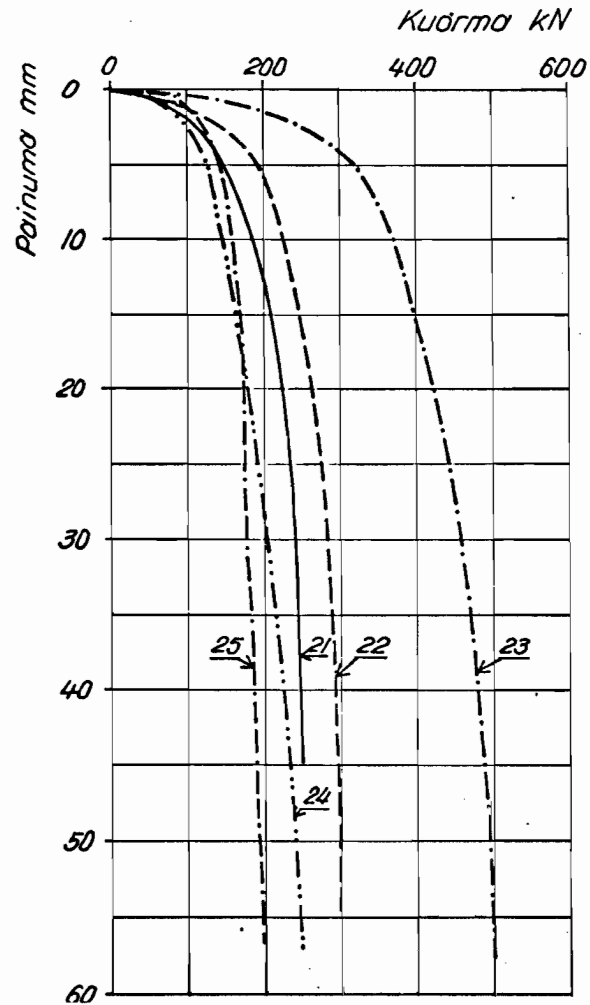
Kuva 13. Kuormituspainumakäyrät koepaikalla I B.



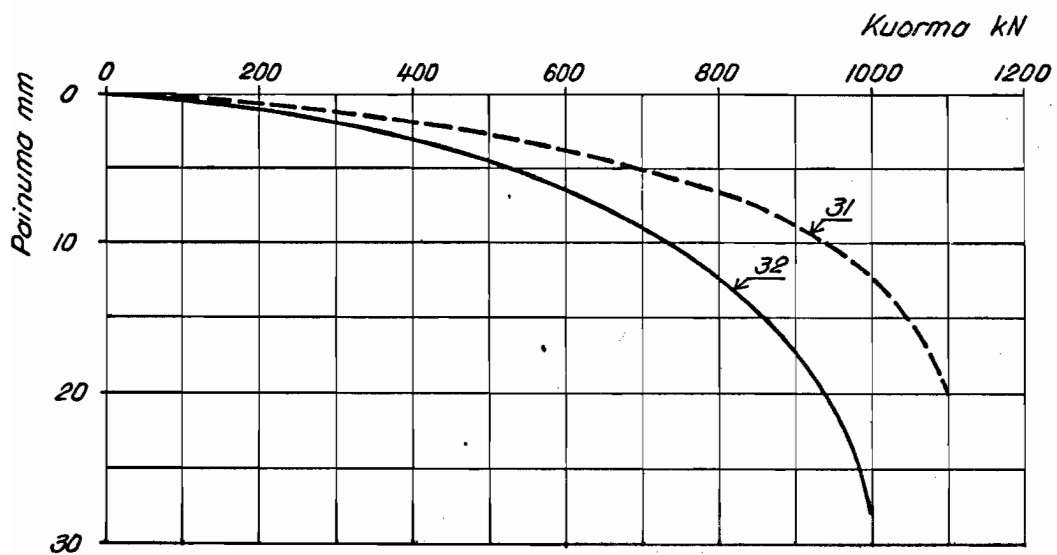
Kuva 14. Kuormituspainumakäyrät koepaikalla II.



Kuva 15. Kuormituspainumakäyrät koepaikalla III A.



Kuva 16. Kuormituspainumakäyrät koepaikalla III B.



Kuva 17. Kuormituspainumakäyrät koepaikalla IV.

4.3 Kantavuuden arviointi kairaustulosten perusteella

4.3.1 Laskentamenetelmä

Käytännössä kantavuuden arvioimiseksi on yleisimmin käytettävissä ainakin aluksi vain kairaustuloksia, Suomessa useimmiten vain painokairaustuloksia. Tämän tutkimuksen analysointi on tehty pääasiassa kairaustuloksiin perustuen. Tällöin on käytetty uusissa norjalaisissa paalutusohjeissa /14/ käytettyjä diagrammeja ja kertoimia tarkoituksena selvittää niiden soveltuvuus Helsingin olosuhteisiin. Kaikissa kohteissa on suoritettu painokairauksia, kolmessa kohteessa heijarikairauksia ja kahdessa kohteessa puristinkairauksia. Yhdessä kohteessa on pohjatutkimukset suoritettu sekä ennen että jälkeen paalutuksen.

Norjalaista paalutusohjetta soveltaen paalun kantavuus muodostuu vaippa- ja kärkivastuksesta kokemusperäisen kaavan mukaan:

$$Q_u = Q_{fe} + Q_{ff} + Q_p = f_r \cdot s_{u_m} \cdot A_{fc} + f_f \cdot q_{cf} \cdot A_{ff} + f_p \cdot q_{cp} \cdot A_p^{(1)}$$

jossa

Q_u = murtokuorma

Q_{fc} = vaippavastus koheesiomaaosuudella

Q_{ff} = vaippavastus kitkamaaosuudella

Q_p = kärkivastus

f_r = vaippavastuksen ja leikkauslujuuden suhde

s_{u_m} = keskimääräinen kuivattamaton leikkauslujuus

A_{fc} = paalun vaipan pinta-ala koheesiomaaosuudella

f_f = maan tiiveydestä riippuva sivukitkakerroin

q_{cf} = keskimääräinen puristinkairausvastus kitkamaaosuudella

A_{ff} = paalun vaipan pinta-ala kitkamaaosuudella

f_p = kärkivastuskerroin

q_{cp} = keskimääräinen puristinkairausvastus välillä 5 d paalun kärjen yläpuolelle ja 3 d alapuolelle.

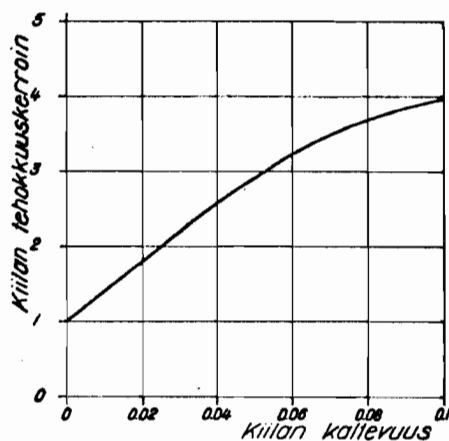
A_p = paalun kärjen pinta-ala.

Kaavaa käytettäessä sen kaikki osat antavat maksimivastuksen. Kuitenkin kunkin osan vastus mobilisoituu erisuuruisilla siir-

tymillä. Tällöin koheesio-osan vaippavastus kehittyy pienimmällä siirtymällä. Sitten seuraa kitka-osan vaippavastus ja viimeisenä mobilisoituu kärkivastus. Näin ollen eri osien yhteenlaskeminen voi johtaa tuloksen epävarmalle puolelle. Eri osien vastuksia painuman funktiona ei käytännössä yleensä voida tarkastella eikä tässäkään yhteydessä ole ollut käytettävissä siihen soveltuvia mittaustuloksia.

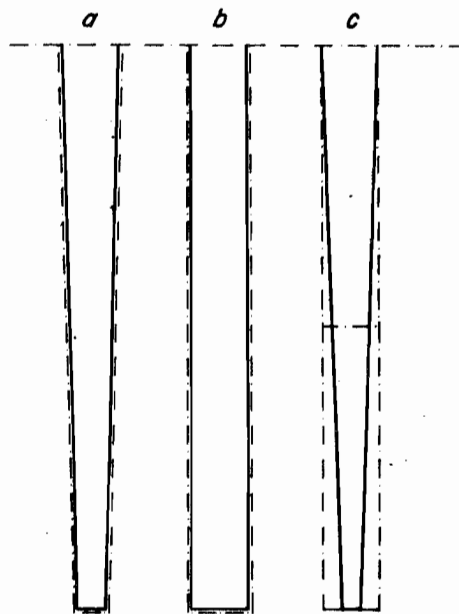
Norjalaisissa ohjeissa on annettu diagrammit vaippavastuksen arvioimiseksi paino- ja heijarikairauksen perusteella puupaaluille ja suorille betonipaaluille. Kärkivastus voidaan tällöin arvioida maan tiiveydestä riippuen verrannollisena vaippavastukseen. Puristinkairauksen perusteella saadaan kärkivastus suoraan ohjeissa suositellulla vakiokerttoimella ja vaippavastus maan tiiveydestä riippuvalla kertoimella.

Kitkapaalussa käytetään usein kiilamaisuutta vaippahankauksen lisäämiseksi. Kiilamaisuuden vaikutus on hyvin tehokas. Se voi kasvattaa vaippahankauksen lyhyillä kiilamaisilla osilla jopa 3..4-kertaiseksi. Tähän soveltuvaa laskentatapaa ei ole norjalaisissa ohjeissa esitetty. Tulosten analysoinnissa on käytetty lyhyille,



Kuva 18. Vaippavastuksen kasvaminen kiilamaisilla osilla

alle 3 m kiilamaisille paalun osille kuvan 18 mukaista tehokkuuskerrointa. Lisäksi on oletettu, että lyhyen kiilan kohdalla maa toimii murtotilassa paalun osana muodostaen suoran "paalun" (kuva 19 c). Puupaalujen luonnollinen kiilamaisuus on jo diagrammissa otettu huomioon (kuva 19 a). Sen sijaan puristinkairauksen osalta asiaa ei ole norjalaisissa ohjeissa käsitelty. Tutkimuksessa ei ollut käytettävissä puristinkairauksia puupaalujen osalta.



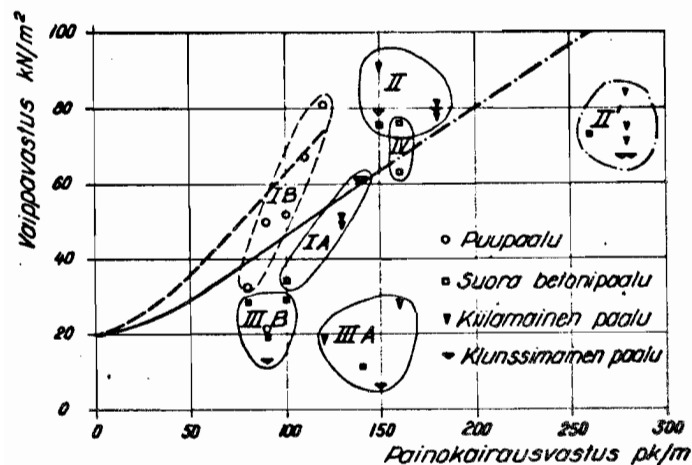
Koheesio-osan vaippavastus on yleensä määriteltävä vastaavien lyhyiden paalujen koekuormitusten perusteella ja joskus jännitysmittauksilla tai saven leikkauslujuuden perusteella. Näin on koheesio-osan vaippavastus voitu erottaa ja keskittyä vain kitkaosan käsittelyyn.

Laskennan lopputulokset kaikkien kairausmenetelmien osalta koheesio-osan, kitkaosan ja kärjen kantavuus eriteltyinä on esitetty taulukossa 2.

Kuva 19. Laskentamenetelmän soveltaminen. Laskentatasot piste-katkoviivalla ja paalu täydellä viivalla. a) Puupaalu, b) suora betonipaalu ja c) betonipaalun lyhyt kiila (alle 3 m).

4.32 Painokairauksen perusteella

Kaikilla koekuormituspaikoilla on suoritettu painokairauksia. Paalujen kantavuus on arvioitu ottamalla vaippavastus norjalaisen paalutusohjeen mukaisesti keskimääräisen kairausvastuksen perusteella. Kärkivastuksen oletetaan olevan 50 x vaippavastus löyhässä maassa (painokairausvastus ~100 pk/m) ja 100 x vaippavastus tiiviissä maassa (painokairausvastus ~250 pk/m). Väliarvot interpoloidaan.

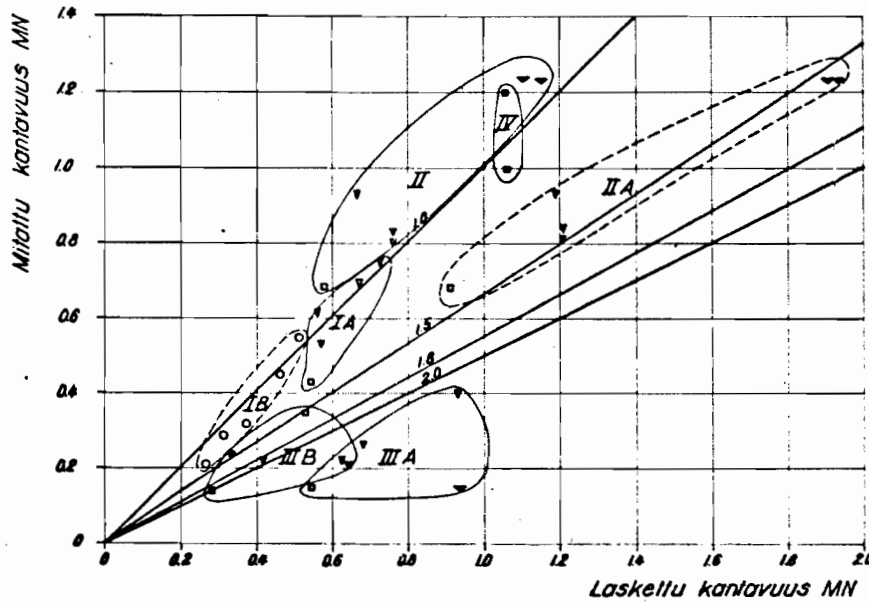


Laskemalla vaippavastuksen todelliset arvot voidaan niitä verrata norjalaisissa ohjeissa esitettyihin suosituksiin (kuva 20). Lisäksi paalujen arvioidut kantavuudet on esitetty kuvassa 21 verrattuna koekuormituksissa saavutettuihin kantavuuksiin.

Kuva 20. Koekuormituksista laskettu vaippavastus verrattuna norjalaisessa paalutusohjeessa /14/ painokairausvastuksen perusteella annettuihin suosituksiin. (Eri koepaikkojen tulokset eriteltyinä ja ohjeiden vastaisesti lasketut tai soveltumattomat tulokset uljaiduuttuna)

TAULUKKO 2. PAALUJEN KANTAVUUS KAIRAUSTULOJEN PERUSTEELLA

Koe- paikka no	Koh. osa	Kitka-osa		Kärki		Kokonais		Murtoma	Koe- paikka	Paalu No	Koh. osa		Kitka-osa		Kärki		Kokonais		Murtoma
		Pak.	Hek.	Pak.	Hek.	Pak.	Hek.				Pak.	Hek.	Pak.	Hek.	Pak.	Hek.	Pak.	Hek.	
I A	1	114	275	171	178	113	178	530		21	63	326			236		625		220
	2	114	211	153	218	119	218	430		22	63	417			198		678		260
	3	113	325	196	178	119	178	560	III A	23	62	617			251		930		400
	4	113	374	263	189	122	189	690		24	62	216			257		545		150
	5	113	435	325	189	137	189	750		25	56	473			392		921		140
	6	136	88	95	46	50	46	210		26	33	129	101		116	156	278	290	140
	7	139	125	123	48	50	48	290		27	33	200	188		97	156	330	377	140
I B	8	142	174	156	54	50	54	320	III B	28	34	329			166		529		150
	9	142	234	196	59	50	59	450		29	37	224	192		161	168	422	397	120
	10	145	310	241	63	50	63	550		30	38	326	280		269	281	633	599	100
	11	60	208	148	315	217	315	680		31	24	715	417		320	205	1059	646	100
	11 ¹	60	330	221	522	379	522	680		32	24	715	417		320	205	1059	646	1200
	12	60	364	249	334	217	334	830											
	12 ¹	60	508	377	641	439	641	830											
	13	60	364	249	334	217	334	800											
	13 ¹	60	508	377	641	439	641	800											
	14	60	322	237	283	217	283	930											
	14 ¹	60	497	369	641	439	641	930											
	15	60	535	362	555	360	555	1230											
	15 ¹	60	793	548	1069	731	1069	1230											
	16	60	475	362	473	360	473	1230											
	16 ¹	60	800	548	1069	731	1069	1230											



Kuva 21. Painokairausvastuksen perusteella lasketut paalujen kantavuudet verrattuina koekuormituksissa saatuihin. (Kuvaan merkittynä varmuuskerroin rajat 1,0; 1,5; 1,8 ja 2,0.

Betonipaalujen osalta tulokset ovat hyvin sopusoinnussa ohjeissa esitettyjen arvojen kanssa tapauksissa I A ja IV. Koepaikalla II paaluryhmä on aiheuttanut huomattavaa maan tiivistymistä. Ainoastaan tällä paikalla paalujen välit huomioonottaen myöskin kitkamaakerrokseen ulottuvat ankkuripaalut olivat pienemmät kuin 6 d. Tiivistyminen nosti painokairausvastusta noin 50-80 %, jolloin kantavuus kasvoi likimäärin saman verran. Kun koekuormituksella saatuja tuloksia verrataan ennen paalutusta tehtyjen kairausten perusteella laskettuihin (II), voidaan todeta, että mitattu arvo on keskimäärin 20 % laskettua suurempi. Paalutuksen jälkeen suoritettujen kairausten perusteella (II¹) saadaan keskimäärin 30 % mitattua pienempi arvo. Mitattu arvo jää siten laskettujen arvojen väliin. Tämä johtuu siitä, että yksittäisetkin paalut ja harvemmassa kuin 6 d olevat paaluryhmät aiheuttavat vähäistä tiivistymistä, joka on jo huomioitu norjalaisissa suosituksissa. Tiivistymisen vaikutus ilmenee myös siten, että kitkamaakerroksessa olevan osan pituuden kasvaessa mitatun ja lasketun arvon suhde kasvaa. Tämä käy selvimmän ilmi tuloksista koepaikalla I. Koepaikalla III ovat mitatut tulokset jääneet

erittäin huonoiksi laskettuihin verrattuina. Kantavuudet ovat olleet 30 ... 70 % lasketuista ja klunssipaalujen osalla vieläkin huonompia. Tämän tuloksen on aiheuttanut savikerroksen alla oleva paineellinen pohjavesi. Erityisen haitalliseksi on tällöin muodostunut klunssipaalujen varren kohdalle jäävä "reikä", joka on mahdollistanut virtauksen ja turmellut siten myös kärkiosan kantavuuden.

Puupaalujen osalta (tapaus I B) mitattujen ja laskettujen kantavuuksien suhde on keskimäärin lähes oikea. Paalun pituuden vaikutus näkyy tässäkin tapauksessa selvästi.

Painokairauksen voidaan todeta tutkitussa tapauksissa soveltuneen hyvin kantavuuden arvioimiseen. Tällöin on otettava huomioon että paikalla III suoritettut kokeet ovat turmeltuneet erikoislaatuisten pohjavesisuhteiden takia ja että ohjetta ei ole tarkoitettu käytettäväksi tapauksen II¹ tapaan. Muissa tapauksissa ovat tulokset aina pysyneet selvästi 1,5-varmuuskerroinrajan yläpuolella. Ts. oletetulla kokonaisvarmuudella 1,5 olisi todellinen varmuus aina ollut > 1.

4.33 Heijarikairausten perusteella

Koepaikoilla I, II ja IV on suoritettu heijarikairauksia. Paalujen kantavuus on arvioitu ottamalla vaippavastus norjalaisen paalutusohjeen mukaisesti keskimääräisen kairausvastuksen perusteella. Heijarikairan kairausvastus on esitetty muodossa

$$Q_0 = \frac{W \cdot H}{S} \quad \text{kNm/m/} \quad (2)$$

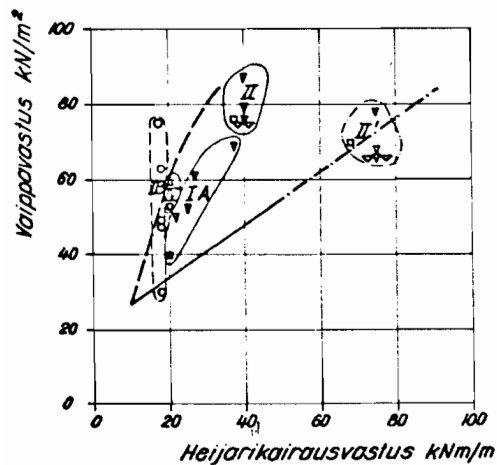
jossa

W = heijarin paino (kN)

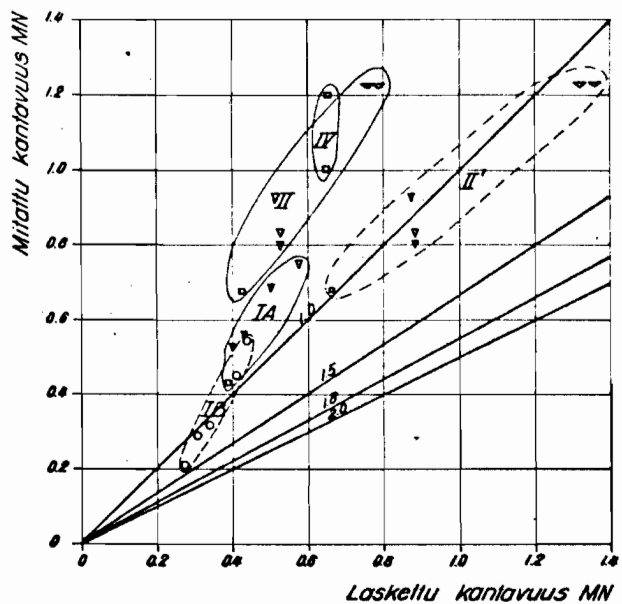
H = pudotuskorkeus (m)

S = keskimääräinen painuma/isku (m)

Kärkivastuksen oletetaan olevan 50 x vaippavastus löyhässä maassa (heijarikairausvastus ~ 35 kNm/m) ja 100 x vaippavastus tiiviissä maassa (110 kNm/m).



Kuva 22. Koekuormituksista laskettu vaippavastus verrattuna norjalaisessa paalutusohjeessa heijarikairausvastuksen perusteella annettuihin suosituksiin.



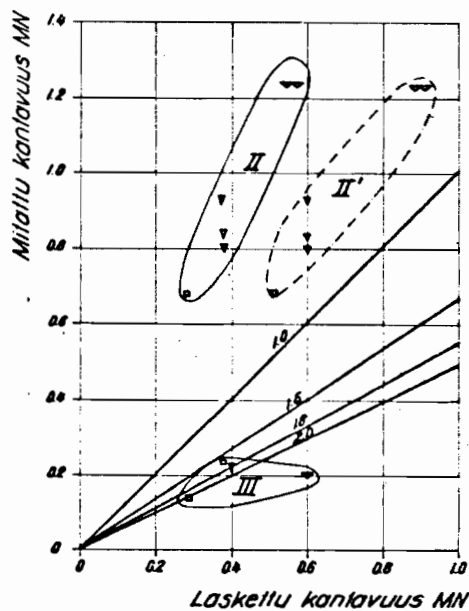
Kuva 23. Heijarikairausvastuksen perusteella lasketut paalujen kantavuudet verrattuina koekuormituksissa saatuihin.

Heijarikairaustulosten arvioitu kantavuus on yleensä ollut selvästi koekuormituksissa mitattua arvoa pienempi (kuvat 22 ja 23). Tällöin koepaikoilla II ja IV saavutettu kantavuus on ollut vähintään 50 % kairaustulosten perusteella laskettua suurempi. Paalutusten jälkeisten kairausten perusteella on koepaikalla II¹ saatu suunnilleen koekuormitustuloksia vastaavat kantavuudet. Koepaikalla I A koekuormituksissa saatu kantavuus on ollut yleensä noin 30 % laskettua suurempi. Näin ollen norjalaista paalutusohjetta käyttäen on saatu heijarikairauksen perusteella varsin varovainen arvio kitkapaalujen kantavuudelle. Koekuormitustulokset ylittävät lasketut tulokset yleensä 30 ... 50 %.

Puupaalujen osalta laskettu tulos on keskimäärin oikea. Kuitenkin paalujen pituudella on varsin huomattava vaikutus. Lyhyemmillä paaluilla koekuormitustulokset ovat alittaneet 25 %, pitemmillä ylittäneet 25 % lasketut tulokset.

4.34 Puristinkairauksen perusteella

Koepaikoilla II ja III B on suoritettu puristinkairauksia. Norjalaisen paalutusohjeen mukaan voidaan paalujen kantavuus arvi-



Kuva 24. Puristinkairausvas-
tuksen perusteella lasketut
paalujen kantavuudet verrat-
tuina koekuormituksissa saa-
tuihin.

den takia erittäin pieneksi, eikä sitä tapausta näin ollen voi-
da varsinaisesti käsitellä. Tällöin kuitenkin puristinkairauksen
perusteella laskettu kantavuus oli suunnilleen sama kuin paino-
kairauksen perusteella laskettu.

Onnistuneiden paalujen osalta on puristinkairauksen perusteella
saatu aivan liian pieni arvio kantavuudelle. Tämän vähäisen ai-
neiston perusteella näyttäisi siltä, että norjalaisissa paalutus-
ohjeissa esitettyjä kertoimia voitaisiin korottaa. Kuitenkin puris-
tinkairauksen osalta tarvittaisiin lisää tuloksia varmojen johto-
päätösten tekemiseen.

4.4 Kantavuuden arviointi paalun lyönnin perusteella

Kantavuuden arviointi paalujen lyönnin perusteella perustuu paa-
lutuskaavojen käyttöön. Paalutuskaavoja on lukuisasti. Ne lähte-
vät periaatteesta: Paalutustyö = Käytetty energia + Energiahäviö.
Paalutuskaavoihin sisältyy lukuisasti virhetekijöitä /11/:

- Paalun kokoonpuristuminen lasketaan staattisella tavalla.
- Osa energiasta kuluu maan siirtämiseen paalun sivuille.
- Kokoonpuristumisesta aiheutuva energiahäviö lasketaan Newtonin
kaavalla, joka ei sovellu paalulle ja järkäleelle.

- Oletttamus, että koko lyöntivastus vaikuttaa paalun kärjessä, on väärä.
- Paalun painuma lyötäessä riippuu lyöntinopeudesta ja iskuaallon kestosta.
- Jotkut energiahäviöt lasketaan kahteen kertaan.

Huolimatta näistä vakavista puutteista kaikki pohjoismaiset paalutusohjeet sisältävät paalutuskaavan. Paalutuskaavan voidaan kuvitella toimivan tyydyttävästi vain tarkoin rajatuissa olosuhteissa. Tällöin esim. lyöntikalusto pitää olla samanlainen, lyöntikorkeus ahtaissa rajoissa ja paalun painuma lyöntiä kohti enintään neljä kertaa suurempi kuin vastaavan tukipaalun loppulyönneillä. Tällöinkin paalutuskaavat kuvaavat paremmin dynaamista lyöntivastusta kuin kantavuutta. Tähän on käytettävissä paljon paalutuskaavoja parempi keino, nimittäin iskuaaltomittaukset, joiden avulla myöskin paalun kantavuus voidaan arvioida paalutuskaavoja paremmin. Iskuaaltomittauksia on kuitenkin toistaiseksi suoritettu melko vähän eikä tähänkään aineistoon sisältynyt onnistuneita iskuaaltomittauksia.

Norjalaisen paalutusohjeen /14/ suositttelema paalutuskaava on ns. Janbun kaava:

$$Q_u = \frac{\eta WH}{s + 1/2 \delta_e} \quad (3)$$

jossa

ηWH = paalun päähän siirretty nettoenergia

W = järkäleen paino

H = pudotuskorkeus

η = tehokerroin (0,4 ... 0,7)

s = pysyvä painuma

δ_e = jousto

Samoilla merkinnöillä ruotsalaisissa /15/ ja suomalaisissa paalutusohjeissa /16/ oleva Krügerin muunnettu paalutuskaava voidaan kirjoittaa:

$$Q_u = 0,8 \cdot \frac{k \cdot W \cdot H}{S + 1/2 \delta_e} \left(1 - 0,1 \frac{W_p}{W}\right) \quad (4)$$

jossa

k = korjauskerroin,

$k = 1,0$, jos järkäle putoaa vapaasti ja

$k = 0,8$, jos järkäle on yhden vaijerin varassa

W_p = paalun, mahdollisen apupaalun ja iskutyynyn yhteenlaskettu paino.

Paalutusohjeet esittävät, että $W \geq W_p$ betonipaaluja lyöessä. Jos $W = W_p$ ja $k = 0,8$ saadaan Krügerin kaavasta:

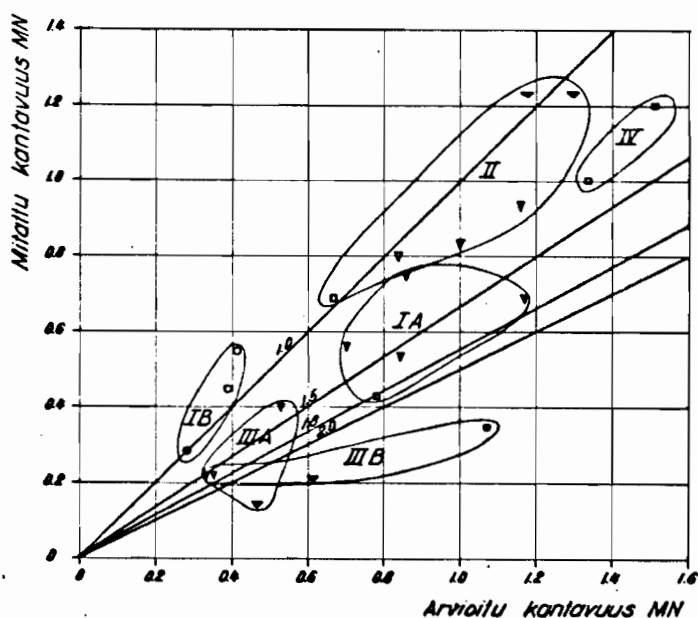
$$Q_u = 0,58 \frac{W H}{S + 1/2 \delta_e} \quad (5)$$

Tämä vastaa Janbun kaavassa keskinkertaisia lyöntiolosuhteita, jolloin

$$Q_u = 0,55 \frac{W H}{S + 1/2 \delta_e} \quad (6)$$

Näin ollen valinta näiden kaavojen välillä näyttää lähinnä maku-asialta. Molempien kaavojen yhteydessä on esitetty kaavat jouston laskemiseksi, jos sitä ei mitata. Tässä yhteydessä laskelmat on kuitenkin suoritettu mitattujen joustojen perusteella. Laskennan tulokset on esitetty taulukossa 3. Jos paalun painuma

lyöntiä kohti on ollut hyvin suuri tai lyöntikorkeus hyvin pieni ei tuloksia ole käsitelty. Arvioidut kantavuudet verrattuna koekuormituksissa mitattuihin kantavuuksiin on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Paalun lyöntityön perusteella arvioidut paalujen kantavuudet verrattuina koekuormituksissa saatuihin.

Taulukko 3. PAALUJEN KANTAVUUS PAALUTUSKAAVOJEN PERUSTEELLA

Koe- paikka	Paalu no	S	δ_e	H	W	W_p	Arvioitu kant.	Mitattu kant.	Suhde	Koe- paikka	Paalu no	S	δ_e	H	W	W_p	Arvioitu kant.	Mitattu kant.	Suhde
I A	1	0,5	0,65	60	2,1	2,8	85	53	0,63	III A	21	2,3	0,6	35	4	2,7	35	22	0,63
	2	0,65	0,46	60	2,1	2,95	78	43	0,55		22	1,2	0,6	35	4	2,9	53	26	0,49
	3	0,5	0,98	60	2,1	2,9	70	56	0,80		23	1,2	0,6	35	4	3,1	53	40	0,76
	4	0,25	0,57	60	2,1	3,1	117	69	0,59		24	1,0	0,6	5*	4	3,2		15	
	5	0,6	0,62	60	2,1	3,25	85	75	0,87		25	1,3	0,6	35	4	2,7	44	14	0,36
I B	6	6,70*	0,79	50	2,1	0,8		21		III B	26	0,15	0,6	5*	4	1,7		14	
	7	1,60	1,01	50	2,1	0,9	29	29	1,00		27	0,7	0,6	10*	4	2,1		24	
	8	3,65*	0,82	50	2,1	0,9		32			28	0,35	0,6	35	4	2,4	107	35	0,37
	9	1,30	0,50	50	2,1	1,0	39	45	1,18		29	2,0	0,6	30	4	2,1	33	27	0,67
	10	1,00	0,86	50	2,1	1,0	41	55	1,34		30	1,0	0,6	30	4	2,1	61	21	0,34
II	11	0,40	0,7	40	2,2	1,9	67	68	1,02	IV	31	0,10	0,7	30	4	3,8	151	120	0,79
	12	0,27	0,4	40	2,2	1,9	100	83	0,83		32	0,5	0,7	30	4	3,8	134	100	0,75
	13	0,36	0,4	40	2,2	1,9	84	80	0,96										
	14	0,16	0,6	40	2,2	1,9	116	93	0,81										
	15	0,15	0,5	40	2,2	1,9	118	123	1,05										
	16	0,20	0,3	40	2,2	1,9	130	123	0,95										

Betonipaalujen osalta on koepaikalla II saatu lähinnä oikea tulos. Tällöin saavutettu kantavuus on ollut rajoissa -20 % ... +5 % lasketusta kantavuudesta. Koepaikalla IV saavutettu kantavuus on ollut noin 25 % laskettua pienempi ja koepaikalla I A 15 ... 45 % laskettua pienempi. Kaikki nämä tapaukset ovat 2-varmuuskerroinrajan yläpuolella. Koepaikalla III on paalujen kantavuus em. syistä pieni. Kuitenkin tällöin on paalun lyöntin yhteydessä voitu saada viitteitä huonosta kantavuudesta. Lyöntityön avulla arvioitu kantavuus on pienempi kuin kairaus-tulosten perusteella arvioitu. Lisäksi eräät paalut ovat painuneet normaalilla lyöntikorkeudella niin paljon, että sitä on jouduttu pienentämään.

Puupaalujen osalta koepaikalla I B saavutettu kantavuus on ollut 0 ... 35 % suurempi kuin arvioitu silloin, kun paalujen painuma lyöntiä kohti on kohtuullinen.

4.5 Kantavuuden arvioiminen kantavuuskaavoilla tai -laskennoilla

Paalun kantavuus muodostuu kärkivastuksesta Q_p ja vaippahankauksesta Q_f , jolloin paalun kantavuus Q_u on teoreettisesti:

$$Q_u = Q_f + Q_p = A_f \cdot 0,5 \cdot K_o \cdot L \cdot \gamma' \cdot \tan \varnothing_a + A_p \cdot N_q \cdot \gamma' \cdot L \quad (7)$$

jossa

A_f = vaipan pinta-ala

K_o = maanpaine kerroin ($K_o = 0,5 \dots 4$)

L = paalun pituus

γ' = tehokas tilavuuspaino

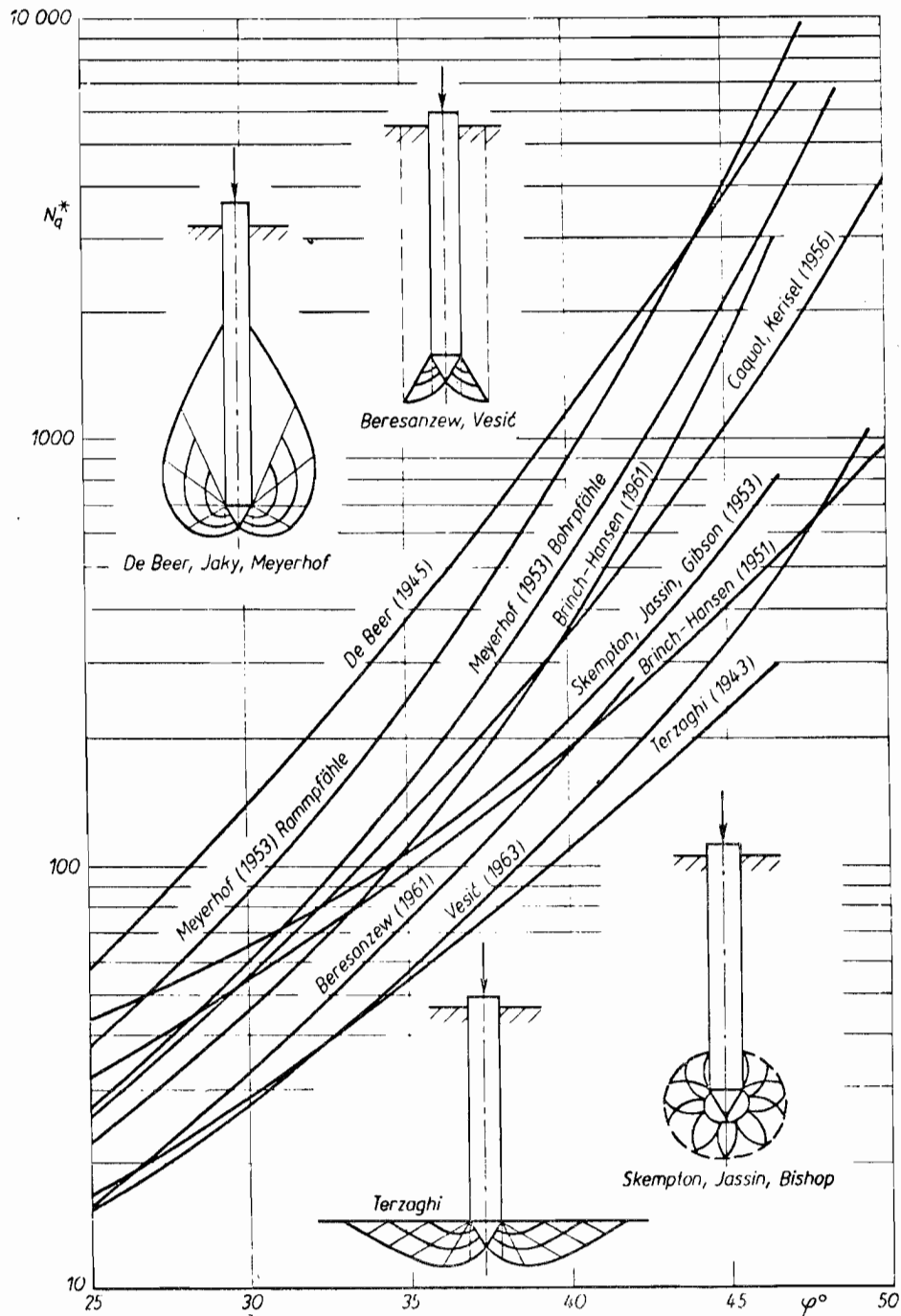
$\varnothing_a$ = vaipan kitkakulma ($0,5 \dots 0,75 \varnothing$)

A_p = paalun kärjen pinta-ala

N_q = kantavuuskaavan kerroin.

Vaippahankausta arvioitaessa suurin vaikeus on K_o arvioimisessa, joka riippuu ratkaisevasti paalutyypistä ja sen aiheuttamasta maan tiivistymisestä.

Paalun kärjen vastuksen arvioimiseksi on kehitetty kantavuuskaava anturaperustuksen kantavuuskaavasta lähtien. Olettamatta murtotilan kehittyvän tietyllä tavalla voidaan saada kantavuuskaavakerroin N_q , jos kitkakulma tunnetaan (kuva 26). Kuvaa 25 tarkasteltaessa huomataan oletettujen murtokuvioiden moninaisuus. Jos joudutaan arvaamaan murtokuvio ja kitkakulma esim.



Kuva 26. Kantavuuskaavan kertoimen N_q hajonta, kitkakulman ja eri teorioiden mukaan 10% .

rajoissa $\pm 5^\circ$ todetaan kantavuuskaavan kertoimen voivan vaihdella esim. rajoissa 30 ... 1000. Näin ollen voidaan sanoa ettei kantavuuskaavoilla ole mitään merkitystä käytännössä. Erilaisia sääntöjä on annettu N_q :n valitsemiseksi. Kuitenkin sen valinta on aina lähinnä arvaamista.

Pohjoismaiset paalutusohjeet eivät käsittele kitkapaalun kantavuuden arvioimista em. perusteella eikä sitä ole käsitelty tässäkään yhteydessä.

Lukuisasti tutkimuksia on käynnissä kitkapaalun käyttäytymisen selvittämiseksi elementtimenetelmälaskentojen avulla. Kuitenkaan ei ole toistaiseksi näköpiirissä mahdollisuuksia soveltaa elementtimenetelmää kitkapaalujen osalta käytännössä. Elementtimenetelmä on vain tehokas laskuväline, jota voidaan käyttää, kun rakenteen käyttäytyminen on selvä ja käytettävissä olevat lähtöarvot riittävän luotettavat. Käytännössä saadaan kitkapaalujen osalta helpommalla luotettavampaa tietoa koekuormituksilla kuin elementtimenetelmälaskennoilla. Sensijaan elementtimenetelmää voidaan käyttää monissa muissa geotekniikan probleemoissa.

5. TUTKIMUKSET KITKAPAALUTUSTA VARTEN

5.1 Pohjatutkimukset

Kitkapaalutusta varten soveltuvia kairausmenetelmiä ovat:

- painokairaus
- heijarikairaus ja
- puristinkairaus.

Näistä puristinkairaus muistuttaa hiukan paalun koekuormitusta, joten sen olettaisi soveltuvan parhaiten. Heijarikairaus taas muistuttaa paalun lyöntiä. Painokairaus sensijaan ei muistuta paalutusta millään tavoin. Kuitenkin tutkituista tuloksista painokairauksen perusteella lasketut olivat lähinnä oikeita. Heijarikairaus aliarvioi paalun kantavuutta ja puristinkairaus vielä enemmän. Tämä johtunee vain siitä, että painokairauksel-

la on pohjoismaissa varsin laaja käyttö. Tällöin sille annetut suositukset perustuvat laajimpaan kokemukseen. Puristinkairauksen käyttö on varsin vähäistä, jolloin suositukset perustuvat vähäiseen kokemukseen ja ne on annettu varsin varovaisesti runsaasti varmalle puolelle. Kokemuksen lisääntyessä suosituksia voidaan luonnollisesti korjata.

Suomessa on yleensä aina käytettävissä painokairauksia. Kuitenkin kitkapaalutusta varten olisi syytä suorittaa myös muita kairauksia. Jos maaperä on läheskivetöntä, puristinkairaus soveltuu hyvin. Jos maaperässä on runsaammin kiviä, heijarikairaus on parempi. Kaikkien menetelmien käyttö on tietysti teknillisesti suositeltavaa, mutta usein kustannukset tai kalustot asettavat esteen.

Kitkamaakerroksesta on syytä ottaa näytteitä tärkeimpien indeksiominaisuuksien selvittämiseksi. Tällöin voidaan arvioita verrata aikaisemmin suoritettuihin koekuormituksiin. Kitkamaakerroksesta ei saada häiriintymättömiä näytteitä. Tällöin lujuus- ja kokoonpuristuvuusominaisuuksien selvittelyllä laboratoriossa ei ole juuri merkitystä etenkin, kun ne muuttuvat paalutuksen yhteydessä.

Savikerroksen leikkauslujuus selvitetään siipikairauksilla.

Pohjavesisuhteet on selvitettävä erityisen tarkoin sen kitkamaakerroksen osalta, johon paalut tukeutuvat.

5.2 Koepaalutukset ja koekuormitukset

Yleensä on ainakin suurempien kitkapaalutusten yhteydessä syytä suorittaa ennakkoon koepaalutus ja koekuormitus. Joskus nämä joudutaan suorittamaan vasta itse työn alussa. Tämä aiheuttaa kuitenkin häiriöitä työrytmiin eikä tuloksia voida enää helposti käyttää.

Koepaalutuksen avulla voidaan laatia paalujen lyöntiohje. Koepaalutuksista tulee laatia täydellinen pöytäkirja. Jos kanta-

vuotta halutaan arvioida koepaalutuksen perusteella, on jousto mitattava viimeisen lyöntisarjan aikana. Suurempien töiden yhteydessä olisi suoritettava iskuaaltomittauksia.

Koepaalutetut paalut olisi koekuormitettava luotettavaan tulokseen pääsemiseksi ja liiallisten varmuuskertoimien välttämiseksi. Koekuormituslaitteiston kapasiteetin on oltava vähintään kaksinkertainen tavoteltuihin sallittuihin arvoihin verrattuna. Yleensä olisi pidettävä miniminä kolmen samantyyppisen ja samanlaisissa pohjasuhteissa sijaitsevan paalun koekuormittamista. Koekuormitusten ja koepaalutusten suorittamista on käsitelty lyöntipaalutusohjeissa LP0-72 /16/. Lisäksi on käytettävissä perusteelliset ruotsalaiset ohjeet /9/.

6. KITKAPAALUTUKSEN SUUNNITTELU

Kitkapaalutusta käytetään yleensä kun se on taloudellisesti edullinen tukipaalutukseen verrattuna. Tämä edellyttää yleensä että saven alapuolinen löyhä kitkamaakerros on huomattavan paksu.

Alustavissa pohjatutkimuksissa selvitetään maan kerrosrajat yleisimmin painokairauksella. Tämän jälkeen voidaan luonnossuunnittelun yhteydessä karkeasti arvioida kitkapaalutuksen kustannukset tukipaalutukseen verrattuna. Kustannuseron täytyy tietysti kattaa myös kitkapaalutuksesta aiheutuvat suuremmat tutkimus- ja suunnittelukustannukset.

Kun kitkapaalutuksen edullisuus on arvioitu, suoritetaan sen vaatimat tarvittavat tutkimukset mieluummin pääpiirustusvaiheen alussa. Näitä ovat kairaukset ja näytteenotto sekä koepaalutukset ja -kuormitukset. Pienissä töissä voidaan koepaalutukset ja -kuormitukset joskus jättää pois, jos on käytettävissä tietoja lähellä suoritetuista vastaavanlaisista töistä. Joskus koepaalutukset ja -kuormitukset joudutaan ohjelmoimaan vasta työn alkuun. Tällöin tulosten poikkeaminen kairaustulosten perusteella arvioiduista johtaa suunnitelmien muutoksiin. Pääpiirustusvaiheessa pitää pystyä määrittelemään paalutyypit,

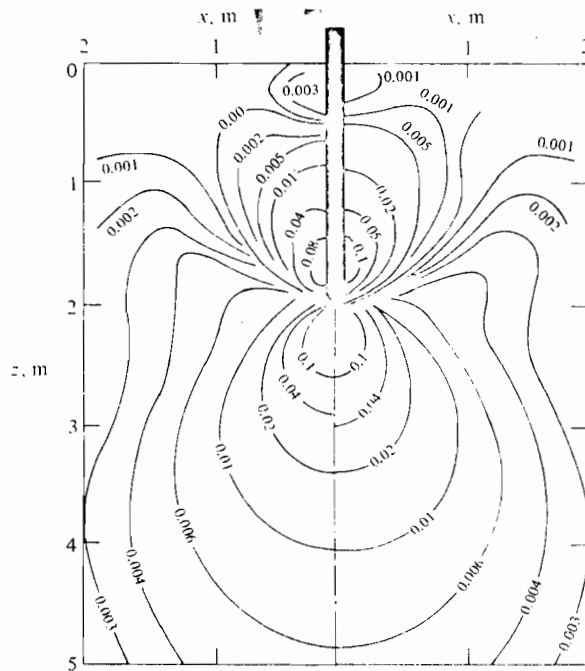
niille sallitut kuormat sekä sallituilla kuormilla syntyvät painumat. Sallittu kuorma saadaan varmuuskertoimella 2,5 kairaustulosten perusteella määritetystä murtokuormasta ja varmuuskertoimella 1,8 koekuormitusten perusteella määritetystä murtokuormasta. Luonnollisesti sallitut painumat voivat rajoittaa sallittua murtokuormaa. Myöskin on arvioitava savikerroksesta paaluille tuleva negatiivinen vaippahankaus, jos savikerros tulee painumaan. Negatiivisen vaippahankauksen osalta on otettava huomioon, että se ei vaikuta samanaikaisesti lyhytaikaisten kuormien kanssa. Lisäksi on suositeltava sopivat paaluvälit. Näiden tietojen perusteella rakennesuunnittelija voi mitoittaa perustusrakenteet.

Työpiirustusvaiheessa rakennesuunnittelun edettyä riittävän pitkälle, suoritetaan tarvittavat tarkistukset pohjarakennussuunnittelun osalta. Tällöin on mm. lopullisesti arvioitava paalujen ryhmävaikutus sekä paaluryhmien painumat. Samalla on suunnitelmaa tarvittaessa muutettava siten, että syntyvät painumat saadaan pysymään mahdollisimman tasaisina. Työpiirustusvaiheessa laaditaan pohjarakennustyöselitys. Tässä on tarkoin määriteltävä mm. paalujen lyöntiohje ja lyöntijärjestys.

Rakennustyön aikana geotekninen suunnittelija huolehtii pohjarakennustyön valvonnasta ja tarvittavista tarkkailutoimenpiteistä.

7. YHTEENVETO

- Käytäntöön soveltuvalta geoteknilliseltä laskumenetelmältä edellytetään, että siihen tarvittavat tiedot on käytettävissä riittävän aikaisin, että ne on saatavissa yleisesti käytettävillä välineillä kohtuullisin kustannuksin, että tulokset ovat riittävän luotettavia ja ettei menetelmän käyttäminen tuhlaa koko projektin aikaa. Kairaustuloksiin perustuvat menetelmät voivat parhaimmillaan täyttää nämä edellytykset.
- Kaikilla kairausmenetelmillä on saatu suuruusluokaltaan oikea tulos norjalaisen paalutusohjeen suositusten mukaan tarkasteltaessa vain onnistuneita ja ohjeiden mukaan laskettuja paaluja. Kuitenkin kaikkien kairausmenetelmien osalta tarvitaan lisää tutkimustuloksia.



Kuva 27. Pystyjännitysten ja kautuminen kitkapaalun ympäristössä /11/.

- Painokairauksen mukaisesti laskettuna on saatu lähinnä oikea tulos (kuva 27). Kuitenkaan suositus ei ulotu riittävän suureen kairausvastukseen asti, jolloin analysoinnissa on jouduttu ekstrapoloimaan.
- Heijarikairaukselle annetut suositukset aliarvioivat vaippahankausta ja kärkivastusta, sillä koekuormituksissa saadut murtokuormat ovat ylittäneet lasketut murtokuormat 30 ... 50 %. Tutkimusaineisto on kuitenkin melko vähäinen.
- Puristinkairaukselle annetut suositukset näyttäisivät aliarvioivan runsaasti vaippahankausta ja kärkivastusta, sillä koekuormituksilla saadut murtokuormat ovat ylittäneet lasketut murtokuormat noin 100 %. Tutkimusaineisto on kuitenkin erittäin vähäinen.
- Paineellinen pohjavesi kitkamaakerroksesta, johon paalut tukeutuvat, voi hävittää paalujen kantavuuden lähes täysin.
- Kiillamaisuus lisää vaippahankausta erittäin huomattavasti. Lyhyillä kiillamaisilla osilla voi vaippahankaus kasvaa jopa 4-kertaiseksi.

- Paalun pituus kitkamaakerroksessa näyttäisi vaikuttavan etenkin puupaaluilla selvästi vaippahankausta lisäävästi.
- Paaluvälin ollessa suurempi kuin 6 d ei merkittävää paaluryhmästä aiheutuvaa maan tiivistymistä ole esiintynyt.
- Vaippavastustus koheesio-osalla on selvitettävä erikseen, sillä sitä ei yleensä voida käyttää hyväksi paalun sallittua kuormaa määritettäessä. Päinvastoin tämä vaippavastus voi vaikuttaa paalukuormana (negatiivinen vaippahankaus) savikerroksen painuessa. Vaikutusta ei kuitenkaan oteta huomioon yhtäaikaisesti lyhytaikaisten kuormien kanssa.
- Paalutuskaavoilla voidaan saada kohtuullinen arvio paalun kantavuudelle vain, jos niitä käytetään erittäin tiukoilla rajoituksilla. Painuma lyöntiä kohti saa olla enintään 4 kertaa vastaavan tukipaalun painuma ja järkäleen pudotuskorkeus 0,25 ... 0,50 m. Janbun kaava ja Krügerin muunnettu kaava antavat yleensä lähes saman tuloksen.
- Murtokuorman tarkan määrittämisen kannalta monet analysoidut koekuormitukset oli jouduttu lopettamaan liian aikaisin. Norjalaisissa ja ruotsalaisissa ohjeissa suositeltu menetelmä näyttää yleensä soveltuvan, jos paalun kantavuus on hyvä.
- Teoreettisten laskumenetelmien antamat arvot liikkuvat käytännön kannalta aivan liian suurissa rajoissa. Lisäksi niitä varten tarvittavat parametrit ovat liian vaikeasti hankittavissa. Näin ollen näitä menetelmiä ei voida toistaiseksi soveltaa kitkapaalun kantavuuden määrittämiseen.

Kirjallisuutta:

1. Broms, B.: Beräkningar av vertikala pålars bärförmåga. Ingeniörsvetenskapsakademien pålkommitten. Meddelande nr 7, Stockholm 1965.
2. Fellenius, B.H.: Negative skin friction on piles in clay. A litteratur survey. Ingengiörsvetenskapsakademien pålkommissionen. Särtryck och preliminära rapporter nr 21. Stockholm 1969.
3. Fellenius, B.H.: Friktionpålars bärförmåga. Resultat av fältförsök i Kanada. Ingeniörsvetenskapsakademien pålkommissionen. Särtryck och preliminära rapporter nr 22. Stockholm 1969.
4. Fellenius, B.H.: Negative skin friction on long piles driven in clay. Ingeniörsvetenskapsakademien pålkommissionen. Meddelande nr 18. Stockholm 1971.
5. Fellenius, B.H. and Broms, B.: Negative skin friction for long piles driven in clay. Proceedings of the VII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico 1969.
6. Gregenson, O.S., Aas, G. and DiBiagio, E.: Load test on friction piles in loose sand. Proceeding of the VIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow 1973.
7. Hartikainen, J.: On the distribution of pile loads in a friction pile foundation. Acta Universitatis Ouluensis. Series C. Technica No 3, Oulu 1972.
8. Hultsjö, S., Svensson, J.: Friktionspålars bärförmåga. En studie av utförda provbelastringar. Ingeniörsvetenskapsakademien pålkommissionen. Särtryck och preliminära rapporter nr 16. Stockholm 1969.
9. Ingeniörsvetenskapsakademien pålkommissionen: Recommendation for pile driving test and routine load testing of piles. Reprints and preliminary Reports no 11. Stockholm 1970.

10. Kézdi, A.: Handbuch der Bodenmechanik. Band II. Budapest 1970.
11. Kézdi, A.: Pile foundations. Foundation engineering handbook. Van Nostrand Reinhold company.
12. Kleemola, J.: Franki-paalujen kantavuus kitkamaassa. Rakennustekniikka 1973:8.
13. Nilsson, Å. och Winqvist, T.: Studier av en friktionspålens verkningsätt. Ingeniörsvetenskapsakademien pålkommissionen. Särtryck och preliminära rapporter nr 29. Stockholm 1971.
14. Den Norske Polekomite: Veiledning ved pelefundamentering. Norges Geotekniske Institutt veiledning nr 1. Oslo 1973.
15. Statens planverk: Pålnormer. Publikation 11. Stockholm 1968.
16. Suomen geoteknillinen yhdistys: Lyöntipaalutusohjeet (LP0-72), Otaniemi 1972.
17. Svenska Byggnorm. Grundkonstruktioner. Stockholm 1975.
18. Szábo, G.: Experiments with conical piles. Institute for surveying and soil investigation. Budapest.