

Särtryck och preliminära
rapporter nr 36

Undersökning av konventionell slagdyna.
Beräkningsanalyser och mätresultat för
olika fall.

Martti Laine *)



INGENIÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
PÅLKOMMISSIONEN



— Särtryck och preliminära
rapporter nr 36

Undersökning av konventionell slagdyna.
Beräkningsanalyser och mätresultat för
olika fall.

Martti Laine *)

*) Ingenjör vid Helsingfors Hamn, Finland

Stockholm 1972

Bearbetning av texten har gjorts av civilingenjör Ulf Bergdahl.

De i rapporten framförda åsikterna är författarens och behöver icke vara pålkommisionens
ståndpunkt.

Pris 15 kr

Förord

I följande rapport redovisas en utredning om olika faktorer, närmast slagdynans inverkan på den s k primärvågens form. Den slagdynmodell, som varit föremål för undersökning, är den konventionella trädynan.

Det kan vara skäl att göra en kort historik av de i Finland gjorda undersökningarna. Helsingfors stads hamnförvaltning utförde under trettio-talet en försöksserie, där man studerade träpålars bärförmåga vid slagning med olika hejartyper. Utvecklingen stannade dock under krigsåren och började på nytt först vid femtiotalets slut. Dessa undersökningar gjordes utslutande med hjälp av provbelastningar.

De första stötvågsmätningarna vid påslagning gjordes vid Tarvovägen år 1965 under ledning av överingenjör P Duncker, som hade fått ett stipendium för detta ändamål från Svenska Tekniska Vetenskapsakademien i Finland. Resultaten har publicerats i akademiens förhandlingar nummer 18. Huvudsyftet var då att studera effekten av olika slagdynor.

Samma ändamål hade också stötvågsmätningarna vid Busholmen i Helsingfors år 1967. Dessa mätningar gjordes av Statens tekniska anstalt och beställaren var Helsingfors stads hamnförvaltning. Resultaten har inte publicerats, men de har legat till grund för den nya slagdynan som utvecklades för att slå betongpålarna till Oceankajen.

Vid Wärtsiläs varvkaj i Åbo gjordes år 1969 några stötvågsmätningar. Ändamålet med dessa var att klarlägga den reflexion, som uppstår från jordlager under påspetsen. Samtidigt utfördes också några provbelastningar.

Beräkningsanalyserna, som har utförts i samband med mätningarna, har gjorts med hjälp av ett datamaskinprogram, som utvecklades år 1965 efter mångåriga forskningar. Programmet har tillämpats först på IBM 1620 sedermera på IBM System 360 40 F och senast på Univac 1108. Beräkningsmetoden har utvecklats av författaren och fil. kand S Koskenniemi har deltagit i programmeringsarbetet.

De första beräkningarna, som gjordes med IBM:s stöd, omfattade närmast analysarbete av mätningarna vid Tarvovägen. Huvuddelen av i denna skrift framlagda analysresultat har erhållits med stöd från Finska Tekniska Högskolan. Jag vill härmed tacka professor E Niskanen för hans intresse för dessa frågor.

Ehuru ändamålet med skriften har varit att visa slagdynans verkningar, har också gjorts en kort redogörelse för hur hejarens form påverkar stötvågen. Detta har gjorts eftersom den kan vara till nytta, när man vill tolka gjorda forskningar. Reflexvågens beteende har dock ej diskuterats.

Tapiola 1972

Martti Laine

Inledning

Den figur, som formas av stötvågen i ett visst tvärsnitt, är en på detta tvärsnitt projicierad bild av systemet, hejare, dyna, påle och jord dvs vi har en teoretisk möjlighet att rekonstruera systemet, om vi känner tvärsnittets egenskaper och stötvågens form. För att kunna analysera bilden måste man känna skilda faktorerers inverkan.

Vid analyser och i viss mån även vid mätningar har tillämpats en metod med stegvis variation av olika parametrar. Man har ändrat, dels längden och dels de elastiska egenskaperna i geometriska serier, varvid andra material- och formfaktorer har varit konstanta. Vid beräkningarna har vidare antagits, att pålen är oändligt lång för att reflexvågen ej skall påverka resultaten.

Resultaten har inte vidare bearbetats eftersom beräkningsserierna har varit korta och därför att sambanden mellan variablerna och resultaten ej är linjära och skulle fordra en finare stegindelning. Beräkningarna har begränsats till det område som förekommer i praktiken.

Huvuddelen av undersökningarna har utförts med hjälp av dator. Mätningar har använts för att kontrollera resultat och bestämma materialkonstanter. Detta har gjorts delvis därför, att det är lättare att vid databeräkning variera en dels materialegenskaper och mått än vid mätningar. Kostnadsmässigt är det också förmånligare.

Beräkningsmetodens grunder och användningssätt

Beräkningsmetoden baserar sig på Huygens princip och kan ej härledas ur den vanliga vågekvationen. Den kan inte visas i sluten form. Beräkningarna utförs med ett Fortran-språkigt program, som är simulerande till sin natur. Det system, som

skall undersökas, uppdelas i delar; deras antal kan vara några tusen beroende på datamaskinens kapacitet och snabbhet. Ett system med fyra hundra delar kräver ett minnesutrymme av ungefär 18 kg ord. Varje del behandlas individuellt, dvs man kan välja fritt mellan delarnas area och elastiska egenskaper. Resultat kan fås för önskad del.

Beräkningsmetoden är endimensionell. Den begränsning, som därav följer förorsakar dock inga större problem när det är fråga om pålning.

Det praktiska utförandet förutsätter att systemets olika delars numeriska ingångsvärden stansas på hålkort. De olika enheternas specifika vikt, stötvågshastighet samt slående delars hastighet är de värden, som vanligen tas med. Man kan dock även ta med friktionskrafter samt pålens och jordens sidostyvhet, som har viss inverkan, när man beräknar friktionen. Delarnas längder behöver ej tas med som ingångsvärden. Man kan bestämma den enskilda delens längd, när man multiplicerar stötvågens gånghastighet för det aktuella materialet med valda tidsintervall. Programmet behöver inga parametervärden utom det som anger i vilken del resultatet tas ut. Resultatet visar vanligen kraften som funktion av tiden men även andra storheter som till exempel sjunkningen kan tas fram. Man kan också analysera mantelfriktionens inverkan med en subrutin, som tillhör programmet. Beräkningens noggrannhet är beroende av valda tidsintervall. När man minskar dessa medför detta att delarnas antal blir större och beräkningstiden därmed växer liksom även kostnaderna. Att modellen är endimensionell bidrar också i viss mån till noggrannheten.

I bilaga visas i tabellform ett exempel på det geometriska systemet, som matas in i datorn.

Hejaren

Hejaren är den del av pålningssystemet, som genererar stötvågen till pålen. Stötvågens maximala spänning är en funktion av den slående hejarens anslagshastighet och vågens effektiva längd beror av hejarens massa. Hejarens massfördelning påverkar också vågens form. Bild 1 visar hur vågens form förändras när hejarens längd varierar. Hejarens vikt har varit konstant och en dyna, som utgör endast en del, har placerats mellan hejaren och pålen. Beräkningen har gjorts under förutsättning att i det första fallet pålens och hejarens dynamiska areor har varit desamma. Med den dynamiska arean förstår man i detta sammanhang produkten av area, specifika vikt och stötvågens gånghastighet.

Vid granskning av beräkningsresultaten finner man att hejarens längd påverkar stötvågens form på ett visst sätt. Denna effekt avtar när hejarens dynamiska area växer i förhållande till pålens dynamiska area. Skillnaden mellan beräkningsexempel 4 och 5 är så liten, att vi inte får fram den ur mätresultaten. I exempel 5 har hejarens och pålens dynamiska areor förhållandet 16:1. Vanligen arbetar man med redskap, där denna relation är 30:1. Hejarmassans fördelning medför då inga större problem och resultaten kan tillämpas från en typ till en annan med samma vikt. Endast i de fall när man använder långa hejare ($L \geq 3 \text{ m}$) är en speciell utredning nödvändig.

Slagdyna

Allmänt

Pålen får, när man slår utan dyna, en maximal spänning, som är beroende på inte bara hejarens slaghastighet utan också på förhållandet mellan hejarens och pålens dynamiska areor. Denna spänning blir större, när hejarens dynamiska area växer.

Dynan, som utgörs av endast en del, förorsakar en viss redartation av tiden så att spänningen hinner växa till sitt maximala värde. Denna redartation är nästan oberoende av hejarens egen-

skaper och förorsakar en minskning av spänningen, om spänningskurvan är sådan, att spänningen hinner falla i redartationstiden. Samtidigt lagrar dynan energi, som den lämnar tillbaka i ett senare skede.

Den konventionella slagdynan består av tre delar (Bild 2), som alla påverkar stötvågens form på ett speciellt sätt. Man kan t ex undersöka de enskilda delarnas verkningsätt eller också varieras en dels längd, tvärsnitt eller elasticitet utan att ändra de andra delarnas egenskaper. Båda metoderna har här använts. Eftersom undersökningarna har pågått under loppet av sex år och för skilda ändamål har man i beräkningar och mätningar medtagit redskap av olika slag. Mätningarna i Helsingfors har gjorts med en långsmal hejare som visas på bild 3 och pålar som visas på bild 4. Dynorna visas på tillhörande bilder. Mätningen i Åbo gjordes med fyra tons hejare och pålmaskin av typ Åkerman. Pålen var vid det tillfället en $25 \times 25 \text{ cm}^2$ betongpåle och dynan var av azobe infattat i fyrkantigt stålrör. Dynans area var 675 cm^2 , vilket också antagits i en del av beräkningarna.

Beräkningar har gjorts delvis med antagandet att hejaren var 3,5 m lång och att arean var 532 cm^2 . I andra fall har antagits att hejaren är av modell Åkerman vägande fyra ton. I beräkningarna har vidare antagits att pålen är av betong med $25 \times 25 \text{ cm}^2$ tvärsnitt.

Slagdyna av endast en del

Den enklaste slagdynan är en tråkloss, som är placerad mellan hejaren och pålen. Tråklossens fibrer kan ligga horisontellt eller vertikalt. I beräkningen kan man variera både dynans elastiska egenskaper och dynans längd. Följande studie (Bild 5) har gjorts under antagande, att dynans längd och area har varit konstanta. Elasticitetsmodulen har ändrats med fyrdubbling mellan 500 och 128.000 kp/cm^2 .

För att vidare studera tråknektens inverkan på stötvågen har gjorts en analys (Bild 6), i vilken knektens längd har ökats. Vi kan observera att vågformen och den maximala spänningen ändras ganska lite när längden växer från 40 cm till 160 cm. Ett exempel från mätningarna vid Busholmen (Bild 7), bekräftar beräkningsresultaten.

Den ovan visade studien berörde ett fall, där fiberriktningen i dynan var vertikal. När dynmateriallets elasticitet är avsevärt mindre än pålens blir resultatet annorlunda. Skillnaden framstår klart när man studerar följande två mätresultat som också erhållits vid Busholmen. I bild 8 ser man hur vågformen ändras när man dubblar tråklossens tjocklek. Samma tendens kan också påvisas i följande bild där dynmateriallet var av gummi (Bild 9). Formförändringen var dock inte så märkbar, eftersom gummi visade sig vara hårdare än trä, där fiberriktningen är horisontell.

Slagdyna av två delar

I Finland utvecklas för närvarande en dyna bestående av två tråklossar, vilka omges av en stålhylsa (Bild 10). I den övre trädelen är fibrerna vertikala och i den undre horisontella. Stötvågsformen är väsentligen beroende på den undre delens längd och elastiska egenskaper. I bild 11 visas ett beräkningsexempel, där som variabel använts den undre delens elasticitetsmodul. Såsom framgår av bilden medför elasticitetsmodulens ökning från 2500 kp/cm^2 till 10.000 kp/cm^2 större förändringen av stötvågens form än ökningen från 10.000 kp/cm^2 till 160.000 kp/cm^2 .

Vid mätningarna i Åbo (Bild 12) avvek förutsättningarna från beräkningsexemplet endast på så sätt att den undre delens tjocklek var 5 cm i stället 10 cm. I stötvågens form, som i princip följer den beräknade formen, kan man se hur reflexvågen från jorden och reflexer från skarven påverkar förloppet. I

Åbo slogs ungefär 1000 pålar med 3 dynor av denna typ. Efter slagningen var 2 av dessa i fullt godtagbart skick utan att trädelarna måste bytas. Pålarnas medellängd var 36 m.

Slagdyna av tre delar

Den traditionella slagdynan är en sammansatt konstruktion. Ståldelen, som samtidigt utgör både styrdon för pålen och fäste för trädelarna väger vanligen 200 - 250 kg. En exakt beräkning av dynans inflytande på stötvågens form skulle härvid fordra användning av tvådimensionell modell, eftersom ståldelens massa också är fördelad i sidled. Stålmaterialets stora styvhet i förhållande till träets gör det ändå möjligt att använda en endimensionell modell för en approximativ beräkning. För att samtidigt få en uppfattning om beräkningens användbarhet, kan man dela massan på olika sätt i längdriktningen.

I bilderna 13 - 19 visade undersökningar har gjorts så, att både ståldelens massa och längd har varierats samtidigt som den undre trädelens elasticitetsmodul också ändrats. Den övre trädelens elastiska egenskaper har hållits konstanta. Hejaren har antagits motsvara fyra tons hejare till pålmaskin modell Akerman med anslagshastigheten 250 cm/sek.

Resultaten kan jämföras med den som visas i bild 11. I fortsättningen avses med ordet vågform, stötvågens huvudförlopp. Såsom framgår av beräkningarna medför ståldelens massa en svängning runt vågens huvudförlopp. Viktigast är iakttagelsen att ju hårdare den nedre trädelen är desto större blir också den första svängningens amplitud. Av mindre betydelse är att de följande svängningarna samtidigt hämmas kraftigt. Ståldelens massfördelning har ingen större inverkning på spänningarna inom de gränser, som normalt kommer i fråga.

Val av dynmaterial

Vid mätningarna i Busholmen gjordes en undersökning där man använde olika träslag till dynor under långa slagserier. Man provade också gummi som dynmaterial. Efter slagningen kunde man konstatera, att de inhemska träslagen, furu, gran och ek inte var tillräckligt hållbara, vilket också var bekant från tidigare erfarenheter. Gummi visade sig också vara ett mindre lämpligt material, eftersom det upphettades ganska snart och började förkolna under slagningen.

För att finna ett lämpligt träslag, gjorde man vid Statens Tekniska anstalt en preliminär undersökning av elasticitetsmodulen i gran, ek och azobe eller järnmahogny. Resultaten, som är medelvärden av två mätningar, ser man i nedanstående tabell. Senare har man vid hamnverkets arbetsplatser använt nästan uteslutande azobe och med enbart goda erfarenheter.

Material	σ_{II} kp/cm ²	E II kp/cm ²	$\sigma_{\perp}$ kp/cm ²	E $\perp$ kp/cm ²	a
Gran	270	110.000	10.0	1000	20
Ek	277	88.000	26.0	2800	40
Azobe	570	157.000	83.0	4400	20

a = fukt %

Sammanfattning

För att kunna använda resultaten av mätningarna och beräkningarna måste man först klargöra hur en vågteoretisk god slagdyna bör fungera. Om man undantar den bästa möjliga vågformen, som är nära rektangulär, och nöjer sig med en exponentiell vågform kan man ställa följande två krav på slagdynans funktionssätt:

1. Stötvågens form skall vara stabil, dvs den maximala spänningen skall vara under hela slagförloppet och stå i direkt proportion till anslagshastigheten.
2. Stötvågens form får inte uppträda skarpa spänningstoppar, som förhindrar slagmaskinens effektiva användning.

Som framgår av undersökningarna beror stötvågens förändring främst på den nedre trädelens deformation vid användning av den konventionella slagdynan. Denna ändring förstärks ytterligare av den svängning, som ståldelens massa förorsakar. Det är inte helt känt hur träets deformation förändrar dess elasticitetsmodul, när fibrerna ligger vinkelrätt mot vågens gångriktning. Ur gjorda mätningar kan man dock dra den slutsatsen att elasticitetsmodulens tillväxt kan vara mer än tiofaldig. Effekten på stötvågen förstärks vidare av att delens tjocklek samtidigt minskar.

För att begränsa stötvågens ändring till ett minimum, bör man i den nedre delen använda hårdast möjliga och hållbara träslag. Delens tjocklek bör också väljas så liten som möjligt.

Den övre delen, där fibrerna är vertikalt ställda, deformerar vanligtvis relativt lite under slagningen, och elasticitetsmodulens ändring är svår att observera ur stötvågens form. Delens längd bör vara så stor att delbelastningar, som alstras i dynan till följd av att hejarens och dynans beröringsytor inte motsvarar varandra fullständigt hinner utjämnas.

Kravet nummer två fyller man bäst, om man väljer i dynan en sådan ståldel att dennas vikt inte överstiger en gräns, som man fått fram genom undersökningarna. Denna gräns är beroende huvudsakligen på hejarens vikt och pålens area och är till exempel ungefär 100 kg, när hejaren väger 4 ton och pålens area är 625 cm^2 . Man kan, om det visar sig nödvändigt skilja de delar som styr pålen, från den egentliga slagdynan så att de ej påverkar stötvågens form.

TUTKIMUS VALIMASSAN VAIKUTUKSESTA (TKK)

TIEDOT POIKKILEIKKAUKSISTA

KPL	PINTA-ALA	OMINAISPAINO	JAYKKYYS	NOPEUS	KITKA	SIVUJAYKK	MAANJAYKK	TULOSTUS
1	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	1.0000	1.0000	0
10	4080.0000	7.8500	.5000	250.0000	.0000	1.0000	1.0000	0
1	200.0000	1.0000	.4000	.0000	.0000	1.0000	1.0000	0
2	675.0000	1.0000	.4000	.0000	.0000	1.0000	1.0000	0
1	675.0000	1.0000	.4000	.0000	.0000	1.0000	1.0000	1
3	1360.0000	7.3500	.5000	.0000	.0000	1.0000	1.0000	0
4	675.0000	1.0000	.1000	.0000	.0000	1.0000	1.0000	0
1	665.0000	2.4000	.3500	.0000	.0000	1.0000	1.0000	1
1	665.0000	2.4000	.3500	.0000	.0000	1.0000	1.0000	0
0	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	0

BILAGA

TUTKIMUS VALIMASSAN VAIKUTUKSESTA (TKK)

AIKAVALEJA KORKEINTAAN	600
LOPETETTAVA KUN TEHO =	-50.000000
SUURIN TEHO	300.000000
POIKKILEIKKAUKSIA YHT.	24
TULOSTETTAVIA	2
PIIRRETTAVIA	0
AIKAVALIN PITUUS	.000025

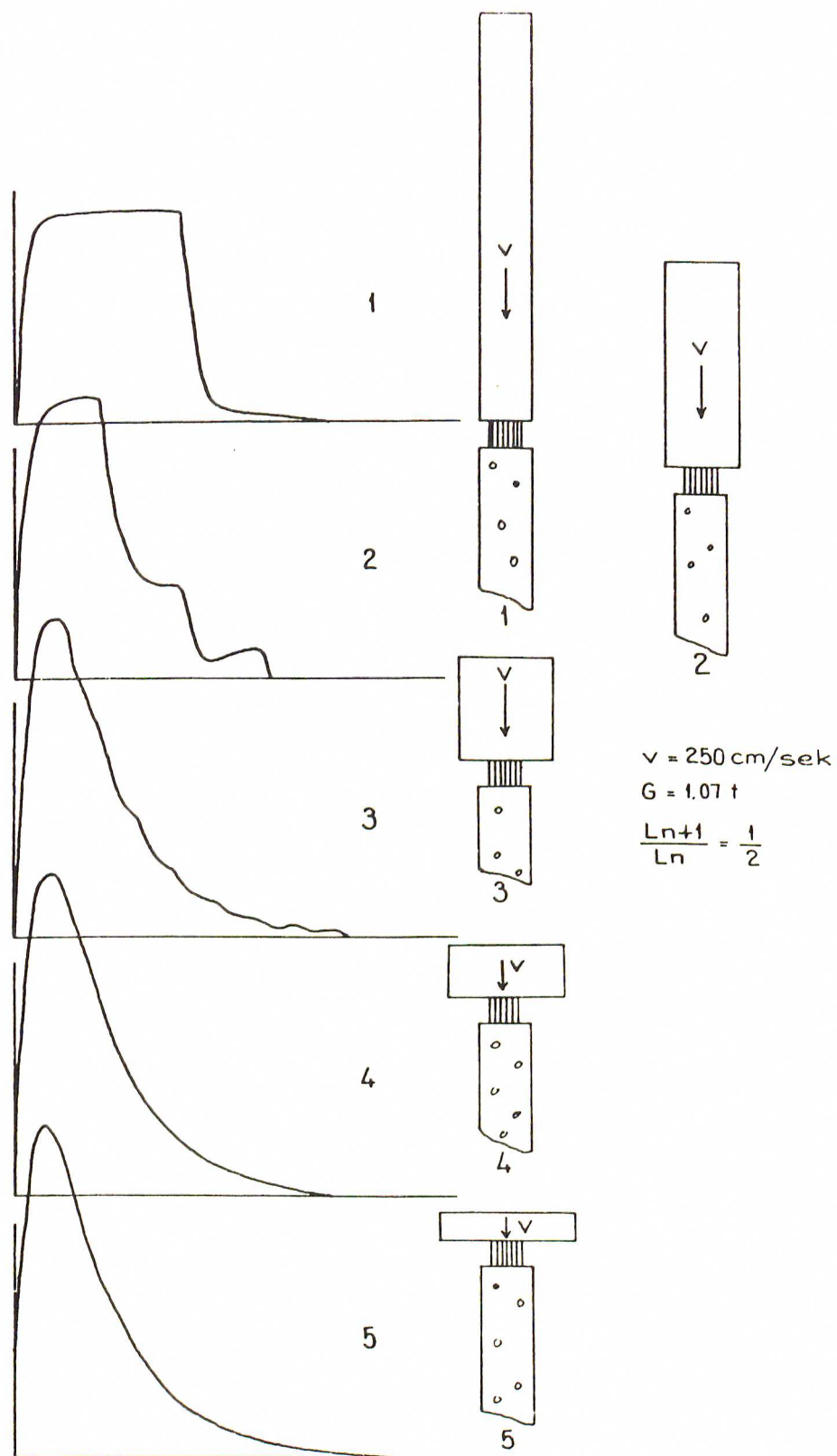


Fig. 1. Stötvågens form vid olika längder på hejaren.

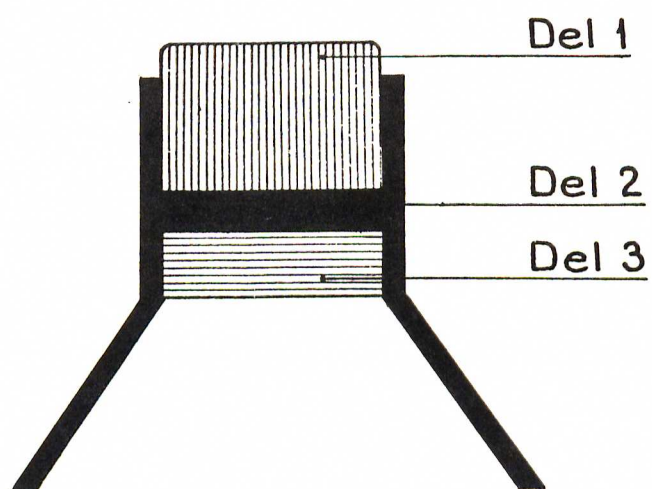


Fig. 2. Konventionell slagdyna (principskiss).

Hejare G = 4300 L = 340cm

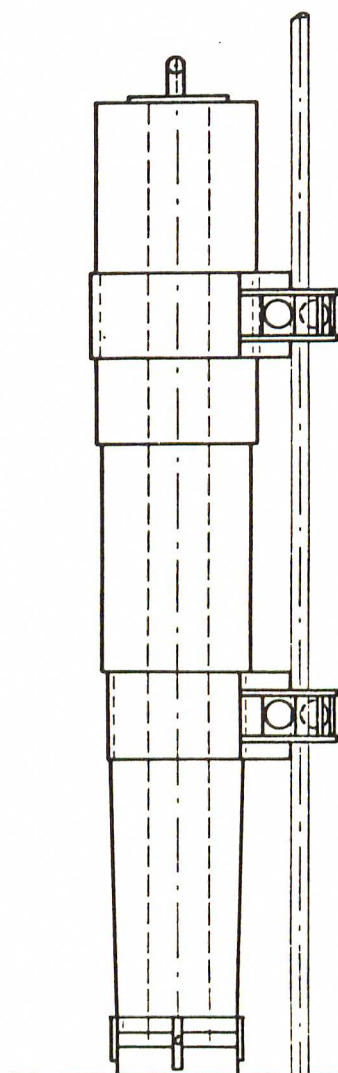


Fig. 3. Långsmal hejare som använts
vid mätningarna i Helsingfors.

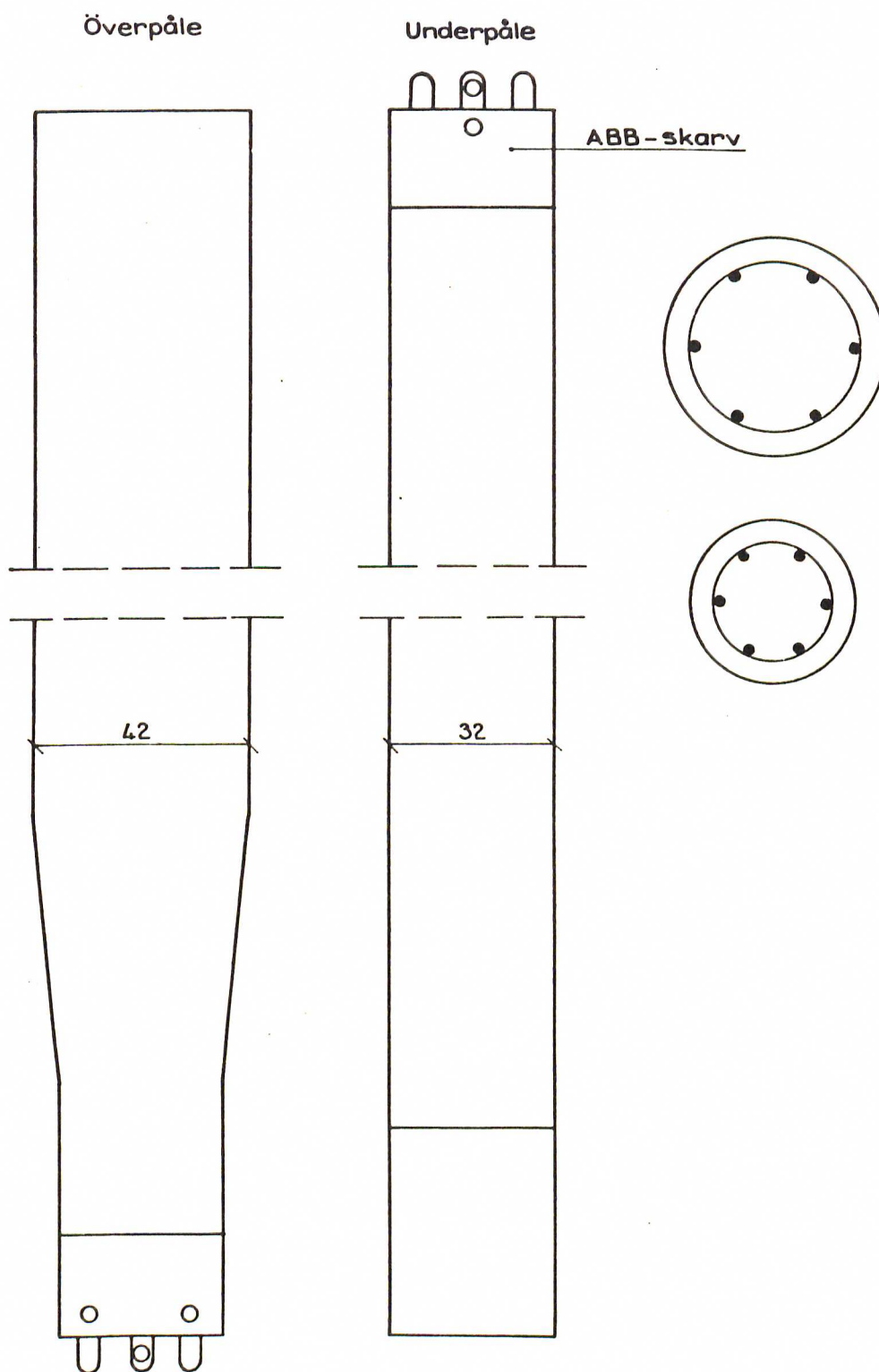


Fig. 4. Påltyp använd vid mätningarna i Helsingfors.

Hejaren

$A = 532 \text{ cm}^2$

$L = 350$

$v = 250 \text{ cm/sek}$

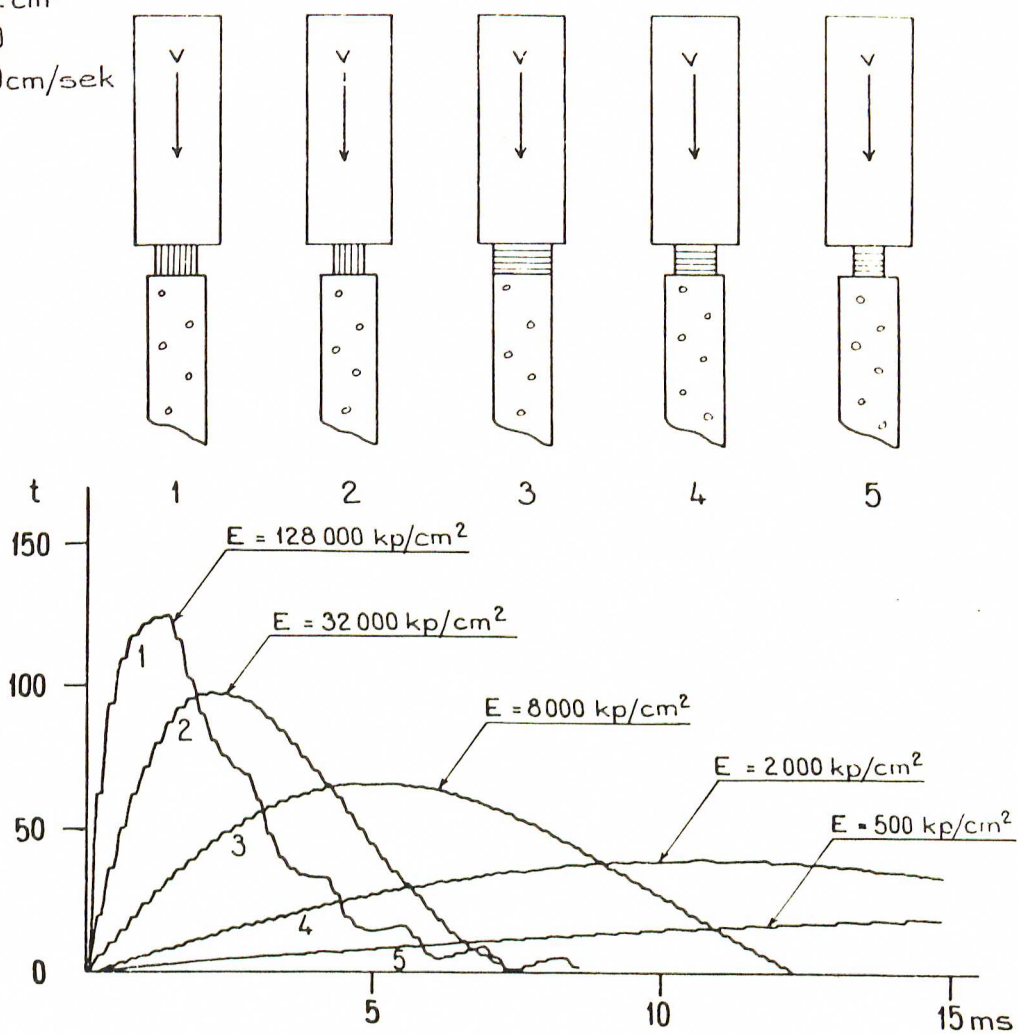


Fig. 5. Beräknad stötvågsform vid olika elasticitetsmoduler i enkel slagdyna.

Hejare

$A = 532 \text{ cm}^2$

$L = 350 \text{ cm}$

$v = 250 \text{ cm/s}$

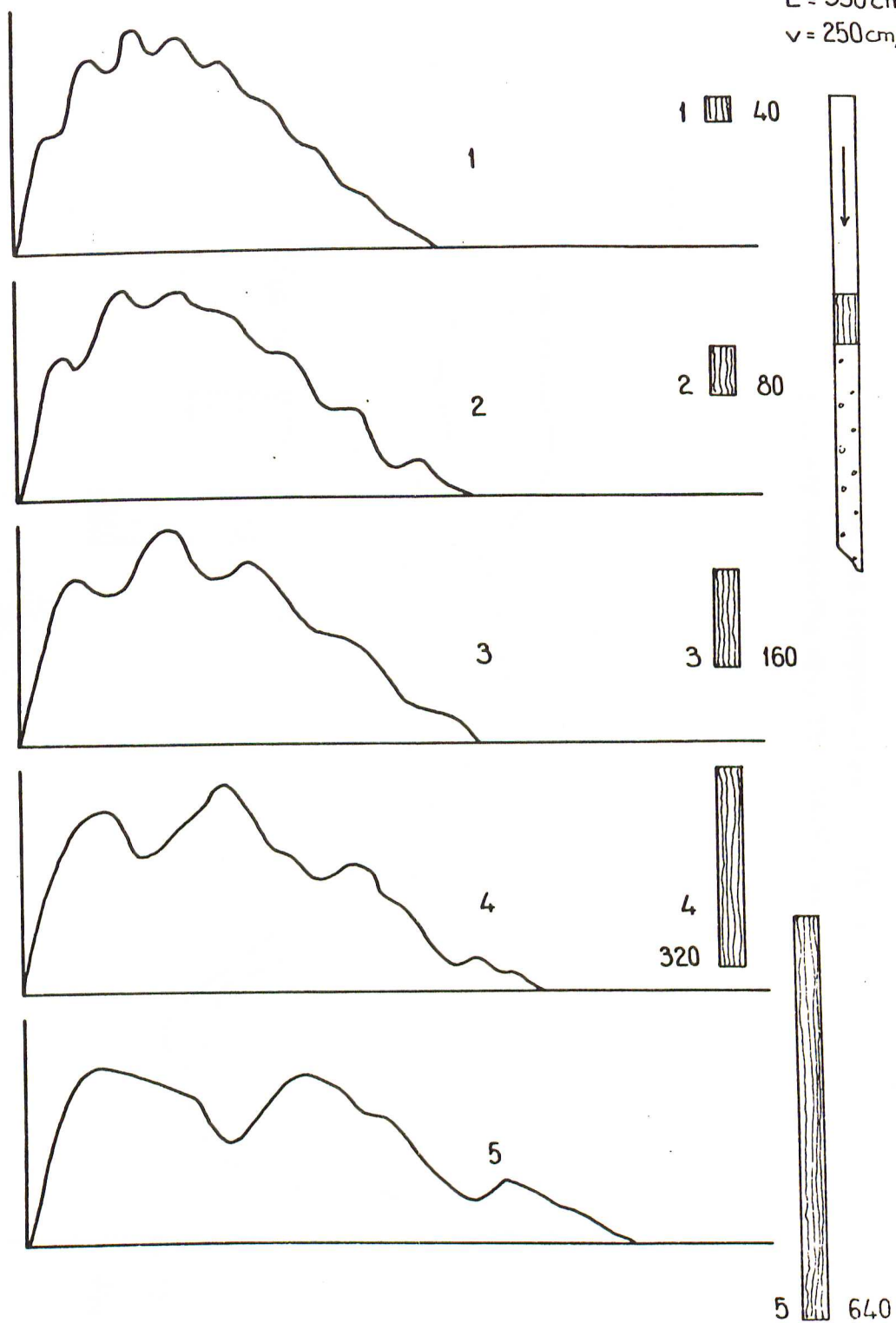


Fig. 6. Stötvågsform vid varierande längd på den enkla trädynan (träknekten).

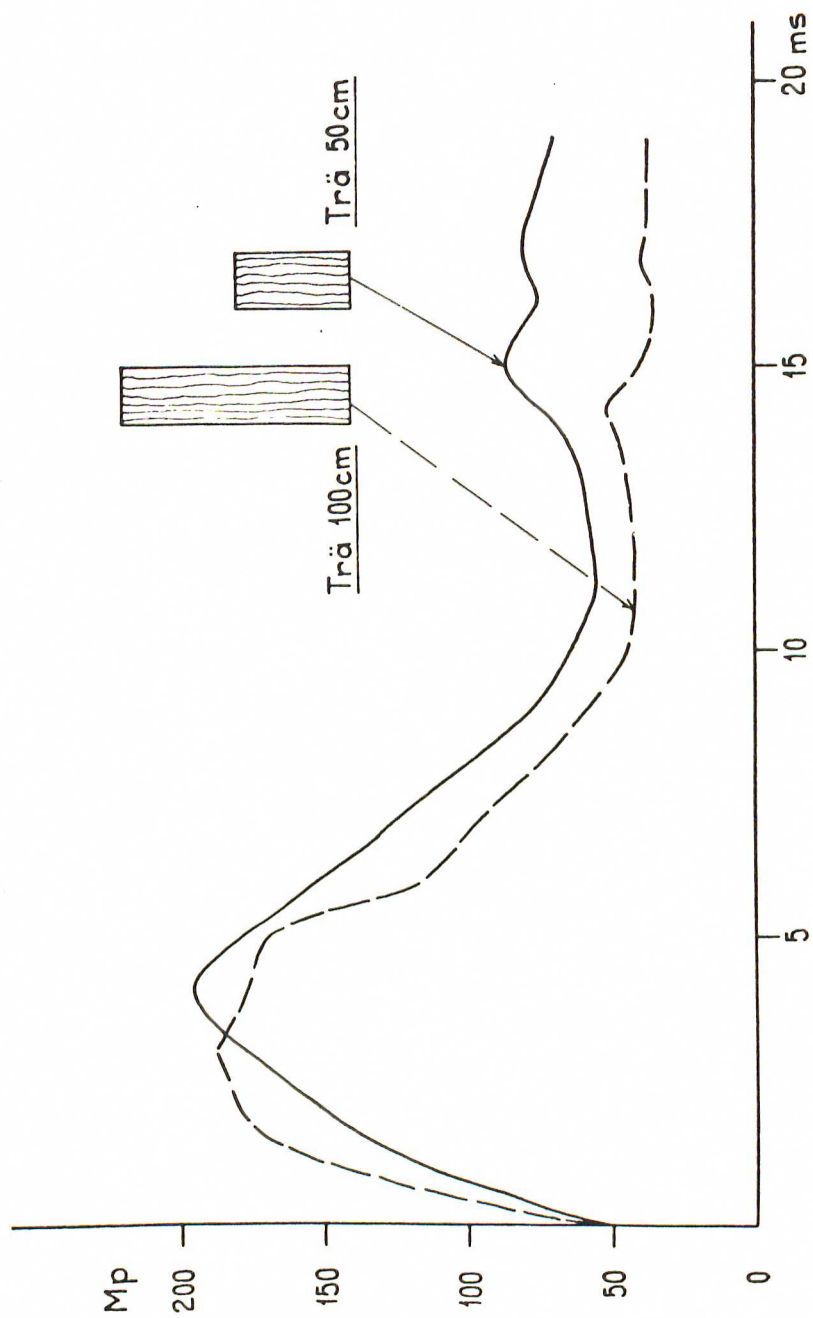


Fig. 7. Mätningresultat från Busholmen där olika långa träkubbar användes som dyna.

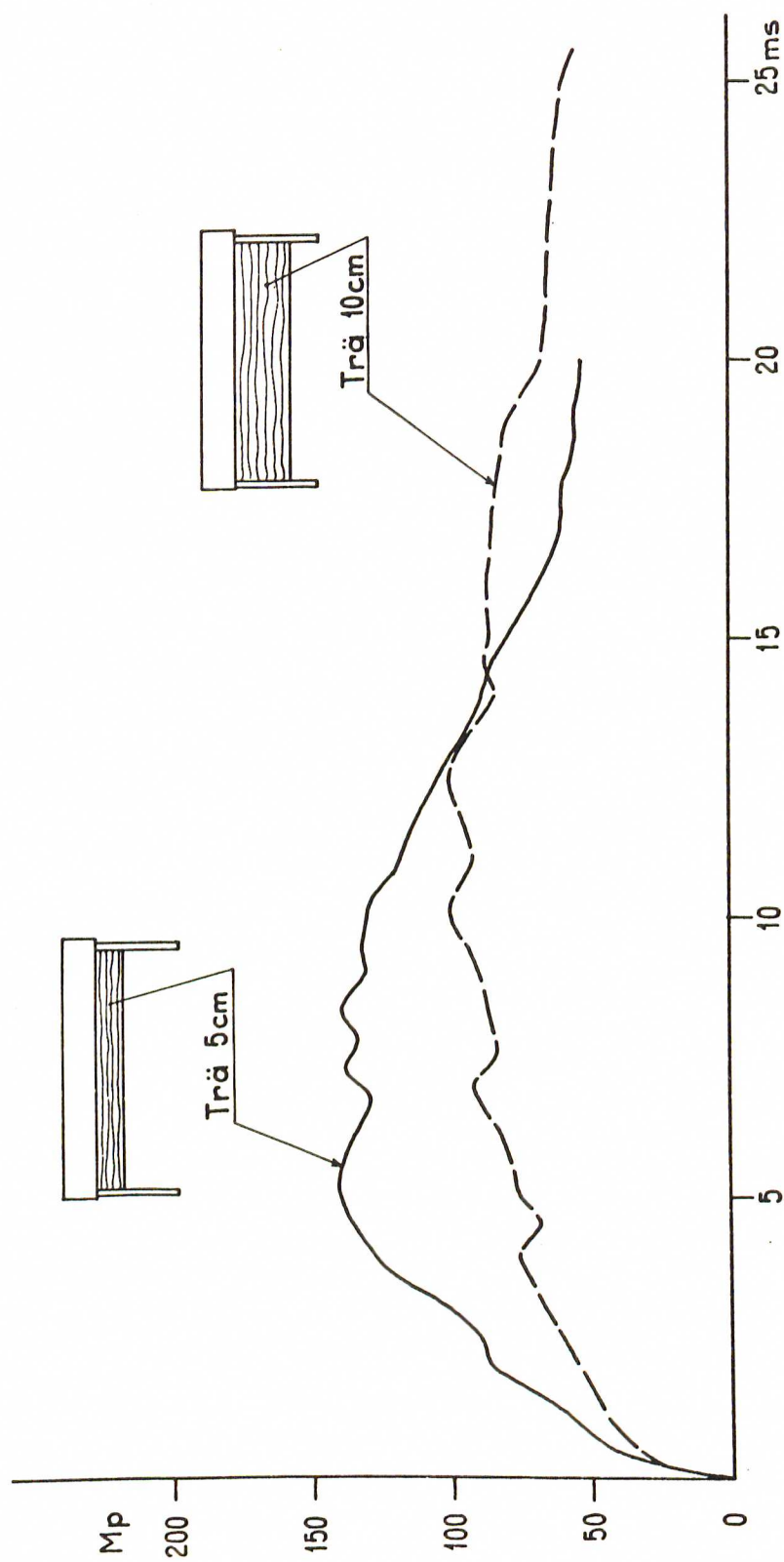


Fig. 8. Mätningresultat från Busholmen där olika tjocka träsmällanlägg med liggande fibrer använts.

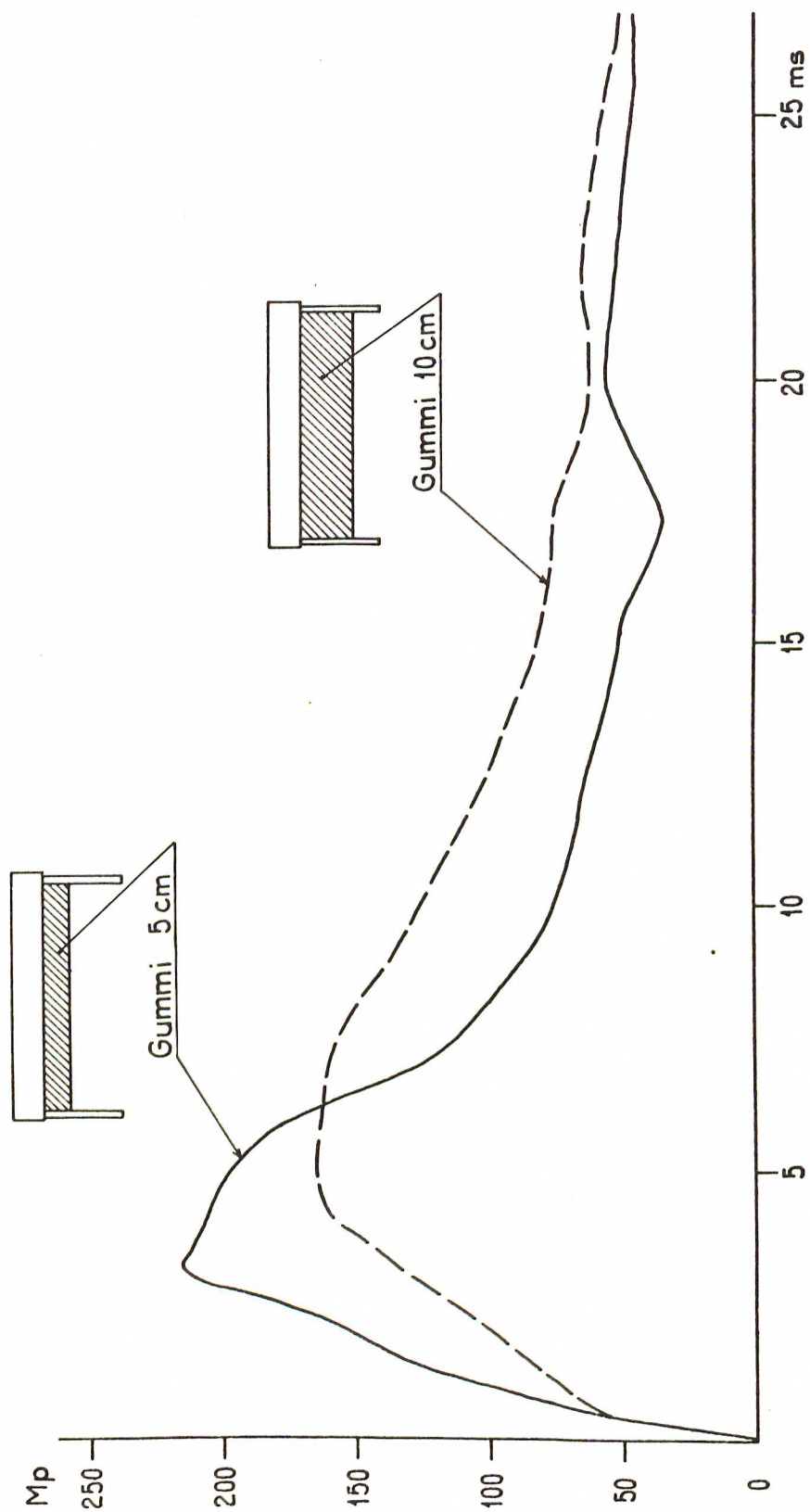


Fig. 9. Försöken vid Busholmen inkluderade också några mätningar med gummimellanlägg i dynan.

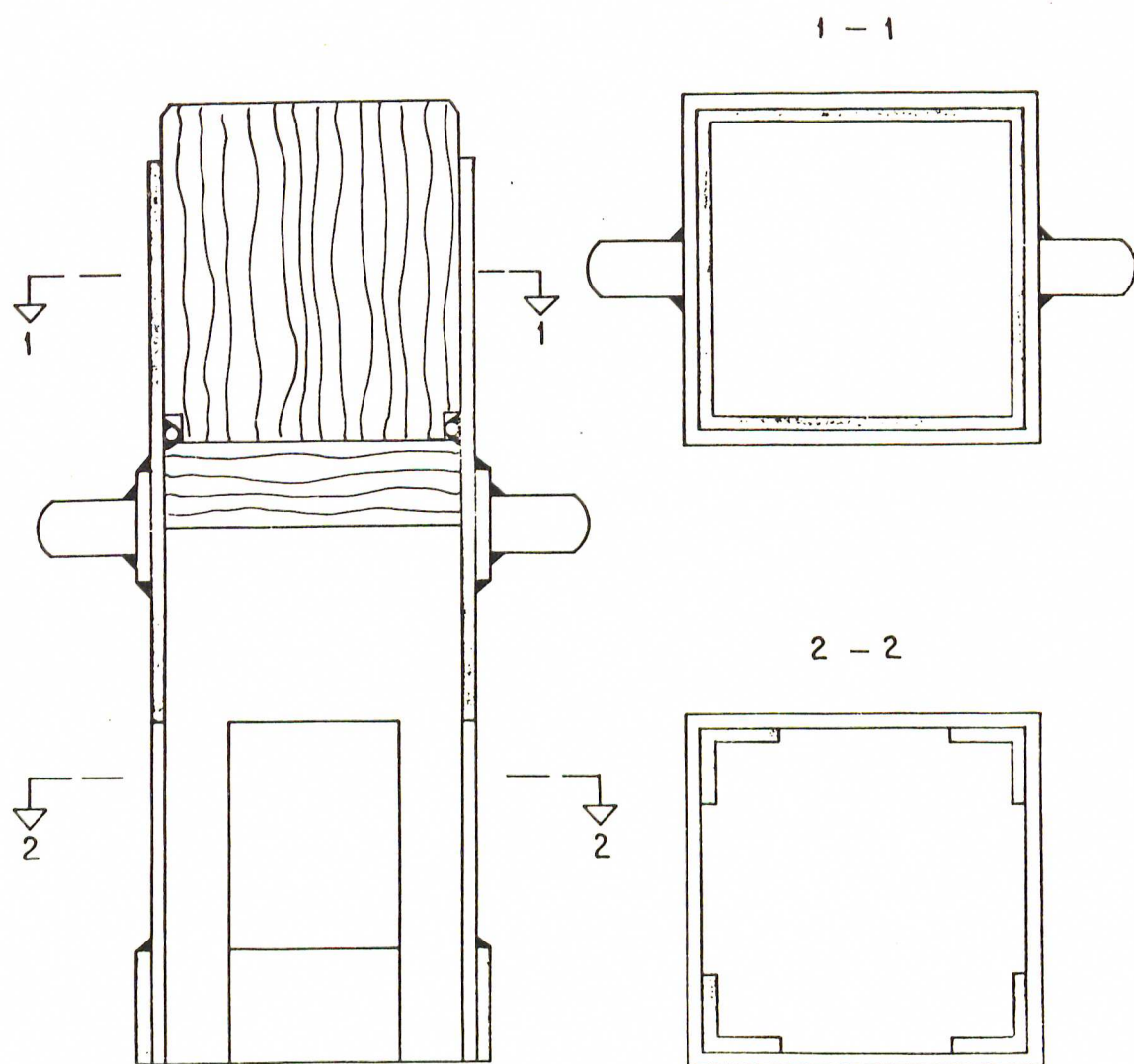


Fig. 10. Dyna under utveckling i Finland.

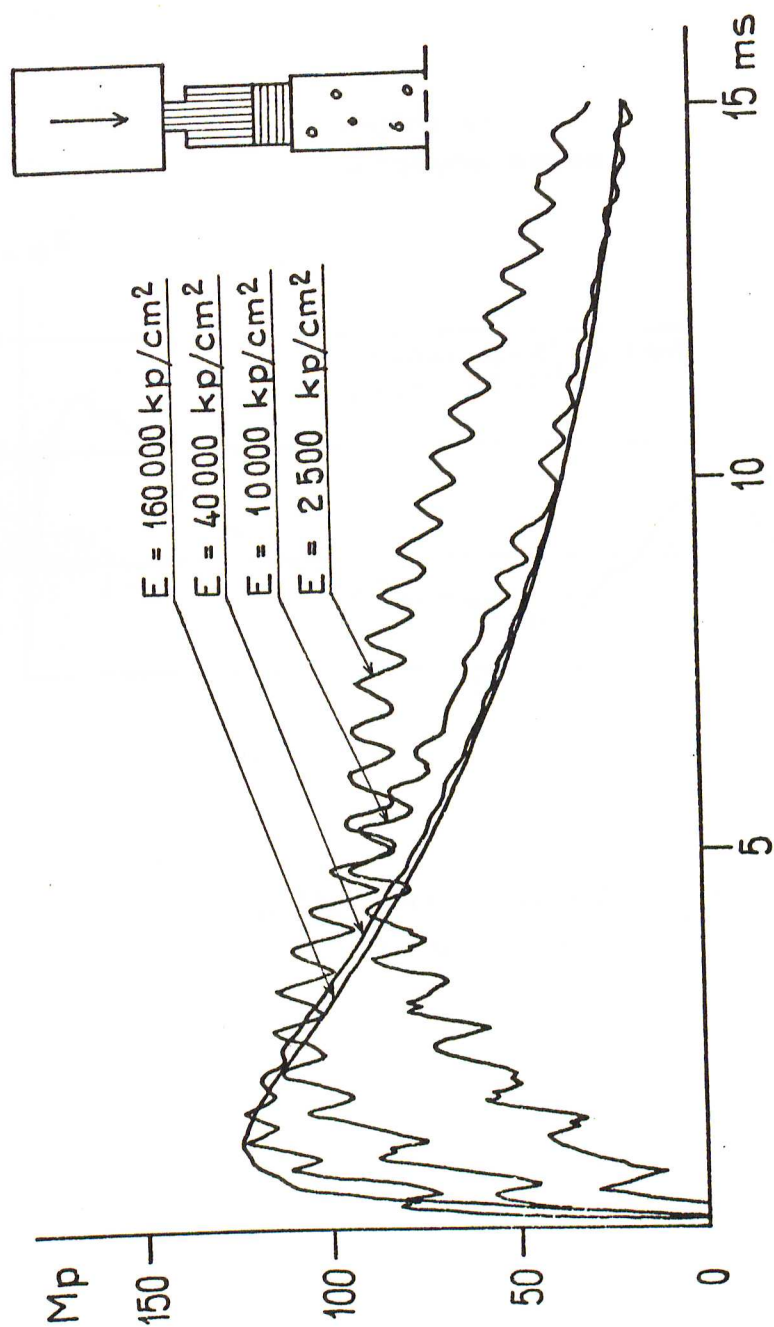


Fig. 11. Stötvågens förändring med varierande elasticitetsmodul hos den undre trädelen.

Hejare 4t
Slagdyna azobe

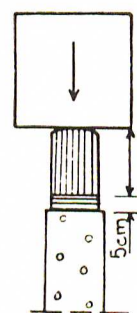
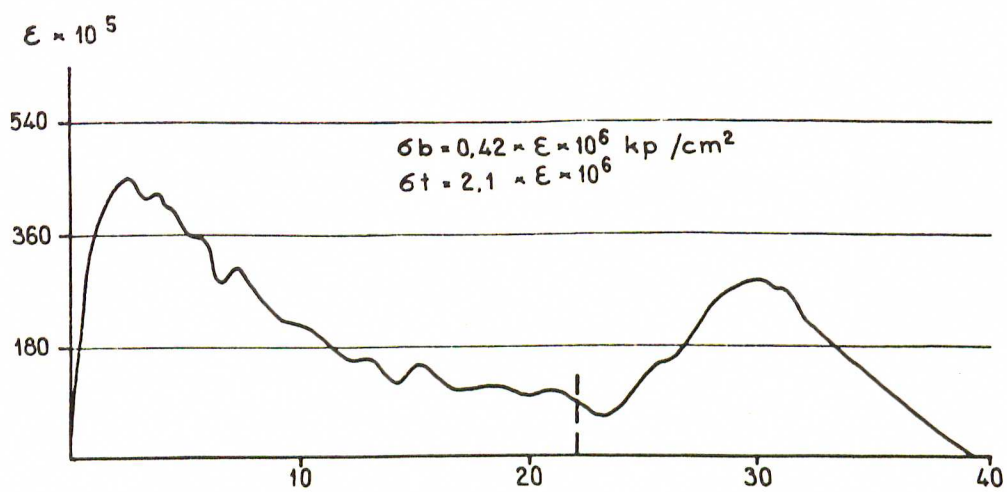


Fig. 12. Mätresultat från Åbo där dyna av två trädelar använts.

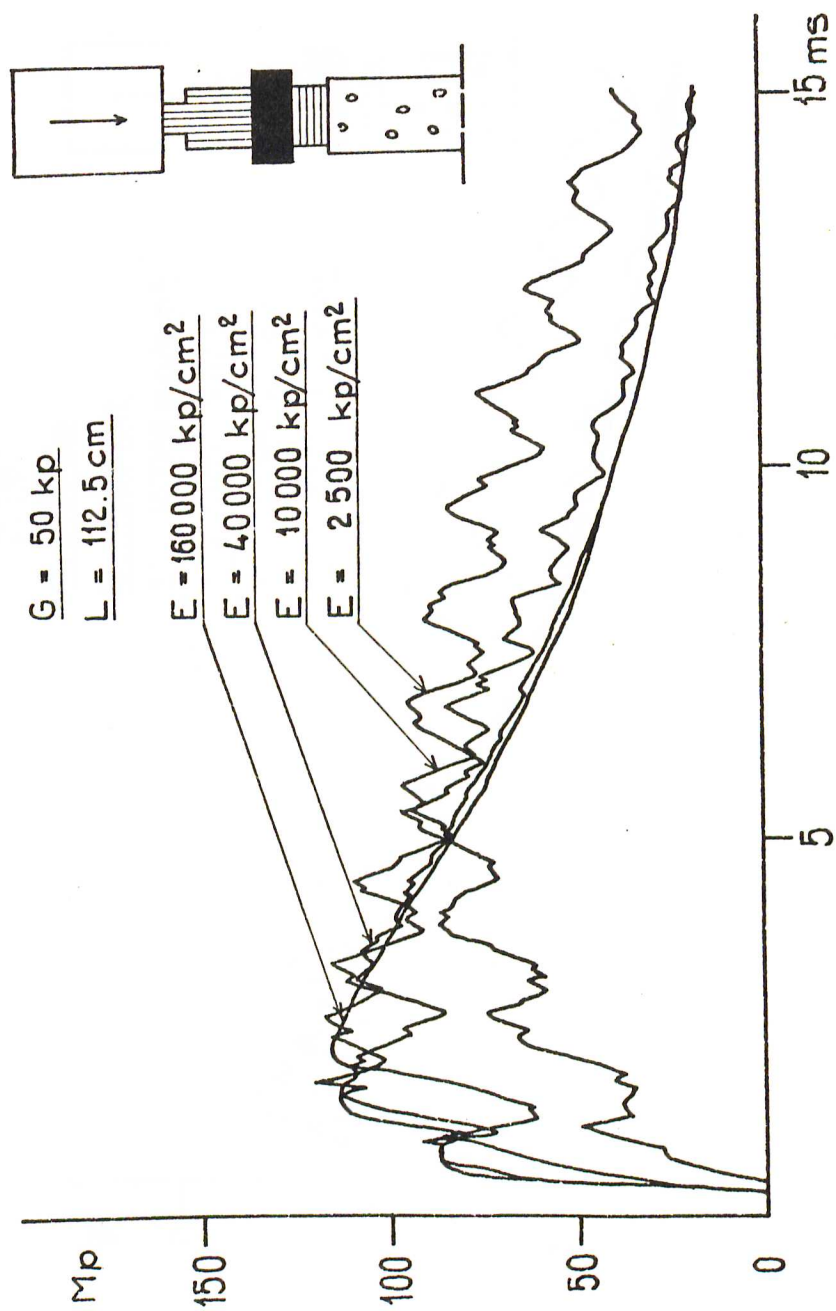


Fig. 13. Slagdyna med tre delar. Ståldelens vikt
 50 kg och längd 112,5 cm. Variation av
 undre trädelens E-modul.

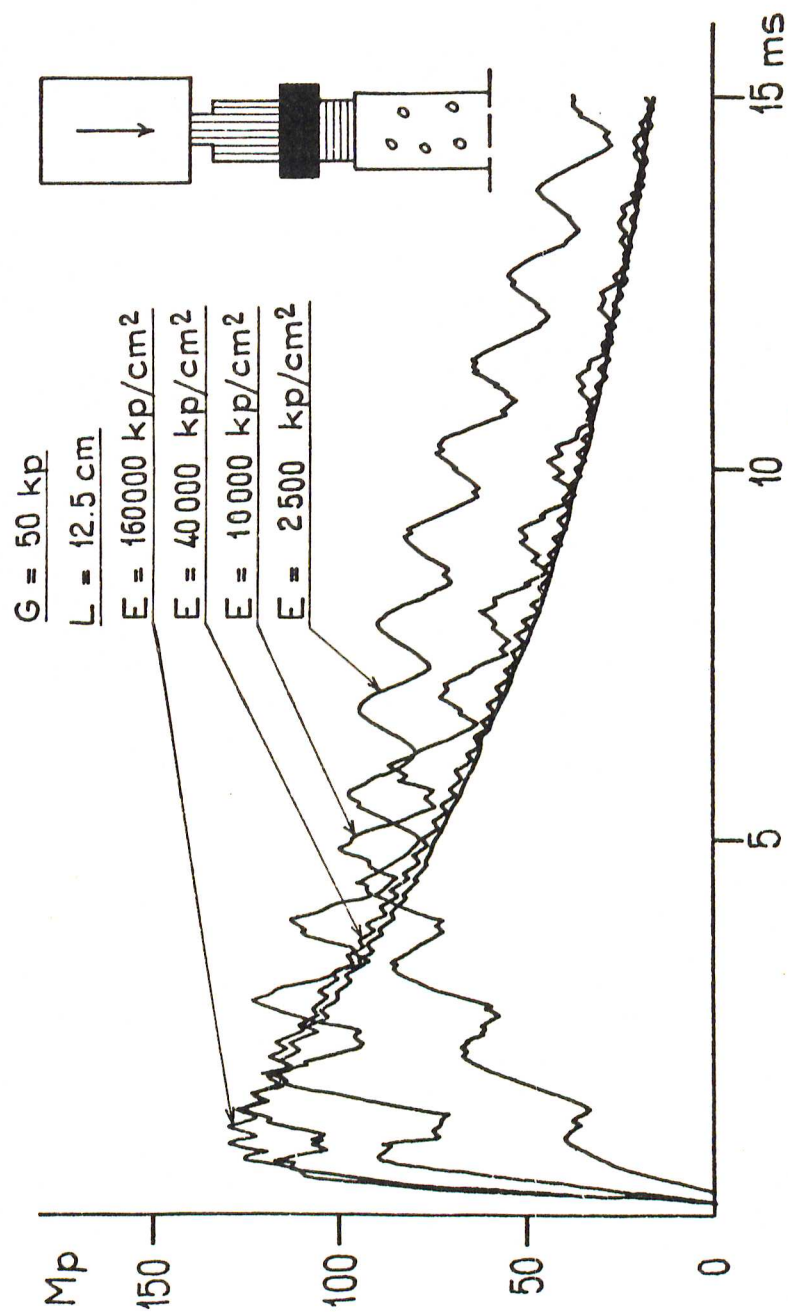


Fig. 14. Tredelad dyna. Ståldelens vikt 50 kg och längd 12,5 cm.
Variation av undre trädelens E-modul.

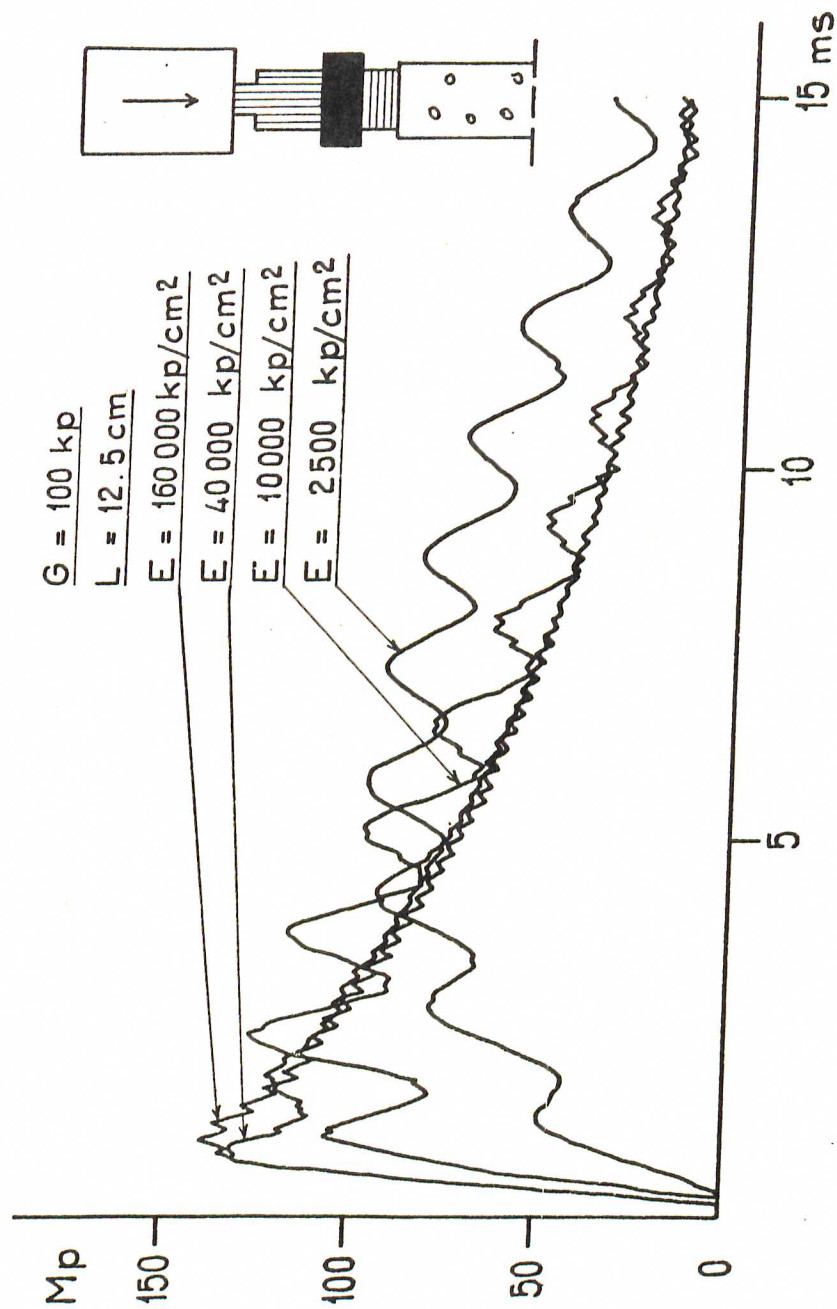


Fig. 15. Tredelad dyna. Ståldelens vikt 100 kg och längd 12,5 cm.
Variation av undre trädelsens E-modul.

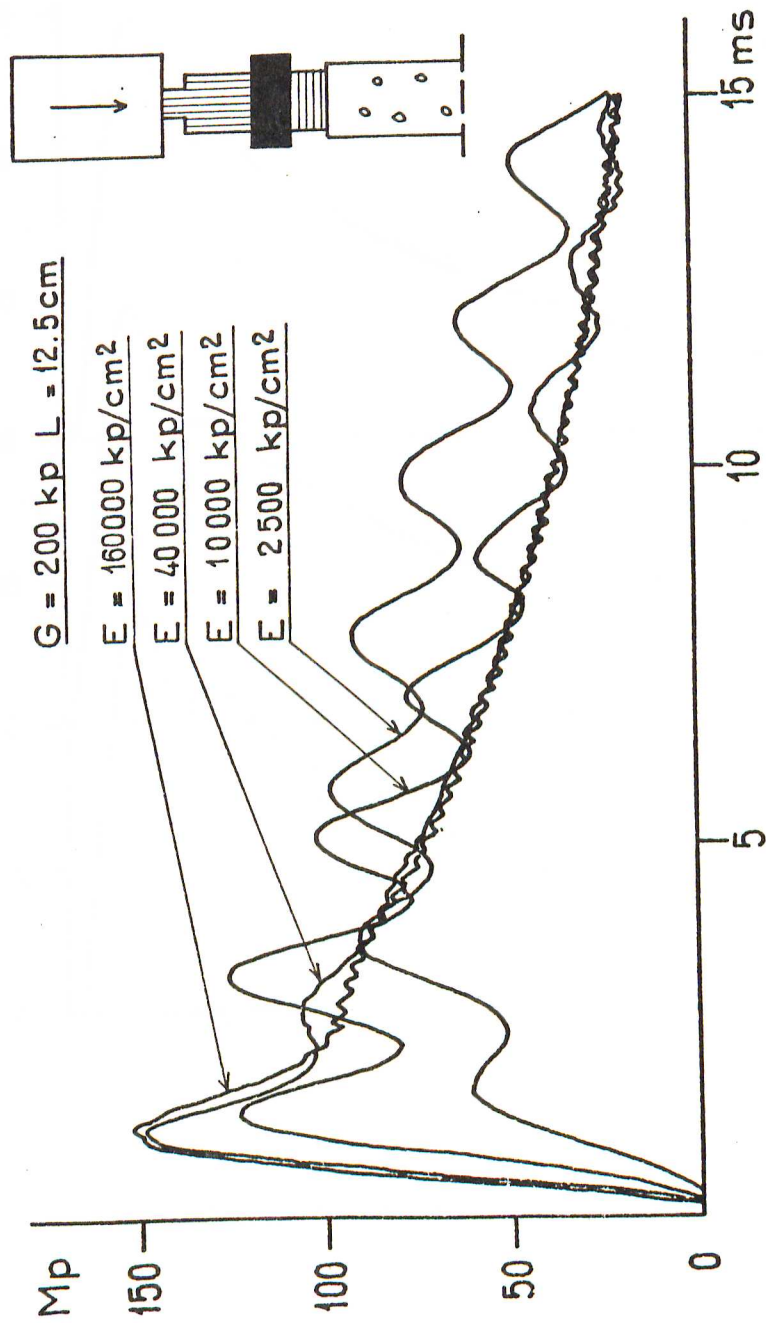


Fig. 16. Tredelad dyna. Ståldelens vikt 200 kg och längd 12,5 cm.
 Variation av undre trädelens E-modul.

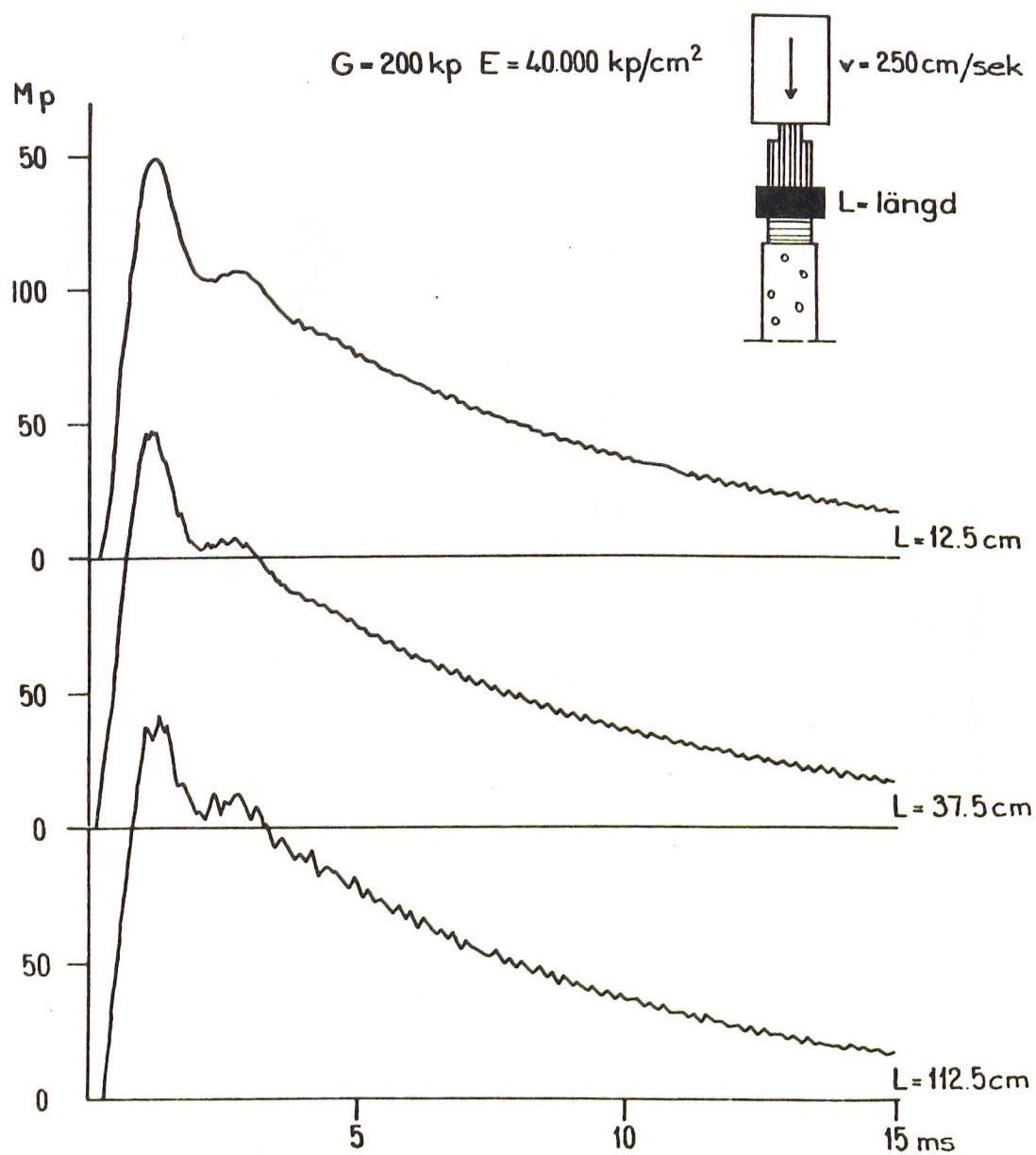


Fig. 17. Tredelad dyna. Variation av ståldelens längd.

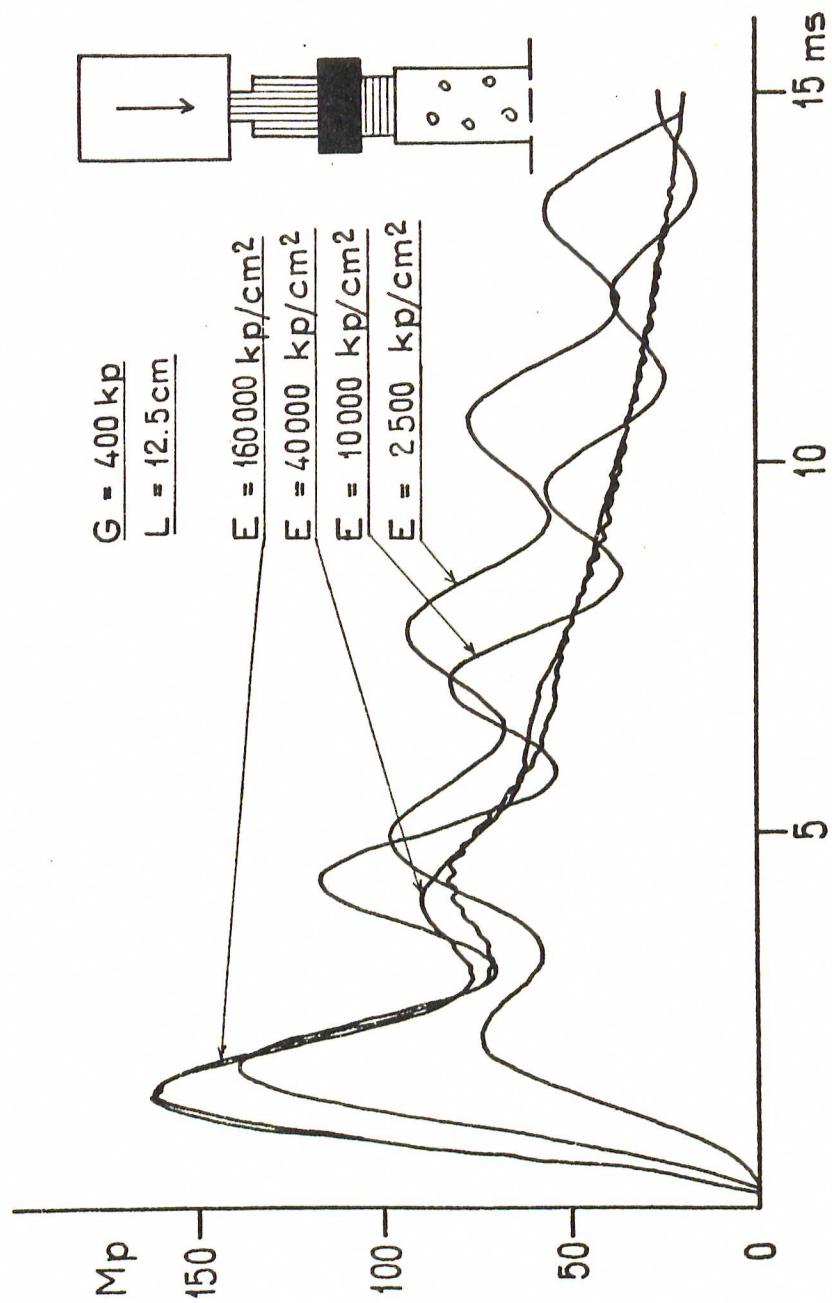


Fig. 18. Tredelad dyna. Ståldelens vikt 400 kg och längd 12,5 cm.
 Variation av undre trädelens E-modul.

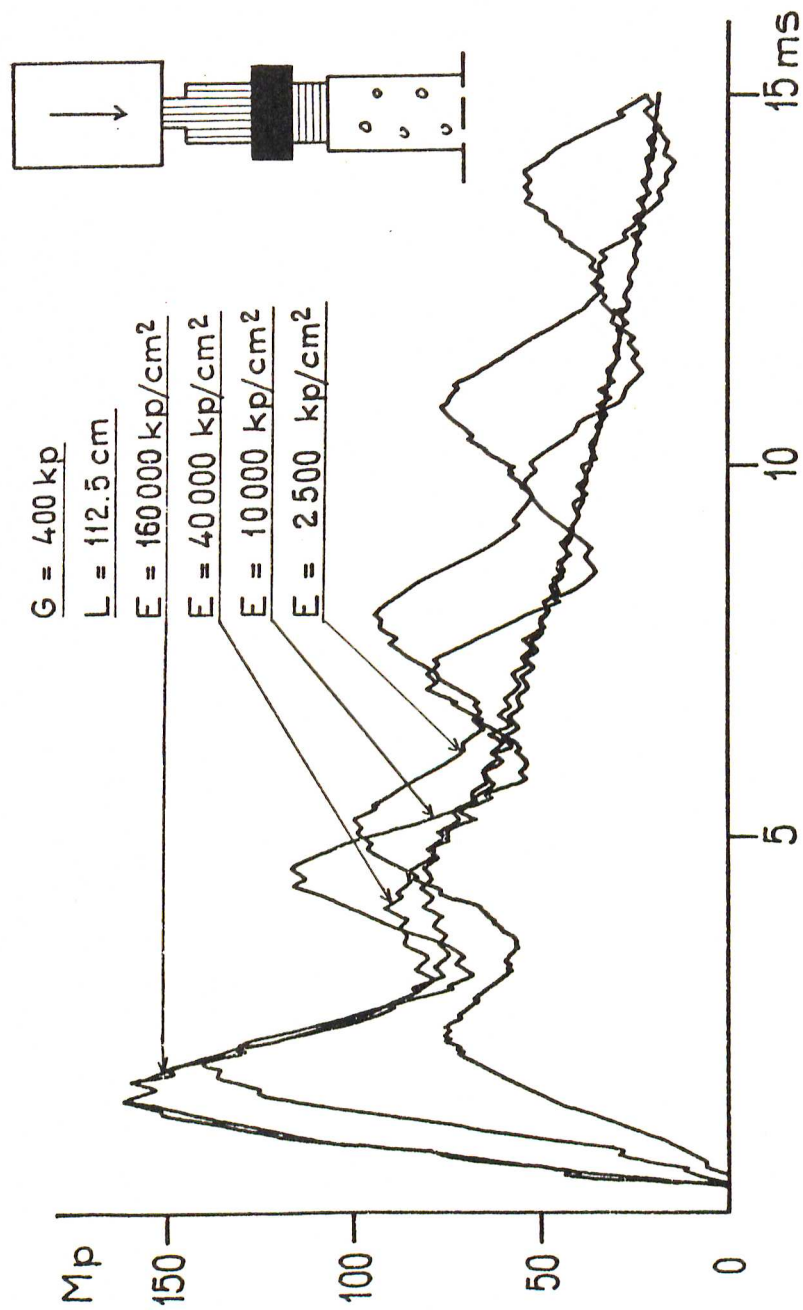


Fig. 19. Tredelad dyna. Ståldelens vikt 400 kg och längd 112,5.
Variation av undre trädelens E-modul.