

BYGGFORSKNINGEN

Särtryck 6:1963

Påslagningen och stötvågsteorin

av *Hans Christian Fischer* och *Lars Hellman*

STOCKHOLM 1963

Påslagningen och stötvågsteorin

*Hans Ch Fischer
Lars Hellman*

Särtryck ur Väg- och vattenbyggaren 9 (1963) nr 1, sid 9—14

*THE DRIVING OF CONCRETE
PILES AND THE THEORY OF
IMPACT. By Hans Christian Fischer,
Doctor of Technology, Atlas Copco AB
Stockholm and Lars Hellman, CE, In-
genjörfirman Orrje & Co AB.*

The most important type of piles that are driven in Sweden are precast concrete piles. There has been a tendency to use three ton drop hammers mounted on self-propelled caterpillar mounted cranes to drive them. Increased use of long piles (up to about 70 m = 200 ft) has exposed the limitations of pile formulae which like Hiley's are based on the classical newtonian theory of impact. These are reviewed. As a better approximation the stress wave theory is introduced. A number of practical conclusions are drawn from it, and some experimental confirmation is mentioned. Finally, a number of tasks for further development of stress wave applications are listed. One of them is the design of a mechanical or rheological model of the behaviour of the soil.

Pålslagningen och stötvågsteorin

Vid påslagning bestäms en stödpåles bärlighet i allmänhet med pålformel. De gängse pålformlerna har emellertid begränsad användning. De ger för låg beräknad bärlighet när slagholven är lättare än pålen såsom vid slagning med lätta trycklufts- eller dieselhejare samt vid slagning av långa skarvade pålar (upp till ca 70 m pålar förekommer numera). Det har därför varit en huvuduppgift för Kommittén för Påslagning och pålbärlighet [1], "Pålslagningskommittén", att undersöka teoretiska och praktiska möjligheter att komma till rätta med dessa frågor, varvid de synpunkter som framkommit vid stötvågsteoretiska betraktelsesätt spelat en avgörande roll. Samtidigt som vissa resultat redan uppnåtts, har idéer till fortsatta undersökningar framkommit. Därvid är betongpålar av speciellt intresse eftersom den låga draghållfastheten kräver särskild omsorg vid hantering och slagning. För den aktuella situationen redogör tekn dr Hans Christian Fischer, Atlas Copco AB, och civilingenjör Lars Hellman, Ingenjörfirman Orrje & Co AB, båda verksamma inom påslagningskommittén. Arbetet har utförts med stöd från Statens råd för byggnadsforskning.

När man slår stödpålar av betong gäller det dels att slå ned pålen hel, dels att i slagningens slutskede avgöra, när pålen uppnått önskvärd bärlighet. Praktisk erfarenhet har lett till att man för att undvika skador anser sig bära använda tunga hejare och måttliga fallhöjder (0,5 å 0,7 m).

För att utan provbelastning kunna bedöma pålens bärlighet skulle man behöva känna krafterna under själva slagningen. Eftersom slaget utspelas under mycket kort tid, mellan en hundraedels och en tiondels sekund, har man tidigare icke kunnat direkt mäta kraftförlöppet (vilket man dock numera kan, se nedan). Därför tillgrep man indirekta metoder för att uppskatta kraftens storlek [2].

Slaget ger pålspetsen en liten permanent inträngning s under övervinnande av motståndet P , vilket antages vara konstant under hela slaget. Denna inträngning förbrukar sålunda ett arbete $W_1 = P \cdot s$. Under slagningens slutskede är s vanligen någon millimeter och kan därför mätas med enkla medel, särskilt om man tar medelvärde för exempelvis 10 slag. Om man dessutom kan uppskatta W_1 , så beräknas det dynamiska spetsmotståndet såsom $P = W_1/s$.

För att uppskatta W_1 utgår man från hejarens nominella energi $W_0 = Q \cdot H$ (Q = hejarens vikt, H = nominell fallhöjd) och inför korrektioner för olika förluster såsom

- 1) hejarens fallförluster genom friktioner samt tröghet i spel mm
- 2) sk stötförluster vid överföring av energin till pålen
- 3) energi som magasineras genom fjädring i påle, dyna och jord.

Genom att dividera P med en lämplig säkerhetsfaktorsfaktor, får man fram ett värde på pålens bärlighet. Under årens lopp har mer än ett tjug sådana beräkningsmetoder, sk dynamiska pålformler, lanserats, bland dem de hos oss ofta använda Kreugers, Hileys och på senare tid även Janbus formler. Alla dessa formler skiljer sig endast därigenom att de använder olika teoretiska eller experimentella metoder

för att bestämma de nämnda förlusterna. Osäkerheten i dessa bestämningar medför att man ofta väljer hög säkerhetsfaktor, t ex fyrfaldig säkerhet. Härigenom blir den erforderliga energin W_1 och därmed fallhöjden så stor att den i vissa fall når sådana värden att pålen kan slås sönder.

För att bestämma fallförlusterna behöver man mäta den verkliga anslags hastigheten. Sådana mätningar har på olika håll gjorts enligt skilda principer, men mätmetodiken behöver ytterligare utvecklas för att bekvämt medge rutinmätningar i fält.

Fjädringen är ofta av storleksordningen 10 mm och kan då mätas med en penna som under slaget föres längs en horisontell fast linjal och ritas på ett papper som är fastsatt på pålen. I andra fall beräknar man fjädringen under antagande att kraften P verkar på hela pålens längd. Som vi nedan skall se, är detta antagande ibland helt felaktigt. Detta framgår av den sk stötvågsteorin, [3] som ger en ny syn på beräkningen av stötförlusterna. Innan vi presenterar stötvågsteorien skall vi kort återge den klassiska stötteorien som ligger till grund för beräkningen av stötförlusterna i gängse pålformler.

Klassisk stötteori

Om en elastisk masspunkt eller kula stöter centralt mot en annan likadan, byter de hastighet och energi, se fig 2. Slår en stor kula mot en mindre stillastående kula, far den lilla kulan iväg med större hastighet än slagkulan kom med, men ändå har den ej övertagit hela slagenergin, utan slagkulan fortsätter med minskad hastighet. Är å andra sidan slagkulan den mindre, så studsar denna tillbaka med reducerad hastighet, medan den stora kulan fortsätter framåt med liten hastighet. Icke heller i detta fall är energiöverföringen fullständig, se fig 3.

Dessa förhållanden, som är välkända såväl från den klassiska mekaniken som från spel med stenkulor och nickeldankar, utgör grunden för beräkningen av stötförlusterna i de klassiska pålformlerna. De torde även vara orsaken till den mycket vanliga

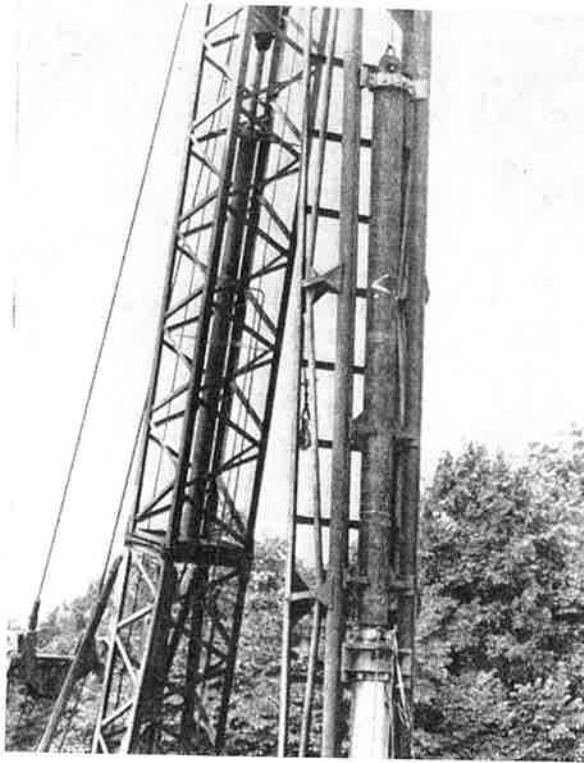


Fig 1. Vid moderat påslagning användes ofta betongpålar och mobilkranar. Provpålning i Cubbero [7] med en teoretiskt fördelaktig långsmal hejare.

rekommendationen, att man bör använda en slagkolv som väger minst lika mycket som pålen (+ dyna och ev knekt). Som vi strax skall se, är dessa lagar emellertid visserligen riktiga för masspunkter eller kulor men fullständigt felaktiga för längdstöt mot så långsmala kroppar som pålar. Därför är det också — åtminstone ur denna synpunkt — oriktigt att utgå från att tunga slagkolv är bättre än lätta.

I praktiken är de sammanstötande kropparna icke helt elastiska, utan en del av energin åtgår till plastisk deformation i kontaktytornas närmaste omgivning. Den klassiska stötteorin beaktar detta genom att införa en stötkoefficient k , definierad som förhållandet mellan skillnaderna i normalhastighet efter och före stöten. Denna är $= 1$ i det fullkomligt elastiska fallet och faller ned mot 0, ju mer plastisk stöten blir ($k=0$ för stöt mellan "smörkulor"). I pålformlerna gör man det förenklade antagandet att stötkoefficienten är en materialkonstant, som en gång för alla kan bestämmas för vissa materialkombinationer. För olika praktiska fall anges ofta värdena $k=0,25$ och $k=0,50$. (Se fig 3).

Stötsvågsteori

Som inledning till stötsvågsteorin studerar vi några varianter av de ovan angivna försöken med elastiska kulor. Den långsmala pålen representeras av en rad kulor, som ligger i kontakt med varandra. Om man enligt fig 4 a slår på denna med en likadan kula, så far icke hela kulraden iväg med liten hastighet, utan det är endast den bortre kulan som stöts ut, och den har samma hastighet som slagkulan, och således även lika stor energi. Om vi ökar "slagkolvens" massa genom att låta en rad kulor i kontakt

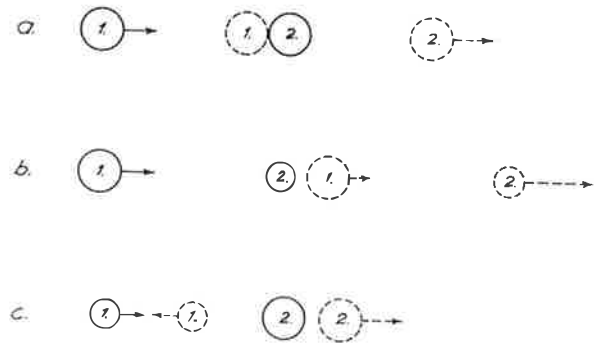


Fig 2. Stöt mellan elastiska kulor enligt Newton — en ytterst ofullständig modell för slagning av långsmala pålar.

med varandra slå, så stötes exakt lika många kulor ut i andra änden, se fig 4 b och c. Använder man istället, som i fig 4 d, en stor slagkula liksom i fig 2 b, så stöts den bortre kulan ut med stor hastighet liksom i fig 2 b, men dessutom stöts en eller flera intilliggande kulor ut. I motsats mot fig 4 b har de efterföljande kulorna emellertid var och en mindre hastighet än den föregående.

Dessa resultat, som läsaren själv lätt kan verifiera, beror på att kraften från sammanstötningen fortplantas med en visserligen stor men dock ändlig hastighet = materialets ljudhastighet (i den klassiska stötteoriens masspunkter fortplantas stötkraften ögonblickligen till hela den oändligt stela kroppen). Detta i sin tur medför att stötenergin transporteras genom pålen (kulraden) i form av ett energipaket, ibland kallat *stötsvåg*. Förloppet kan liknas vid det som händer när en orm sväljer en rått. Ljudhastigheten är i stål såväl som aluminium och trä omkring 5 000 m/s men för armerad betong ungefär 3 800 m/s (den kan variera avsevärt för olika kvaliteter, armeringsprocent mm).

De tre översta fallen i fig 4 motsvarar att man slår på pålen med kortare eller längre stycken av en likadan påle. I detta viktiga elementarfall blir *stötsvågen rektangulär*, dvs kraften stiger plötsligt till ett värde som bibehålles så länge förloppet varar. Stötsvågens längd är i detta fall proportionell mot (dubbel så stor som) slagkolvens längd. Töjningen är förhållandet mellan halva anslagshastigheten v och materialets ljudhastighet c . Med hjälp av elasticitets-

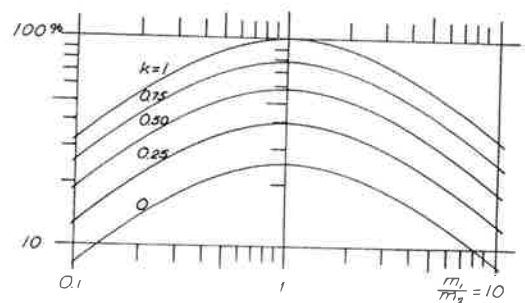


Fig 3. Energiöverföring vid stöt enligt Newton som funktion av förhållandet mellan kulornas massor och med stötkoefficienten k som parameter.

modulen E och arean A beräknar man därur lätt stötvågskraften F :

$$F = \frac{1}{2} v A E / c.$$

För 600 cm² betongpålar med $E = 350\,000$ kp/cm² som stöter ihop med en hastighet av 4 m/s blir sålunda kraften $F = 110$ ton.

Faktorn $\frac{1}{2}$ i formeln kommer därav, att fjädringen fördelar sig lika mellan pålen och slagkolven, vilka ju antagits vara lika styva. Om slagkolven i stället hade varit fullständigt stel, så skulle faktorn $\frac{1}{2}$ ersatts med 1 och kraften i pålen sålunda blivit dubbelt så stor. I praktiska fall har man vanligen en faktor som ligger mellan dessa ytterlighetsvärden. För stöt mellan raka cylindrar av olika material och areor blir sålunda stötvågens toppkraft

$$F = \frac{(AE/c)_{kolv}}{(AE/c)_{påle} + (AE/c)_{kolv}} \cdot v \cdot (AE/c)_{påle}$$

Så snart faktorn är större än $\frac{1}{2}$, upphör stötvågen att vara rektangulär, ty den får (liksom den rätta som ormen svalde) en "svans". Ju mer faktorn växer, desto längre och fetare blir svansen, och när faktorn blir 1, har vi en stötvåg vars kraft plötsligt stiger till $2F$ och sedan exponentiellt avklingar mot noll, jfr kurvan under fig 4 d. (Amplituden har minskat till 14 % av sitt ursprungsvärde, när fronten har passerat en så lång del av pålen att den väger lika mycket som slagkolven.)

Slutsatser ur stötvågsteorien

Vi ser sålunda att maximikraftens storlek beror av pålens area och materialkonstanter samt av slagkolvens "stötvågsmotstånd" AE/c i förhållande till pålens. Dessutom är pålkraften proportionell mot kolvens anslagshastighet. Däremot inverkar icke slagkolvens vikt på pålkraften utan endast på stötvågens längd dvs på kraftens varaktighet. Detta innebär, att man kan åstadkomma lika stora pålkrafter med lätta hejare som med tunga, blott man väljer lämplig anslagshastighet jfr fig 5 och [4]. Vidare överföres i samtliga nämnda fall hela anslagsenergin från slagkolven till stötvågen i pålen, och det förekommer sålunda inga sådana stötförluster som den klassiska teorien för elastisk stöt anger (fig 3).

För att åstadkomma glidning vid pålens spets erfordras en viss kraft. Ju längre tid denna kraft verkar, desto större blir inträngningen. Detta innebär att den rektangulära stötvågen är den fördelaktigaste. Man skall sålunda eftersträva att slå med en likadan påle som den slagna, eller också skall man på annat sätt göra slagkolven så fjädrande, att den ger en rektangulär stötvåg.

I stället för att följa dessa principer har man hittills brukat använda korta, tjocka, stela fallhejare som i det närmaste ger den exponentiellt avklingande stötvågsformen. För att i någon mån ta bort den värsta toppen och göra stötvågen litet mer rektangulär sätter man sedan på pålskallen en *dyna* som inne-

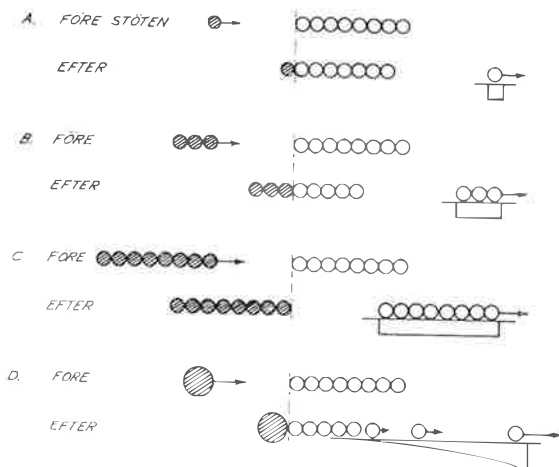


Fig 4. Kul försök som bättre än fig 2 motsvarar förhållandena vid påslagning.

håller betydande mängder trä eller annat mjukt mellanlägg. Detta mellanlägg fyller visserligen i viss mån den avsedda funktionen men dämpar därvid bort en betydande del av stötvågens energi. Detta medför dessutom att mellanlägget snabbt förbrukas och därför ofta måste bytas. Vidare förändras ständigt den genomsläppta stötvågens kraft och energi med mellanläggets förslitning, vilket medför stor osäkerhet vid försök att beräkna bärigheten ur sjunkningen vid stoppslagning.

Ett principiellt riktigare tillvägagångssätt vore att endast använda så mycket mjukt mellanlägg som behöves för att jämnt fördela trycket över pålens topp och för övrigt ge stötvågen den önskade formen genom lämplig utformning av hejaren. Alternativt skulle man kunna tänka sig ett elastiskt fjädrande element i dynan, som visserligen kapade för höga krafttoppar men strax därpå åter avlämnade lika stor energi till den senare delen av stötvågen.

Stötvågens fortplantning och reflexion

När stötvågen fortplantas längs pålen är den inre dämpningen relativt liten, men under vissa förhållan-

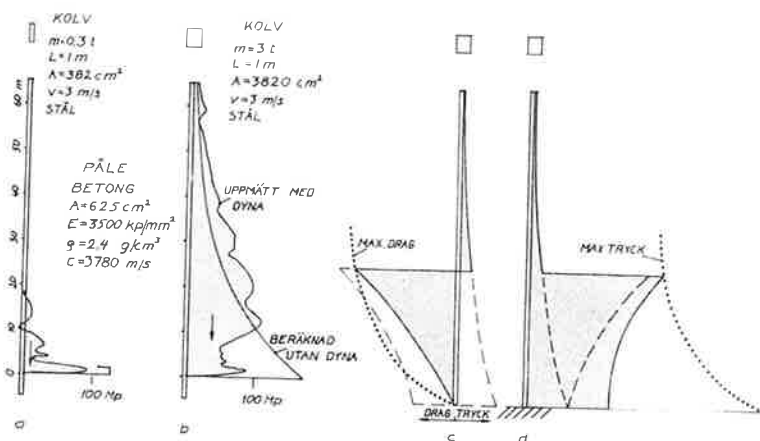


Fig 5. Trycklufthammare (a) med lätt slagkolv (0,3 ton) ger lika stor toppkraft i pålen som (b) tungt slagverk (3 tons fallhejare), men den senare ger en stötvåg av mycket (ca 10 ggr) större längd (varaktighet) [7]. Reflexion vid pålspetsen ger en uppåtgående dragvåg om spetsmotståndet är försurnbart (c), medan stort spetsmotstånd ger en tryckreflex som i gränsfallet (d) förorsakar en fördubbling av tryckkraften i pålens nedersta del (prickad kurva).

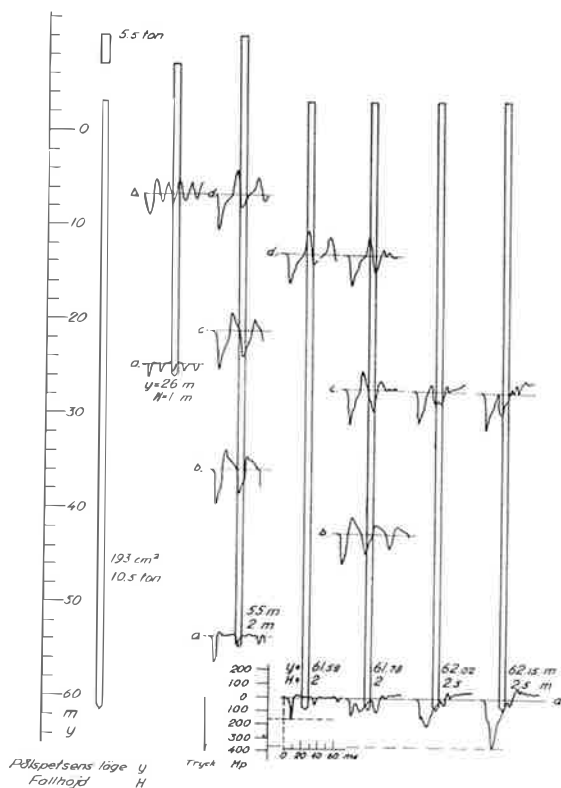


Fig 6. Stötvågsmätningar från Jordfallet [8] visar att pålen i början av slagningen utsättes för både tryck- och dragkrafter, men när spetsen möter stort motstånd är reflexen en tryckvåg, och samtidigt uppkommer vid pålspetsen dubbla tryckkraften.

den kan avsevärda energiförluster förorsakas av olämpligt utförda skarvar eller av mantelfriktion. [5].

I början av slagningen när motståndet vid pålens spets är obetydligt, reflekteras tryckvågen som en dragvåg. Detta kan man förstå av figur 4, ty om kulorna hängde ihop (som hopkopplade järnvägsagnar), så skulle den eller de kulor som kastas ut, dra med sig närliggande kulor, varvid dragning uppstår i kopplingarna. Det enda fall utan dragning är visat i fig 4 c, dvs då kolven är (minst) lika lång som pålen. Med hjälp av stötvågsteorien kan man beräkna, hur dragkraftens storlek varierar längs pålen och beror av stötvågens form och amplitud, även om av mantelfriktion och spetsmotstånd [6].

När spetsmotståndet ökar, blir dragreflexen allt mindre och övergår efter hand i en tryckreflex. Om pålen står på berg eller annat stelt underlag, blir den reflekterade tryckvågen lika stor som den ursprungliga. Medan reflexionen pågår vid pålspetsen, överlagras den reflekterade tryckvågens början över den ursprungliga tryckvågens slut, och vi får extra hög tryckkraft i pålens nedersta del, se fig 5 och 6. Denna är maximalt dubbelt så stor som tryckvågens maxikraft F enligt ovan. Eftersom den hoptryckta delen av pålen icke kan vara längre än stötvågen, framgår det att de klassiska pålformlernas antagande att hela pålens längd är hoptryckt med en kraft lika stor som spetsmotståndet, endast kan vara riktigt om stötvågen är minst lika lång som pålen. Detta betyder att hejaren helst skall vara ungefär lika tung som pålen

för att de klassiska pålformlerna skall vara riktiga ur denna synpunkt. Det är sålunda i många fall endast de gamla beräkningsmetoderna men icke själva slagningen som blir bättre av tung hejare.

Stötvågsmätningar

Med en viss omsorg är det numera möjligt enl. fig 6 att registrera töjningsförloppet i en godtycklig punkt av pålen med hjälp av fastlimmade sk tråd-töjningsgivare, som kopplas till ett högklassigt oscilloskop, försett med kamera, se figurerna 7 och 8. Under medverkan av Pålsagningskommittén har stötvågsmätningar utförts vid ett antal propvpålningar [4, 7, 8], vilka avsevärt ökat vår kunskap om slagningsförloppet under olika förhållanden.

Hurudan är jordens reaktion

Av de nämnda propvpålningarna framgick bl a att en 28 m lång 4 tons stålpåle i Stockholms Frihamn kunde slås lika bra med en tryckluftshammare med 600 kg slagkolv som med en 5,5 tons fallhejare, medan en liknande påle vid Jordfallet i Göta älv icke rördes ur fläcken med en betydligt större tryckluftshammare än den ovan nämnda, varemot den utan svårighet slogs ned med en 5,5 tons fallhejare. [4, 8].

Orsaken till de olika resultaten är att finna i skillnaderna i jordens reaktion när stötvågorna når pålspetsen. I Frihamnen slog man genom gammal fyllning som fjädrade ytterst obetydligt, medan leran i Göta älv fjädrade upp till en halv meter för varje slag. Detta antyder, att det är vid stor fjädring hos jorden, som tung hejare, dvs lång stötvåg erfordras, medan man vid liten fjädring hos jorden tydligen lika gärna kan slå med en hejare som endast väger tiondelen av pålen. Dessa slutsatser behöver givetvis underbyggas av fler försök, men de visar dock att jordens fjädring är minst lika viktig för slagningen som spetsmotståndet.

Figur 9 visar, hur man med en enkel mekanisk modell kan efterlikna spetsmotståndet och jordens fjädring. Kolven 1 slår på pålen 2 vars nedre ände med friktion (spetsmotståndet) är förbunden med ett rör 3, vars area väljes så att fjäderstyvheten motsvarar jordens. Detta system kan studeras ur stötvågsteoretisk synpunkt, t ex med den grafiska metod som visas i figuren [2, 3]. Sålunda kan man beräkna, hur inträngningen per slag beror av spetsmotståndet och rörets (jordens) fjädring.

Om geoteknikerna skulle lyckas att representera olika jordarter med modeller av denna typ med olika data, så skulle därmed en väg öppnas för att beräkna spetsmotståndet ur slagningsdata. Om denna modell visar sig för grov, finns möjligheter att uppställa mer komplicerade modeller, exempelvis av den typ som de inom reologiska vetenskaper använda modellerna för materials elastiska efterverkan, krypning osv [9]. Det torde även finnas möjligheter att

därvid ta hänsyn till inverkan av portryck, som i vissa jordarter tycks spela stor roll [10].

Utveckling av påslagning

Ifråga om slagverkens utformning har under det senaste decenniet förmärkts en tendens att använda allt tyngre hejare. Man har övergått från de manuellt flyttade trä- och stålkranarna som ofta hade klen dimensionerad friktionskoppling till mobilkranar av grävmaskintyp på larvband, och samtidigt har tre tons fallhejare i enkel part blivit allt vanligare. Med hänsyn till kranmastens dimensioner samt ekipagets maximalt tillåtna vikt och storlek vid väg- och järnvägstransporter synes optimal hejarvikt fn ligga mellan tre och fyra ton. Eftersom grävmaskinskranar har "stryktålig" spelkoppling och tillräcklig motor-kraft för att manövrera fallhejare, användes explosionshejare eller tryckluft-/ånghejare endast i ringa omfattning i sådana kranar.

De gamla kranarnas dåliga friktionskoppling med-gav icke någon längre tids slagning med små fallhöjder, och därför använde man förr stora fallhöjder fram till stoppslagningen. För att icke slå sönder på-len, gjorde man dynan extra mjuk, ibland med trä-mellanlägg, ibland med cementsäckar, gamla over-aller etc. Med moderna kranar har man kunnat över-gå till att hela tiden använda små fallhöjder, vilket skyddar pålen mot för stora tryck- och dragkrafter. Därför har man nu större möjlighet att begränsa dynans uppgifter till att centrera slaget och fördela kraften jämnt över pålskallen.

Först genom det stötvågsmässiga betraktelsesättet har man fått klart för sig att dragkrafter kan före-komma i pålen under slagningens första skede, och detta har i utkast till nya bestämmelser medfört strängare krav på pålens och eventuella skarvars för-måga att icke blott uthärda tryck och höjning utan även dragning [11].

Försöken att tillämpa stötvågsteorien på påslag-ning har i vårt land huvudsakligen skett inom Pål-slagningskommittén. Som tidigare nämnts, har där-vid stötvågsmätningar utförts vid olika provpålning-ar med lätta och tunga slagverk. Resultaten har bl a lett till att stötvågsmässiga synpunkter har beaktats vid Järnvägsstyrelsens anvisningar för pålningen för en ny järnvägsviadukt vid Gubbero (Olskroksmotet) i Göteborg, där ca 70 m långa pålar skall slås.

Vad behöver ytterligare göras?

Det vore värdefullt om resultat från provpålningar samt provbelastningar som utföres på olika håll kunde centralt sammanställas i jämförbar form. Här-för erfordras bl a viss standardisering av metodik och protokollföring vid pålningsarbeten.

Fig 8. Oscilloskop och kameror för registrering av stötvågor kan vid jälmätningar med fördel placeras i en skåpbil.



Fig 7 Töjningen i betongpålen kan mätas med trådtöjnings-givare som omsorgsfullt limmas på armeringsjärnen före pålens gjutning. Svårigheterna ligger framför allt i fukt-isolering och kablarnas hållfasthet under slagningen.

Utän anspråk på fullständighet nämner vi några arbetsuppgifter som synes värda att bearbetas vidare.

1) Stimulera tillverkarna av fallhejare, tryckluft- och dieselhejare att vid nykonstruktioner beakta stöt-vågsteorien. Tex utforma korta tjocka slagkolvar fjädrande så att stötvågen ändå blir rektangulär lik-som från slagen av en påle på en annan.

2) Utforma dynor så att de centrerar slaget och fördelar trycket över pålskallen men icke ger stöt-vågsförluster. Detta förutsätter slagkolvar som själva ger någorlunda rektangulär stötvåg. Har man ingen sådan, bör dynan utformas elastiskt fjädrande så att den "kappar toppen" av en spetsig stötvåg men åter levererar denna energi till stötvågens senare del.

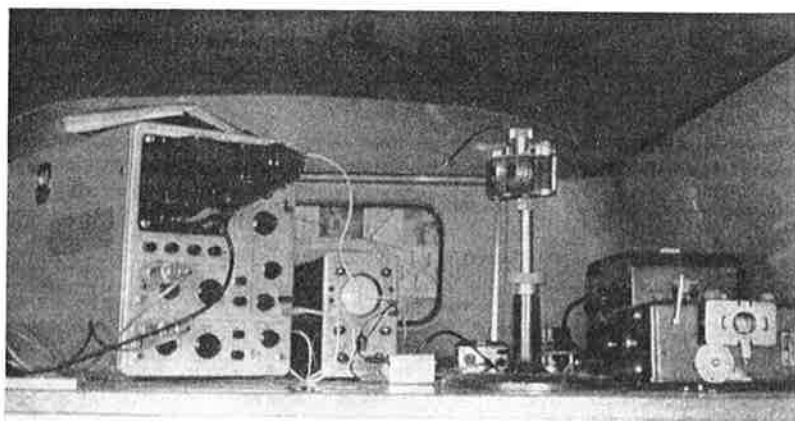
3) Utreda i vilken utsträckning jordens reaktion vid pålspetsen kan beskrivas med den ovan (fig 9) angivna modellen (friktionspunkt och fjädrande rör) och i så fall ange modelldata för olika jordarter. Om så erfordras utveckla mekaniska modeller som bättre representerar jordens beteende och eventuellt inklu-derar inverkan av portryck, långtidslast o dyl.

4) Med hjälp av ovan angivna modeller eller på annat sätt ur jordens egenskaper bestämma, i vilka fall tung slagkolv är principiellt överlägsen en lätt.

Utveckla och förbättra olika metoder att bestäm-ma pålars bärighet, däribland:

5) Rutinmetoder för att i fält mäta (registrera) hejares anslagshastighet.

6) Rutinmetoder för att mäta stötvågsförluster i skarvar, dynor och knektar.



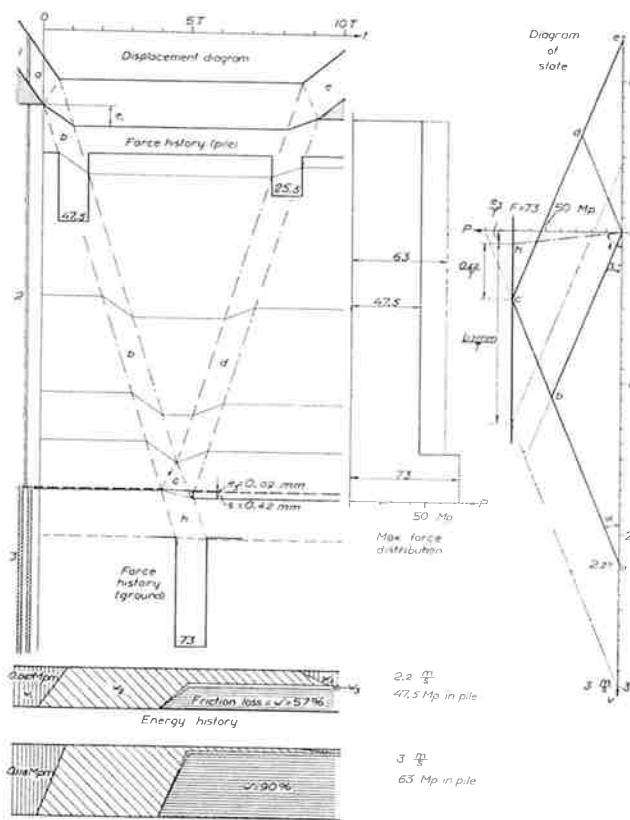


Fig 9. Grafisk beräkning (i "diagram of state") av förloppet, visat i "displacement diagram", vid slag med lätt hejare (1) mot en påle (2), som drives ned ett stycke s i jorden som här representerats av ett elastiskt rör (3) (20 gånger styvare än pålen), med vilket pålspetsen är förbunden med en punktfriktion, $F = 73$ ton (Mp). Summan av den nedåtgående stötvågens kraftamplitud (47,5 ton) och den reflekterade vågens (25,5 ton) är lika med friktionsmotståndet vid spetsen (73 ton). Detta är även proportionellt mot summan av hejarens anslagshastighet (a) och studshastighet (e). Från [2, 3].

7) Med hjälp av en särskild mätknekt kan man registrera såväl den nedgående som den reflekterade stötvågen. Härpå kan man grunda en metod att bestämma spetsmotståndet vid slagning (jfr fig 9).

8) Det är välkänt att pålspetsens kontakt med fasta jordlager åtföljes av ett hårdare ljud vid slagningen och av hejarstuds. Stötvågsteoretiskt skulle man kunna utnyttja studsmätning på en lämpligt utformad slagkolv för att bestämma såväl spetsfriktionen som jordens (rörets) fjädring i den tidigare (fig 9) angivna modellen. Härför skulle man behöva mäta studshöjdens förändring när fallhöjden successivt ökas. Denna föreslagna metod behöver närmare utvecklas.

9) Med hänsyn tagen till stötvågsbegreppet kan man systematiskt bygga upp en pålformel som beaktar slagkolvens form, förluster i dyna och skarvar samt längs mantelytan, reflexionsfaktorn vid pålspetsen mm. En sådan bör uppställas och dess användningsmöjligheter närmare studeras.

10) Som ett provisorium kan det vara värt att undersöka, hur väl de klassiska pålformlernas felaktigheter vid långa pålar och lätta hejare kan korrigeras genom att man i stället för hela pålens massa och längd endast tar med en så lång del av pålen som stötvågens längd anger.

11) Mätmetoden med trådtöjningsgivare och oscilloskop har med ganska god framgång använts

såväl för att mäta stötvågorna under slagningen som de statiska krafterna vid efterföljande provbelastning. Metoden bör emellertid ytterligare utvecklas för att bekvämt kunna användas vid framtida prov.

12) Eftersom det är möjligt (speciellt vid lämplig utformning av dynan) att i betydligt större utsträckning än hittills slå pålar med lätta slagverk (tryckluft- och dieselhejare t ex för efterknackning [12]), och eftersom det synes möjligt att med ovan angivna metoder även bestämma så slagna pålars bärighet, återstår frågan om i vilka fall det skulle löna sig att använda lätta slagverk.

För att besvara denna fråga behöver man en på arbets- och metodstudier baserad teknisk-ekonomisk utredning, som utöver direkta slagningskostnader även beaktar investeringskostnader, eventuella besparingar ifråga om bortslagna pålar, fördelar av ev högre tillåten last för omsorgsfullt och kontrollerat slagna pålar av hög kvalitet mm.

Som nämnts har Pålslagningskommittén medverkat vid ett flertal pålförsök, där en del av ovan redovisade synpunkter studerats. Det synes naturligt och lämpligt att fortsatt försöksverksamhet på detta område sker i kommitténs regi. Dessvärre har dock för närvarande kommittén nödgats begränsa verksamhetens omfattning väsentligt på grund av bristande ekonomiska resurser.

LITTERATURHÄNVISNINGAR

- [1] L Hellman: Forskning om pålslagning och pålbärighet, Väg- o Vattenbyggaren nr 6, 1960, s 203—204.
- [2] H C Fischer: New graphodynamical pulse method of computing pile-driving processes, Appl.Sci.Res. A 9 (1960) s. 93—139.
- [3] H C Fischer: Theory and application of longitudinal impact
Del I: Tryckluft nr 1 (1961)
Del II: Tryckluft nr 2 (1962)
- [4] H C Fischer: Application of the graphodynamical method... Appl. Sci. Res. A 9 (1960) s 248—274.
- [5] H Granholm: Stötvågen vid slagning av pålar, Väg- och vattenbyggen nr 2, 1960, s 43—46.
- [6] H C Fischer och J Luthman: Dragkrafter i en påle under slagning med olika slagverk vid olika spetsmotstånd och mantelfriktioner, Intern rapport Atlas Copco T-421, Stockholm 1963.
- [7] B Fellenius m fl: Provpålningar och pålprovningar vid Gubbero i Göteborg åren 1960—1962, Kommittén för pålslagning och pålbärighet, Stockholm 1962. Stencilad rapport (under tryckning hos Byggeforskningen).
- [8] P Sahlström: Redogörelse för propålning för bro över Göta älv vid Bohus station (Jordfallet), Göteborgs och Bohus samt Älvsborgs län, Kungl Väg- och Vattenbyggnadsstyrelsen, Stockholm 1962. Stencilad rapport.
- [9] A M Freudenthal: The inelastic behavior of engineering materials and structures, New York 1950, artikel 36.
- [10] P B Atwell: Composite model to simulate porous rock, Engineering (London) 193 (1962) April 27, s 574—575, samt: Response of rocks to high velocity impact, Trans Inst Min & Met 71 (1961—62), s 705—724.
- [11] S O Asplund, A Bergfelt och G Kärrholm: Förslag till normer för slagna stödpålar av betong, Göteborg 1962, samt: Stödpålar av betong, Väg- och vattenbyggaren (1963) nr 1, s 3—8.
- [12] Strömbäck: Pålning. Vi bygger på fast grund. (Granit o Betong), Dec 1962 s 7.

Särtryck Utgivare: Statens råd för byggnadsforskning

- 1957:** 11. *Klingberg, Lennart och Olsson, Eskil.* Krandagbok. En metod för arbetsstudier på tornsvängkranar. 18 s. Kr. 2:—.
- 1958:** 1. *Klingberg, Lennart, Olsson, Eskil m. fl.* Monterbara fasadställningar. 27 s. Kr. 3:—.
2. *Tynelius, Sven.* Parkeringsundersökning från luften med tillhjälp av stereobilder. 13 s. Kr. 1:50.
3. Uppsatser om golv. 62 s. Kr. 3:—.
6. *Saare, Erik.* Forskning om fukt i byggnadsmaterial. 7 s. Kr. 2:—.
- 1959:** 1. *Höglund, Ingemar m. fl.* Invändig ytbehandling i betonghus. 11 s. Kr. 1:—.
2. *Backmark, Lennart, Blomgren, Boris, Jacobsson, Mejse och Månsson, Kurt.* Byggnadsverksamhet och bostadsförhållanden i Sovjetunionen. (Fyra artiklar.) 48 s. Kr. 4:—.
5. *Eneborg, Ingemar.* Driftundersökningar på små oljeeldade värmeanläggningar. 7 s. Kr. 1:—.
- 1960:** 2. *Jacobsson, Mejse.* Monteringsbyggeri i Europa. 8 s. Kr. 1:50.
3. *Mandorff, Sven.* Förinställningsberäkning — ett viktigt led i värmeanläggningens projektering. 16 s. Kr. 3:—.
4. *Eneborg, Ingemar.* Värmeutbytet vid sopeldning. (Två artiklar.) 11 s. Kr. 3:—.
5. *Westin, Olle.* Markexploatering. 7 s. Kr. 1:50.
6. *Saare, Erik.* Åldringsbeständighet hos byggnadsmaterial av plast. 8 s. Kr. 1:50.
7. *Jacobsson, Mejse.* Byggnaders underhåll — ett viktigt forskningsområde. 8 s. Kr. 2:—.
8. *Tynelius, Sven.* Kan det äldre villabeståndet förnyas? 4 s. Kr. 1:50.
9. *Eneborg, Ingemar och Nilsson, Stig.* Problem kring soporna. 7 s. Kr. 2:—.
- 1961:** 2. *Nyquist, Ingemar resp. Jansson, Ingvar.* Den III internationella betongvarukongressen, Stockholm, 16—22 juni 1960. RILEM:s lättbetongsymposium, Göteborg, 20—23 juni 1960. (Två sammanfattningar.) 8 s. Kr. 2:—.
3. *Dirke, Lars.* Varmvattenförbrukning i lägenheter med och utan varmvattenmätare. 12 s. Kr. 3:—.
4. *Brandt, Ove.* Luft- och stegljudsisolering i monteringsbyggda bostadshus. 8 s. Kr. 12:—.
5. *Pleijel, Gunnar.* Fönsterglasens transmission av strålning från sol och himmel. 8 s. Kr. 2:—.
6. *Blomberg, Clas.* Matematisk-statistisk behandling av en stadsplaneprogno. 4 s. Kr. 1:—.
7. *Rasmussen, Poul.* 1. Försök med nersotning av en värmepanna. 2. Hur ofta lönar det sig att sota en värmepanna? — Nomogram för bestämning av optimala sotningsintervaller. 5 + 7 s. Kr. 3:—.
8. *Löfstedt, Börje.* Vertikal temperaturgradient och väggtemperatur — modellförsök i klimatkammare. 8 s. Kr. 2:—.
9. *Holm, Lennart.* Ett svenskt institut för byggnadsforskning. 8 s. Kr. 1:—.
11. *Brandt, Ove och Bring, Christer.* Stegljudsisolering och beständighet mot intryck hos golvbeläggningar på massivbjälklag av betong. 15 s. Kr. 2:—.
12. *Löfstedt, Börje och Ronge, Hans.* Strålningsdrag från en kall fönsteryta. Experimentell undersökning med värmeflödesmätning. 7 s. Kr. 2:—.
13. *Trägårdh, Uno.* Korrosion på varmvattenrör inbäddade i betong. 4 s. Kr. 2:—.
- 1962:** 1. *Holm, Lennart.* Konsumtionsanpassade bostäder. 11 s. Kr. 2:—.
2. *Löfstedt, Börje.* Varma rumsklimats inverkan på människans komfort och prestationsförmåga. 11 s. Kr. 2:—.
3. *Norén, Bengt.* Utvecklingstendenser för träkonstruktioner. 8 s. Kr. 2:—.
4. *Bring, Christer.* Avtorkningsanordningar i entréer. 8 s. Kr. 2:—.
5. *Brown, Gösta.* Nya metoder vid beräkning av byggnaders värme- och kylbehov. 15 s. Kr. 3:—.
6. *Bildmark, Knut.* Byggnadselementens uppskattade ekonomiska varaktighet och tidsintervaller för underhåll. 67 s. Kr. 7:—.
7. *Saare, Erik och Jansson, Ingvar.* Measurement of Thermal Conductivity of Moist Porous Building Materials with Particular Emphasis on the Thermal Conductivity of Cellular Concrete. 17 s. Kr. 3:—.
8. *Jacobsson, Mejse.* Utvecklingsgruppen — ett medel för bättre byggnadsplanering. 7 s. Kr. 2:—.
9. Aktuella värmeisoleringsproblem. Några undersökningar vid Institutionen för byggnadsteknik, KTH. 76 s. Kr. 10:—.
10. *Hanson, Rune.* Takterrasser och plana industritak — tre artiklar. 16 s. Kr. 3:50.
13. *Saretok, Vitold.* Mur- och putsbruk i teori och praktik. 11 s. Kr. 3:—.
14. *Rasmussen, Poul.* Termiskt drag hos oljeeldade villapannor. 12 s. Kr. 3:—.
15. *Bring, Christer.* Värmebehaglighet hos golv. 11 s. Kr. 3:—.
- 1963:** 1. *Högberg, Erik.* Vidhäftningsundersökningar. 12 s. Kr. 3:—.
2. *Bring, Christer och Wallén, Ingvar.* Avjämningsmassor för undergolv. 8 s. Kr. 3:—.
3. *Pusch, Roland.* On the Deformation Processes in Stressed Clay. 8 s. Kr. 3:—.
4. *Thiberg, Sven.* Prov i full skala — ett nytt hjälpmedel i projekteringen. 4 s. Kr. 3:—.
5. *Petersons, Nils.* Synpunkter på säkerhetsproblemet, brottlast- och partialkoefficientmetoder. 12 s. Kr. 3:—.

Pris kr. 3:—

Distribueras av
AB Svensk Byggtjänst
Stockholm C · Pg. 540 33