

Särtryck och preliminära
rapporter nr 29

**STUDIER AV EN FRIKTIONSPÅLES
VERKNINGSSÄTT**

Åke Nilsson
Torbjörn Winqvist



INGENIÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
PÅLKOMMISSIONEN



**Särtryck och preliminära
rapporter nr 29**

**STUDIER AV EN FRIKTIONSPÅLES
VERKNINGSSÄTT**

**Åke Nilsson
Torbjörn Winqvist**

**Examensarbete i geoteknik vid
Kungl Tekniska Högskolan,
Stockholm**

Stockholm juni 1971

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

Pris 25 kr

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING

SUMMARY

INNEHÅLL

FÖRORD

- 1 INLEDNING
- 1.1 Friktionspålars bärförmåga
- 2 UNDERSÖKNINGENS SYFTE
- 3 FÖRSÖKPLATSENS GRUNDFÖRHÅLLANDEN
- 4 FÖRSÖKSUTRUSTNING
- 4.1 Pålens utformning
- 4.2 Mätutrustning
- 4.3 Slagningsutrustning
- 4.4 Mothåll och belastningsutrustning
- 5 UTFÖRANDE
- 5.1 Slagning
- 5.2 Provb belastning
- 6 UTVÄRDERING AV MÄTRESULTAT
- 6.1 Brottlaster
- 6.2 Mätningarna med trådtöjningsgivare
- 7 REDOVISNING OCH DISKUSSION AV FÖRSÖKSRESULTAT
- 7.1 Lastfördelning längs pålen
- 7.2 Spetsmotstånd
- 7.3 Sammanställning av provbelastningarna
- 7.4 Dragförsök
- 7.5 Slagningsformler
- 7.6 Feluppskattningar
- 8 FÖRSLAG TILL FORTSATTA UNDERSÖKNINGAR
- 9 LITTERATURREFERENSER
- 10 REFERAT
- 11 FIGURBILAGA

SAMMANFATTNING

För att studera en friktionspåles verkningssätt har försök utförts med en modellpåle vid Albysjön ca 20 km SV om Stockholm. Jorden består av löst till medelfast friktionsmaterial, huvudsakligen sand. Pålen sammanfogades av stålrörse delar med en ytterdiameter på 89 mm. Skarvarna svetsades. Vissa rörse delar hade trådtöjningsgivare klistrade på insidan. Kraften i pålen kunde därigenom bestämmas i dessa snitt. Med ledning av kraftfördelningen i pålen erhöles en uppfattning av spetslastens storlek och mantelfriktionens fördelning.

Slagningen utfördes med en tryckluftdriven modellpåmaskin. En hejare med 200 kg massa fick falla fritt 50 cm. Neddrivningen avbröts då pålspetsen nått en förutbestämd nivå och en provbelastning utfördes. Sammanlagt gjordes 10 provtryckningar varvid pålens längd i jord varierades mellan 5 och 25 m.

Försöken visade att mantelfriktionen per ytenhet under ett visst gränsdjup ej ökade med avståndet från markytan utan var nära konstant. Detta gränsdjup var för den undersökta pålen mindre än 5 m. Mantelfriktionen för påldelar på större djup var ca 1 Mp/m^2 . Pålspetsens bärförmåga ökade med spetsens djup p.s.s. som spetsmotståndet vid en trycksondering på försöksplatsen men utgjorde i medeltal endast ca 40 % av det senare.

Inom det undersökta intervallet (5 - 25 m) varierar pålens bärförmåga rätlinjigt med pålens längd i jord.

Kreügers pålformel eller andra pålformler av denna typ beskriver ej på ett riktigt sätt variationerna i pålens bärförmåga i de olika försöken.

Efter den sista provtryckningen, försök 10, då pålens längd i jord var 25 m utfördes ett dragprov utan mellankommande nedslagning av pålen. Den last som pålen kunde ta vid dragning utgjorde endast hälften av den last som vid försök 10 tagits i friktion längs pålens mantelyta.

SUMMARY

Tests with a model pile to study the mode of operation of a friction pile in cohesionless material have been performed at Albysjön about 20 km south west of Stockholm. The soil is mainly loose to medium dense sand. The pile was made of steel pipe segments with an 89 mm outer diameter and welded at the joints. Strain gages were glued to the inside of some segments so that the force in the pile could be measured at these levels. Thus the magnitude of the point load and the distribution of the friction on the pile shaft could be estimated.

The driving was done by a pneumatic model pile driver. A 200 kg hammer was dropped from 50 cm height. The driving was interrupted when the pile point had reached a predetermined depth and a load test was performed. Ten compression load tests with the length of the pile in soil varying from 5 to 25 m were executed.

The tests showed that the unit friction on the pile shaft did not increase with depth below a certain limit. The unit friction on parts of the pile shaft below that depth was almost konstant and approximately 1 Mp/m^2 . The limit depth for this pile was less than 5 m.

The bearing capacity of the pile point increased with depth in a similar way as the point resistance of the static Dutch cone penetrometer but the former was on the average only 40 % of the latter. The bearing capacity of the pile increased linerally with the length of pile in soil in the investigated interval, 5 to 25 m.

Hiley's and other similar pile driving formulas do not correctly describe the variation of the pile bearing capacity in these tests.

After the last compression test (No 10) when the pile point was 25 m below the surface, the pile was loaded in tension to failure. There was no intervening driving. The failure load of the pile in tension was only half the load that was carried by friction on the shaft in test No 10.

FÖRORD

I samarbete med IVA:s Pålkommision och Statens geotekniska institut (SGI) har försök med en modellpåle genomförts under sommaren 1970. Arbetet ingår i verksamheten för Pålkommisionens friktionspålgrupp, vilken finansieras genom bidrag från enskilda medlemsföretag, statliga verk och myndigheter samt genom anslag från Statens råd för byggnadsforskning. Handledare för detta examensarbete vid institutionen för geoteknik, KTH, har varit civilingenjör Jan Wennerstrand. Civilingenjör Ulf Bergdahl har bistått med råd vid planering och redovisning av försöken. Limningen av trådtöjningsgivare i påldelarna utfördes med hjälp av ingenjör Kent Allard, SGI.

Vi vill uttrycka vår tacksamhet till alla som bidragit till denna undersöknings genomförande och vill därvid särskilt nämna Skånska Cementgjuteriet som bl a upplät en del av sin arbetsplats vid Albysjön för försöken samt Borros AB, som utfört trycksondering vid försöksplatsen.

Stockholm i januari 1971

Åke Nilsson

Torbjörn Winqvist

1 INLEDNING

Kunskaperna om friktionspålars verkningsätt är relativt begränsade. Bärförmågan enligt provbelastningar har i flera fall visat dålig överensstämmelse med beräknad bärförmåga. Vid dimensionering av en friktionspåle är man därför i allmänhet hänvisad till provbelastningsförsök. För att bättre kunna beräkna friktionspålars bärförmåga samt med större säkerhet kunna extrapolera resultaten från provbelastningar, är det önskvärt att närmare känna dessa pålars verkningsätt.

1.1 Friktionspålars bärförmåga

Lasten på en friktionspåle uppbärs dels av pålens spetsmotstånd och dels av de friktionskrafter, som verkar mellan pålens mantelyta och omgivande jord.

Mantelfriktion

Friktionskraften beräknas i allmänhet som produkten av en jordtryckskoefficient (K), en friktionskoefficient ($\tan \phi$) och effektiva vertikalspänningen i jorden före slagningen (σ_z). Vissa forskare anger dock att man ej kan räkna med så stor tillväxt i friktionskraften, utan att man från en viss nivå bör räkna med en konstant friktionskraft. Aas (1966) ger följande två förklaringar till denna minskade tillväxt:

1. Massförträngning vid spetsen medför en utåt- och nedåtriktad rörelse av sandmassorna som fortplantar sig ett stycke upp längs pålen. Detta kan medföra en successiv avlastning av sanden strax ovan spetsnivån och skapar således ett löst skikt med reducerade spänningar. De större horisontalspänningarna i den utanförhängande sanden tages då upp genom valvbildning runt pålen, "arching".
2. Sanden närmast pålen vill på grund av vibrationer under slagningen sätta sig, vilket resulterar i att sanden runt pålen hänger upp sig på de utanförhängande massorna.

Vesić (1967) har funnit att mantelfriktionen ökar rätlinjigt till ett djup av 10 ggr pålens diameter och vid djup större än 20 ggr pålens diameter är mantelfriktionen nära konstant och oberoende av djupet. Liknande resultat har även erhållits av Tcheng (1965) och Hjeldnes (1968).

Enligt ovanstående författare synes det s k gränsdjupet, under vilket mantelfriktionen är kvasikonstant, öka med ökad mantelfriktion per ytenhet (specifik mantelfriktion). De faktorer som har störst inverkan på mantelfriktionen hos en slagen påle är: Sandens lagringstäthet, pålens volym per längdenhet, pålytans råhet samt pålens form (t ex konicitet).

Spetsmotstånd

Spetsmotståndet beräknas vanligen som produkten av bärighetsfaktorn (N_q) och effektiva vertikalspänningen vid spetsens nivå före slagningen. Flera källor anger att även spetsmotståndet på liknande sätt som mantelfriktionen från ett visst djup är beroende av vertikalspänningen i jorden före slagningen. Aas (1966) ger följande förklaring till spetsmotståndets variation: Då spetsen står på små djup är spänningarna, som kan framkalla ett passivt brott runt pålen, små i förhållande till de spänningar, som erfordras för att ge nödvändig komprimering av sanden. Horisontala spänningarna, vilka bestämmer spetsmotståndet, ökar därför i början linjärt med djupet och har samma storlek som det passiva jordtrycket. På stora djup sker massförträngningen i allt högre grad genom volymändringar hos sanden och man får under ett visst djup ett lokalt brott runt spetsen. Under gränsdjupet synes spetsmotståndet främst bero av sandens kompressionsenskaper.

Försök av Vesić (1967) visar ett konstant spetsmotstånd under ett djup av ca 20 ggr pålens diameter.

2

UNDERSÖKNINGENS SYFTE

Avsikten med denna undersökning var att studera hur bärförmågan för en friktionspåle varierar med dess längd i sanden samt att mäta hur kraften fördelar sig i pålen. Genom att mäta kraften i olika snitt hos pålen kunde såväl spetsmotståndet som mantelfriktionens fördelning längs pålen erhållas. Eftersom pålen provbelastades vid flera tillfällen med successivt ökande längd i jord erhöles en kontroll av mättekniken. Pålens verkningssätt enligt normalkraftsmätningarna ger en variation av pålens bärförmåga med dess längd i jord. Denna variation måste överensstämma med variationen i pålens brottlast vid de olika provbelastningarna. Vidare skulle spetsmotståndets variation med djupet studeras. Slutligen avsåg man studera slagningsformlernas tillämpbarhet för sådana friktionspålar vilkas mantelmotstånd utgör en stor del av deras bärförmåga.

3

FÖRSÖKSPLATSENS GRUNDFÖRHÅLLANDEN

Försöken utfördes vid Albysjön ca 20 km SV om Stockholm i närheten av östra landfästet av den tunnelbanebro som där är under byggnad. (FIGUR 1). Grundförhållandena är kända från grundundersökningar och omfattande provpålningar som utförts för bron.

Jorden består av friktionsmaterial, huvudsakligen sand, till mer än 50 m djup. Sanden är lös till medelfast och fastheten ökar enligt sonderingsresultaten **något** med djupet. (FIGUR 5). Med en ny trycksond har ingenjörsfirman BORROS AB utfört en trycksondering vid försöksplatsen. Spetsmotståndet mättes därvid direkt med trådtöjningsgivare monterade i sondspetsen. Resultatet visas i FIGUR 6.

Försöksplatsen ligger ca 50 m från Albysjöns strand. På våren står vattenytan i sjön i nivå med markytan på försöksplatsen. I juli 1970 då försöken utfördes stod vattenytan i sjön 0,65 m under markytan intill pålen. Öster om försöksplatsen höjer sig markytan med en relativt brant slänt.

4 FÖRSÖKSUTRUSTNING

4.1 Pålens utformning

Pålen utgjordes av stålrör SIS 1233-05 med ytterdiameter 89 mm och godstjocklek 6,0 mm. Pålen sammansattes efterhand av dels 5 st 650 mm långa mätdelar och dels 15 st 1500 mm långa skarvdelar. Rördelarna sammanfogades genom svetsning. Som skydd för ledningarna, vilka drogs upp i rören, användes ett dubbelt mässingsrör med asbetsisolering. Vid skarvning utnyttjades hejare och dyna för att fixera den nya skarvdelen under svetsningen. Svetsarna efterbehandlades ej med slipning eller dylikt. Pålens slutliga längd var 26 m. Spetsen var svarvad av ett massivt stålämne och hade 90° spetsvinkel. (FIGUR 2).

4.2 Mätutrustning

De fem mätdelarna var som nämnts vardera 650 mm långa. Fyra trådtöjningsgivare klistrades ortogonalt på rörets insida ca 250 mm från dess överände. Två aktiva givare klistrades mittemot varandra parallellt med rörets längdaxel. Härigenom utjämnas inverkan av snedbelastning vid mätning i fullbrygga. De två passiva givarna klistrades vinkelrätt mot rörets längdaxel och tjänstgjorde som referensgivare. Genom de passiva givarnas placering erhöles korrektion för längdändringar av temperaturvariationer samt något ökad känslighet för mätdelen. Dock påverkades givarna av det yttre trycket mot röret, vilket gav en nollpunktsförskjutning jämfört med kalibreringen.

Klistringen av givarna utfördes på följande sätt. På en bärtape av mätdelens längd fästes trådtöjningsgivare och ledning. Efter hoplödning av dessa isolerades skarven med plastisk isolermassa och isolertape. På ledningen placerades tape med klister på båda sidor. Givaren beströks med lim, typ Hottinger X 60. Därefter placerades hela satsen med hjälp av bärtapen på rätt plats i rördelen som var betad samt rengjord med trikloretylen. När de fyra givarna var färdigklistrade i rördelen beströks alltsammans med Cementex Kontaktlim som skydd mot fukt. Trådtöjningsgivaren var av typ 10/120 LP31 från Hottinger Baldwin Messtechnik.

Mätdelarna kalibrerades i en tryckpress mot en tryckdosa av fabrikat Bofors, typ LSK 2 (20 Mp) som avlästes med hjälp av en givarindikator (Bofors BKI-1). Vid kalibreringen blev utslagen stabila efter två till fyra lastcykler med belastningar från 0 till 20 Mp. Trådtöjningsgivarna kopplades i fullbrygga. Bryggans obalans vid belastning av pålen mättes med en kompensator (Manueller Kompensator typ Mk, Hottinger Baldwin Messtechnik, Darmstadt). Mät noggrannheten för kompensatorn är 1 micro-strain, vilket i detta fall motsvarade en belastning på mätdelen med ca 10 kp.

4.3 Slagningsutrustning

Pålen slogs ned med en modellpålmaskin, som utvecklats på SGI med anslag från Statens råd för byggnadsforskning. (FIGUR 4). Hejaren lyfts av en tryckluftscylander via en wire, som är fäst vid hejaren. Fallhöjden hålls konstant genom att man kan ge kolven i tryckluftscylindern en viss slaglängd. Då hejaren släpps, faller den i det närmaste fritt. En hejare vägande 200 kg användes och fallhöjden hölls vid 50 cm. På rörpålen sattes en dyna som styr i påmaskingejden. Dynan är av stål och innehåller gummimellanlägg, som ger viss fjädring.

4.4 Mothåll och belastningsutrustning

Mothållet bestod av fyra stycken dragpålar nedslagna så att de bildade en kvadrat med 4,0 m sida. (FIGUR 1). Dragpålarna var nedslagna ca 16 m och utgjordes av kvadratiske lådprofiler med 100 mm sida. Mätbalken fästes vid äldre provpålar som var nedslagna till ca 15 m djup. De var av samma utförande som dragpålarna och nedslagna mitt på sidorna av den kvadrat som omskrev dessa. Mothållskraften överfördes av två sekundärbalkar INP 320 och en primärbalk HEB 300. Provpålen slogs mitt i den fyrkant som dragpålarna bildade (FIGUR 1). Avståndet mellan provpåle och mothållspåle var nära 30 gånger provpålens diameter (D) samt mellan provpåle och mätbalkspåle 22 D. De olika pålarna bedöms därför ej ha påverkat varandra.

Provpålen belastades med en domkraft, fabrikat Bahco, driven av en handpump. Den på pålhuvudet verkande kraften mättes med en hydraulisk tryckdosa. Nedsjunkningen mättes med två mätklockor, graderade i hundra delar mm. (FIGUR 3).

5 UTFÖRANDE

5.1 Slagning

Pålen slogs i 10 etapper. Efter varje nedslagningsetapp provbelastades pålen. Slagningen utfördes vanligen på eftermiddagarna och provbelastningen följande morgon. Pålen fick på detta sätt vanligen stå ca 16 timmar innan den provbelastades. Undantag är försök nr 1 samt 5 och 10, där pålen fick stå ytterligare 3 respektive 2 dygn. Cirka 1 dygn efter försök 10 dragprovades pålen utan mellankommande slagning. Pålspetsens djup vid de olika försöken framgår av FIGUR 7. Under slagningen noterades antal slag per 20 cm sjunkning (se FIGUR 8). Vid slutet av varje slagningsetapp mättes även pålens fjädring.

5.2 Provbelastning

Under första delen av provbelastningen påfördes lasten stegvis. Laststegen avpassades så att 7 - 8 laststeg erfordrades för att nå en sjunkning av ca 1 cm. Därefter vidtog konstant nedpressning med en avsedd sjunkningshastighet av 0,5 mm/min. Med den utrustning vi hade var vi hänvisade till att lasta på i korta steg så att lastökningen gick att läsa av på manometern. Nytt steg lastades på så snart sjunkningshastigheten understeg den eftersträfvade. Vid uppritningen har belastningen avsatts för den de-

formation vid vilken sjunkningshastigheten var 0,5 mm/min. Avlastning företogs i 3 - 4 steg. Som exempel på provbelastningsmetoden visas i FIGUR 9 lasten som funktion av tiden under försök 7. Vid försöken 8 - 10 gjordes knackningar på pålhuvudet med en slägga eller en hammare efter provbelastningen för att lösa ut inspänningskrafterna. Man kunde på detta sätt säkrare bestämma mätdelarnas nollpunkter. Vid försöken 6, 8 och 9 avlastades pålen under pågående tryckning för att rätta upp domkraften. Vid försök 7 gjordes även en avlastning för att försöka skilja på effekterna av snedbelastning och av en av- och pålastningscykel.

6 UTVÄRDERING AV MÄTRESULTAT

6.1 Brottlaster

Last- deformationskurvor för de tio provtryckningarna visas i FIGURERNA 10 - 15 och en sammanställning därav i FIGUR 16. Formen på kurvorna förändras med pålens längd i jord på så sätt att brottdeformationen ökar med ökad pållängd.

Brottlasten har bestämts med tre olika brottkriterier:

1. P_B^{90} Den last för vilken deformationen är dubbelt så stor som för 90 % av samma last. (Anvisningar för provpålning och enkel provbelastning, 1970).
2. P_B^{80} Den last för vilken deformationen är dubbelt så stor som för 80 % av samma last. (Hjeldnes, 1964).
3. $P_B^{\text{rät}}$ Den last som i last - deformationsdiagrammet motsvarar den punkt där last - deformationskurvan övergår till en rät linje. (Vesić, 1967).

Tabell 1. Brottlaster (Mp) enligt olika kriterier.

Försök nr	P_B^{90}	P_B^{80}	$P_B^{\text{rät}}$
1	1,9	1,3	1,9
2	1,5	1,3	1,5
3	2,6	1,6	2,6
4	4,2	2,0	4,2
5	4,6	3,0	4,7
6	5,6	3,4	5,6
7	5,5	2,8	5,1
8	> 7,3	4,0	6,7
9	> 9,5	5,0	8,0
10	> 11,0	7,5	10,2

Kriterium 1 ger i vårt fall vid de första sju försöken värden som i last - deformationskurvan ligger i slutet av dess krökta del eller i början av den efterföljande rätlinjiga delen. Vid de tre sista försöken inträffar P_B^{90} vid mycket stora deforma-

tioner, större än 80 mm. Så långt har dock provtryckningarna ej drivits.

Kriterium 2 ger brottlaster (P_B^{80}) i början på den krökta delen av last - deformationskurvan och således låga värden.

Kriterium 3 har bedömts vara det mest lämpliga p g a kurvornas varierande form och har därför använts i den fortsatta behandlingen. Anledningen härtill är främst att brottlasterna enligt detta kriterium är bäst jämförbara. Bestämningen av brottlasterna skulle ha underlättats om pålen vid försöken 6 - 10 tryckts ytterligare några cm.

En jämförelse mellan de på olika sätt bestämda brottlasterna visar att P_B^{90} är ungefär lika med $P_B^{\text{rät}}$ vid försök 1 - 7 och P_B^{80} är ungefär $2/3$ av P_B^{90} respektive $P_B^{\text{rät}}$.

Brottlasten $P_B^{\text{rät}}$ har inritats på sammanställningen av last - deformationsdiagrammen (FIGUR 16). Samtliga brottlaster har dock inritats i FIGURERNA 10 - 15.

6.2 Mätningarna med trådtöjningsgivare

Det visade sig att mätdelarna ibland fick nollpunktsförskjutningar av betydande storlek mellan de olika försöken. Dessa förskjutningar medförde att det avlästa nollvärdet vid kalibreringen ej kunde användas för att bestämma initialspänningen i pålen före en provbelastning. Nollavläsningen, dvs det utslag en mätdel skulle ha visat om mantelfriktionen varit noll längs pålen bestämdes därför på följande sätt. Ett diagram med mätdelens utslag som funktion av lasten på pålhuvudet uppritades. Sambandet är approximativt rätlinjigt utom vid låga laster. Nollavläsningen erhöles genom extrapolering av den räta linjen ned till lasten noll. Vid testnivåerna 8, 9 och 10 gjordes försök att få bort kvarvarande spänningar efter provbelastningen genom att knacka på pålhuvudet med en slägga eller en hammare. Efter knackningen visade mätdelarna utslag som mycket nära överensstämmer med de extrapolerade nollpunkterna. Ett exempel från försök 9 visas i FIGUR 17.

När försöksprogrammet genomförts, drogs pålen upp och mätdelarna kalibrerades åter. För- och efterkalibreringen överensstämde helt för mätdelarna 2 och 4. Mätdel 3 visade vid efterkalibreringen 3,8 % lägre värde. Mätdel 1 visade en stor avvikelse. Denna avvikelse är inte förvånande, då man kunde iaktta en väsentlig förändring i funktionen för mätdel 1 vid försök 10. Vid utvärderingen av försök 10 har därför värden från mätdel 1 ej använts. Mätdel 5 slutligen upphörde av ej bestämd anledning att fungera efter försök 10.

7 REDOVISNING OCH DISKUSSION AV FÖRSÖKSRESULTAT

7.1 Lastfördelning längs pålen

Kraftens fördelning längs pålen visas i FIGURERNA 18 - 24, 26 och 28. Fördelningen vid brottlasten (den yttersta linjen) samt vid några av laststegen har ritats in. När lasten är så hög att

pålen inte längre påverkas av initialspänningarna avtar lasten i det närmaste rätlinjigt med djupet. Vid försöken 6 och 8 visar mätningarna en större lastupptagning på nedre delen av pålen.

Skillnaden mellan normalkraften i olika mätsnitt ger ett medelvärde på mantelfriktionen mellan snitten, som visas i FIGURERNA 18 - 25, 27 och 29. Med hjälp av dessa medelvärden har försök gjorts att lägga in mantelfriktionens fördelning längs pålen, den streckade linjen i diagrammen. Lastfördelningen visas för brottlasten. Diagrammen visar att mantelfriktionen i samtliga försök växer snabbt på den översta påldelen för att därefter ha ett tämligen konstant värde (jfr FIGUR 35). Variationen på den konstanta delen är liten. Den specifika mantelfriktionen ligger mellan 0,75 och 1,10 Mp/m². Mantelfriktionens tillväxt när den pålagda kraften ökas upp till brottlasten visas i FIGUR 30. Man ser att tillväxten sker likartat längs pålens hela längd för denna styva påle.

7.2 Spetsmotstånd

Spetslasten kan bestämmas ur diagrammen över normalkraftens fördelning längs pålen, FIGURERNA 18 - 24 och 26, genom att kurvorna extrapoleras från nivån för mätbelastning till spetsnivån (60 cm). Vid provbelastningen avlästes pålhuvudets sjunkning. För att erhålla spetsens sjunkning har pålens elastiska hoptryckning beräknats och dragits ifrån pålhuvudets sjunkning.

Spetslasten som funktion av spetsens sjunkning visas i FIGURERNA 31 - 33. Last - deformationsdiagrammen för spetsen visar att spetslasten uppnår ett högt värde redan vid ringa sjunkning och sedan ökar med en nästan konstant lutning. Vid pålens brottlast ($P_B^{\text{rät}}$) befinner man sig på linjen med konstant lutning.

En jämförelse med trycksondens spetsmotstånd (kp/cm²) visar att pålens spetsmotstånd (kp/cm²) endast utgör ca 40 % av det förra, TABELL 2 och FIGUR 34. Enligt tidigare erfarenheter av bl a Hui-zinga (1951) och Menzenback (1961) skall pålens och trycksondens spetsmotstånd visa god överensstämmelse i lös sand. Vid dessa undersökningar bestämdes dock spetslasten vanligen som skillnaden mellan pålens brottlast vid tryck- och dragförsök. Man antog således att pålens mantelbärförmåga är densamma vid tryck- och dragförsök. Försöken 10 och 11 visar att detta ej gäller för denna 25 m långa stålrörspåle. Liknande resultat har tidigare erhållits av bl a Hjeldnes (1968) (modellförsök) och Brinch Hansen (1968) (teoretiskt).

Tabell 2. Jämförelse mellan pålens och trycksondens spetsmotstånd.

Försök nr	Spetsmotstånd vid pålens brottlast kp/cm ²	Spetsmotstånd trycksond kp/cm ²
1	13	38
2	9	35
3	16	36
4	27	56
5	18	57
6	31	75
7	20	60
8	39	95
9	51	75
10	57	-

Pålens spetsmotstånd ökar med spetsens djup under markytan och kan i detta fall tämligen väl beräknas med antagandet $N_g = 20$ såsom visas med den streckade linjen i FIGUR 34. Denna överensstämmelse torde bero på att sanden på denna plats är nära normalkonsoliderad och således dess fasthet ökar med vikten av överliggande jord.

7.3 Sammanställning av provbelastningarna

I FIGUR 35 har pålens brottlast avsatts som funktion av pålens längd i jord. Den del av pålens bärförmåga som härrör från mantelfriktion erhålls genom att från pålens brottlast subtrahera den ur trådtöjningsmätningarna utvärderade spetslasten. Såsom framgår av diagrammet växer mantelfriktionens andel i bärförmågan rätlinjigt med pålens längd i jorden under ett visst djup. Det innebär att under detta djup har mantelfriktionen ett konstant värde per ytenhet, vilket är helt i överensstämmelse med de fördelningar av mantelfriktionen som utvärderats ur trådtöjningsgivarmätningarna. Lutningen på den streckade linje som inlagts motsvarar ett värde på mantelfriktionen av 1,0 Mp/m². Den streck-prickade linjen i diagrammet motsvarar en tillväxt i pålens bärförmåga i enlighet med den s k friktionsformeln, vilken förutsätter en triangulär fördelning av mantelmotståndet. Försöken visar således entydigt att mantelfriktionen per ytenhet ej växer rätlinjigt med pålens längd mer än till ett visst djup. Under detta syns mantelfriktionen vara nära konstant.

Mantelfriktionen tycks öka med tiden efter slagningen, åtminstone under de första dygnen. Vid försöken 1,5 och 10, där pålarna stod ca 3 dygn mellan slagning och provbelastning, erhöles större mantelbärförmåga än vid de övriga försöken för vilka motsvarande tidsförskjutning var mindre än 1 dygn.

Försöksresultaten medger ej någon bestämning av det gränsdjup ned till vilket mantel- respektive spetsmotstånd påverkas av närheten till markytan. Gränsdjupet för försökspålen är dock mindre än 5 m. Detta bör beaktas vid dimensionering av pålar med liten volym såsom räls- eller stålbalkspålar.

7.4 Dragförsök

Ett dygn efter försök 10 utfördes ett dragförsök på pålen utan mellankommande nedslagning. Maximal dragkraft uppnåddes efter relativt liten deformation (FIGUR 36 och 37). Brottlasten vid dragprovet blev 3,6 Mp, vilket utgör ca 1/3 av brottlasten vid tryckförsöket på samma nivå. Liknande resultat har även erhållits av Hjeldnes (1968).

Pålen kunde vid dragförsöket endast ta hälften så stor last i friktion längs dess mantelyta som vid tryckförsöket. Detta torde till en del kunna förklaras av de ändringar i spänningstillståndet i den omkringliggande jorden som erhålls av påförd mantelfriktion såsom påtalas av Brinch Hansen (1968).

En bidragande orsak till den låga mantelfriktionen vid dragförsöket är att pålen tidigare varit belastad till nära brott i ett tryckförsök. Denna effekt har visats av Mazurkiewicz (1968).

7.5 Slagningsformler

Pålens statiska brottlast samt pålhuvudets sjunkning och fjädring vid slagningen har bestämts. Därigenom erhöles en möjlighet att studera tillämpbarheten av vanligen använda slagningsformler. Brobyggnadsanvisningar (1968) innehåller Kreügers pålformel:

$$P_{\text{brott}} = k \frac{Q_n + 1/4 Q_p}{Q_n + Q_p} \cdot \frac{Q_n \cdot h}{e + \frac{c}{2}}$$

En något modifierad form av samma formel återfinns i SBN - S 23:6 (1968)

$$P_{\text{brott}} = 0,8 \ k \left(1 - 0,1 \frac{Q_p}{Q_n} \right) \cdot \frac{Q_n \cdot h}{e + \frac{c}{2}}$$

P_{brott} = pålens brottlast

Q_n = hejarens massa

Q_p = pålens massa (inkl dyna och ev knekt)

h = hejarens fallhöjd

e = kvarstående sjunkning per slag

c = jordens, pålens och eventuell knekts fjädring

k = korrektionsfaktor för fallhöjden

Den sista faktorn i formlerna är huvudfaktorn och de övriga kan betecknas som korrektionsfaktorer för bl a förhållandet mellan pålens och hejarens massor. Undersökningar av Sörensen & Hansen (1957) och Olson & Flaate (1967) visar att den enkla danska slagformeln

$$P_{\text{brott}} = \eta \cdot \frac{Q_h \cdot h}{e + \frac{c}{2}}$$

är lika användbar.

Vid de här redovisade försöken hölls hejarens massa och fallhöjd konstanta under hela slagningen (200 kg respektive 50 cm) P_{brott} , e , och c varierade med pålens längd i jord. I några fall var sjunkningen per slag större vid den fortsatta slagningen efter ett försök än den var vid fjädringsmätningen före provtryckningen (Tabell 3).

Tabell 3 Slagningsdata

Försök nr	Längd m	Fjädring c (mm)	Sjunkning (mm)		$\eta = P_B / \frac{Q_h \cdot h}{e + c/2}$	$\eta' = P_B / \frac{Q_h \cdot h}{e}$
			före e_1	efter e_2		$e = e_1$ $e = e_2$
1	5,90	(2,0) ¹	15	- 18	0,32 - 0,38	0,31 - 0,36
2	7,40	(2,0) ¹		13	0,24	0,23
3	9,55	2,0	6,3	7,4	0,18	0,16 0,19
4	12,55	2,0	5,0	6,5	0,26	0,21 0,28
5	14,80	2,0	4,5	4,8	0,27	0,22 0,24
6	16,10	2,4	4,1	5,1	0,29	0,23 0,28
7	17,60	2,4	3,5	4,3	0,26	0,19 0,24
8	19,75	3,0	3,3	3,8	0,35	0,24 0,27
9	22,75	4,2	2,4	2,7	0,41	0,22 0,25
10	25,75	4,8	2,2	-	0,52	0,25 -

1 uppskattade

Krügers pålformel både den ursprungliga och den modifierade anger att η skall avta med ökad pållängd medan dessa försök visar att η växer med ökad pållängd (FIGUR 38). Om man i pålformelns nämnare ersätter $(e + \frac{c}{2})$ med e , erhålles för η' ett nära konstant

värde för dessa försök (FIGUR 38). En pålformel av denna typ

$$P_{\text{brott}} = \text{konst} \cdot \frac{Q_h \cdot h}{e}$$

har föreslagits av S Severinsson och återfinns i "Anvisningar för pålningsarbeten" (1968).

Slagningsformlerna i de svenska anvisningarna visade sig således icke tillämplbara på den undersökta påltypen och pålmaskinen.

7.6 Feluppskattningar

Fel av nollpunktsbestämningen för mätdelarna har uppskattats vara mindre än 50 - 75 kp, beroende på mätbel.

Övriga fel vad gäller mätanordningar och avläsningsfel är att betrakta som små, utom för avläsningen av tryckdosan. Avläsningsnoggrannheten för tryckdosan är ca 25 kp i intervallet 0 - 7 Mp och ca 50 kp vid laster större än 7 Mp.

Vid snabb deformationshastighet i slutet av en provbelastning erhöles svårigheter att hålla jämn last med den handdrivna domkraften. Detta medförde fel i kraftavläsningen på högst 50 kp. Sammanlagda felet i uppmätt kraft på grund härav uppskattas till maximalt ca 100 kp.

Fel i spetsmotståndet kan ha uppkommit vid extrapoleringen 60 cm från mätbel 1 till spetsen. Aas (1966) anger orsaker som kan leda till en minskad mantelfriktion närmast spetsen på pålen. Detta fel kan högst uppgå till 100 kp.

Sammanlagda totalfelet i spetsmotståndet uppskattas vara högst 200 - 250 kp vilket motsvarar 3 å 4 kp/cm².

8 FÖRSLAG TILL FORTSATTA UNDERSÖKNINGAR

Det vore önskvärt att denna försöksserie kunde följas av liknande försöksserier varvid man varierar mantelytans råhet och jordens sammansättning och fasthet. Dessa försök bör om möjligt utföras på platser där fullskalepålar provbelastas.

Med ledning av erfarenheterna från den utförda försöksserien föreslås följande modifieringar av försöksutförande och försöksutrustning.

- 1^o Vid varje provbelastning bör pålen belastas till brott för både axiell tryck- och axiell dragpåkning.
- 2^o Pålen bör tryckas så långt att man säkert kan bestämma dess brottl原因.
- 3^o De passiva givarna i mätdelarna bör ej klistras direkt på röret utan så att de ej påverkas av ringspänningarna i röret.
- 4^o Fuktisoleringen av trådtöjningsgivarna bör förbättras.
- 5^o Pålens spetslast bör mätas direkt i spetsen. En speciell nollpunktstabil mätspets bör tillverkas. Den bör utformas så att den tål en viss överbelastning i samband med slagningen.

LITTERATURREFERENSER

Aas, G. (1966) Baereevne av peler i friktionsjordarter.
(Norges geotekniske institutt), Oslo.

Anvisningar för provpålning och enkel provbelastning (1970)
/ Förslag, 2:a omarb. uppl. / (IVA, Pålkommissionen), Stockholm.

Anvisningar för pålningsarbeten (1968) (Statens Vägverk) P TB
108, Stockholm

Brinch Hansen, U. (1968) A theory for skin friction on piles
(Dansk geoteknisk institut) Bull. 25, København.

Brobyggnadsanvisningar (1968) (Statens Vägverk) P TB 103,
Stockholm.

Hjeldnes, E. (1964) Utførelse og interpretering av prøvebelast-
ning på peler (Institutt for geoteknikk og fundamenteringslaere,
NTH), Trondheim.

Hjeldnes, E. (1968) Forsøk med ramming og prøvebelastning av mo-
dellpeler i sand / Hovedrapport /. (Institutt for geoteknik og
fundamenteringslaere, NTH), Trondheim.

Huizinga, T.K. (1951) Application of results of deep penetration
tests to foundation piles. Building Research Congress. London
Div. 1, p.p. 173 - 179.

Mazurkiewicz, B.K. (1968) Skin friction on model piles in sand.
(Dansk geoteknisk institut), Bull. 25, København.

Menzenback, E. (1961) The determination of the permissible point
load of piles by means of static penetration tests. 5th Int.
Conf. Soil Mech. Found. Engng. Proc. Vol. II, p.p. 99 - 104.

Olson, R & Flaate, K (1967) Pile-driving formulas for friction
piles in sand. (ASCE) Journ. SMF Div. Vol. 93, No SM6 p. 279.

SN - S 23:6 (1968) Svensk Byggnorm - Supplement, Pålnormer
(Statens Planverk) Publikation nr 11, Stockholm.

Sørensen, T & Hansen, B. (1957) Pile driving formulae - An inves-
tigation based on dimensional considerations and a statistical
analysis. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Proc. Vol. II,
p.p. 61 - 65.

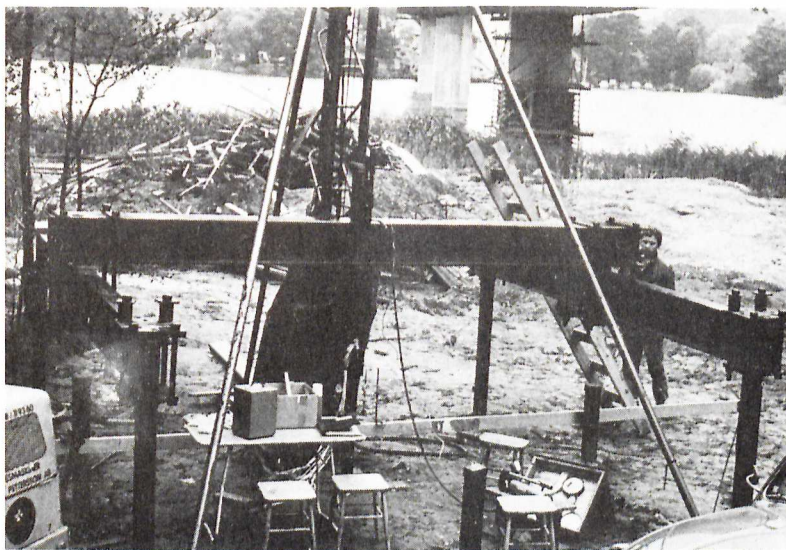
Tcheng, Y. (1965) Fondations profondes en milieu pulvérulent a
diverses compacités. Annales de l'institut technique du bati-
ment et des travaux publics. 19 (1966): 219 - 220. Série:
Sols et fondations (54). Paris.

Vesić, A. (1967) A study of bearing capacity of deep foundations.
Final report, project B - 189. (Georgia institut of technology),
Atlanta.

En friktionspåles verkningssätt studerades med en modellpåle av 89 mm stålrör. Pålen slogs med en tryckluftdriven modellpålmaskin. De olika påldelarna sammanfogades med svetsning. Kraftfördelningen i pålen bestämdes med hjälp av trådtöjningsgivare. Därigenom erhöles en uppfattning om spetslastens storlek och mantelfriktionens fördelning.

Elva provbelastningar utfördes varvid pålens längd i jord varierades mellan 5 och 25 m. Försöken visade att mantelfriktionen per ytenhet under ett visst gränsdjup ej ökade med avståndet från markytan utan var nära konstant. Detta gränsdjup var för den undersökta pålen mindre än 5 m. Mantelfriktionen för påldelar på större djup var ca 1 Mp/m^2 . Pålspetsens bärförmåga ökade med spetsens djup p.s.s. som spetsmotståndet vid en trycksondering på försöksplatsen men utgjorde i medeltal endast ca 40 % av det senare. Provpålens bärförmåga varierade rätlinjigt med dess längd i jord.

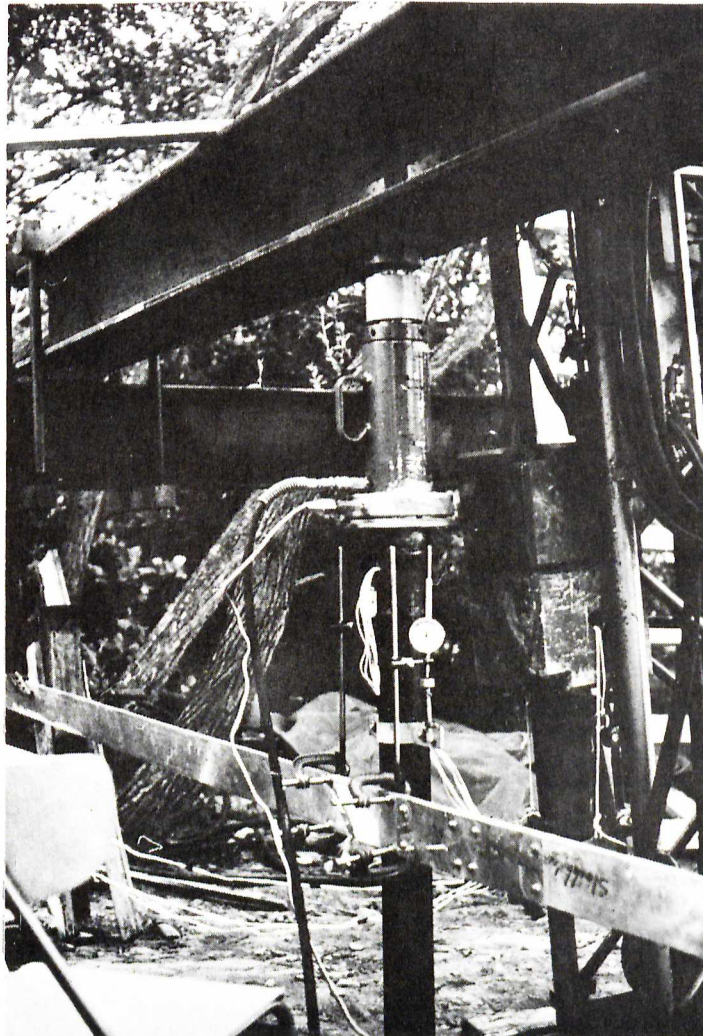
Vid en provdragning då pålens längd i jord var 25 m kunde pålen endast ta halva den last som vid den föregående provtryckningen överförts längs pålens mantelyta.



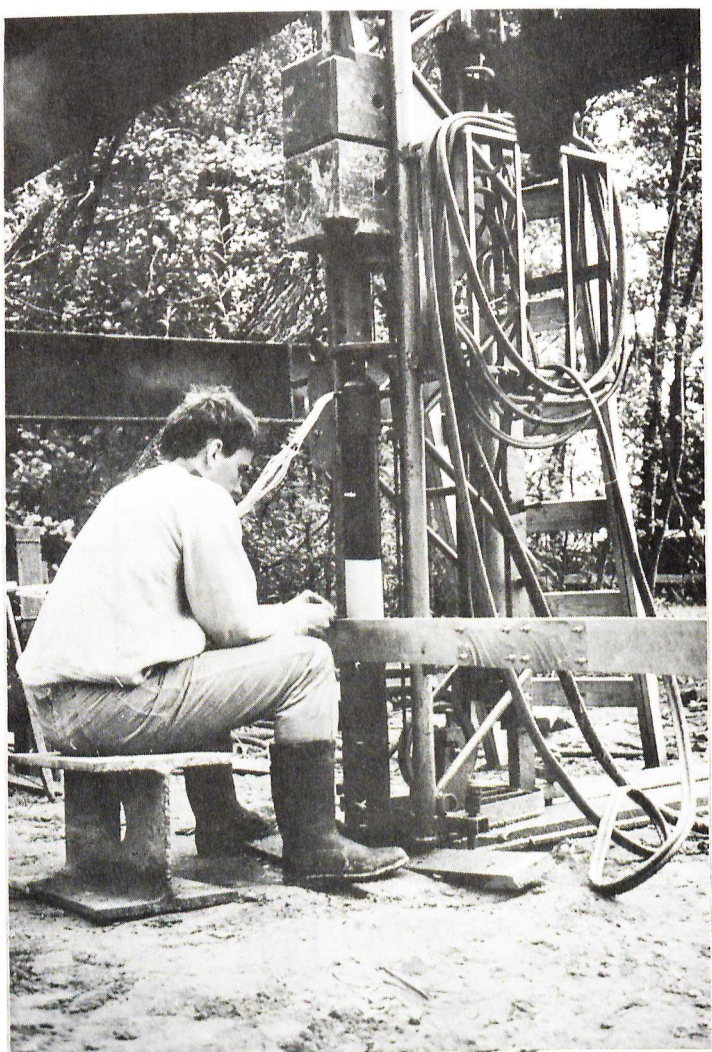
FIGUR 1. Översikt över provningsplatsen. 8 pålar från tidigare försök bildar en kvadrat med 4 m sida. Försökspålen slogs i kvadratens mitt. Hörnpålarna från det tidigare försöket, vilkas längd i jord var 16 m, utgjorde via balkkonstruktionen mothåll vid provbelastningarna. I bakgrunden den blivande T-banebron.



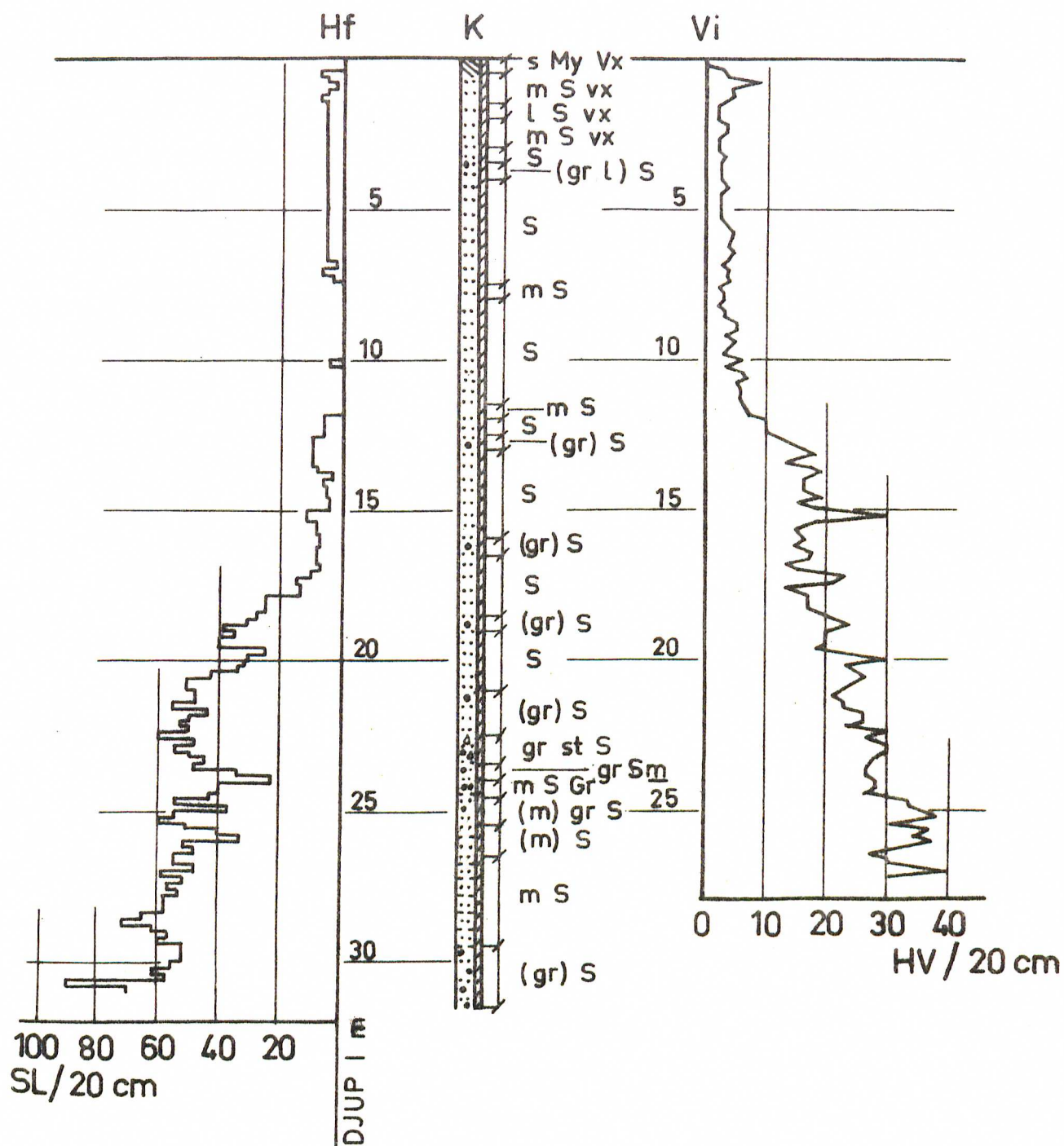
FIGUR 2. Utformning av pålspetsen. Påldiametern 89 mm. Spetsvinkeln 90° .



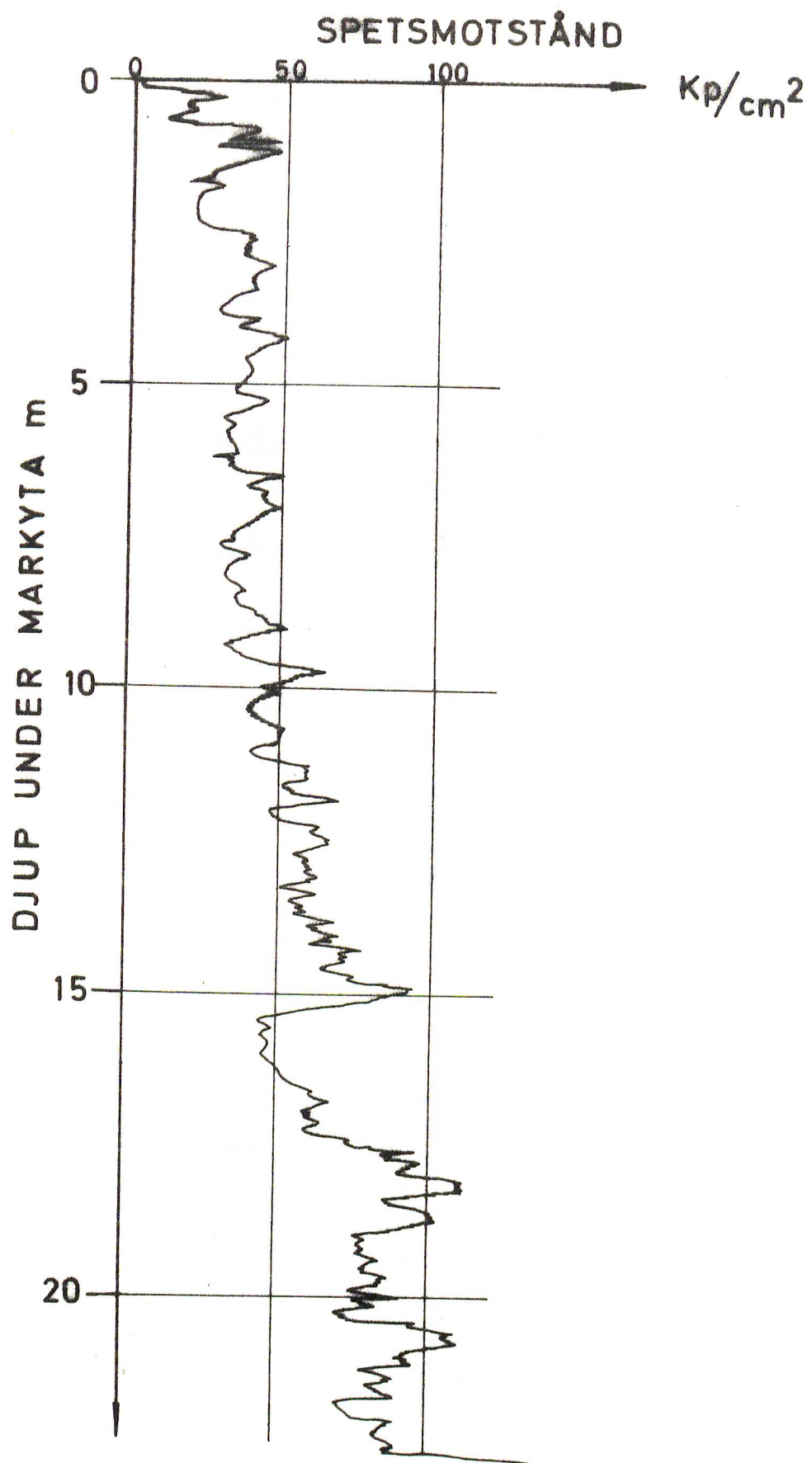
FIGUR 3. Uppställning för ett tryckförsök. Mellan pålhuvudet och domkraften har en tryckdosa placerats för att mäta påförd kraft. Nedsjunkningen mäts med två mätlockor monterade på mätbalken i förgrunden. Notera även hur ledningarna från trådtöjningsgivarna har letts ut genom en vertikal slits i pålhuvudet.



FIGUR 4. Mätning av pålens sjunkning och fjädring per slag. Genom att sakta föra en penna i horisontalled, stödd mot den fixa mätbalken, uppritas pålens rörelser på det på pålen fasttejpade papperet.

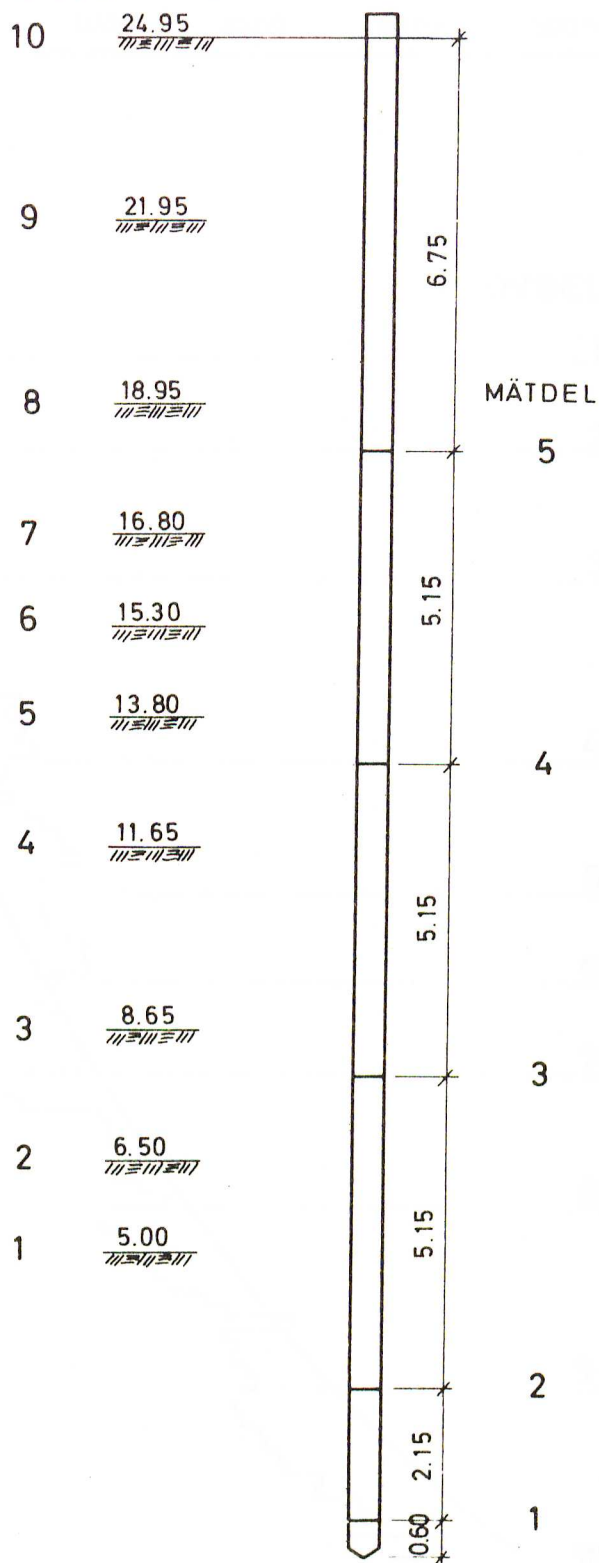


FIGUR 5. Grundundersökning vid försöksplatsen.

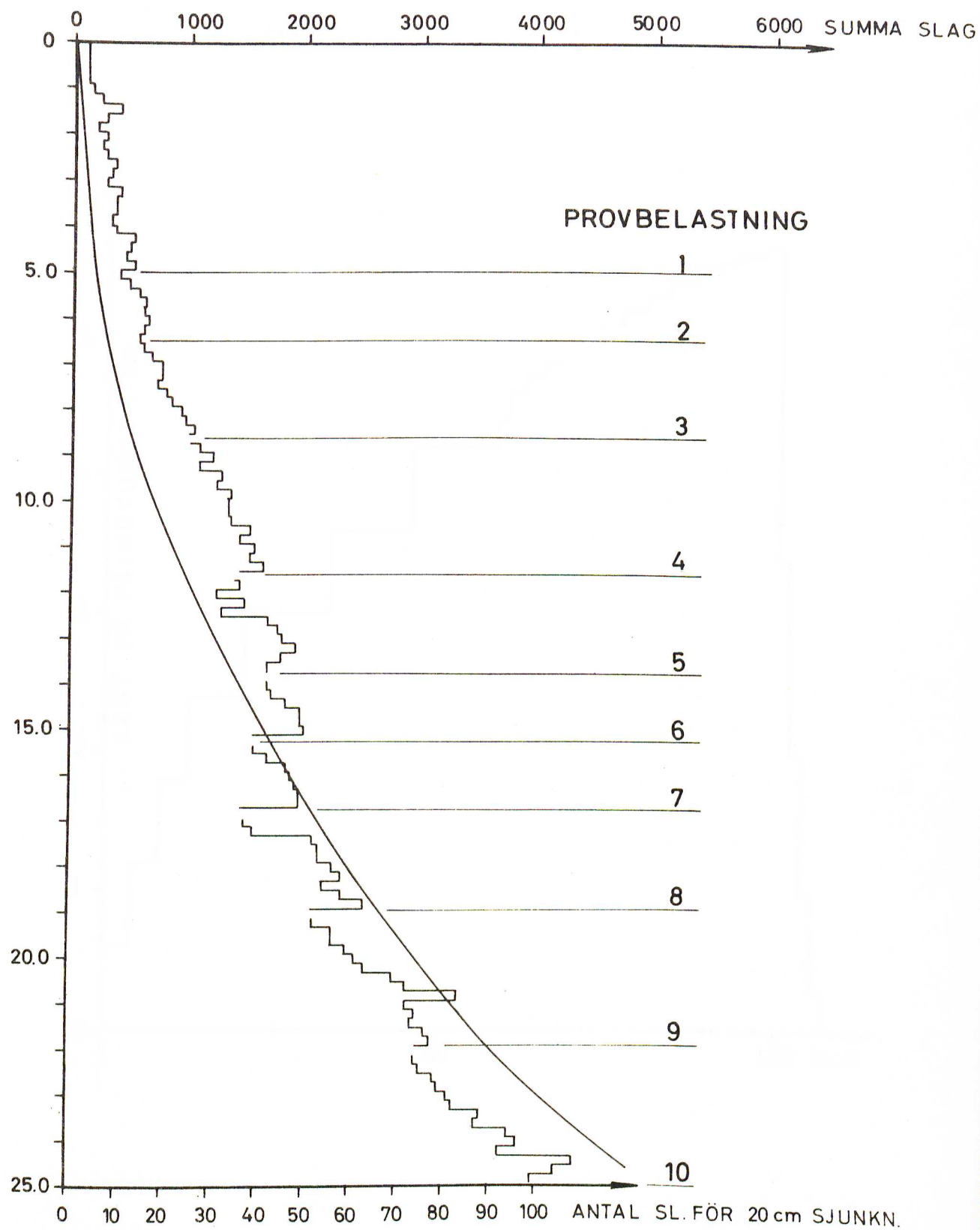


FIGUR 6. Resultat av trycksondering

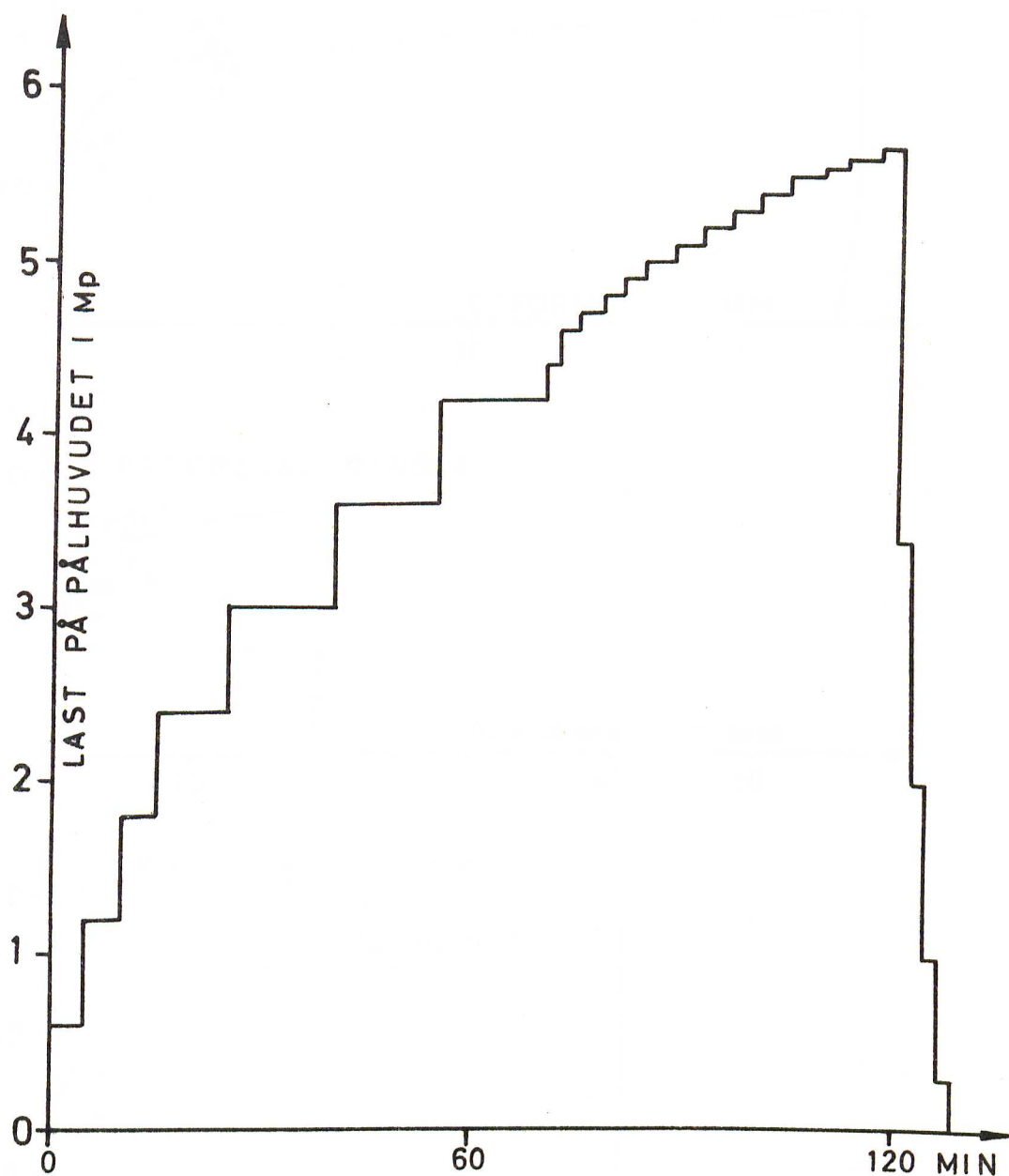
PÅLENS LÄNGD
PROVBEL. I JORD



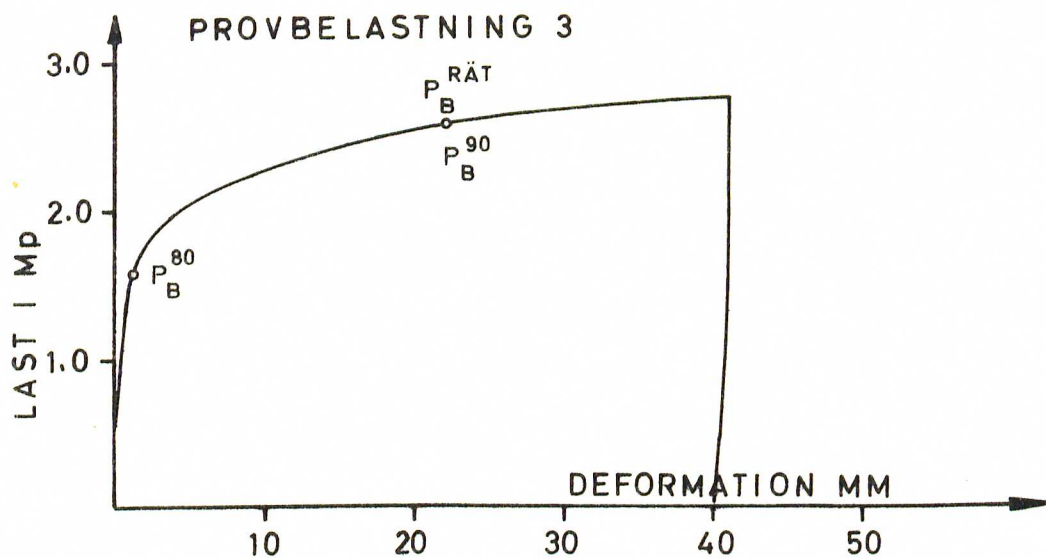
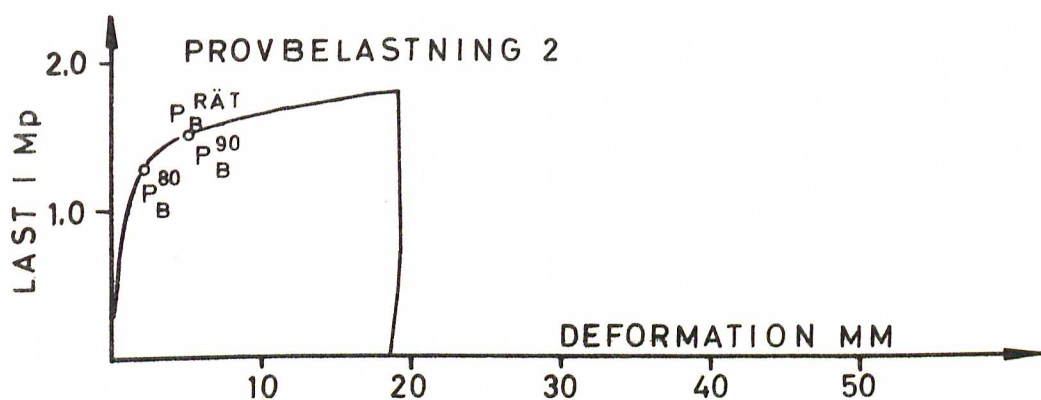
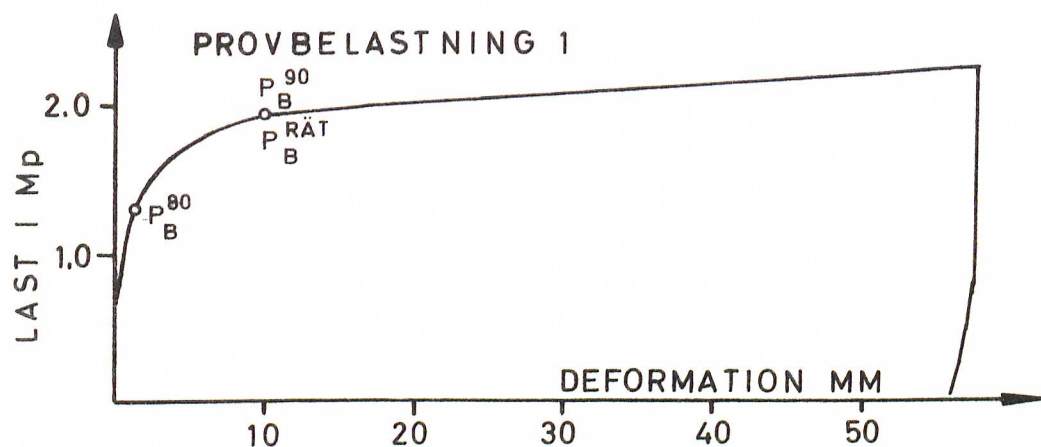
FIGUR 7. Pålens utformning. Pålens diameter är 89 mm. Den hade 5 mätställen och provbelastningar utfördes med 10 olika pållängder.



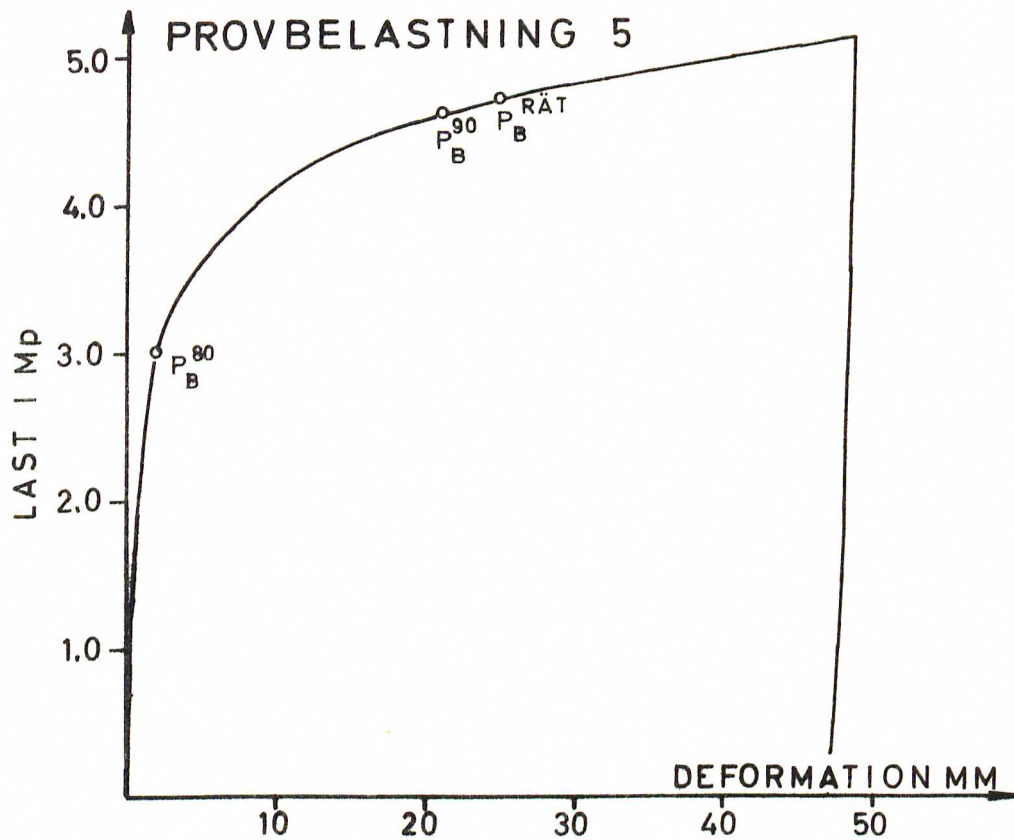
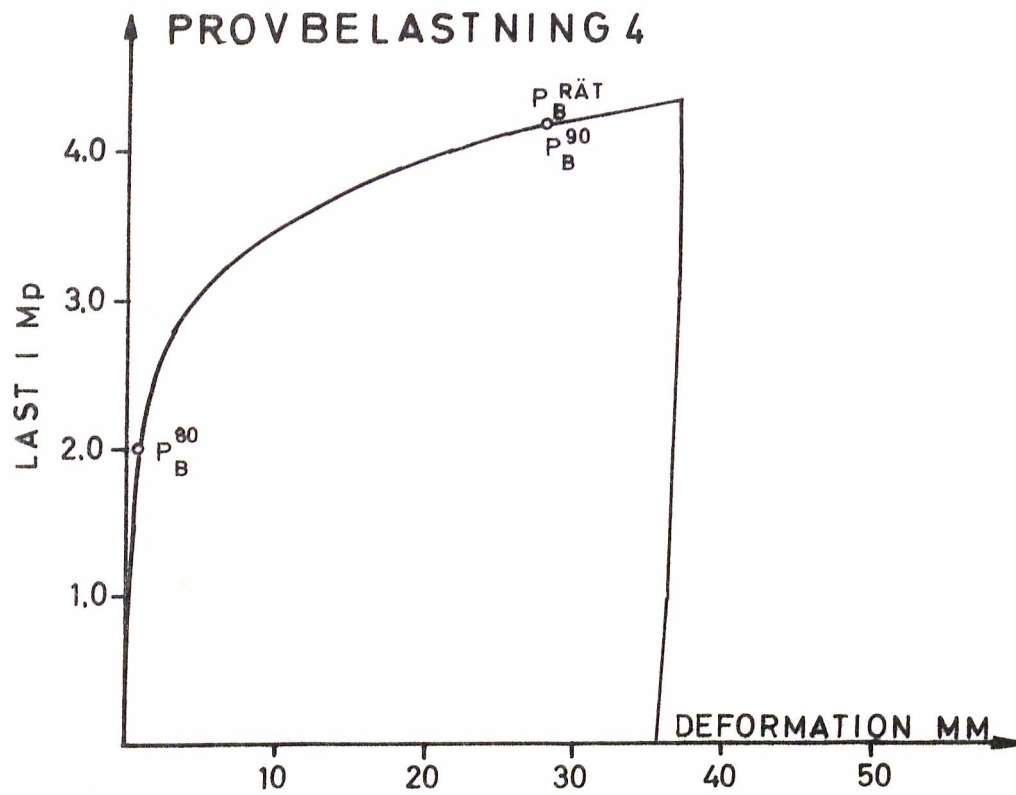
FIGUR 8. Pålens neddrivningsmotstånd.



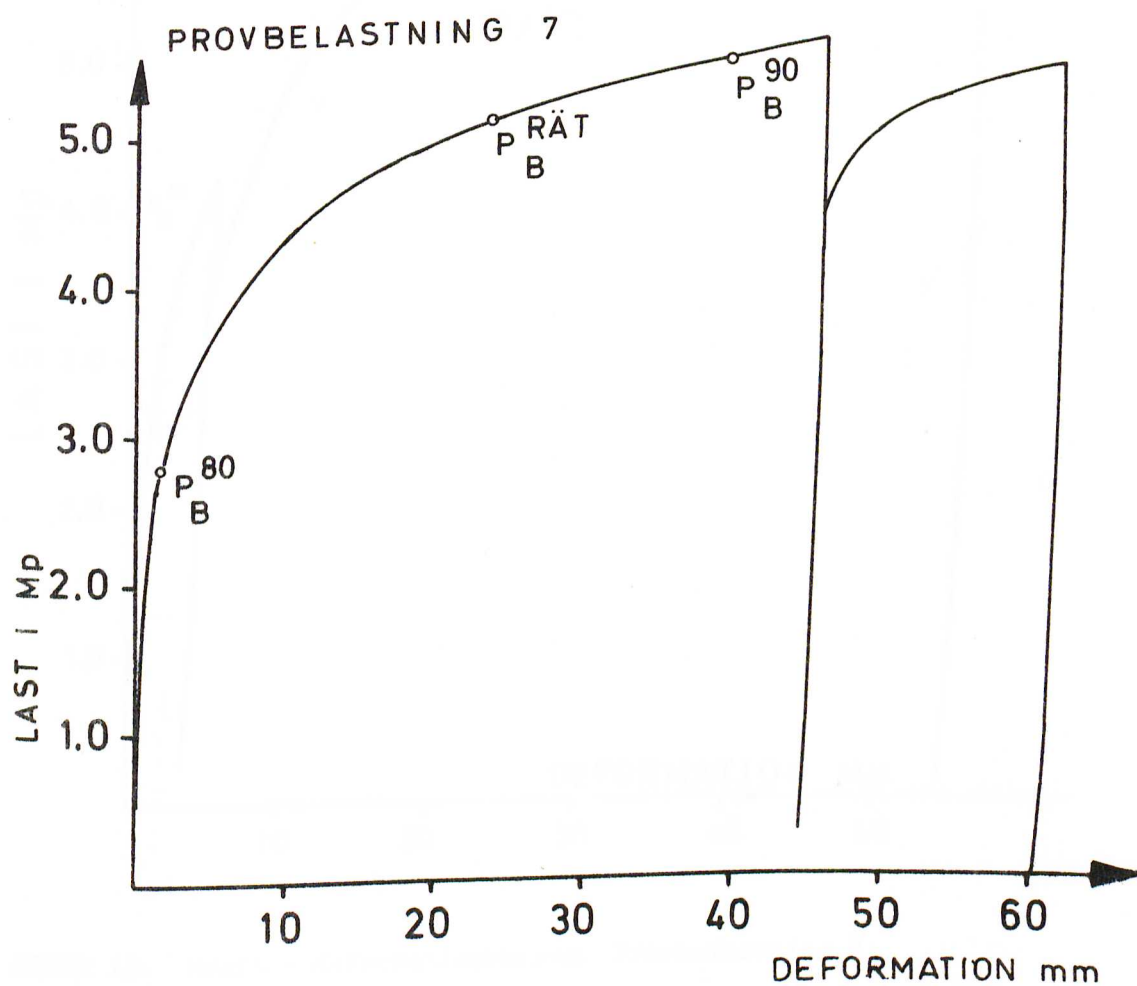
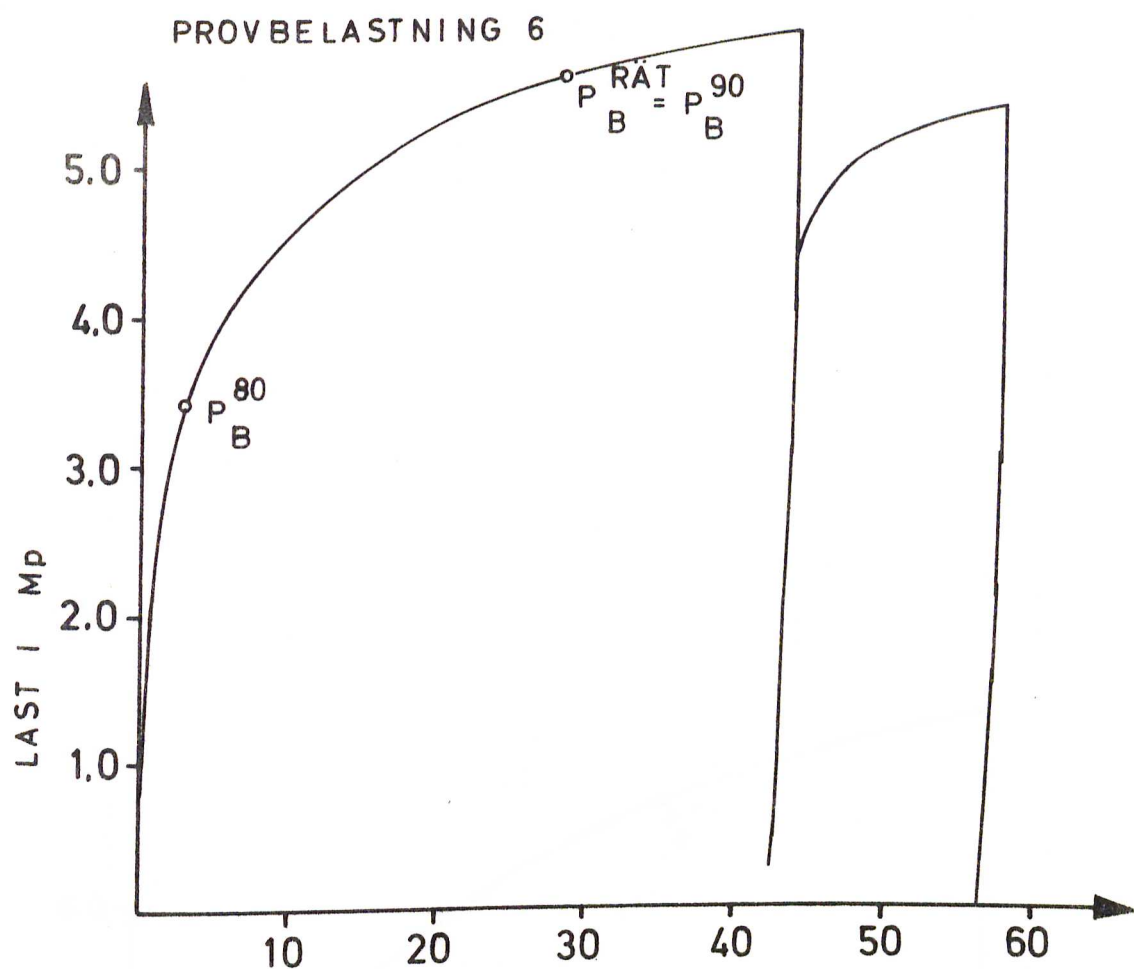
FIGUR 9. Provb belastningsmetod. Exempel från provbelastning 7. Stegvis pålastning (7 - 8 laststeg) utföres tills totala sjunkningen uppgår till ca 1 cm. Därefter utföres pålastningen i så korta steg att lastökningen går att läsa av på manometern. Dessa mindre steg kvarhålls till dess sjunkningen underskrider 0,5 mm/min, varefter lasten höjes till närmast högre avläsbara värde.



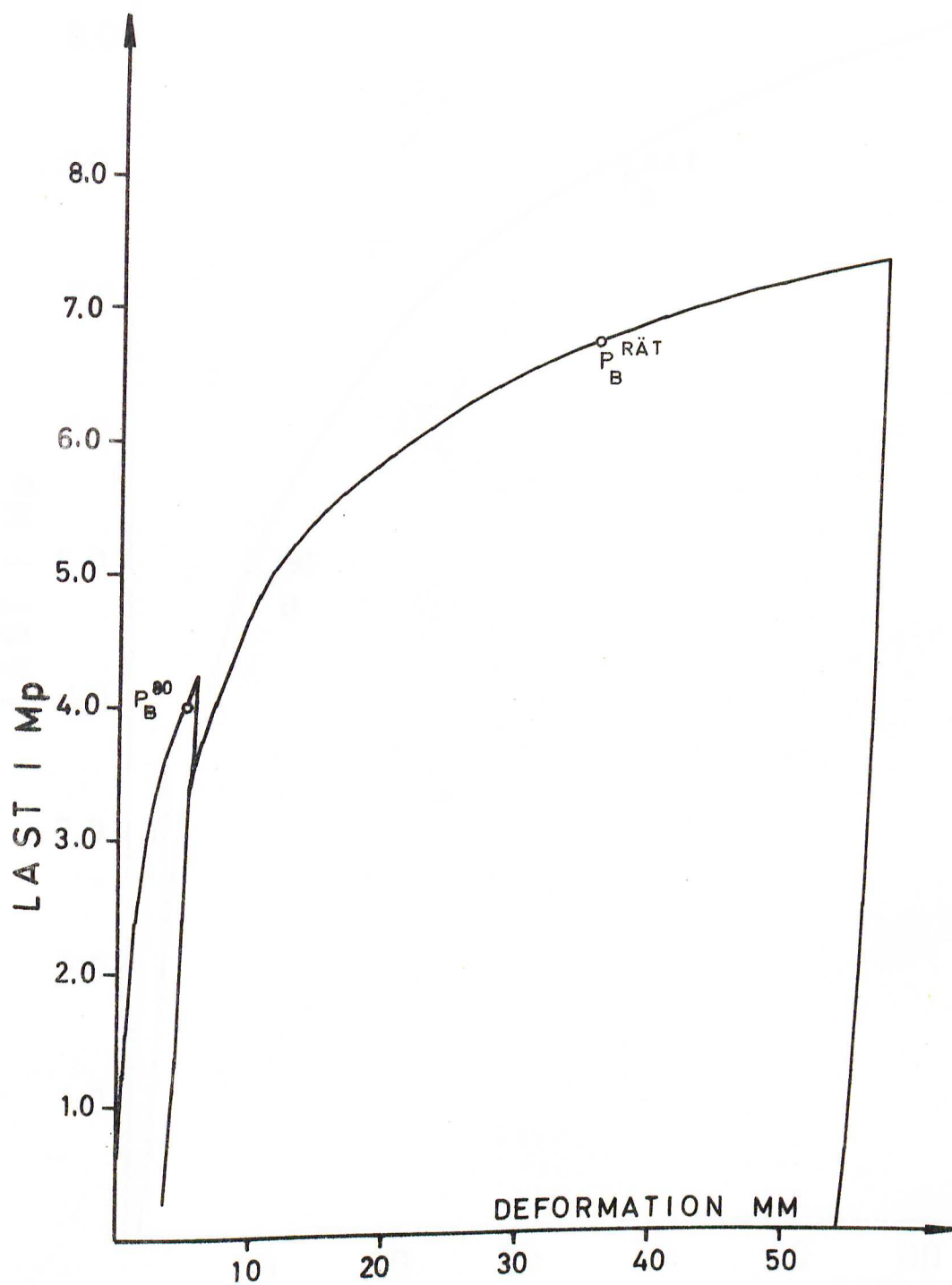
FIGUR 10. Kraft - deformationskurvor för provbelastningarna 1, 2 och 3.



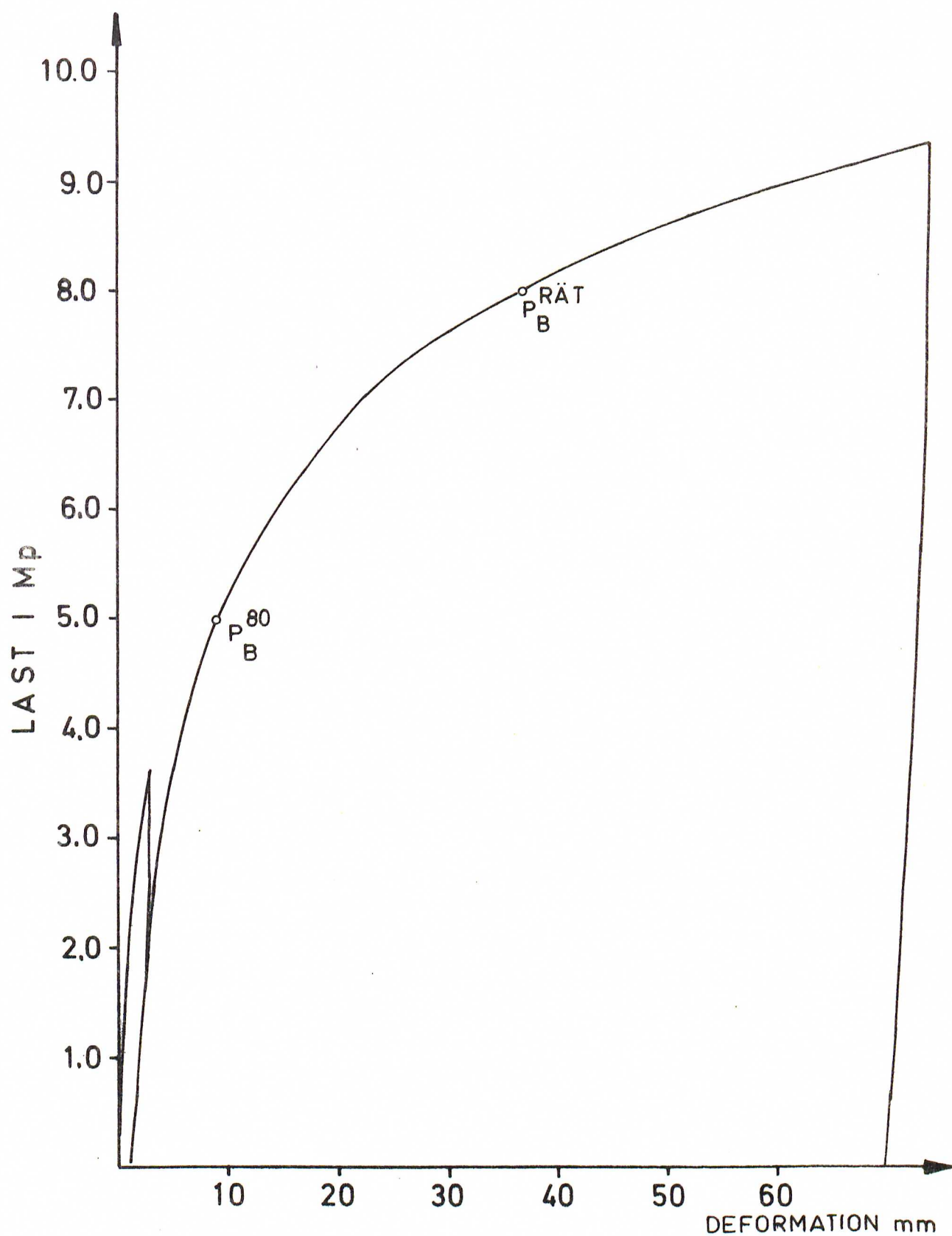
FIGUR 11. Kraft - deformationskurvor för provbelastningarna 4 och 5.



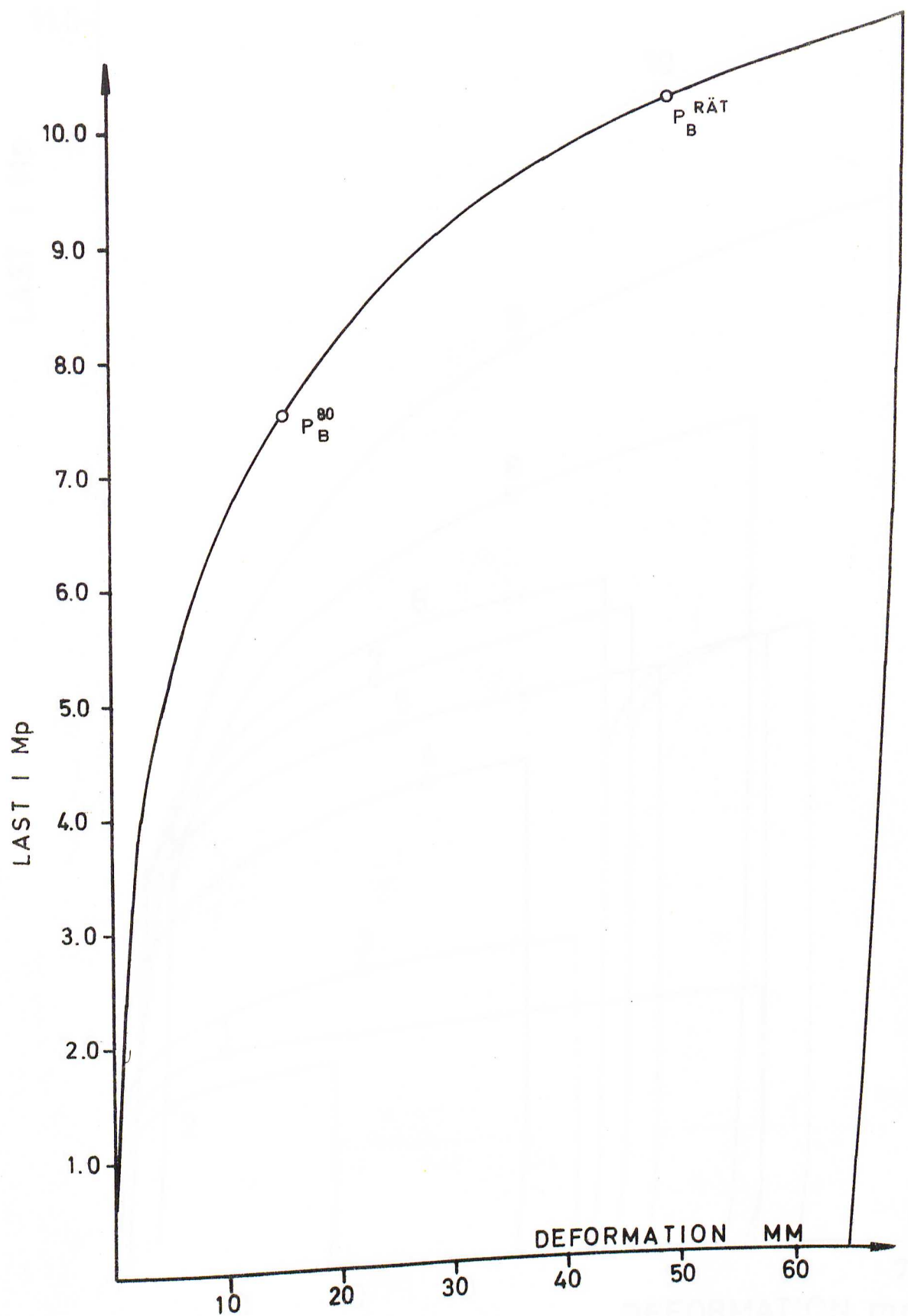
FIGUR 12. Kraft - deformationskurvor för provbelastningarna 6 och 7.



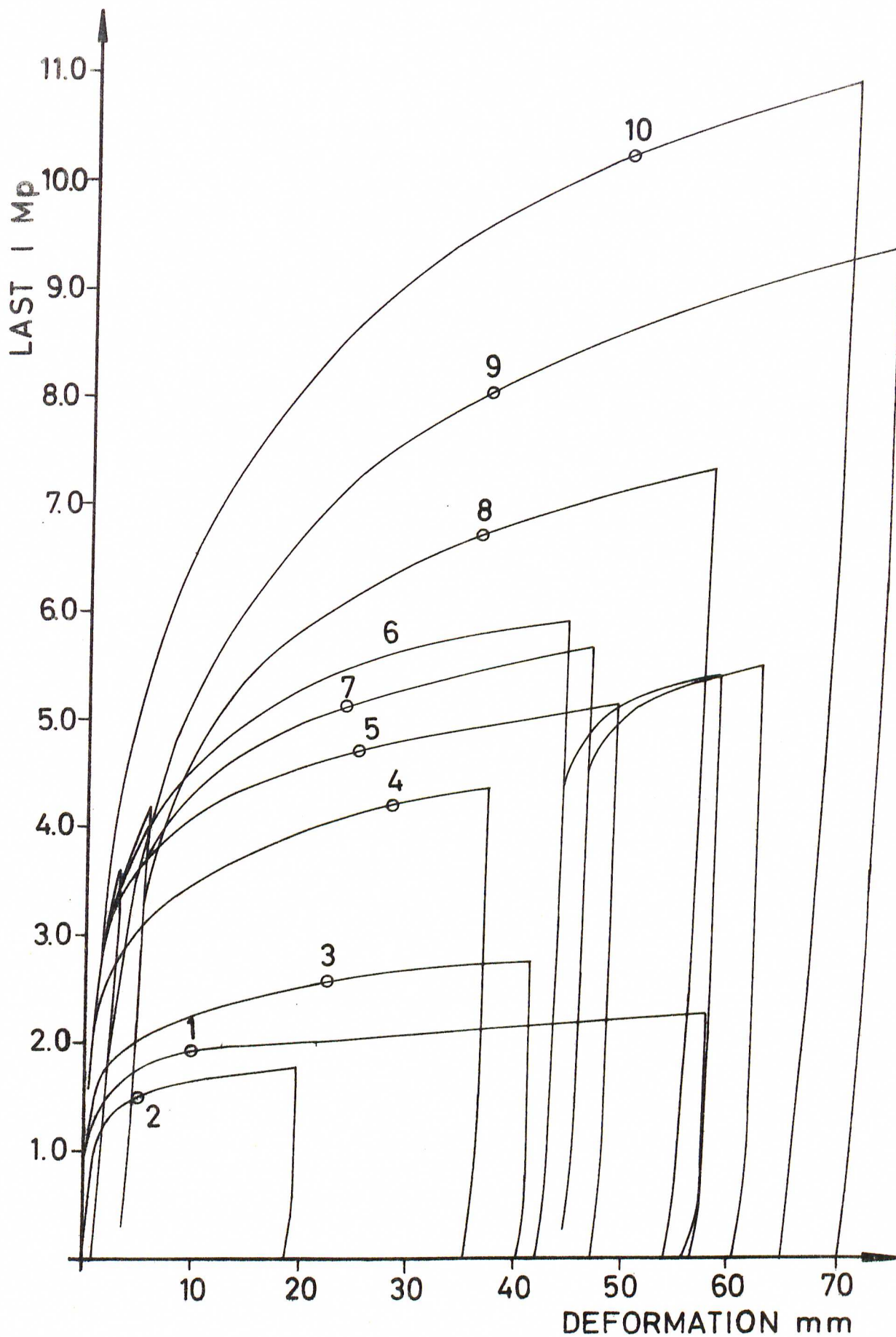
FIGUR 13. Kraft - deformationskurva. Provbekastning 8.



FIGUR 14. Kraft - deformationskurva. Provbekastning 9.

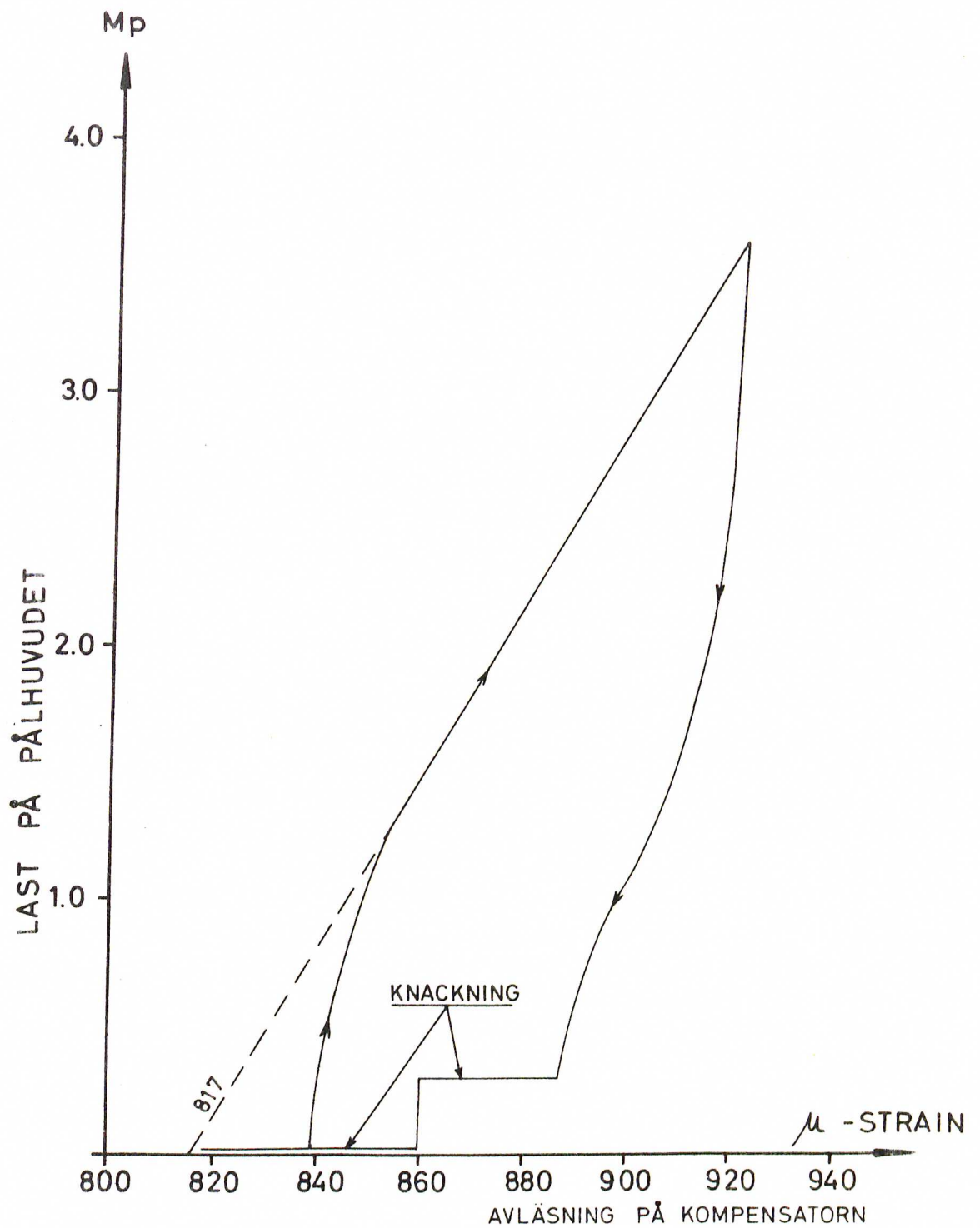


FIGUR 15. Kraft - deformationskurva. Provbekastning 10.

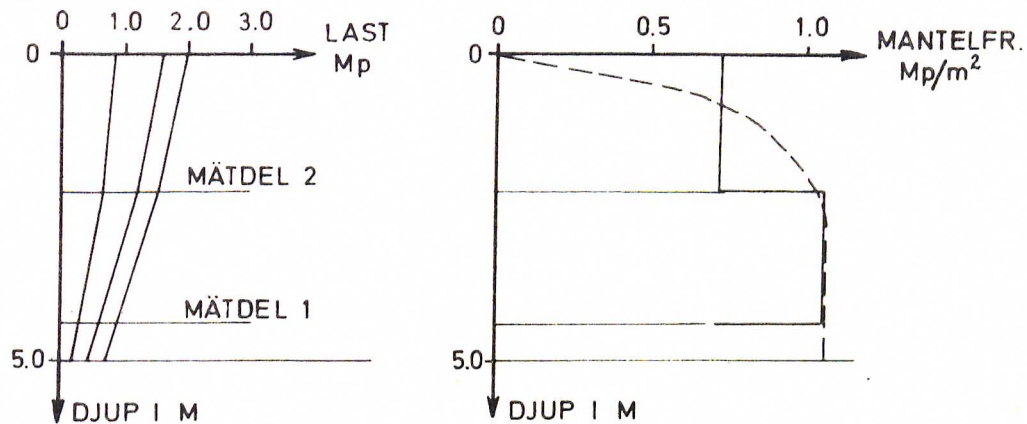


FIGUR 16. Kraft - deformationskurvor för provbelastningar 1 - 10.

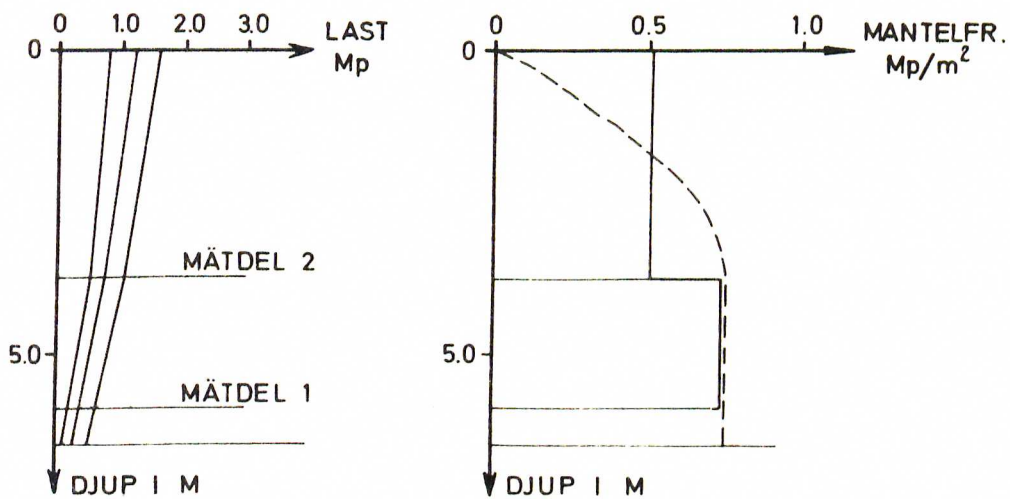
Brottlasten $P_B^{\text{rät}}$ är inprickad.



FIGUR 17. Bestämning av nollutslag. Exempel från provbelastning 9, mätbel 1. Det extrapolerade värdet överensstämmer bra med värdet som erhålls efter knackningen på pålen.

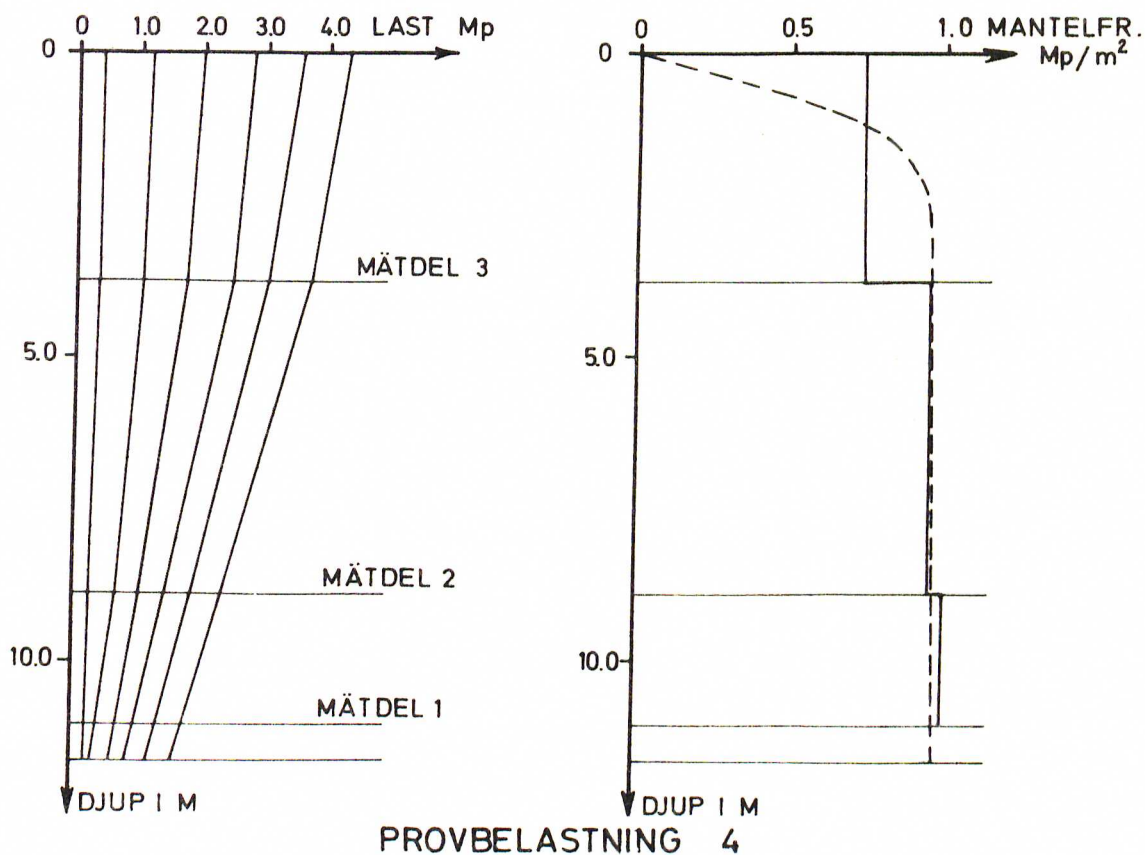
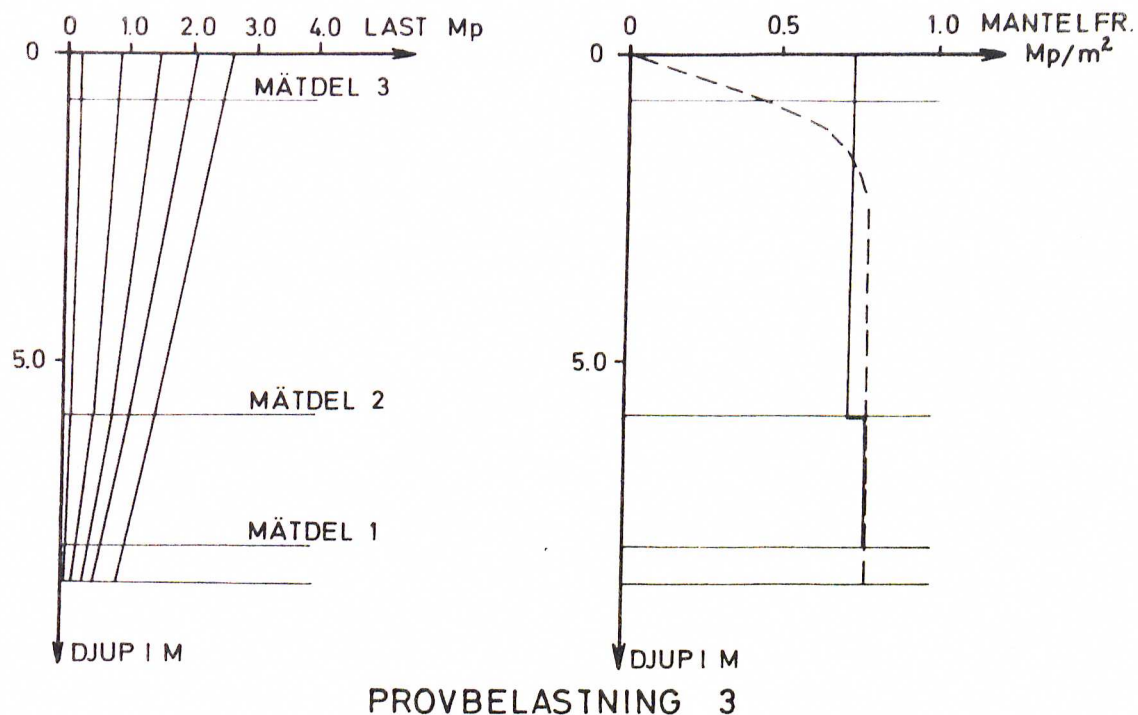


PROVBELASTNING 1

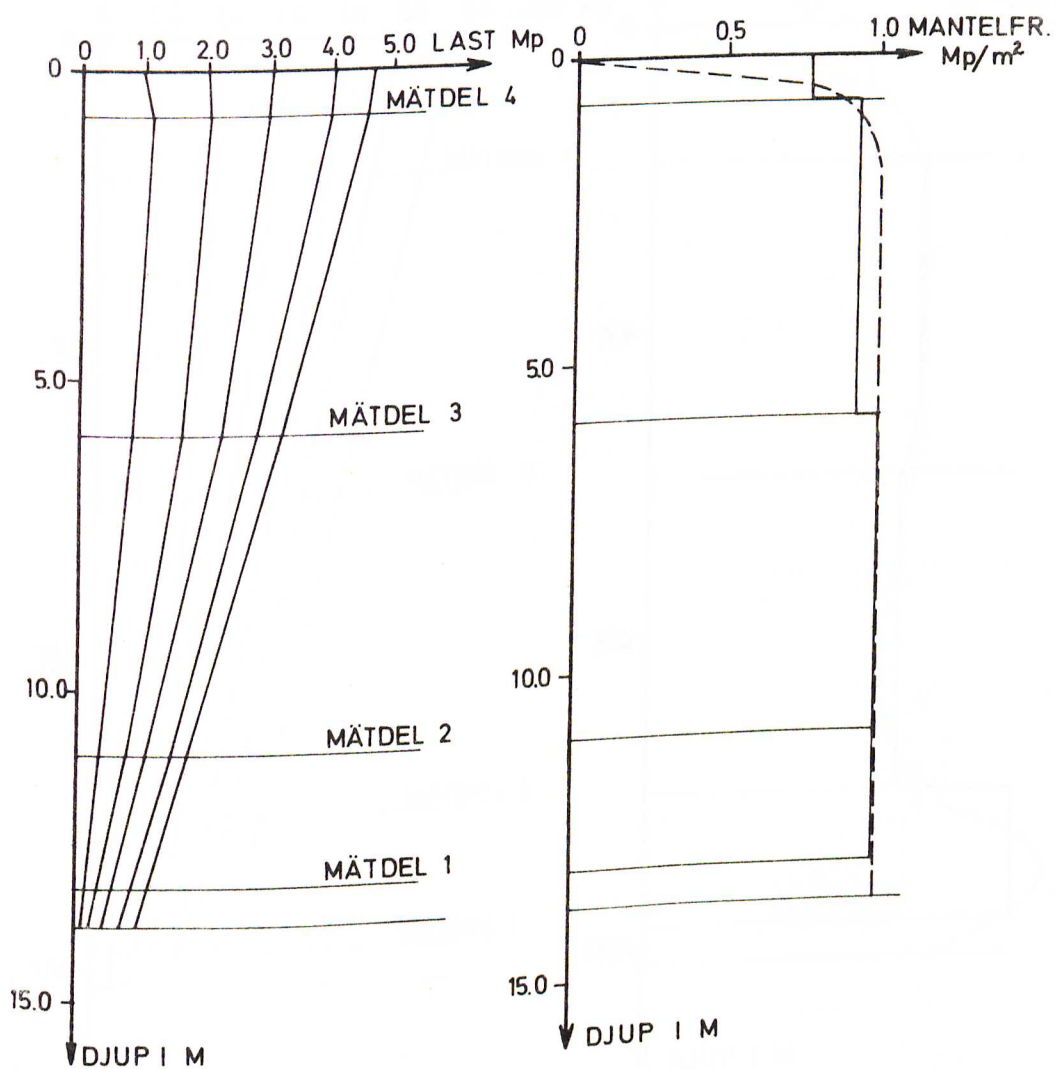


PROVBELASTNING 2

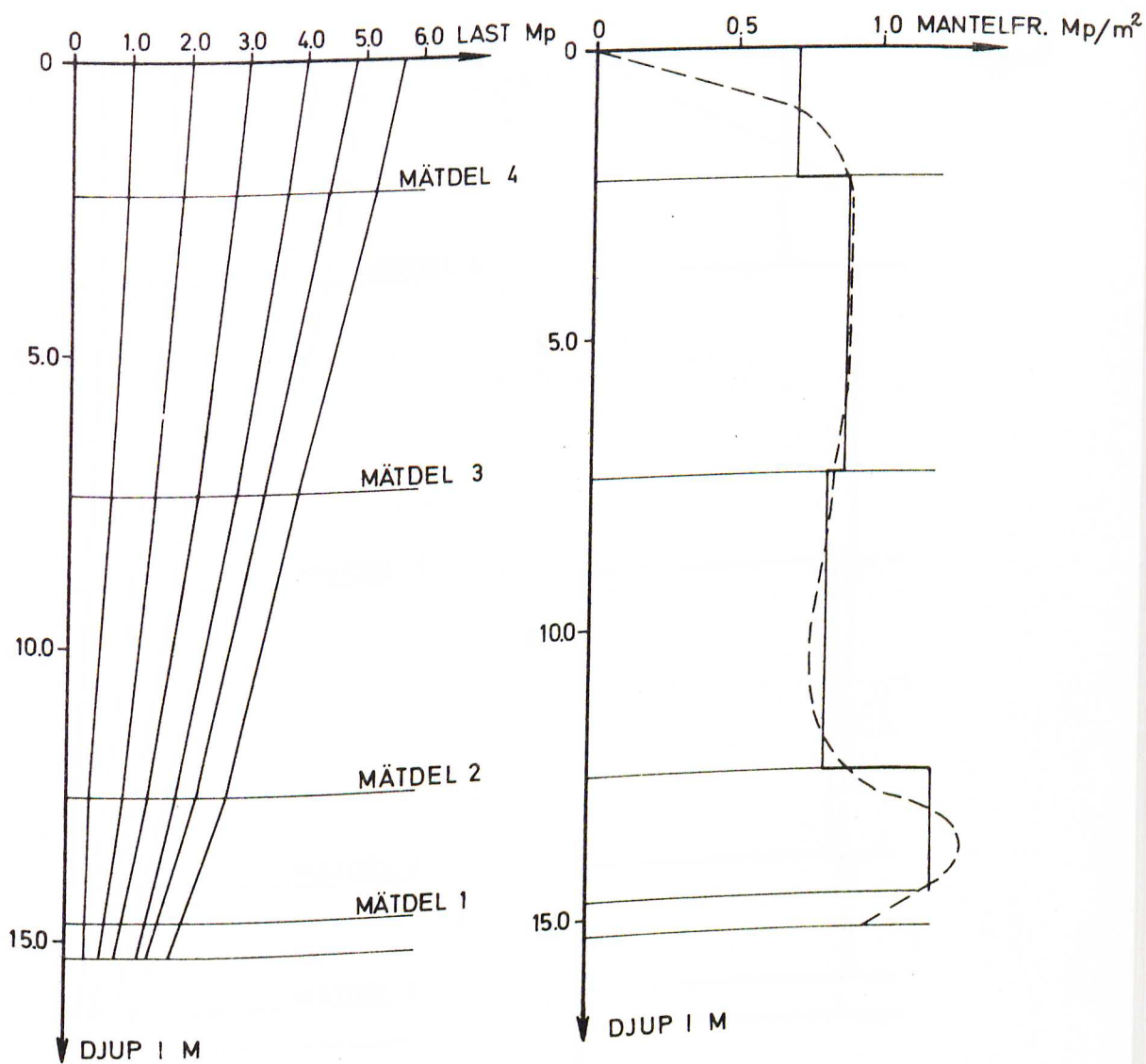
FIGUR 18. Lastupptagning och mantelfriktionens fördelning. Provbekastningarna 1 och 2.



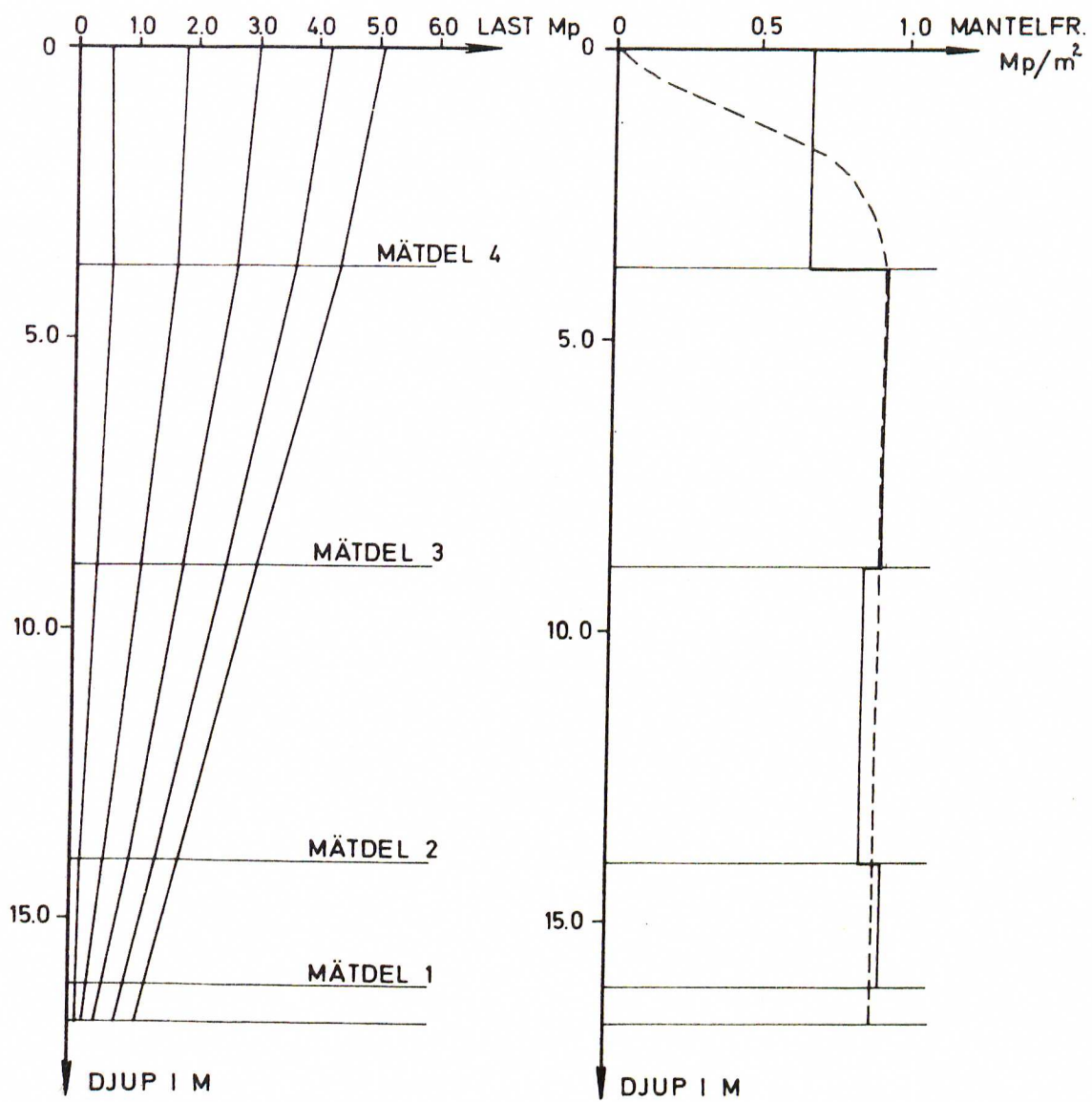
FIGUR 19. Lastupptagning och mantelfriktionens fördelning.
Provbelastningarna 3 och 4.



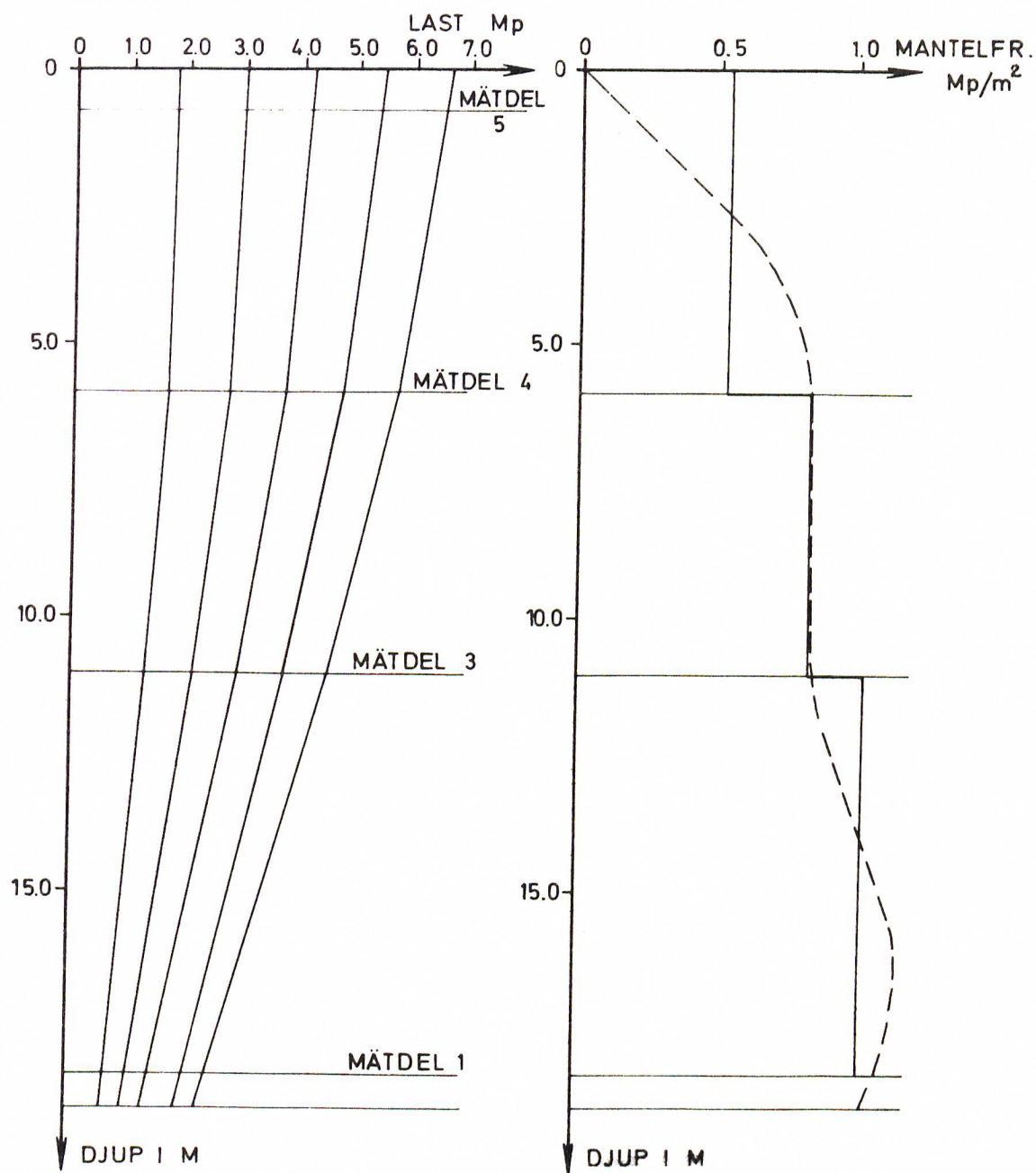
FIGUR 20. Lastupptagning och mantelfriktionens fördelning.
 Provbekastning 5.



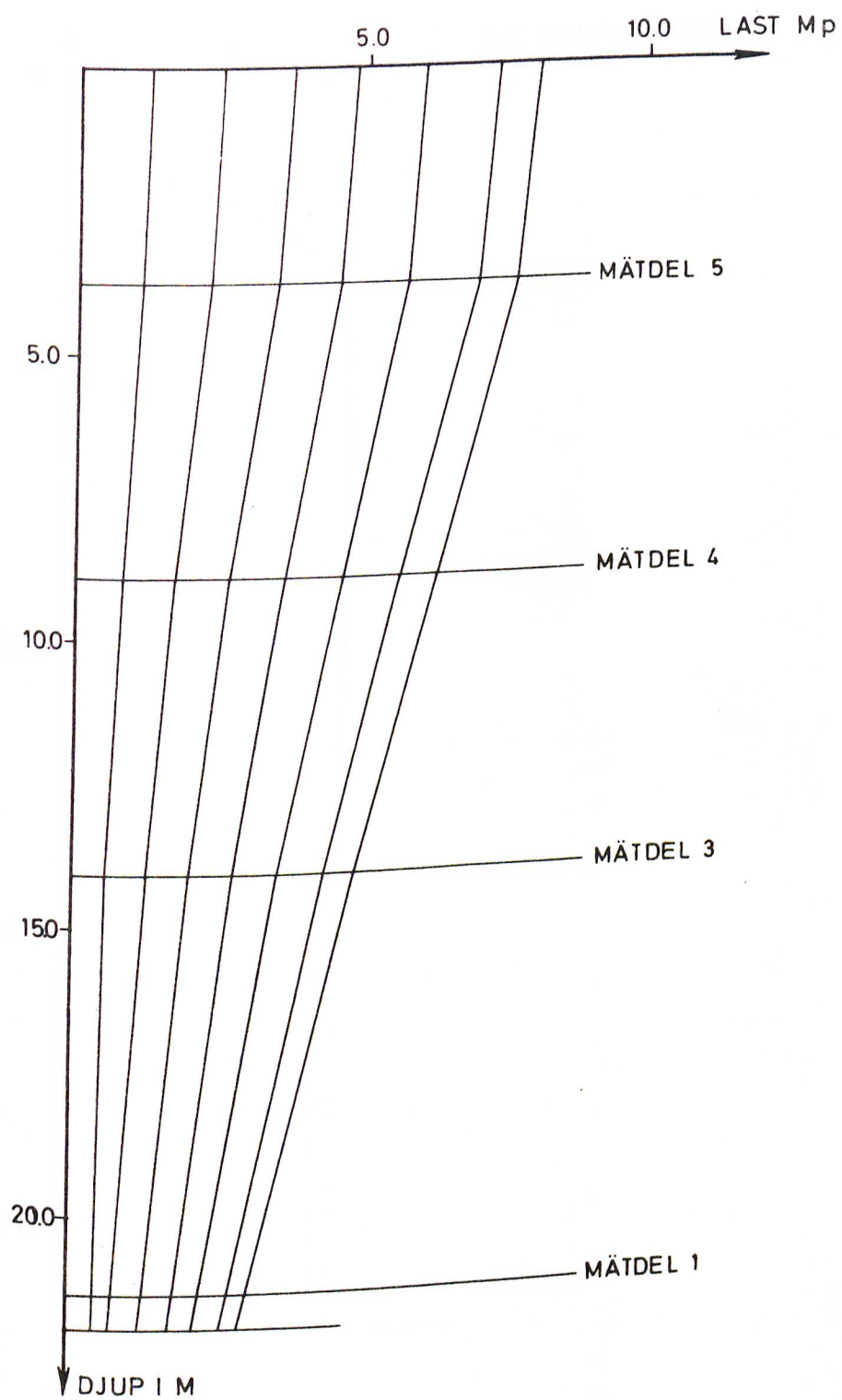
FIGUR 21. Lastupptagning och mantelfriktionens fördelning.
 Provbekastning 6.



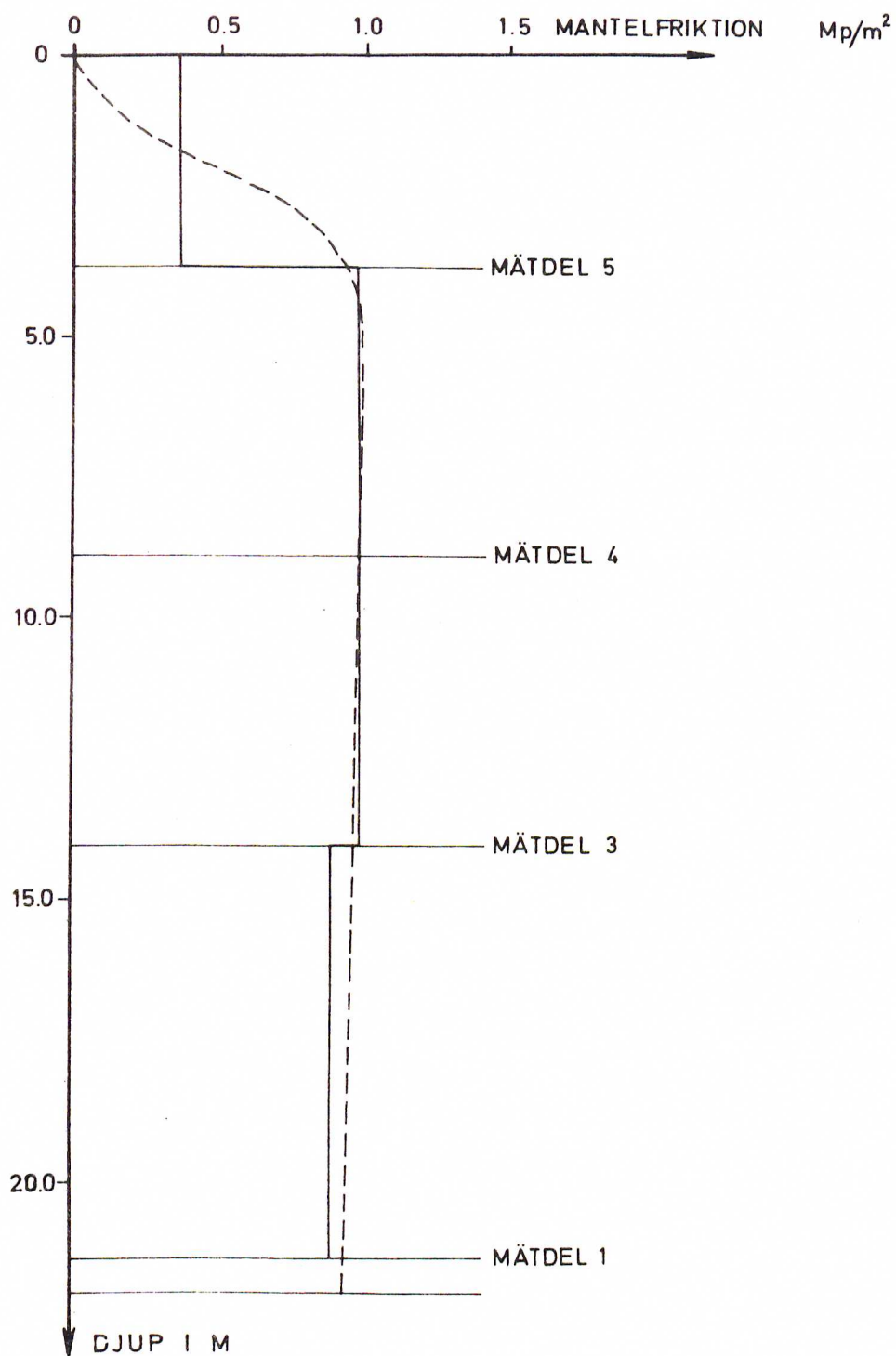
FIGUR 22. Lastupptagning och mantelfriktionens fördelning.
 Provbekastning 7.



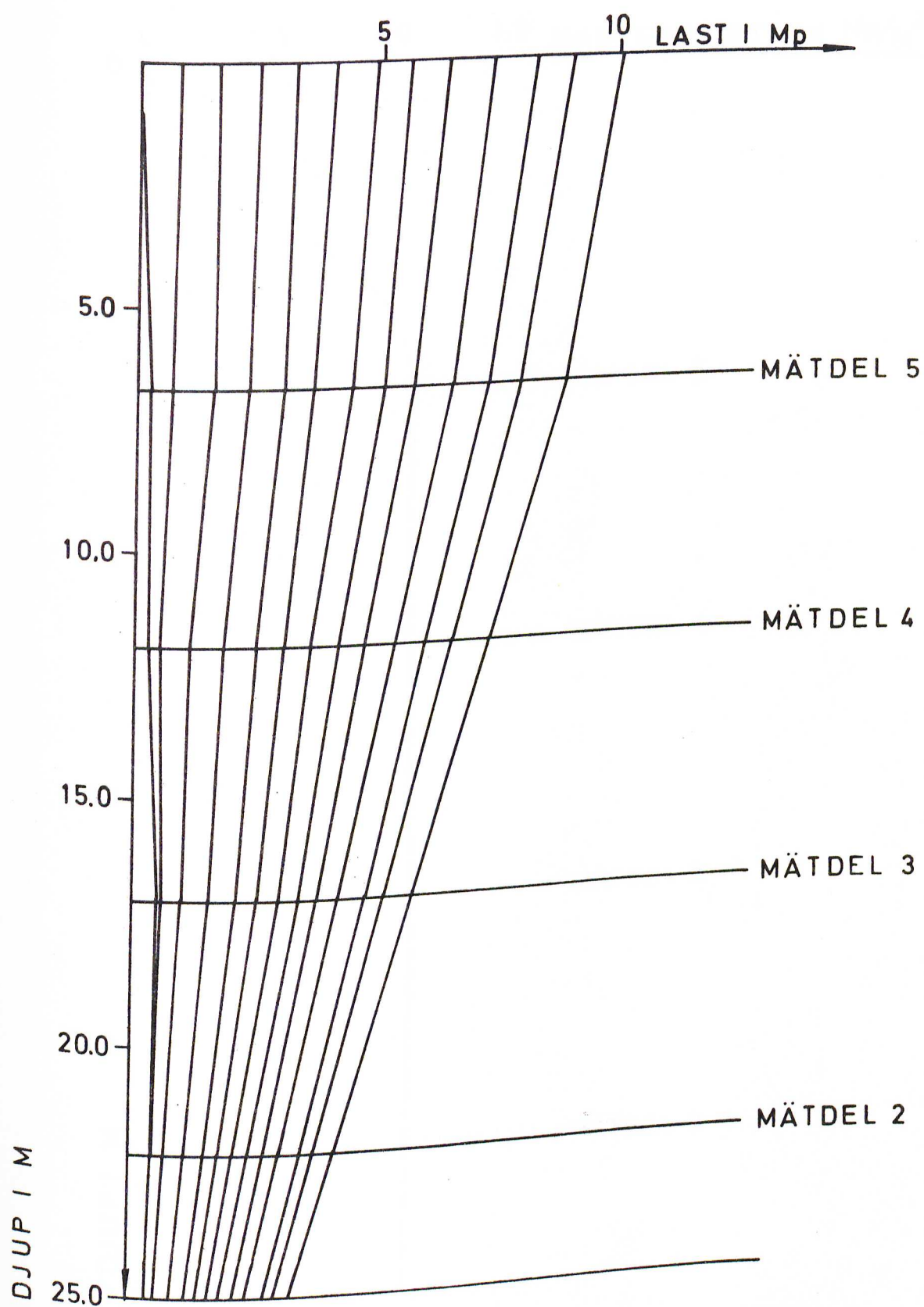
FIGUR 23. Lastupptagning och mantelfriktionens fördelning.
Provbelastning 8.



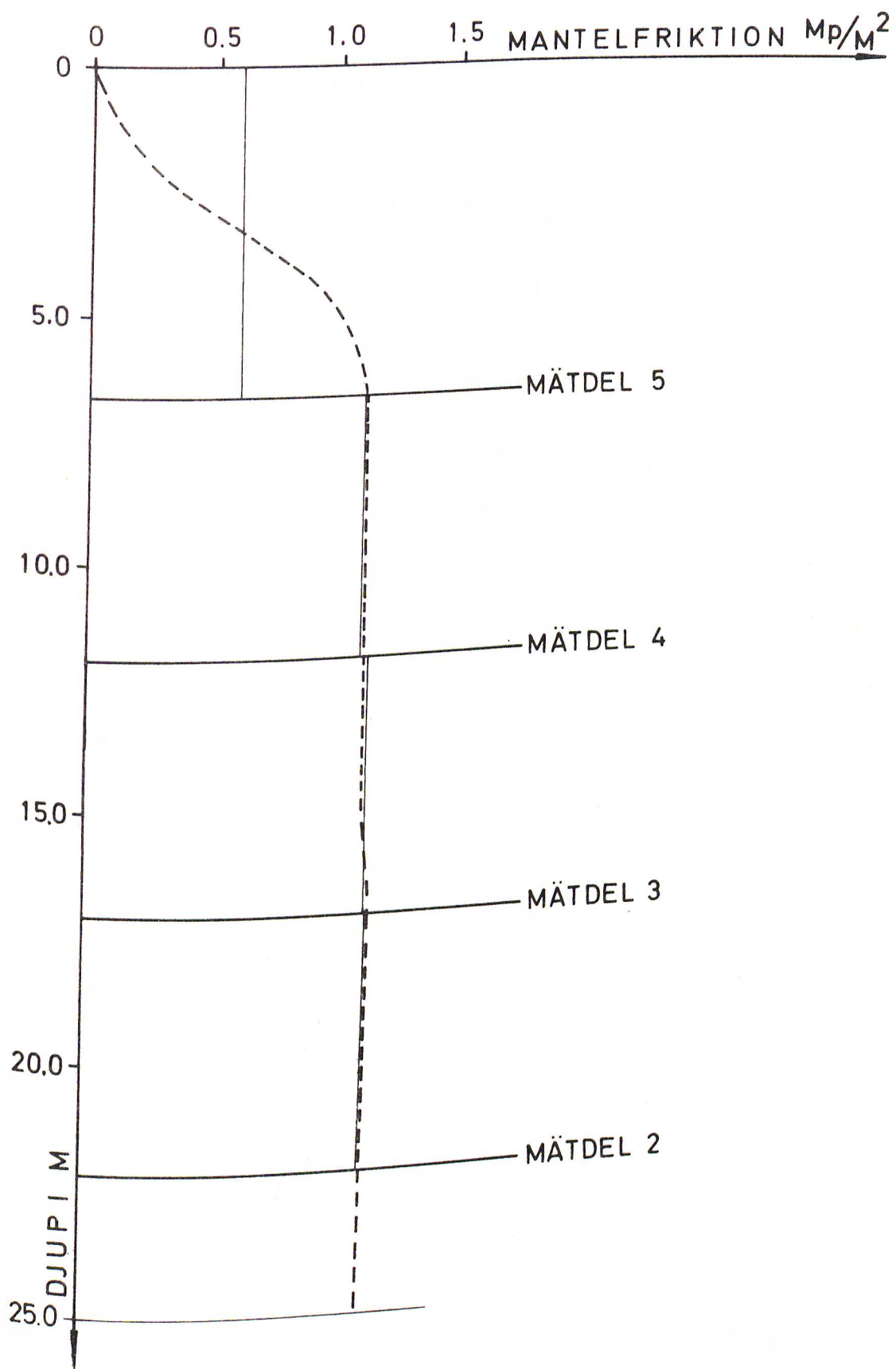
FIGUR 24. Lastupptagning. Provbekastning 9.



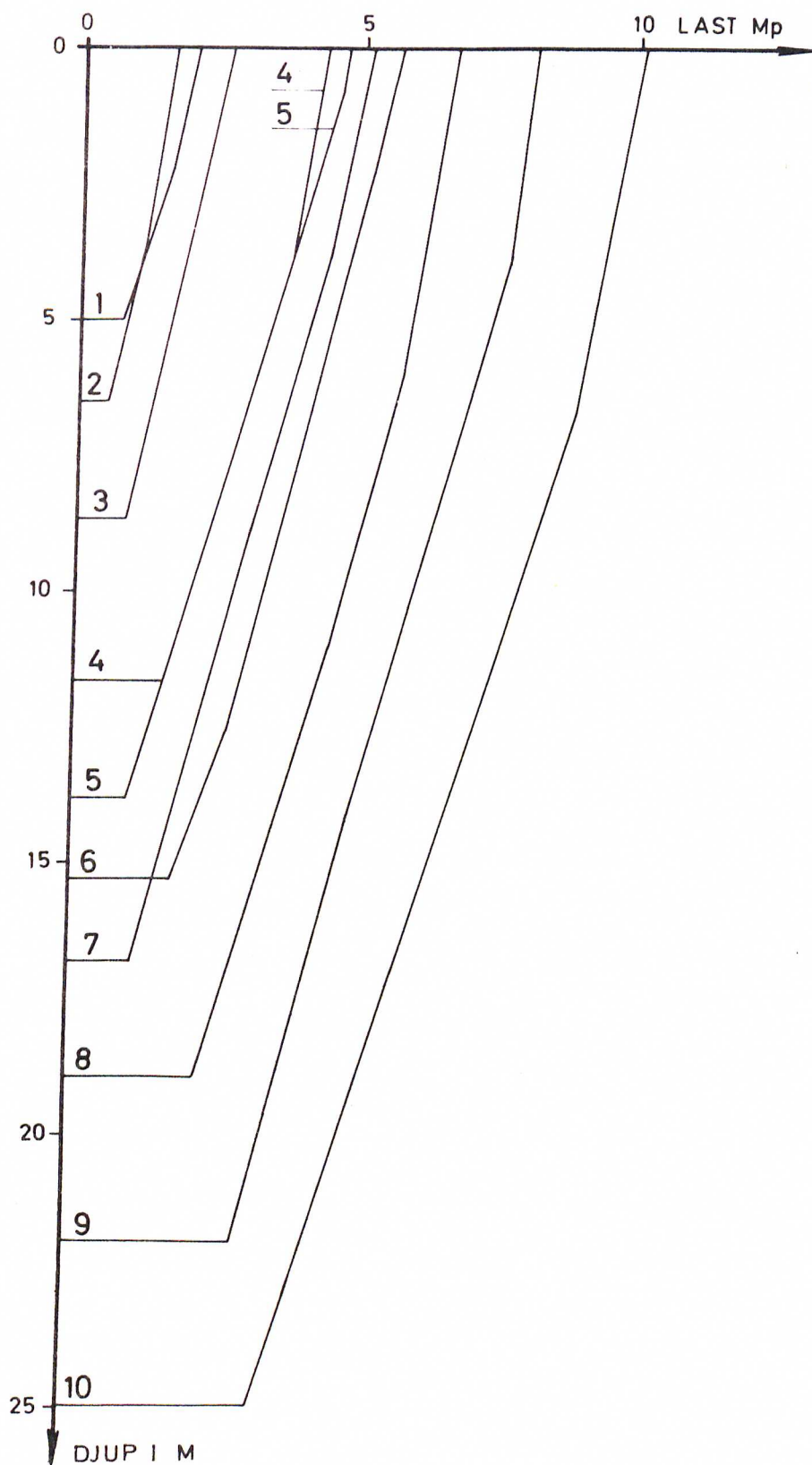
FIGUR 25. Mantelfriktionens fördelning. Provbekastning 9.



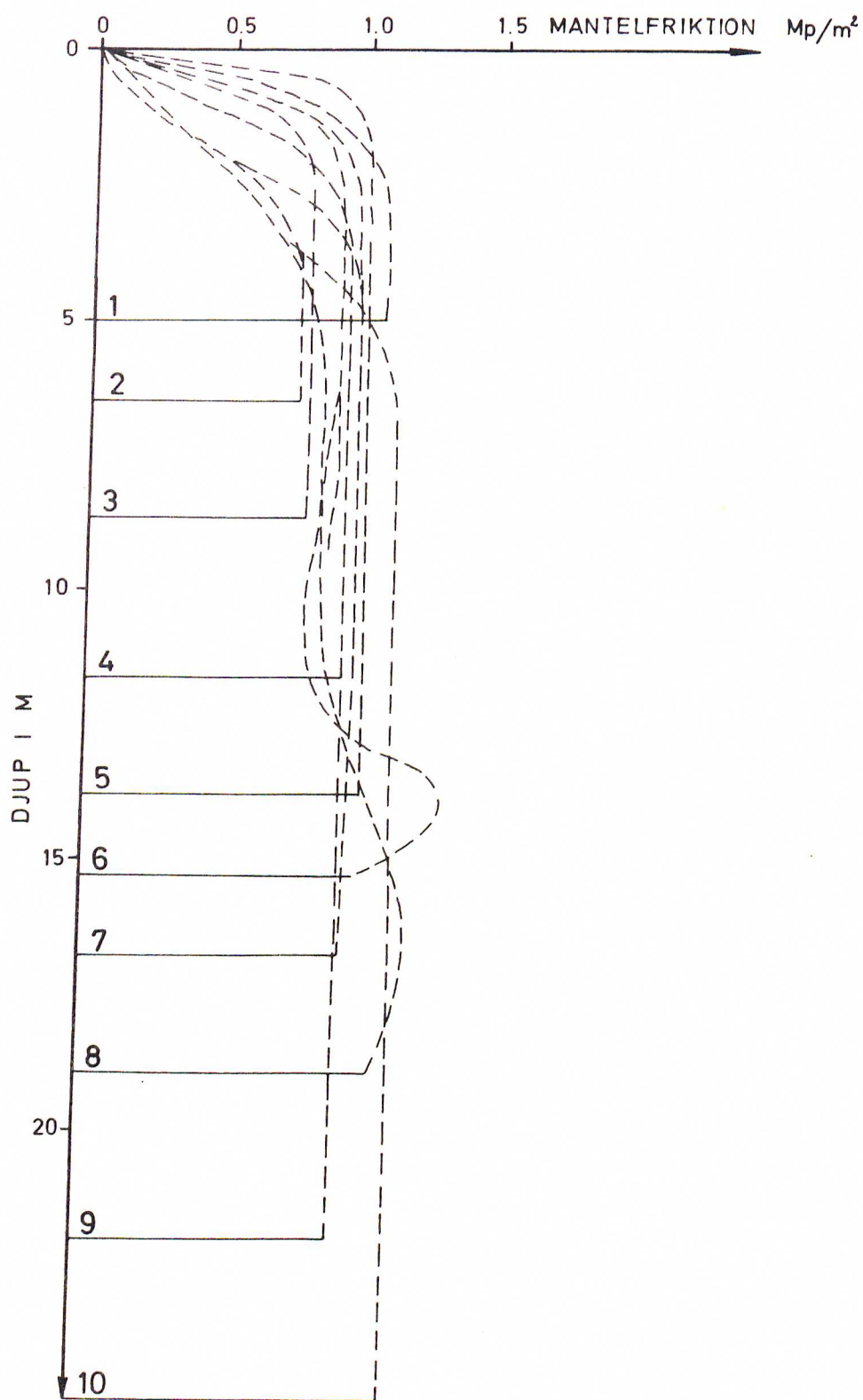
FIGUR 26. Lastupptagning. Provbelastrning 10.



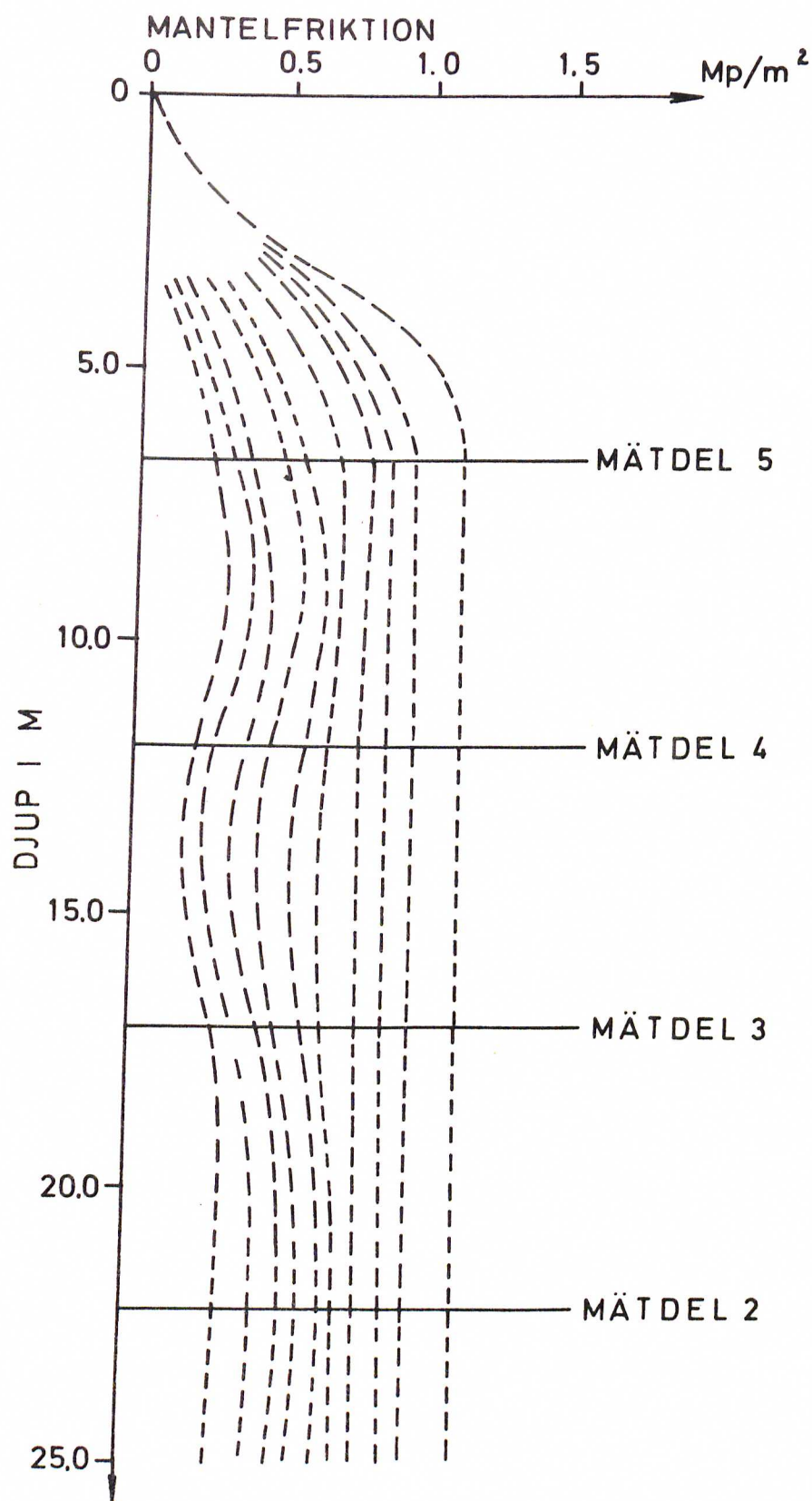
FIGUR 27. Mantelfriktionens fördelning. Provbekastning 10.



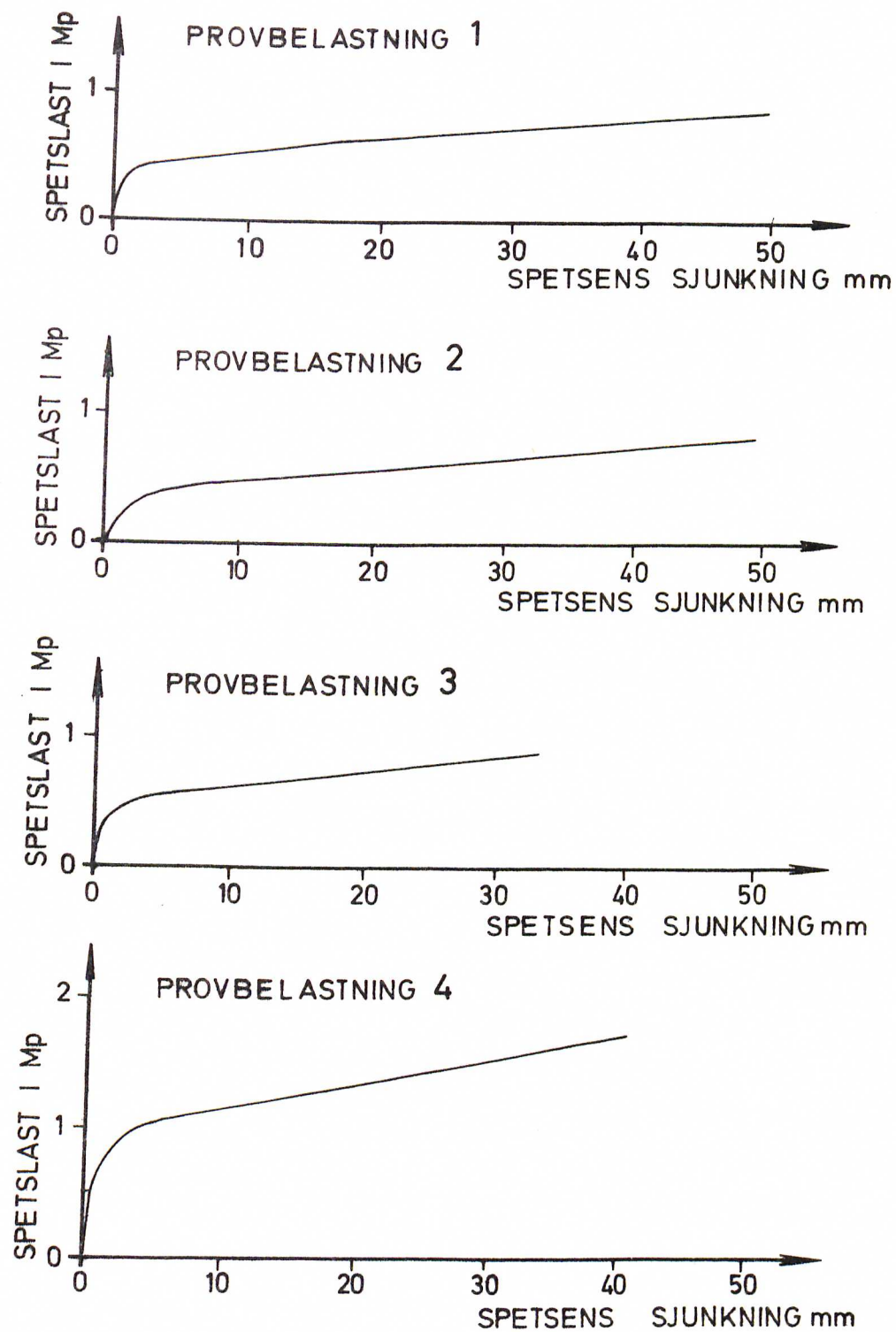
FIGUR 28. Sammanställning av lastfördelning vid brott för provbelastningarna 1 - 10.



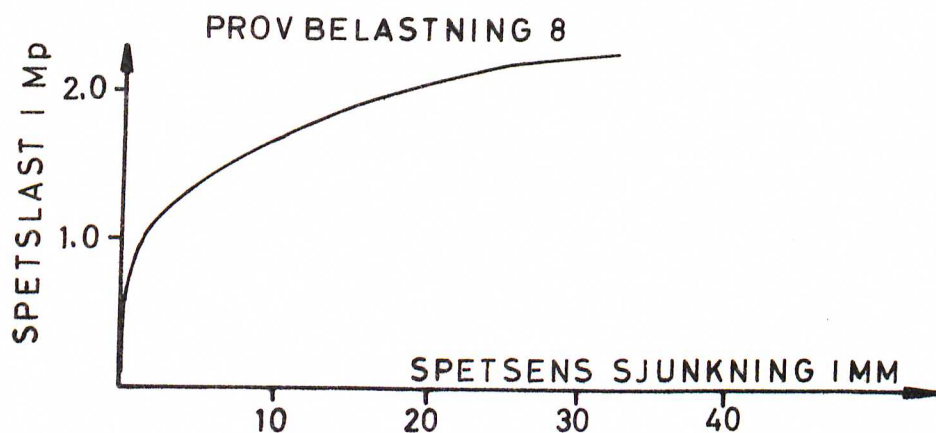
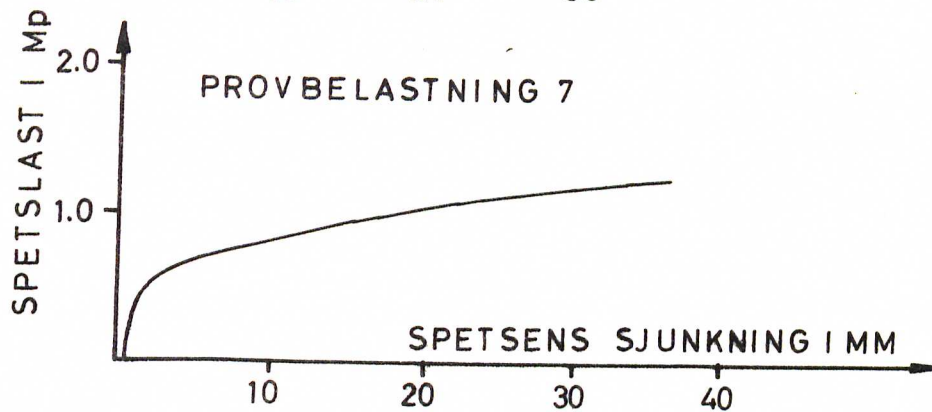
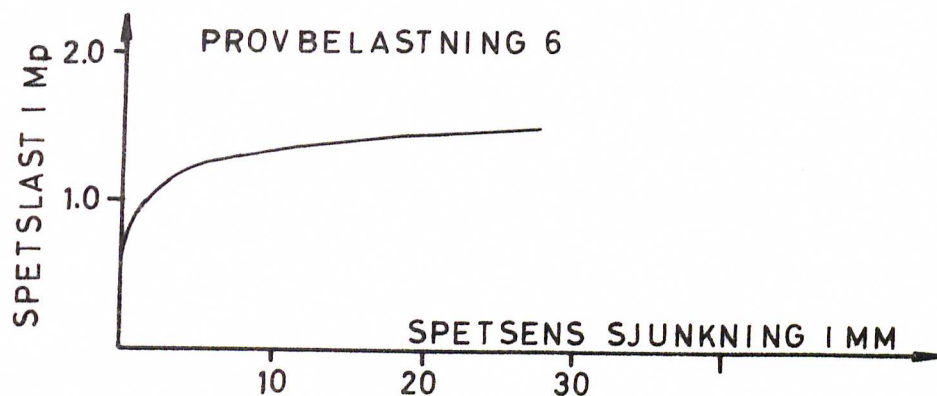
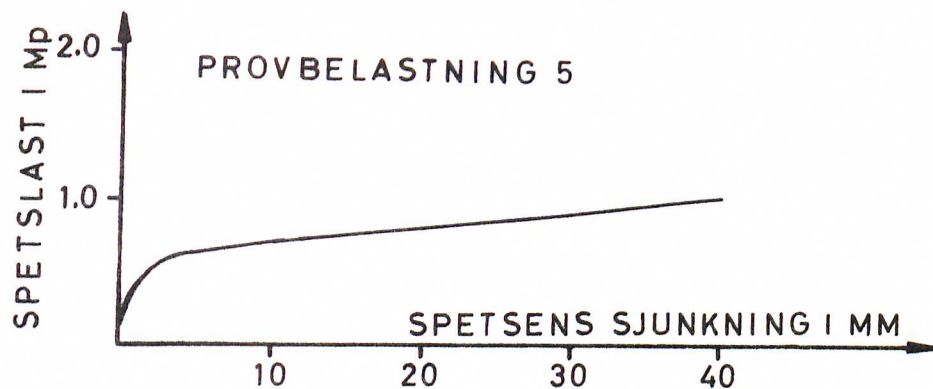
FIGUR 29. Mantelfriktionens storlek vid brott för provbelastningarna 1 - 10.



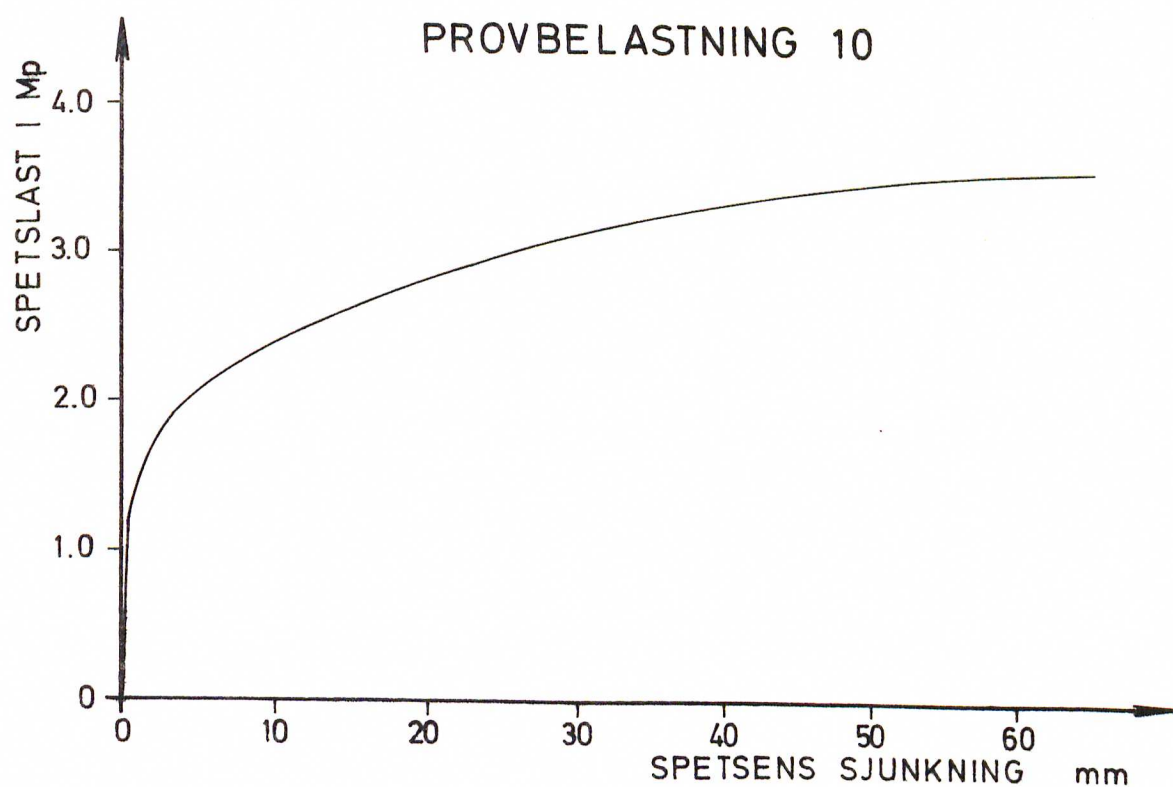
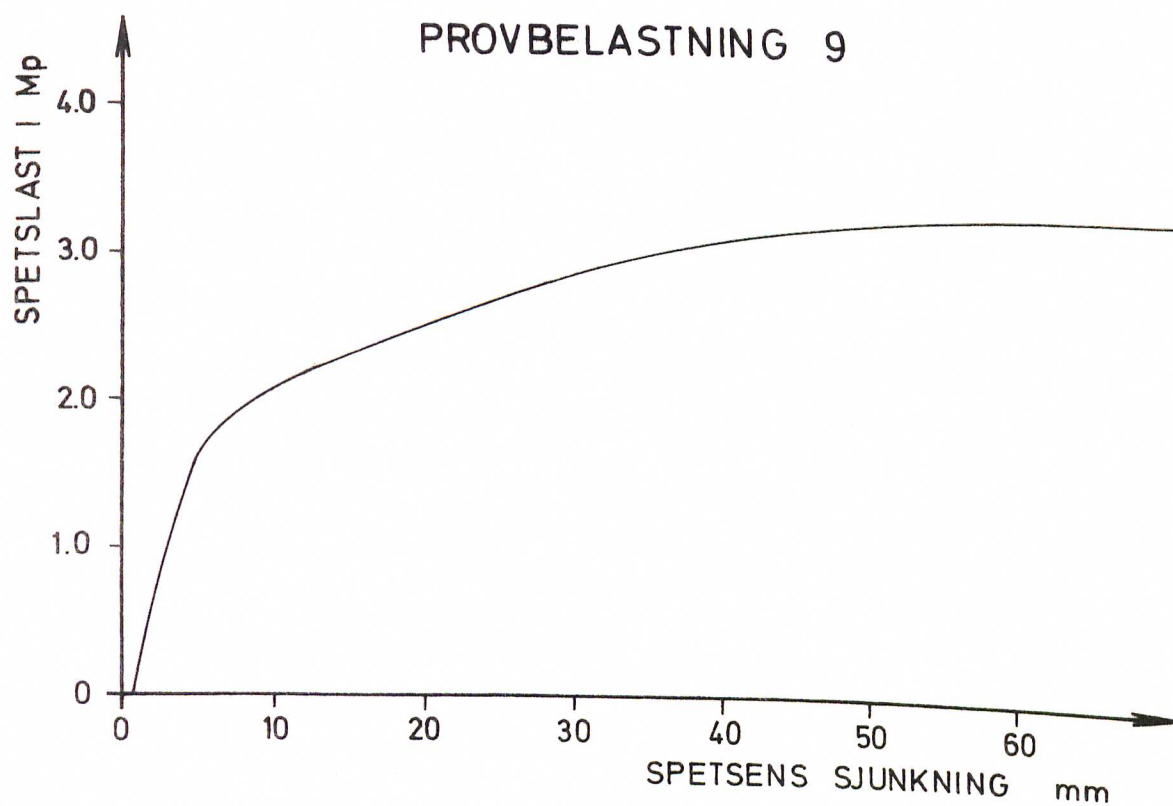
FIGUR 30. Mantelfriktionens tillväxt. Provbekastning 10. Tillväxten sker lika längs hela pålen över laster som ej påverkas av initiallasten i pålen.



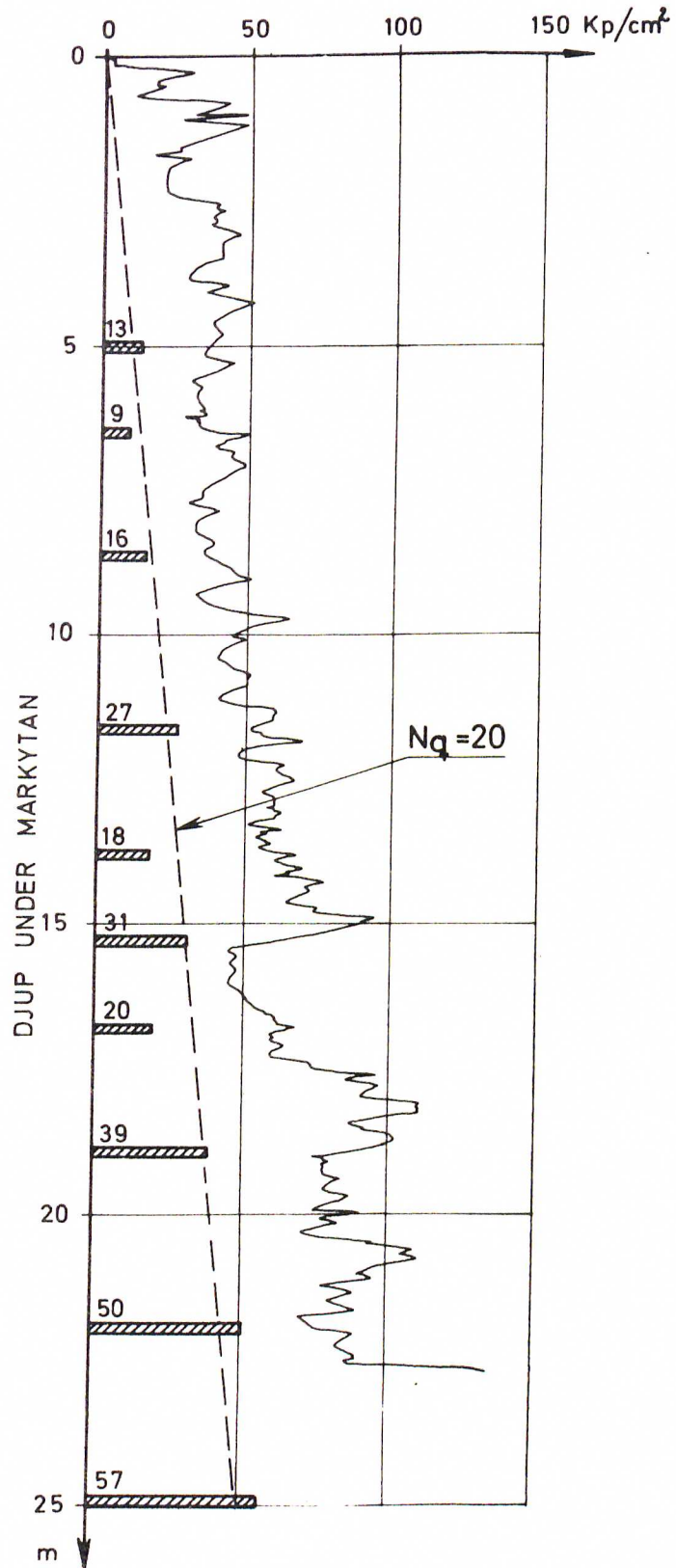
FIGUR 31. Spetsmotståndet som funktion av spetsens sjunkning. Provbekastningarna 1 - 4.



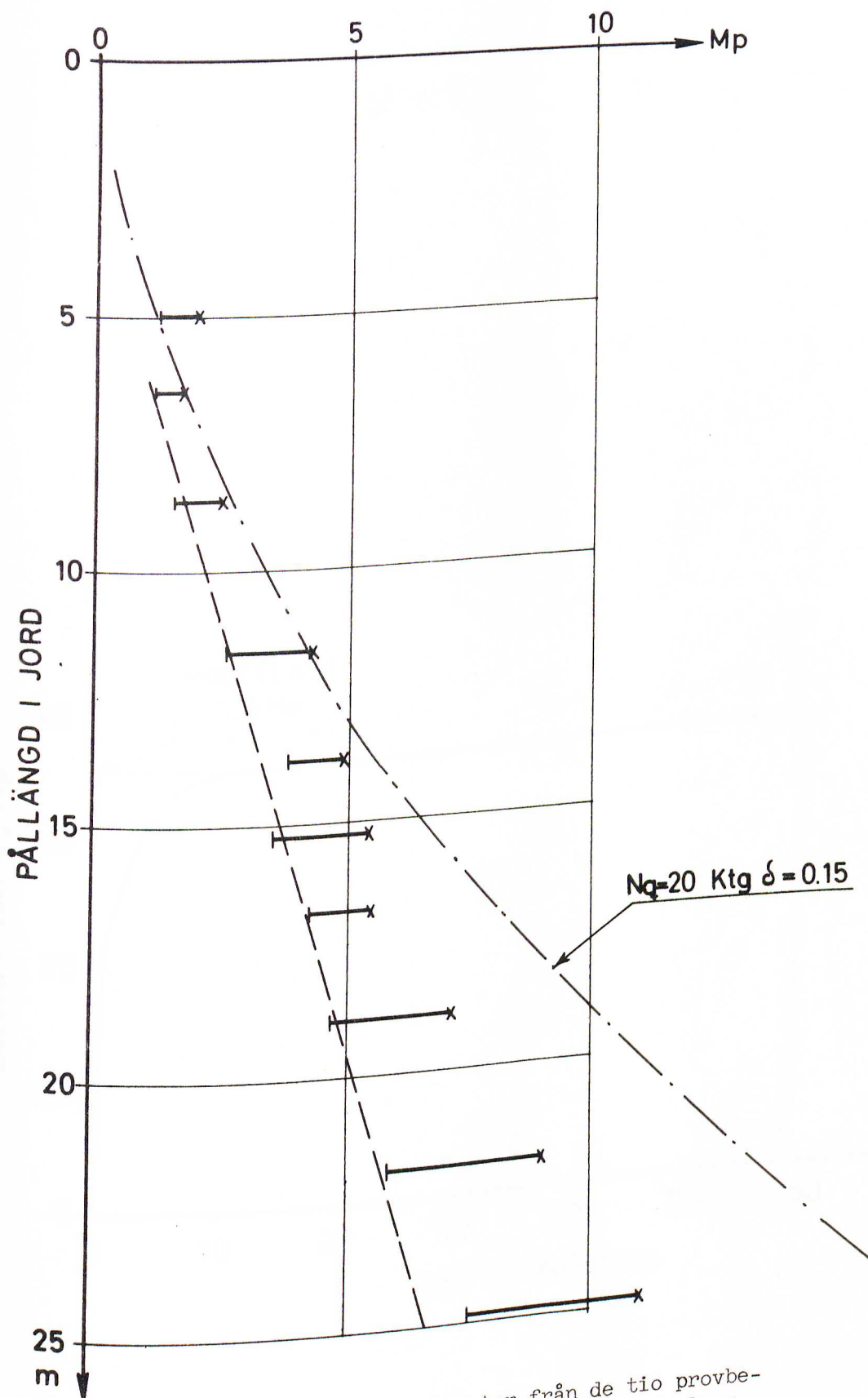
FIGUR 32. Spetsmotståndet som funktion av spetsens sjunkning. Provbekastningarna 5 - 8.



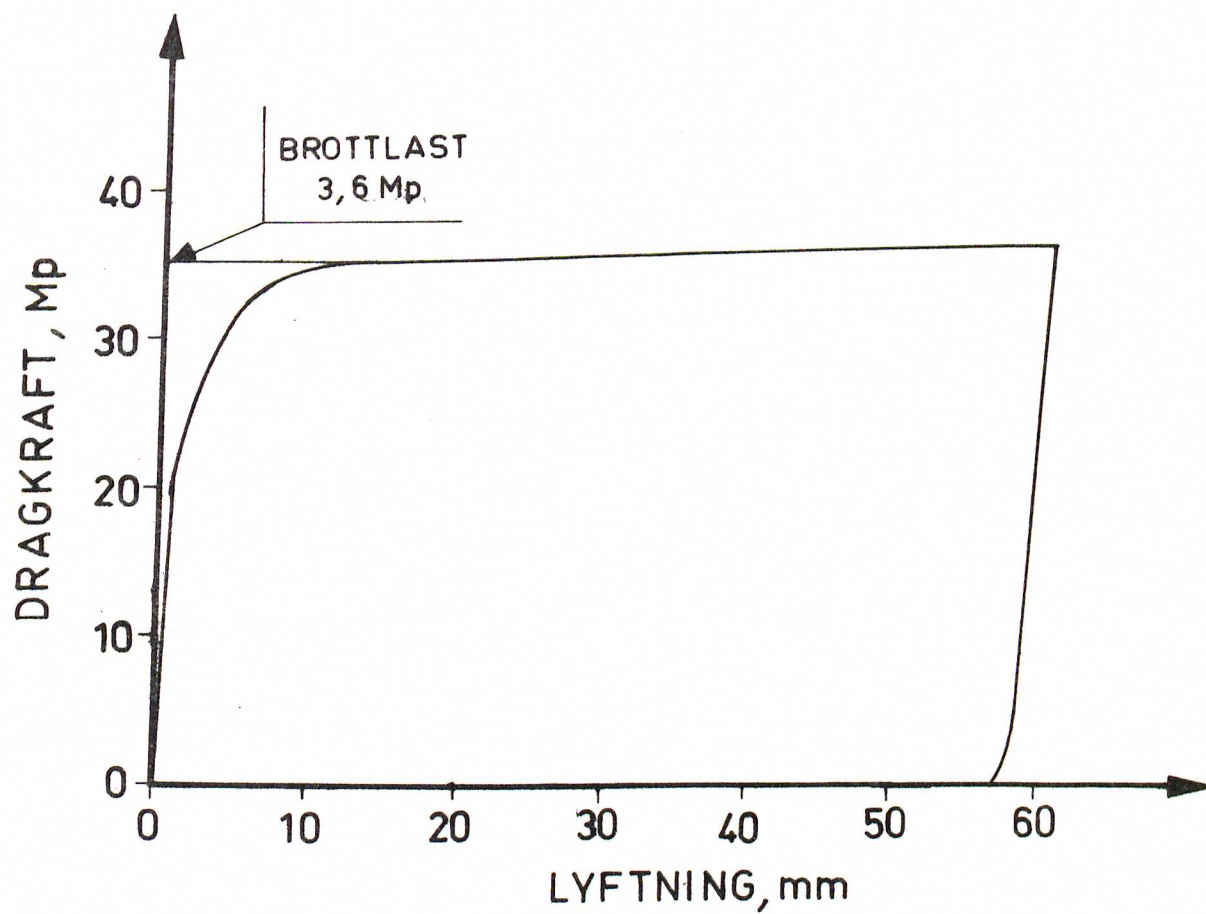
FIGUR 33. Spetsmotståndet som funktion av spetsens sjunkning.
Provbekastningarna 9 och 10.



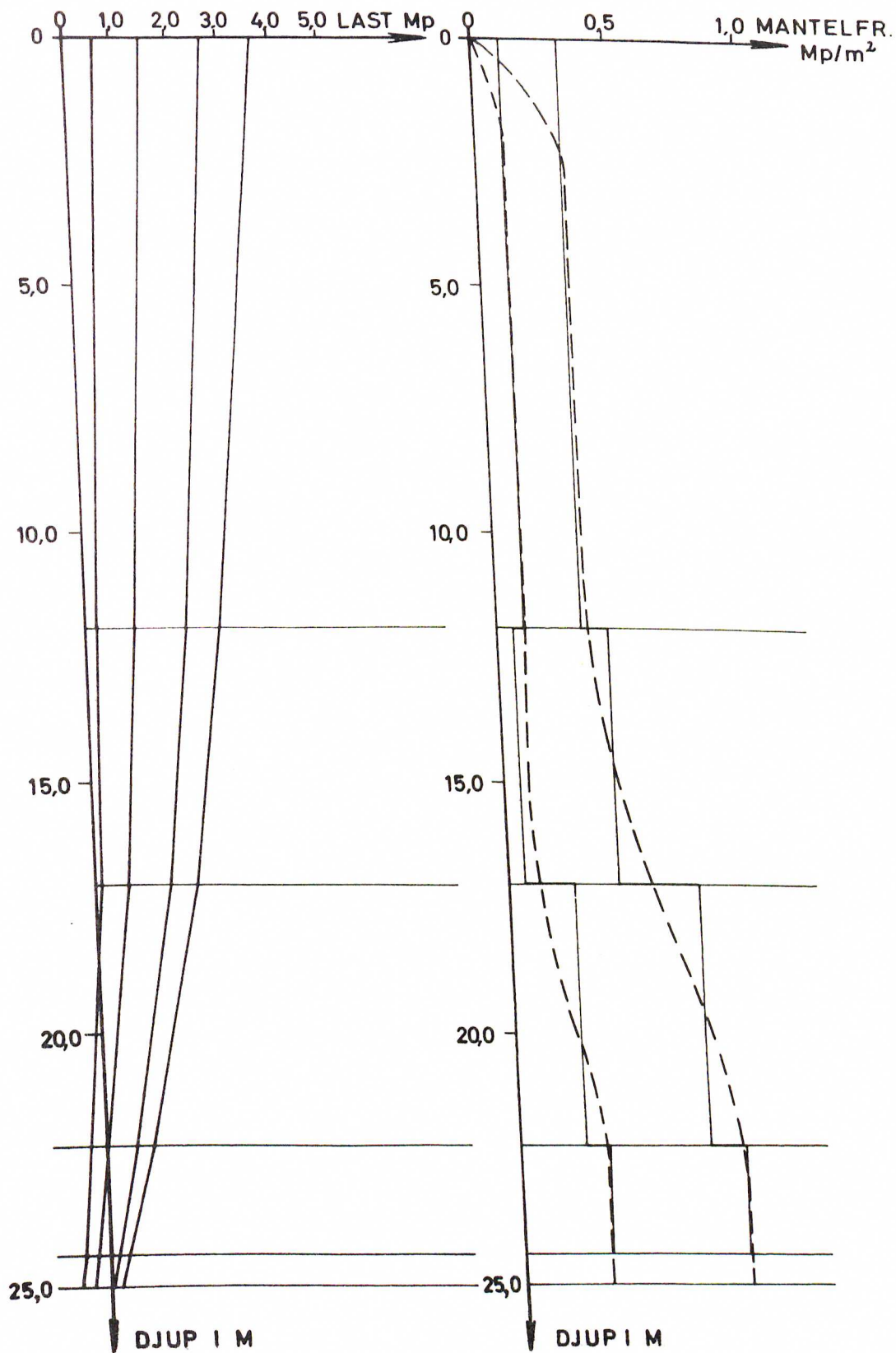
FIGUR 34. Trycksondens och pålens spetsmotstånd. Den streckade linjen motsvarar $N_q = 20$.



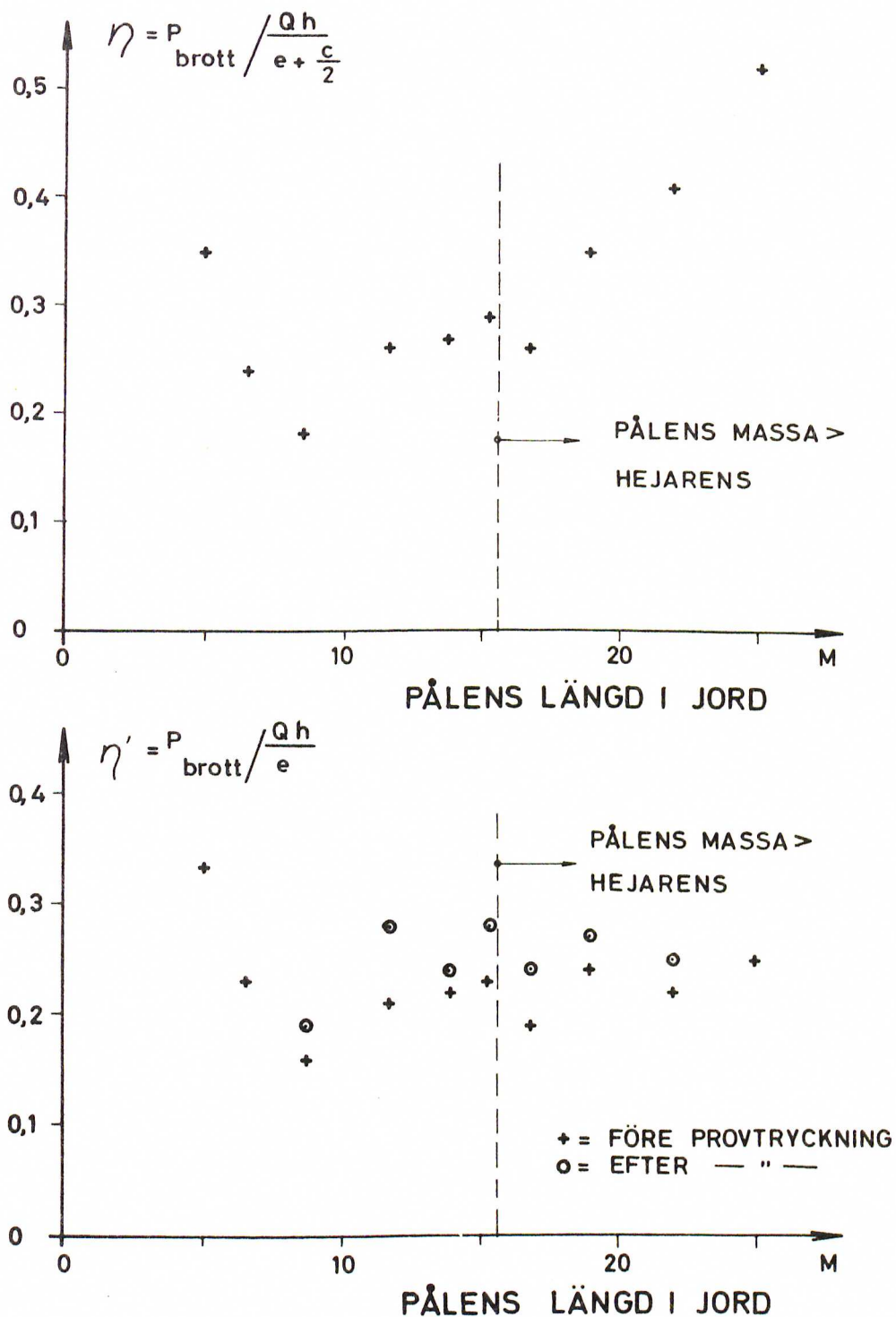
FIGUR 35. Sammanställning av brottlaster från de tio provbelastningarna. De heldragna staplarna är spetslastens del av brottlasten. Den punktstreckade linjen visar brottlasten vid en triangulär fördelning av mantelfriktioner med konstanter anpassade för de korta pållängderna. Den streckade linjen visar mantelbärförmågans tillväxt med pålens längd i jord. Denna räta linje motsvarar ett konstant specifikt mantelmotstånd av $1,0 \text{ Mp/m}^2$.



FIGUR 36. Last - deformationsdiagram för dragförsöket.



FIGUR 37. Dragförsök, lastupptagning och mantelfriktionens fördelning vid brottlast, samt vid lägre last.



FIGUR 38. Variationen med pålens längd i jord för de empiriska "konstanterna" η respektive η' i slagningsformlerna

$$P_{\text{brott}} = \eta \frac{Qh}{e + \frac{c}{2}} \quad \text{och} \quad P_{\text{brott}} = \eta' \frac{Qh}{e}$$