



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT

SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

No. 18

SÄRTRYCK OCH PRELIMINÄRA RAPPORTER

REPRINTS AND PRELIMINARY REPORTS

Supplement to the "Proceedings" and "Meddelanden" of the Institute

Pålgruppers bärförmåga

av Bengt Broms

STOCKHOLM 1967

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT

SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

No. **18**

SÄRTRYCK OCH PRELIMINÄRA RAPPORTER

REPRINTS AND PRELIMINARY REPORTS

Supplement to the "Proceedings" and "Meddelanden" of the Institute

Pålgruppers bärförmåga

av Bengt Broms

Ingår även i IVA:s Pålkommittés Meddelande Nr 13

STOCKHOLM 1967

Innehåll

	Sid.
Summary	
PÅLGRUPPERS BÄRFÖRMÅGA	
Inledning	1
1. Kohesionspålar	2
1.1. Brottlast	2
1.11. Pålgrupp bestående av parallella pålar	2
1.12. Pålgrupp bestående av godtyckligt orienterade pålar	5
1.2. Lastfördelning	8
1.3. Sättning hos en kohesionspålgrupp	9
1.31. Pålgruppssättning under belastningens påförande	9
1.32. Pålgruppssättning efter belastningens påförande	10
2. Friktionspålar	11
2.1. Brottlast	11
2.2. Lastfördelning	14
2.3. Sättning hos en friktionspålgrupp	15
3. Stödpålar	17
3.1. Brottlast	17
3.11. Rotationscentrummetoden	19
3.12. Metoden med ett elastiskt centrum	21
3.2. Sättning hos en stödpålgrupp	24
Sammanfattning	24
Referenser	26
Figurförteckning	34

SUMMARY

The ultimate strength of friction piles is generally governed by the strength properties of the surrounding soil while the ultimate strength of a pile group with point bearing piles often is governed by the ultimate strength of the pile material. The ultimate strength of a pile group in a cohesive soil is often less than the sum of the failure loads of the individual piles as determined by load tests in contrast to a pile group in a cohesionless soil where the ultimate strength is generally larger than the sum of the failure loads of the individual piles.

The settlement of a friction pile group is primarily governed by consolidation or compression of the soil below the pile group. This settlement will increase with increasing size of the pile group and can for a pile group be 10 to 15 times larger than the settlement of the corresponding single pile at the same pile load. The elastic compression of the individual piles is often small and can be neglected.

The settlements of a pile group with point bearing piles is primarily caused by the compression of the individual piles and to some extent by local compression of the soil or rock below the pile points. The settlement of a pile group is roughly equal to the settlement as determined from a load test with a single pile.

The individual piles in a pile group with friction piles do not carry the same load. The corner piles and the piles located along the edge of the pile group carry in a cohesive soil a larger share of the total applied load than the center piles in contrast to a pile group in a cohesionless soil. The load distribution of a pile group with arbitrarily oriented point bearing piles is frequently calculated by the rotation center or the elastic center methods. It is generally assumed, when these methods are used, that the piles behave as elastic hinged members. In a pile group with parallel piles it is thus assumed that the applied load will be evenly distributed between the piles if all the piles have the same area and length.

PÅLGRUPPERS BÄRFÖRMÅGA

INLEDNING

Vår kännedom om pålgruppers bärförmåga och deformation vid en viss belastning är mycket begränsad. De kunskaper man har är i huvudsak grundade på modellförsök i liten skala eller på teoretiska beräkningar, där man antar att de enskilda pålarna har vissa ideala egenskaper. Det finns för närvarande (1967) mycket få resultat från försök utförda i full skala där pålgrupper har belastats till brott eller där man uppmätt erhållna sättningar vid en viss belastning. Press (1933), Swiger (1941) och Feagin (1954) har utfört belastningsförsök i full skala på pålgrupper bestående av friktionspålar, medan Masters (1943) och Schlitt (1952) har utfört belastningsförsök på kohesionspålgrupper.

Vid dimensionering av en pålgrupp skiljer man i allmänhet mellan pålgrupper som består av ett antal svävande pålar (kohesions- eller friktionspålar) och pålgrupper bestående av stödpålar. Brottlasten hos en kohesions- eller friktionspålgrupp kan vara betydligt större eller mindre än summan av motsvarande enstaka pålars brottlast med avseende på jordbrott¹⁾, medan brottlasten hos en stödpålgrupp i regel är beroende av de enskilda pålarnas brottlast. I en stödpålgrupp påverkas i allmänhet ej de enskilda pålarnas bärförmåga av närstående pålar i motsats till de pålar som ingår i en kohesions- eller friktionspålgrupp. Då man beräknar brottlasten hos en kohesions- eller friktionspålgrupp antar man ofta att jorden uppför sig som ett idealt, helt plastiskt material med en bestämd flytgräns vid vilken pålarna tränger ned utan ökning av belastningen.

Vid en stödpålgrupp antar man däremot som regel vid beräkning av lastfördelningen vid brott att de enskilda pålarna

¹⁾ Vid jordbrott har jordens bärförmåga överskridits medan vid pålbrott pålmaterialets bärförmåga överskridits.

uppför sig som ideala, helt elastiska strävor.

I det följande görs ett försök att sammanfatta de laboratorie- och fältförsök samt de metoder som finns för närvarande att beräkna (a) en pålgrupps brottlast, (b) lastfördelningen inom en pålgrupp och (c) de sättningar som erhålls vid belastning. I kapitel 1 behandlas kohesionspålar medan friktionspålar och stödpålar behandlas i kapitel 2 resp. 3.

1. KOHESIONSPÅLAR

1.1. Brottlast

1.1.1. Pålgrupp bestående av parallella pålar

En pålgrupp består ofta av en eller flera delgrupper där de enskilda pålarna i var delgrupp är sinsemellan parallella. Brottlasten för en sådan delgrupp bestående av parallella kohesionspålar är i allmänhet mindre än summan av motsvarande enstaka pålars brottlast i de fall då pålavståndet är litet.

En enstaka påles brottlast kan härvid bestämmas ur t.ex. belastningsförsök. Peck, Hanson & Thornburn (1953) har föreslagit en metod för beräkning av brottlasten för en delpålgrupp. Enligt denna metod antas att den maximala bärförmågan av en delgrupp som består av tätt slagna pålar är ekvivalent med bärförmågan av ett massivt fundament med samma ytterdimensioner som pålgruppen. Det ekvivalenta fundamentets bottenyta antas vara belägen vid pålspetsarnas nivå och dess sidor antas sammanfalla med pålgruppens omskrivna yta, såsom visas i fig. 1. När pålavståndet är stort (större än två à tre påldiametrar), är bärförmågan hos det ekvivalenta fundamentet (då pålfundamentet betraktas som en enhet) större än summan av de enstaka pålarnas bärförmåga. I detta senare fall antas pålgruppens bärförmåga enligt Peck & al. vara lika med summan av de enstaka pålarnas bärförmåga.

Enligt "BABS 1967"¹⁾ skall avståndet mellan pålarna anpassas efter jordens beskaffenhet. Normalt bör centrumavståndet mellan parallella pålar ej vara mindre än tre gånger pålarnas kantlängd eller diameter. Pålavståndet bör således vara större än

1) Reviderad upplaga av BABS 1960. Benämningen ännu ej definitiv.

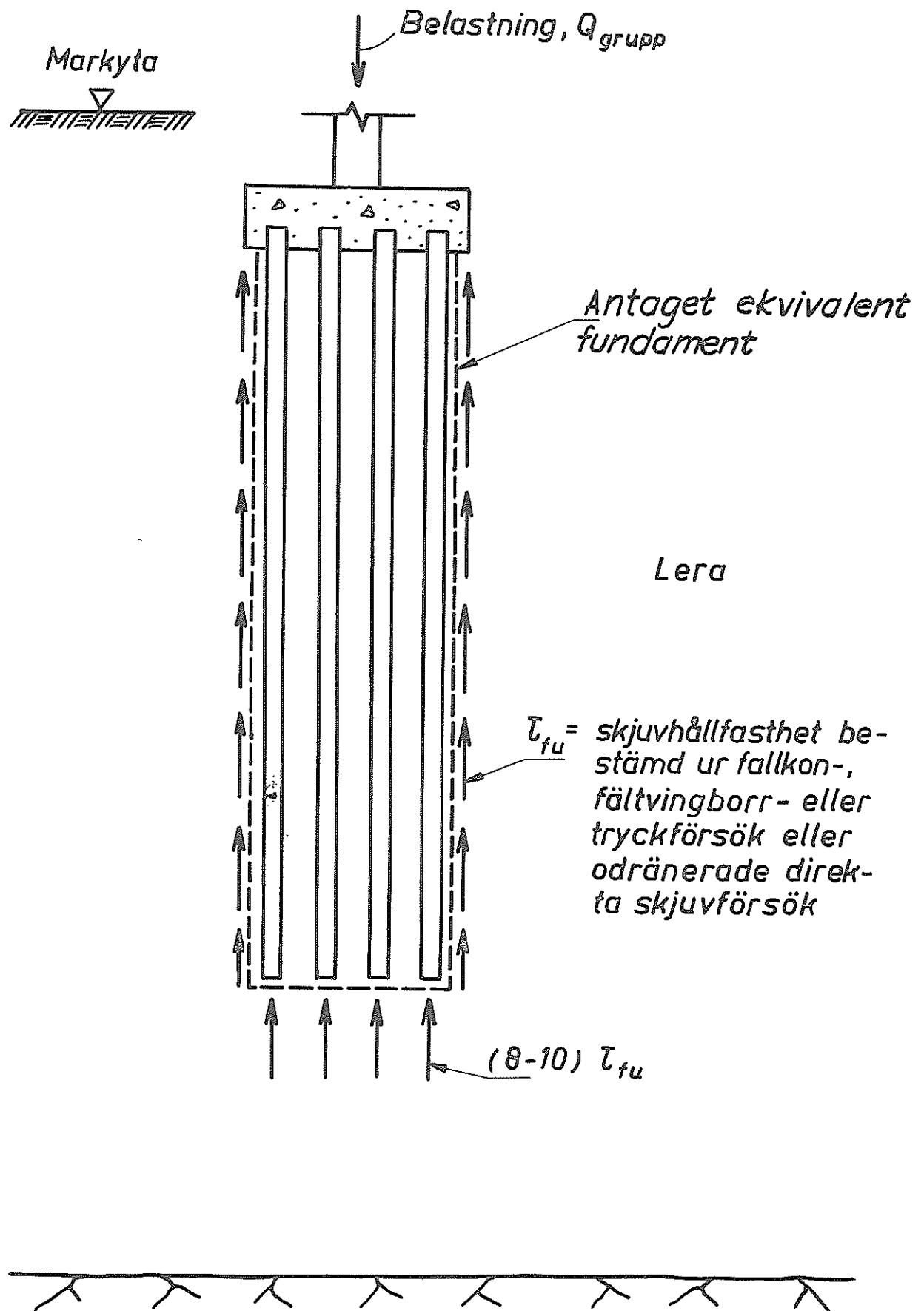


Fig. 1. BERÄKNINGSMETOD FÖR EN PÅLGRUPP BESTÅENDE AV KOHESIONS-PÅLAR.

Calculation of ultimate strength for a pile group with friction piles.

det s.k. optimala pålavståndet¹⁾. I "BABS 1967" finns dock inga andra detaljerade anvisningar om hur en pålgrupp skall vara konstruerad än att centrumavståndet vid kohesions- och friktionspålar bör bestämmas med hänsyn till skjuvspänningarna i pålgruppens omslutande mantelyta och påkänningarna i jorden under pålgruppen. Det anses således att en pålgrupp är ekvivalent med ett fundament vars bottenyta är belägen vid pålspetsarnas nivå och vars sidor sammanfaller med pålgruppens omkrets såsom redan angivits (fig. 1).

I fig. 2 och 3 visas en jämförelse mellan beräknad brottlast enligt den beräkningsmetod som föreslagits av Peck & al. (1953) och resultat från modellförsök utförda av Whitaker (1957) och av Sowers & al. (1961). Längs vertikalaxeln har avsatts pålgruppens effektivitet²⁾ och längs horisontalaxeln pålavståndet.

Man kan se ur fig. 2 och 3 att bärförmågan hos en modellpålgrupp är genomgående mindre än den man erhåller enligt Peck & al. (1953). Överensstämmelsen med den föreslagna beräkningsmetoden är dock god då pålavståndet är mindre än cirka två påldiametrar och då brott sker hos pålgruppen såsom en enhet. Däremot har modellförsök utförda av Gamal (1963) visat

1) Det optimala pålavståndet definieras som det minsta pålavstånd vid vilket man teoretiskt erhåller jordbrott hos de enskilda pålarna och den teoretiskt beräknade bärförmågan hos pålgruppen är lika med summan av de enskilda pålarnas bärförmåga. När pålavståndet är mindre än det optimala pålavståndet, tränger pålgruppen som enhet ned i jorden och den beräknade teoretiska bärförmågan blir då mindre än summan av motsvarande enskilda pålars bärförmåga.

2) I denna artikel har en pålgrupps effektivitet E definierats såsom kvoten mellan pålgruppens brottlast Q_{grupp} och summan av motsvarande enskilda pålars brottlast $Q_{\text{påle}}$ bestämd med belastningsförsök, dvs.

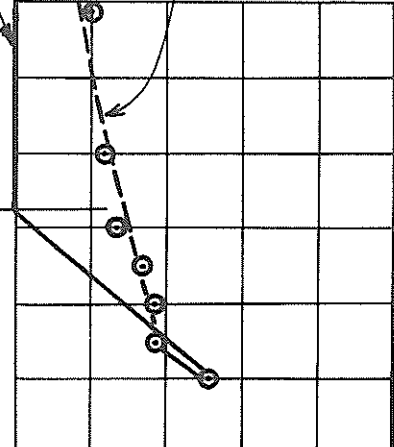
$$E = \frac{Q_{\text{grupp}}}{nQ_{\text{påle}}} \quad (1.1)$$

där n är antalet pålar i pålgruppen. De numeriska värden på effektivitetsfaktorn E som har föreslagits av olika forskare (Chellis, 1957) är emellertid grundade på ett mycket ringa antal mätresultat. Detta förhållande har påpekats av bl.a. Terzaghi & Peck (1948).

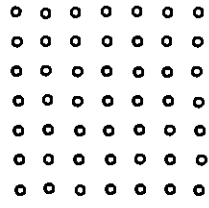
Optimalt pålavstånd

Peck, Hanson & Thornburn (1953)
($l = 24D$)

Whitaker (1957)



Pålgrupp:



Påldiameter: 3,2 mm

Pållängd: 76 eller 15

Jord: Londonlera

$\tau_{fu} = 0,4$ à $0,9 \text{ t/m}^2$

Fig. 2. BÄRFÖRMÅGA HOS EN PÅLGRUPP BESTÅENDE AV KOHESIONSPÅLAR (WHITAKER, 1957).

Ultimate strength of a pile group with friction piles (Whitaker, 1957).

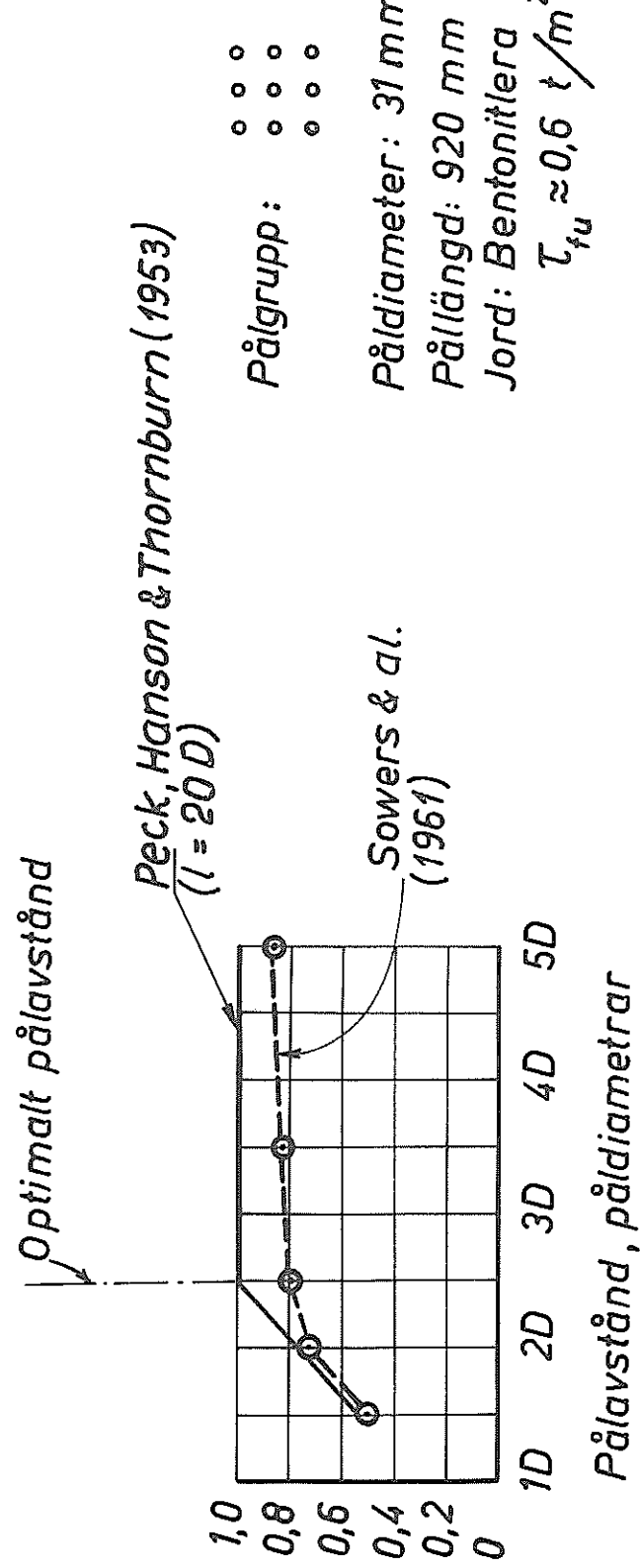


Fig. 3. BÄRFÖRMÅGA HOS EN PÅLGRUPP BESTÅENDE AV KOHESIONSPÅLAR (SOWERS & al., 1961).
Ultimate strength of a pile group with friction piles (Sowers & al., 1961).

att en pålgrupps brottlast kan vara något högre än motsvarande ekvivalenta fundaments brottlast när pålavståndet är mindre än det optimala. I fig. 2 och 3 visas även pålgruppernas teoretiskt beräknade optimala pålavstånd. För de använda påldimensionerna är det teoretiskt beräknade optimala pålavståndet omkring 2,5 påldiametrar. Enligt försöken av Whitaker (1957) och av Sowers & al. (1961) är det uppmätta optimala pålavståndet dock mindre än det teoretiskt beräknade. För pålgruppen i fig. 3 motsvarade det optimala pålavståndet 2,2 påldiametrar. Det optimala pålavståndet ökar i allmänhet med pålantalet. Vid de av Sowers & al. (1961) utförda försöken var det optimala pålavståndet i genomsnitt 0,4 påldiametrar mindre än det som erhålls ur Peck, Hanson & Thornburns beräkningsmetod. En jämförelse mellan uppmätt brottlast hos en pålgrupp vid optimalt pålavstånd och den brottlast som erhålls enligt den sistnämnda beräkningsmetoden har även utförts av Sowers & al. (1961). Försöksresultaten visar att skillnaden mellan beräknad och uppmätt brottlast minskar med ökat antal pålar i pålgruppen. I det fall då en pålgrupp bestod av mer än 8 pålar var vid optimalt pålavstånd den uppmätta brottlasten ungefär 80 % av den beräknade brottlasten (Sowers & al., 1961). Liknande resultat har erhållits av Saffery & Tate (1961). Viss försiktighet bör således iakttas vid användning av den beräkningsmetod som föreslagits av Peck & al. (1953).

Det bör omnämnas att även Kondner (1962) har utfört försök med modellpålgrupper. Vid dessa försök undersöktes effektivitetsfaktorn E :s variation med pålantal och pålavstånd. Emellertid har Peck & Davisson (1963) och Reese & Coyle (1963) ifrågasatt de generella slutsatser som dragits av Kondner ur dessa försök.

Emellertid påverkar en pålplint en pålgrupps bärförmåga då pålavståndet är större än ca två à tre påldiametrar såsom visas i fig. 4 (Whitaker, 1960). Den maximala bärförmågan kan för en sådan pålgrupp beräknas ur antagandet att pålgruppen uppträder som ett massivt fundament även om pålavståndet är så stort som fyra påldiametrar. Pålgruppens effektivitet befanns vara större än 1,0 då pålavståndet var större än 2 à 3 påldiametrar. Emellertid är det svårt att utnyttja pålplintens bärförmåga eftersom stora deformationer (sättningar) erfordras för att uppnå denna brottlast. (Pålgruppens brottdeformation motsvarar omkring 10 till 20 procent av pålplintens sida.) Pål-

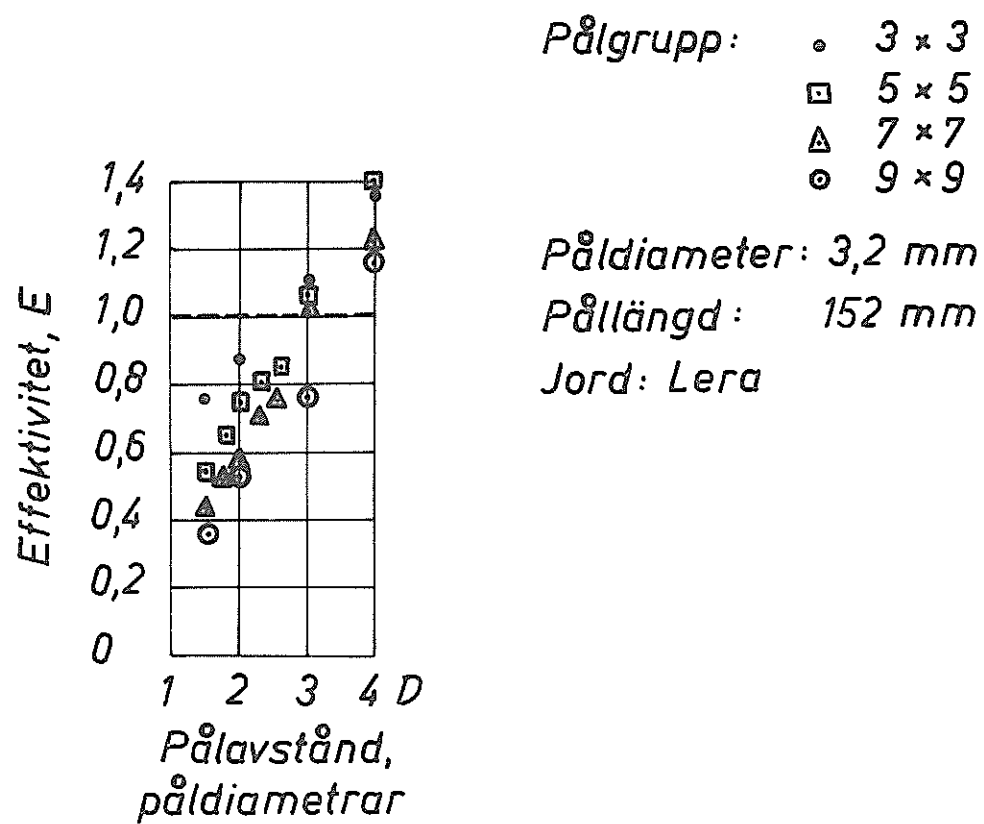


Fig. 4. PÅLPLINTS INVERKAN PÅ EN PÅLGRUPPS BÄRFÖRMÅGA (WHITAKER, 1960).

Effect of pile cap on the ultimate strength of a pile group (Whitaker, 1960).

plintens bärförmåga medräknas som regel ej vid beräkning av en pålgrupps bärförmåga.

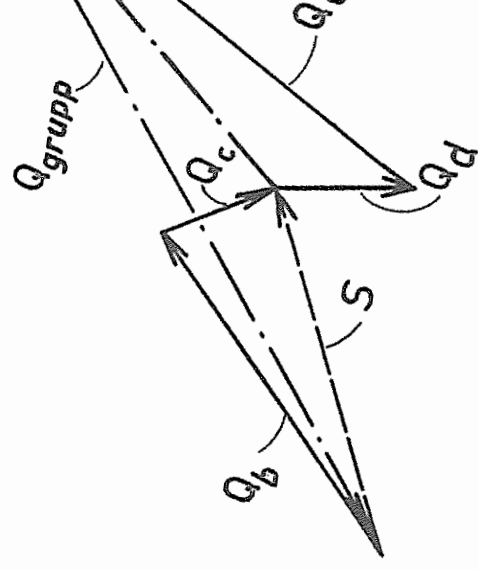
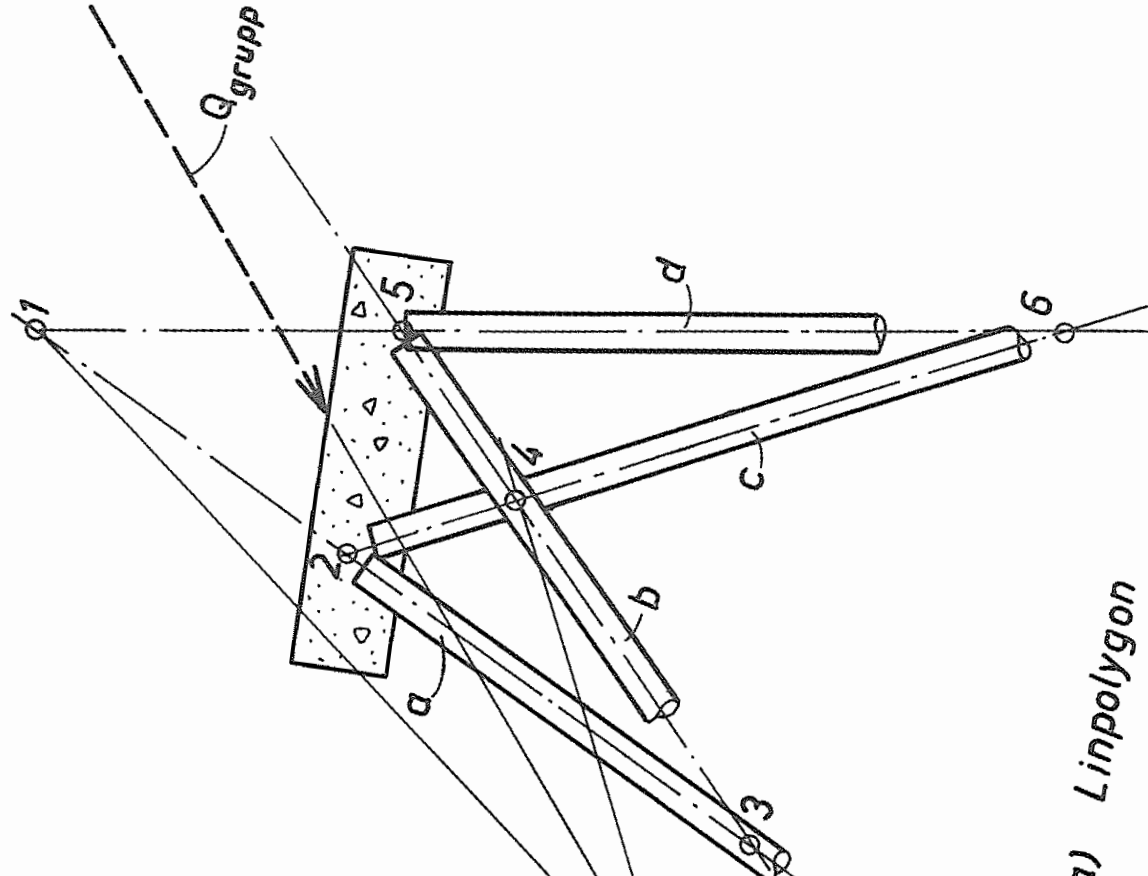
1.12. Pålgrupp bestående av godtyckligt orienterade pålar

Brott hos en pålgrupp bestående av godtyckligt orienterade pålar inträffar då samtliga pålar med undantag av två är belastade till brott och då pålgruppen antas rotera kring en punkt som är belägen i skärningspunkten mellan axlarna till dessa två återstående pålar. Vid brott är belastningen i dessa två pålar mindre än pålarnas brottlast. Det förutsätts att brott hos de enskilda pålarna sker såsom jordbrott och att pålasten är konstant när de brottbelastade pålarna rör sig i jorden.

Ett exempel på hur man kan beräkna brottlasten hos en plan pålgrupp bestående av fyra godtyckligt orienterade pålar (a, b, c och d) visas i fig. 5 a. Skärningspunkten mellan de olika pålarnas axlar är här markerade 1 - 6, och vid brott sker rotation kring en av dessa skärningspunkter. Rotationspunktens läge är beroende av den påförda yttre lastens riktning och angreppspunkt. Om t.ex. pålgruppen vid brott roterar medsols kring skärningspunkt 1, blir de pålar vars axlar är belägna till vänster om denna punkt utsatta för en dragbelastning. De pålar som är belägna till höger om denna punkt blir däremot utsatta för en tryckbelastning. Pålarna a och d (vars skärningspunkt är punkt 1) är vid brott utsatta för antingen en drag- eller tryckbelastning som är mindre än pålarnas drag- resp. tryckhållfasthet.

Vid beräkning av en pålgrupps brottlast skiljer sig beräkningsmetodiken från den som används vid beräkning av lastfördelningen inom pålgruppen. I det sistnämnda fallet känner man den påförda lastens storlek och riktning, medan denna last är okänd vid beräkning av en pålgrupps brottlast.

Pålgruppens brottlast kan beräknas grafiskt med hjälp av en kraft- och en linpolygon såsom visas i fig. 5 a och 5 b. Vid rotation kring punkt 1 är belastningarna i pålarna b och c (vilkas axlar ej går genom punkt 1) lika med dessa pålars brottlast. Belastningen Q_c i påle c motsvarar pålens dragbrottlast, medan belastningen Q_b i påle b motsvarar denna påles tryckbrottlast. Resultanten S till de två krafterna



(b) Kraftpolygon

Fig. 5. BESTÄMNING AV PÅLGRUPPS BROTTLAST.
Calculation of the ultimate strength of
a pile group.

Q_b och Q_c kan beräknas ur en kraftpolygon såsom visas i fig. 5 b. Denna resultant verkar genom punkt 4 som är skärningspunkten mellan pålarna b och c:s axlar.

Vid beräkning av pålgruppens brottlast måste man emellertid känna till den påförda lastens verkningslinje. Resultanten S som verkar genom punkt 4 och den påförda lasten Q_{grupp} skär varandra i punkt 7 såsom visas i fig. 5 a. Vid jämvikt av pålgruppen fordras dock att även resultanten U till krafterna Q_a och Q_d i påle a resp. d går genom punkt 7. Då denna resultant även måste gå igenom punkt 1 är dess riktning given och man kan beräkna pålgruppens brottlast såsom visas i fig. 5 b.

Ur kraftpolygonen i denna figur kan man även beräkna belastningen i pålarna a och d genom att dela upp kraften U i två komponenter längs pålarna a och d:s riktningar. Emellertid måste man kontrollera att belastningarna Q_a och Q_d i påle a respektive d är mindre än dessa pålars brottlast. Om emellertid de beräknade belastningarna överstiger respektive påles brottlast, är det valda rotationscentrumet (punkt 1) ej pålgruppens verkliga rotationscentrum och den beräknade brottlasten Q_{grupp} är för stor. I sådant fall måste man välja ett nytt rotationscentrum, t.ex. punkt 2. Man upprepar sedan det ovan beskrivna förfarandet för detta nya rotationscentrum. Om belastningen i de två pålar (a och c) kring vars skärningspunkt (2) fundamentet antas rotera vid brott är mindre än dessa pålars brottlast, har man valt rätt rotationscentrum.

Den ovannämnda metoden kan även användas vid beräkning av brottlasten för en excentriskt belastad pålgrupp (Meyerhof, 1960) bestående av parallella pålar såsom visas i fig. 6. Den påförda lasten antas verka längs pålarnas axlar. Emellertid har dessa pålar ett visst sidomotstånd. Detta motstånd kan dock ersättas av en imaginär horisontell påle som är belägen vid markytan om pålarnas inspänning i pålplinten försummas. Brott av den visade pålgruppen inträffar när samtliga pålar utom två har nått motsvarande pålars brottlast. Gruppen kommer då att rotera kring en punkt belägen i skärningspunkten mellan de två pålar som inte är belastade till brott. Eftersom pålgruppen är utsatt för en vertikal belastning, uppbär den imaginära horisontella pålen ej någon last. Denna påle kommer så-

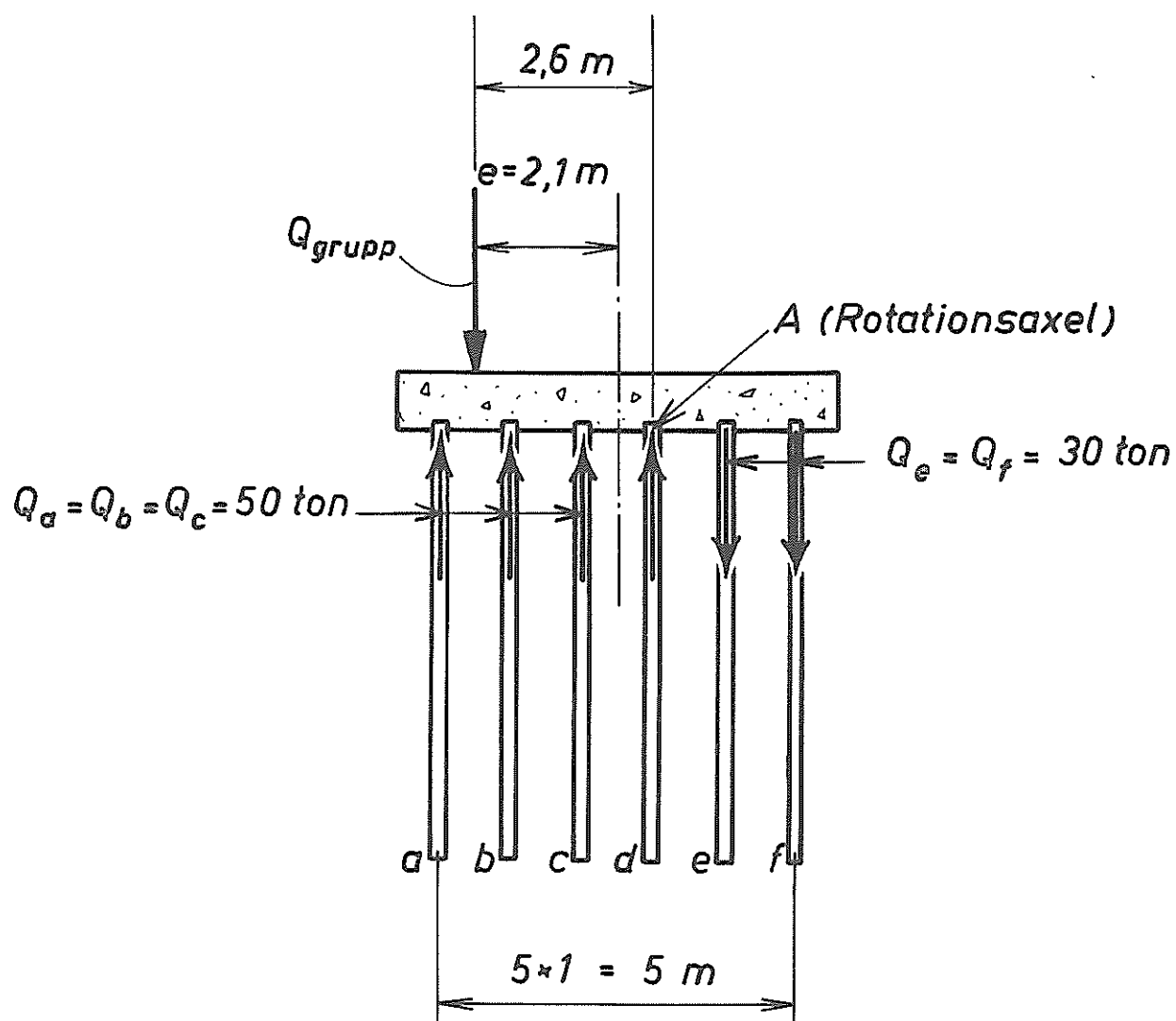


Fig. 6. BERÄKNING AV PÅLGRUPPS BROTTLAST.

Calculation of the ultimate strength of a pile group.

ledes att vara en av de två pålar som ej är belastade till brott av pålgruppen. Rotationscentrumet kommer därför att vara beläget längs denna imaginära påles axel. Om man t.ex. antar att pålgruppen vid brott roterar kring en punkt A som är belägen omedelbart till höger om pålgruppens centrumlinje, kan man beräkna pålgruppens brottlast ur en momentekvation med avseende på denna punkt. Pålarna till vänster om punkt A kommer då vid brott att vara utsatta för tryckbelastning, medan pålarna till höger om denna punkt kommer att vara dragna. Om de tryckta och dragna pålarnas brottlast är 50 ton respektive 30 ton, blir pålgruppens vridmotstånd 360 tm med avseende på den valda punkten eftersom avståndet mellan de enskilda pålarna är 1,0 m.

Den excentriska lasten antas verka på ett avstånd av 2,6 m från punkt A (2,1 m till höger om pålgruppens centrumlinje). Pålgruppens brottlast Q_{grupp} blir i detta fall 138,5 ton ($360/2,6$).

Den last som påle d bär kan sedan beräknas ur pålgruppens jämviktsvillkor. Denna last är lika med skillnaden mellan den totalt påförda lasten (pålgruppens brottlast 138,5 ton) och den last som uppbärs av de återstående pålarna (90 ton). Belastningen i påle d är således 48,5 ton. Denna last som är en tryckbelastning måste vara mindre än pålens tryckhållfasthet (50 ton) men större än pålens draghållfasthet (30 ton). Det är således relativt enkelt att beräkna en pålgrupps brottlast i det speciella fall då pålgruppen består av ett antal sinsemellan parallella pålar. Emellertid visar resultat från modellförsök (Saffery & Tate, 1961) att brottlasten för en excentriskt belastad pålgrupp är approximativt lika med motsvarande centriskt belastade pålgrupps brottlast då lastexcentriciteten är liten (mindre än $2/3$ av pålavståndet). Således är brottlasten för en excentriskt belastad pålgrupp något större än den som erhålls ur den beskrivna beräkningsmetoden.

En faktor som bör beaktas vid dimensionering av kohesionspålgrupper och stödpålgrupper då enskilda pålar skall slås genom kohesionsmaterial är de stora porövertryck som uppträder i leran vid pålslagningen. Dessa porövertryck som kan uppnå och även överskrida det totala överlagringstrycket kan vid pålning i eller intill lutande terräng förorsaka släntskred på grund av

en minskning av effektivtrycket i leran och en motsvarande minskning av lerans skjuvhållfasthet (Bjerrum, Brinch Hansen & Sevaldson, 1958; Bjerrum & Johannessen, 1960). En viss tid efter nedslagningen sker en portrycksutjämning som förorsakar en motsvarande ökning av lerlagrets skjuvhållfasthet. Denna portrycksutjämning, vilken kan beräknas enligt en metod som föreslagits av Soderberg (1962), är främst beroende av lerlagrets dimensioner, lerans permeabilitet och kompressibilitet samt av pålmaterialet. Portrycksutjämning sker relativt hastigt när trä- eller betongpålar används eftersom dessa pålar mer eller mindre fungerar som vertikaldräner. (Trä- och betongmaterialens permeabilitet är hög i jämförelse med lerans permeabilitet).

1.2. Lastfördelning

Lastfördelningen i en pålgrupp beräknas i allmänhet ur antagandet att de enskilda pålarna uppför sig som ideala, elastiska strävor när den maximala pållasten är mindre än cirka halva brottlasten. I detta fall beräknas lastfördelningen i allmänhet enligt elasticitetsläran. Då den påförda lasten närmar sig pålgruppens brottlast är emellertid pålarnas axialdeformation (förkortning eller förlängning) ej proportionell mot motsvarande pållast, och en elasticitetsteoretisk metod kan ej användas vid beräkning av lastfördelningen.

Vid låga belastningar bär de pålar som är belägna längs pålgruppens periferi en större andel av den påförda lasten än de pålar som är belägna i pålgruppens mitt. I fig. 7 visas försöksresultat från de tidigare beskrivna modellförsöken av Whitaker (1957) vid två olika pålavstånd (2 D och 4 D).

Man kan se att den last som uppbars av hörnpålarna var tre till fem gånger större än belastningen i pålgruppens mitt då den totalt påförda lasten var mindre än ca 80 % av pålgruppens brottlast. Vid brott däremot var skillnaden i belastning liten. En jämförelse mellan fig. 7 a och 7 b visar att skillnaden i belastning minskar med ökat pålavstånd. Då pålavståndet motsvarade åtta påldiametrar och modellpålgruppen bestod av nio pålar var skillnaden mycket liten. Liknande försöksresultat har även erhållits av Sowers & al. (1961).

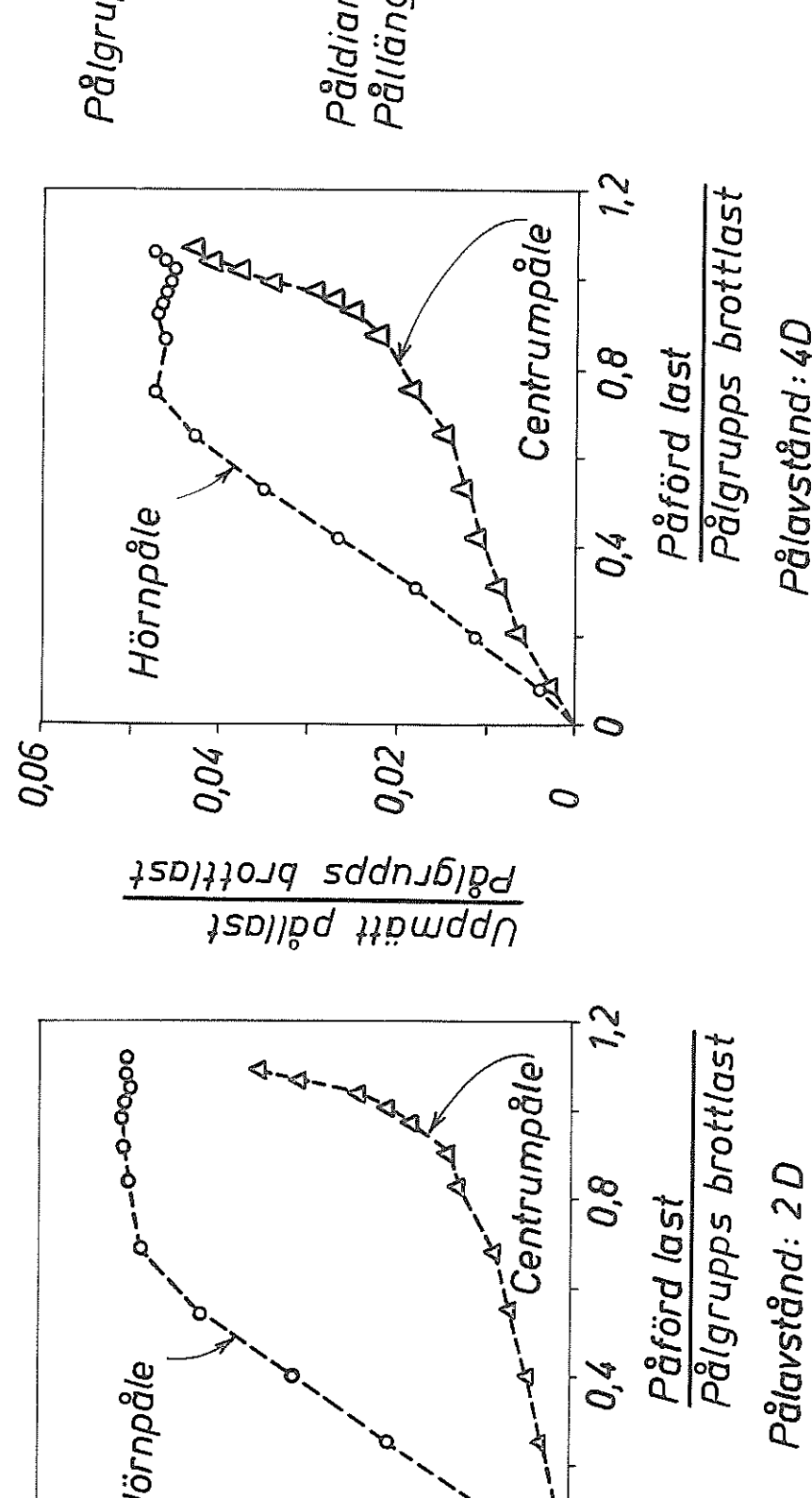


Fig. 7. LASTFÖRDELNING I EN PÅLGRUPP (WHITAKER, 1957).
Load distribution in a pile group (Whitaker, 1957).

1.3. Sättning hos en kohesionspålgrupp

För en kohesionspålgrupp blir sättningarna större än för motsvarande enstaka påle vid samma belastning per påle. I fig. 8 a visas spänningsfördelningen under en enstaka påle och i fig. 8 b spänningsfördelningen under en pålgrupp. Man kan se att vertikalspänningarna under pålgruppen är större än under den enstaka pålen på grund av överlappning av "tryckbubblorna" från de enskilda pålarna i pålgruppen.

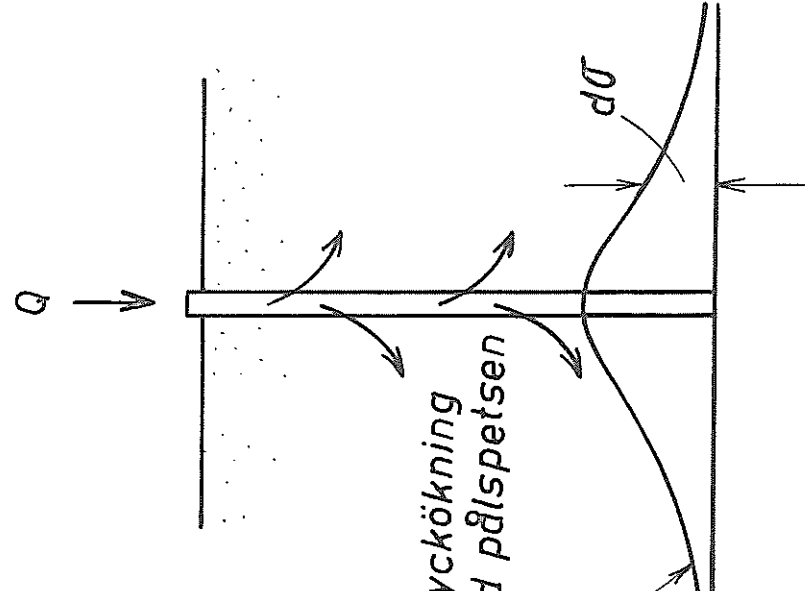
Totalsättningen hos en pålgrupp kan uppdelas i den sättning som äger rum när pålgruppen belastas och den sättning som äger rum efter belastning och som är förorsakad av poröverttrycksutjämning i jorden (primärkonsolidering) och av krypning (sekundärkonsolidering). Sättningen i samband med pålgruppens belastning är beroende av pålarnas elastiska hoptryckning och av sidoutpressning av jorden under pålgruppen utan ändring av jordens vattenhalt.

1.31. Pålgruppssättning under belastningens påförande

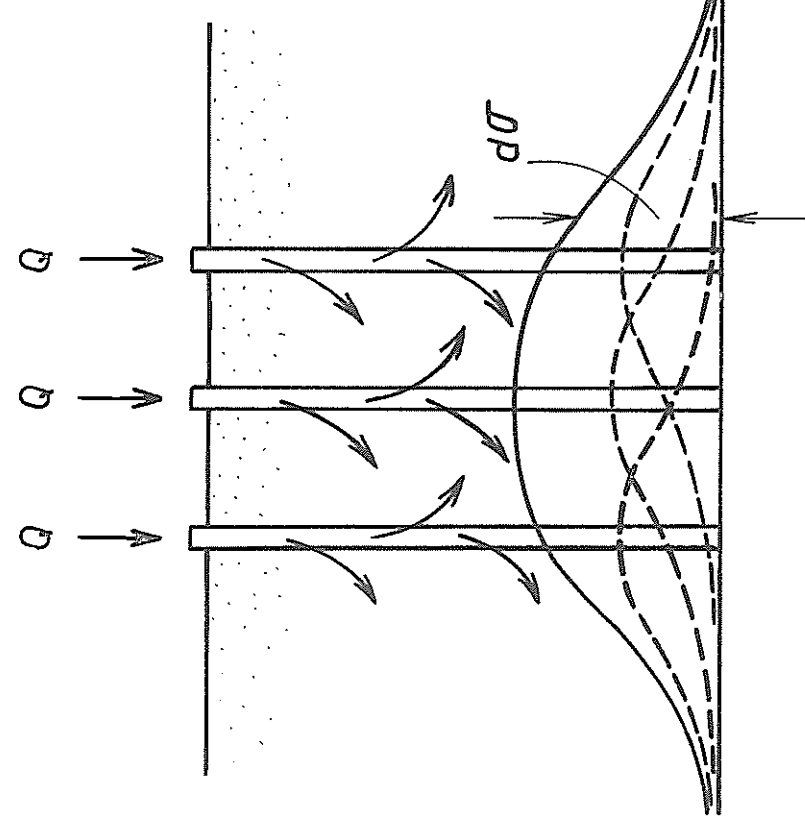
Den sättning som äger rum under belastningens påförande och som är förorsakad av de enskilda pålarnas sammantryckning och av jordens sidoutpressning antas ofta vara liten när den påförda lasten är mindre än pålgruppens halva brottlast. Denna sättning försummas i allmänhet vid en sättningsberäkning.

Whitaker (1957) har för kortvariga belastningar uppmätt den deformation (sättning) som erfordras för att erhålla brott hos en kohesionspålgrupp. Denna brottdeformation är en funktion av pålavstånd och antalet pålar i pålgruppen såsom visas i fig. 9. I denna figur har kvoten mellan pålgruppens brottdeformation och motsvarande enskilda påles brottdeformation avsatts som en funktion av pålavståndet. Vid små pålavstånd (mindre än två till tre påldiametrar), när brott av pålgruppen som enhet ägde rum, ökade pålgruppens brottdeformation med ökat pålavstånd och med ökat antal pålar i pålgruppen. Brottdeformationen var $0,1 B$ à $0,2 B$, där B är pålgruppens sida.

Då brott av pålgruppen ägde rum på grund av att de enskilda pålarnas brottlast hade överskridits, minskade pålgruppens brottdeformation med ökat pålavstånd. Detta förhållande kan förklaras av att en mycket liten deformation (några mm) erfordras för att mobilisera de enskilda pålarnas fulla mantelkohesion,



(a) Enskild påle



(b) Pålgrupp

Fig. 8. SPÄNNINGSFÖRDELNING VID EN ENSKILD PÅLE OCH EN PÅLGRUPP.

Stress distribution below a single pile and a pile group.

Brottdeformation hos pålgrupp
Brottdeformation hos enskild påle

Påldiameter: 32 mm
 Pålängd: 152 mm

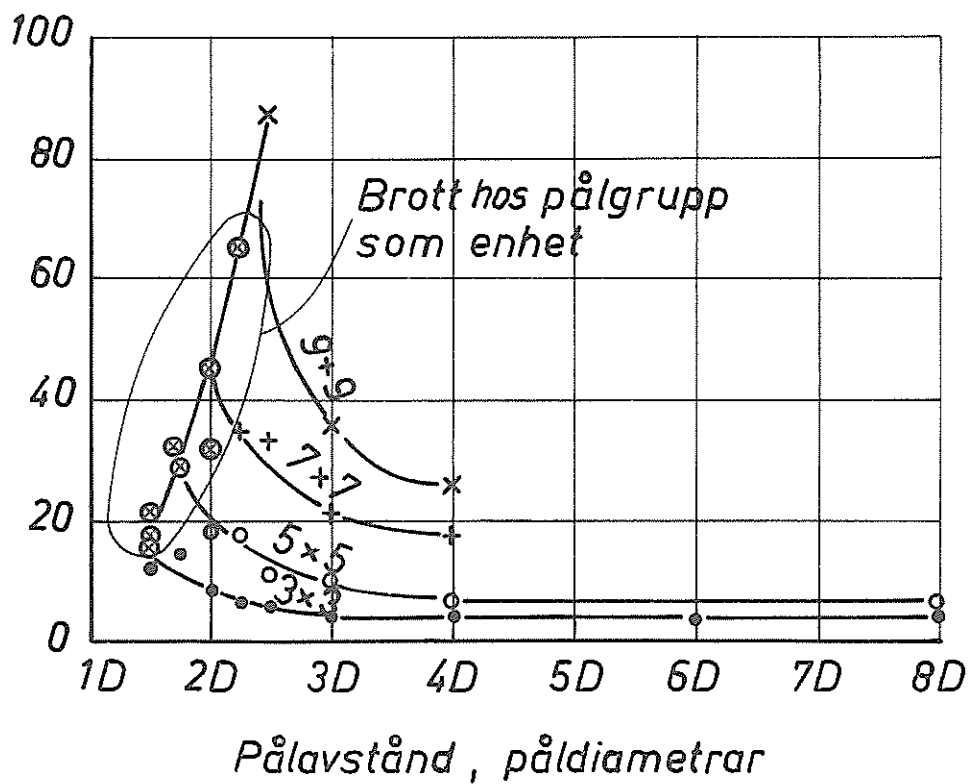


Fig. 9. SÄTTNINGAR VID BROTT HOS EN KOHESIONSPÅLGRUPP (WHITAKER, 1957).

Settlement at failure of a pile group with friction piles (Whitaker, 1957).

medan en deformation motsvarande 10 - 20 % av de enskilda pålarnas eller pålgruppens sida erfordras för att utbilda spetsmotstånd. Den sättning som erhålls vid belastning och som är förorsakad av elastiska och plastiska deformationer i jorden utan en förändring av jordens vattenhalt kan emellertid vara av stor betydelse vid små pålavstånd och tämligen höga belastningar. Sättningar är speciellt betydelsefulla när man vid beräkning av en pålgrupps brottlast tar hänsyn till pålplattans bärande förmåga (Whitaker, 1960). Dessa begränsar utnyttjandet av pålplattans bärförmåga.

1.32. Pålgruppssättning efter belastningens påförande

Även en sättning som är förorsakad av krypning i den jordmassa som är belägen alldeles intill de enskilda pålarna är i allmänhet liten när den påförda lasten är mindre än pålgruppens halva brottlast och försummas i allmänhet vid beräkningar.

Den vanligaste metoden för beräkning av en svävande kohe-sionspålgrupps primär- och sekundärsättning är att anta, såsom visas i fig. 10, att pålgruppen är ekvivalent med ett fundament med samma yttre dimensioner som pålgruppen och vars underkant är belägen vid pålgruppens nedre tredjedelspunkt (Peck & al., 1953). Denna beräkningsmetod skiljer sig således från den som användes vid beräkning av en pålgrupps brottlast (jfr. fig. 1). Man antar i allmänhet att lastfördelningen under detta ekvivalenta fundament är sextiogradig eller likvärt med den man erhåller ur den s.k. 2:1 metoden¹⁾.

Vid beräkning av sättningarna indelar man vanligen jordmassan under det ekvivalenta fundamentet i skikt och beräknar sedan hoptryckningen för varje enskilt skikt. Pålgruppens totala sättning antas sedan vara lika med summan av de enskilda

1) Vid 2:1 metoden antas att lastökningen $\Delta\sigma_z$ på avståndet z under det ekvivalenta fundamentet kan beräknas ur uttrycket

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q_{\text{grupp}}}{(b+z)(d+z)} \quad (1.2)$$

där Q_{grupp} är påförd last och b och d är det ekvivalenta fundamentets bredd resp. längd såsom framgår av fig. 10.

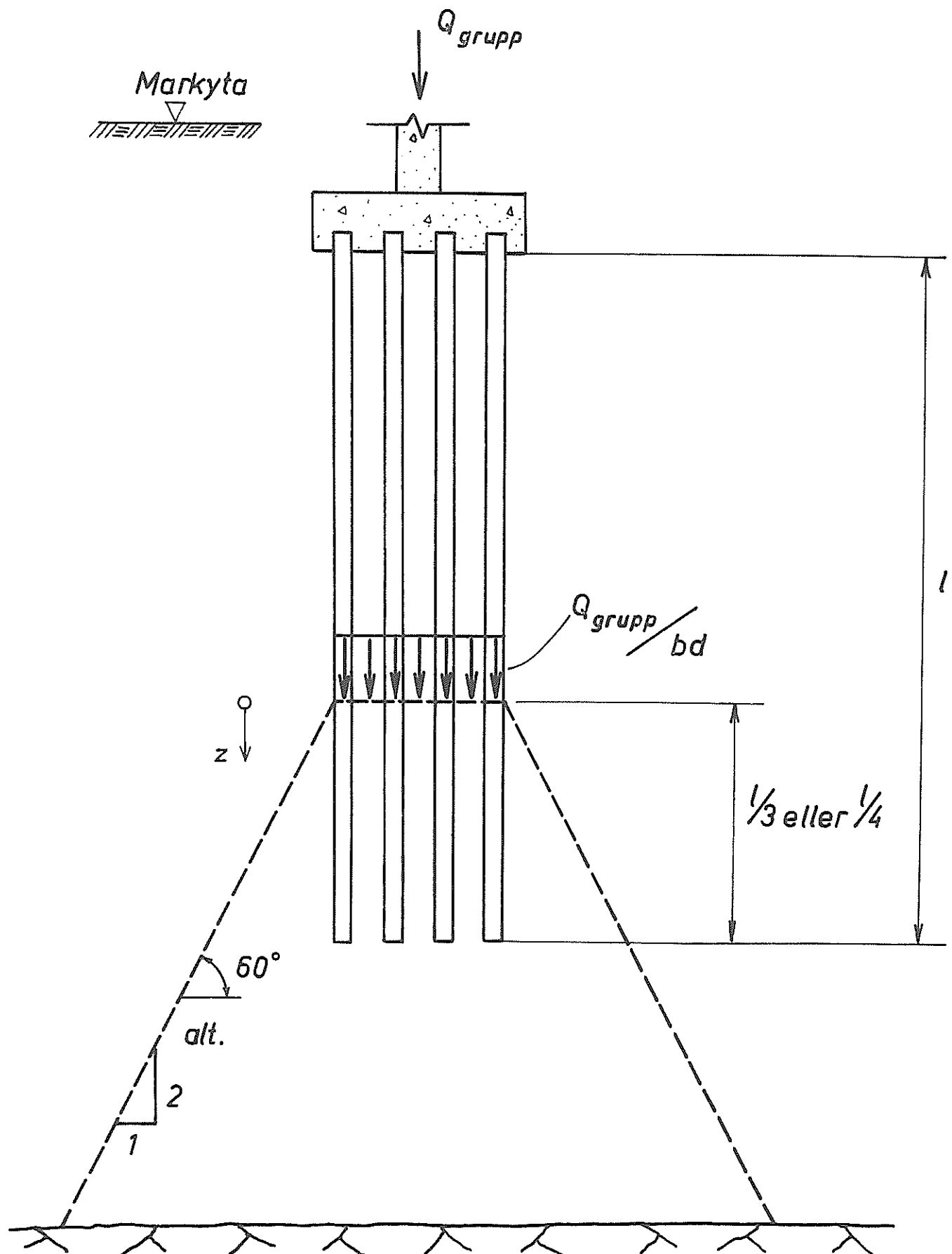


Fig. 10. BERÄKNING AV SÄTTNINGAR HOS EN PÅLGRUPP VID KOHESIONSMATERIAL.
Settlement calculations for a pile group in cohesive soils.

skiktens hoptryckning. Emellertid är denna beräkningsmetod grundad på mycket litet antal försöksresultat och metodens tillförlitlighet är därför osäker. En analys av Bjerrum, Jönson & Ostenfeld (1957) av de sättningar som ägt rum vid Aggersundsbron i Danmark har visat att de verkliga sättningarna kan vara större än de som erhålls ur ovan nämnda beräkningsmetod. Likaledes var de uppmätta sättningarna (Yu, Shu & Tong, 1965) för 14 byggnader i Shanghai större än de teoretiskt beräknade sättningarna. Emellertid erhöles god överensstämmelse då pålgrupperna betraktades som ekvivalenta med ett massivt fundament grundlagt vid pålspetsarnas nivå och då spänningsfördelningen i jorden beräknades ur Boussinesqs ekvation. Det bör dock påpekas att ett bärande lager vid pålspetsarnas nivå kan ha inverkat på mätresultaten.

I en del fall bör en viss försiktighet iakttas vid svävande pålgrundläggning i kohesionsjord. Zweck (1957) har t.ex. rapporterat att sättningarna hos en bottenplatta grundlagd på ett tjockt lerlager var mindre än sättningarna hos motsvarande flytande pålfundament. De stora sättningar som uppmäts för pålfundament i sådana fall kan möjligtvis förklaras av den omröring av en kohesionsjord som sker vid slagning av pålarna.

Vid beräkning av sättningarna hos en pålgrupp i lera bör man även ta hänsyn till den s.k. negativa mantelfriktion som uppträder då den omgivande marken sätter sig i förhållande till pålarna. Denna sättning kan förorsakas av t.ex. grundvattensänkning. Skador förorsakade av grundvattensänkning är tämligen vanliga och visar en tendens att öka i antal på grund av en allmän sänkning av grundvattenytan inom tätbebyggda områden.

2. FRIKTIONSPÅLAR

2.1. Brottlast

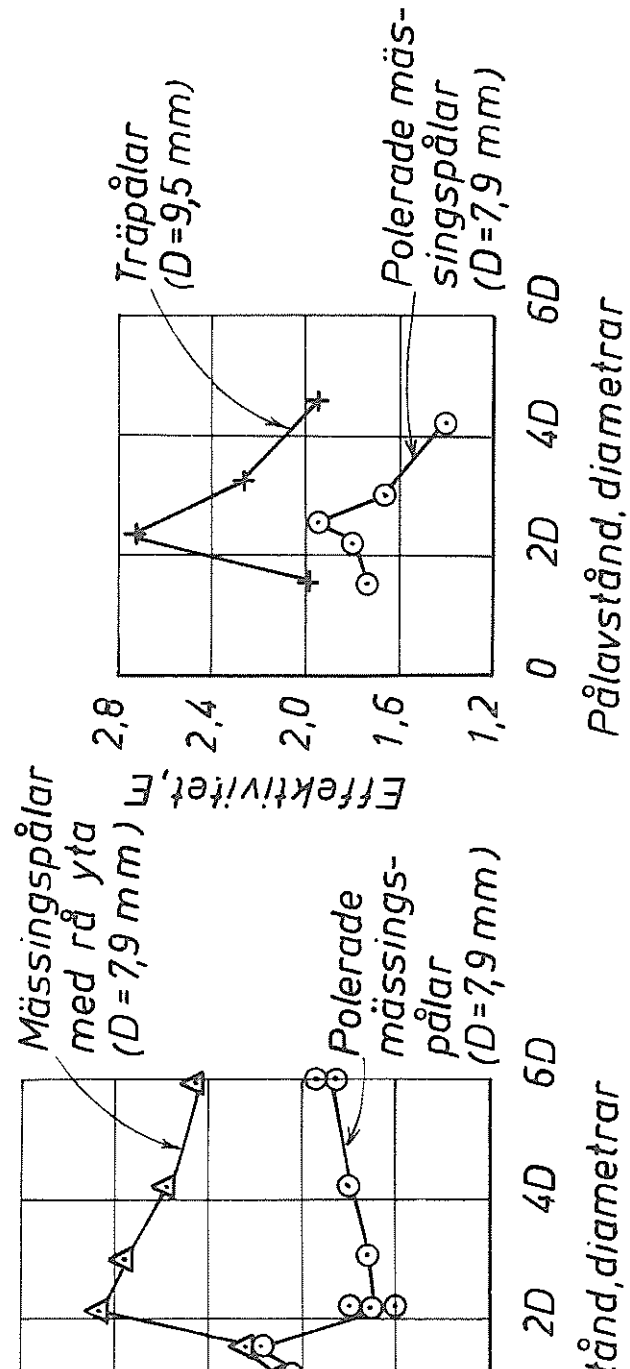
Den maximala bärförmågan för en centriskt belastad delgrupp bestående av sinsemellan parallella vertikala friktionspålar är ofta större än summan av motsvarande enstaka pålars bärförmåga. I det fall då jordens relativa lagringstäthet är liten till normal och pålarna drivs på ett avstånd som är mindre än ca sju à åtta påldiametrar förorsakar påldrivningen en ökning av sandens relativa täthet omkring närstående pålar. När lagringstätheten från början är hög sker emellertid en minskning av denna (Kishida & Meyerhof, 1965). Detta har till följd

att pålgruppens brottlast ökar med antalet pålar när jordens lagringstäthet före påslagningen är normal till låg men att en minskning av brottlasten sker då lagringstätheten är hög.

Emellertid ökar spetsmotståndet med ökat antal pålar i pålgruppen på grund av att det effektiva överlagringstrycket inom en pålgrupp är större än överlagringstrycket för motsvarande enstaka påle. Denna ökning av överlagringstrycket är förorsakad av överlappning av "tryckbubblorna" hos de enskilda pålarna såsom illustreras i fig. 8.

Mantelfriktionen för de enskilda pålarna ökar även med ökat antal drivna pålar. Denna ökning är förorsakad av den ökning av sidotrycket som äger rum i jorden med ökat antal drivna pålar. Cambefort (1953) har studerat dessa faktorer genom att belasta dels enskilda pålar i en modellpålgrupp, dels pålgruppen som enhet. Pålavståndet vid dessa modellförsök motsvarade två påldiametrar. Försöksresultaten visar att den förändring av bärförmågan som är förorsakad av en ändring av jordens packningsgrad och som ökar med ökat antal drivna pålar troligtvis är betydligt större än den som äger rum på grund av en ändring av överlagringstrycket.

Stuart, Hanna & Naylor (1960) och Hanna (1963) har även påvisat att sandens relativa täthet och pålytans råhet påverkar en pålgrupps effektivitet. Vid modellförsöken av Stuart & al. (fig. 11) användes mässingspålar och träpålar. Varje pålgrupp bestod av 15 pålar som var arrangerade i tre rader med fem pålar i varje rad. Bärförmågan hos den pålgrupp som hade drivits i tät packad sand befanns vara större än summan av motsvarande enstaka pålars bärförmåga i de fall då pålarna hade en rå yta. Däremot var bärförmågan mindre än summan av motsvarande enstaka pålars bärförmåga då pålgruppen bestod av mässingspålar med polerad yta. Den sistnämnda pålgruppens låga bärförmåga är troligtvis förorsakad av den minskning av sandens relativa täthet som äger rum under påslagning. Dessutom förutsätts att motsvarande minskning av pålgruppens bärförmåga är större än den som är förorsakad av effektiva överlagringstryckets ökning vid belastning av pålgruppen. För de pålgrupper som hade drivits i löst lagrad sand observerades en avsevärd ökning av pålgruppernas bärförmåga jämfört med motsvarande enstaka pålars bärförmåga. Pålgruppernas effektivitet var i dessa fall betyd-



lagrad sand

(b) Löst lagrad sand

Pålgrupp:
Pållängd:

Fig. 11. BÄRFÖRMÅGA HOS EN PÅLGRUPP BESTÅENDE AV FRIKTIONSPÅLAR (STUART, HANNA & NAYLOR, 1960).

Ultimate strength of a pile group with friction piles (Stuart, Hanna & Naylor, 1960).

ligt större än 1,0. Den observerade ökningen av bärförmågan jämförd med motsvarande enstaka pålars bärförmåga var större för de pålgrupper som bestod av pålar med en rå yta än för pålgrupperna med polerade pålar. Dessa försök utfördes emellertid i en behållare med tämligen små dimensioner som kan ha inverkat på försöksresultaten, vilket har påpekats av Hanna (1963). Liknande försöksresultat har även rapporterats av Beredugo (1966).

Hanna (1963) har även funnit att pålgruppens geometriska utformning har stor inverkan på bärförmågan. Brottlasten för en pålgrupp bestående av en enkel pålrad befanns vara betydligt lägre än för motsvarande pålgrupp bestående av flera pålrader.

Kezdi (1957) har utfört modellförsök med betongpålar försedda med löstagbar spets varvid spetsmotståndet uppmättes. Fyra fyrkantiga pålar drevs i en rad eller i ett rutmönster på olika inbördes avstånd. Pålgruppens effektivitet med avseende på spetsmotståndet visas i fig. 12 som en funktion av pålavståndet. Då pålavståndet var 6 D, var pålgruppens effektivitet omkring 1,0. När pålavståndet motsvarade två à tre gånger pålarnas kantlängd var pålgruppens totala spetsmotstånd omkring 1,5 gånger summan av spetsmotståndet hos motsvarande enstaka pålar.

Resultat från ytterligare försök med modellpålar av betong utförda av Kezdi (1960) visas i fig. 13. Man kan se att pålgruppens brottlast ökar med antal pålar i pålgruppen och med minskat pålavstånd i de fall då pålavståndet är större än tre påldiametrar. Vid detta pålavstånd nådde pålgruppens effektivitet ett maximum. Pålgruppens brottlast var omkring 25 % större än summan av motsvarande enstaka pålars brottlast. Då pålavståndet var sex påldiametrar, var pålgruppens effektivitet lika med 1,0, dvs. pålgruppens bärförmåga motsvarade summan av motsvarande enstaka pålars brottlast bestämd genom belastningsförsök.

Liknande försöksresultat har rapporterats av Cambefort (1953) och Schiff (1961 och 1964). Den maximala effektiviteten nåddes vid de försök som utfördes av Schiff då pålavståndet motsvarade fyra till sex påldiametrar. De försök som utförts av Stuart & al. (1960) och av Stuart & Hanna (1961) visade dock att den maximala bärförmågan uppnåddes vid ungefär tre påldiametrar.

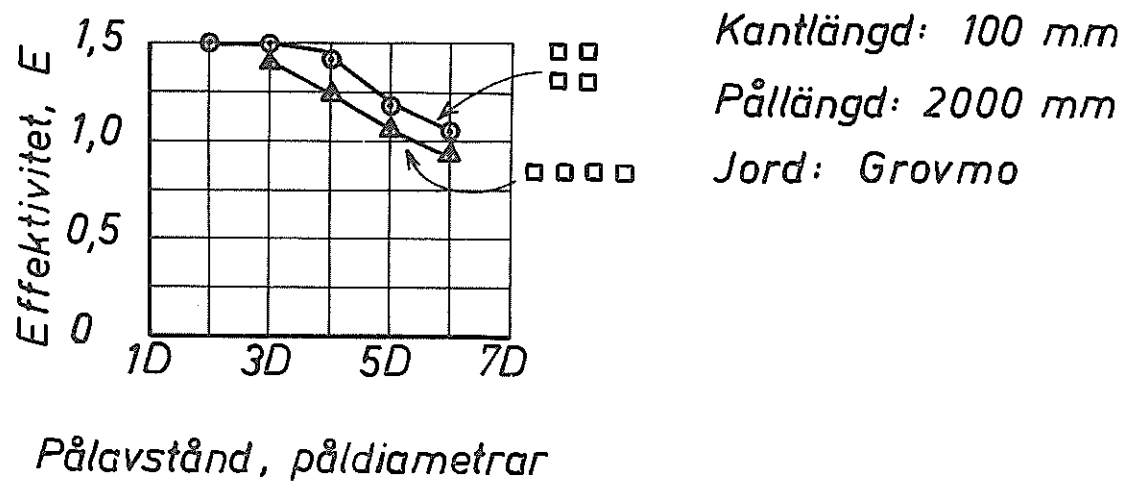


Fig. 12. BÄRFÖRMÅGA HOS EN BELASTAD PÅLGRUPP (KEZDI, 1957).

Point bearing capacity of a loaded pile group (Kezdi, 1957).

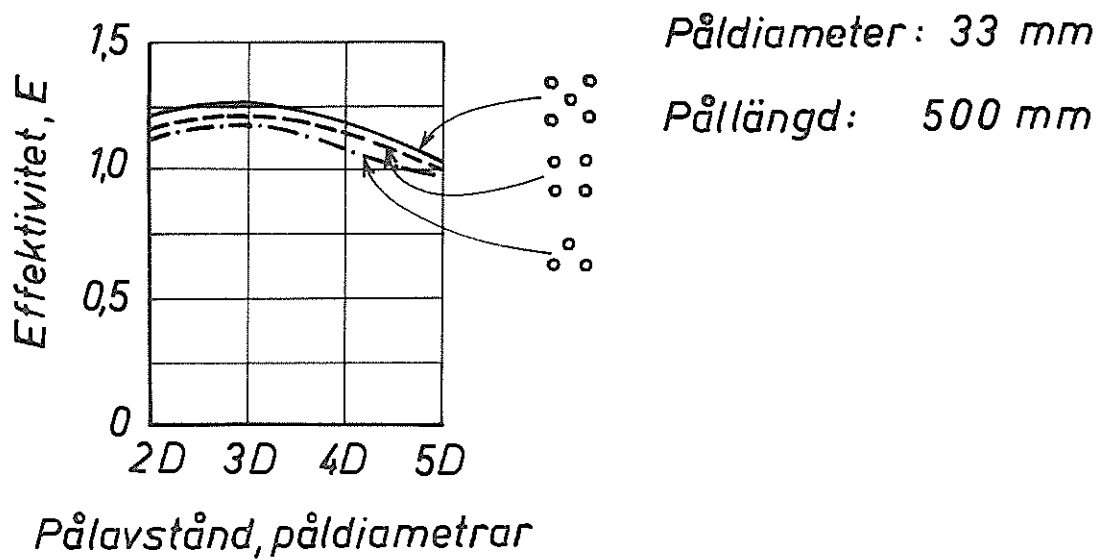


Fig. 13. BÄRFÖRMÅGA HOS EN PÅLGRUPP BESTÅENDE AV FRIKTIONSPÅLAR (KEZDI, 1960).

Ultimate strength of a pile group with friction piles (Kezdi, 1960).

Som sammanfattning kan nämnas att det för närvarande (1967) ej heller för friktionsmaterial finns någon beprövad metod för att säkert beräkna en centriskt belastad pålgrupps brottlast. Modellförsöken har emellertid visat att en pålgrupps brottlast kan vara mindre än summan av motsvarande enstaka pålars brottlast i det fall då de enskilda pålarna i pålgruppen har slagits i en friktionsjordart med hög relativ lagringstäthet.

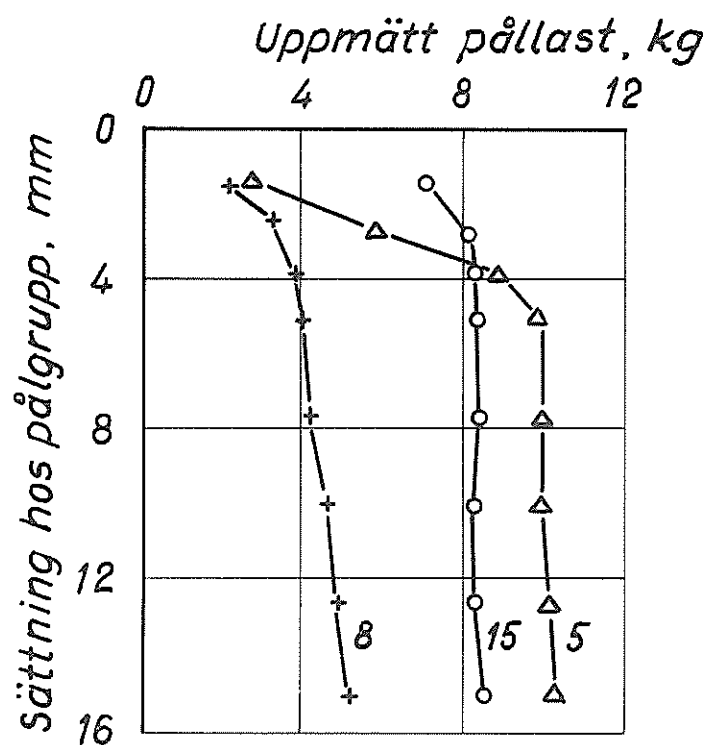
En excentriskt belastad friktionspålgrupps brottlast beräknas i allmänhet enligt samma metod som används vid kohe-sionspålar. Emellertid har modellförsök utförda av Meyerhof (1963) och av Kishida & Meyerhof (1965) visat att brottlasten för en excentriskt belastad friktionspålgrupp kan vara betydligt större än den ovan beräknade brottlasten när hänsyn ej tas till jordens sidomotstånd. Försöksresultaten visar att en excentriskt belastad pålgrupps brottlast ej påverkas nämnvärt av lastexcentriciteten så länge som excentriciteten är mindre än pålgruppens halva bredd.

Brottlasten för en dragen pålgrupp är troligtvis mindre än summan av motsvarande enstaka pålars brottlast beroende på att det effektiva överlagringstrycket intill en enskild påle i en pålgrupp påverkas av närstående pålar. Försöksresultat saknas emellertid.

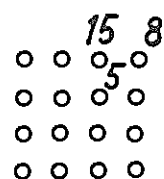
Sidobelastade vertikala pålgrupper har studerats av bl.a. Prakash (1962) och California Division of Highways (1958). Försöksresultat visar att en pålgrupps sidomotstånd är mindre än summan av de enstaka pålarnas sidomotstånd (Broms, 1964a).

2.2. Lastfördelning

Stuart & al. (1960) och Beredugo (1966) har uppmätt lastfördelningen i en friktionspålgrupp. Mätningarna visar att de pålar som drivits ned i pålgruppens mitt bär en större andel av den totalt påförda lasten än de pålar som är belägna längs pålgruppens periferi. Emellertid är lastfördelningen till stor del beroende av den ordning i vilken pålarna är drivna (Beredugo). Detta förhållande förorsakas av att slagningsmotståndet ökar med antalet pålar. I allmänhet bär de sist slagna pålarna en större andel av den påförda lasten än som motsvarar pålarnas läge i pålgruppen. Denna inverkan är stor vid låg belastning men utjämnas när pålgruppen utsätts för upprepade av- och på-



Pålgrupp:



Påldiameter: 9,5 mm

Pållängd:

Pålavstånd: 28,6 mm

Jord: Löst packad grovmo
($\phi = 31,5^\circ$)

Fig. 14. LASTFÖRDELNINGEN I EN FRIKTIONSPÅLGRUPP
(BEREDUGO, 1966).

Load distribution in a friction pile group
(Beredugo, 1966).

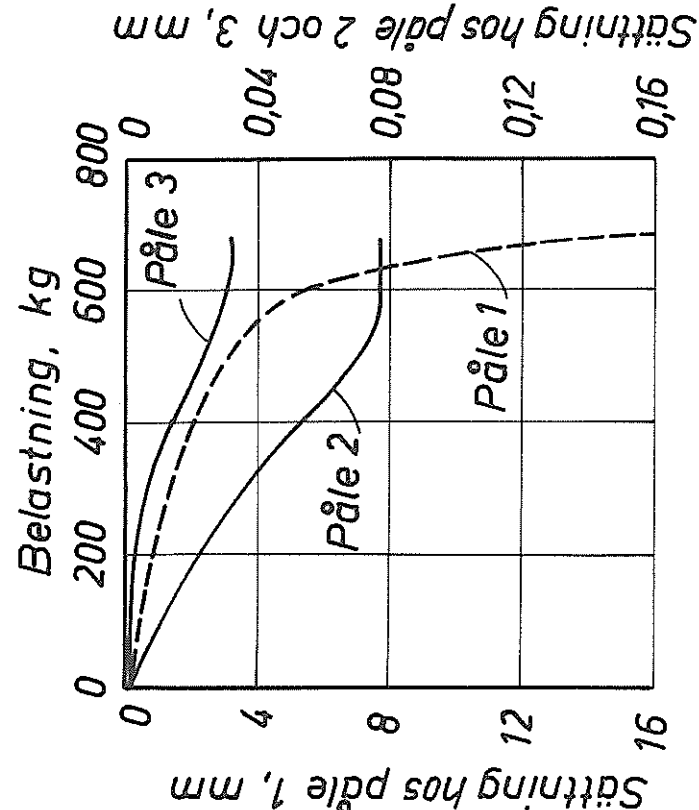
lastningar. En utjämning sker även med ökad belastning. I fig. 14 visas lastfördelningen i en 4 x 4 modellpålgrupp enl. Beredugo (1966). Vid brott var den last som uppbars av påle (5) ungefär dubbelt så stor som lasten i motsvarande hörnpåle (8). Denna lastfördelning skiljer sig från den fördelning som erhålls i en pålgrupp bestående av kohesionspålar. Liknande resultat har rapporterats av Stuart & al. (1960).

2.3. Sättning hos en friktionspålgrupp

Den sättning som äger rum vid belastningens påförande är i allmänhet betydligt större än den tidsberoende sättning som äger rum efter belastningens påförande och som är förorsakad av krypning i den underliggande jorden. Denna tidsberoende sättning antas i allmänhet vara liten och kan försummas vid beräkning av en friktionspålgrupps sättning i motsats till vad som är fallet vid en kohesionspålgrupp.

En friktionspålgrupps deformation är sammansatt av a) de enskilda pålarnas elastiska hoptryckning och b) jordens hoptryckning kring och under pålgruppen. Pålarnas elastiska hoptryckning är beroende av lastfördelningen i pålgruppen, de enskilda pålarnas längd och genomsnittsarea samt pålmaterialets elasticitetsmodul. Jordens hoptryckning är i sin tur beroende av jordens relativa packningsgrad efter slagningen samt spänningsökningen i jorden vid belastningens påförande.

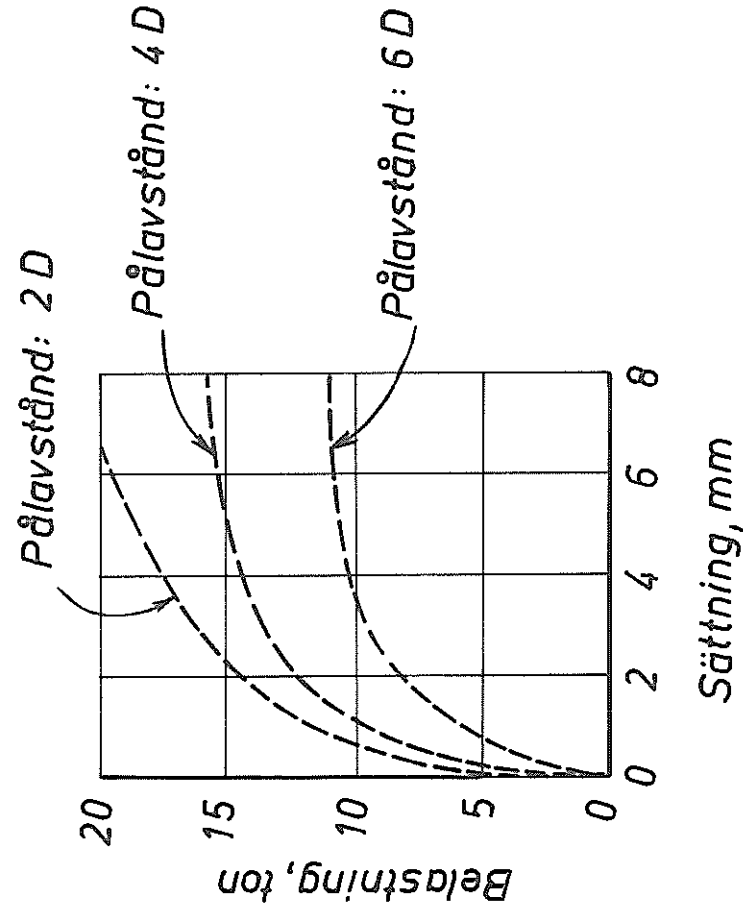
Belastning av respektive påle påverkar emellertid närstående pålar. Denna inverkan är emellertid ofta liten för en friktionspålgrupp i jämförelse med en kohesionspålgrupp. Kezdi (1960) har undersökt denna inverkan med hjälp av modellpålar med 33 mm diameter och 500 mm längd. Dessa pålar drevs ned i packad sand på ett inbördes avstånd som motsvarade fyra påldiametrar såsom visas i fig. 15. Vid belastning av påle (1) erhöles sättningar hos de närstående obelastade pålarna (2) och (3). Sättningarna hos dessa ökade med ökad belastning till dess att brott av den belastade pålen inträffade vid 550 kg påförd last. Försöken visar att den påförda lasten överförs till den omgivande jorden huvudsakligen genom mantelfriktion vid låga belastningar och att motsvarande "tryckbubbla" påverkar närstående pålar. Vid ökad belastning ökar spetsmot-



Pålgrupp: 3° 4° 5°
 1° 2° 3° 4° 5°
 Belastad påle

Påldiameter: 33 mm
 Pålängd: 500 mm
 Jord: Packad sand

Fig. 15. SÄTTNING HOS EN PÅLGRUPP (KEZDI, 1960).
 Settlement of a pile group (Kezdi, 1960).



Pålgrupp: 
 Kantlängd: 100 mm
 Pål­längd: 2000 mm
 Jord: Grovmo

Fig. 16. PÅLGRUPPS SÄTTNING VID FRIKTIONSMATERIAL (KEZDI, 1957).
 Settlement of pile groups in cohesionless soils
 (Kezdi, 1957).

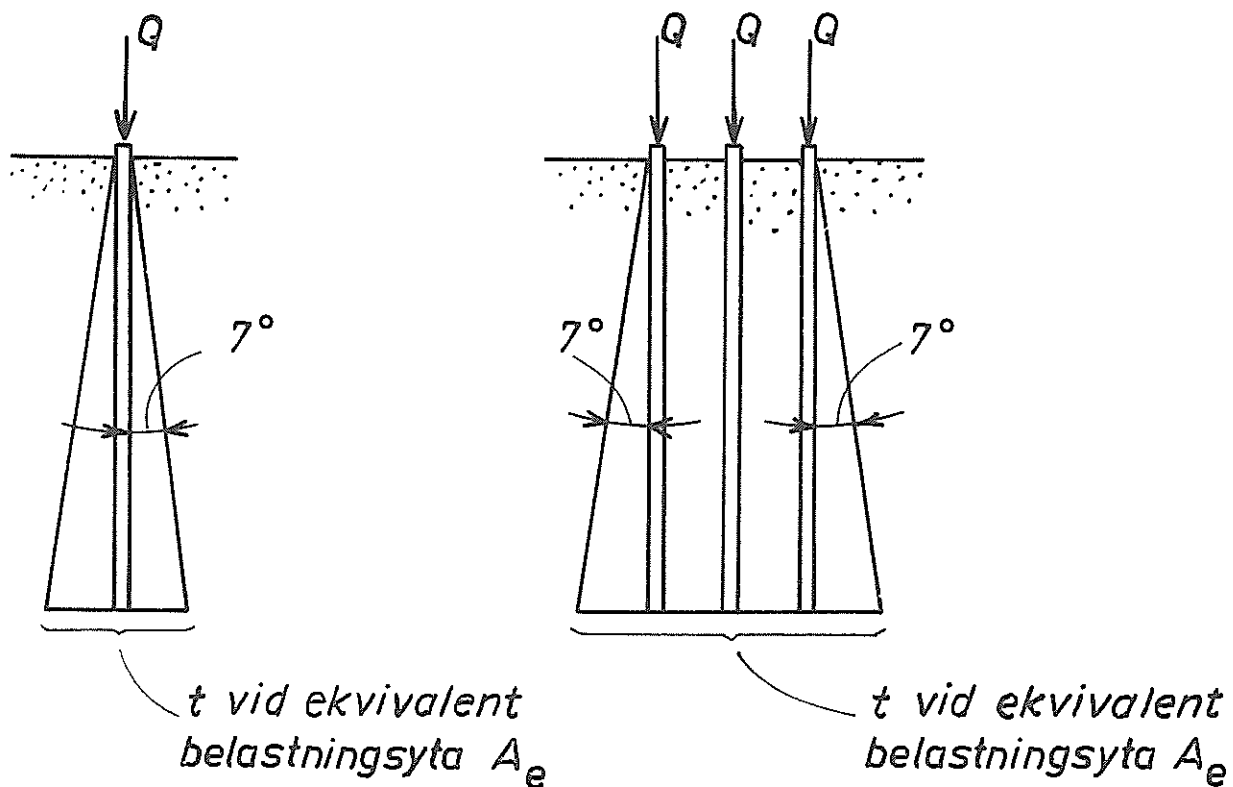
ståndet och motsvarande "tryckbubbla" förskjuts nedåt. Denna förskjutna "tryckbubbla" har relativt sett liten inverkan på närstående pålar. I fig. 16 visas ytterligare resultat från belastningsförsök med modellpålgrupper vid olika pålavstånd (Kezdi, 1957). Resultaten visar att sättningarna minskar avsevärt med minskat pålavstånd. Denna minskning kan delvis förklaras av att jordens packningsgrad inom pålgruppen ökar under själva påslagningen med minskat pålavstånd.

Även Stuart & al. (1960) har visat att sättningarna hos en pålgrupp påverkas av pålavståndet (fig. 17). I denna figur redovisas resultaten från försök med modellpålar i packad sand. Man kan se att sättningarna ökar med ökat pålavstånd men att de når ett maximivärde vid ett pålavstånd som motsvarar 2,5 till 3 påldiametrar. Sättningarna hos pålgruppen i relation till motsvarande enstaka påles sättning ökar med ökad belastning (med minskad brottsäkerhetsfaktor F). När säkerhetsfaktorn var lika med 1,5 (dvs. då den påförda lasten var 66 % av brottlasten), var pålgruppens sättning ungefär sex gånger så stor som motsvarande enstaka påles sättning vid samma relativa belastning.

Resultat från belastningsförsök med pålar slagna i packad grovmo (Berezantzev, Khristoforov & Golubkov, 1961) har visat att sättningarna ökar linjärt med sidan t av en ekvivalent belastningsyta med arean A_e som är belägen vid pålspetsarnas nivå och att sättningarna ej påverkas av antalet pålar i pålgruppen. Den ekvivalenta belastningsytan, vid spridningsvinkeln 7° visas i fig. 18. Denna metod används allmänt i t.ex. Polen för att beräkna sättningarna hos friktionspålgrupper.

En analys av tillgängliga försöksdata utförd av Skempton, Yassin & Gibson (1953) visar att sättningarna hos en friktionspålgrupp ökar med pålgruppens storlek. I fig. 19 visas härvid förhållandet mellan sättningarna för en pålgrupp och motsvarande sättning av en enstaka påle vid samma pållast. Man kan här se att pålgruppens sättning ökade med ökad storlek hos pålgruppen. Då pålgruppens sida (avståndet mellan ytterpålarna) var t.ex. 20 m, erhöles en sättning som var omkring 12 gånger större än motsvarande enstaka påles sättning.

En ytterligare beräkningsmetod har föreslagits av Terzaghi & Peck (1948). Enligt denna metod kan man beräkna sättningen för en friktionspålgrupp genom att anta att dessa sättningar



(a) *Enskild påle*

(b) *Pålgrupp*

Fig. 18. BERÄKNING AV EN PÅLGRUPPS SÄTTNINGAR VID FRIKTIONSMATERIAL.

Settlement calculations for a pile group in cohesionless soils.

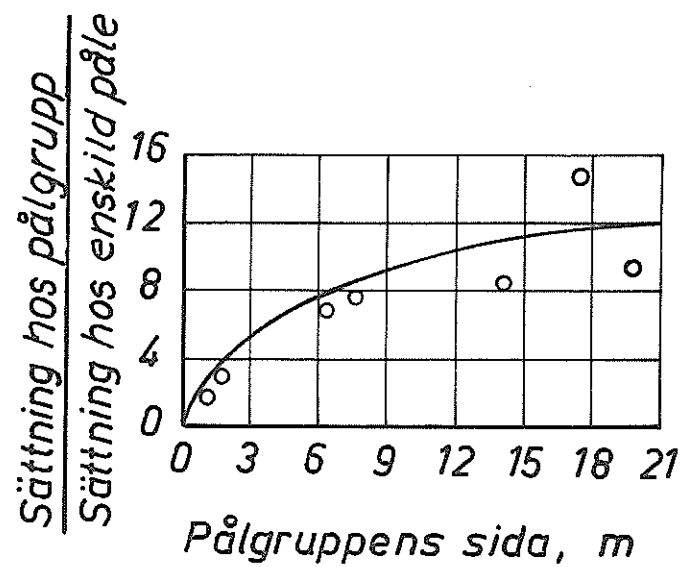


Fig. 19. SÄTTNING HOS EN PÅLGRUPP VID FRIKTIONS-
MATERIAL (SKEMPTON, 1953).
Settlement of pile group in cohesionless
soils (Skempton, 1953).

är lika med sättningen för ett plattfundament grundlagt på väl packad sand och vars ytterdimensioner sammanfaller med pålgruppens ytterdimensioner. Vidare antas att detta plattfundament är belastat på samma sätt som pålfundamentet.

3. STÖDPÅLAR

3.1. Brottlast

Man beräknar vanligtvis en stödpålgrupps brottlast (bärförmåga) genom att först med hjälp av elasticitets- eller plasticitetsteorier beräkna lastfördelningen i pålgruppen och sedan sätta lasten i den högst belastade pålen lika med denna påles brottlast. Vid denna beräkningsmetod görs antagandet att bärförmågan hos en stödpålgrupp är främst beroende av de enskilda pålarnas bärförmåga med avseende på jord- eller pålbrott. Brott hos pålgruppen antas således inträffa då lasten i den hårdast belastade pålen har nått pålsektionens brottlast och krossning av pålmaterialet äger rum eller då den omgivande jordens bärförmåga har överskridits och pålen rör sig i jorden. Det förutsätts i det första fallet att de underliggande jordlagrens bärförmåga är tillräcklig för att uppbära de påförda pållasterna. I det sistnämnda fallet förutsätts däremot att pålsektionens bärförmåga är större än de underliggande jordlagrens bärförmåga.

En pålgrupp är ofta utsatt för både axiala och laterala laster samt stjälpande moment.

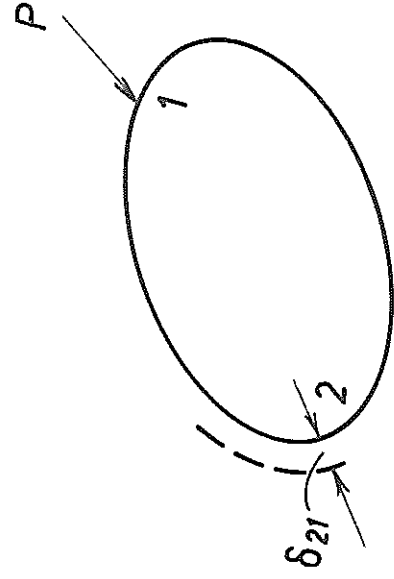
Fördelningen av en sådan belastning hos de enskilda pålarna i en pålgrupp är emellertid beroende av de enskilda pålarnas deformationsegenskaper, pålgruppens geometriska utformning och av den omgivande jordens hållfasthets- och deformationsegenskaper. När man beräknar lastfördelningen enligt en elasticitetsmetod, antar man i allmänhet att de enskilda pålarna uppför sig som ledade, ideala, elastiska strävor som endast kan uppta drag- eller tryckkrafter i pålarnas längdriktning och att den jord som omger pålarna ej bidrar till pålarnas bärförmåga. (Det finns dock beräkningsmetoder som tar hänsyn till den omgivande jordens bärförmåga genom att ersätta denna jordmassa med en eller flera ekvivalenta pålar med samma deformationsegenskaper som jorden). Dessutom antas i allmänhet att pålplinten är styv.

Gullander (1902) var bland de första som studerade lastfördelningen i en stödpålgrupp bestående av ett antal sinsemellan parallella pålar. Fellenius (1910), Gullander (1911, 1912), Ekwall (1911) och Hultin (1911) utvecklade vidare denna metod till att även omfatta godtyckligt orienterade pålar.

Det finns för närvarande ett stort antal metoder för att beräkna lastfördelningen i en tvådimensionell pålgrupp (t.ex. Westergaard 1917, Ostenfeld 1922, Nökkentved 1928, Franx 1928, Hedde 1929, Vetter 1938, Jampel 1949, Hrennikoff 1949, Manning 1952, Reynolds 1953, Minnich 1954, 1955, Förster & Zimirski 1955, Vesić 1956, Zimirski 1956, 1958, Gouda 1960, Turzynski 1960 och Francis 1964). Bland dem kan nämnas rotationscentrummetoden och metoden med ett elastiskt centrum. Den sistnämnda metoden kan med fördel användas vid beräkning av lastfördelningen i de flesta pålgrupper. Det bör emellertid framhållas att båda metoderna är grundade på antagandet att de enskilda pålarna uppför sig som ideala, elastiska strävor samt att pålgruppen är tvådimensionell. Lastfördelningen vid brott då de enskilda pålarna undergår stora inelastiska deformationer beräknas ofta ur antagandet att pålarna uppför sig som ideala, plastiska strävor. Denna lastfördelning kan beräknas t.ex. med en metod utarbetad av Radosavljević (1957).

I en tredimensionell pålgrupp beräknas lastfördelningen lämpligast med hjälp av matriser (Asplund, 1947, Schneider, 1959, Alcock, 1966, Juhl, 1966 och Aschenbrenner, 1967). Det är även möjligt att med en sådan metod ta hänsyn till pålarnas inelastiska deformation (Hansen, 1959a, 1959b, Asplund, 1960). Roy (1953) och Dalkiewicz (1955) har även analyserat tredimensionella pålgrupper. Ett förenklat beräkningsförfarande för tredimensionella pålgrupper har utarbetats av Smolczyk (1962, 1965). Det bör också påpekas att Pant, Nihalani & Khot (1964) har beskrivit en metod där man uppskattar lastfördelningen i en tredimensionell pålgrupp med modellförsök. En sammanfattning av två- och tredimensionella beräkningsmetoder har utförts av Schiel (1960).

Rotationscentrummetoden och metoden med ett elastiskt centrum är grundade på Maxwells sats (fig. 20). En kropp med godtycklig form (fig. 20 a) är belastad i punkt 1 av en



(a)



(b)

$$\delta_{12} = \delta_{21} \quad \text{ENLIGHT MAXWELLS SATS}$$

Fig. 20. MAXWELLS SATS I PRINCIP.
Law of reciprocity (after Maxwell).

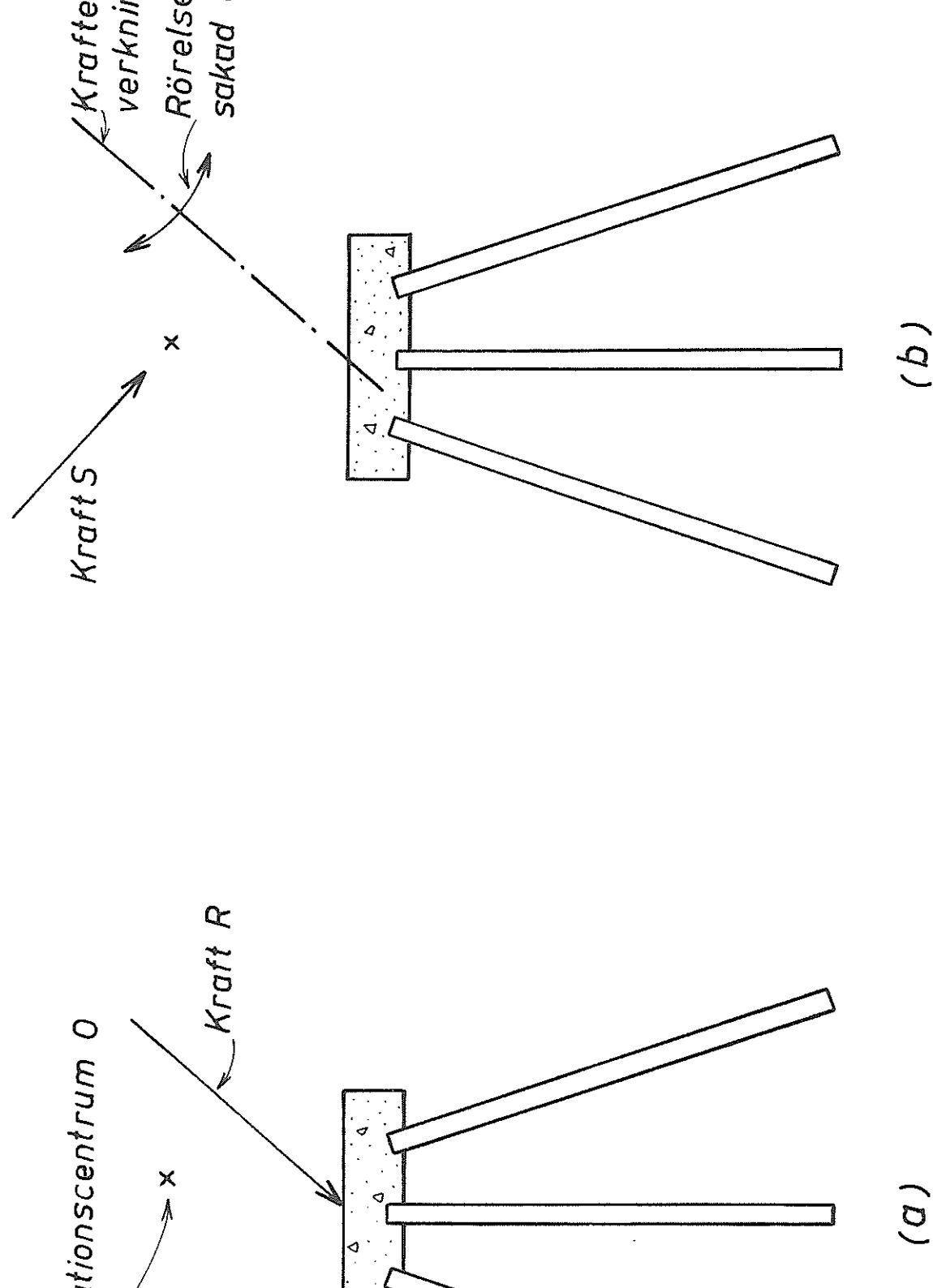


Fig. 21. BERÄKNING AV LASTFÖRDELNINGEN I EN STÖDPÅLGRUPP ENLIGT ROTATIONSCENTRUMMETODEN.

Calculation of load distribution in a pile group according to the rotation center method.

kraft P . Vid punkt 2 erhålls av kraften P en deformation δ_{21} . Om emellertid samma kropp belastas vid punkt 2 av samma kraft P och om denna kraft verkar i deformationen δ_{21} :s riktning (fig. 20 b), rör sig punkt 1 sträckan δ_{12} i kraften P :s riktning. Enligt Maxwells sats är deformationen δ_{21} lika med δ_{12} .

3.11. Rotationscentrummetoden

En stel pålplint utsatt för kraften R visas i fig. 21 a. Denna pålplint, som understöds av tre pålar, roterar kring ett rotationscentrum O när pålplinten belastas av kraften R . Läget av detta rotationscentrum är beroende av den påförda kraftens riktning och angreppspunkt. Om kraften R :s riktning ändras, förflyttas pålgruppens rotationscentrum. I det fall då en kraft S verkar i gruppens rotationscentrum O (fig. 21 b) med avseende på kraften R kommer pålgruppen enligt Maxwells sats ej att röra sig i kraften R :s riktning. Däremot kan kraften S förorsaka en rörelse vinkelrätt mot kraften R :s riktning. Detta medför att rotationscentrumet för kraften S måste vara beläget på kraften R :s verkningslinje.

Vid rotation hos pålgruppen kring en punkt som är belägen på kraften R :s verkningslinje kommer emellertid resultanten till de krafter som verkar i de enskilda pålarna i pålgruppen att vara riktad genom punkt O (fig. 22).

Man kan därför bestämma O :s läge genom att först välja godtyckligt en punkt A belägen på kraften R :s verkningslinje såsom visas i fig. 22 a. Pålgruppen tänks sedan rotera kring denna punkt, och de krafter som därvid uppstår i de enskilda pålarna beräknas. Eftersom man har antagit att pålplinten är styv och att de enskilda pålarna uppför sig som ideala, elastiska strävor kan man beräkna t.ex. kraften Q_a i pålen ur följande ekvation såsom visas i fig. 23.

$$Q_{na} = \frac{\theta r_{na} E_n A_n}{L_n} \quad (3.1)$$

där A_n är denna påles genomsnittsarea, r_{na} det vinkelräta avståndet från det antagna rotationscentrumet A till pålens

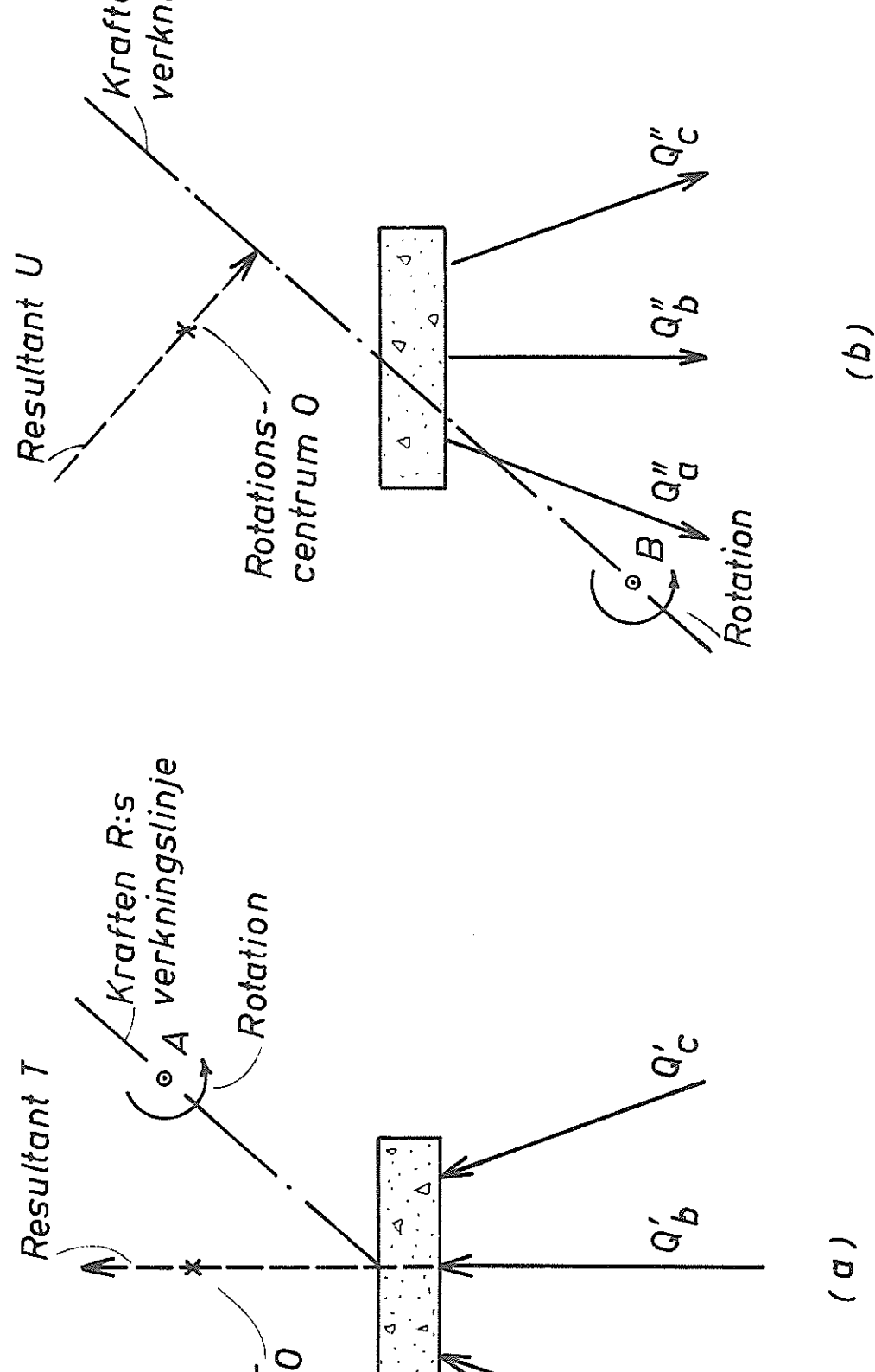


Fig. 22. BERÄKNING AV LASTFÖRDELNINGEN I EN STÖDPÅLGRUPP ENLIGT ROTATIONSCENTRUMMETODEN.

Calculation of load distribution in a pile group according to the rotation center method.

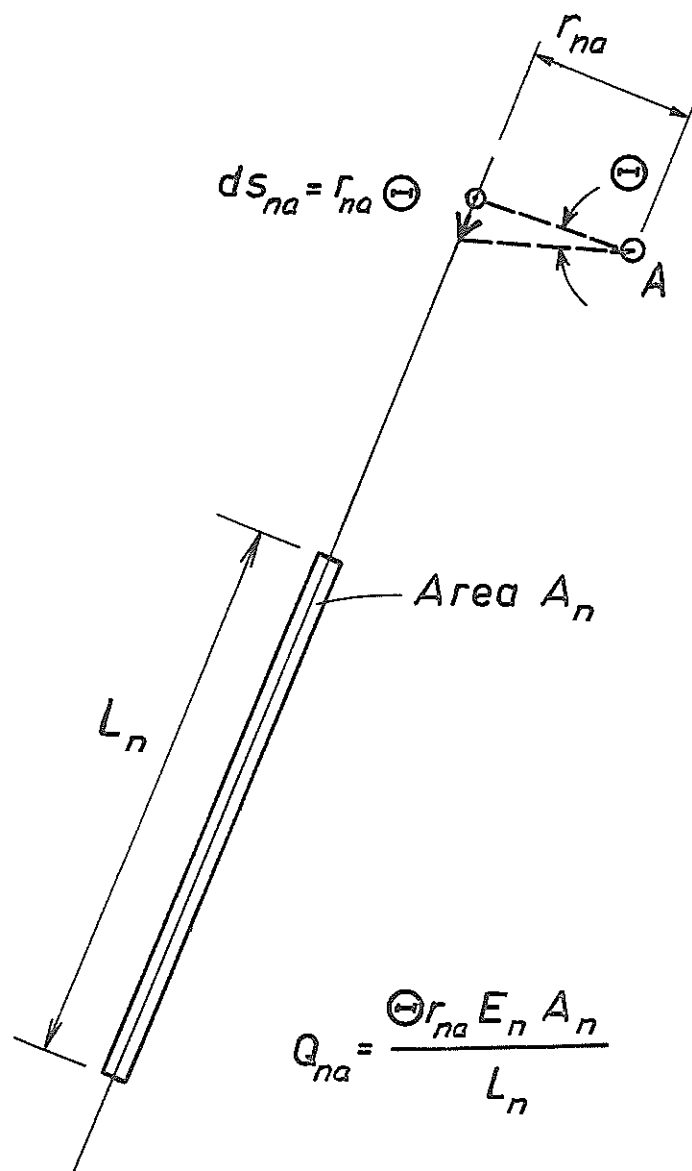


Fig. 23. BERÄKNING AV ENSKILD PÅLES LAST
VID ROTATION AV PÅLGRUPP.

Calculation of load in a single
pile during rotation of a pile group.

verkningslinje (pålaxel), θ pålgruppens rotation i radianer, E_n pålmaterialets ekvivalenta elasticitetsmodul och L_n pålens ekvivalenta längd. (Den ekvivalenta längden L_n antas ofta vara lika med pålens totala längd för en stödpålgrupp, pålens halva längd för en kohesionspålgrupp och $2/3$ av pålens längd för en friktionspålgrupp). Eftersom genomsnittsarean och den ekvivalenta elasticitetsmodulen är konstant för de flesta pålar i en pålgrupp är den last som uppbärs av varje påle proportionell mot r_{na}/L_n .

Då man vet kraften i de enskilda pålarna, kan man sedan grafiskt beräkna resultanten T till detta kraftsystem med t.ex. en lin- och en kraftpolygon. Som tidigare nämnts måste pålgruppens rotationscentrum O med avseende på kraften R vara belägen på resultanten T :s verkningslinje. Man upprepar därefter detta förfarande för ett nytt godtyckligt valt rotationscentrum B som är beläget på resultanten R :s verkningslinje såsom visas i fig. 22 b. Man beräknar de nya pålkrafterna som uppträder i pålgruppen då den roterar kring detta rotationscentrum. Med hjälp av en annan kraft- och linpolygon kan man sedan beräkna resultanten U och dess verkningslinje. Då rotationscentrum O med avseende på kraften R är beläget på resultanten U :s verkningslinje, måste centrum O vara beläget i resultanten T och U :s skärningspunkt. Pålgrupperna kommer således att rotera kring denna skärningspunkt då gruppen belastas av kraften R .

Man kan sedan beräkna lasten i de enskilda pålarna ur en momentekvation med avseende på denna skärningspunkt. Vid jämvikt gäller

$$\sum_1^n Q_n r_n = R r_o \quad (3.2)$$

där Q_n är lasten i den n :te pålen, r_n är det vinkelräta avståndet från denna påle till rotationscentrum O och r_o motsvarande avstånd från kraften R till rotationscentrum O . Eftersom (fig. 23)

$$Q_n = \frac{\theta r_n E_n A_n}{L_n} \quad (3.3)$$

kan man beräkna pålgruppens rotation θ ur ekv. (3.2) och

(3.3). Därav följer att

$$\theta = \frac{R r_o}{\sum_{n=1}^n \frac{r_n^2 E_n A_n}{L_n}} \quad (3.4)$$

Lasten Q_n i den n:te pålen kan sedan beräknas ur ekv. (3.3) och (3.4)

$$Q_n = \frac{R r_o r_n E_n A_n}{L_n \sum_{n=1}^n \frac{r_n^2 E_n A_n}{L_n}} \quad (3.5)$$

Ekv. (3.5) kan förenklas betydligt i de fall då pållängden L_n , pålarean A_n och den ekvivalenta elasticitetsmodulen E_n är konstant för samtliga pålar i pålgruppen. I detta fall kan belastningen Q_n i påle n beräknas ur uttrycket

$$Q_n = \frac{R r_o r_n}{\sum_{n=1}^n r_n^2} \quad (3.6)$$

Man har emellertid vid dessa beräkningar antagit att varje påle är ledad och att den omgivande jorden ej bidrar till de enskilda pålarnas bärförmåga.

3.12. Metoden med ett elastiskt centrum

Vid metoden med ett elastiskt centrum förutsätts att pålgruppen är plan, att pålplinten är styv och att belastningen i var påle är proportionell mot pålhuvudets förskjutning. Metoden grundar sig på att pålgruppen först parallellt förflyttas avståndet S' och S'' i två godtyckligt valda riktningar såsom visas i fig. 24 a resp. 24 b. Dessa parallellförskjutningar förorsakar en deformation S'_n resp. S''_n av pålgruppens n:te påle. Ur dessa deformationer och pålens dimensioner kan motsvarande pållaster P'_n och P''_n beräknas såsom visas i fig. 24.

Med hjälp av en kraft- och en linpolygon beräknas därefter vid denna metod resultanten S till pållasterna $P'_a, P'_b, \dots, P'_n$ (fig. 24 a) förorsakade av parallellförskjut-

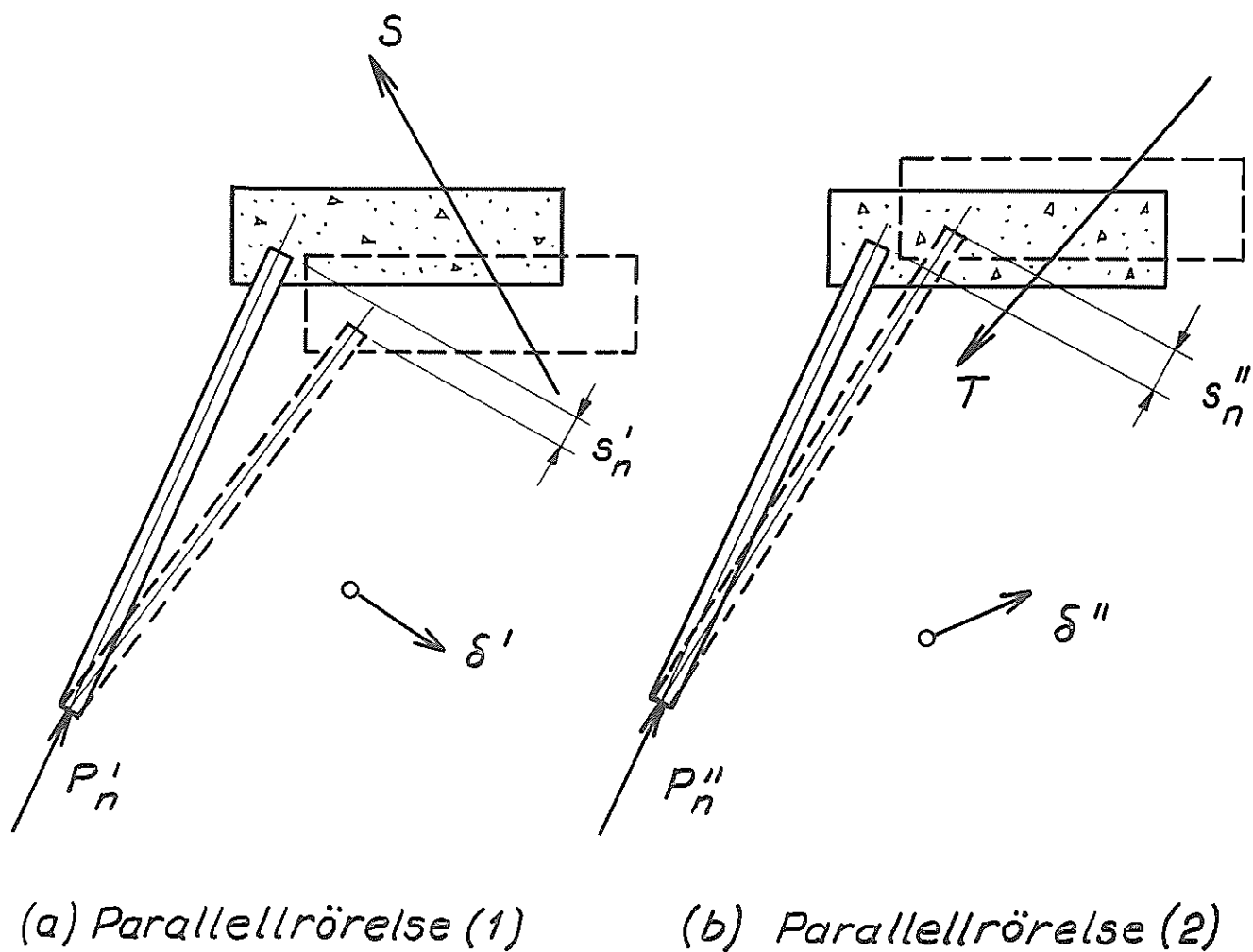


Fig. 24. BERÄKNING AV LASTFÖRDELNINGEN I EN PÅLGRUPP ENLIGT METODEN MED ELASTISKT CENTRUM.

Calculation of load distribution in a pile group according to the elastic center method.

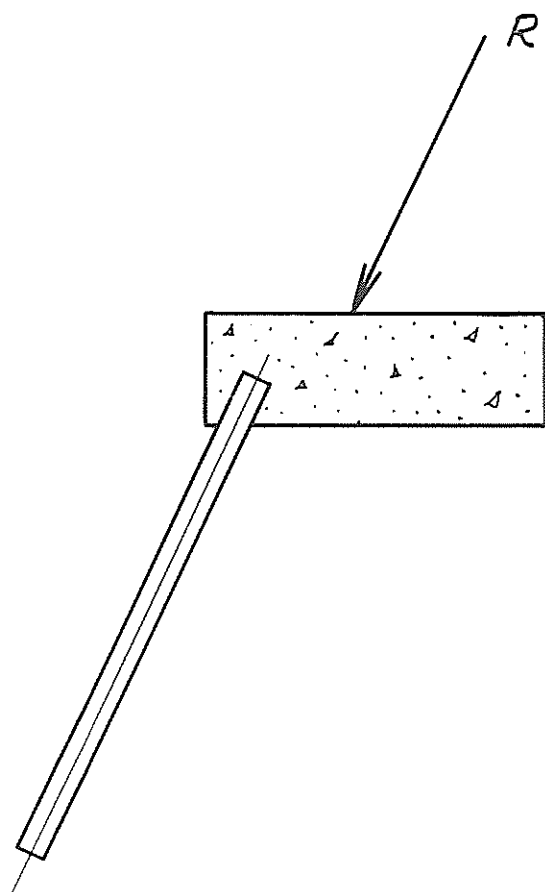
ningen δ' och resultanten T till pållasterna $P_a'', P_b'', \dots, P_n''$ förorsakade av parallellförskjutningen δ'' (fig. 24 b).

Vid beräkning av lastfördelningen i en pålgrupp, som belastas av en kraft R (fig. 25 a) delas kraften R upp i två komponenter F och G samt i ett vridande moment M (fig. 25 b). Komponenten F verkar i resultanten S 's riktning, medan G verkar i resultanten T 's riktning. Eftersom de båda resultanterna S och T 's riktningar är kända, kan F och G bestämmas med t.ex. en grafisk metod. Det vridande momentet M kan beräknas eftersom detta moment är den yttre kraften R 's moment med avseende på de båda resultanterna S och T 's skärningspunkt.

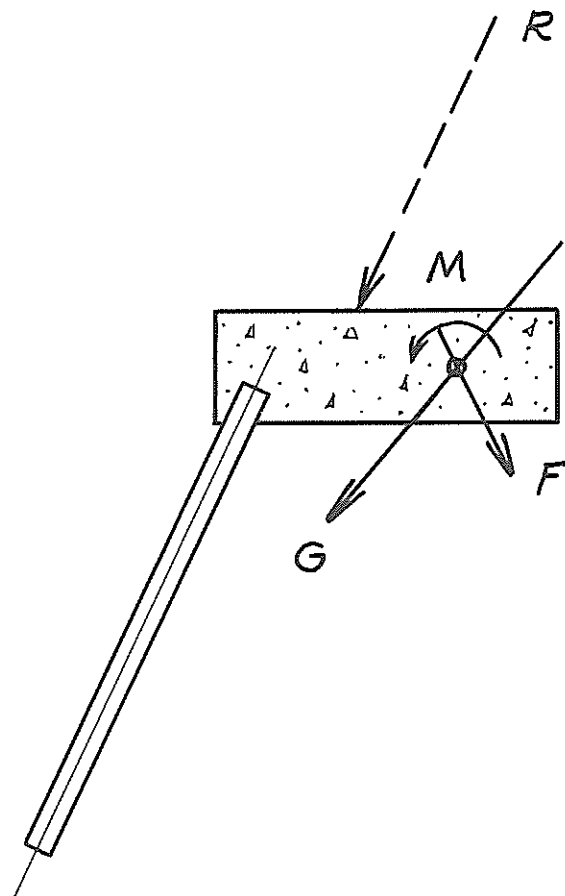
De pållaster som är förorsakade av de båda komponenterna F och G kan beräknas såsom visas i fig. 24 a resp. 24 b. Den last Q_n' resp. Q_n'' som komponenterna F och G förorsakar i t.ex. den n :te pålen är lika med $(P_n' F/S)$ resp. $(P_n'' G/T)$.

Komponenterna F och G förorsakar även en deformation av pålgruppen. Eftersom resultanterna S och T motsvarar en ren parallellförskjutning δ' resp. δ'' av pålgruppen, förorsakar komponenterna F och G även en ren parallellförskjutning (utan rotation) då dessa krafter verkar i resultanterna S och T 's riktningar. Dessa parallellförskjutningar är $\delta' F/S$ resp. $\delta'' G/T$.

Ett stjälpande moment förorsakar en ren rotation av pålgruppen (utan sidobelastning) kring resultanterna S och T 's skärningspunkt eftersom ett moment motsvarar en kraft som verkar på ett oändligt avstånd från pålgruppen. Man kan finna denna krafts rotationscentrum genom att rotera pålgruppen kring två punkter som är belägna på den ekvivalenta kraftens verkningslinje. (Denna verkningslinje är belägen på oändligt avstånd från pålgruppen). Eftersom en sådan rotation motsvarar en ren parallellförskjutning (utan rotation) och S och T är resultanten till de pållaster som är förorsakade av sidoförskjutningarna δ' resp. δ'' , följer ur Maxwells sats att pålgruppens rotationscentrum (elastiska centrum) är beläget i resultanterna S och T 's skärningspunkt. Pålgruppen kommer således att rotera kring denna punkt då den belastas av det stjälpande momentet M (från lasten R). Motsvarande pållast Q_n kan be-



(a) Påförd last



(b) Uppdelad last

Fig. 25. UPPDELNING AV PÅFÖRD LAST VID BERÄKNING AV LASTFÖRDELNING ENLIGT METODEN MED ELASTISKT CENTRUM.

Distribution of applied load according to the elastic center method.

räknas ur ekv. (3.5) eller (3.6).

Metoden med ett elastiskt centrum är speciellt lämplig vid beräkning av lastfördelningen i en pålgrupp när pålgruppen består av två pålgrupper med sinsemellan parallella pålar med konstant längd och tvärsnitt såsom visas i fig. 26. En sidoförskjutning av en sådan pålgrupp förorsakar samma belastning i samtliga pålar i en delpålgrupp om pålarnas genomsnittsarea och längd är konstanta. Resultanten till var delpålgrupp kommer i detta fall att vara riktad genom skärningspunkten mellan mittlinjerna till de två delpålgrupperna. Det följer ur Maxwells sats att en kraft som verkar i denna punkt förorsakar en ren sidoförskjutning av pålgruppen.

Vid en sådan ren sidoförskjutning kommer samtliga pålar i delpålgruppen att bli likformigt belastade om pålarnas genomsnittliga längd är konstant.

Man kan i detta fall beräkna belastningarna Q'_n och Q''_n i påle n genom att först dela upp den belastning som verkar i pålgruppens centrum i två komponenter (F) och (G) längs de två delpålgruppernas axlar och dividera motsvarande komponent (F) resp. (G) med antalet pålar (f) resp. (g) i de två delpålgrupperna.

Den pållast Q'''_n som är förorsakad av ett vridande moment M kan beräknas ur ekv. (3.5).

$$Q'''_n = \frac{M r_n E_n A_n}{L_n \sum_{l=1}^n \frac{r_l^2 E_l A_l}{L_l}} \quad (3.7)$$

Denna ekvation kan förenklas betydligt när samtliga pålar i en delpålgrupp har samma styvhet ($E_n A_n / L_n$). I detta fall blir

$$Q'''_n = \frac{M r_n}{\sum_{l=1}^n r_l^2} \quad (3.8)$$

Eftersom kraften i en enskild påle är förorsakad dels av ett moment M , dels av kraftkomponenten F eller G längs de två delpålgruppernas axlar, blir den totala lasten Q_n i påle n

$$Q_n = Q'_n + Q''_n + Q'''_n = \frac{G}{g} + \frac{M r_n}{\sum_{l=1}^n r_l^2} \quad (3.9)$$

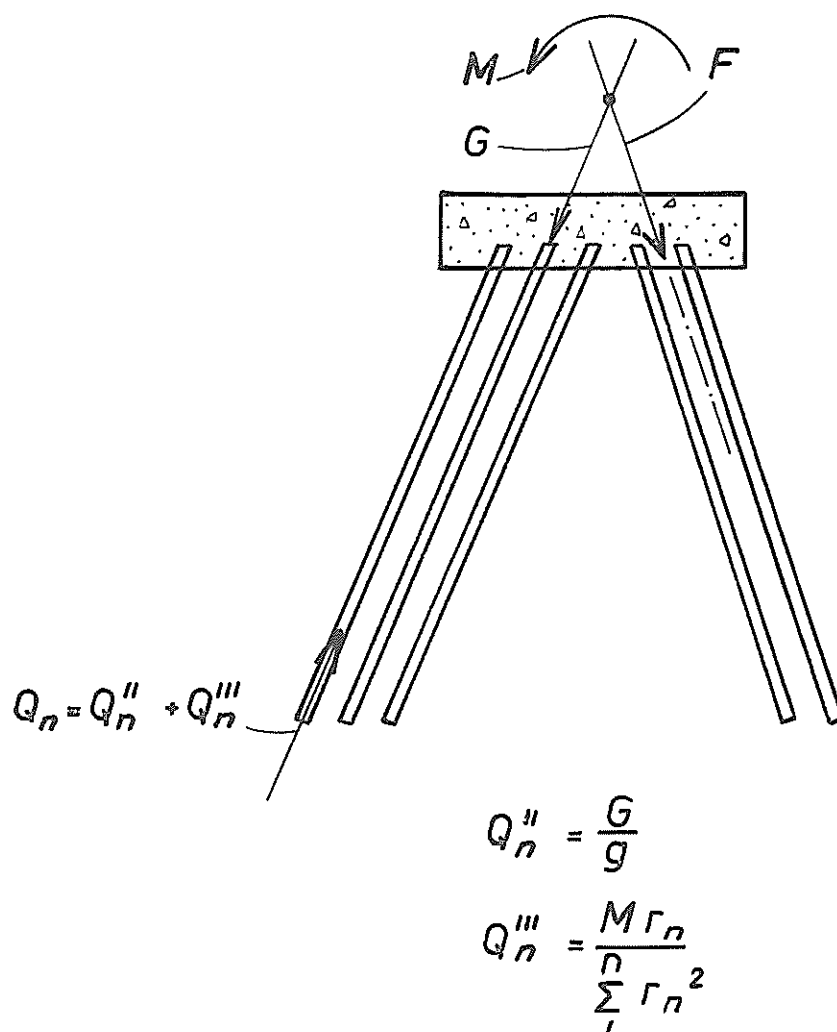


Fig. 26. BERÄKNING AV LASTFÖRDELNINGEN I EN PÅLGRUPP ENLIGT METODEN MED ELASTISKT CENTRUM.

Distribution of load distribution in a pile group according to the elastic center method.

I detta fall antas att komponenten G verkar längs den delpålgrupp som innehåller den n :te pålen.

Det är även möjligt vid beräkning av lastfördelningen att ta hänsyn till pålarnas sidomotstånd genom att ersätta den omgivande jorden med en eller flera imaginära pålar som begränsar de enskilda pålarnas sidoförskjutning. Om en påle belastas av sidokraften H , blir pålens sidoförskjutning ΔH . Denna sidoförskjutning kan beräknas ur ekvationen

$$\Delta H = H/K \quad (3.10)$$

där K är en proportionalitetskoefficient som är en funktion av den omgivande jordens bäddmodul (fjädringsmodul), pålens styvhet och pålens längd (Broms, 1964a, 1964b). Jordens sidomotstånd kan således ersättas med en ekvivalent imaginär påle vars styvhet (L/EA) är lika med proportionalitetskoefficienten K .

Metoder där även pålarnas inspänning i pälplinten beaktas har beskrivits av bl.a. Hrennikoff (1949) och Francis (1964).

3.2. Sättning hos en stödpålgrupp

Den sättning man erhåller vid belastning av en stödpålgrupp är beroende av de enskilda pålarnas hoptryckning, de lokala sättningar som uppstår vid själva pålspetsen och den konsolidering som äger rum av ett eventuellt lerlager beläget under pålgruppen. I det fall då det ej finns något kompressibelt lager under pålgruppen antages sättningen av en stödpålgrupp motsvara sättningen av motsvarande enstaka påle, dvs. att stödpålgruppens sättning kan bestämmas ur belastningsförsök med en enstaka påle.

SAMMANFATTNING

Brotttlasten för en kohesions- eller friktionspålgrupp är i allmänhet beroende av den omgivande jordens bärförmåga, medan en stödpålgrupps brottlast bestäms av de enskilda pålarnas brottlast med avseende på pålbrott. En kohesionspålgrupps brottlast är i regel mindre än summan av motsvarande enstaka pålars brottlast utvärderad från belastningsförsök, medan brottlasten för en friktionspålgrupp i allmänhet är större än

summan av motsvarande enstaka pålars brottlast. För en stödpålgrupp däremot bestäms brottlasten av de enskilda pålarnas brottlast eftersom brott av en stödpålgrupp i allmänhet sker såsom pålbrott.

Sättningarna av en belastad kohesions- eller friktionspålgrupp är vid vanliga belastningsfall främst beroende av jordens konsolidering eller sammantryckning under själva pålgruppen. Sättningarna ökar med ökad storlek hos pålgruppen och kan vid samma belastning vara upp till 10 till 15 gånger större än motsvarande enstaka påles sättning. Ofta är pålarnas elastiska hoptryckning liten och kan försummas.

För en belastad stödpålgrupp bestäms däremot sättningarna av de enstaka pålarnas hoptryckning samt i viss mån av jordens eller bergmaterialets lokala hoptryckning vid pålarnas spetsar. En stödpålgrupps sättning är i stort sett lika med motsvarande enstaka påles sättning såsom den bestäms ur pålförsök.

Den totala påförda lasten är ej jämnt fördelad bland de enskilda pålarna i en kohesions- eller friktionspålgrupp vid vanliga belastningsfall. Medan i en kohesionspålgrupp hörnpålarna och kantpålarna bär en större andel av den totala lasten än motsvarande centrumpålar, är förhållandet det motsatta i en friktionspålgrupp. Lastfördelningen i en stödpålgrupp bestående av ett antal godtyckligt orienterade pålar beräknas ofta med rotationscentrummetoden eller metoden med ett elastiskt centrum. Vid dessa metoder antas att de enskilda pålarna uppför sig som ledade, elastiska strävor. Det antas således att den påförda lasten är jämnt fördelad i en delpålgrupp bestående av ett antal parallella pålar med samma area och längd.

REFERENSER

- ALCOCK, D.G., 1966. The analysis of structural piling systems. Struct. Engr. Vol. 44, Nr 11, pp 403 - 409.
- ASCHENBRENNER, R., 1967. Three dimensional analysis of pile foundations. J. Structural Div. Proc. ASCE. Vol. 93:ST 1, pp 201 - 219.
- ASPLUND, S.O., 1947. A study of three dimensional pile groups. Int. Assoc. for Bridge a. Struct. Engng. Vol. 8, pp 1 - 16.
- ASPLUND, S.O., 1960. Pile groups, elastic and plastic design. Symposium on the Design of Pile Foundations, Stockholm, pp 77 - 87.
- BEREDUGO, Y.O., 1966. An experimental study of the load distribution in pile groups in sand. Canad. Geotechn. J., Vol. 3, Nr 3, pp 145 - 166.
- BEREZANTZEV, V.G., KHRISTOFOROV, V.S. & GOLUBKOV, V.N., 1961. Load bearing capacity and deformation of piled foundations. Proc. 5. Int. Cont. Soil Mech. a. Found. Engng. Vol. 2, pp 11 - 15.
- BJERRUM, L., BRINCH HANSEN, J. & SEVALDSON, R., 1958. Geotechnical investigations for a quay structure in Horten. Norg. Geot. Inst. Publ. Nr 28, pp 1 - 17. Oslo.
- BJERRUM, L., JÖNSEN, W. & OSTENFELD, C., 1957. The settlement of a bridge abutment on friction piles. Proc. 4. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng. Vol. 2, pp 14 - 18.
- BJERRUM, L. & JOHANNESSEN, I., 1960. Pore pressures resulting from driving piles in soft clay. (Conf. on) Pore Pressure a. Suction in Soil, London 1960. pp 14 - 17.
- BROMS, B.B., 1964a. Lateral resistance of piles in cohesive soils. J. Soil Mech. a. Found. Div. Proc. ASCE. Vol. 90:SM 2, pp 27 - 63.

- BROMS, B.B., 1964b. Lateral resistance of piles in cohesionless soils. J. Soil Mech. a. Found. Div. Proc. ASCE. Vol. 90:SM 3, pp 123 - 156.
- CALIFORNIA DIVISION OF HIGHWAYS, 1958. Lateral pile load tests - Santa Monica Viaduct. Santa Monica, Calif. (Unpublished)
- CAMBEFORT, H., 1953. La force portante des groupes de pieux. Proc. 3. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng. Vol. 2, pp 22 - 28.
- CHELLIS, R.D., 1957. Pile foundations. pp 136 - 140. New York.
- DALKIEWICZ, B., 1955. Die Berechnung des räumlichen Pfahlrostes und ihre Überprüfung durch Modellversuche. Dtsch. Gesellschaft f. Erd- u. Grundbau e.V. Vorträge der Baugrundtagung 1954 in Stuttgart, 7 - 8 Okt. pp 161 - 174. Hamburg.
- EKWALL, R., 1911. Beräkning af grundpålningar. Tekn. Ts. V.o.V. Vol. 41, No. 7, pp 79 - 83.
- FEAGIN, L.B., 1954. Lateral load tests on groups of battered and vertical piles. ASTM Spec. Techn. Publ. No. 154, pp 12 - 20.
- FELLENIOUS, W., 1910. Om beräkning af kajbyggnader o.d. Tekn. Ts. V.o.V. Vol. 40, No. 3, pp 29 - 33.
- FRANCIS, A.J., 1964. Analysis of pile groups with flexural resistance. J. Soil Mech. a. Found. Div. Proc. ASCE. Vol. 90:SM 3, pp 1 - 32.
- FRANX, C., 1928. De berekening van een paal fundeering. De Ingenieur, Vol. 43, No. 33, pp B 189 - B 195.
- FÖRSTER, K. & ZIMIRSKI, F., 1955. Pfahlroste, Berechnung und Ausbildung. Grundbau-Taschenbuch, Bd. 1, pp 481 - 500. Berlin.
- GAMAL, A.K., 1963. Bearing capacity of friction pile groups and its relation to the basic characteristics of penetrated clays. Proc. 2. Asian Reg. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng. Vol. 1, pp 196 - 201.

- GOUDA, M.A., 1960. Analysis for load distribution in the piles of piers. J. Waterw. a. Harb. Div. Proc. ASCE. Vol. 86:WW 2, pp 93 - 115.
- GULLANDER, P., 1902. Bidrag till teorien för grundpålning. Tekn. Ts. V.o.V. Vol. 32, No. 5, pp 51 - 52, No. 6, pp 58 - 62, No. 7, pp 69 - 70.
- GULLANDER, P., 1911. Grafostatisk metod för beräkning af grundpålning. Tekn. Ts. V.o.V. Vol. 41, No. 5, pp 55 - 64.
- GULLANDER, P., 1912. Till teorien för grundpålningar. Tekn. Ts. V.o.V. Vol. 42, No. 3, pp 40 - 41.
- HANNA, T.H., 1963. Model studies of foundation groups in sand. Géotechnique. Vol. 13, No. 4, pp 334 - 351.
- HANSEN, B., 1959a. Limit design of pile foundations. The Danish Geotechnical Institut, Bulletin No. 6, pp 37 - 86.
- HANSEN, B., 1959b. A new design method for pile foundations. The Danish Geotechnical Institute, Bulletin No. 6, pp 1 - 29.
- HEDDE, P., 1929. Einflusslinien zur statischen Untersuchung der Grundbauwerke (Kaimauern, Pfahlroste u.s.w.). Bauingenieur, Vol. 20, H. 1, pp 1 - 6.
- HRENNIKOFF, A., 1949. Analysis of pile foundations with batter piles. Proc. ASCE, Vol. 75, Sep. No. 2, pp 185 - 208.
- HULTIN, T., 1911. Om beräkning af grundpålningar. Ind. tidn. Norden, No. 46, pp 370 - 373.
- JAMPEL, S., 1949. An analysis of groups of piles. Concrete & Constr. Engng. Vol. 44, No. 7, pp 201 - 208, No. 8, pp 253 - 257.
- JUHL, H.G., 1966. Loads on vertical pile groups. J. Struct. Div. Proc. ASCE, Vol. 92:ST 2, pp 103 - 114.
- KEZDI, A., 1957. Bearing capacity of piles and pile groups. Proc. 4. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng. Vol. 2, pp 46 - 51.

- KEZDI, A., 1960. Bemerkungen zur Frage der Tragfähigkeit von Pfahlgruppen. Symposium on Pile Foundations, Stockholm. pp 89 - 96.
- KISHIDA, H. & MEYERHOF, G.G., 1965. Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand. Proc. 6. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng. Vol. 2, pp 270 - 271.
- KONDNER, R.L., 1962. Friction pile groups in cohesive soils. J. Soil Mech. a. Found. Div. Proc. ASCE, Vol. 88:SM 3, pp 117 - 149.
- MANNING, G.P., 1952. Analysis of groups of piles by the displacement method. Concrete & Constr. Engng. Vol. 47, No. 1, pp 3 - 7.
- MASTERS, F.H., 1943. Timber friction pile foundations. Trans. ASCE, Vol. 108, pp 115 - 140.
- MEYERHOF, G.G., 1960. The design of Franki piles with special reference to groups in sands. Symposium on Pile Foundations, Stockholm. pp 105 - 123.
- MEYERHOF, G.G., 1963. Some recent research on the bearing capacity of foundations. Canad. Geotechn. J. Vol. 1, No. 1, pp 16 - 26.
- MINNICH, H., 1954. Erweitertes Nökkentved-Verfahren für ein ebenes Pfahlsystem mit waagrecht liegendem Anker in beliebiger Höhe. Bautechnik, Vol. 31, H. 12, pp 399 - 401.
- MINNICH, H., 1955. Verallgemeinerung des Nökkentved-Verfahrens. Bautechnik, Vol. 32, H. 11, pp 364 - 367.
- NÖKKENTVED, C., 1924. Beregning af pæleværker. Analytisk undersøgelse. København.
- NÖKKENTVED, C., 1928. Berechnung von Pfahlrosten. Berlin.
- OSTENFELD, A., 1922. Berechnung von Pfahlrosten. Beton u. Eisen. Vol. 21, H. 1, pp 21 - 23, H. 2, pp 30 - 33.

- PANT, B., NIHALANI, I.K. & KHOT, A.S., 1964. Experimental analysis of pile groups. Symposium on Bearing Capacity of Piles. Centr. Build. Res. Inst., Roorkee. pp 164 - 173.
- PECK, R.B., HANSON, W.E. & THORNBURN, T.H., 1953. Foundation engineering. New York.
- PECK, R.B. & DAVISSON, M.T., 1963. Discussion on: "Friction pile groups in cohesive soils" av Kondner 1962. J. Soil Mech. a. Found. Div. Proc. ASCE, Vol. 89:SM 1, pp 279 - 285.
- PRAKASH, S., 1962. Behavior of pile groups subjected to lateral loads. Thesis, Univ. of Illinois, Urbana, Ill.
- PRESS, H., 1933. Die Tragfähigkeit von Pfahlgruppen in Beziehung zu der des Einzelpfahles. Bautechnik, Vol. 11, H. 45, pp 625 - 627.
- RADOSAVLJEVIĆ, Z., 1957. Calcul et essais des pieux en groupe. Proc. 4. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng. Vol. 2, pp 56 - 60.
- REESE, L.C. & COYLE, H.M., 1963. Discussion on: "Friction pile groups in cohesive soils" av Kondner 1962. J. Soil Mech. a. Found. Div. Proc. ASCE, Vol. 89:SM 1, pp 285 - 290.
- REYNOLDS, C.E., 1953. Loads on groups of free-standing piles. Concrete & Constr. Engng. Vol. 48, No. 12, pp 373 - 380.
- ROY, M., 1953. Static distribution of the eccentric load on a group of piles. Civ. Engng. (London). Vol. 48, pp 249 - 252, 345 - 347, 441 - 443, 554 - 555, 654 - 656.
- SAFFERY, M.R. & TATE, A.P.K., 1961. Model tests on pile groups in a clay soil with particular reference to the behavior of the group when it is loaded eccentrically. Proc. 5. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng. Vol. 2, pp 129 - 134.
- SCHIEL, F., 1960. Statik der Pfahlwerke. Berlin.

- SCHIFF, S.C., 1961. Portance d'un groupe de pieux dans le sable. Ann. Inst. Techn. Bat. et Trav. Publ. Vol. 14, No. 166, pp 1001 - 1003. Questions Générales No. 53.
- SCHIFF, S.C., 1964. Model studies of group pile foundations in sand. Symposium on Bearing Capacity of Piles. Centr. Build. Res. Inst. Roorkee, pp 129 - 135.
- SCHLITT, H.G., 1952. Group pile loads in plastic soils. Highw. Res. Board. Proc. Vol. 31, pp 62 - 81.
- SCHNEIDER, K., 1959. Die Berechnung ebener und räumlicher Pfahlsysteme mit beliebiger Höhenlage der Pfahlköpfe und beliebiger Pfahlneigung. Bauingenieur, Vol. 34, H. 12, pp 462 - 469.
- SKEMPTON, A.W., YASSIN, A.A. & GIBSON, R.E., 1953. Théorie de la force portant des pieux dans le sable. Ann. Inst. Techn. Bat. et Trav. Publ. Vol. 6, No. 63 - 64, pp 285-290. Sols et Fond. No. 13.
- SMOLTCZYK, H.U., 1962. Axialsymmetrische Pfahlroste. Bauingenieur, Vol. 37, H. 3, pp 98 - 99.
- SMOLTCZYK, H.U., 1965. Die Biegebeanspruchung axialsymmetrischer Pfahlroste. Bauingenieur, Vol. 40, H. 10, pp 387 - 391.
- SODERBERG, L.O., 1962. Consolidation theory applied to foundation pile time effects. Géotechnique, Vol. 12, No. 3, pp 217 - 225.
- SOWERS, G.F. & al., 1961. The bearing capacity of friction pile groups in homogeneous clay from model studies. Proc. 5. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng. Vol. 2, pp 155 - 159.
- STUART, J.G., HANNA, T.H. & NAYLOR, A.H., 1960. Notes on the behavior of model pile groups in sand. Symposium on Pile Foundations, Stockholm, pp 97 - 103.

- STUART, J.G. & HANNA, T.H., 1961. Groups of deep foundations: A theoretical and experimental investigation. Proc. 5. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng. Vol. 2, pp 149 - 153.
- SWIGER, W.F., 1941. Foundation test for Los Angeles Steam Plant. Civ. Engng. (New York). Vol. 11, pp 711 - 714.
- TERZAGHI, K., 1930. Die Tragfähigkeit von Pfahlgründungen. Bau-technik, Vol. 8, H. 31, pp 475 - 478.
- TERZAGHI, K. & PECK, R.B., 1948. Soil mechanics in engineering practice. New York.
- TURZYNSKI, L.D., 1960. Groups of piles under mono-planar forces. Struct. Engr. Vol. 38, No. 9, pp 286 - 293.
- VESIĆ, A., 1956. Contribution à l'étude des fondations sur pieux verticaux et inclinés. Annales des Travaux Publics de Belgique, No. 6, pp 5 - 78.
- VETTER, C.P., 1938. Design of pile foundations. Proc. ASCE, Vol. 64, pp 311 - 331.
- WESTERGAARD, H.M., 1917. The resistance of a group of piles. J. Western Soc. of Engrs. Vol. 22, pp 704 - 713.
- WHITAKER, T., 1957. Experiments with model piles in groups. Géotechnique, Vol. 7, No. 4, pp 147 - 167.
- WHITAKER, T., 1960. Some experiments on model piled foundations in clay. Symposium on Pile Foundations. Stockholm. pp 124 - 139.
- YU, T.M., SHU, W.Y. & TONG, Y.X., 1965. Settlement analysis of pile foundations in Shanghai. Proc. 6. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng. Vol. 2, pp 356 - 359.
- ZIMIRSKI, F., 1956. Berechnung von Pfahlrostverstärkungen nach Nökkentved. Beton u. Stahlbetonbau, Vol. 51, H. 3, pp 62 - 63.

ZIMIRSKI, F., 1958. Vereinfachte Berechnung ebener Pfahlroste.
Bauingenieur, Vol. 33, H. 4, pp 149 - 152.

ZWECK, E., 1957. Reibungspfähle in Weighen Ton. Bauingenieur,
Vol. 32, H. 5, pp 181 - 183.

Figurförteckning

- Fig. 1. Beräkningsmetod för en pålgrupp bestående av kohesionspålar
- " 2. Bärförmåga hos en pålgrupp bestående av kohesionspålar (Whitaker, 1957)
 - " 3. Bärförmåga hos en pålgrupp bestående av kohesionspålar (Sowers & al., 1961)
 - " 4. Pålplints inverkan på en pålgrupps bärförmåga (Whitaker, 1960)
 - " 5. Bestämning av pålgrupps brottlast
 - " 6. Beräkning av pålgrupps brottlast
 - " 7. Lastfördelning i en pålgrupp (Whitaker, 1957)
 - " 8. Spänningsfördelning vid en enskild påle och en pålgrupp
 - " 9. Sättningar vid brott hos en kohesionspålgrupp (Whitaker, 1957)
 - " 10. Beräkning av sättningar hos en pålgrupp vid kohesionsmaterial
 - " 11. Bärförmåga hos en pålgrupp bestående av friktionspålar (Stuart, Hanna & Naylor, 1960)
 - " 12. Bärförmåga hos en belastad pålgrupp (Kezdi, 1957)
 - " 13. Bärförmåga hos en pålgrupp bestående av friktionspålar (Kezdi, 1960)
 - " 14. Lastfördelningen i en friktionspålgrupp (Beredugo, 1966)
 - " 15. Sättning hos en pålgrupp (Kezdi, 1960)
 - " 16. Pålgrupps sättning vid friktionsmaterial (Kezdi, 1957)
 - " 17. Pålgrupps sättning vid friktionsmaterial (Stuart, Hanna & Naylor, 1960)
 - " 18. Beräkning av en pålgrupps sättningar vid friktionsmaterial
 - " 19. Sättning hos en pålgrupp vid friktionsmaterial (Skempton, 1953)
 - " 20. Maxwells sats i princip
 - " 21. Beräkning av lastfördelningen i en stöd-pålgrupp enligt rotationscentrummetoden
 - " 22. Beräkning av lastfördelningen i en stöd-pålgrupp enligt rotationscentrummetoden
 - " 23. Beräkning av enskild påles last vid rotation av pålgrupp

- Fig. 24. Beräkning av lastfördelningen i en pålgrupp enligt metoden med elastiskt centrum
- " 25. Uppdelning av påförd last vid beräkning av lastfördelning enligt metoden med elastiskt centrum
- " 26. Beräkning av lastfördelningen i en pålgrupp enligt metoden med elastiskt centrum

SÄRTRYCK OCH PRELIMINÄRA RAPPORTER

Reprints and preliminary reports

No.			Pris kr. (Sw. crs.)
1.	Views on the Stability of Clay Slopes. <i>J. Osterman</i>	1960	Out of print »
2.	Aspects on Some Problems of Geotechnical Chemistry. <i>R. Söderblom</i>	1960	»
3.	Contributions to the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris 1961. Part I.	1961	»
	1. Research on the Texture of Granular Masses. <i>T. Kallstenius & W. Bergau</i>		
	2. Relationship between Apparent Angle of Friction — with Effective Stresses as Parameters — in Drained and in Consolidated-Undrained Triaxial Tests on Saturated Clay. Normally-Consolidated Clay. <i>S. Odenstad</i>		
	3. Development of two Modern Continuous Sounding Methods. <i>T. Kallstenius</i>		
	4. In Situ Determination of Horizontal Ground Movements. <i>T. Kallstenius & W. Bergau</i>		
4.	Contributions to the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris 1961. Part II.	1961	5:—
	Suggested Improvements in the Liquid Limit Test, with Reference to Flow Properties of Remoulded Clays. <i>R. Karlsson</i>		
5.	On Cohesive Soils and Their Flow Properties. <i>R. Karlsson</i>	1963	10:—
6.	Erosion Problems from Different Aspects.	1964	10:—
	1. Unorthodox Thoughts about Filter Criteria. <i>W. Kjellman</i>		
	2. Filters as Protection against Erosion. <i>P. A. Hedar</i>		
	3. Stability of Armour Layer of Uniform Stones in Running Water. <i>S. Andersson</i>		
	4. Some Laboratory Experiments on the Dispersion and Erosion of Clay Materials. <i>R. Söderblom</i>		
7.	Settlement Studies of Clay.	1964	10:—
	1. Influence of Lateral Movement in Clay Upon Settlements in Some Test Areas. <i>J. Osterman & G. Lindskog</i>		
	2. Consolidation Tests on Clay Subjected to Freezing and Thawing. <i>J. G. Stuart</i>		
8.	Studies on the Properties and Formation of Quick Clays. <i>J. Osterman</i>	1965	5:—
9.	Beräkning av pålar vid olika belastningsförhållanden. <i>B. Broms</i>	1965	30:—
	1. Beräkningsmetoder för sidobelastade pålar.		
	2. Brottlast för snett belastade pålar.		
	3. Beräkning av vertikala pålars bärförmåga.		
10.	Triaxial Tests on Thin-Walled Tubular Samples.	1965	5:—
	1. Effects of Rotation of the Principal Stress Axes and of the Intermediate Principal Stress on the Shear Strength. <i>B. Broms & A. O. Casbarian</i>		
	2. Analysis of the Triaxial Test-Cohesionless Soils. <i>B. Broms & A. K. Jamal</i>		
11.	Något om svensk geoteknisk forskning. <i>B. Broms</i>	1966	5:—
12.	Bärförmåga hos pålar slagna mot släntberg. <i>B. Broms</i>	1966	15:—
13.	Förankring av ledningar i jord. <i>B. Broms & O. Orrje</i>	1966	5:—
14.	Ultrasonic Dispersion of Clay Suspensions. <i>R. Pusch</i>	1966	5:—
15.	Investigation of Clay Microstructure by Using Ultra-Thin Sections. <i>R. Pusch</i>	1966	10:—
16.	Stability of Clay at Vertical Openings. <i>B. Broms & H. Bennermark</i>	1967	10:—

No.	Pris kr. (Sw. crs.)
17. Om påslagning och påbärighet.	1967 5:—
1. Dragsprickor i armerade betongpålar. <i>S. Sahlin</i>	
2. Sprickbildning och utmattning vid slagning av armerade modellpålar av betong. <i>B-G. Hellers</i>	
3. Bärighet hos släntberg vid statisk belastning av bergspets. Resultat av modellförsök. <i>S-E. Rehnman</i>	
4. Negativ mantelfriktion. <i>B. H. Fellenius</i>	
5. Grundläggning på korta pålar. Redogörelse för en försöks- serie på NABO-pålar. <i>G. Fjellner</i>	
6. Krokiga pålars bärförmåga. <i>B. Broms</i>	
18. Pålgruppers bärförmåga. <i>B. Broms</i>	1967 10:—