

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Negativ mantelfriktion längs pålar

Bengt Broms

Stockholm 1979



rapport 60

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Negativ mantelfriktion längs pålar

Bengt Broms *

*Professor, KTH, Institutionen för jord- och bergmekanik, Stockholm

De i rapporten framförda bedömningarna är författarens och behöver ej vara Pålkommisionens.

Stockholm 1979

Pris 40:—.



rapport 60

NEGATIV MANTELFRIKTION LÅNGS PÅLAR

Bengt B. Broms

SAMMANFATTNING

Belastningen i spetsbärande pålar kan öka på grund av negativ mantelfriktion vid sättningar i den omgivande jorden. Därvid bär pålarna även en del av den omgivande jorden. Sättningar kan förorsakas av en uppfyllning kring en pålad byggnad eller av en sänkning av grundvattennivån. Ökningen av belastningen i pålarna på grund av negativ mantelfriktion kan bli så stor att pålarna krossas eller att deras deformation blir så stor att den ovanliggande byggnaden skadas.

En inventering av byggnader som skadats har utförts i denna rapport liksom av de metoder som kan användas för att beräkna påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion för såväl enskilda pålar som för pålgrupper. Man kan minska påhängskraften genom att t ex minska pål-avståndet eller antalet pålar i en pålgrupp. Påhängskraften kan även reduceras med elektro-osmos, genom att bestryka pålarna med asfalt eller genom att omge pålarna med ett bentonitskikt.

NEGATIV MANTELFRIKTION LÅNGS PALAR
Bengt B. Broms

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sid
SAMMANFATTNING	I.
1. INLEDNING	1
2. INVERKAN AV INSTALLATIONSFÖRFARANDET PÅ NEGATIV MANTELFRIKTION	5
3. SKADEFALL	9
4. MODELL- OCH FÄLTFÖRSÖK	12
5. FAKTORER SOM PÅVERKAR NEGATIV MANTELFRIKTION	24
6. BERÄKNING AV NEGATIV MANTELFRIKTION	45
7. DIMENSIONERINGSMETODER	56
8. BELASTNINGSFÖRSÖK	64
9. FÖREBYGGANDE ÅTGÄRDER	67
10. SLUTSATSER	78
REFERENSER	80

INLEDNING

Redan vid början av detta sekel kände man till att belastningen i pålar kan öka på grund av negativ mantelfriktion¹⁾ när den omgivande marken sätter sig såsom visas i fig 1 för en byggnad och i fig 1b för ett brofundament (Aldrich, 1970). I båda fallen kommer pålarna att bära även en del av den omgivande jorden, vilket i flera fall har lett till att pålar har krossats eller erhållit så stora sättningar att den pålade byggnaden har skadats.

Det är först under de senaste 20 åren som man mera systematiskt har undersökt negativ mantelfriktion och hur denna påverkar både enstaka pålar och pålgrupper. Förvånansvärt få fall har rapporterats i litteraturen där byggnader och andra konstruktioner har skadats på grund av negativ mantelfriktion. Detta kan delvis förklara bristen på intresse för detta problem.

Negativ mantelfriktion är främst ett problem i länder där stora områden med lös lera förekommer, såsom i Sverige, Norge, Finland, USSR, Holland, Kanada, USA, Mexiko, Japan och Thailand.

I Sverige har pågått och pågår fortfarande en debatt angående negativ mantelfriktion och dess inverkan på enstaka pålar och pålgrupper och om man över huvud taget vid dimensionering av stödpålar eller flytande pålar (kohesions- eller friktionspålar) skall ta hänsyn till de påhängskrafter som kan förorsakas av negativ mantelfriktion. Det har påpekats att det inte finns något känt fall i Sverige där en byggnad grundlagd på stödpålar har skadats på grund av negativ mantelfriktion (Severinson, 1965). Situationen i Sverige är typisk för förhållandena i många andra länder i världen.

Det finns inga föreskrifter i Svensk Byggnorm 1975 som behandlar negativ mantelfriktion eller hur man skall ta hänsyn till negativ mantelfriktion vid dimensionering. Det finns endast vissa generella föreskrifter såsom

"Grundkonstruktionen utformas så, att för byggnadens funktion skadliga formändringar och sprickbildningar eller andra olägenheter på grund

1) Även termen negativ mantelkohesion förekommer. I engelskt språkbruk används termen "negative skin friction" både för friktionsjord och kohesionsjord.

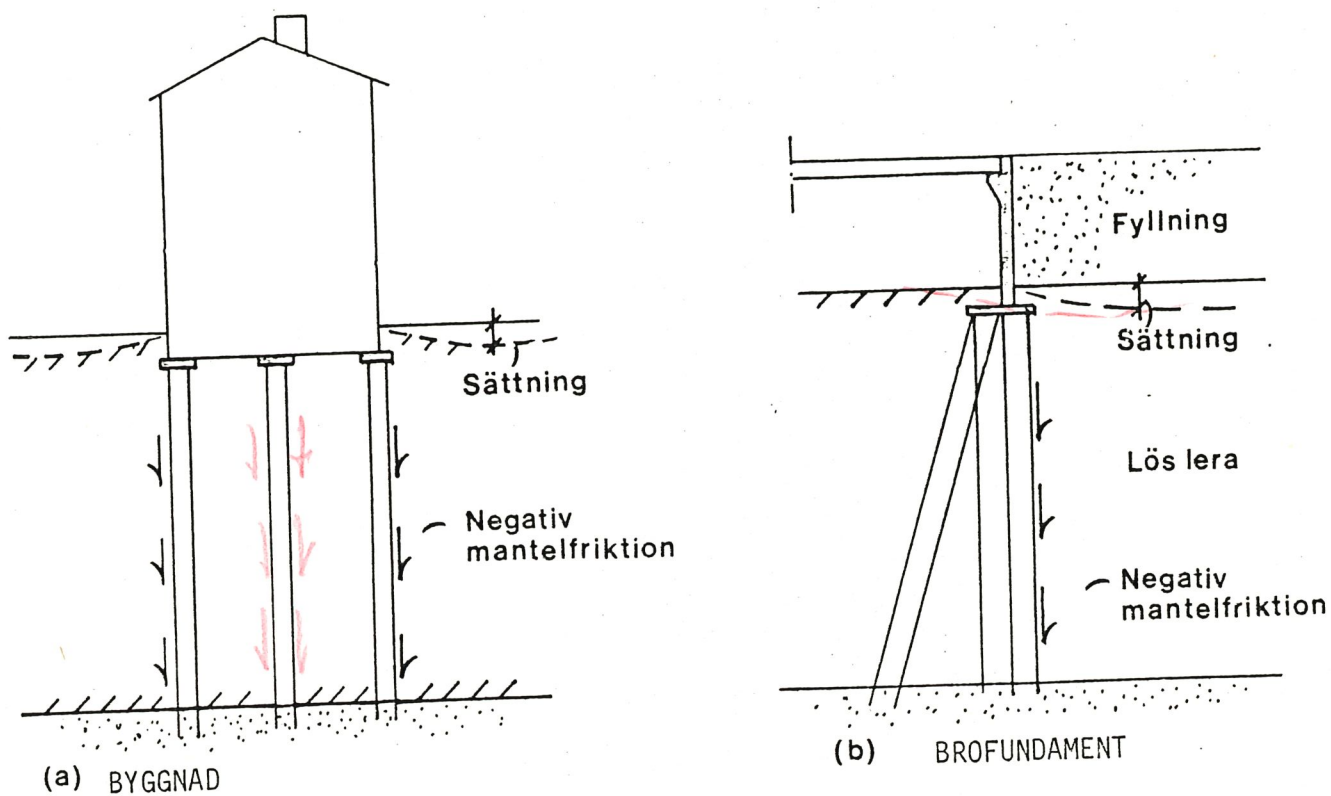
av rörelser i jordlagren under eller intill byggnaden undviks". (SBN 1975, kap 23:21).

"Grundkonstruktion med pålar anordnas så, att den med betryggande säkerhet kan överföra uppträdande laster under bruksstadiet till underliggande jord eller berg utan att för byggnaden skadliga sättningar uppstår. Lämplig påltyp bestäms på grundval av de geotekniska förhållandena och byggnadens konstruktion". (SBN 1975, kap 23:61). I det förslag till revision av SBN 1975 som har utarbetats behandlas negativ mantelfriktion. Där anges regler för hur negativ mantelfriktion skall beräknas både för enskilda pålar och för pålgrupper.

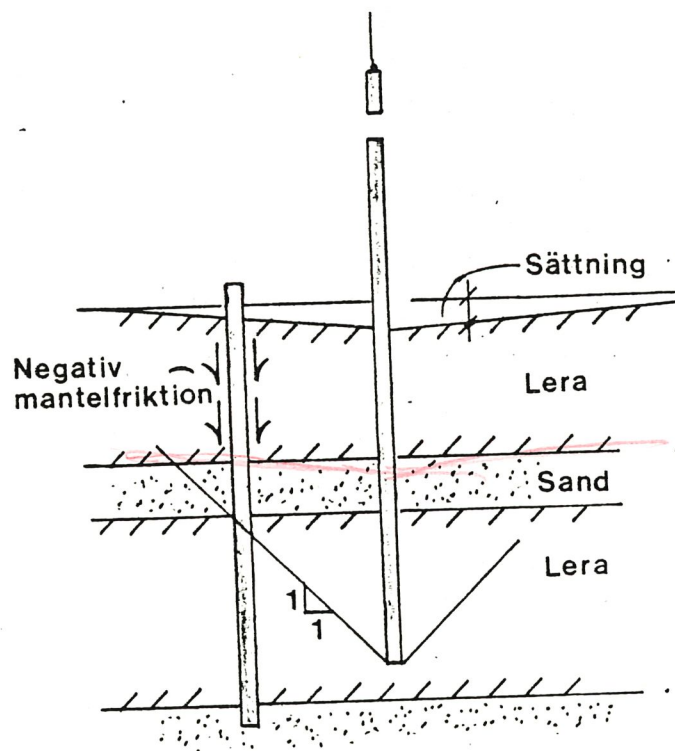
Påhängskrafter förorsakade av negativ mantelfriktion kan förorsakas av

- (a) Sättningar från en sänkning av grundvattennivån.
(Detta är framförallt ett problem i lös normalkonsoliderad eller svagt överkonsoliderad lera. En sänkning av grundvattennivån förorsakar en ökning av det effektiva överlagringstrycket i jorden. Upp till 4 m stora sättningar har exempelvis observerats i Tokyo på grund av en sänkning av grundvattennivån (Kishida och Takano, 1976). Upp till 10 m stora sättningar har observerats i Mexico City).
- (b) Sättningar från en uppfyllning runt en pålad byggnad grundlagd på normalkonsoliderad eller svagt överkonsoliderad lera eller från ett upplag av kol, virke, stålämnen etc.
- (c) Sättningar orsakade av den störning som sker vid slagning av pålar i normalkonsoliderad eller svagt överkonsoliderad lera.

Pålar kan även påverkas av negativ mantelfriktion vid slagning av närliggande pålar såsom illustreras i fig 2. Detta kan inträffa när pålar slås genom ett lager med löst lagrad sand såsom har rapporterats av exempelvis Gregersen et al (1973). Sättningar uppstår i detta fall på grund av att sanden runt pålen packas under slagningen. Främst berörs ett konformat område vars sidor lutar 1:1 såsom visas i fig 2.



Figur 1. Negativ mantelfriktion längs pålar.



Figur 2. Sättningar i sand förorsakad av påslagning.

Närbelägna pålar kommer då att påverkas eftersom jorden sätter sig i förhållande till de redan slagna pålarna. En ökning av påhängskraften har observerats av Brons et al (1969a) vid slagning av närliggande pålar. Endast en mycket liten sättning, ett par millimeter, erfordrades för att ändra mantelfriktionen från positiv till negativ. Den ordning som pålarna slås har därför stor betydelse för hur pålarna är belastade efter slagningen.

Det är först under de senaste tio åren som man i Sverige har beaktat de problem som är förknippade med en sänkning av grundvattennivån och som man har vidtagit åtgärder för att begränsa eller förhindra en fortsatt sänkning av grundvattennivån. Det finns flera områden i Stockholm där grundvattennivån har sjunkit och där pålade konstruktioner har påverkats. Man har försökt att motverka en sänkning av grundvattennivån genom att på konstgjord väg infiltrera vatten genom rör nedsatta i jorden från markytan eller från tunnlar i det underliggande berget. Man har även försökt infiltrera vatten genom sten- eller grusfyllningar.

Flera faktorer påverkar påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion nämligen

- Jordens egenskaper runt de slagna pålarna såsom kompressibilitet, skjuvhållfasthet och permeabilitet.
- Belastningen i jorden runt de slagna pålarna, eventuell förändring av grundvattennivån samt tjockleken hos de olika kompressibla lagren. Även belastningshastigheten och variationer av belastningen har betydelse.
- Pålmaterialets egenskaper såsom elasticitetsmodul och ytans råhet. Även pålavstånd, pållängd och pålgruppens storlek påverkar påhängskraften. Dessa olika faktorer måste beaktas i en analys av negativ mantelfriktion och dess inverkan på både enskilda pålars och pålgruppers bärförmåga.

Flera metoder för beräkning av negativ mantelfriktion har föreslagits. En del av dessa är mycket komplicerade eftersom de tar hänsyn till hur samverkan mellan pålarna i en pålgrupp och den omgivande jorden påverkas av pålarnas elastiska hoptryckning och av sättningar

i jorden runt och under pålarna vilket påverkar den neutrala punktens läge i pålarna. (I den neutrala punkten motsvarar pålarnas sättning sättningen i den omgivande jorden. I den neutrala punkten är den relativa förskjutningen mellan pålar och omgivande jord lika med noll).

Det finns få mätresultat som visar vilken relativ förskjutning som erfordras för att man skall erhålla maximal mantelfriktion och hur denna relativa förskjutning påverkas av exempelvis hur pålarna har installerats och av den omgivande jordens egenskaper såsom sensitivitet, rapiditet, förbelastning och av tiden.

I denna rapport har undersökts de faktorer som påverkar påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion. En granskning har skett av fall där man mätt negativ mantelfriktion och av de metoder som finns för beräkning av påhängskrafter förorsakade av negativ mantelfriktion.

2. INVERKAN AV INSTALLATIONSFÖRFARANDET PÅ NEGATIV MANTELFRIKTION

Sättningar

I lera sker en omrörning av jorden runt en påle under nedslagningen inom ett område från pålen som motsvarar en påldiameter. Den efterföljande sättningen på grund av lerans återkonsolidering leder till att belastningen i pålen gradvis ökar på grund av negativ mantelfriktion. Denna effekt har påtalats av exempelvis Casagrande (1932). Cummings et al (1950) tvivlade emellertid på att omrörningen under nedslagningen kunde vara tillräcklig att framkalla sättningar och negativ mantelfriktion. Cummings et al observerade att störningen på grund av påslagning var liten och begränsad till några centimeter runt en slagen påle och att återkonsolideringen i leran skedde i huvudsak genom att jorden dränerades horisontellt. Leran var i huvudsak ostörd.

Hypotesen att negativ mantelkohesion kunde förorsakas av påslagning stöddes av bl a Zeevaert (1950). Han hade nämligen iakttagit i ett fall i Mexico City en hävning som var 0,33 m vid slagning av 33,5 m långa skarvade träpålar. Sättningar erhöles efter slagningen som motsvarade hävningen under påslagningen. Sättningarna upphörde efter ca en månad. Även Tschoborarioff (1950) och Avery och Wilson (1950)

observerade stora sättningar som har förorsakats av påslagning.

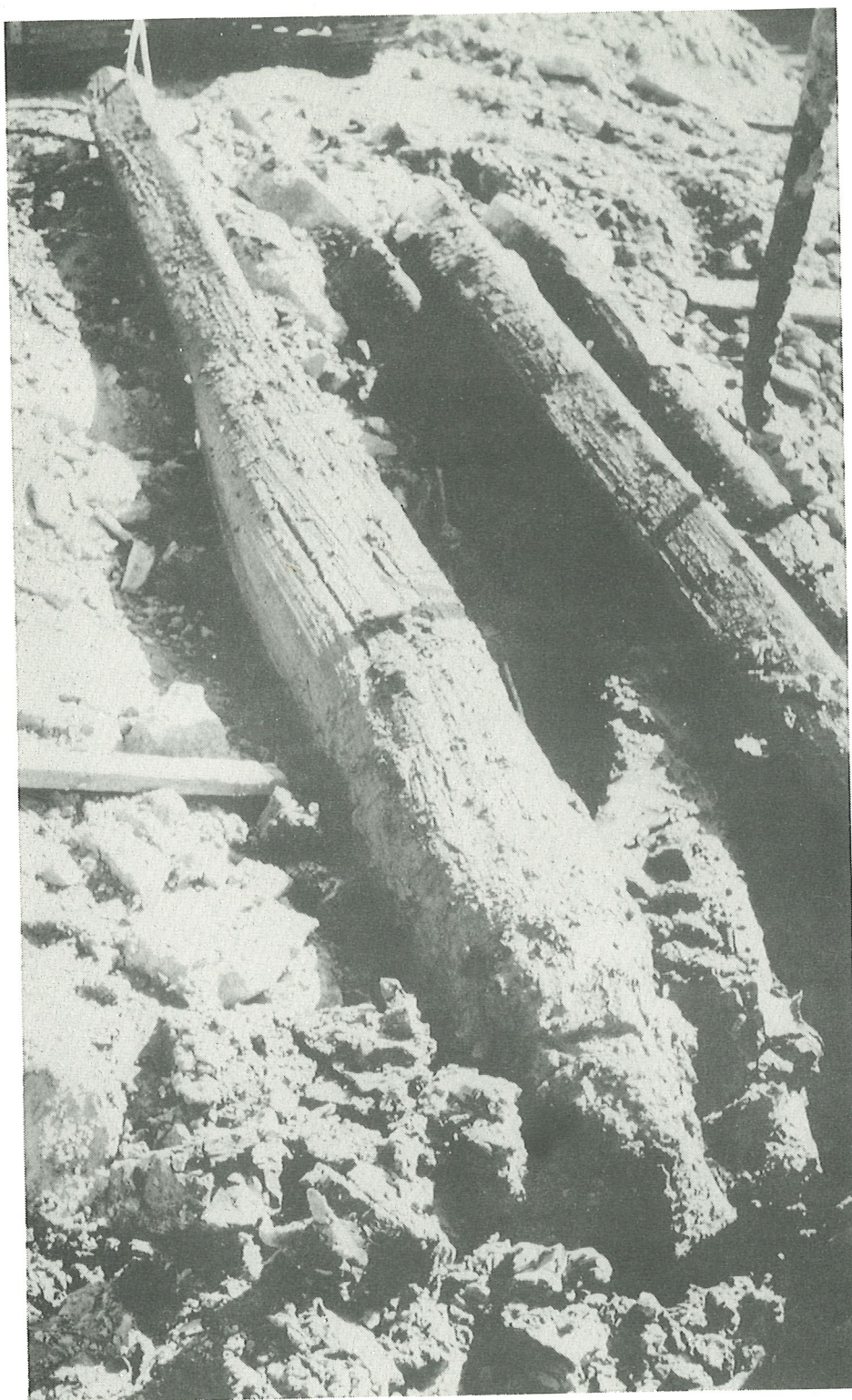
Det är allmänt accepterat i dag (1979) att den störning och omrörning som sker vid påslagning är fullt tillräcklig att förorsaka stora sättningar och höga påhängskrafter på grund av negativ mantelfriktion främst i spetsbärande pålar, att dessa sättningar ofta är av samma storleksordning som hävningen under själva påslagningen och att lerans återkonsolidering sker snabbt, inom ett par veckor eller ett par månader. Det är möjligt att reducera hävningen och den efterföljande sättningen på grund av påslagning och därmed den negativa mantelfriktionen genom att exempelvis slå pålarna innan man schaktar eller genom att ta upp lerproppar.

Skjuvhållfasthet

Jorden trängs i huvudsak åt sidan under nedslagningen. Runt pålarna finns en zon av omrörd jord. Den undanträngda jordens volym motsvarar i lera ungefär pålarnas sammanlagda volym.

Om en påle slås genom ett sandlager ned i ett underliggande lager med lös lera så följer sanden delvis med pålen. Pålen kommer att omges av ett lager med packad sand ned till ett djup under sandlagret som motsvarar ungefär 20 påldiametrar (Tomlinson, 1970, 1971). Påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion kan då bli högre än vad som svarar mot lerans skjuvhållfasthet. Om en påle slås genom ett lager med lös lera ned i ett lager med fast lera så följer den lösa lera delvis med pålen under nedslagningen ned till ett djup som motsvarar ca 20 påldiametrar. I detta fall reduceras den negativa mantelfriktionen.

Påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion påverkas av tjockleken hos den omrördazonen. Mätresultaten visar att lerans skjuvhållfasthet reduceras upp till ett avstånd från den slagna pålen som motsvarar pålens diameter. Zeevaert (1957) rapporterar att den omrördazonens tjocklek i Mexico City normalt ej är större än ca 5% av pålens radie. Utanför denna zon är lerans vattenhalt praktiskt taget oförändrad. Zeevaert påpekar att det effektiva överlagringstrycket runt en slagen påle efter lerans återkonsolidering har en tendens att gå tillbaka till sitt ursprungliga värde.



Figur 3. Lera som sitter fast på påle vid uppdragning.

Om lerans sensitivitet och rapiditet är höga kan leran runt den slagna pålen få en konsistens som liknar den hos ärtsoppa. Under slagningen kan den omrörda leran flyta upp längs pålen och ut på markytan. Träpålar måste ibland hållas nere under 10 à 20 minuter med hjälp av pålhammaren för att hindra att pålarna flyter upp.

En konsolidering sker av leran runt de slagna pålarna under det höga horisontaltryck som erhålls i leran under slagningen. Lerans skjuvhållfasthet i den omrörda zonen runt pålarna ökar gradvis och kommer som regel efter ett par månader att vara större även i kvicklera än den ursprungliga skjuvhållfastheten.

Den återkonsoliderade lerans hållfasthets- och deformationsegenskaper skiljer sig i allmänhet ifrån de för den ostörda leran. Den ostörda lerans egenskaper kan därför inte direkt användas vid beräkning av spänningsfördelningen längs en slagen påle på grund av omrörning och negativ mantelfriktion särskilt om lerans sensitivitet är hög. Det lerlager som i allmänhet följer med pålen när den dras upp efter ett par månader efter nedslagningen är en indikation på den ökning av skjuvhållfastheten som sker med tiden såsom påpekats bl a av Zeevaert (1973). I fig 3 visas en betongpåle som dragits upp ca 40 år efter nedslagningen. Pålen omges av ett ca 10 cm tjockt lager av fast lera.

Jorden störs runt en slagen påle till ett avstånd som motsvara pålens diameter såsom nämnts tidigare. Efter nedslagningen sker i lera en snabb återkonsolidering. Efter ett par veckor eller månader motsvarar den störda lerans skjuvhållfasthet minst den för den ostörda leran.

Porvattentryck

En kraftig ökning av porvattentrycket i jorden erhålls under nedslagningen. Detta porvattenövertryck utjämnas med tiden på grund av att leran dräneras dels radiellt från pålarna till den omgivande jorden, särskilt om jorden innehåller tunna sand- eller siltskikt, dels axiellt genom de radiella sprickor som bildas längs pålen under nedslagningen på grund av det höga porvattentrycket. Ökningen i porvattentrycket i normalkonsoliderad lera motsvarar i allmänhet 5 till

7 gånger lerans odränerade skjuvhållfasthet ($5\tau_{fu}$ till $7\tau_{fu}$). Utjämningen av detta porvattenövertryck sker som regel snabbt, vanligtvis erfordras ett par veckor eller ett par månader (t ex Clark och Meyerhof, 1973).

3. SKADEFALL

Flera fall har rapporterats i litteraturen där skador på byggnader och andra konstruktioner har förorsakats av negativ mantelfriktion. Pålarna har som regel slagits genom ett lager med torv, lös lera eller silt. Alldeles innan eller efter påslagningen har det skett en uppfyllning av området eller en grundvattensänkning. Skadorna har förorsakats av sättningar i de kompressibla lagren runt pålarna på grund av den ökade belastningen från fyllningen eller från sänkningen av grundvattennivån.

Argentina

Moretto och Bolognesi (1960) har beskrivit två fall i Argentina där byggnader har blivit skadade på grund av negativ mantelfriktion. De observerade snedsättningarna var relativt stora, upp till 0,18 m.

Frankrike

En byggnad som skadats svårt på grund av negativ mantelfriktion har beskrivits av Florentin och l'Heriteau (1948a, 1948b). Byggnaden var grundlagd på runda betongpålar med 0,8 m diameter. Pålarna hade slagits genom 4 m fyllning och ett djupt lager med lös lera (22 m). Byggnaden hade satt sig upp till 0,3 m.

Aven Buisson et al (1960) har beskrivit ett fall utanför Paris där en byggnad hade skadats på grund av negativ mantelfriktion.

Holland

Miller (1938) har relaterat ett fall i Holland där en fabriksbyggnad har skadats på grund av negativ mantelfriktion. Upp till 20 m långa träpålar hade slagits genom 5 m fyllning (sand), 13 m lös lera och torv ned i ett underliggande sandlager. Byggnaden satte sig 0,7 m under fyra år. Påhängslasten på grund av negativ mantelfriktion uppskattades till 0,15 MN/påle. Byggnaden måste grundförstärkas.

Japan

Kishida et al (1976) har beskrivit flera byggnader i Japan som har skadats på grund av negativ mantelfriktion. Sättningarna var förorsakade av en sänkning av grundvattennivån.

Kanada

I Kanada har man observerat i flera fall (Stermac, Devata och Selby (1968)) att landfästen för broar har tippat bakåt. Denna rotation har troligtvis förorsakats av negativ mantelfriktion på grund av uppfyllning bakom brolandfästena såsom påpekats av Bjerrum (1969).

Mexico

Zeevaert (1973), Gonzales Flores (1959), Marsal och Mazari (1969) har beskrivit flera fall i Mexico City där byggnader har blivit skadade på grund av negativ mantelfriktion. Sättningarna i Mexico City har förorsakats av en sänkning av grundvattennivån. Mexico City har under lång tid täckt sitt vattenbehov med grundvatten. Upphängning av jord främst längs de pålar som varit belägna i hörnen och längs sidorna har förorsakat att byggnaderna satt sig ojämnt. Zeevaert rekommenderar att en grundkonstruktion utsatt för negativ mantelfriktion bör vara så styv att sättningsskillnader kan överbryggas.

Sverige

Författaren har nyligen träffat på ett fall där en pålgrundlagd byggnad har skadats på grund av påhängskrafter förorsakade av negativ mantelfriktion. Byggnaden var grundlagd på 17 m långa träpålar. Pålarna hade slagits ned i ett djupt lager med lös lera. En 1,4 till 1,8 m hög fyllning hade placerats kring det skadade huset. Uppmätta maximala sättningsskillnaden var 0,25 m. Byggnaden måste grundförstärkas.

Tailand

Brand och Luangdilok (1975) har beskrivit en fabriksbyggnad utanför Bangkok som har skadats på grund av negativ mantelfriktion. Byggnaden var grundlagd på kombinerade pålar. Överpålen var av betong medan underpålen var av trä. De 18 till 21 m långa pålarna hade slagits genom ett 15 m tjockt lager med lös lera. En 1,5 m hög sandfyllning hade placerats kring byggnaden. Sättningarna hade förorsakats dels

av en fyllning kring den skadade byggnaden, dels av en sänkning av grundvattennivån på grund av pumpning.

Tyskland

Weiss (1974) har rapporterat att flera byggnader i Tyskland har skadats på grund av negativ mantelfriktion.

USA

Det finns flera exempel i USA där byggnader har erhållit skador på grund av negativ mantelfriktion. Se t ex McKay (1938), Chellis (1961) och Johnson och Kavanagh (1968).

Moore har beskrivit ett fall där påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion har varit så stor att några av träpålarna under den pålade byggnaden hade slitits ut ur sina plintar. Träpålarna hade slagits genom 13 m fyllning och 15 m dy och lera. Påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion uppskattades till 1,7 MN/påle. Liknande observationer har gjorts under en flyghangar i Californien. De pålar som skulle bära golvet hade dragits ut ur pålplintarna 25 till 500 mm (Roberts och Darragh, 1963). Även författaren har observerat, under en flyghangar vid La Guardiaflygfältet i New York City, att pålar har dragits ut ur sina plintar på grund av negativ mantelfriktion. Garlanger (1974) har rapporterat att pålar under ena landfästet för Cutler Circle Bridge utanför Boston har dragits ut ur sina infästningar.

Relativt stora sättningar erhöles vid återfyllning kring en pumpanläggning i Utah, USA, på grund av negativ mantelfriktion såsom har rapporterats av Gibbs och Merriman (1966). Sättningarna var sannolikt förorsakade av negativ mantelfriktion längs de pålar som var belägna längs byggnadens omkrets.

Sherman (1973) har observerat sättningar vid återfyllning kring en slussanläggning i Columbia Lock. Slussväggarna tippade bakåt mot återfyllningen. Uppmätta största sättningen var 120 mm. Det uppskattades att belastningen i pålarna hade ökat med 10% på grund av negativ mantelfriktion.

Shannon (1960) har beskrivit ett fall där en förankrad spontvägg har skadats på grund av negativ mantelfriktion längs de mothållspålar som användes vid denna konstruktion. Spontväggen rörde sig utåt 0,45 m när förankringspålarna satte sig.

En tunnel grundlagd på runda betongpålar med 0,4 m diameter har skadats allvarligt på grund av negativ mantelfriktion när pålarna satte sig. Pålarna hade slagits genom 8 m lös lera. Påhängslasten på grund av negativ mantelfriktion uppskattades till 0,8 MN/påle (Milner, 1957).

USSR

Det finns flera exempel i USSR där byggnader har skadats på grund av negativ mantelfriktion. Iovchuck och Babitskii (1967) har t ex rapporterat att en betong- och asfaltfabrik måste rivas i Leningrad efter det att byggnaden hade satt sig 0,6 m på grund av negativ mantelfriktion. I Riga måste ett magasin rivas när sättningsskillnaden förorsakad av negativ mantelfriktion var 0,25 m. (Bakholdin och Berman, 1974, Dalmatov et al 1975).

Sammanfattningsvis kan sägas att skador förorsakade av negativ mantelfriktion är relativt sällsynta. Relativt få fall där skador inträffat har rapporterats i litteraturen. I allmänhet har en fyllning placerats kring de skadade byggnaderna eller har en sänkning av grundvattennivån skett.

4. MODELL- OCH FÄLTFÖRSÖK

Negativ mantelfriktion har undersökts både på laboratorium och i fält. Uppmätt negativ mantelfriktion har jämförts i allmänhet med det effektiva överlagringstrycket i jorden eller med jordens odränerade skjuvhållfasthet (τ_{fu}).

Mantelmotståndet f_s längs en påle påverkas av det effektiva överlagringstrycket genom sambandet

$$f_s = K \tan \phi'_a \quad \bar{\sigma}_v = \beta \sigma'_v$$

där K är en jordtryckskoefficient som relaterar horisontaltrycket

($\bar{\sigma}_h$) i jorden med vertikaltrycket ($\bar{\sigma}_v$) och ϕ'_a är friktionsvinkeln mellan jord och pålmaterialet. Koefficienten β ($K \tan \phi'_a$) ger den sammanlagda effekten av jordtryckskoefficienten K och av friktionsvinkeln ϕ'_a .

Uppmätt negativ mantelfriktion har även jämförts med jordens odränerade skjuvhållfasthet bestämd med t ex vingborrförsök, konförsök eller tryckförsök.

$$f_s = \alpha \tau_{fu}$$

där α är en reduktionskoefficient som är beroende av jordens överkonsolideringsgrad, pålmaterialet (betong, trä eller stål) och den metod som används vid installation av pålarna (slagning, tryckning etc).

Modellförsök

Relativt få undersökningar har utförts på laboratorium. Negativ mantelfriktion längs små modellpålar i lera och silt har undersökts av t ex Elmasry (1963), Silva (1966), Koerner et al (1972), Zeevaert (1973), Takashi et al (1974), Ito och Matsui (1976) och av Kaniraj och Ranganatham (1978). Modellförsök i sand har utförts av Lebêque (1964) och Mazurkiewicz (1968). Bakholdin och Berman (1974) har undersökt på laboratorium negativ mantelfriktion längs betongpålar i torv.

Elmasry (1963) undersökte negativ mantelfriktion längs modellpålar med 50 mm diameter i en siltig lera. Jorden packades i lager i en behållare. Pålarna trycktes ned i den packade jorden. Elmasry undersökte systematiskt inverkan av jordens egenvikt, densitet och vattenhalt samt tjockleken hos det kompressibla lagret. Dessutom varierade pålarnas längd. Buckinghams teorem användes vid utvärderingen av försöksresultaten. Det finns emellertid alltid en viss osäkerhet i att extrapolera resultat från modellförsök till full skala särskilt för relativt små pålar. En ytterligare begränsning av Elmasrys undersökning är att endast ett jordmaterial undersöktes.

Koerner och Mukhopadhyay (1973) undersökte negativ mantelfriktion i en organisk siltig lera med hjälp av modellförsök. Pålarnas diameter var endast 25 mm. Både vertikala och lutande pålar undersöktes.

Mätresultaten visade att påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion ökade med ökad lutning hos pålarna och med ökat pålavstånd. En högre negativ mantelfriktion observerades för träpålar än för betongpålar.

Vid de undersökningar som utfördes av Silva (1966) i lerig silt i en 1,34 m hög stålbehållare användes en aluminiumpåle med 76 mm diameter. Koefficienten β varierade vid dessa försök mellan 0,11 och 0,29. Motsvarande variation för jordtryckskoefficienten K var mellan 0,25 och 0,65.

Negativ mantelfriktion i lera har undersökts av Takashi et al (1974). Pålarnas längd och diameter var 0,6 m respektive 48 mm. Spänningsfördelningen längs pålarna mättes med trådtöjningsgivare. Den genomsnittliga mantelfriktionen motsvarade ett värde på koefficienten β av 0,25. Koefficienten β varierade mellan 0,24 och 0,30.

Vid de undersökningar som utfördes av Ito och Matsui (1976) användes modellpålar med en diameter som varierade mellan 16 och 38 mm. Pållängden var 0,71 m till 0,76 m. Både enskilda pålar och pålgrupper undersöktes. Finita element-metoden användes vid analys av försöksresultaten.

Även Kaniraj och Ranganatham (1978) undersökte negativ mantelfriktion med modellpålar. Den relativa förskjutning som erfordrades för att erhålla maximal mantelfriktion bestämdes med treaxliga försök. Både ostörda och omrörda prover undersöktes. Den relativa förskjutning som erfordras för att uppnå maximalt mantelmostånd ökade med ökat konsolideringstryck.

Lebéque (1964) undersökte negativ mantelfriktion i sand. Han fann att påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion var lika stor som utdragsmotståndet. Den negativa mantelfriktionen ökade linjärt med djupet och med ökad inre friktionsvinkel hos jorden. Koefficienten $\beta = K \tan \phi$ var lika med 2 ($\tan \phi' - \tan 24^\circ$) vid ϕ' mellan 30° och 40° . Vid $\phi' = 30^\circ$ var koefficienten $\beta = 0,26$ och vid $\phi' = 40^\circ$ var $\beta = 0,76$.

Även Mazurkiewicz (1968) har undersökt pålars mantelfriktion i sand. Pålarnas diameter var 50 mm. Den positiva mantelfriktionen var ungefär dubbelt så stor som den negativa mantelfriktionen. Försöksresultaten visade således att deformationsriktningen har stor inverkan på mantelmoståndet.

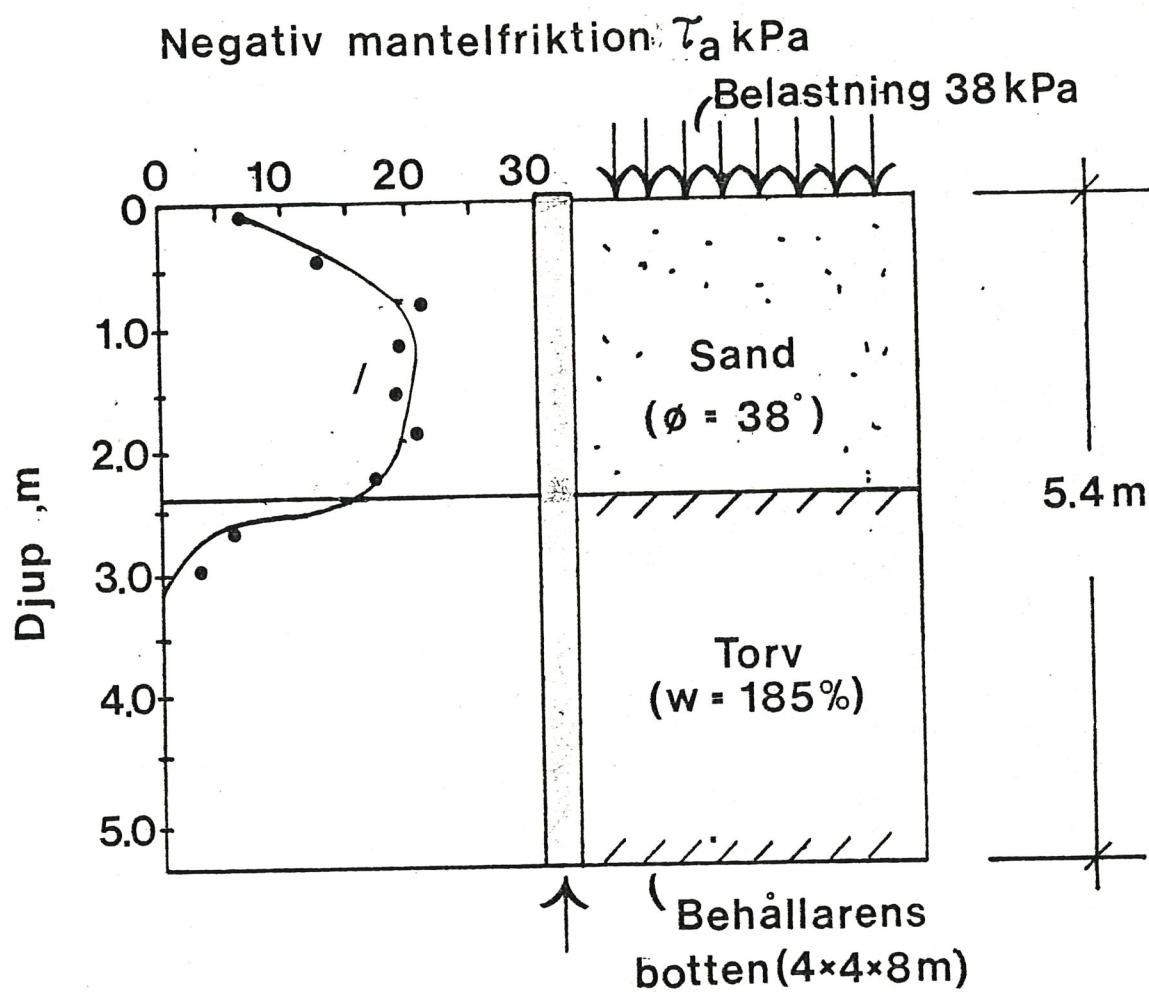
Bakholdin och Berman (1974) undersökte påhängslasten längs en 5,8 m lång betongpåle (0,25 x 0,25 m) förorsakad av negativ mantelfriktion. Pålen hade slagits genom ett 2,5 m tjockt sandlager ned i ett underliggande lager med torv. Försöken utfördes i en 4 x 4 x 8 m betongbehållare. Jorden belastades på ytan med betongblock (38 kPa). Den sättning som erfordrades för att erhålla maximalt mantelmotstånd i den packade sanden var relativt stor (50 till 60 mm). Mantelmotståndet ökade ungefär linjärt med ökad relativ förskjutning. Den sättning som erfordrades för att helt eliminera den negativa mantelfriktionen längs pålen var försumbar.

Den reduktion av överlagringstrycket i jorden som förorsakades av negativ mantelfriktion befanns vara störst närmast pålen. Överlagringstrycket ökade approximativt expotentiellt med avståndet från pålen. Upphängningen i det 2,5 m tjocka sandlagret var nästan konstant (200 kPa) utom närmast ytan såsom visas i fig 4. Sandens densitet var $1,65 \text{ t/m}^3$ vilket motsvarar ett totalt överlagringstryck av 40 kPa vid botten av sandlagret och ett värde på β av 0,52 vid ytan och 0,26 vid botten av sandlagret.

Fältförsök

Försök med instrumenterade pålar i fält har utförts av Gant, Stephens och Moulton (1958), van Weele (1964), Johannessen (1965, 1966), Johannessen och Bjerrum (1965), Bjerrum, Johannessen och Eide (1969), Bozozuk (1970, 1972), Fellenius (1969, 1970, 1972), Fellenius och Broms (1969), Brons et al (1969a, 1969b), Cognon (1972), Heijnen och Lubking (1973), Walker och Darvall (1973), York et al (1974), Garlanger (1974), Bakholdin och Berman (1974), Grigoryan et al (1975) och av Takashi och Sawaguchi (1976).

Påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion från en 15 m hög vägbank intill ett brolandfäste för Connecticut Turnpike har undersökts av Gant, Stephens och Moulton (1958). Tre instrumenterade



Figur 4. Negativ mantelfriktion i sand (efter Bakholdin och Berman, 1974).

pålar slogs genom vägbanken och ett lager med marin lerig silt. Påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion ökade kraftigt med tiden. En analys av försöksresultaten visar att den negativa mantelfriktionen i sandfyllningen motsvarade ett värde på koefficienten $\beta (K \cdot tg\phi_a)$ av 0,19. I den leriga silten var den negativa mantelfriktionen ungefär lika med jordens odränerade skjuvhållfasthet.

van Weele (1964) har undersökt påhängslasten på tre träpålar som slagits genom 6 m sand och 4 m lös lera ned i ett underliggande sandlager. Avståndet mellan pålarna var 4 m. Påhängslasten på pålarna var förorsakad av en sänkning av grundvattennivån i de permeabla bottenlagren. En mycket liten relativ förskjutning fordrades, ca 10 mm, för att erhålla maximal negativ mantelfriktion. van Weele drog slutsatsen att påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion motsvarade pålarnas utdragsmotstånd.

Johannessen (1965, 1966) och Johannessen och Bjerrum (1965) har i Norge undersökt den negativa mantelfriktion som påverkade två ca 55 m långa stålspålar. Pålarna hade slagits till berg genom ett tjockt lerlager. Leran var svagt organisk ned till ca 20 m djup med en genomsnittlig vattenhalt av 40%. Skjuvhållfastheten ökade med djupet från ca 20 kPa till 50 kPa. En ca 10 m tjock fyllning hade placerats runt de slagna pålarna. Spänningsfördelningen längs pålarna mättes med stålstänger som var nedsatta i rör. Sättningen efter 1,3 år var ca 1,8 m. Koefficienten $\beta (K \cdot tg\phi_a)$ ökade från 0,12 när pålarna installerades till 0,20 sexton månader senare. Det största värdet på koefficienten β uppskattades till 0,20.

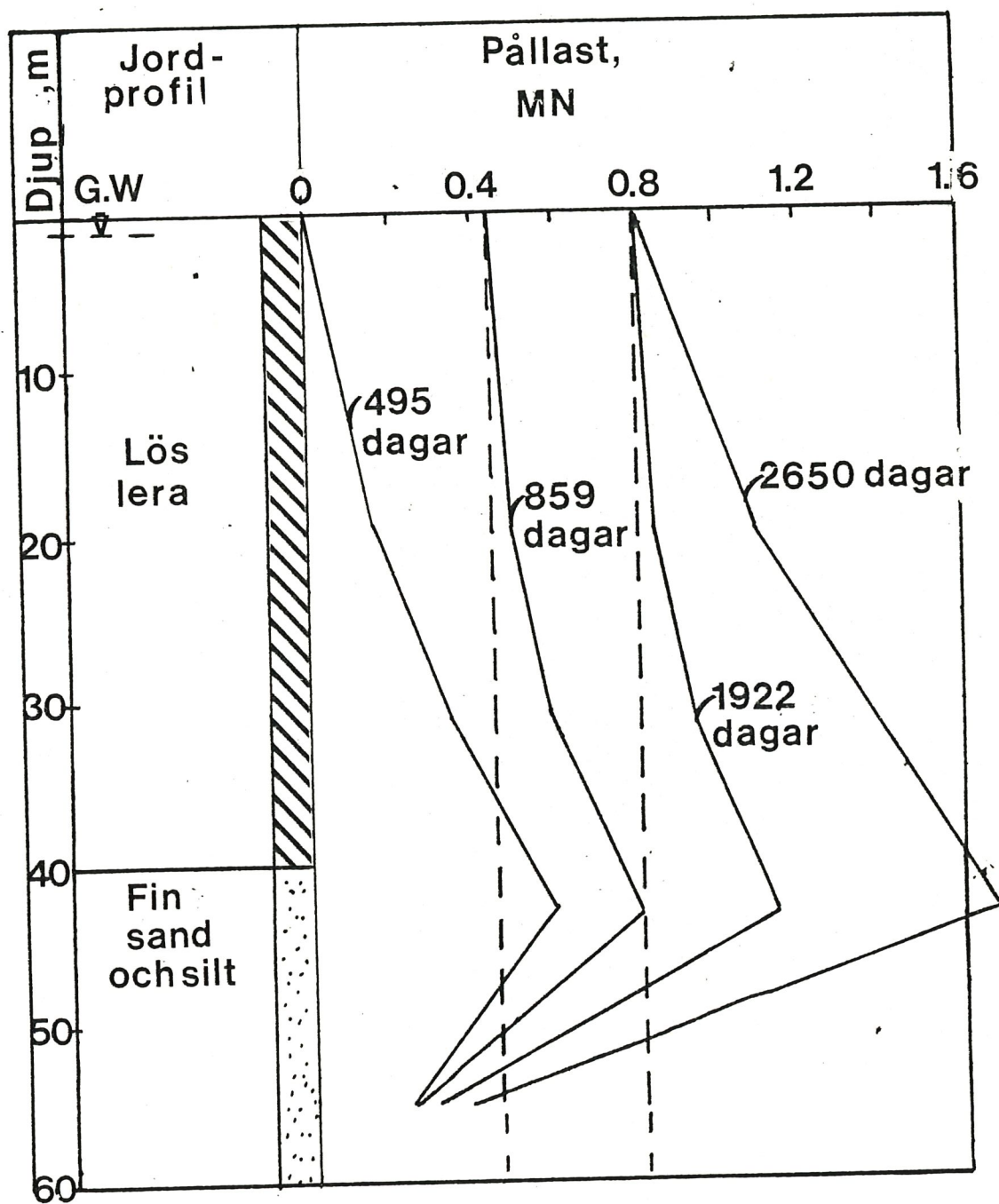
Påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion har undersökts av Labregue (1968) och Bozozuk (1970) längs två 82 m långa betongpålar. Pålarnas diameter var 1,0 m. Pålarna hade slagits till berg genom ett djupt lager med lös lera. Pålarna hade dimensionerats för en belastning av 18 MN. Påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion uppskattades till 10,9 MN. Uppmätt påhängslast på grund av negativ mantelfriktion var 7,6 MN/påle. Lastfördelningen längs pålarna beräknades med hjälp av den elasticitetsmodul som bestämdes från tryckförsök på betongcylindrar med 150 mm diameter. Den beräknade mantelfriktionen är därför osäker.

Negativa mantelfriktionen längs två instrumenterade betongpålar har undersökts av Fellenius och Broms (1969), Fellenius (1969, 1971) och Bjerin (1977). Pålarna hade slagits genom 40 m lös lera, 13 m silt ned i ett underliggande 15 m tjockt sandlager. Negativa mantelfriktion på grund av lerans omrörning under nedslagningen och från den efterföljande återkonsolideringen mättes liksom den negativa mantelfriktionen som förorsakades av en 1,7 m hög fyllning runt de slagna pålarna. En speciell lastcell hade utvecklats så att lastfördelningen i pålarna kunde mätas med stor noggrannhet (Fellenius och Haagen, 1969).

Ett högt porvattenövertryck erhöles under själva nedslagningen som t o m översteg det totala överlagringstrycket i jorden. Detta porvattenövertryck utjämnades efter ca 5 månader. Belastningen i pålarna alldeles efter nedslagningen motsvarade pålarnas egenvikt såsom visas i fig 5 för påle PII. Påhängslasten ökade gradvis. Efter ca 5 månader var den 0,25 MN till 0,30 MN vilket motsvarar 17% av lerans ursprungliga skjuvhållfasthet ($\alpha = 0,17$) eller 5% av det effektiva överlagringstrycket ($\beta = 0,05$). Efter 17 och 28 månader var belastningen i påle PII 0,44 MN respektive 0,80 MN.

En 1,7 m hög fyllning placerades runt pålarna 64 månader (5,3 år) efter nedslagningen. Påhängslasten i pålarna på grund av negativ mantelfriktion var 0,83 MN och 0,87 MN i de två pålarna efter 7,3 år vilket var större än den påförda belastningen på pålarna (0,80 MN). Påhängslasten på grund av negativ mantelfriktion längs pålarnas övre del var 20% å 25% av det effektiva överlagringstrycket ($\beta = 0,20$ å 0,25) vilket motsvarar 55% respektive 61% ($\alpha = 0,55$ å 0,61) av lerans ursprungliga skjuvhållfasthet. Vid pålarnas mitt motsvarade den negativa mantelfriktionen 40% å 49% ($\alpha = 0,40$ å 0,49) av lerans odränerade skjuvhållfasthet.

Negativa mantelfriktionen längs stål-pålar med 0,30 till 0,50 m diameter har undersökts av Bjerrum et al (1969) vid två platser i Norge. Vid den ena platsen hade pålarna slagits genom en 10 m tjock fyllning och 40 m normalkonsoliderad lera. Vid den andra försöksplatsen hade pålarna slagits genom en 13 m till 15 m tjock sprängstensfyllning och 25 m till 45 m lös lera ned till berg på 40 till 60 m djup. Mätresultaten visade att endast en mycket liten sättning erfordrades



Figur 5. Negativ mantelfriktion i påle III (efter Bjerin, 1977).

för att erhålla maximal negativ mantelfriktion. Denna motsvarade i leran 20% till 25% av det effektiva överlagringstrycket ($\beta = 0,20$ ä $0,25$).

Försök gjordes att med asfalt eller bentonit minska påhängskraften. Mätningarna visar att påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion minskade med över 90% för de pålar som hade bestrukits med asfalt. Även elektro-osmos prövades. Påhängskraften minskade med 50% efter behandling med elektro-osmos.

Negativ mantelfriktion längs platsgjutna och slagna pålar har undersökts av Brons, Amesz och Rinck (1969a, 1969b). Närliggande pålar påverkades under slagningen när sanden packades runt pålarna även när avståndet var så stort som 5 m. Även slagningsordningen hade stor betydelse. Den negativa mantelfriktionen var störst för de pålar som hade slagits först. Skillnaden i påhängskraft mellan pålarna minskade emellertid med tiden när sättningarna ökade. Endast en mycket liten sättning erfordrades för att avsevärt ändra belastningen i pålarna på grund av negativ mantelfriktion. T o m rörelserna i jorden förorsakade av flod och ebb i en intilliggande hamnbassäng var fullt tillräckliga för att påverka belastningen i pålarna.

Endo et al (1969) undersökte påhängslasten på grund av negativ mantelfriktion i stålplålar med 0,7 m diameter. Pålängden var 43 m. Pålarna hade slagits genom 2 m fyllning, 7 m siltig sand och 30 m lös lera med nederänden antingen öppen eller sluten. Den negativa mantelfriktionen längs pålarna förorsakades av sättningar från en sänkning av grundvattennivån i de permeabla bottenlagren. Det är intressant att konstatera att påhängskraften i påle CE 43 på grund av negativ mantelfriktion var liten ned till 15 m djup. Påhängskraften ökade upp till två år efter nedslagningen. Den största sättningen vid markytan var 0,172 m.

Påhängskraften var lägre än lerans odränerade skjuvhållfasthet för de pålar där nederänden hade varit öppen under nedslagningen medan den för de pålar där nederänden var sluten var något större än lerans odränerade skjuvhållfasthet. Koefficienten β var lika med 0,35 för de slutna pålarna och 0,20 för de öppna pålarna. För de

slutna pålarna motsvarade påhängskraften c/p-talet för den ostörda leran. Någon tendens att påhängslasten skulle minska när sättningshastigheten gradvis avtog kunde inte iakttas. Pålarna satte sig något och den neutrala punkten förflyttades gradvis uppåt. Den neutrala punkten i pålarna var belägen på ett djup som motsvarade 0,73 H till 0,78 H där H är det kompressibla lagrets tjocklek.

Bozozuk (1970, 1972) undersökte påhängslasten längs en 49 m lång stålpåle med 0,30 m diameter på grund av negativ mantelfriktion. Pålen hade slagits genom 9 m fyllning ned i ett underliggande lager med lös lera. Påhängslasten efter 5 år var 1,40 MN. Pålen hade då satt sig 0,47 m. Den neutrala punkten i pålen rörde sig gradvis nedåt. Mantelfriktionen i sandfyllningen var hög, 83 kPa vid fyllningens överkant och 34 kPa vid underkanten. I leran översteg den negativa mantelfriktionen lerans odränerade skjuvhållfasthet bestämd med vingborrförsök. Alldeles under fyllningen hade skjuvhållfastheten nästan ökat med 100%. Den genomsnittliga negativa mantelfriktionen var nästan en tredjedel av det genomsnittliga överlagringstrycket ($\beta = 0,33$).

Cognon (1972) har vid flera platser i Frankrike bestämt negativ mantelfriktion i torv. Pålarnas diameter var 0,53 m. Den negativa mantelfriktionen varierade mellan 14% och 68% av torvens odränerade skjuvhållfasthet. Den genomsnittliga negativa mantelfriktionen motsvarade 42% av torvens odränerade skjuvhållfasthet ($\alpha = 0,42$).

I Holland har Heijnen och Lubking (1973) undersökt negativ mantelfriktion för både enskilda pålar och pålgrupper med prefabricerade betongpålar. Pålarnas sida var 0,3 m. Pålarna hade slagits genom ca 9 m lera och torv längs kanten av en ca 9 m hög vägbank. Sanddräner hade installerats under vägbanken i den lösa leran innan pålarna slogs. Påhängskraften i pålarna på grund av negativ mantelfriktion ökade kraftigt med tiden. Efter 80 dagar var påhängslasten 0,25 MN till 0,90 MN per påle.

Walker och Darvall (1973) har i Australien undersökt påhängslasten längs två stålpålar med 0,76 m diameter. Pålarna var nedslagna 15 m i fast, siltig lera. En påle hade bestrukits med asfalt för att reducera påhängslasten. Maximal påhängslast för den obehandlade pålen var 1,80 MN vid den nedre tredjedelpunkten. Maximal påhängskraft

för den behandlade pålen var endast 0,03 MN, dvs 2% av påhångslasten i den obehandlade pålen. Liknande observationer har gjorts i Österrike av Rieder (1976) för en platsgjuten betongpåle med 0,9 m diameter som var nedslagen i lerig silt.

I Italien har Appendino (1973) undersökt negativ mantelfriktion längs en platsgjuten betongpåle med 1,0 m diameter. Pålen hade installerats i ett 30 m tjockt lerlager. Pålens totala längd var 46 m. Påhångslasten i pålen på grund av negativ mantelfriktion uppskattades till 0,2 MN.

York, Miller och Ismael (1974) har undersökt påhångslasten för en pålgrupp vid LaGuardiaflygplatsen i New York. De ca 15 m långa stål-pålarna hade slagits genom en sandfyllning, organisk silt och torv ned till berg (skiffer). Pålarnas diameter var 0,32 m. Påhångslasten ökade gradvis och nådde ett maximum efter 250 dagar. Efter omkring fyra år var påhångslasten 0,073 MN/påle. Både vertikala och lutande pålar (7,5:1) undersöktes. Skillnaden i påhångslast mellan de båda påltyperna var liten. Där sanddräner ej hade använts motsvarade den uppmätta mantelkohesionen den som hade uppskattats medan i området med sanddräner var den uppmätta påhångslasten på grund av negativ mantelfriktion betydligt lägre än den som hade beräknats. En tillfällig (rörlig) last reducerade påhångslasten med 60%.

Negativ mantelfriktion längs stålprofilpålar (H-pålar) i ett brofundament (Cutler Circle Bridge) har undersökts av Galanger (1974). Pålarna hade slagits genom 7,6 m fyllning, 4 m sand och 15 m lera. Påhångslasten på grund av negativ mantelfriktion uppskattades till 0,89 MN vilket motsvarar ett värde på koefficienten β av 0,20 å 0,25 i leran och 0,30 å 0,40 i sanden.

Bakholdin och Berman (1974) har undersökt i fält påhångskraften längs tio 16 m långa prefabricerade betongpålar (0,30 x 0,30 m). Pålarna hade slagits genom 1,6 m sand, 3 m lös organisk lera, 4 m lös siltig sand och 8 m lös organisk lera ned i ett underliggande sandlager. En 5 m tjock sandfyllning (25 m x 25 m) placerades över området runt pålarna. Sättningsarna från fyllningen avstannade efter 3 å 4 månader.

Weiss (1974) har utvärderat påhängslasten längs träpålar på grund av negativ mantelfriktion med dragförsök. Tre pålar slogs genom torv och dy ned till ett underliggande sandlager. Pålängden varierade mellan 12,4 och 19,5 m. Det uppmätta mantelmotståndet motsvarade den organiska jordens odränerade skjuvhållfasthet bestämd med tryckförsök ($\alpha = 1,0$).

Negativ mantelfriktion längs pålar nedslagna i löss har undersökts av Grigoryan och Grigoryan (1975) och av Grigoryan och Vliyanii (1975). Sex platsgjutna pålar undersöktes. Fyra pålar var försedda med en förstorad fot. Pålarna hade installerats innan området vallades in och fylldes med vatten under 2,5 månader. Två pålar belastades. Belastningen i pålarna ökade gradvis på grund av negativ mantelfriktion när jorden blev vattenmättad och kollapsade. Den neutrala punkten i Påle I och III vars längd var 16 m låg 10,5 m respektive 15,5 m under markytan. Den neutrala punkten i Påle III var således belägen nära den förstorade foten. I Påle II med en total längd av 22 m låg den neutrala punkten 11,3 m under markytan och således nära pålens mittpunkt. Påhängslasten i Påle I på grund av negativ mantelfriktion var 0,28 MN vilket motsvarar ett värde av 0,18 på koefficienten β om den neutrala punkten var belägen 10,5 m under markytan. Det har antagits i beräkningarna att jordens densitet är $1,5 \text{ t/m}^3$ och att grundvattennivån är belägen under pålarna. Det är intressant att konstatera att påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion ökade plötsligt när jorden blev vattenmättad.

Takashi och Sawaguchi (1975) har undersökt i fält negativ mantelfriktion längs fem 40 m långa stålplålar med 0,5 m diameter. Fyra pålar hade bestрукits med asfalt. För dessa pålar var påhängskraften liten och försumbar medan påhängskraften för den femte obehandlade pålen var 0,9 MN. Den negativa mantelfriktionen motsvarade ett värde av 0,25 på koefficienten β .

Sammanfattning

Negativ mantelfriktion har undersökts både i fält och på laboratorium. Försöksresultat visar att en liten relativ förskjutning mellan påle och omgivande jord erfordras, för att utveckla eller helt eliminera negativ mantelkohesion längs en påle. Påhängslasten på grund av

negativ mantelfriktion har jämförts med antingen det effektiva överlagringstrycket i jorden ($f_s = \beta \bar{\sigma}_v$) eller med jordens odränerade skjuvhållfasthet ($f_s = \alpha \tau_{fu}$).

5. FAKTORER SOM PÅVERKAR NEGATIV MANTELFRIKTION

Positiv och negativ mantelfriktion

Lastöverföringen mellan en påle och omgivande jord är beroende av pålens relativa förskjutning i förhållande till den omgivande jorden. När pålen rör sig nedåt i förhållande till jorden överförs belastningen i pålen till den omgivande jorden. Belastningen i pålen minskar i detta fall med ökat djup under markytan beroende på att mantelmotståndet är positivt. I det fall jorden rör sig nedåt visavi pålen på grund av sättning i jorden belastas pålen av den omgivande jorden. Belastningen i pålen ökar således i detta fall med djupet på grund av negativ mantelfriktion. Pålen bär inte bara belastningen från den ovanliggande konstruktionen utan även en del av den omgivande jorden.

Påhängslasten i en påle på grund av negativ mantelfriktion påverkas inte endast av den omgivande jordens hållfasthetsegenskaper utan även av pålens relativa förskjutning gentemot den omgivande jorden, av pålytans råhet och av sättningshastigheten.

Begemann (1969) har jämfört den negativa mantelfriktion som erhålls i lera med utdraghållfastheten. Påhängskraften i lös lera på grund av negativ mantelfriktion uppskattades vara ca 75% å 80% av utdraghållfastheten på grund av skillnaden i belastningshastighet. Även Rossichin (1970) har påpekat belastningshastighetens betydelse. I medelfast till fast lera bör dock den negativa mantelfriktionen motsvara utdragshållfastheten och de metoder som används för att beräkna positiv mantelfriktion bör kunna användas. Belastningshastighetens inverkan är liten och försumbar. Mantelmotståndet i överkonsoliderad lera påverkas emellertid av installationsförfarandet och av vald påltyp. Mantelmotståndet minskar i allmänhet med ökad pållängd på grund av pålens hoptryckning vid belastning såsom påpekats av Meyerhof (1976).

Utdragshållfastheten för pålar i friktionsjord (sand och grus) och därmed påhängslasten på grund av negativ mantelfriktion blir i allmänhet lägre än den positiva mantelfriktionen längs tryckta pålar. Mansur och Kaufman (1958) har rapporterat att mantelmotståndet för dragna pålar var endast 41% av mantelmotståndet för tryckta pålar. Det genomsnittliga värdet på jordtryckskoefficienten K för dragna pålar var lika med 0,63. För tryckta pålar var det genomsnittliga värdet 2,5 gånger större än det för dragna pålar.

Försöksresultat visar att den relativa deformation som erfordras för att erhålla maximalt mantelmotstånd både för platsgjutna och slagna pålar är liten, några millimeter. Försöksresultat tyder på att denna deformation är nästan oberoende av påldiametern. I lös lera är den ca 1 å 3 mm (Torstensson, 1973), Bjerin (1977) har rapporterat att den relativa förskjutning som erfordras för slagna betongpålar är 2 till 4 mm. Enligt Begemann (1969) erfordras i lös jord en relativ förskjutning som är av storleksordningen 5 till 8 mm för att erhålla maximalt mantelmotstånd. I fast jord erfordras enligt Begemann en relativ förskjutning av 3 å 4 mm. Vid pålspetsen är motsvarande förskjutning 1 å 2 mm.

I friktionsjord är den deformation som erfordras för att erhålla maximalt spetsmotstånd relativt stor, ca 10 å 20% av pålens diameter. En större deformation erfordras som regel för platsgjutna pålar än för slagna pålar beroende på den packning som sker av jorden under slagningen.

Neutrala punkten

I den neutrala punkten motsvarar pålens sättning sättningen i den omgivande jorden. Pålens relativa förskjutning är lika med noll. Bakholdin och Berman (1974) har emellertid påpekat att den neutrala punkten motsvarar egentligen den nivå där pålens sättningshastighet motsvarar sättningshastigheten i den omgivande jorden eftersom en försvinnande liten förskjutning erfordras av pålen för att helt eliminera påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion och att mantelmotståndet på en viss nivå skall övergå i positiv mantelfriktion. Denna relativa förskjutning är mindre än den som erfordras för

att först uppnå maximalt negativ mantelfriktion. Den neutrala punkt där mantelmotståndet är lika med noll kommer således att skilja sig från den punkt där pålens relativa förskjutning med avseende på den omgivande jorden är lika med noll när sambandet mellan mantelmotstånd och relativ förskjutning inte är linjärt. Skillnaden är som regel liten och försumbar. I det följande har antagits att den neutrala punkten är belägen där pålens relativa förskjutning gentemot den omgivande jorden är lika med noll.

För spetsbärande pålar, som är nedslagna till berg, kommer den neutrala punkten att vara belägen nära pålspetsen. Negativ mantelfriktion erhålls i detta fall nästan längs hela pålen. För en påle som slagits ned i ett sandlager eller i morän kommer den neutrala punkten att vara belägen över det fasta lagret. Antagandet att hela pålen påverkas av negativ mantelfriktion är i detta fall konservativt.

Den neutrala punktens läge påverkas även av pålens deformation under den neutrala punkten och således av pålens elastiska hoptryckning och pålspetsens deformation liksom av sättningar i den omgivande jorden under den neutrala punkten. Den neutrala punktens läge kan bestämmas genom att först anta den neutrala punktens läge och sedan kontrollera att pålens relativa förskjutning i denna punkt är lika med noll. Om så ej är fallet måste beräkningarna upprepas för ett nytt antaget läge av den neutrala punkten såsom föreslagits av Long och Healy (1974).

Vid en sådan beräkning uppskattas först sättningarna i den omgivande jorden på exempelvis varannan meters djup för den uppskattade sänkningen av grundvattennivån eller för den uppskattade fyllningshöjden. Reduktionen av sättningarna förorsakad av pålarna försummas som regel för att förenkla beräkningarna.

Sedan beräknas spänningsfördelningen i pålen för ett antaget läge av den neutrala punkten, t ex $0,1 H_c$ över fast botten (H_c är den kompressibla lagertjockleken). Enligt de ryska byggnadsnormerna (USSR Building Code, 1978) kan man anta att den neutrala punkten i en påle är belägen där sättningarna i jorden motsvarar halva den sättning som den ovanliggande byggnaden tål utan att skadas. Efter det att

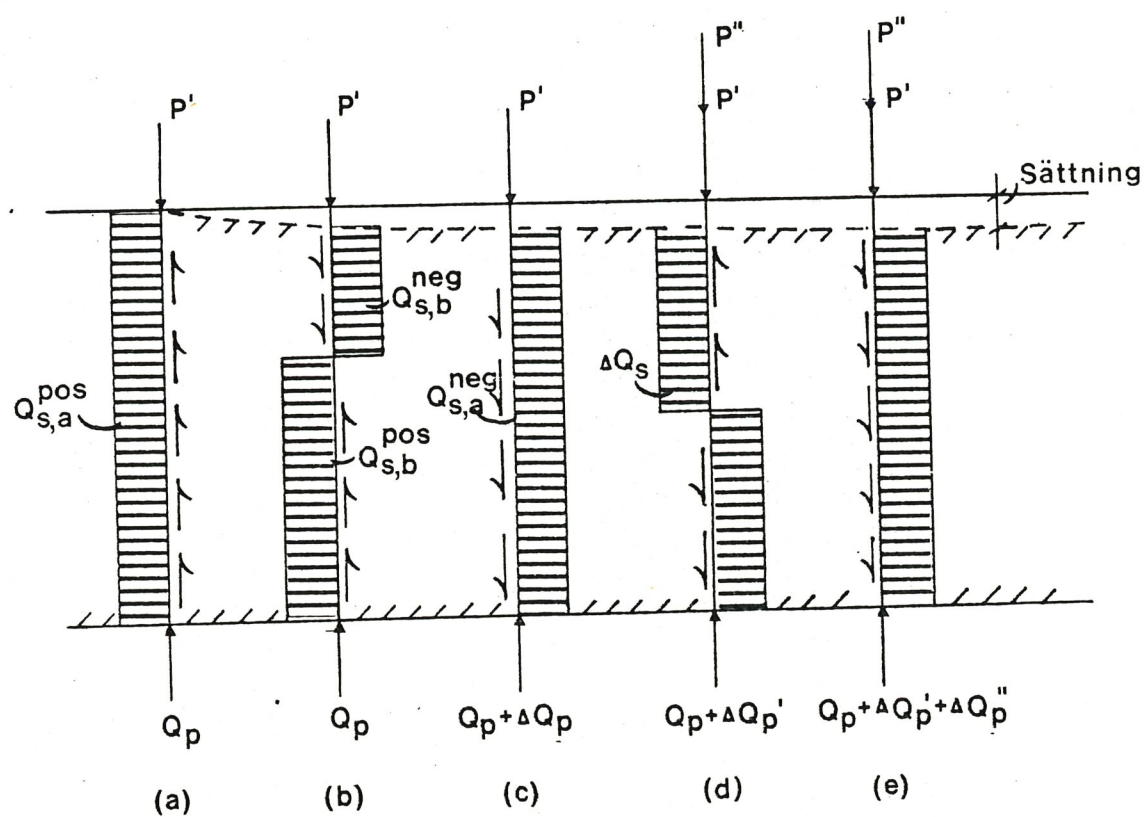
den neutrala punktens läge har bestämts beräknas belastningen i pålen vid pålspetsen och pålspetsens sättning.

Pålens totala deformation motsvarar pålens elastiska hoptryckning och pålspetsens förskjutning. Sättningen i den omgivande jorden kan beräknas från ökningen av effektivspänningen i jorden och från jordens kompressionsmodul. Beräkningarna upprepas för nya antagna lägen för den neutrala punkten tills dess pålens deformation i den antagna punkten motsvarar den omgivande jordens sättning. Beräkningarna är emellertid tidsödande. Dessutom är pålspetsens sättning relativt svår att beräkna utan tillgång till resultat från belastningsförsök där pålspetsens förskjutning och belastningen vid pålspetsen har bestämts separat.

Ständiga och rörliga laster

Spänningsfördelningen längs en påle som slagits genom ett lager med lera ned till fast botten visas i fig 6. När pålen belastas med en last P_d bär pålen till en början belastningen dels genom positiv mantelfriktion ($Q_{s,a}^{pos}$) längs pålens hela längd dels genom spetsmotstånd (Q_p). Det har antagits att belastningen P' är större än mantelmotståndet ($Q_{s,a}^{pos}$). Endast en mycket liten deformation erfordras för att eliminera mantelmotståndet längs hela pålen. Pålens elastiska hoptryckning är i allmänhet fullt tillräcklig.

Belastningen i en pålgrupp ökar gradvis på grund av negativ mantelfriktion när sättningarna i den omgivande jorden ökar på grund av exempelvis en sänkning av grundvattennivån eller av en fyllning som placerats runt pålarna. Även jordens återkonsolidering efter slagningen av pålarna kan vara fullt tillräcklig. Vanligtvis bortser man ifrån sättningarna förorsakade av jordens återkonsolidering, eftersom endast ett par veckor eller månader erfordras för denna återkonsolidering. Pålarnas elastiska hoptryckning när de belastas är fullt tillräcklig för att helt eliminera den resulterande negativa mantelfriktionen för spetsbärande pålar om spetsmotståndet och det positiva mantelmotståndet längs pålens nedre del är tillräckliga att bära påhängslasten förorsakad av negativ mantelfriktion längs pålens övre del. Detta är normalt fallet. I annat fall överskrids pålens bärförmåga och spetsmotståndet kan minska.



Figur 6. Spänningsfördelning längs påle vid negativ mantelfriktion.

Sättningar påverkar mantelmotståndet först närmast markytan där det ändras från att vara positivt till att bli negativt såsom visas i fig 6b. Endast en mycket liten sättning erfordras, ca 10 å 20 mm för att erhålla negativ mantelfriktion längs en stor del av en påle. Brons et al (1969a) rapporterar att maximal påhängskraft på grund av negativ mantelfriktion erhöles när sättningen vid markytan endast var 20 mm.

Den neutrala punkten i en påle förskjuts gradvis nedåt med ökad sättning tills nästan hela pålen påverkas av negativ mantelfriktion såsom visas i fig 6c. Belastningen vid pålspetsen ökar därvid från Q_p till $(Q_p + \Delta Q_p)$ så att

$$Q_p + \Delta Q_p = P' + Q_{s,a}^{neg}$$

där $Q_{s,a}^{neg}$ är påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion.

Belastningen på pålen har i fig 6d ökat från P' till $(P' + P'')$. Till en början bärs belastningen P'' som positiv mantelfriktion närmast markytan eftersom endast en mycket liten deformation, ett par millimeter, erfordras för att negativ mantelfriktion skall övergå i positiv mantelfriktion. Belastningen vid pålspetsen påverkas ej av belastningen P'' är mindre än $(Q_{s,a}^{neg} + Q_{s,a}^{pos})$ såsom påpekats t ex av Fellenius (1975). Om belastningen därefter reduceras med P'' påverkas endast mantelfriktionen längs pålens övre del. Mantelfriktionen ändras från att vara positiv till att bli negativ. En rörlig (transient) last påverkar ej belastningen i pålen vid pålspetsen om ändringen i belastningen är mindre än $(Q_{s,a}^{neg} + Q_{s,a}^{pos})$.

Den del av belastningen som överförs till pålspetsen ökar gradvis med tiden om den yttre belastningen på pålen inte ändras. Den ökning av sättningen som erfordras för att ändra mantelmotståndet från att vara positivt till att bli negativt är mycket liten som tidigare nämnts. Den är av samma storleksordning som pålens elastiska hoptryckning.

En påle som utsätts för negativ mantelfriktion kan dimensioneras såsom visas i fig 7. Man kan därvid använda belastningsfaktorer (l_d , l_l och l_n) och partiella säkerhetsfaktorer (f_s och f_p) som tar hänsyn till den osäkerhet som är förknippad med belastningen på pålen och

mantelmotståndet. Statistiska metoder kan användas vid beräkning av de olika belastningsfaktorerna och de olika partialsäkerhetskoefficienterna.

Två fall måste undersökas såsom visas i fig 7a och 7b. I fig 7a (Fall a) belastas pålen dels av en permanent last P_d , dels av en påhängskraft $Q_{s,a}^{neg}$ över den neutrala punkten i pålen. Summan av positiv mantelfriktion $Q_{s,a}^{pos}$ under den neutrala punkten och spetsmotstånd Q_p måste vara tillräcklig för att bära de påförda lasterna

$$P_d l_d + Q_{s,a}^{neg} l_n \leq Q_{s,a}^{pos} / f_s + Q_p / f_p$$

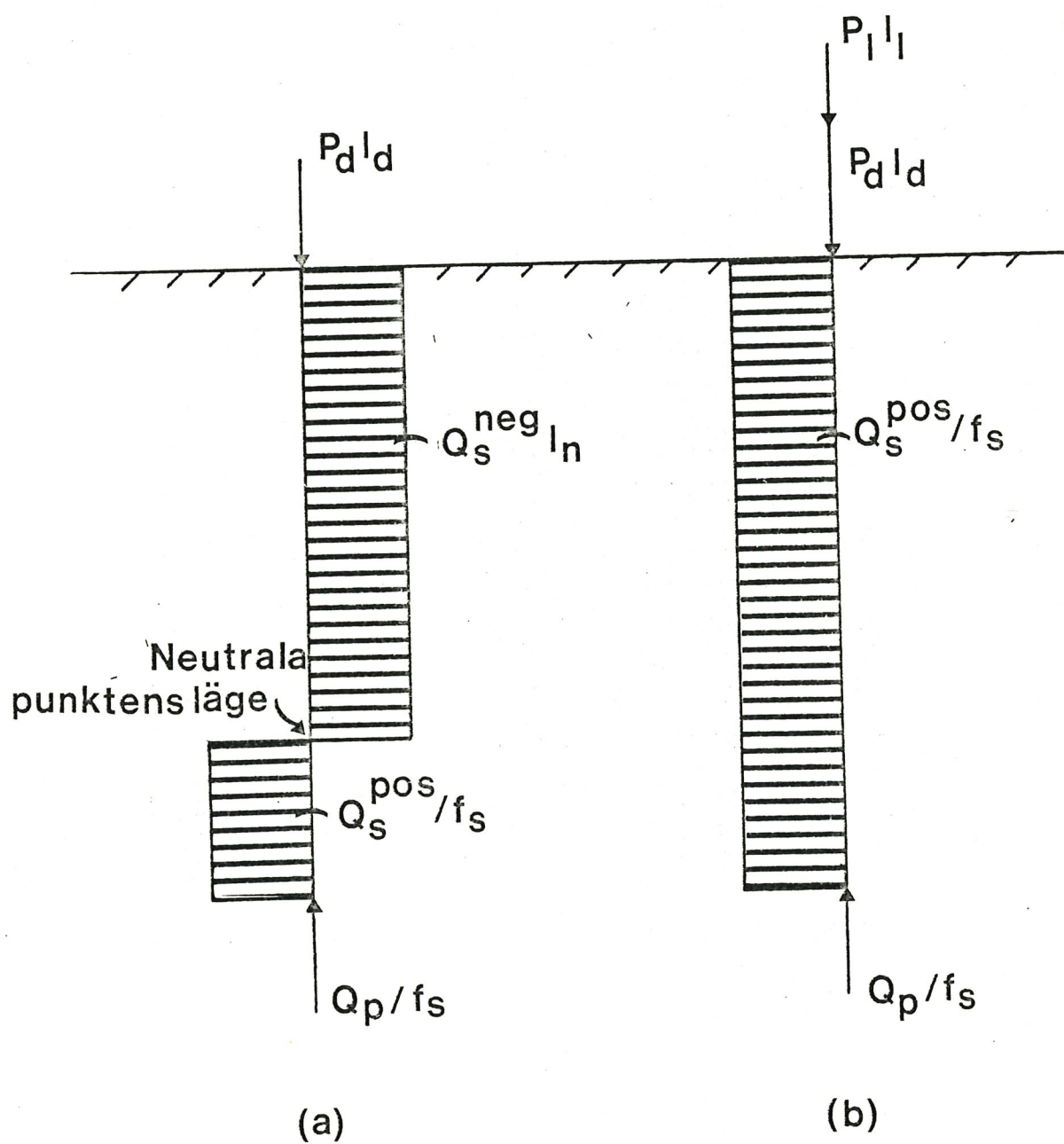
Belastningsfaktorerna l_d och l_n är beroende av den noggrannhet som den ständiga lasten P_d och påhängskraften Q_s^{neg} kan beräknas och av konsekvenserna av ett brott. Ett relativt lågt värde kan väljas på belastningsfaktorn l_n (1,0 till 1,1) eftersom en mycket liten deformation erfordras för att mantelmotståndet skall ändras från att vara negativt till att bli positivt. Partialsäkerhetsfaktorerna f_s och f_p är beroende av hur noggrant som jordens hållfasthetsparametrar c och ϕ kan beräknas eller uppskattas. Ofta används en reducerad kohesion ($c_r = c/f_c$) och en reducerad inre friktionsvinkel ($\tan \phi_r = \tan \phi / f_\phi$) i beräkningarna.

I fig 7b visas en påle som belastas av dels en ständig last P_d dels en rörlig last P_l (Fall b). Summan av positivt mantelmotstånd Q_p^{pos} längs hela pålen och spetsmotståndet Q_p måste i detta fall vara tillräckligt för att bära de påförda lasterna ($P_d + P_l$)

$$P_l l_l + P_d l_d \leq Q_p^{pos} / f_s + Q_p / f_s$$

I allmänhet väljs ett högre värde på belastningsfaktorn l_l vid en rörlig belastning än på l_p vid en permanent belastning beroende på den större osäkerhet som är förknippad med en rörlig last. Vanligtvis är Fall (a) dimensionerande om

$$P_l \leq 2 Q_s^{neg}$$



Figur 7. Dimensionering av påle som påverkas av negativ mantelfriktion när partialsäkerhets- och belastningsfaktorer används.

Även en total säkerhetsfaktor F kan användas såsom illustreras i fig 8. Två fall måste då beaktas. I fig 8a belastas pålen med en permanent last P_d och av påhängskraft $Q_{s,a}^{neg}$ över den neutrala punkten i pålen. Det positiva mantelmotståndet under den neutrala punkten $Q_{s,a}^{pos}$ och spetsmotståndet Q_p måste i detta fall vara tillräckliga för att bära belastningen på pålen

$$P_d + Q_{s,a}^{neg} \leq (Q_{s,a}^{pos} + Q_p)/F$$

Denna ekvation kan omskrivas till

$$P_d \leq (Q_{s,a}^{pos} + Q_p)/F - Q_{s,a}^{neg}$$

I fig 8b belastas pålen med både en permanent last P_d och en rörlig last P_l . Även i detta fall måste summan av det positiva mantelmotståndet $Q_{s,b}^{pos}$ och spetsmotståndet Q_p vara tillräcklig för att bära belastningen i pålen

$$P_d + P_l \leq (Q_{s,b}^{pos} + Q_p)/F$$

Värdet på totala säkerhetsfaktorn F är i allmänhet 2 å 3. Ett lägre värde kan väljas om $Q_{s,a}^{neg}$, $Q_{s,a}^{pos}$, $Q_{s,b}^{pos}$ och Q_p har bestämts med belastningsförsök.

Negativ mantelfriktion för enstaka pålar

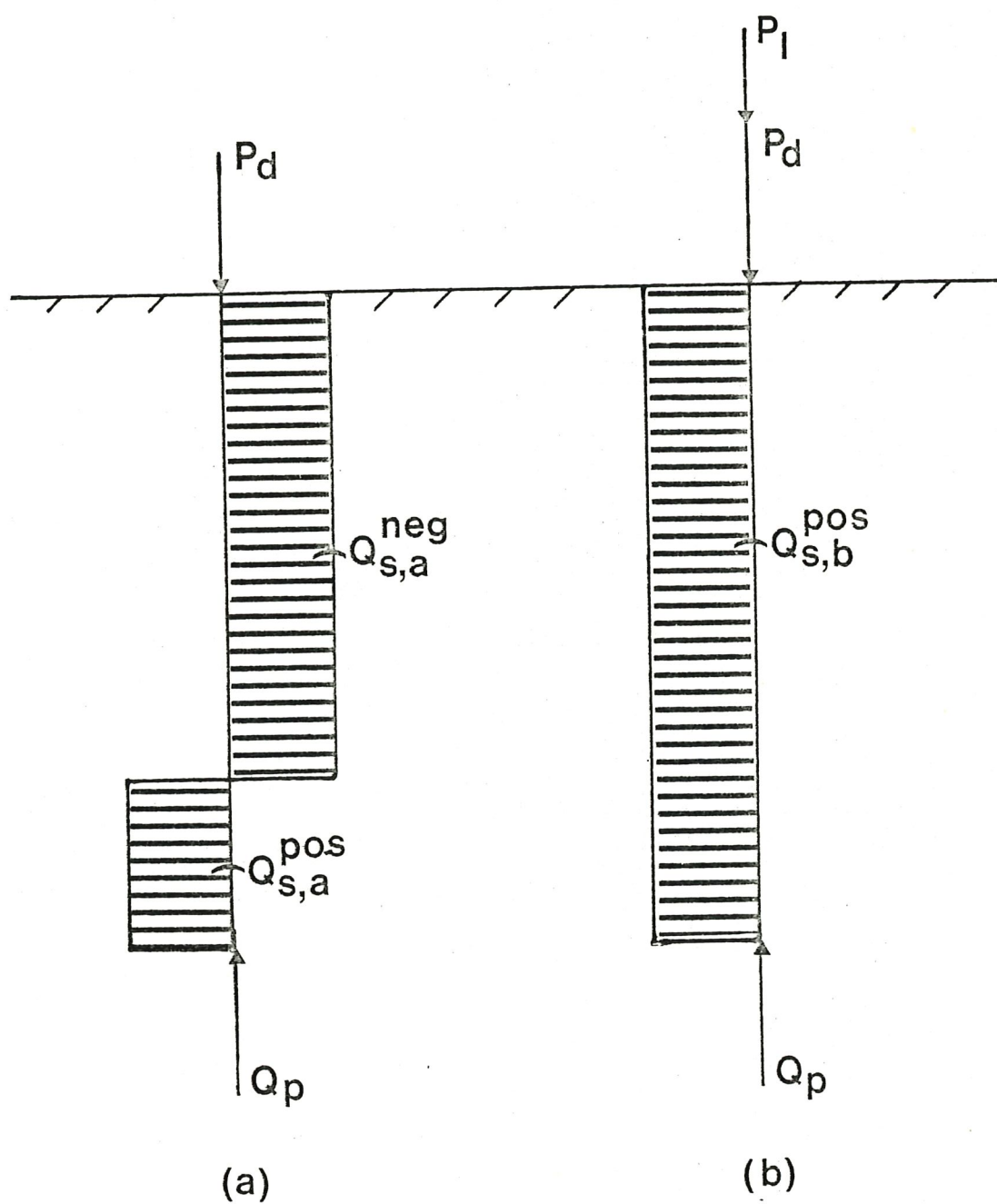
Kohesionsjord

Det finns i huvudsak två metoder att beräkna negativ mantelfriktion i lera, nämligen (a) effektivspänningsmetoden och (b) totalspänningsmetoden.

Vid effektivspänningsmetoden beräknas den negativa mantelfriktionen från uttrycket

$$f_s = K \operatorname{tg} \phi_a \quad \bar{\sigma}_v = \beta \bar{\sigma}_v$$

där K är en jordtryckskoefficient, $\bar{\sigma}_v$ är det effektiva överlagringstrycket och ϕ_a är jordens effektiva friktionsvinkel med avseende på



Figur 8. Dimensionering av påle som påverkas av negativ mantelfriktion när en totalsäkerhetsfaktor används.

pålen. Jordtryckskoefficienten K är förutom jordens deformations- och hållfasthetsegenskaper även beroende av vald påltyp (massundanträngande eller ej massundanträngande påle) och vald installationsmetod. Friktionsvinkeln ϕ_a påverkas av pålytans råhet och den omgivande jordens skjuvhållfasthet.

Burland (1973) har t ex använt en effektivspänningsanalys för att beräkna mantelmotståndet för pålar i lera. För lös lera varierar koefficienten β mellan 0,25 och 0,40. Vid beräkning av negativ mantelfriktion föreslog Burland ett övre gränsvärde $\beta = 0,25$. Burland påpekar med rätta att en effektivspänningsanalys blir komplicerad för fast överkonsoliderad lera eftersom jordtryckskoefficienten K varierar med djupet. Den kan vara så hög som 3,0 nära markytan. Burland har föreslagit att mantelmotståndet beräknas från ett uppmätt eller beräknat värde på jordtryckskoefficienten K . Den största osäkerheten med en effektivspänningsanalys är utvärderingen av K .

Försöksdata från instrumenterade stålplålar i lös lera redovisade av Bjerrum et al (1969) visade att koefficienten β varierade mellan 0,18 och 0,26. Endo et al (1969) fann att koefficienten β varierade mellan 0,20 och 0,35 för olika typer av stålplålar. Liknande resultat har rapporterats av andra forskare.

Garlanger (1974) har från en analys av tillgängliga försöksresultat föreslagit följande värden på koefficienten β

Tabell 1. Föreslagna värden på koefficienten β
(efter Garlanger, 1974)

Jord	β
Lera	0,20 å 0,25
Silt	0,25 å 0,35
Sand	0,35 å 0,50

Vid en totalspänningsanalys beräknas maximal negativ mantelfriktion från jordens odränerade skjuvhållfasthet (τ_{fu}) bestämd med vingborrförsök, konförsök eller tryckförsök

$$f_s = \alpha \tau_{fu}$$

I detta uttryck är α en korrektionskoefficient som tar hänsyn till pålmaterialet och den omgivande jorden (lera och silt) och eventuell förkonsolidering. Mantelmotståndet är i allmänhet lägre för stålpålar än för betong- eller träpålar.

Resultat från drag- och tryckförsök med pålar visar att positivt och negativt mantelmotstånd för pålar med parallella sidor i lös lera ($\tau_{fu} \leq 50$ kPa) motsvarar lerans skjuvhållfasthet. Det positiva mantelmotståndet för koniska träpålar är som regel högre än mantelmotståndet för betongpålar. Det motsatta förhållandet förväntas vid negativ mantelfriktion.

För tryckta pålar kan koefficienten β variera mellan 0,3 och 1,5 beroende på jordmaterial, överkonsolideringsgrad och påltyp såsom påpekas av Burland (1973). För lös lera med en odränerad skjuvhållfasthet som är lägre än 50 kPa kan ett värde på α lika med 1,0, 0,8 och 0,5 användas för träpålar, betongpålar respektive stålpålar. (Broms, 1966).

Försöksresultat visar emellertid att för lös lera kan det negativa mantelmotståndet bli betydligt större än vad som motsvarar lerans ursprungliga skjuvhållfasthet (Bjerrum et al, 1969) beroende på den ökning av skjuvhållfastheten som sker med tiden på grund av lerans konsolidering. Även Bozozuk (1970, 1972) fann att det negativa mantelmotståndet kan överstiga lerans ursprungliga skjuvhållfasthet.

Även belastningshastigheten påverkar mantelmotståndet. Försöksresultat tyder på att mantelmotståndet minskar 10 å 20% vid en tiofaldig minskning av belastningshastigheten (Eide et al, 1972). Liknande resultat har rapporterats av Marsal och Mazari (1969) och av Torstensson (1973a). Även Rossichin (1973) har undersökt belastningshastighetens inverkan på det negativa mantelmotståndet i lera.

Installationsförfarandet påverkar både det positiva och det negativa mantelmotståndet. Tomlinson (1970) har exempelvis observerat att i Londonlera (London Clay) är mantelmotståndet större för en slagen

påle än för en tryckt påle och att mantelmotståndet i lera jämfört med lerans odränerade skjuvhållfasthet minskar med djupet. För slagna pålar var adhesionsfaktorn α ca 0,85 för korta pålar och ca 0,65 för långa pålar. För tryckta pålar var α lika med 0,6 för korta pålar och 0,5 för långa pålar.

Även porvattentrycket påverkas av installationsförfarandet. Ett högre porvattenövertryck och en långsammare utjämning av porvattenövertrycket observerades av Tomlinson (1970) för tryckta pålar än för slagna pålar. Han drog slutsatsen att det ej var möjligt att göra några meningsfulla beräkningar grundade på en effektivspänningsanalys eftersom brottlasten för en tryckt påle minskade med tiden trots att effektivtrycket i jorden ökade. Den högsta bärförmågan erhöles för pålar som hade pressats ner. Tomlinson har påpekat att vid en effektivspänningsanalys måste man ta hänsyn till det glapp som bildas mellan påle och jord under nedslagningen närmast markytan. En påle som slagits genom ett lager med lös lera ned i ett underliggande lager med fast lera kommer att vara omgiven av ett lager med lös lera ned till ett djup i den fasta leran som motsvarar ca 20 påldiametrar. Pålar som slagits genom ett sandlager ned i ett underliggande lager med lös lera kommer att på liknande sätt vara omgivna i den lösa leran av ett sandlager.

En total- och en effektivspänningsanalys ger i allmänhet likartade resultat. I normalkonsoliderad lera ökar lerans odränerade skjuvhållfasthet (τ_{fu}) approximativt linjärt med ökat effektivt överlagringstryck ($\bar{\sigma}_{vo}$). Kvoten ($\tau_{fu}/\bar{\sigma}_{vo}$) är konstant. Värdet på denna kvot ökar som regel med ökad flytgräns (w_F) och ökat plasticitetsindex (I_p). För de lösa leror som förekommer i Sverige är denna kvot ca 0,35.

I det fall mantelmotståndet motsvarar lerans odränerade skjuvhållfasthet ($\alpha=1,0$) är koefficienten β lika med kvoten ($\tau_{fu}/\bar{\sigma}_{vo}$). Denna koefficient bör således öka med ökad flytgräns och ökat plasticitetsindex. Belastningshastigheten och den ökning av skjuvhållfastheten som sker med djupet på grund av lerans konsolidering bör således påverka mantelmotståndet och koefficienten β . Ökningen av lerans skjuvhållfasthet

med ökat effektivtryck blir emellertid lägre än vad som svarar mot lerans ursprungliga $(\tau_{fu}/\bar{\sigma}_{vo})$ -tal bestämd med exempelvis vingborrförsök. Skjuvhållfastheten ökar nämligen även under sekundärkonsolideringsskedet när effektivtrycket i jorden är konstant. Det $(\tau_{fu}/\bar{\sigma}_{vo})$ -tal som erhålls med vingborrförsök tar även hänsyn till sekundärkonsolideringens inverkan. Det förväntas därför att koeficienten β ökar med ökat plasticitetsindex och med ökat $(\tau_{fu}/\bar{\sigma}_{vo})$ -tal och att β minskar med minskad sättningshastighet och med ökad belastning.

Enligt den ryska byggnormen (USSR Building Code, 1978) påverkas påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion av höjden av den fyllning som placeras runt en pålgrupp och av lerans flytindex I_L ($I_L = (w - w_p)/I_p$).

När fyllnadshöjden är större än 5 m skall enligt den ryska byggnormen värdena i följande tabell användas vid beräkning av negativ mantelfriktion. I torv antas påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion vara konstant (5 kPa). När fyllningens höjd är mellan 2 och 5 m antas att påhängskraften motsvarar 40% av de i tabellen angivna värdena. Man tar ej hänsyn till negativ mantelfriktion när fyllningens höjd är mindre än 2 m. För grovsand, mellansand och finsand används de värden i tabellen som gäller för $I_L = 0,2, 0,3$ respektive 0,4.

Tabell 2. Mantelfriktion för pålar i lera (efter USSR Building Code, 1978)

Genomsnittligt djup under mark- ytan av aktuellt lager , (m)	Maximal mantelfriktion f_s , kPa Flytindex, I_L									
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
1	35	23	15	12	8	4	4	3	2	
2	42	30	21	17	12	7	5	4	4	
3	48	35	25	20	14	8	7	6	5	
4	53	38	27	22	16	9	8	7	5	
5	56	40	29	24	17	10	8	7	6	
6	58	42	31	25	18	10	8	7	6	
8	62	44	33	26	19	10	8	7	6	
10	65	46	34	27	19	10	8	7	6	
15	72	51	38	28	20	11	8	7	6	
20	79	56	41	30	20	12	8	7	6	
25	86	61	44	32	20	12	8	7	6	
30	93	66	47	34	21	12	9	8	7	
35	100	70	50	36	22	13	9	8	7	

Friktionsjord

I friktionsjord beräknas påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion från det effektiva överlagringstrycket ($\bar{\sigma}_v$). Därvid används följande samband

$$f_s = K \operatorname{tg} \phi'_a \bar{\sigma}_v$$

Osäkerheten med denna metod är främst förknippad med utvärderingen av jordtryckskoefficienten K . Denna påverkas nämligen av vald installationsmetod (slagpålar, platsgjutna pålar eller tryckta pålar), av vald påltyp liksom av den maximala belastning som jorden varit utsatt för tidigare. I en fyllning där jorden har packats noggrant i lager kan horisontaltrycket t o m bli högre än överlagringstrycket (t ex Dingosov, 1976, Mislivec, 1972). Mislivec har föreslagit följande samband mellan koefficienten K och friktionsvinkeln ϕ'

$$K = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'}{3} \right)$$

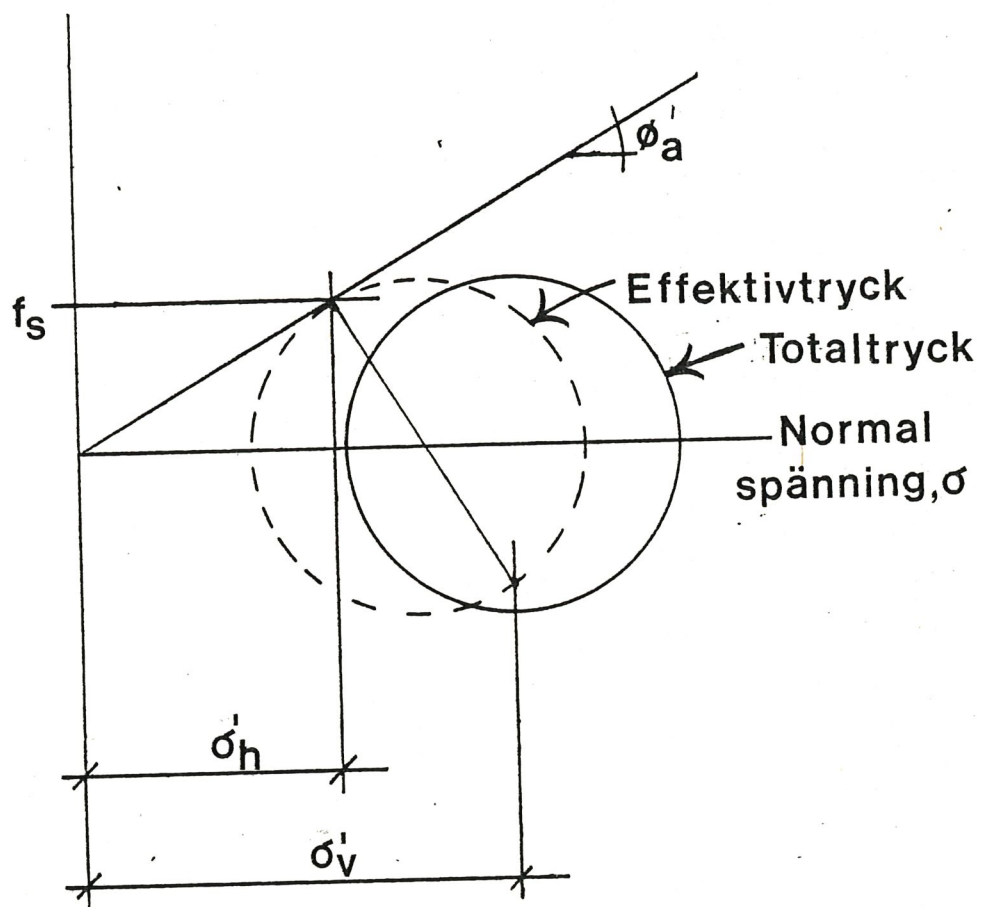
Horisontaltrycket mot en slagen påle ökar som regel med djupet ned till ett visst kritiskt djup som motsvarar 15 å 20 gånger pålens diameter. Under detta kritiska djup är horisontaltrycket i stort sett konstant. Intill pålspetsen kan horisontaltrycket dock vara lägre än det ursprungliga vilojordtrycket på grund av den packning som sker vid slagningen.

Jordtryckskoefficienten K beräknas ibland såsom visas i fig 9. Det bör observeras att horisontal- eller vertikalplan intill den belastade pålen inte är huvudspänningsplan. När skjuvspänningen längs pålen motsvarar mantelmotståndet $f_s = \bar{\sigma}_n \operatorname{tg} \phi'_a$ kan man visa att kvoten ($\bar{\sigma}_h/\bar{\sigma}_v$) blir lika med

$$K = \frac{1 - \sin^2 \phi'_a}{1 + \sin^2 \phi'_a}$$

Det har föreslagits för sand och grus att den friktionsvinkel som gäller längs en påle motsvarar den inre friktionsvinkel som erhålls vid direkta skjuvförsök som utförs vid konstant volym eftersom volymändringar i jorden är förhindrade (Feda 1976). I fast lagrad sand kan mantelmotståndet bli mycket högt på grund av dilatans.

Skjuvspänning, τ



Figur 9. Samband mellan σ'_v och σ'_h .

Menard (1963) har föreslagit att jordtryckskoefficienten K kan beräknas ur resultaten från pressiometerförsök och att horisontaltrycket mot en påle motsvarar gränstrycket.

I många fall antas att negativ mantelfriktion längs pålar i sand motsvarar det positiva mantelmotstånd som erhålls vid belastningsförsök (tryckförsök). Försöksresultat visar emellertid att påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion kan vara så låg som hälften till en tredjedel av det positiva mantelmotståndet.

Mantelmotståndet i sand har även jämförts med resultaten från trycksonderingsförsök (Meyerhof, 1956). En påles mantelmotstånd i sand motsvarar som regel 0,5% till 2% av spetsmotståndet vid trycksondering (q_c). Kvoten mellan mantelmotstånd och spetsmotstånd (f_s/q_c) är approximativt konstant för sand och grus och oberoende av jordens relativa lagringstäthet.

Negativ mantelfriktion för pålgrupper

Negativ mantelfriktion för en pålgrupp kan beräknas från jämvikten av ett litet jordelement med tjockleken dz som skurits ut ur jorden som visas i fig 10. Elementet är beläget på avståndet z under grundvattenytan. Upphängningen av den omgivande jorden längs pålarna har antagits vara proportionell mot det effektiva överlagringstrycket ($f_s = \bar{\sigma}_v K \tan \phi'_a$).

Mätresultat tyder på att sättningen mellan pålarna är jämn om inte avståndet mellan pålarna är alltför stort ($>5D$). Det förefaller därför vara rimligt att anta att spänningsfördelningen mellan pålarna är jämn. Vid jämvikt

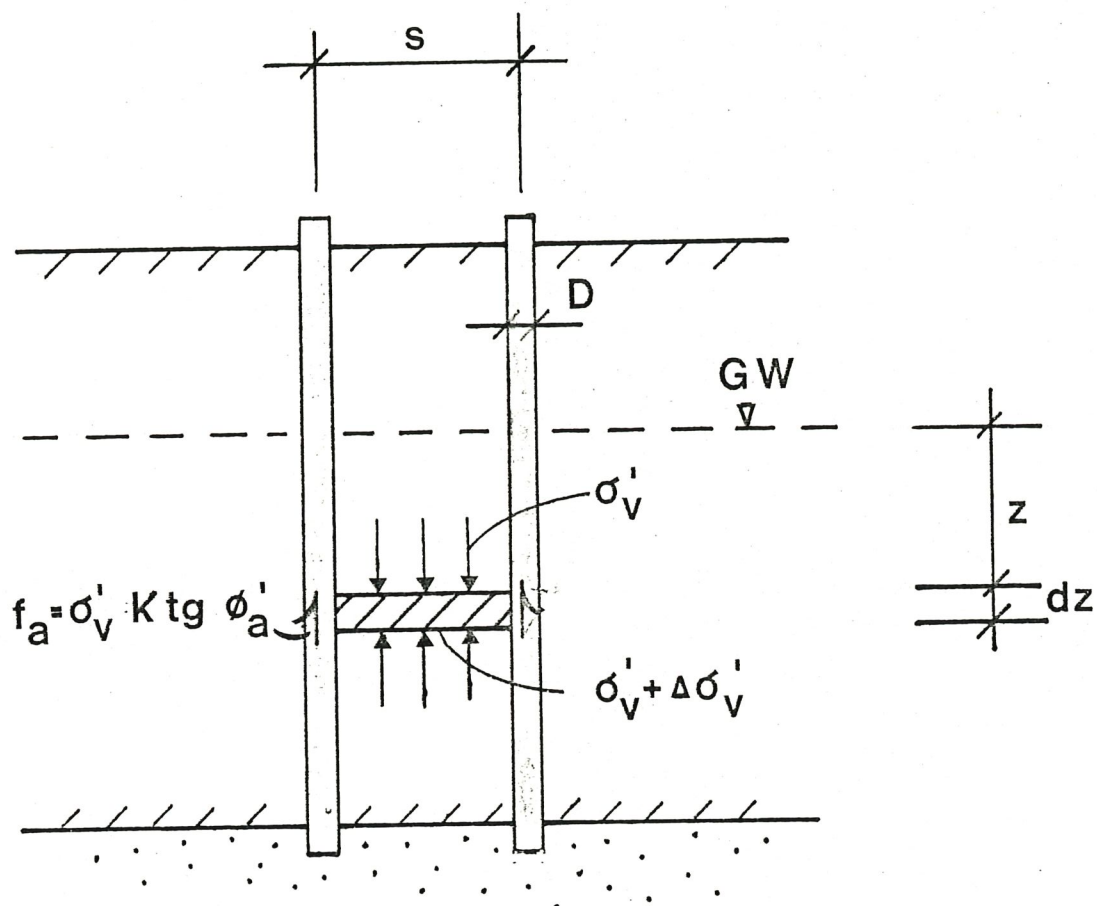
$$\frac{d\bar{\sigma}_v}{dz} + \frac{\bar{\sigma}_v}{A} = \rho'_g$$

där $A = \frac{S^2}{\pi D \beta}$, S är pålavståndet och D är påldiametern.

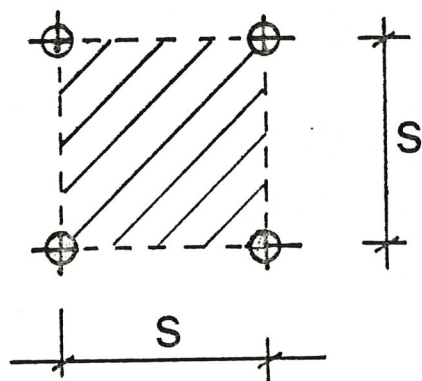
Lösningen till denna differentialekvation är

$$\bar{\sigma}_v = \rho'_g A + e^{-z/A}(\bar{q}_0 - \rho'_g A)$$

där $\bar{q}_0$ är det effektiva överlagringstrycket vid grundvattennivån.



Sektion



Plan

Figur 10. Inverkan av negativ mantelfriktion på en stor pålgrupp.

Det har antagits i beräkningarna att det effektiva överlagrings-trycket är jämnt fördelat mellan pålarna i pålgruppen och att maximalt mantelmotstånd har tagits i anspråk längs pålarna över den betraktade nivån, djupet z .

I allmänhet kommer belastningen q från en fyllning eller den ekvivalenta belastningen ($q = \Delta h_w \rho_w g$) förorsakad av en grundvattensänkning att bäras av de pålar som är belägna inuti pålgruppen. Endast när pålavståndet är mycket stort kommer den negativa mantelfriktionen längs pålarna att vara dimensionerande.

Ett försök har även gjorts att beräkna påhängskraften längs pålgruppens omkrets med hjälp av elasticitetsläran. Det har antagits i analysen att vilojordtrycket i jorden kan beräknas från Jakys uttryck $K_0 = (1 - \sin \phi')$. Analysen visar att pålgruppen kommer att bära en belastning förorsakad av en sänkning av grundvattennivån intill ett avstånd som motsvarar H_a/a från pålgruppen, där H_a är avståndet från markytan till den neutrala punkten. Koefficienten a påverkas av vilojordtryckskoefficienten K_0 och således av jordens inre friktionsvinkel ϕ' enligt följande tabell

ϕ'	$K_0 = (1 - \sin \phi')$	Koefficient a
5	0,91	6,8
10	0,83	4,8
15	0,71	3,9
20	0,66	3,4
25	0,58	3,1

Tabell 3. Samband mellan jordens inre friktionsvinkel ϕ' och koefficienten a .

Koefficienten a minskar med ökat värde på friktionsvinkeln och således med lerans plasticitetsindex.

Sättningsberäkningar

En pålgrupps eller en enskild påles sättning motsvarar summan av sättningen i den neutrala punkten och pålens kompression över den neutrala punkten. (I den neutrala punkten motsvarar pålens sättning sättningen i den omgivande jorden). Pålens elastiska hoptryckning är som regel liten och försumbar.

Sättningen för en pålgrupp med flytande pålar kan beräknas såsom visas i fig 11. Om avståndet mellan pålarna är stort kan den neutrala punktens läge beräknas ur antagandet att maximalt positivt och negativt mantelmotstånd ($f_s = \beta \bar{\sigma}_v$) har utbildats under respektive över den neutrala punkten. Vid jämvikt

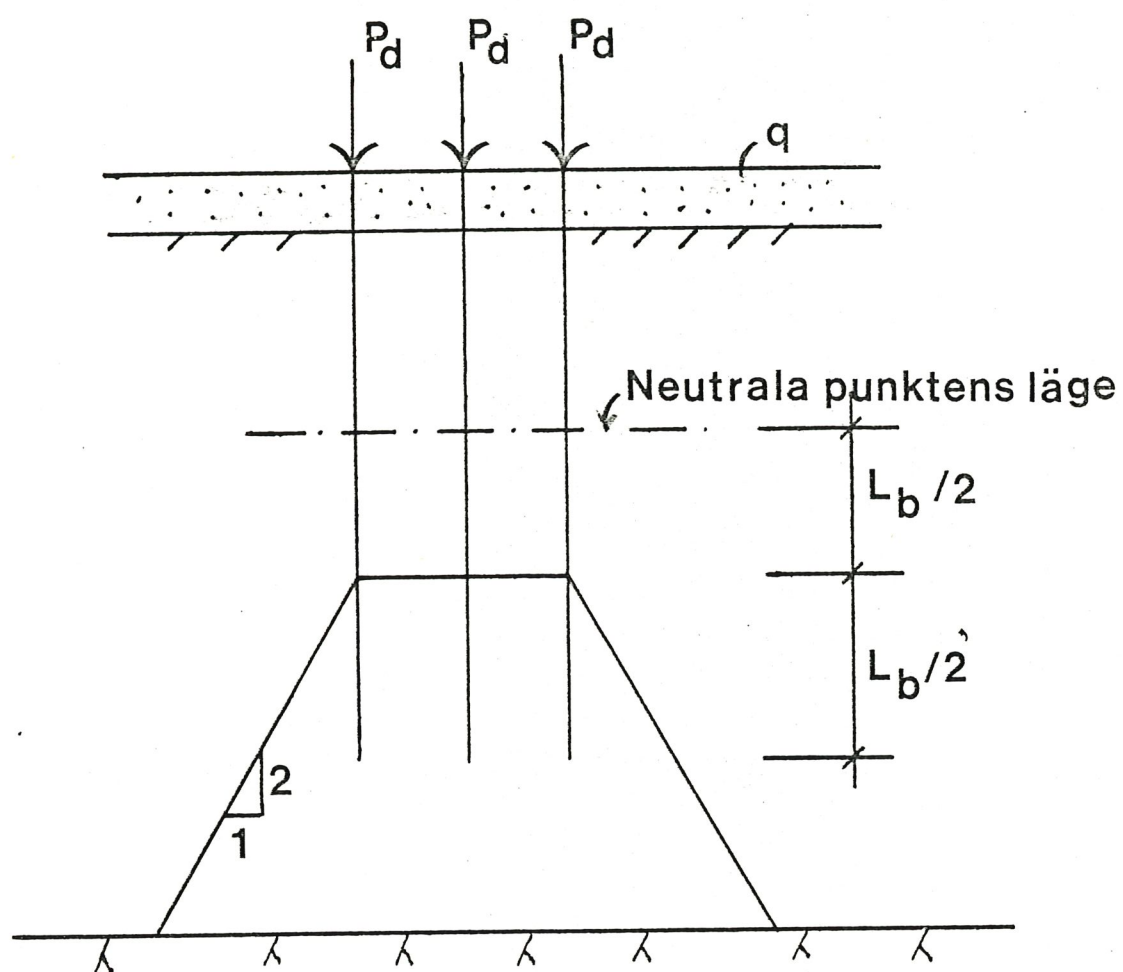
$$P_d + Q_s^{\text{neg}} = Q_s^{\text{pos}} + Q_p$$

Där P_d är den permanenta belastningen på pålen, Q_s^{neg} är påhängskraften över den neutrala punkten, Q_s^{pos} är det positiva mantelmotståndet under den neutrala punkten och Q_p är spetsmotståndet.

Sättningarna i jorden under den neutrala punkten och under pålgruppen kan beräknas ur antagandet att hela den permanenta belastningen P_d är jämnt fördelad i jorden halvvägs mellan den neutrala punkten och pålspetsarnas nivå (fig 11). Sättningarna under den neutrala punkten förorsakas av både en ökning av belastningen i jorden på grund av den jämnt fördelade belastningen q från en fyllning eller en grundvattensänkning och av den ständiga lasten P_d på pålgruppen. Spänningsfördelningen i jorden kan beräknas exempelvis med 2:1-metoden.

Sammanfattning

Belastningen i en påle på grund av negativ mantelkohesion påverkas av den neutrala punktens läge där pålens sättning motsvarar sättningen i den omgivande jorden. Maximal mantelfriktion kan beräknas med hjälp av antingen en effektivspännings- eller totalspänningsanalys ($f_s = \beta \bar{\sigma}_v$ resp αc_u). Den relativa förskjutning som erfordras för att erhålla maximal negativ mantelfriktion är liten, ett par millimeter.



Figur 11. Sättningsberäkning för en pålgrupp som påverkas av negativ mantelkohesion.

6. BERÄKNING AV NEGATIV MANTELFRIKTION

Flera beräkningsmetoder har föreslagits att beräkna maximal negativ mantelfriktion för både enskilda pålar och pålgrupper. Heijnen och Posthumus (1971) och Fellenius (1969) har granskat några av dessa metoder. Därvid har det i allmänhet antagits att jorden uppför sig

- a) som ett idealt elastiskt material med konstant elasticitetsmodul eller
- b) som ett idealt elastiskt-plastiskt material.

Även empiriska metoder har föreslagits (Elmasry, 1963).

Vid de metoder som är baserade på elasticitetsläran tar man i allmänhet hänsyn till pålarnas elastiska hoptryckning och pålspetsens förskjutning. Vissa metoder beaktar även den återhållande effekt som pålarna har på den omgivande jorden. Metoder som baseras på elasticitetsläran kan endast användas vid små deformationer och vid små sättningar innan maximal mantelfriktion utbildas närmast markytan. Det är intressant att konstatera att det antagna värdet på Poissons tal (ν) för jorden påverkar avsevärt påhängskraften och den negativa mantelfriktionen.

Flera metoder har föreslagits som är baserade på antagandet att jorden uppför sig som ett idealt elastiskt-plastiskt material. Spänningsfördelningen i jord och samverkan mellan de olika pålarna i en pålgrupp beräknas därvid ut ifrån antagandet att jorden uppför sig som ett idealt elastiskt material och att sättningarna i jorden runt en påle är tillräckligt stora för att erhålla maximal mantelfriktion längs pålarna. Den spänningsfördelning som föreslagits av Boussinesq, Westergaard och Mindlin har använts. Den maximala mantelfriktionen beräknas med hjälp av en total- eller en effektivspänningsanalys.

I allmänhet används sambandet

$$f_s = \sigma'_h \tan \phi'_a = \sigma'_v K \tan \phi'_a = \beta \sigma'_v$$

Det effektiva horisontaltrycket i jorden beräknas antingen direkt eller som $K \sigma'_v$ där σ'_v är det effektiva vertikalltrycket i jorden. Beräkningen av jordtryckskoefficienten K har tidigare diskuterats i kapitel 2. Den svåraste delen i beräkningarna är uppskattningen

av pålspetsens rörelse och den relativa förskjutning som erfordras för att erhålla maximalt negativt eller positivt mantelmotstånd. Normalt erfordras belastningsförsök där spetsmotståndet och mantelmotståndet mäts separat.

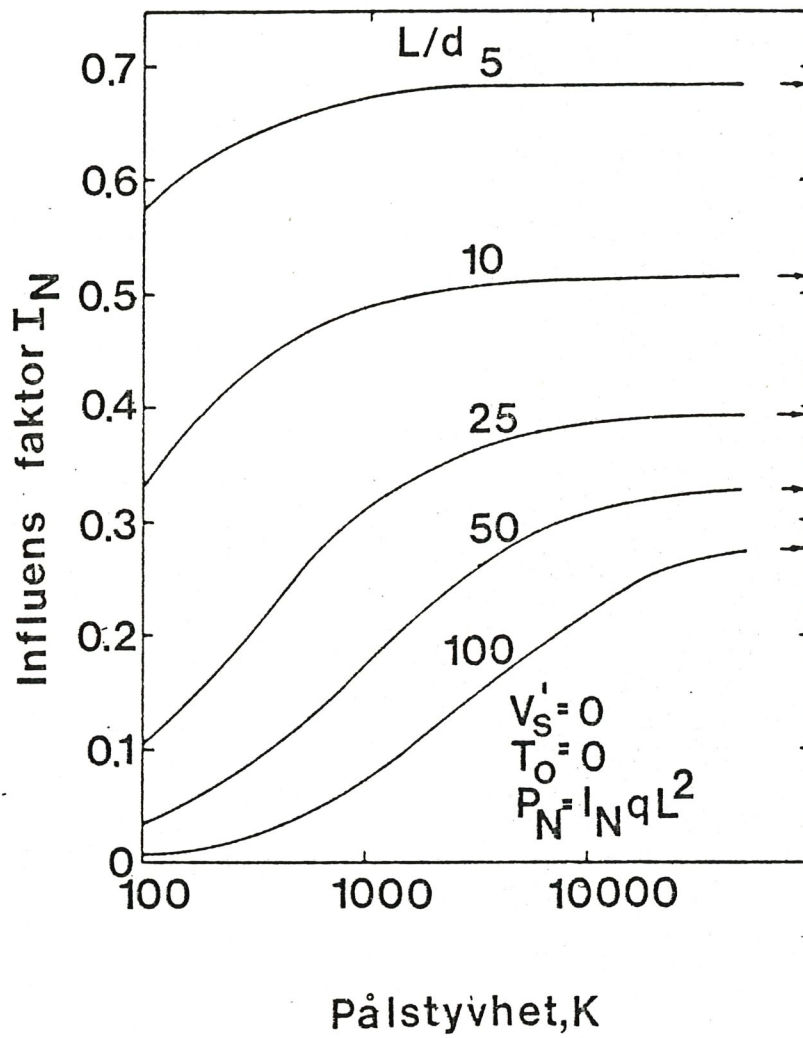
De metoder som är grundade på elasticitetsteori blir komplicerade när samverkan mellan pålarna i pålgruppen beaktas särskilt för de pålar som är belägna längs pålgruppens omkrets. Det är tveksamt om den förbättring av beräkningarna som man får när denna samverkan beaktas motsvarar pålgruppens verkliga uppträdande när pålgruppen påverkas av negativ mantelfriktion.

Metoder baserade på elasticitetsteori

Salas och Belzunce (1965) har beräknat den negativa mantelfriktion som erhålls när den omgivande jorden uppför sig som ett idealt elastiskt material med konstant elasticitetsmodul. Spänningsfördelningen har erhållits från Mindlins spänningsekvation. Elasticitetsteori har även använts av Buisson et al (1960) och av Verruijt (1969). Dessa två metoder är nästan identiska. Det har antagits vid båda metoderna att pålarna ej står på ett fast underlag. Verruijt visade att påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion kan bli hög även när sättningarna är små och att den negativa mantelfriktionen är störst närmast markytan. Verruijt har även tagit hänsyn till glidning mellan påle och omgivande jord.

Negativ mantelfriktion har även undersökts av Davis och Poulos (1969) och av Poulos och Davis (1972, 1973, 1975) för det fall jorden uppför sig som ett idealt elastiskt material med konstant elasticitetsmodul. Hänsyn tas vid beräkningarna till pålarnas elastiska hoptryckning. Det har antagits att pålarna står på ett helt stelt underlag och att porvattentrycket i jorden ej påverkas av pålarna. Mindlins spänningsekvation har använts i beräkningarna. Påhängskraften P_N på grund av negativ mantelfriktion beräknas med hjälp av en influensfaktor I_N , se fig 12.

Beräkningarna visar att tidpunkten för påslagningen har stor inverkan på påhängslasten i pålarna med avseende på en inträffad grundvattensänkning eller när den fyllning lades ut som förorsakade den negativa



Figur 12. Influenzfaktorn I_N (efter Davis and Poulos, 1972).

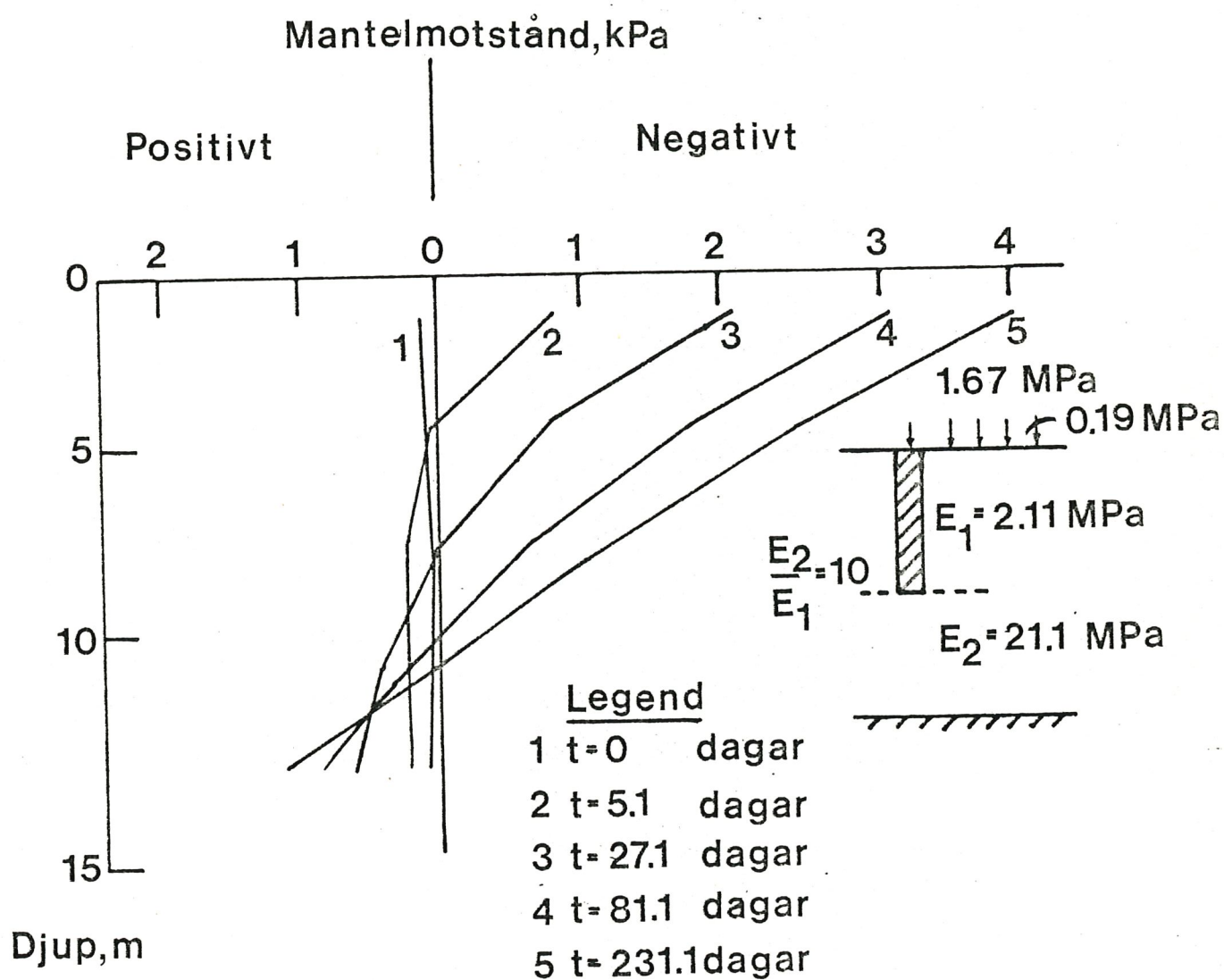
mantelfriktionen i pålarna. Påhängskraften reduceras om pålarna slås någon tid efter det att en fyllning lagts ut särskilt om det kompressibla lagret dräneras vid både under- och oversidan.

Begemann (1969) har använt elasticitetsteori för att beräkna påhängskraften längs enstaka pålar. Inverkan av negativ mantelfriktion har antagits vara ekvivalent med en koncentrerad last som verkar på en platta med oändlig utsträckning som är grundlagd på ett elastiskt underlag. Begemann drog slutsatsen att den maximala mantelfriktionen som regel är bestämmande eftersom endast en mycket liten relativ förskjutning erfordras för att erhålla maximal mantelfriktion.

Även Marsal och Mazari (1969) och Ng et al (1976) har utnyttjat Mindlins lösning vid beräkning av negativ mantelfriktion längs enskilda pålar och pålgrupper. Ng et al har beaktat pålarnas elastiska hoptryckning och pålspetsarnas förskjutning. Konsolideringen i jorden beräknades med hjälp av Terzaghis endimensionella konsolideringsteori. Beräkningarna visade att pålspetsarnas förskjutning hade stor inverkan på påhängskraften och den neutrala punktens läge.

Desai et al (1976) har använt den finita elementmetoden (FEM) till att beräkna påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion. Desai antog att jordens egenskaper motsvarade de hos ett idealt linjärt elastiskt material. Pålarna betraktades som en oändligt lång väggskiva. Den beräknade mantelfriktionen visas i fig 13 för en påle som slagits genom en jord med konstant elasticitetsmodul ($E=2,11$ MPa) ned till ett underliggande jordlager med elasticitetsmodulen $21,1$ MPa. Förhållandet mellan elasticitetsmodulerna för de två jordmaterialen var således 1:10. Pålarna och den omgivande jorden antogs vara belastade samtidigt. Det är intressant att se hur den neutrala punkten förflyttades nedåt under konsolideringen av jorden runt pålarna.

Även Walker och Darvall (1970) har utnyttjat den finita elementmetoden (FEM) till att beräkna påhängskraften längs en påle som står på ett fast underlag. Sambandet mellan spänning och deformation antogs vara paraboliskt.



Figur 13. Spänningsfördelningen längs en påle som påverkas av negativ mantelfriktion beräknad med finita elementmetoden (efter Desai et al, 1978).

Metoder baserade på plasticitetsteori

Kaniraj och Ranganatham (1977) har beräknat den påhängskraft som erhålls på grund av negativ mantelfriktion i normalkonsoliderad lera när lerans skjuvhållfasthet är antingen konstant eller ökar linjärt med djupet. Det har antagits i beräkningarna att pålarna är helt styva och står på ett stelt underlag. Vidare har antagits att jordens deformation på en viss nivå är konstant, att den ej varierar med ökat avstånd från en påle och att kvoten $C_0/(1 + e_0)$ är konstant. Sambandet mellan spänning och deformation har antagits motsvara det för ett idealt elastiskt-plastiskt material. Beräkningarna visar att påhängskraften främst påverkas av det djup där maximalt negativt mantelmotstånd erhålls och av den relativa förskjutning som erfordras för att erhålla maximal negativ mantelfriktion. Metodens huvudsakliga begränsning är att den inte tar hänsyn till pålspetsens rörelse eller till pålens elastiska hoptryckning. Båda dessa faktorer påverkar den neutrala punktens läge.

Sawaguchi (1971) har beräknat påhängskraften i en påle när pålens elastiska hoptryckning och pålspetsens rörelse beaktas. I beräkningarna har antagits att mantelmotståndet motsvarar det i ett idealt elastiskt-plastiskt material. Det har även antagits att den negativa mantelfriktionen längs en påle ej påverkar spänningsfördelningen i jorden runt pålen.

Combarieu (1974) har i sina beräkningar tagit hänsyn till att spänningsfördelningen i jorden mellan pålarna ej är konstant. Den ojämna spänningsfördelningen har uttryckts med en koefficient λ . Combarieu fann att spänningsfördelningen var i det närmaste konstant när avståndet mellan pålarna var litet. Reduktionen av överlagringstrycket på grund av negativ mantelfriktion var minst när koefficienten λ var lika med noll och spänningsfördelningen mellan pålarna var konstant.

Poorooshasb och Bozozuk (1967, 1969) har beräknat ett övre gränsvärde på den negativa mantelfriktionen. Beräkningarna är baserade på plasticitetsteori. Det har antagits att sättningarna är likformiga, att sättningshastigheten motsvarar reduktionen av porvattentrycket i jorden och att pålarna ej påverkas av portrycksutjämningen. Den största mantelfriktionen erhöles vid pålspetsen. Beräkningsresultaten presenterades i grafisk form.

Även Brinch-Hansen (1968) har föreslagit en metod för beräkning av negativ mantelfriktion både för enstaka pålar och för pålgrupper. Boussinesqs spänningsekvation användes vid beräkning av inverkan av närstående pålar på spänningsfördelningen i en pålgrupp. Brinch-Hansen har påpekat att påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion för en enskild påle ej kan vara större än utdragsmotståndet medan för en pålgrupp begränsas påhängskraften av den belastning som förorsakade sättningarna och den negativa mantelfriktionen. Den negativa mantelfriktionen reducerar överlagringstrycket enligt Brinch-Hansen med $4 f_s$ för en enstaka påle och med $4 f_s (1+1,7 S/D)$ för en pålgrupp där S är pålavståndet och D är påldiametern. Den maximala mantelfriktionen är för en pålgrupp $f_s \leq q (4+6,8 S/D)$ där q är belastningen från den fyllning eller den grundvattensänkning som förorsakade upphängningen längs pålarna. Motsvarande upphängning i det fall porvattenstrycket minskar med Δu är

$$f_s \leq \Delta u / (4 + 6,8 S/D)$$

Mätresultat stämde väl överens med beräknade värden.

Zeevaert (1957a) har föreslagit att påhängslasten på grund av negativ mantelfriktion kan beräknas från $f_s = \beta \bar{\sigma}_v$ där $\beta = 0,67 K_0 \tan \phi'_a$. Zeevaert (1973) har även föreslagit att passningsförfarandet för beräkning av påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion när reduktionen av överlagringstrycket på grund av negativ mantelfriktion beaktas. Spänningsändringen i jorden beräknas ur Westergaards spänningsekvation där spänningsfördelningen motsvarar förhållandena i en skiktad jord och där deformationen sker vertikalt. I en pålgrupp begränsas jordens deformation i sidled av de omgivande pålarna. Zeevaert har presenterat beräkningsresultaten i grafisk form så att reduktionen av det effektiva överlagringstrycket enkelt kan beräknas. Överlagringstrycket reduceras på grund av att en del av belastningen i jorden bärs av pålarna. Minskningen av överlagringstrycket vid pålspetsarnas nivå har beräknats på liknande sätt. Zeevaert har antagit att den genomsnittliga minskningen av överlagringstrycket vid pålarnas underkant är lika med en tredjedel av spänningsminskningen alldeles intill själva pålspetsen och att den genomsnittliga reduktionen för en enstaka påle är lika med $Q_{neg}/(12 r_o)^2$, där r_o är pålens radie och Q_{neg} är den totala påhängslasten. Zeevaerts beräkningsmetod har behandlats av bl a DeBeer (1966, 1977). Locher (1969) har utvecklat ett dataprogram som är grundat på Zeevaerts metod.

Den metod som föreslagits av Zeevaert överskattar troligtvis reduktionen av spetsmotståndet på grund av negativ mantelfriktion. Det effektiva överlagringstrycket kommer knappast att bli lägre än det ursprungliga effektiva överlagringstrycket om man bortser ifrån den störning av jorden som erhålls under själva nedslagningen. Om överlagringstrycket skulle minska kommer jorden att häva sig något och mantelmotståndet kommer då att bli positivt. Detta innebär att effekten av påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion kommer att bli mindre än vad som antagits av Zeevaert. Det föreslås därför att eventuell reduktion av överlagringstrycket på grund av negativ mantelfriktion ej beaktas vid beräkning av spetsmotståndet.

Terzaghi och Peck (1948, 1967) föreslog tidigt en metod för beräkning av negativ mantelfriktion för pålgrupper och enskilda pålar. Vid denna metod antogs att full maximal mantelfriktion erhålls längs hela längden för samtliga pålar inom en pålgrupp eller längs pålgruppens omkrets. Detta är en konservativ beräkningsmetod eftersom den neutrala punkten antas vara belägen vid pålspetsen. Terzaghi och Pecks beräkningsmetod visas i fig 14. Det har antagits att den totala belastningen på pålgruppen motsvarar summan av den yttre påförda belastningen Q , massan av den jord som är innesluten av pålarna Q' och påhängslasten Q'' på grund av negativ mantelfriktion längs pålgruppens omskrivna yta. Pålgruppens totala belastning blir i detta fall

$$Q_{\text{total}} = Q + Q' + Q''$$

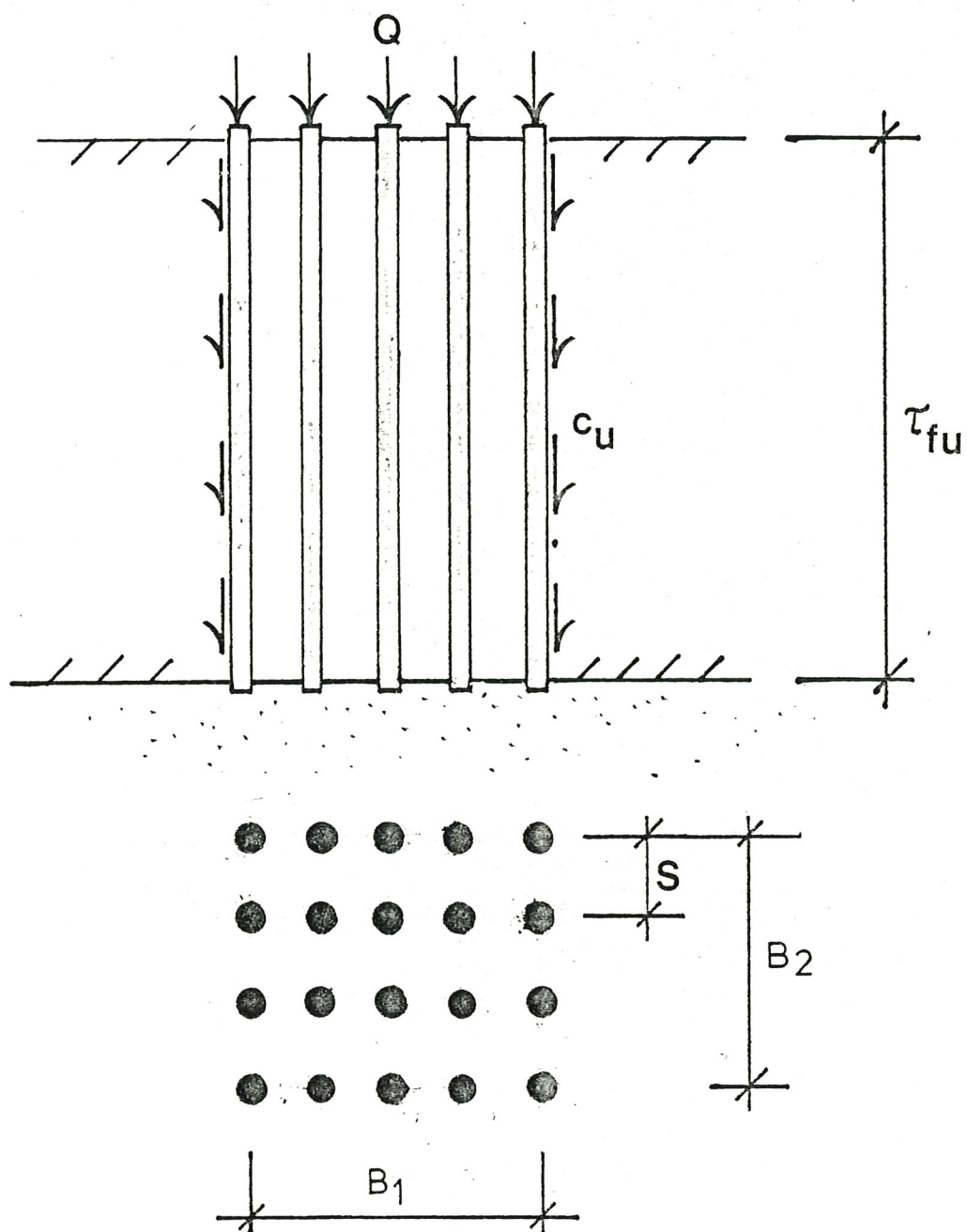
Ökningen Q' av belastningen i pålarna påverkas av pålavståndet S . Denna ökning av belastningen kan beräknas ur ekvationen

$$Q' = S^2 L_c \rho g$$

där L_c är det kompressibla lerlagrets tjocklek. Ökningen av den genomsnittliga belastningen i pålarna Q'' kan enligt Terzaghi och Peck uppskattas ur uttrycket

$$Q'' = 2(B_1 + B_2) L_c c_u/n$$

där B_1 och B_2 är pålgruppens bredd respektive längd och n är antalet pålar i pålgruppen. Terzaghi och Peck (1967) har antagit att lastökningen i samtliga pålar på grund av negativ mantelfriktion är lika stor. Pålavståndet bör vara så litet som möjligt för att reducera mantelfriktionen.



$$Q_{\text{tot}} = Q + Q' + Q''$$

Figur 14. Negativ mantelfriktion för en pålgrupp (efter Terzaghi och Peck, 1948).

Den dimensioneringsmetod som föreslagits av Tomlinson (1975) för en enstaka påle visas i fig 15 där pålen har slagits ned till antingen ett relativt fast lager (fig 15a) eller ett relativt löst lager (fig 15b). Sättningen antas i båda fallen vara tillräckligt stor för att mantelmotståndet skall motsvara jordens residualskjuvhållfasthet. Maximal mantelfriktion antas vara utbildad (fig 15a) på ett avstånd $0,1 H_c$ över det fasta lagret eftersom endast en mycket liten förskjutning erfordras för att mobilisera maximalt mantelmotstånd. Denna förskjutning är enligt Tomlinson av storleksordningen 0,5% till 1% av pålens diameter. I fig 15b har pålen slagits ned till ett relativt löst lager. Endast pålens övre del kommer i detta fall att påverkas av negativ mantelfriktion. Tomlinson föreslår att pålen skall dimensioneras för negativ mantelfriktion ned till ett djup där sättningen i jorden motsvarar pålspetsens förskjutning.

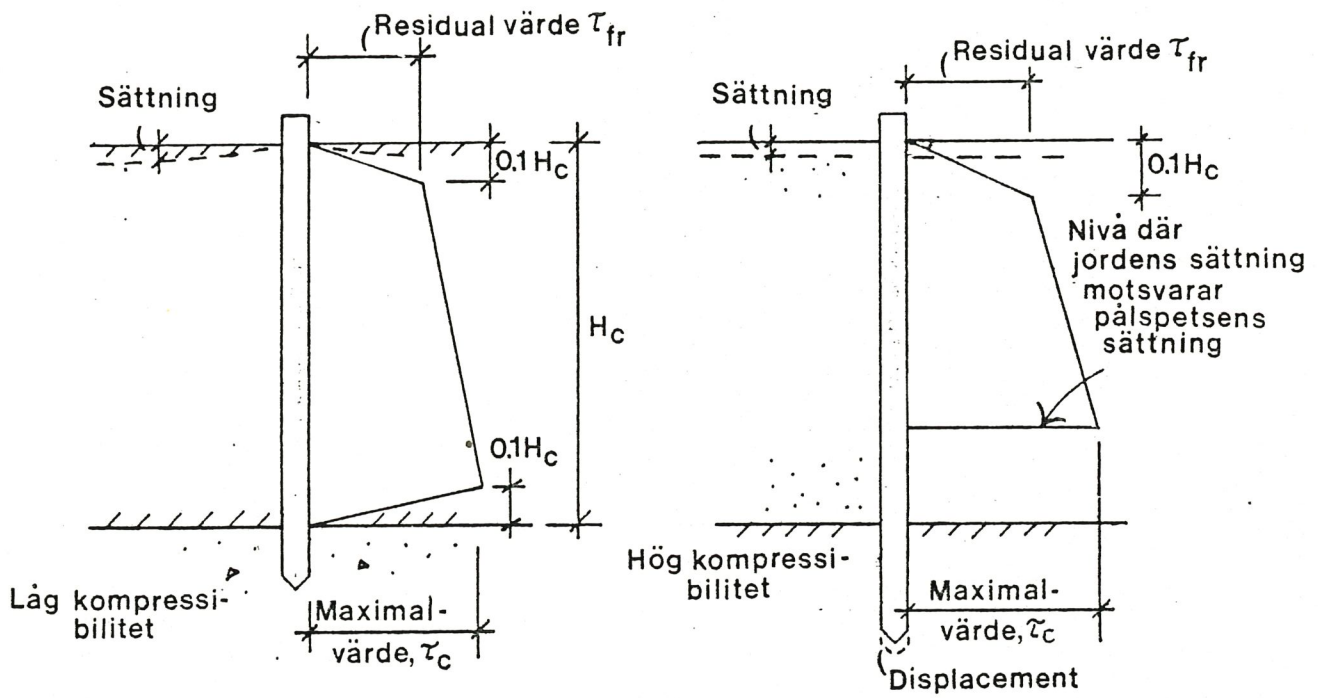
Norska pålkommittén (1973) har föreslagit att ett värde lika med 15 till 22% av det effektiva överlagringstrycket bör användas vid beräkning av negativ mantelfriktion ($\beta = 0,15 \text{ \AA } 0,22$). I beräkningarna inkluderas även ökningen av överlagringstrycket från en fyllning runt pålarna eller från en sänkning av grundvattennivån. I de kanadensiska normerna (National Research Council, 1975) har föreslagits värdet 0,25 på koefficienten β .

De dimensioneringsprinciper som tillämpas i USSR har beskrivits av Rossichin (1970, 1971) och av Dalmatov et al (1975).

I en kommande revidering av Svensk Byggnorm 1975 kommer negativ mantelfriktion att beaktas. Beräkningar som är baserade på partialsäkerhetskoefficienter och lastfaktorer eller på sannolikhetskalkyl kommer att accepteras.

Sammanfattning

Flera olika metoder som är baserade på elasticitets- eller plasticitets-teori har föreslagits för beräkning av påhängslasten på grund av negativ mantelfriktion. Den största osäkerheten i de metoder som är grundade på elasticitetsläran är utvärderingen av de elastiska konstanterna E_s och ν_s och hur dessa konstanter påverkas av det valda installationsförfarandet av pålarna och av tiden.



Figur 15. Negativ mantelfriktion för en enstaka påle (efter Tomlinson, 1975).

7. DIMENSIONERINGSMETODER

Beräkning av negativ mantelfriktion

Vid ett symposium som hölls 1973 vid MIT i Cambridge, USA (Garlanger och Lambe, 1973) jämfördes olika metoder att beräkna påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion. De beräknade värdena jämfördes med den påhängslast som hade uppmätts längs en stålprofilpåle (H-profil) vid Cutler Circle Bridge, Reserve, Mass. Pålen hade slagits genom 7,5 m fyllning, 4 m sand och 15 m lös lera ned i ett underliggande moränlager. Det var helt uppenbart att negativ mantelfriktion hade påverkat pålarna för brolandfästet. Den bakomliggande tillfartsbanken hade satt sig 46 cm medan brolandfästets sättning var mindre än 1,25 cm. Några av de lutande pålarna i brolandfästet hade t o m slitits ut ur sina infästningar. Belastningen i de återstående vertikala pålarna var således högre än vad som antagits vid dimensioneringen av brolandfästet.

Påhängslasten på grund av negativ mantelfriktion kunde uppskattas genom att mäta återfjädringen när en elektrisk ström fick passera genom pålen (elektro-ösmos) och pålen frigjordes från den omgivande jorden. Mätningarna visade att påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion var 0,32 MN å 0,45 MN i fyllningen och sandlagret och 0,60 MN å 0,72 MN i den underliggande leran.

Sju framstående ingenjörer fick i uppdrag att beräkna påhängslasten på grund av negativ mantelfriktion. Olika metoder användes vid beräkningarna. I leran beräknades den negativa mantelfriktionen med hjälp av effektivtrycket i jorden

$$f_s = \bar{\sigma}_v K \tan \phi'_a = \beta \bar{\sigma}_v$$

där K är jordtryckskoefficient, $\bar{\sigma}_v$ är det effektiva överlagringstrycket och ϕ'_a är jordens effektiva friktionsvinkel med avseende på pålmaterialet. Olika värden på koefficienten β användes i beräkningarna särskilt för sandlagret under fyllningen. Mätningarna visade att $K \tan \phi'_a$ i fyllningen var 0,30 till 0,35.

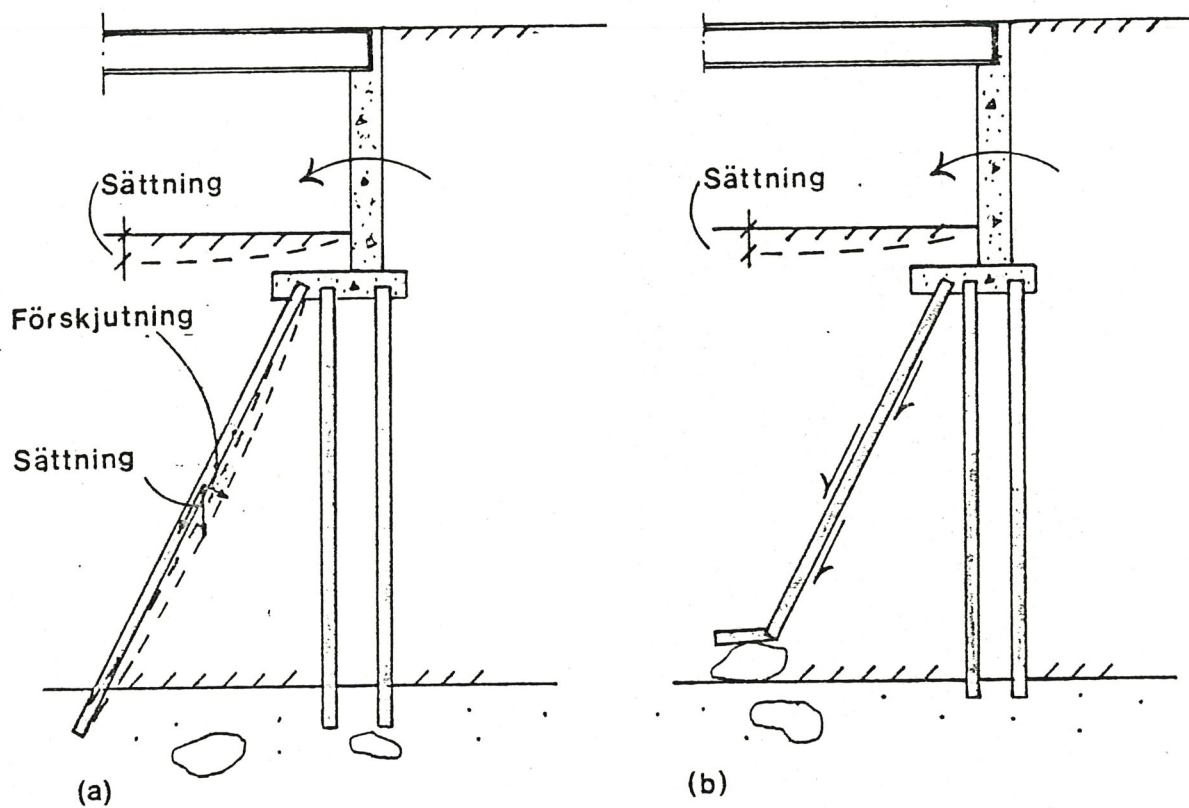
Symposiet visade att den största osäkerheten vid beräkning av påhängslasten förorsakad av negativ mantelfriktion är förknippad med uppskattningen av den yttre lasten på pålgruppen särskilt när pålgruppen

består både av vertikala och lutande pålar. Lutande pålar slås i allmänhet inte lika hårt som vertikala pålar eftersom effektiviteten vid påslagningen minskar kraftigt med ökad lutning.

Landfästet för en bro visas i fig 16. De lutande pålarna har i fig 16a förskjutits i sidled på grund av sättningar förorsakade av en sänkning av grundvattennivån. Pålarnas sidoförskjutning är beroende av sättningens storlek och av pålarnas lutning. Den relativa belastningen i de lutande pålarna reduceras när dessa deformeras medan belastningen i de vertikala pålarna ökar. Ett ytterligare fall visas i fig 16b där en av pålarna har skadats nära spetsen under nedslagningen. Spetsmotståndet för denna påle är lågt jämfört med mantelmotståndet. På grund av negativ mantelfriktion kommer pålplinten att påverkas av en dragkraft från den skadade pålen om mantelmotståndet är större än spetsmotståndet. I det fall spetsmotståndet är mycket lågt kommer dragkraften på grund av negativ mantelfriktion att bli hög. Eftersom de pålar som är belägna längs pålgruppens periferi ofta är lutande kommer det stjälpande momentet förorsakat av negativ mantelfriktion att bli relativt stort. Lutande pålar bör därför undvikas om det finns risk för att påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion blir större än spetsmotståndet.

Negativ mantelfriktion beaktas i allmänhet ej vid dimensionering av en pålgrupp om pålarna har slagits genom en äldre fyllning ned i ett underliggande lager med lös lera eller torv. En sådan fyllning kan ej heller utnyttjas till att bära någon del av belastningen eftersom även en liten ökning av belastningen på fyllningen kan förorsaka relativt stora sättningar.

Den omrörning som sker vid nedslagningen är i allmänhet fullt tillräcklig att förorsaka ytterligare sättningar. Sättningarna är som regel av samma storleksordning som hävningen under nedslagningen. Man kan reducera hävningen och därmed de efterföljande sättningarna genom lerproppdragning eller förborrning eller genom att använda stålprofilpålar eller platsgjutna pålar i stället för slagna betongpålar.



Figur 16. Dimensionering av brofundament.

Jordens konsolidering efter nedslagningen sker som regel relativt snabbt, inom ett par veckor eller månader i de flesta fall. Pålarnas elastiska hoptryckning då de belastas är som regel fullt tillräcklig för att förändra mantelmotståndet från att vara negativt till att bli positivt. Negativ mantelfriktion på grund av lerans omrörning under nedslagningen behöver man i allmänhet ej beakta vid dimensionering av en pålgrupp.

I det fall påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion blir så stor att pålarna krossas vid spetsen kommer pålarnas egenskaper att ändras. Pålarna kommer då att sätta sig tillsammans med den omgivande jorden. Belastningen i kvarvarande hela pålar kommer då att öka. De krossade pålarna fungerar därvid som dragpålar. Konstruktionen kommer i detta fall att belastas med en dragkraft som motsvarar påhängskraften längs pålarna. Ökningen av belastningen i de oskadade pålarna motsvarar då inte endast bortfallet i bärförmåga från de krossade pålarna utan även den dragkraft som erhålls i dessa pålar då de utsätts för negativ mantelfriktion. Eftersom påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion normalt är större än pålarnas draghållfasthet i pålplinten dras pålarna i allmänhet ut ur sina infästningar.

Det finns en principiell skillnad mellan positiv och negativ mantelfriktion. För tryckta pålar är man intresserad av det lägsta möjliga värdet på den positiva mantelfriktionen medan det högsta möjligt värdet är av intresse vid beräkning av negativ mantelfriktion. Den positiva mantelfriktionen bidrar till en påles bärförmåga medan den negativa mantelfriktionen ökar belastningen på pålarna.

Beräkning av pålarnas spetsmotstånd

Spetsmotståndet för en påle nedslagen i friktionsjord (sand eller grus) kan uppskattas från följande ekvation

$$q_p = \sigma_v' N_{qp}$$

där σ_v' är det effektiva överlagringstrycket i jorden vid pålspetsen och N_{qp} är en bärfaktor som är beroende av jordens inre friktionsvinkel. Spetsmotståndet hos en påle i sand eller grus är således beroende av det effektiva överlagringstrycket vid pålspetsen.

Zeevaert (1960) har påpekat att överlagringstrycket och därför spetsmotståndet påverkas av påhängslasten på grund av negativ mantelfriktion eftersom en del av jordens egenvikt bärs av pålarna. Denna effekt kan man reducera genom att använda pålar med förstorad spets. Man bör dock utnyttja ett relativt lågt värde på bärfaktorn N_{qp} vid beräkning av spetsmotståndet om reduktionen av överlagringsstrycket ej beaktas (Moretto, 1971).

Resendiz och Auvinet (1973) har föreslagit att konstruktioner som kan påverkas av negativ mantelfriktion dimensioneras så att de kan följa med den omgivande jorden genom att reducera pålarnas spetsmotstånd. Detta kan ske genom att reducera påldiametern vid spetsen. Denna princip har tillämpats av bl a Resendiz et al, 1969.

Dimensioneringsprinciper

Peck (Garlanger och Lambe, 1973) har påpekat att dimensionering av pålar med avseende på negativ mantelfriktion sker i allmänhet i tre steg. Först fastställs om negativ mantelfriktion över huvudtaget kommer att uppträda. Därefter beräknas den negativa mantelfriktionen och dess konsekvenser. Man måste alltid uppskatta möjliga variationer av olika faktorer. För det tredje måste konstruktören ta hänsyn till olika möjliga lösningar. Han kan antingen dimensionera sin grundkonstruktion för negativ mantelfriktion eller försöka eliminera den. Han kan även använda en annan grundläggningsmetod.

Man försummar ofta påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion när pällängden är mindre än ca 10 m. Påhängskraften måste alltid beaktas för långa pålar (≥ 25 m). När pällängden är mellan 10 och 25 m kan påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion vara så stor att den kan påverka bärförmågan. Enligt de ryska byggnormerna (USSR Building Code, 1978) behöver man ej beakta negativ mantelfriktion om sättningarna efter det att byggandet har satts igång kommer att bli mindre än halva den sättning som byggnaden tål utan att skadas.

Vid dimensionering av en pälgrupp påverkad av negativ mantelfriktion kan man skilja mellan tre olika fall såsom påpekats av Broms (1969) beroende på valt pålavstånd och den belastning som kan förorsaka negativ mantelfriktion såsom visas i fig 17. I Fall I är avståndet mellan pålarna stort. Påhängskraften för varje enskild påle ned till den neutrala punkten kommer att vara avgörande i detta fall. Den neutrala punktens läge kan bestämmas såsom visas i kap 5. När pålavståndet är litet (Fall II) kom mantelfriktionen längs pälgruppens omkrets att vara dimensionerande.

Den negativa mantelfriktionen $f_g = \beta \sigma'_v$ i Fall I och II är beroende av effektivtrycket i jorden och av koefficienten β . Det föreslås att de värden på koefficienten β som är angivna i tabell 4 används när sättningshastigheten är ca 10 mm/år. Sättningshastigheten påverkar emellertid koefficienten β när jordens plasticitetsindex (I_p) är större än ca 50. När $I_p > 50$ föreslås att värdet på koefficienten β ökas med 10% vid varje tiofaldig ökning av sättningshastigheten. Värdet för sand och grus kan vara högre än det som anges i tabell 4 när sanden eller gruset har packats. I detta fall kan koefficienten β närma sig eller till och med vara större än 1,0.

Tabell 4. Föreslagna värden på koefficienten (efter Broms, 1976).

Stenfyllning	0,40
Sand och grus	0,35
Silt eller normalkonsoliderad lera med lågt till normalt plasticitetsindex ($I_p < 50$)	0,30
Normalkonsoliderad lera med högt plasticitetsindex ($I_p > 50$)	0,20

Även vald påltyp påverkar den negativa mantelfriktionen. För stålprofilpålar (H-balk) är det viktigt att man kontrollerar påhängskraften med avseende på pålens totala yta och den omskrivna ytan såsom visas i fig 18.

Horisontaltrycket i jorden kommer i allmänhet att bli högre för slag-na pålar än för platsgjutna eller tryckta pålar. För slagna pålar i sand föreslås att ett värde på mantelmotståndet som motsvarar 1% av spetsmotståndet vid trycksondering används vid beräkning av påhängskraften. För platsgjutna pålar kan ett värde som motsvarar 0,5% av trycksonderingsmotståndet användas. Mantelmotståndet kan även uppskattas från SPT-försök. Mantelmotståndet (f_s) i kPa kan då antas motsvara $2N$ där N är det genomsnittliga sonderingsmotståndet uttryckt i antal slag/30,5 cm sjunkning vid SPT-försök ($f_s = 2N$).

Den belastning eller den sänkning av grundvattennivån som i Fall III förorsakar en påhängskraft på grund av negativ mantelfriktion är liten. Maximal mantelfriktion utbildas ej i detta fall. Påhängskraften motsvarar belastningen inom ett område runt pälgruppen som svarar mot en linje som lutar 1:a och som utgår från ytterpålarna intill det kompressibla lagrets underkant eller från den neutrala punkten. Hörnpålarna kommer i detta fall att bära en påhängslast på grund av negativ mantelfriktion som är $q(H_c/a + S/2)^2$. Motsvarande påhängslast för innerpålarna är qS^2 där S är pålavståndet. I det fall påhängslasten på grund av negativ mantelfriktion är större än mantelmotståndet $f_s = \beta \sigma'_v$ så kommer de omgivande pålarna att bära den överskjutande belastningen.

För lös normalkonsoliderad lera föreslås följande värden på koefficienten a (tabell 5) som påverkas av lerans plasticitetsindex I_p ($I_p = w_L - w_p$).

Tabell 5. Föreslaget samband mellan plasticitetsindex I_p och koefficienten a .

I_p	a
>50	5
30-50	4
<30	3

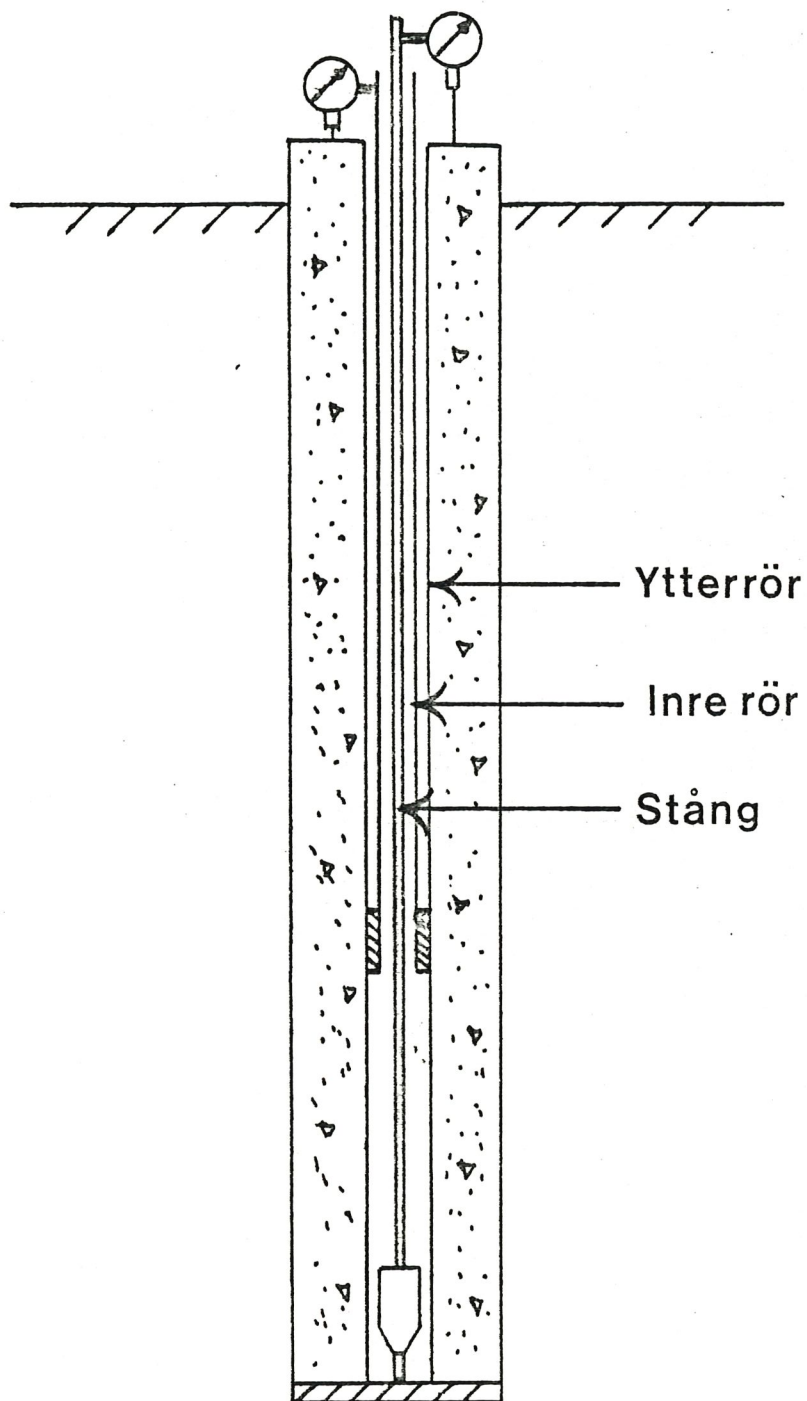
Sammanfattning. Det föreslås att effektivtrycket används vid beräkning av påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion och att endast ständig last används i kombination med negativ mantelfriktion. Man kan skilja mellan tre olika fall (I, II och III) beroende på pål-avstånd, pålgruppens storlek och belastningens intensitet.

8. BELASTNINGSFÖRSÖK

Vid en provbelastning när bärformågan kan påverkas av negativ mantelfriktion är det viktigt att skilja mellan spetsmotstånd och mantelfriktion vid utvärdering av försöksresultaten.

Erforderlig instrumentering har bl a diskuterats av Crawford (1969). Olika metoder kan utnyttjas för att skilja mellan mantelfriktion och spetsmotstånd såsom stångsystem eller lastceller vilka placeras på olika nivåer längs den undersökta pålen eller vid pålspetsen. Även trådtöjningsgivare kan användas (Varde, 1969). Åtminstone bör pålspetsens rörelse mätas.

Olika stångsystem kan användas såsom har beskrivits av t ex Mansur och Kaufmann (1958) och Hellman och Broms (1968). Ett exempel på ett system som består av stänger och rör visas i fig 19. Pålens relativa hoptryckning bestäms genom att mäta stängernas förskjutning relativt varandra och relativt pålhuvudet. Mantelmotståndets fördelning längs pålen kan sedan beräknas om man känner eller kan bestämma pålmaterialets elasticitetsmodul. Vid utvärderingen av försöksresultaten antas i allmänhet att pålen är spänningsfri innan den belastas. Emellertid kan spänningar finnas kvar i pålen efter nedslagning i friktionsjord eller fast lera (Hanna, 1966, Hunter och Davisson, 1969) vilket försvårar utvärderingen.



Figur 19. Mätning av spänningsfördelningen längs en påle
(efter Broms och Hellman, 1968).

Elasticitetsmodulen för betong varierar emellertid med betongens hållfasthet, den valda belastningshastigheten och spänningsnivån. Man kan ta hänsyn till dessa faktorer genom att öka antalet mätpunkter i pålen. Därigenom kan betongens elasticitetsmodul beräknas som en funktion av påförd belastning. Vid utvärderingen är det emellertid nödvändigt att anta att betongens elasticitetsmodul vid konstant spänningsnivå ej varierar längs pålen. Bl a Bozozuk och Labreque (1969) har använt denna metod vid utvärderingen av spänningsfördelningen i prefabricerade betongpålar. Resultaten påverkades emellertid av krypning och krympning i betongen.

Mantelmotstånd och spetsmotstånd kan även bestämmas separat genom att mäta direkt med lastcell den kraft som överförs till den underliggande jorden genom pålspetsen såsom beskrivits av t ex Fellenius och Haagen (1969). Flera lastceller erfordras om spänningsfördelningen skall bestämmas längs en påle.

Mantelmotståndet påverkar det totala överlagringstrycket och därmed spetsmotståndet i silt, sand och grus (friktionsjord). I lera kan emellertid påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion underskattas från belastningsförsök eftersom lerans skjuvhållfasthet gradvis ökar vid konsolidering och dess vattenhalt minskar.

Det är även önskvärt att placera porttrycksgivare längs den belastade pålen så att man kan följa utjämnningen av eventuella porvattenövertryck efter nedslagningen av pålen och vid provbelastningen under konsolideringen av den omgivande lera.

Mantelmotståndet i lös lera påverkas även av belastningshastigheten. Mantelmotståndet ökar i genomsnitt 10 å 20% vid en tiofaldig ökning av belastningshastigheten. Denna ökning av mantelmotståndet förorsakas delvis av den ändring av porvattenövertrycket som erhålls under själva belastningen. Porvattenövertrycket efter nedslagningen motsvarar ungefär $0,2 \tau_{fu}$ å $0,5 \tau_{fu}$ (Meyerhof, 1976). Påhängskraften på grund av negativa mantelfriktionen överskattas ofta om resultaten från belastningsförsök användes direkt utan korrektion vid beräkningarna.

Sammanfattning. Det är viktigt att vid ett belastningsförsök skilja mellan mantelmotstånd och spetsmotstånd när negativ mantelfriktion

måste beaktas. En sådan uppdelning kan sked med hjälp av rör och stänger i den belastade pålen eller med lastceller eller lastgivare.

9. FÖREBYGGANDE ÅTGÄRDER

Flera olika metoder har föreslagits att eliminera eller reducera påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion för både enskilda pålar som för pålgrupper. Man kan reducera den negativa mantelfriktionen genom att

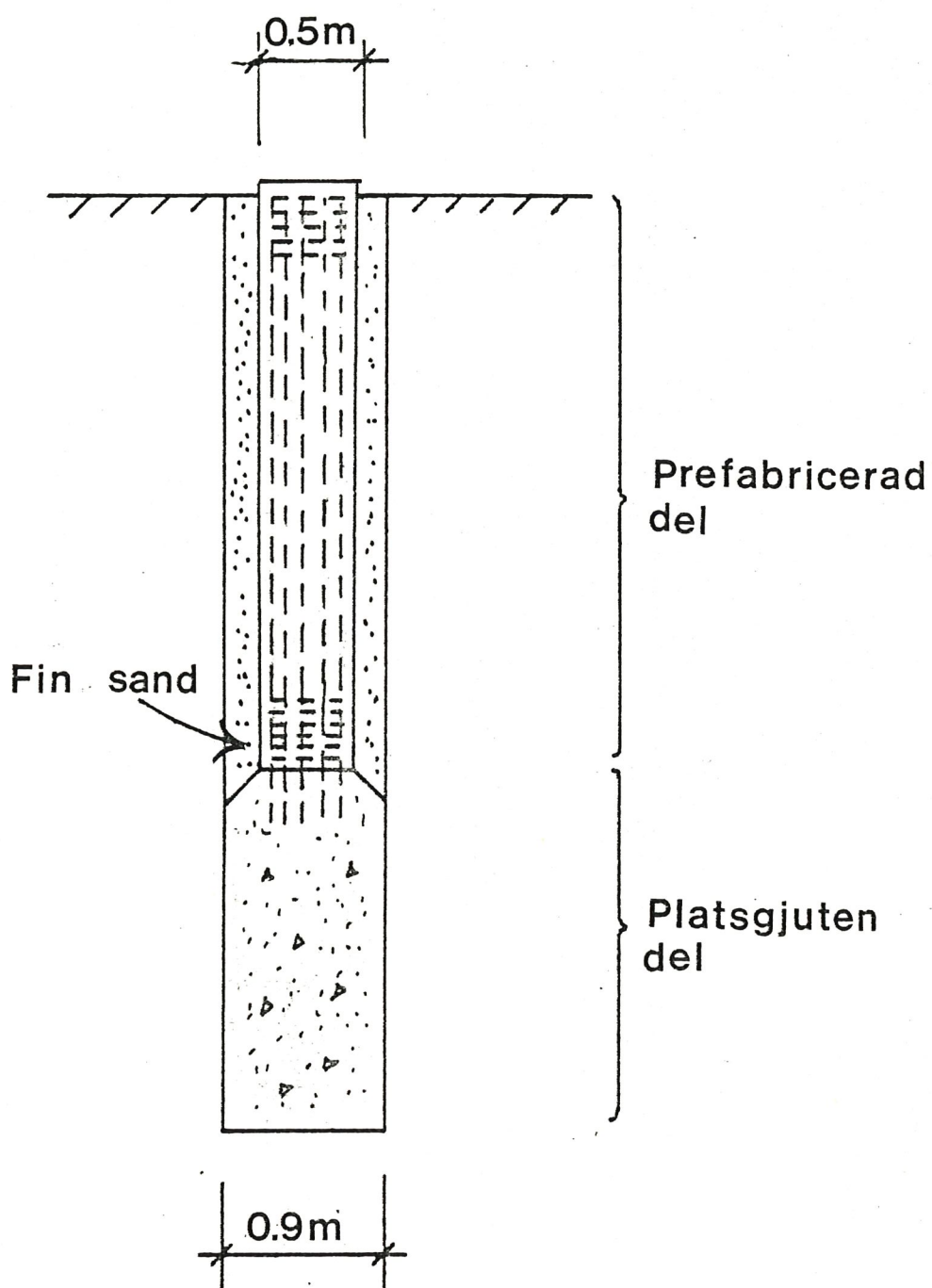
- (a) ändra konstruktionen,
- (b) ändra pålgruppens utformning (geometri),
- (c) övergå till en annan påltyp,
- (d) använda skyddspålar,
- (e) använda betonitslam runt pålarna,
- (f) bestryka pålarna med asfalt,
- (g) leda en elektrisk ström mellan pålarna (elektro-osmos),
- (h) använda foderrör eller genom förborrning,
- (i) reducera sättningarna med exempelvis förbelastning eller genom att
- (h) reducera spetsmotståndet.

(a) Ändring av konstruktionen

Zeevaert (1964) och Resendiz (1964) har föreslagit att pålade byggnader i ett område som sätter sig på grund av t ex en grundvatten-sänkning kan konstrueras på så sätt att byggnadernas sättning motsvarar den omgivande jordens sättning. Pålarna har i detta fall främst en sättningsreducerande funktion. Pålängden och pålavståndet väljs så att totalsättningarna och sättningsskillnaderna blir mindre än vad byggnaderna tål utan att skadas. Denna princip har utnyttjats i flera fall i Mexico City såsom beskrivits av av Gonzales Flores (1959).

(b) Ändring av pålgruppens utformning (geometri)

Påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion kan även reduceras genom att minska pålavståndet och antalet pålar i pålgruppen. Påhängskraften längs pålgruppens omkrets och från den jordvolym som innesluts i pålgruppen kommer då att minska.



Figur 20. Kombinerad påle (efter Locher, 1965).

(c) Övergång till annan påltyp

I Holland används i stor utsträckning specialpålar med ett smalt skaft och förstorad fot för att reducera påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion såsom beskrivits av Plantema och Nolet (1957). Även Moretto (1971) har rekommenderat användningen av pålar med ett smalt skaft.

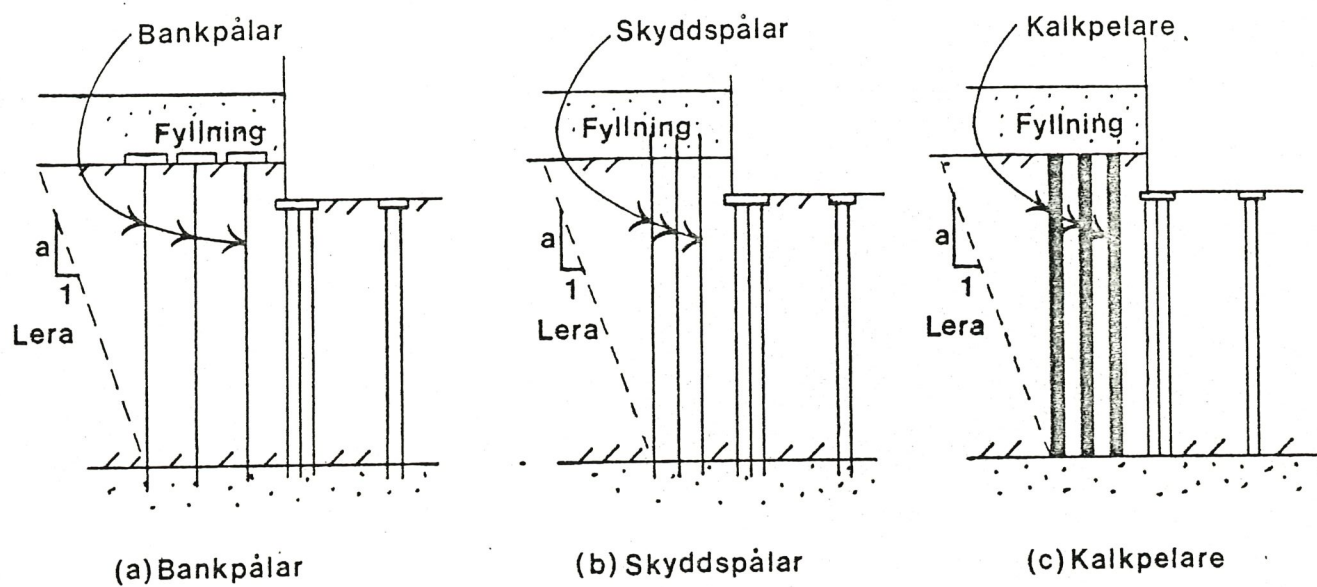
En intressant kombinerad påle har beskrivits av Locher (1965). Denna påltyp har använts bl a för en bro i Moosmatten i Schweiz för att reducera mantelmotståndet och därmed påhängskraften förorsakad av negativ mantelkohesion. Pålarna var sammansatta av en nedre platsgjuten del och en övre prefabricerad del såsom visas i fig 20. Pålarna tillverkades genom att först slå ett foderrör med 0,9 meter diameter. Foderröret drogs upp allteftersom röret fylldes med betong. En rund prefabricerad påldel med 0,5 m diameter placerades sedan på den platsgjutna pålen. Mellanrummet mellan den prefabricerade pålen och foderröret fylldes med lös finsand innan foderröret drogs upp. Den reduktion av mantelmotståndet som då erhöles beräknades med Zeevaerts metod (1960).

(d) Skyddspålar

I många fall kan det vara fördelaktigt att skydda en pålad byggnad som utsätts för negativ mantelfriktion med skyddspålar längs pålgruppens omkrets såsom visas i fig 21, särskilt i de fall då den negativa mantelfriktionen förorsakas av en fyllning som placerats in till den pålade byggnaden eller av en sänkning av grundvattennivån.

Långa bankpålar används i fig 21a. Pålarna är försedda med en platta som bär fyllningen runt den pålade byggnaden. Pålplattornas storlek är beroende av fyllningens tjocklek och av pålavståndet. Pålplattornas totala yta motsvarar normalt 10 å 50% av fyllningens totala yta.

Separata skyddspålar har slagits i fig 21b runt den pålade byggnaden genom de kompressibla lagren. Pålarna kommer i detta fall att överföra belastningen från fyllningen genom positiv mantelfriktion till det underliggande fasta lagret. I fig 21c visas en skyddspålning som består av kalkpelare. Kalkpelarna reducerar sättningarna runt den pålade byggnaden och således påhängskraften på konstruktionspålarna under byggnaden.



Figur 21. Olika typer av skyddspålar.

Pålar som går om lott utnyttjas i fig 22 såsom har föreslagits av Girault (1964). Belastningen i A-pålarna överförs delvis till B-pålarna och delvis till den omgivande jorden. B-pålarna reducerar sättningarna främst under A-pålarna förutom att sättningsskillnaderna reduceras. B-pålarna kan dimensioneras med en låg säkerhetsfaktor ($F_s = 1,0$). Pålarna slås med knekt så att avståndet mellan pålarna och den pålade byggnadens grundläggningsnivå blir tillräckligt stort.

Mätningar har utförts av Girault (1969) på en byggnad som grundlagts med denna metod. B-pålarna trycktes ned med hjälp av domkrafter från källaren av den byggnad som skulle grundförstärkas. Efter 100 dagar var belastningen i de 17 m långa B-pålarna 1 MN/påle.

(e) Bentonitslam

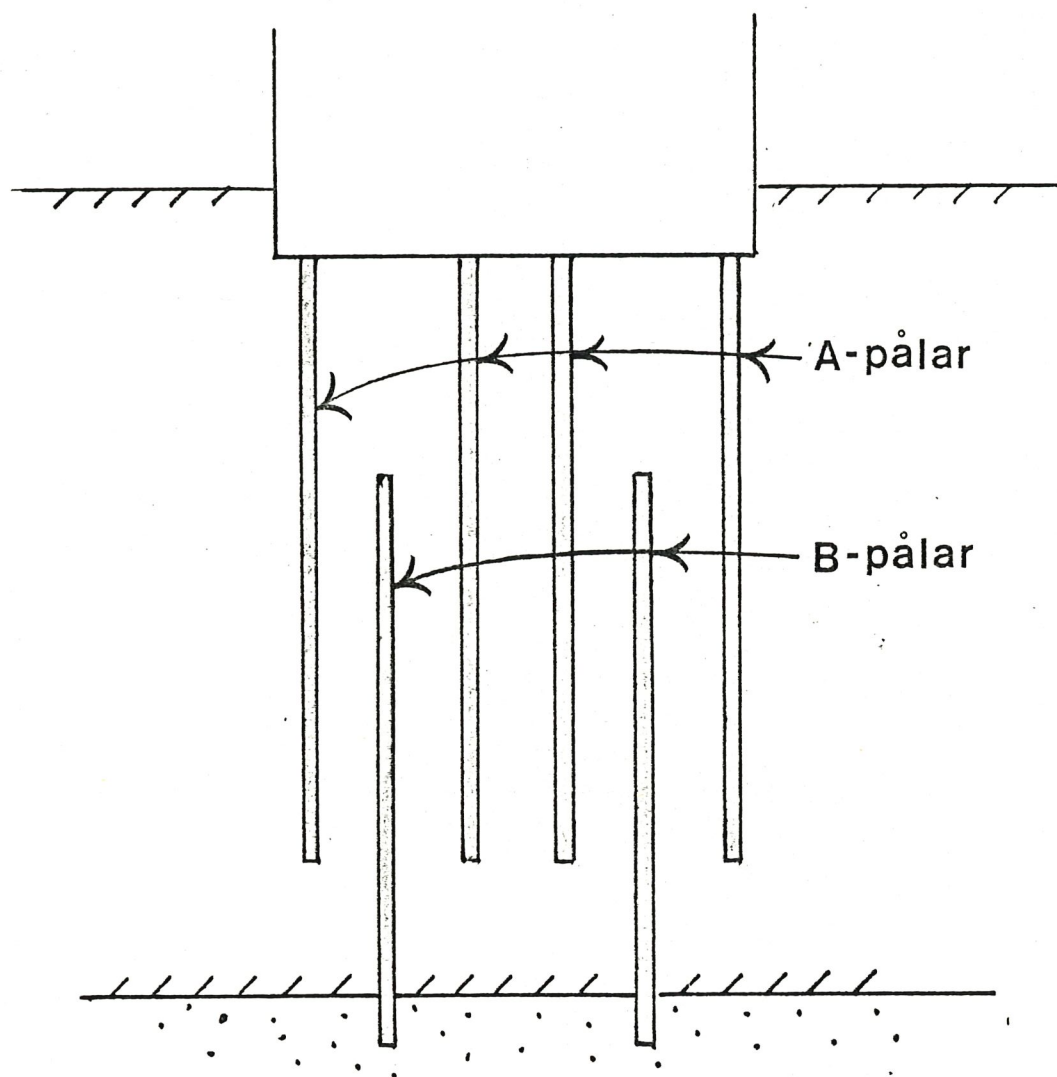
Försöksresultat redovisade av Brons et al (1969a) och av Bjerrum et al (1969) visar att bentonitslam runt en påle reducerar avsevärt påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion. Även Edwards och Visser (1969) har beskrivit fall där påhängskraften har reducerats med ett 30 till 40 mm tjockt skikt med bentonitslam. Påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion var 0,12 MN jämfört med 0,70 å 0,80 MN för oskyddade pålar.

Det har varit en omfattande diskussion om den ökning av påhängskraften som sker med tiden när bentonitslam används. Försöksresultat tyder på att påhängskraften ej ökar. Bentonitskiktet kan emellertid skadas vid slagningen av angränsande pålar om avståndet mellan pålarna ej är tillräckligt stort såsom påpekats av Brons et al (1969b).

(f) Asfaltbetrykning

Den vanligaste metoden att reducera påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion är att betryka pålarna med asfalt (se t ex Edwards och Visser, 1969, Hunt, 1973). Mätningar utförda av Brons et al (1969a) och av Bjerrum et al (1969) visar att även ett relativt tunt asfaltskikt effektivt reducerar påhängskraften.

Bjerrum et al (1969) har rapporterat att endast ett 1 mm tjockt asfaltslager reducerade påhängskraften med mer än 90% i jämförelse med en obehandlad påle. Om asfaltslagret är alltför tunt kan emellertid jorden runt pålarna efter ett par år tränga igenom asfaltskiktet.



Figur 22. Överlappande pålar (efter Girault, 1964).

Vid belastningsförsök utförda av Hutchinson och Jensen (1968) med 14 till 24 m långa betong-, stål- och träpålar i Khorramshar i Iran reducerade ett 1,2 mm tjockt asfaltlager påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion med 30 till 80% jämfört med obehandlade pålar. Pålarna var nedslagna i lös siltig lera. Emellertid hade temperaturen i jorden en stor inverkan på resultaten.

Claessen och Horvat (1974) och Edwards och Visser (1969) har beskrivit ett fall i Holland där påhängskraften med hjälp av asfalt reducerades med mer än 90%. Asfaltlagrets tjocklek var 10 mm. Påhängskraften på grund av negativ mantelkohesion var 0,06 MN jämfört med 0,7 å 0,8 MN för motsvarande obehandlade pålar. Claessen och Horvat observerade att asfaltlagret längs pålarnas nedre del minskade spetsmotståndet vid långtidsbelastning. Asfaltlagret deformerades gradvis vid det höga tryck som existerade vid pålspetsen. Denna minskning av spetsmotståndet kan förhindras genom att lämna pålarna obehandlade vid pålspetsen längs en sträcka som motsvarar ca 10 påldiametrar.

Flera fall har beskrivits i litteraturen där asfalt har använts för att reducera påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion (Edwards och Visser, 1969, Schönian, 1972, Horvat, 1973, Wassmuth och Gass, 1973). Vid en av överfarterna för motorväg M 5 i England där tillfartsbankarna var upp till 8 m höga behandlades pålarna med ett 3 mm tjockt asfaltlager. Stora sättningar förväntades i den underliggande torven och den lösa siltiga leran. Asfalten skyddades under nedslagningen med foderrör runt pålarna. Mellanrummet mellan pålarna och den omgivande jorden fylldes med pulveriserad aska (Anon, 1973). Längden av den asfaltbetrykta delen var 16 m. Totalt behandlades 5000 m. Kostnaden var ca £ 20 per påle (1973).

Omkring 300 ca 10 m långa prefabricerade betongpålar för en bro vid Newhaven, Sussex, England, försågs med ca 6 mm tjockt asfaltlager för att minska upphängningen på grund av negativ mantelfriktion. Vid gjutningen av asfalten runt pålarna användes en form (Anon, 1976).

Asfaltbetrykning har även använts för att reducera påhängskraften längs platsgjutna pålar för det 12 våningar höga Bush Lane House i London, England. Pålarna var försedda med en förstorad fot. Asfalten applicerades på utsidan av ett permanent foderrör av stål som placerades i det yttre temporära foderröret som användes vid tillverkningen av pålarna (Anon, 1974).

En liknande metod utnyttjades av Hilton och Hardenberg (1964) och av Golder och Spence (1961) vid byggandet av Port Mannbron i Vancouver, Kanada. Påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion reducerades genom att först borra ett hål med 0,84 m diameter genom leran ned till ett underliggande moränlager. Borrvätska användes under borrhningen för att stabilisera hålet. Ett stålrör med 0,61 m diameter sänktes sedan ned. Utsidan av röret hade bestrukits med asfalt och täckts med ett lager med glasfiberväv. Asfaltslagrets tjocklek var 5 mm. Pålarna slogs till stopp i moränen med en hejare som löpte i röret. Borrvätskan runt rören ersattes sedan med betongbruk. Med denna metod förhindrades att asfalten skrapades av under nedslagningen.

Reduktionen av påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion med asfalt har undersökts bl a av Claessen och Gelok (1971), Schönian (1972), Claessen och Horvat (1972, 1976) och av Baligh et al (1978). Försök visar att asfalt uppför sig som en ej linjär viskös vätska och att asfaltens viskositet påverkas av temperaturen i jorden. Även åldring av asfalten kan vara viktig.

Asfalten kan antingen borstas eller sprutas på pålarna. Tjockleken är vanligtvis 1 till 5 mm. Om ett tjockare lager erfordras på grund av att den omgivande jorden kan tränga igenom asfaltskiktet måste asfalten gjutas i en form runt pålarna. Optimal tjocklek är enligt Shell International Petroleum (1974) ca 10 mm.

Ett problem med behandlade pålar är att asfalten deformeras när pålarna lagras, särskilt sommartid när det är varmt. Man kan förhindra detta genom att spruta kallt vatten på pålarna eller genom att förvara pålarna under vatten. Därvid reduceras även temperaturändringarna.

Det är viktigt att behandlade pålar skyddas under nedslagningen, särskilt om pålarna slås genom ett lager med sprängsten. Bjerrum et al (1969) rapporterar att påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion reduceras till 0,15 MN när pålar försedda med en förstorad spets användes och pålarna skyddades av ett foderrör under nedslagningen genom en ca 15 m tjock sprängstensfyllning. Påhängskraften var 2,1 MN när foderrör ej användes under nedslagningen.

Asfaltbestrukna pålar som slås genom ett sandlager kan skyddas genom att förse pålarna med en förstorad spets och genom att stabilisera mellanrummet mellan påle och omgivande jord med bentonitslam (Bjerrum et al, 1969). Det är även möjligt att skydda pålar under nedslagningen genom att öka asfaltlagrets tjocklek. Om fyllningen är grusig eller stenig erfordras foderrör.

För att kunna välja lämplig asfaltkvalitet och lämplig tjocklek måste man känna till den genomsnittliga temperaturen i jorden runt pålarna med en noggrannhet av ca 1°C och den maximala sättningshastigheten. Den genomsnittliga temperaturen i jorden kan variera på 1,5 å 2,0 m djup mellan 5°C och 25°C beroende på klimatet. Den högsta sättningshastigheten erhålls vid markytan omedelbart efter det att en fyllning har placerats runt pålarna eller alldeles efter en grundvattensänkning. Sättningshastigheten minskar med ökat djup och med tiden. För normalkonsoliderad lera är sättningshastigheten främst beroende av lerans konsolideringskoefficient och antalet dränerande lager. I början är sättningshastigheten oberoende av de olika lagrens tjocklek. En sättningshastighet av upp till 500 mm/år har dock observerats.

Kostnaden för att reducera påhängskraften med asfalt är främst beroende av kostnaden för själva appliceringen av asfalten samt ökade kostnader vid installationen av pålarna. Kostnaden för asfaltbetrykning kan vara av samma storleksordning som kostnaden för själva pålarna.

(g) Elektro-osmos

Reduktionen av negativ mantelfriktion med elektro-osmos där pålarna används som katoder har undersökts av bl a Bjerrum et al (1969). Erforderlig spänning är låg (0,6 å 2,0 volt). Den är av samma storleksordning som den som erfordras vid katodiskt skydd. Påhängskraften längs pålarna reduceras nästan omedelbart när porvatten dras från den omliggande leran till pålarna. Om behandlingen avbrytes ökar påhängskraften snabbt eftersom endast en mycket liten relativ förskjutning fordras för att erhålla maximal mantelfriktion. Behandlingen med elektro-osmos måste fortsätta tills sättningarna helt har avstannat. Behandling med elektro-osmos är som regel dyrare än andra metoder och används därför sällan.

(h) Foderrör eller förborrning

Främst i friktionsjord kan man använda foderrör för att reducera påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion. Rören installeras innan påslagningen. Rörens diameter måste vara tillräcklig så att ett mellanrum erhålls mellan foderrör och påle. Mellanrummet fylls ofta med sand eller bentonitslam. En nackdel med denna metod är att pålarnas sidomotstånd blir lågt.

Golder och Willeumier (1964) har använt ett visköst material för att reducera påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion. Pålarna slogs genom ett foderrör. Mellanrummet mellan pålarna och foderröret fylldes med det viskösa materialet. Därefter drogs foderröret upp.

(i) Förbelastning

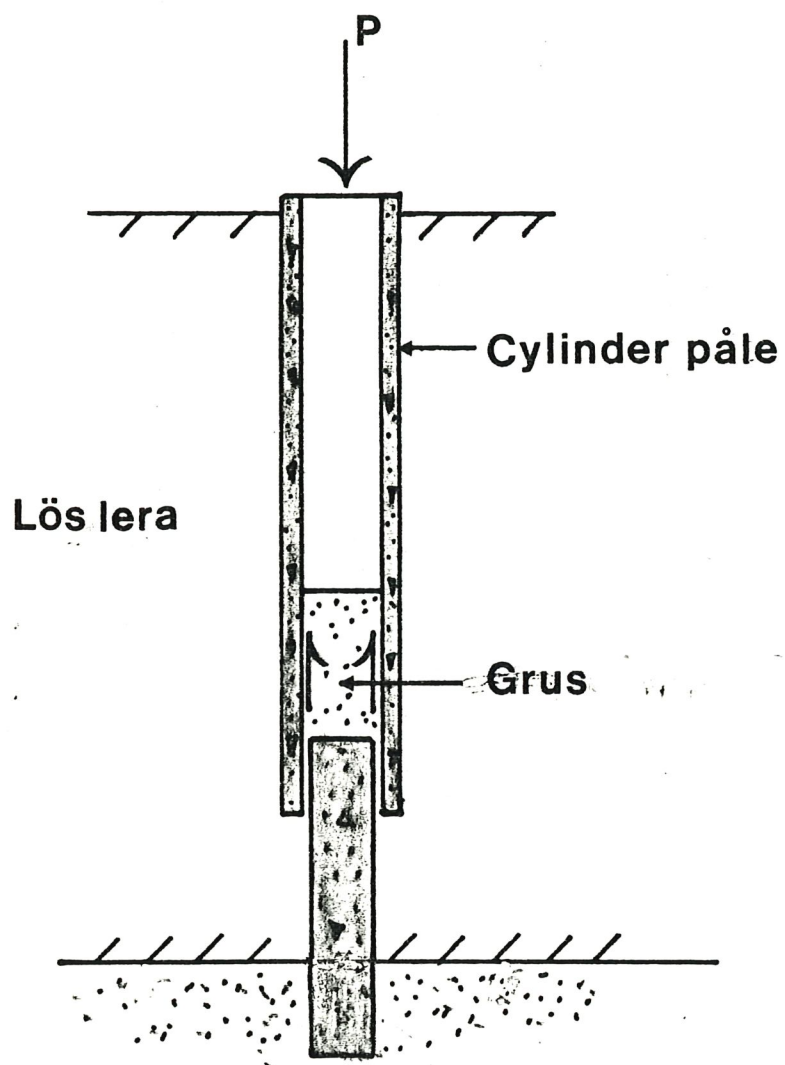
Påhängskraften på grund av negativ mantelfriktion kan reduceras eller elimineras genom att förbelasta jorden innan pålarna installeras. I allmänhet erfordras lång tid för konsolidering av leran. Tiden kan reduceras med vertikaldränering. Även kalkpelare eller stenpelare kan användas.

(j) Reduktion av spetsmotståndet

Correa (1969) har föreslagit en hoptryckbar påle som reducerar upphängningen förorsakad av negativ mantelfriktion. Pålen består av två delar, en rörformad överdel och en massiv cirkulär underdel. Underdelen glider inuti den rörformade överdelen såsom visas i fig 23. Belastningen i underdelen kan ändras genom att variera grusfyllningens höjd i den rörformade delen.

En liknande metod har föreslagits av Gonzales Flores (1959) när ett 11-våningshus i Mexiko City, grundlagt på pålar, förstärktes. Byggnaden hade erhållit en snedsättning som var 0,25 m. Hål borrades in i bottenplattan för varje påle. Belastningen från huset kunde sedan överföras från bottenplattan till pålarna genom en upphängningsanordning. Belastningen i varje påle anpassas sedan så att byggnaden rätades upp.

Resendiz (1964) använde pålar med varierande diameter för att reducera upphängningen på grund av negativ mantelfriktion. Varje påle



Figur 23. Teleskoppåle (efter Carrea, 1969).

hade en 3 m lång underdel vars diameter var 0,2 m medan diametern för den 30 m långa överdelen var 0,35 m. Pålarna slogs genom lös lera ned i ett underliggande sandlager. Spetsmotståndet blev lågt beroende på den relativt klena underdelen. Pålarna satte därför sig med den omgivande jorden. Sättningarna var förorsakade av en sänkning av grundvattennivån.

Sammanfattning. Flera olika metoder har föreslagits för att minska påhängskraften för både enskilda pålar och för pålgrupper. Påhängskraften kan reduceras genom att ändra de enskilda pålarnas form eller pålgruppers geometri, genom att bestryka pålarna med asfalt, genom att omge pålarna med ett skikt med bentonitslam eller med ett foder-rör eller genom att behandla pålarna med elektro-osmos. Det är även möjligt att minska påhängskraften genom att reducera spetsmotståndet så att byggnadens sättning kommer att motsvara den omgivande jordens sättning och byggnaden rör sig tillsammans med den omgivande jorden.

10. SLUTSATSER

Det är först under de senaste 15 åren som problemet med negativ mantelfriktion har uppmärksammats och man systematiskt har studerat fenomenet. Negativ mantelfriktion kan t ex förorsakas av den omrörning som sker vid påslagning i lera, av en fyllning som placeras kring en pålgrupp eller runt en pålad byggnad eller av en sänkning av grundvattennivån.

Jorden runt en påle störs under nedslagningen intill ett avstånd som motsvarar ca en påldiameter. Sättningarna efter nedslagningen svarar i lera ungefär mot den hävning som erhålls vid nedslagningen.

Relativt få fall har rapporterats i litteraturen där pålade byggnader har skadats på grund av negativ mantelfriktion. Främst byggnader och broar har påverkats. Där skador har inträffat har dessa vanligtvis varit förorsakade av en fyllning som placerats runt eller bakom konstruktionen. Endast i ett fåtal fall har skador på grund av negativ mantelfriktion förorsakats av en sänkning av grundvattennivån.

Negativ mantelfriktion har undersökts med både laboratorie- och fältförsök. Försöksresultatet visar att endast en mycket liten förskjutning erfordras för att erhålla maximal mantelfriktion. Påhängs-

kraften förorsakad av negativ mantelfriktion har jämförts med antingen det effektiva vertikalltrycket (överlagringstrycket) i jorden eller med jordens odränerade skjuvhållfasthet.

Påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion är beroende av den neutrala punktens läge där pålens sättning motsvarar den i den omgivande jorden. Man behöver endast beakta negativ mantelfriktion i kombination med ständig last. En rörlig last påverkar endast spänningsfördelningen längs pålens övre del så länge som belastningen är mindre än ca 2 gånger påhängskraften.

Metoder som är grundade på elasticitets- eller plasticitetsläran har utvecklats för att beräkna negativ mantelfriktion för både enskilda pålar som för pålgrupper. Den största begränsningen av dessa metoder är utvärderingen av de konstanter som erfordras och hur dessa konstanter förändras med tiden.

Det föreslås att både enskilda pålar och pålgrupper som påverkas av negativ mantelfriktion bör dimensioneras för maximal negativ mantelfriktion över den neutrala punkten och att den negativa mantelfriktionen beräknas från det effektiva överlagringstrycket i jorden. Värden som främst är baserade på resultat från belastningsförsök i fält har föreslagits i tabell 4 på koefficienten β .

Man kan reducera påhängskraften förorsakad av negativ mantelfriktion genom att ändra pålarnas form eller pålgruppens geometri, genom att bestryka pålarna med asfalt, genom att omge pålarna med ett bentonitskikt eller genom att behandla pålarna med elektro-osmos. Även foder-rör kan användas. Det är även möjligt att reducera påhängskraften genom att utföra pålgrundläggning på så sätt att byggnaden sätter sig tillsammans med den omgivande jorden.

REFERENSER

- Aldrich, H.P. (1970), "Back Bay Boston - Part 1." Jour. of the Boston Society of Civil Engineers, Vol.57, No.1, pp. 1-33.
- Anon (1973). "Bitumen Slip-Coatings, Construction 7", Dept. of the Environment. Sept. 73, pp. 26-29, England.
- Anon (1984). "Bitumen Coated Piles Cut Excessive Down-Drag". Ground Engineering, Vol.7, No.3, pp. 53.
- Anon (1976). "Slip Coat for Newhaven, Bridge Precast Piles", Ground Engineering, Vol.9, No.4, pp. 45-46.
- Appendino, M. (1973), "Results of Full-Scale Investigation in a Large instrumented Bored Pile," Rivista Ital. Geotechn., Vol.7, No.2/3, pp. 115-118.
- Avery, S.B. and Wilson, S.D. (1950), "Discussion," Trans. ASCE. Vol.115, pp. 322-331.
- Bakholdin, V. and Berman, V.I. (1974a), "Estimation of Negative Skin Friction on Piles" (in Russian), Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov, Vol.16, No.4, pp. 11-15.
- Bakholdin, B.V. and Berman, V.I. (1974b), "Investigations of Negative Skin Friction on Piles and Suggestions on Its Calculation," (in Russian). Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov. No.5, pp. 11-15, July-August, 1974.
- Baligh, M.M., Figi, H. and Vivatrat, V. (1978). "Design of Bitumen Coatings to Reduce Downdrag on Piles", Constructed Facilities Division, Dept. of Civil Engng, M.I.T. Research Report R 78-5, 143 pp.
- Baligh, M.M. and Viatrat, V. (1975). "A Manual on Prediction on Pile Downdrag on End-Bearing Piles", Research Report R 75-38. Geotechnical Publication 518, Dept. of Civil Engng. M.I.T., Cambridge, Mass., Nov. 1975.

- Begemann, H.K.S.P. (1969), "Negative Skin Friction of a Single Pile", Proc. Specialty Session on Negative Skin Friction and Settlement of Piled Foundations, 7. Int. Conf. Soil. Mech. a. Found. Engng. Mexico, 3 pp.
- Bjerin, L. (1977), "Påhängskrafter på långa betongpålar", (Drag Forces on Long Concrete Piles), Swedish Geotechnical Institute, Report No.2, 62 pp.
- Bjerrum, L. (1969), "Discussions", Canadian Geotechnical Journal, Vol.6, No.3, pp. 366-367.
- Bjerrum, L. (1973), "Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays and Structurally Unstable Soils (Collapsible, Expansive and Others)", Proc. 8 Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng. Vol.3, pp. 111-159.
- Bjerrum, L., Johannessen, I.J. and Eide, O. (1969), "Reduction of Negative Skin Friction on Steel Piles to Rock", Proc. 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng. Mexico, Vol.2, pp. 27-33.
- Bozozuk, M. (1970), "Field Observations of Negative Skin Friction Loads on Long Piles in Marine Clay", Proc. Conf. on Design a. Installation of Pile Foundations and Cellular Structures, Lehigh Univ., pp. 273-280.
- Bozozuk, M. (1972). "Downdrag Measurements on a 160 ft Floating Pipe Test Pile in Marine Clay". Canadian Geotechnical Jour., Vol.9, No.2, pp. 127-136.
- Bozozuk, M. and Labreque, A. (1969). "Downdrag Measurements on 270' Composite Piles. Performance of Deep Foundations", Am. Soc. Testing Mat., STP No.444, pp. 15-40.
- Brand, E.W. and Luangdilok, N. (1975), "A Long-Term Failure Caused by Dragdown on Piles", Proc.4, Southeast Asian Conf. Soil Engng. 4.15-4.24.

- Brinch Hansen, J. (1968), "A Theory for Skin Friction on Piles", The Danish Geotechnical Institute, Bulletin No.25, pp. 5-12.
- Britt, G.B. and Rawcliffe, E. (1970), "Piling and Pile Tests on a Number of Sites in Malaya", Proc. 2, Southeast Asian Conf. Soil Engng, Singapore, pp. 93-105.
- Broms, B.B. (1966), "Methods of Calculating the Ultimate Bearing Capacity of Piles - A Summary", Sols-Soils, Vol.5, No.18-19, pp. 21-32.
- Broms, B.B. (1969), "Design of Pile Groups with Respect to Negative Skin Friction", Specialty Session, Negative Skin Friction and Settlement of Pile Foundations, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol.2, 2 pp.
- Broms, B.B. (1976), "Pile Foundations - Pile Groups", Proc. 6. European Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol.2.1, pp. 103-132.
- Broms, B.B. and Hellman, L. (1968). "End Bearing and Skin Friction Resistance of Piles", Jour. Soil Mech.a. Found. Div., Proc. ASCE, Vol.94, No. SM 2, pp. 421-429.
- Brons, K.F., Amesz, A.W. and Rinck, J. (1969a), "The Negative Skin Friction Along the Shaft of a Foundation Pile", Proc. Specialty Session on Negative Skin Friction and Settlement of Piled Foundations, Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Mexico, Vol.1, 16 pp.
- Brons, K.F., Amesz, A.W. and Rinck, J. (1969b), "Discussion", Proc. Specialty Session Negative Skin Friction and Settlements of Piled Foundations, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol.2, 3 pp.
- Buisson, M., Ahu, J. and Habib, P. (1960), "Le Frottement Négatif", Annales de l'Institut Francais du Batiment et des Travaux Publics, Sols et Fondations, No.31, pp. 29-46.
- Burland, J. (1973), "Shaft Friction of Piles in Clay", Ground Engineering, Vol.6, No.3, pp-30-42.

- Burland, J.B. and Cooke, R.W. (1974), "The design of Bored Piles", Ground Engineering, Vol.7, No.4, pp. 28-30, 33-35.
- Casagrande, A. (1932), "The Structure of Clay and Its Importance in Foundation Engineering", Boston Soc. of Civil Engng, Contribution to Soil Mechanics, 1925-1940, pp. 72-125.
- Chellis, R.D., (1961), "Pile Foundations", Mc Graw Hill Book Co., 2nd Ed., 704 pp.
- Claessen, A.I.M. and Gelok, J.J. (1971), "Reduction of Negative Friction on Bearing Piles by Bitumen Slip Layers", Publ. No M 59/71, Koninklijke/Shell Laboratorium, Amsterdam, The Netherlands, 1971.
- Claessen, A.I.M. and Horvat, E.I. (1972), "Reduction of Negative Friction on Bearing Piles by Bitumen Slip Layers", Shell International Petroleum Co. Ltd., 11 pp.
- Claessen, A.I.M. and Horvat, E. (1974), "Reducing Negative Friction with Bitumen Slip Layers", Jour. Geotechn. Engng Div., Proc. ASCE, Vol.100, No. GT 8, pp. 925-944.
- Claessen, A.I.M. and Horvat, E. (1976), "Discussion", Jour. Geotechnical Div., Proc. ASCE, Vol.102, No. GT 3, pp. 255-257.
- Clark, J.C. and Meyerhof, G.G. (1973), "The Behaviour of Piles Driven in Clay - Investigation of the Bearing Capacity Using Total and Effective Strength Parameters", Canadian Geotechnical Jour., Vol.10, pp. 82-102.
- Cognon, J.M. (1972), "Measure in Situ du Frottement Négatif (In-Situ Measurement of Negative Friction). Ann. Inst. Techn. Bat. Trav. Publ. No.293, Sols et Fondations (89), pp. 1-12.
- Colombo, P. (1971), "Osservazioni sul comportamento di pali a grande diametro", (Behaviour of Large Diameter Bored Piles), Riv. Ital. Geotechn., Vol.5, No.3, pp. 163-172.

- Combarieu, O. (1974), "Effect d'accrochage et méthode d'évaluation de frottement négatif", Bulletin Liaison & Lab. Pont et Chaussées, No. 71, Mai-Juin 1974, pp. 93-107.
- Cornfield, G.M. (1973), "Piles for Tall Buildings", Ground Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 36-46.
- Correa, J.J. (1961), "The Application of Negative Friction Piles to the Reduction of Settlement", Proc. 5. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Paris, Vol. 2, pp. 41-44.
- Correa, J.J. (1969), "A Telescopic Type of Pile for Subsidence Conditions", Proc. Specialty Session on Negative Skin Friction and Settlements of Piled Foundations, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Mexico City, 4 pp.
- Crawford, C.B. (1969), "Instrumentation and Down-Drag - Performance of Deep Foundations", Am. Soc. Testing Material, Techn. Publ. No. 444, pp. 223-226.
- Cummings, A.E., Kerkhoff, G.O. and Peck, R.B. (1950), "Effect of Driving Piles in Soft Clay", Trans. ASCE, Vol. 115, pp. 275-285.
- Dalmatov, B.I., Lapschin, F.K. and Rossichin, Jo. V. (1975), "Proektirovanie svajnykh fundamentov v usloviyakh slabyykh gruntov", Leningrad, 240 p.
- Davis, E.H. and Poulos, H.G. (1969), "A Summary of Some Recent Solutions for the Theoretical Behaviour of Piles", Proc. Specialty Session. Negative Skin Friction and Settlements of Piled Foundations. 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found Engng, Mexico City, 15 pp.
- De Beer, E.E. (1976), "Berekning van de mantelwrijving op ingeheide palen", Tijdschrift der Openbare Werken van Belgie, Vol. 16, No. 1, pp. 23-53, No. 2, pp. 131-157.
- De Beer, E.E. (1966), "Berekning van de negative wrijving op palen", Tijdschrift der openbare Werken van Belgie, Vol. 6, pp. 485-514.

- Desai, C.S., Chow, L.L. and Siriwardane, T.H.J. (1978), "Analysis and Design for Negative Skin Friction", Virginia Polytechnic Institute and State Univ., VPI-E-78.2, Blacksburg, Virginia, 20 pp.
- Dingosov, G. (1976), "Analyse du frottement négatif lors de fondation sur pieux", (Analysis of Negative Skin Friction in Pile Foundation), Proc. 6. Europ. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 1.2., pp. 407-410.
- Edwards, J.M and Visser, W. (1969), "Bitumen Slip Layers for Construction Piles", Shell International Petroleum Company Ltd, London, Marketing Oil Report MOR 475, England, 16 pp.
- Eide, O., Aas, G. and Jøsang, T. (1972), "Special Application of Cast-in-Place Walls for Tunnels in Soft Clay in Oslo", 5. Europ. Conf. Soil Mech a. Found. Engng, Madrid, Vol. 1, pp. 485-498.
- Elmasry, M.A. (1963), "The Negative Skin Friction of Bearing Piles", Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 115 pp.
- Endo, M., Minov, A., Kawasaki, T. and Shibata, T. (1969), "Negative Skin Friction Acting on Steel Pipe-Piles in Clay", Proc. 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Mexico City, Vol. 2, pp. 85-92.
- Feda, J. (1976), "Skin Friction of Piles", Proc. 5. Europ. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vienna, Vol. 1.2, pp. 423-428.
- Fellenius, B. (1955), "Resultat från pålprovningar vid Göteborg C. (Results from Piles Tests at Gothenburg C), Swedish State Railways, Geotechnical Dept, Bulletin No. 5, Stockholm, 29 pp.
- Fellenius, B.H. (1969a), "Negative Skin Friction for Long Piles Driven in Clay", Specialty Session, Negative Skin Friction and Settlements of Piled Foundations, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 2, 1 p.
- Fellenius, B.H. (1969b), "Negative Skin Friction on Piles in Clay - A literature Survey", Proc. Specialty Session, Negative Skin Friction and Settlements of Pile Foundations, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 2, 8 pp.

- Fellenius, B.H. (1971), "Negative Skin Friction on Long Piles Driven in Clay", 1. Results of a Full Scale Investigation. II. General Views and Design Recommendations, Proc. Swedish Geotechn. Inst. No. 25, 38 pp.
- Fellenius, B.H. (1975a), "Down-drag on Piles in Clay due to Negative Skin Friction", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, No. 4, pp. 323-337.
- Fellenius, B.H. (1975b), "Dimensionering av pålar i lera påverkade av negativ mantelfriktion", (Design of Piles Affected by Negative Skin Friction), Väg- och Vattenbyggaren, No. 3, pp. 63-64.
- Fellenius, B.H. and Broms, B.B. (1969), "Negative Skin Friction on Long Piles Driven in Clay", Proc. 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Mexico, Vol. 2, pp. 93-98.
- Fellenius, B.H. and Haagen, T. (1969), "New Pile Force Gauge for Accurate Measurements of Pile Behaviour During and Following Driving, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 356-362.
- Florentin, J. and l'Heriteau, G. (1948a), "Sur un cas observé de pieux surchargés par frottement négatif, Travaux No. 164, June 1948, pp. 345-347.
- Florentin, J. and l'Heriteau, G. (1948b), "About an Observed Case of Negative Friction", Proc. 2. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 5, pp. 155-156.
- Gant, E.V., Stephens, J.E. and Moulton, L.K. (1958), "Measurement of Forces Produced in Piles by Settlement of Adjacent Soil", Highway Research Board, Bull. 173, Analysis of Soil Foundation Studies, pp. 20-37.
- Garlanger, J.E. (1974), "Measurement of Pile Down-drag Beneath a Bridge Abutment", Highw. Res. Board, Transp. Research Record, No. 517, pp. 61-69.

- Garlanger, J.E. and Lambe, T.W. (1973), "Proc. of a Symposium on Downdrag of Piles", Mass. Inst. Techn., Cambridge, Mass., Research Report No. 73-56, 104 pp.
- Gibbs, H.J. and Merriman, J. (1966), "Construction Load Effects on Settlement of a Soft Clay Foundation", Proc. 6. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 2, pp. 247-251.
- Girault, P. (1964), "A New Type of Pile Foundation", Proc. Conf. on Deep Foundations, Mexican Soc. of Soil Mech., Mexico, Vol. 1, pp. 329-341.
- Girault, P. (1969), "Discussion", Specialty Session, Negative Skin Friction and Settlements of Piled Foundations, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 2, 6 pp.
- Golder, H.Q. and Spence, R.A. (1961), "Engineering Properties of the Marine Clay at Port Mann, B.C.", National Research Council of Canada, Associate Committee on Soil and Snow Mechanics, Technical Memorandum, No. 69, pp. 128-153.
- Golder, H.Q. and Willeumier, G.C. (1964), "Design of Main Foundations of the Port Mann Bridge", Engineering Journal, Canada, Vol. 8, No. 47, pp. 27-29.
- Gonzales Flores, M. (1948), "Level Control in Buildings by Means of Adjustable Piling", Proc. 2. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Rotterdam, Vol. 4, pp. 152-156.
- Gonzales Flores, M. (1959), "Settling Vertical Two Buildings", First Panamerican Conference on Soil Mechanics and Found. Engng, Vol. 3, pp. 1215-1248.
- Gregersen, O.S., Aas, G. and DiBiagio, E. (1973), "Load Tests on Friction Piles in Loose Sand", Proc. 8. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 2, pp. 109-117.
- Grigoryan, A.A. and Grigoryan, R.G. (1975), "Experimental Study of Negative Skin Friction of Piles in the Case of Slumping of Soils from their own Weight", (in Russian), Osnosvaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov, Nov. 5, pp. 10-12, Sept.-Oct. 1975.

- Grigoryan, A.A. and Vliyanii, S.H. (1975), "Effect of Negative Friction on the Behaviour of Piles in Macroporous and Weak Soils", (in Russian), Proc. 1, Baltic Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Gdansk, Vol. 3, pp. 61-71.
- Hanna, T.H. (1966), "Distribution of Load in Long Piles", Ontario Hydro Research Quaterly, Vol. 4, No. 4, pp. 1-7.
- Heijnen, W.J. and Lubking, P. (1973), "Lateral Soil Pressure and Negative Friction on Piles", Proc. 8, Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Moscow, Vol. 2.1, pp. 143-147.
- Heijnen, W.J. and Posthumus, L.P.M. (1971), "Negatieve kleeft op palen", (Negative Skin Friction on Piles) Part 1 and 2. De Ingenieur, Utrecht, Vol. 83, No. 26, B 113-B 125.
- Hilton, N. and Hardenberg, G. (1964), "Port Mann Bridge, Vancouver, Canada", Proc. Inst. Civil Engrs, Great Britain, Vol. 29, pp. 677-712.
- Horvat, E. (1973), "Discussion", Proc. 8. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 4.2, pp. 76-78.
- Hunt, M. (1973), "Finding One's Bearing in Piling", Civil Engineering, London, Vol. 809, pp. 1052-1055.
- Hunter, A.H. and Davisson, M.T. (1969), "Measurements of Pile Load Transfer", Am. Soc. Testing Materials, Special Techn. Publ. No. 444, pp. 106-117.
- Hutchinson, J.N. and Jensen, E.V. (1968), Loading Tests on Piles Driven into Estuarine Clays at the Port of Khopramshanr, Iran, and Observations on the Effect of Bitumen Coatings on Shaft Bearing Capacity ", Norwegian Geotechn. Inst. Publ. No. 78, pp. 1-2.
- Ito, T. and Matsui, T. (1976), "Negative Skin Friction Acting on Piles", Proc. 5, Budapest Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Akadémiai Kiado, Budapest, pp. 297-311.

- Johannessen, I.J. (1965), "Observations of the Drag Load on a Steel Pile to Rock due to Settlement of Clay", Int. Nav. Congress 21, Section 2, pp. 173-186.
- Johannessen, I.J. (1966), "Påhengskrefter i en stålpeil ved setning i omkringliggende leire", Norwegian Geotechnical Institute, Publ. No. 68, pp. 45-48.
- Johannessen, I.J. and Bjerrum, L. (1965), "Measurement of the Compression of a Steel Pile to Rock due to Settlement of the Surrounding Clay", Proc. 6. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 2, Montreal, pp. 261-264.
- Johnson, S.M. and Kavanagh, T.C. (1968), "The design of Foundations for Buildings", McGraw Hill Book Co, New York, 393 pp.
- Kaniraj, S.R. and Ranganatham, B.V. (1977), "Drag-Load on Piles in Normally Consolidated Clay", Indian Geotechnical Journal, Vol. 7, No. 2, pp. 83-105.
- Kaniraj, S.R. and Ranganatham, B.V. (1978), "Drag-Load on Model Piles", Indian Geotechnical Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 99-104.
- Kishida, H. and Takano, A. (1976), "Protrusion of Piles out of Ground Surface due to Ground Subsidence", Proc. 5. Budapest Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Akadémiai Kiado, Budapest, pp. 337-352.
- Koerner, R.M. and Mukhopadhyay, C. (1972), "Behaviour of Negative Skin Friction on Model Piles in Medium-Plasticity Silt", Highway Research Record, No. 405, pp. 34-44.
- Lebègue, M.Y. (1964), "Etude experimentale des efforts d'arrachage et de frottement négatif sur les pieux en milieu pulvérulent", Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics Sols et Fondations (42).
- Locher, H.G. (1965), "Combined Cast-in-Place and Precast Piles for the Reduction of Negative Friction Caused by Embankment Fill", Proc. 6. Int. Conf. on Soil Mech. a. Found. Engng, Montreal, Vol. 2, pp. 290-294.

- Locher, H.G. (1969), "Computer Program with the Help of CSMP for the Calculation of Negative Friction on Piles", Proc. Specialty Session, Negative Skin Friction and Settlements of Pile Foundations, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Mexico City, 5 pp.
- Long, R.P. and Healy, K.A. (1974), "Negative Skin Friction on Piles", Civil Engineering Dept, School of Engineering, The University of Connecticut, Project 73-1, 18 pp.
- Mansur, C.I. and Kaufman, R.I. (1958), "Pile Tests, Low Silt Structure, Old River, Louisiana", Trans. ASCE, Vol. 123, pp. 715-743.
- Marsal, R.J. and Mazari, M. (1969), "El subsuelo de la ciudad de Mexico", (The Subsoil of Mexico City), Facultad de Ingenieria, Mexico, 2 Vol.
- Mazurkiewicz, B.K. (1968), "Skin Friction on Model Piles in Sand", Danish Geotechnical Institute, Bulletin, No. 25, pp. 13-48.
- Mazurkiewicz, B. (1971), "Settlement of Single Piles due to Negative Skin Friction", Proc. 4. Budapest Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, - Akadémiai Kiado, Budapest, pp. 659-677.
- McKay, G.A. (1938), "Discussion", Trans. ASCE, Vol. 103, pp. 1220-1221.
- Menard, L. (1963), Calcul de la force portant des fondations sur la base des résultats des essais pressiométriques", Sols-Soils, No. 5, pp. 9-32. No. 6, pp. 9-31.
- Meyerhof, G.G. (1956), "Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils", Journ. Soil Mech. a. Found. Engng, Div. Proc, ASCE, Vol. 82, No. SM 1.
- Meyerhof, G.G. (1976), "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations", Jour. Geotechn. Div. Proc. ASCE, Vol. 102, No. GT 3, pp. 197-228.
- Miller, R.M. (1938), "Soil Reactions in Relation to Foundations on Piles", Trans. ASCE, Vol. 103, pp. 1193-1236.

- Milner, R.P. (1957), "Discussion", Proc. 4. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, London, Vol. 3, pp. 201-202.
- Mislivec, A. (1972), "Pressure at Rest of Cohesive Soils", Proc. 5. Europ. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Madrid, Vol. 1, pp. 63-67.
- Moore, W.W. (1947), "Experiences with Predetermining Pile Lengths", ASCE, Proc. Vol. 73, No. 9, pp. 1341-1358.
- Moretto, O. (1969), "Development and Mechanism of Negative Skin Friction", Specialty Session, Negative Skin Friction and Settlements of Piled Foundations, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Mexico, Vol. 2, 11 pp.
- Moretto, O. (1971), "Deep Foundations, Selected Synthesis of the Present State of Knowledge about Soil Interaction", Rev. Latinoamer. Geotechn. Vol. 1, No. 2, pp. 142-178.
- Moretto, O. and Bolognesi, A.J.L. (1960), "Pile Foundations Stressed by Negative Friction", 1. Pan American Conf. on Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 1, pp. 315-325.
- National Research Council, Canada (1975), "Canadian Manual on Foundation Engineering", Associate Committee on the National Building Code, 318 pp.
- Ng, H.K., Karasudhi, P. and Lee, S.L. (1976), "Prediction of Negative Skin Friction and Settlement in Piles due to Fill Surcharge", Geotechnical Engng, Vol. 7, No. 1, pp. 25-45.
- Norwegian Pile Committee (1973), "Veiledning ved pelefundamentering", (Guidelines at Pile Foundations) Den Norske Pelekomité, Veiledning No. 1, Oslo, Norway.
- Plantema, G. and Nolet, C.A. (1957), "Influence of Pile Driving on the Sounding Resistance in a Deep Sand Layer", Proc. 4. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 2, pp. 52-55.
- Plomb, A. and Mierlo, W.C. (1948), "Effects of Drainage by Well Points on Pile Foundations", Proc. 2. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 4, pp. 141-148.

- Poorooshasb, H.B. and Bozozuk, M. (1967), "Skin Friction on a Single Pile to Bedrock", Proc. 3. Panam. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 1, pp. 613-621.
- Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1972), "The Development of Negative Friction with Time in End-Bearing Piles", Australian Geomechanics Journal, Vol. C 2, No. 1, pp. 11-20.
- Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1973), "Theory of Piles in Swelling and Shrinking Soils", Proc. 8. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 2.2, pp. 169-176.
- Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1975), "Prediction of Downdrag Forces in End-Bearing Piles", Journ. Geotechn. Div., Proc. ASCE, Vol. 101, No. GT 2, pp. 189-204.
- Poulos, H.G. and Mattes, N.S. (1969), "The Analysis of Downdrag in End-Bearing Piles", Proc. 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Mexico City, Vol. 2, pp. 203-209.
- Resendiz, D. (1964), "On a Type of Point Bearing Pile through Sinking Subsoil", Conf. on Deep Foundations", Mexican Soc. of Soil Mech., Mexico, Vol. 1, pp. 385-403.
- Resendiz, D., Auvinet, G. and Silva, C. (1969), "Conception et Comportement des Foundations du Palais des Sports de la Ville de Mexico en Présence de Frottement Negatif", Proc. Specialty Session, Negative Skin Friction and Settlements of Piled Structures, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Mexico City, 19 pp.
- Resendiz, D. and Auvinet, G. (1973), "Analysis of Pile Foundations in Soils", Proc. 8. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Moscow, Vol. 2.1, pp. 211-218.
- Rieder, V. (1976), "Belastungsversuch an einem instrumentierten Bohrpfehl", (Load Test on an Instrumented Drilled Pile), Proc. 6. Europ. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vienna, Vol. 1.2, pp. 557-560.

- Roberts, D.V. and Darragh, R.D. (1963), "Areal Fill Settlements and Building Foundation Behaviour at the San Fransisco Airport", ASTM Special Technical Publication No. 332, pp. 211-230.
- Rossichin, J.O.W. (1970), "Die negative Mantelreibung an einzelnen Pfählen", (Negative Skin Friction on Single Piles), Bergakademie, Vol. 22, No. 12, pp. 714-721.
- Rossichin, J.O.W. (1971), "Die negative Mantelreibung an Pfahlgruppen", (Negative Skin Friction on Pile Groups), Neue Bergbautechnik, Vol. 1, No. 6, pp. 417-423.
- Rossichin, J.O.W. (1973), "Der zeitliche Verlauf der negativen Mantelreibung an Pfählen", (Effect of Time on the Negative Skin Friction of Piles), Der Zeitschrift für angewante Geologie, Vol. 19, No. 1, pp. 27-37.
- Rossikhin, Y.V. (1970), "Negative Skin Friction during Compaction of a Soft Stratum by a Surcharge Distributed over a Considerable Area. Evaluation of the Aftereffect of Overloading of Bases of Pile Foundations surrounded by Settling Soft Soil", (in Russian), Construction on Soft Soils, RPI, NAMGIF, Riga.
- Salas, J.A. and Belzunce, J.A. (1965), "Résolution Iteorique de la Distribution des Forces dans des Pieux", Proc. 6. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 6, Montreal, pp. 309-313.
- Sawaguchi, M. (1971), "Approximate Calculation of Negative Skin Friction of a Pile", Soils and Foundations, Vol. 11, No. 3, pp. 31-49.
- Schönian, E. (1972), "Pfahlgleitschichten aus Bitumen zum Abbau der negativen Mantelreibung", (Bitumen Coatings for Piles to Minimize the Negative Skin Friction), Vorh. Baugrundtag Stuttgart, Deutsch. Ges. Erd- und Grundbau, Essen, pp. 657-680.
- Severinsson, S. (1965), "Praktiska erfarenheter av rationell stöd-pålning med prefabricerade betongpålar", (Practical Experience from Rational Use of Precast Concrete Piles), Byggnadskonst, Vol. 57, No. 12, Stockholm, pp. 561-566.

- Shannon, W.L. (1960), "Discussion", Proc. 1. Panam. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Mexico, Vol. 1, pp. 326-329.
- Shell International Petroleum Co. (1974), "Slip Layer Compounds for Bearing Piles", Shell International Petroleum Co. Ltd, London, England, 7 pp.
- Sherman, W.C. (1973), "The Behaviour of Lock Walls Supported on Batter Piles", Proc. 8. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 2.1, pp. 219-222.
- Silva, A.J. (1966), "Downdrag on Piles", Ph.D. thesis submitted to the University of Connecticut, 123 pp.
- Stermac, A.G., Devata, M. and Selby, K.G. (1968), "Unusual Movements of Abutments Supported by Endbearing Piles", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 5, No. 2, pp. 69-79.
- Sultan, H.A. (1969), "Downdrag on Piles", State-of-the Art. Proc. Specialty Session, Negative Skin Friction and Settlements of Piled Foundations, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, 11 pp.
- Takashi, K. and Sawaguchi, M. (1976), "Experimental Study on Negative Skin Friction on Piles", Port Harbour Res. Inst., Report Vol. 15, No. 3, pp. 21-51.
- Takashi, K., Sawaguchi, M., Zen, K, Shinohara, K. and Hashimoto, K. (1974), "Experiment and Study on Negative Skin Friction on Piles", Rep. Port a. Harbour Res. Inst., Ministry of Transportation, Vol. 13, No. 1, pp. 65-86.
- Tavenas, F.A. (1969), "The Bearing Capacity of Friction Piles in Sand: Results of Loading Tests", Proc. Specialty Session, Negative Skin Friction and Settlements of Piled Foundations, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Mexico City, 21 pp.
- Teng, W.C. (1962), "Foundation Design", Prentis-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., pp. 239-240.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948), "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley & Sons, New York, 566 pp.

- Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967), "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley & Sons, Inc. New York, Second Edition, 729 pp.
- Tomlinson, M.J. (1970), "Adhesion of Piles in Stiff Clays", Constr. Ind. Res. Inf. Assoc. CIRIA, Rep. No. 26, 47 pp.
- Tomlinson, M.J. (1971), "Some Effects of Pile Driving on Skin Friction", Proc. Conf. on Behaviour of Piles, Inst. Civil Engrs, London, pp.
- Tomlinson, M.J. (1975), "Foundation Design and Construction", Pitman Publishing, Third Edition, 785 pp. 107-114.
- Torstensson, B.A. (1973a), "Kohesionspålar i lös lera. En fältstudie i modellskala", (Floating Piles in Soft Clay. A Field Investigation in Model Scale), Chalmers Institute of Technology, Dept. of Geotechnics and Foundations, Gothenburg, Sweden.
- Torstensson, B.A. (1973b), "The Behaviour of a Cohesion Pile Group in Soft Clay", Proc. 8. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Moscow, Vol. 2.1, pp. 237-242.
- Tschebotarioff, G.P. (1950), "Discussion", Trans. ASCE, Vol. 115, pp. 296-301.
- USSR Building Code (1978), "Stroitelnye normy i pravila, SN i P II-17-77 Normy proektirovaniya Tjast II Svajnye fundamenty Glava 17", (Rules and Regulations for Buildings, Part II, Design Code, Chapter 17, Pile Foundation), Gosudarstvennyi Komitet Soveta Ministrov SSSR po Delam stroitelstva GOSSTROJ SSSR, Moscow 1978, 48 pp.
- Varde, O.A. (1969), "Discussion", Specialty Session, Negative Skin Friction and Settlement of Piled Foundations, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 2, 2 pp.
- Verruijt, A. (1969), "A Simplified Elastic Method for the Calculation of Negative Skin Friction on Piles", Proc. Specialty Session on Negative Skin Friction and Settlements of Piled Foundations, 7. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Mexico City, 9 pp.

- Vesic, A.S. (1977), "Design of Pile Foundations", Transportation Research Board, National Cooperative Highway Res. Program. Synthesis of Highway Practice, Washington D.C., No. 42, 68 pp.
- Walker, L.K. and Darvall, P.L.P. (1970), "Some Aspects of Dragdown on Piles", Proc. 2. Southeast Asian Conf. Soil Mech a. Found. Engng, Singapore, pp. 121-137.
- Walker, L.K. and Darvall, P.L.P. (1973), "Dragdown on Coated and Uncoated Piles", Proc. 8. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Moscow, Vol. 2.1, pp. 257-262.
- Wassmuth, H.G. and Gass, H. (1973), "Die Hochstrasse Elbmarsch im Zuge der Bundesautobahn Westliche Umgehung Hamburg", (The Elevated Highway over the Elbe on the Motorway to the West of Hamburg), Bauingenieur, Vol. 48, No. 6, pp. 201-211.
- Weiss, K (1974), "Pfahlversuche zur Ermittlung der Grösse der negativen Mantelreibung in organischen Böden", Mitt. Degebo, No. 30, pp. 34-40.
- Van Weele, A.F. (1964), "Negative Skin Friction on Pile Foundation in Holland", Proc. Symp. on Bearing Capacity of Piles, Roorkee, India, pp. 1-10.
- Yokowo, Y., Yamagata, K. and Nagaoka, H. (1968), "Negative Skin Friction Acting on a Pile-Group", Trans. Architectural Institute of Japan, No. 150, Aug. 1968, pp. 51-57.
- York, D.L., Miller, V.G. and Ismael, N.F. (1974), "Long Term Load Transfer in End Bearing Pipe Piles", Highw. Res. Board, Transp. Res. Record, No. 517, pp. 48-60.
- Zeevaert, L. (1950), "Discussion", Trans. ASCE, Vol. 115, pp. 286-292.
- Zeevaert, L. (1957a), "Foundation Design and Behaviour of Tower Latino Americana in Mexico City", Geotechnique, Vol. 7, pp. 115-133.
- Zeevaert, L. (1957b), "Discussion on Negative Friction and Reduction of Point Bearing Capacity", Proc. 4. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 3, p. 188.

Zeevaert, L. (1960), "Reduction of Point Bearing Capacity of Piles because of Negative Friction", Proc. 1. Panam. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng, Vol. 1, pp. 331-338.

Zeevaert, L. (1964), "General Considerations on Problems Related with Pile and Pier Foundations", Conf. on Deep Foundations, Mexican Soc. of Soil Mech., Mexico, Vol. 1, pp. 65-96.

Zeevaert, L. (1973), "Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions", Van Nostrand Reinhold Co., New York, 652 pp.



INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN

Pålkommisionen

Utgivna handlingar

Meddelanden

1	Slagningsprov av pålskor med bergdubbar Bror Fellenius 1963	10:—	14	Påkänningar, sprickbildning och utmattning vid slagning av armerade modellpålar av betong Bo Göran Hellers — Sven Sahlin 1971	30:—
2	Provpålning för broar inom blivande Olskroks- och Gullbergsmoten i samband med byggande av Europaväg 6 genom Göteborg Bror Fellenius — Waldemar Pejrud 1964	Slut	15	Bärförmåga hos släntberg vid statisk belastning av bergspets. Resultat av modellförsök Sven-Erik Rehnman 1968	15:—
3	Jämförelse mellan moment, krökningsradie och sprickvidd i betongpålar slagna genom lös lera till släntberg vid Tingstadsdelen, Göteborg Bror Fellenius 1964	10:—	16	Stålpålars bärförmåga. Resultat av fältförsök med lätta slagdon Gunnar Fjelkner 1970	30:—
4	Pålprovning för järnvägsbro vid Vännäs Bror Fellenius 1964	Slut	17	Bergdubbens hållfasthet. Resultat från statiska belastningsförsök Sven-Erik Rehnman 1970	20:—
5	Beräkningsmetoder för sidobelastade pålar Bengt Broms 1965	Slut	18	Negative skin friction on long piles in clay. I. Results of a full scale investigation II. General views and design recommendations Bengt H Fellenius 1971	30:—
6	Brottlast för snett belastade pålar Bengt Broms 1965	10:—	19	Damping of stress waves in piles during driving. Results from field tests Gunnar W Fjelkner — Bengt B Broms 1972	30:—
7	Beräkning av vertikala pålars bärförmåga Bengt Broms 1965	10:—	<i>Särtryck och preliminära rapporter</i>		
8	Provpålning mot släntberg vid Skansen Lejonet, Göteborg Waldemar Pejrud 1965	25:—	1	Allowable bearing capacity of initially bent piles Bengt Broms Referat från pålkommitténs informationsdag 25 okt 1965	
9	Inverkan av armeringsmängd, förspänning och fallhöjd på sprickrisken hos betongpålar vid slagning Sven Sahlin 1965	15:—		Provbelastning av påle slagen i lera och frik- tionsmaterial Gunnar Hellström	
10	Bärförmågan hos armerade betongpålar slagna till fast bergbotten Hjalmar Granholm 1967	20:—		Knäcklasten för momentstyvt skarvade pålar i lera Krister Cederwall 1965	10:—
11	Bärförmågan hos pålar slagna till släntberg Bengt Broms 1965	15:—	2	Provbelastning av stödpålar av betong inom östra Nordstaden, Göteborg. Delrapport Gunnar Hellström 1965	5:—
12	Dynamisk draghållfasthet hos modellpålar av oarmerad betong. Resultat av orienterande försök Sven Sahlin — Lars Hellman 1966	15:—	3	Bärighet hos släntberg vid statisk belastning av bergspets. Resultat av modellförsök Sven-Erik Rehnman 1966	5:—
13	Pålgruppers bärförmåga Bengt Broms 1967	10:—	4	Om pålslagning och pålbärighet (Informa- tionsdagen 14/11 1966) 1967	Slut

- | | | | | | |
|----|---|-------------------|----|--|------------------|
| 5 | Resultat av pålprovning vid Göteborg C
Bror Fellenius 1955
(omtryckt 1967) | 20:— | 19 | Datorberäkning av stötvågsförlopp i pålar
medelst variation av modellparametrar.
Delrapport III
Lennart Vilander
1969 | 15:— |
| 6 | Om stoppslagning av stödpålar
Lars Hellman
1967 | 5:— | 20 | Nya pålnormer. Föredrag vid informations-
möte 25/4 1969
Göte Åström — Per Sahlström — Erik Sandegren
1969 | Slut |
| 7 | Undersökning med syfte att uppställa stopp-
slagningsregler för stålplålar slagna med tryck-
lufthammare. Delrapport I.
Gunnar Fjellkner
1967 | Ersatt av Medd 16 | 21 | Negative skin friction on piles in clay.
A literature survey
Bengt H Fellenius
1969 | 20:— |
| 8 | Industriell tillverkning av betongplålar
Kajsa Sundberg — Arne Forsell
1968 | 10:— | 22 | Deformationsegenskaper hos slagna betong-
plålar
Bengt H Fellenius — Torsten Eriksson

Friktionsplålar bärformåga. Resultat från
fältförsök i Kanada
Bengt H Fellenius
1969 | 20:— |
| 9 | Digitalisering av stötvågs-mätningar.
Delrapport I
Lennart Vilander
1968 | 5:— | 23 | Plålar bärformåga i elastiskt medium under
hän synstagande till egenspanningar i pål-
materialiet
Stig Bernander
1969 | 20:— |
| 10 | Stopp-slagning av stålplålar med lätta slagdon
(trycklufthammare). Delrapport II
Gunnar Fjellkner
1968 | Ersatt av Medd 16 | 24 | IVA:s Pålkommission 1959—1969. Uppsatser
utgivna i samband med Pålkommissionens
tioårsjubileum
1969 | 20:— |
| 11 | Förslag till anvisningar för pålprovning och
enkel provbelastning. (Andra omarbetade
upplagan)
1970 | 20:— | 25 | Statistik över antal slagna pål-meter år 1962,
1966 och 1968
1969 | Ersatt av SPR 30 |
| 12 | Tillåtna laster på långa stödpålar av betong
i östra Nordstaden, Göteborg. Slutrapport
Gunnar Hellström
1969 | 15:— | 26 | Föredrag vid Pålkommissionens jubileums-
möte den 20 november 1969

Den norske pelekomités arbeide
Kaare Flaate

Aktuella forskningsbehov inom pålnings-
området
Bengt Broms
1970 | 20:— |
| 13 | Kvarstående förspänningskraft i slagna
betongplålar. Undersökning av pålar från
grunden till Silo 68, Köping
Bo-Göran Hellers
1968 | 5:— | 27 | Rapport från en resa till Mexiko, USA,
Kanada och England 23.8—13.9 1969
Bengt H Fellenius
1970 | 20:— |
| 14 | Föredrag vid Halmstad Järnverks armerings-
dag 17/11 1967
Bengt Broms — Gunnar Sundberg —
Per Möller — Thorild Blomdahl
1968 | 5:— | 28 | Mätning av fallhejares anslagshastighet vid
pålslagning
Karl-Erik Sundström
1970 | 15:— |
| 15 | Statistik över antal slagna pål-meter 1962
och 1966
1968 | Ersatt av SPR 30 | 29 | Studier av en friktionsplåles verknings-sätt
Åke Nilsson — Torbjörn Winqvist
1971 | 25:— |
| 16 | Friktionsplålar bärformåga. En studie av
utförda provbelastningar
Sven Hultsjö — Jan Svensson
1969 | 25:— | 30 | Statistik över antal slagna pål-meter 1962,
1966, 1968 och 1970
1971 | Ersatt av SPR 38 |
| 17 | Ett program för beräkning av stötvågsför-
loppet vid friktionspålning. Delrapport II
Lennart Vilander
1969 | 15:— | | | |
| 18 | Pålkraftmätare
Bengt H Fellenius — Thomas Haagen

Negative skin friction for long piles driven
in clay
Bengt H Fellenius — Bengt Broms
1969 | 15:— | | | |

31	Friktionspålning för brostöd nr 2 vid Albysjön, tunnelbana 2 SV, Botkyrkabanan Sven-Erik Rehnman 1971	25:—	42	Pålar i lera. En geoteknisk återblick med speciell anknytning till Göteborgs-förhållandena Bror Fellenius 1974	15:—
32	Aktuellt forskningsbehov för pålområdet i Sverige i juni 1971 Ulf Bergdahl 1971	15:—	43	Jordundanträngning vid påslagning — resultat av modellförsök Rainer Massarsch 1974	20:—
33	Sättningar vid pålning olika djupgrundläggningsmetoder Intryck från pålkonferens 1972	20:—	44	Pålning för Silo 68 i Köping. En redovisning av mätresultat Ulf Bergdahl — Åke Nilsson 1974	20:—
34	On the bearing capacity of driven piles 1972	20:—	<i>Rapporter</i>		
35	Load testing of piles according to the polish regulations B K Mazurkiewicz 1972	15:—	45	Aktuellt forskningsbehov för pålområdet i Sverige 1974 Ulf Bergdahl 1974	20:—
36	Undersökning av konventionell slagdyna. Beräkningsanalyser och beräkningsresultat för olika fall Martti Laine 1972	15:—	46	»Root-piles» Small-diameter injected borepiles Anton Frank 1975	15:—
37	Approximativ bestämning av böjstyvheten i ett förspänt, delvis uppsprucket betongtvärsnitt Bo-Göran Hellers 1973	15:—	47	Jordgjutna pålar — en redovisning av vanliga metoder K Rainer Massarsch 1975	30:—
38	Statistik över antal slagna pålmeter år 1962, 1966, 1968, 1970 och 1972 1973	10:—	48	Svensk statistik över antal tillverkade och slagna pålmeter åren 1962—1974 1975	20:—
39	Inventering och sammanställning av utförda böjprovningar med oskarvade och skarvade betongpålar Björn Kvist — Pär Sandin 1973	20:—	49	Deformationsmätningar vid slagning av pålar nära en stenmur — resultat av stereofotogrammetriska mätningar K Rainer Massarsch — Gunnar Ivmark 1975	25:—
40	Undersökning av avklingande stötvågs utseende efter passage genom dyna med tallriksfjädrar Bo Larsson 1973	20:—	50	Pålgrundläggning i Sovjetunionen 1976	25:—
41	Om korrosion på stål, speciellt i betongpålar Bengt H Fellenius 1974	15:—	51	Soil movements caused by pile driving in clay K Rainer Massarsch 1976	50:—
<i>Övrigt</i>			52	Angelägenheten hos forskningsprojekt inom pålområdet i Sverige 1975 — enkätresultat Ulf Bergdahl — Gunnar Ivmark 1977	15:—
	Slagning och provbelastning av långa pålar. Försök i Gubbero, Göteborg. (Statens Råd för Byggnadsforskning, rapport 99)	35:—	53	Svensk statistik över antal tillverkade och slagna pålmeter åren 1962—1976 1978	20:—
	Pålningssprotokoll. Blanketter upprättade enligt Särtryck och preliminära rapporter nr 11. Block om 50 blad Pris per block	10:—	54	Pålgrupper med sidomotstånd och in-spänning Håkan Bredenberg — Bengt Broms 1978	40:—
			55	Rälsplårs böjstyvhet — resultat av böjprovningar Elvin Ottosson 1979	40:—

- | | | |
|----|--|------|
| 56 | Provbelastning av friktionspålar —
En studie av olika provningsmetoder
U Bergdahl — G Hult
1979 | 40:— |
| 57 | Swedish Building Code 1975
Chapter 23.6 Pile Foundations.
Swedish Building Code 1975
Approval Rules No. 1975:8 Piles
Translated by B Broms
1979 | 40:— |
| 58 | Grävpålanvisningar
Dimensionering, utförande och kontroll
av grävda, i jorden gjutna pålar
1979 | 40:— |
| 59 | Anvisningar för provpålning med efter-
följande provbelastning
1979 | 40:— |
| 60 | Negativ mantelfriktion längs pålar
Bengt Broms
1979 | 40:— |

