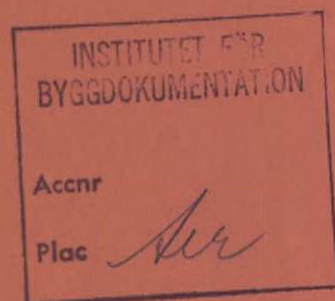


## Provb belastning av slanka stålpålar i lös lera

### Resultat av belastningsförsök

**Håkan Bredenberg**



R53:1982

PROVBELASTNING AV SLANKA STÄLPÄLAR  
I LÖS LERA

Resultat av belastningsförsök

Håkan Bredenberg

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
730558-3 från Statens råd för byggnadsforskning  
till Bjurströms Geotekniska Byrå AB, numera in-  
gående i Tyréns Företagsgrupp AB, Stockholm.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R53:1982

ISBN 91-540-3695-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1982

## INNEHÅLL

FÖRORD av Gösta Bjurström .....	5
FÖRORD TILL PROVBELASTNINGAR .....	9
1. PROBLEMSTÄLLNING, INLEDNING .....	11
2. TEORETISK BAKGRUND .....	13
2.1 Ral påle med konstant bäddmodul ....	14
2.2 Initiellt utböjd påle .....	15
2.3 Inverkan av egenspanningar i pålmaterialet .....	16
2.4 Inverkan av skarvar .....	17
2.5 Storleken av bäddmodulen kd .....	19
3. FÖRSÖKSUTRUSTNING OCH UTFÖRANDE ....	21
3.1 Försöksplats, grundförhållanden ....	21
3.2 Pålarnas utformning .....	22
3.3 Slagutrustning .....	24
3.4 Rakhetskontroll .....	25
3.5 Injektering .....	25
3.6 Provbekastning .....	26
3.7 Lastprogram, kort- och långtidsbelastning .....	28
3.8 Pålmaterialets bärförmåga .....	28
4. FÖRSÖKSRESULTAT .....	29
4.1 Resultatsammanställning .....	29
4.2 Uppdragning av pålar .....	30
4.3 Inklinometermätningar .....	31
4.4 Slagförsök på pålspets och -skarvar.	31
4.5 Stötvågsmätningar .....	32
5. ANALYS AV FÖRSÖKSRESULTAT .....	35
5.1 Knäcklast .....	35
5.2 Brott vid pålspetsen .....	36
6. SLUTSATSER .....	39
6.1 Stuklast .....	39
6.2 Knäcklast .....	39
6.3 Spetsbrottlast .....	39
7. FÖRSÖKENS PRAKTISKA VÄRDE .....	41
7.1 Tydgodkännande .....	41
7.2 Konstruktiva synpunkter .....	41



7.3	Stoppslagning .....	41
7.4	Rakhetskontroll, rengöring .....	42
	REFERENSER .....	43
	SAMMANFATTNING .....	45
	SUMMARY .....	47

#### BILAGEFÖRTECKNING

1	Plan över försöksområde
2	Detaljplaner, elevationer och sektioner visande slagna pålar
2:1	Plats 1
2:2	Plats 2
2:3	Plats 3
3	Mothåll vid provbelastning
4	Lastprogram, korttidsbelastning
5	Resultat från provbelastning, uppmätning av uppdragna pålar m m
5:1	Påle 1, korttidsbelastning
5:2	Påle 2, korttidsbelastning
5:3	Påle 3, korttidsbelastning
5:4	Påle 4, ej fylld med cementbruk, korttidsbelastning
5:5	Påle 6, korttidsbelastning
5:6	Påle 7, korttidsbelastning
5:7	Påle 8, korttidsbelastning
5:8	Påle 9, ej fylld med cementbruk, korttidsbelastning
5:9	Påle 10, ej fylld med cementbruk, korttidsbelastning
5:10	Påle 11, korttidsbelastning
5:11	Påle 12, korttidsbelastning
5:12	Påle 14, korttidsbelastning
5:13	Påle 15, korttidsbelastning
5:14	Påle 13, långtidsbelastning
5:15	Påle 16, långtidsbelastning
5:16	Påle 18, ej fylld med cementbruk, långtidsbelastning
5:17	Pålarna 13, 16, 18, krypning vid avlastning
6	Resultat av inklinometermätningar
6:1	Påle 4, plats 1, korttidsbelastning
6:2	Påle 9, plats 2, korttidsbelastning
6:3	Påle 10, plats 2, korttidsbelastning
6:4	Påle 18, plats 3, långtidsbelastning

## FÖRORD

av fil lic, civ ing Gösta Bjurström

## BJURSTRÖMPÅLEN

Det har sedan länge funnits ett behov av en påle som är så lätthanterlig att den kan bäras av en man och slås ned med en lätt tryckluftshejare. En sådan påle borde enkelt kunna skarvas även med mycket korta bitar. En ytterligare önskan vore att pålen skulle vara inspekterbar. Den skulle då vara idealisk för användning vid pålning i trånga utrymmen som t ex källare vid grundförstärkning av byggnader. Ett annat tillfälle då en sådan påle vore särskilt lämplig är vid pålning för småhus och där golv i industrier, lagerbyggnader etc har satt sig.

Bjurströmpålen som i princip består av ett stålrör, vilket efter nedslagningen fylls med betong, fyller alla dessa krav.

Det har sedan många år forskats i möjligheten att använda smäckra stålrör som pålar. Orsaken till att sådana pålar hittills endast använts i begränsad omfattning i vårt land torde främst ha varit att bärförmågan bedömts bli liten på grund av risken för knäckning samt att risken för avrostning skulle vara så stor att pålens bärförmåga av den orsaken så småningom skulle kunna äventyras. Andra orsaker kan ha varit svårigheten att framställa en godtagbar skarv samt en ändamålsenlig spets.

Om man däremot bl a genom praktiska prov skulle kunna påvisa att:

- . korrosion praktiskt taget inte förekommer eller att korrosionsrisken kan elimineras
- . den tillåtna lasten kan sättas relativt hög
- . pålen ger god grundläggningsekonomi

skulle en rörpåle ur nationalekonomisk synpunkt ha stor betydelse, bortsett från betydelsen av att stålrör med hög kvalitet skulle få ett nytt användningsområde.

## INGEN KORROSION PÅ STÅL I LERA

Korrosion av stålprodukter är ett mycket observerat fenomen - bl a på grund av de kostnader som underhåll av stålkonstruktioner m m medför - och har bl a i vårt land behandlats i ett stort antal avhandlingar. Efter-som rörpålen praktiskt taget endast kommer till användning i lerområden, är rostningsproblemet huvudsakligen förknippat med vad som händer med en rörpåle nedslagen i lera. Pålen omges då i övre delen av lerans torrskorpa i den mån sådan finns, i delarna därunder av vanligen lös, helt vattenmättad lera och därunder av fastare jord av mo, sand och grus på morän på berg. Vissa av nämnda fastare jordarter kan saknas. Det är således inte helt ovanligt att lera vilar direkt på berg eller att exempelvis morän saknas.

Korrosionen och dess storlek anses vara beroende av bl a jordens pH-värde och resistivitet. Det är emellertid sedan lång tid tillbaka känt att någon korrosion knappast sker i stål, som är omgivet av vattenmättad normal lera eller i jord, dit syre icke kan nå. Detta har verifierats genom forskning av bl a O Arrhenius, A Bergfelt, B Fellenius, A Jerbo och E Sandegren.

## PÅLENS KONSTRUKTIVA UTFORMNING

Stålrörspålen kan, liksom andra typer av pålar, ha olika dimensioner.

Det stålrör, vilket hittills provats vid pålning, har en ytter- och en innerdiameter av 60,3 resp 50,3 mm. Rören som är galvaniserade levereras normalt i längder om 6 m. Vid större pållängder än 6 m eller vid pålning inomhus, där takhöjden inte tillåter så långa pålar, skarvas pålen med galvaniserade rörhylsor med en längd av 300 mm. Hylsorna är med kälsvets fästade vid ett av rören före galvaniseringen. Hylsornas inre diameter är obetydligt större än pålrörets yttre.

Vid pålspetsen finns en stålspets som nedtill är utformad som en dubb med konkav spets.

Stålkvaliteten hos röret och skarvhylsan är mycket hög. Spetsen har en brinellhårdhet av 500.

Komponenterna i pålen specialtillverkas av Wirsbo Bruk under mycket sträng kvalitetskontroll.

Genom dubbens och spetsens utformning får pålen fäste i en även starkt lutande berg- eller blockyta. Pållasten blir genom dubben centriskt nedförd till underlaget.

Pålen är i färdigt skick fylld med injekteringsbetong. På den plant kapade påltoppen sätts en stålplatta fast med sådan area att plattan kan överföra lasten från den ovanliggande konstruktionen utan risk för genomstansning.

#### TRYCKLUFTHEJARE ANVÄNDS

Pålen neddrivs med trycklufthejare. Slagningen avslutas när pålens spets nått fast botten av berg eller block eller när sjunkningen visar avtagande tendens i enlighet med fastställt stoppslagningskriterium. Sedan pålen inspekterats i hela sin längd, fylls den med injekteringsbetong.

#### FÖRSÖK MED KORTA PÅLAR

För att undersöka storleken av brottlasten i själva pålmaterialet (stål och betong) och samtidigt så vitt möjligt utesluta att knäckning kan medverka vid brottbildningen utfördes en serie provningar med påldelar med en längd av endast 10 cm. Dessa längder togs från de uppdragna redan provade pålarna.

Vid provningarna användes

- . betongfyllda rördelar
- . enbart rör
- . urtagna betongkärnor.

Provtryckningsförsöken utfördes vid KTHs laboratorium för bergteknik i en press med 300 tons kapacitet. Vid tryckningen registrerades medelst töjningsgivare och skrivare deformationernas storlek i både axial- och transversalled (dvs längs periferien).

Resultaten visar att brottlasterna för de korta påldelarna är mycket nära de som uppnåtts vid fältförsöken.

#### SÄRSKILD PÅLMASKIN FINNS

Det finns en mängd olika tillfällen då konventionella pålars stora bärförmåga inte fullt kan utnyttjas. Av konstruktionsmässiga skäl slås flera pålar än som är "bärmässigt" nödvändigt.

Bjurströmpålen är i dessa fall genom sin lätthanterlighet vid etablering - inga stora maskiner - och pålning ett ekonomiskt tilltalande alternativ.

Pålgrunden för ett småhus som väger 100 ton kan t ex inte konstrueras för färre pålar än 6-9 även om 3 konventionella pålar klarar lasten. Vid byggnadet av ett fribärande golv i en industri- eller lagerbyggnad kan inte pålningskostnaden ses som en isolerad företeelse. För att fullt utnyttja pålar med hög bärförmåga måste



pålarna slås med relativt stora c/c avstånd, vilket medför att golvet hållfasthetsmässigt måste göras relativt tjockt. Den optimala ekonomin uppnås när kostnaden för golv och pålning tillsammans är ett minimum. Bjurströmpålen träffar ofta detta ekonomiska optimum.

Grundförstärkningar av befintliga byggnader och stora golv har blivit en allt mer uppmärksam fråga. Problemet är ofta att i trånga utrymmen "komma åt" att stabilisera t ex en sjunkande byggnad. Mothåll för att kunna pressa ner pålar är inte alltid lätt att finna.

En speciell pålmaskin har därför konstruerats som mycket enkelt kan "skräddarsys" för rådande takhöjd. Pålarna slås sedan ner på vanligt sätt men i kortare längder.

En ytterligare fördel med Bjurströmpålen, värd att notera, är att genom pålens ringa tvärsnittsarea blir jordundanträngningen liten. Detta är inte minst viktigt vid pålning i närheten av andra byggnader samt i sluttningar ner mot t ex vattendrag, där risk för skred vid stor undanträngning inte kan uteslutas.

Metoden är patenterad.

Ett alternativ till pålning med rör är pålning med räls. Rälspålen tenderar emellertid dels att försvinna ur marknaden och dels är en sådan påle konstruktivt besvärlig att skarva. Nedslagningen måste desstuom ske med relativt tunga redskap.

Sammanfattningsvis kan rörpålen användas som stödpåle vid bl a

- . småhus av skilda slag
- . stora fribärande golv
- . ledningar
- . bryggor
- . fundament för monolitiska konstruktioner
- . vid alla slag av grundförstärkningar
- . vägar och bankar.

Slutligen kan rörande ekonomiska synpunkter nämnas att spillprocenten är mycket liten. Vid de pålningar som hittills utförts har knappast någon påle bortslagits. Kapade pålbitar kan nyttjas i nya pålar.



## FÖRORD TILL PROVBELASTNINGAR

Fältförsöken som redovisas i denna rapport utfördes 1976/77 vid Sättsjö, Lidingö. Provbekastningarna omfattade ett tjugotal slanka stålplålar som provbekastades till brott och kan därför betecknas som en relativt omfattande provbekastning. Projektet kan betecknas som det hitintills mest omfattande fullskaleförsöket avseende slanka plålar knäckning i lera.

Konstruktion av mothållsanordningar samt biträde vid provbekastningar och uppmätningar samt redovisning av dessa har utförts med stor noggrannhet av dipl ing Laimonis Lakka, TYRENS.

Stabilator AB bidrog med personal och material för påslagning och provbekastning.

Dag Bjurström har ombesörjt planeringsarbetet under initialskedet av försöken. Vidare har utskrifts- och ritarbeten skett genom TYRENS försorg. Dr Håkan Sundquist, TYRENS, har välvilligt granskat föreliggande rapport.

Professor Bengt Broms, KTH, Inst för jord- och bergmekanik, har varit engagerad i olika skeden av undersökningen.

Fil lic Gösta Bjurström har i egenskap av föregångare beträffande användning av slanka rörpålar möjliggjort det aktuella försöket.

Till alla som på olika sätt bidragit till försökens genomförande framförs härmed ett hjärtligt tack.

Stockholm 1981-12-09

Håkan Bredenberg



## 1 PROBLEMSTÄLLNING, INLEDNING

Slanka stålplålar används i Sverige huvudsakligen för grundläggning av småhus och industrigolv. De utnyttjas också i ökande omfattning för förstärkning av äldre byggnaders grundläggning, vilket beror på att erforderligt arbetsutrymme är måttligt och att massundantäckning vid pådrivningen blir av liten omfattning. Det finns en klar tendens till ökad användning av stålrörprofilen istället för begagnad räls som pålmaterial.

Pålen som beskrivs i denna rapport brukar kallas Bjurströmpålen efter civilingenjör Gösta Bjurström som sedan länge förordats och tillämpats grundläggning på slanka stålrörspålar. Den aktuella påltypen har med ledning av erhållna erfarenheter successivt förbättrats. Utvecklingsarbetet har bedrivits i samarbete mellan Bjurströms Geotekniska Byrå AB, Wirsbo Bruk AB och Stabilator AB. Provbekastning och samhörande arbeten har till övervägande del finansierats av Statens råd för byggforskning, BFR.

Pålen kan i korthet beskrivas som ett  $\emptyset$  60 mm galvaniserat stålrör som efter neddrivningen fylls med cementbruk. Skarvarna är av mufftyp och nedtill finns en fast bergspets. För slagning nyttjas normalt dubbelverkande snabbslående luft- eller hydraulhejare. Efter kapning och avplaning förses pålhuvudet med en tryckplatta av stål.

Det är sedan länge känt att knäckbrott inträffar för slanka stålplålar om den jord som omger pålarna består av lera med tillräckligt låg hållfasthet. Inverkan av initiella utböjningar i skarvar och andra imperfektioner hos neddrivna pålar är ofullständigt klarlagd, vilket motiverat relativt stora säkerhetsmarginaler vid utarbetandet av normer och föreskrifter för bestämning av tillåten belastning på pålar av aktuell utformning.

För att få en säkrare uppfattning om bärförmågan för skarvade Bjurströmspålar i lös lera utfördes under 1976 den serie belastningsförsök som redovisas i denna rapport. Ytterligare ett motiv till de beskrivna försöken var att tidigare genomförda provbelastningar visat att de tillåtna pållaster som erhöles vid tillämpning av gällande normer för stålplålar var orealistiskt låga i jämförelse med pålarnas uppmätta bärförmåga.



## 2 TEORETISK BAKGRUND

Fig 1 visar en initieellt rak och spänningsfri sträva med böjstyvheten  $EI(x)$  i ett omgivande medium, vars deformationsegenskaper beskrivs av relationen

$$p(x) = kd(x)y \quad (1)$$

där  $p(x)$  = kontakttryck mellan balk och underlag

$kd(x)$  = bäddmodul

$y$  = rörelse

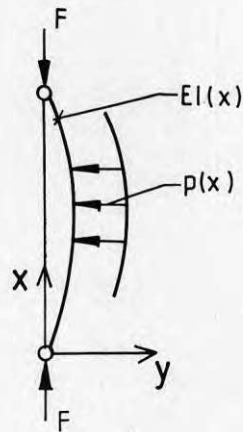


FIG 1 Sträva i elastiskt medium

En approximation av ett sådant underlag utgörs av ett stort antal vinkelrätt mot balken anbringade linjärelastiska fjädrar som endast upptar last i sin längdriktning, ett s k Winklerunderlag.

Sambandet mellan sidokraft  $p(x)$ , böjstyvhet  $EI(x)$  och utböjning  $y$  för en sådan balk kan skrivas

$$\frac{d^2}{dx^2} (EI(x) \frac{d^2 y}{dx^2}) = p(x) \quad (2)$$

Under förutsättning att den statiska axiella kraften  $F$  har konstant riktning gäller

$$p(x) = -F \frac{d^2 y}{dx^2} - kd(x)y \quad (3)$$

som insatt i Ekv 2 ger

$$EI(x) \frac{d^4 y}{dx^4} + F \frac{d^2 y}{dx^2} + kd(x)y = 0 \quad (4)$$



Problemet att beräkna den minsta last ( $F_k$ ) för vilket ett utböjt jämviktsläge existerar, dvs knäcklasten, består i att finna det minsta egenvärdet till Ekv 4. Ur numerisk synpunkt är det då ofta lämpligt att dela upp balken i segment vilket i fysisk mening svarar mot att istället genomföra egenvärdesbestämningen för en balk med finita avstånd mellan fjäderupplagen. Det resulterande egenvärdesproblemet kan tecknas

$$(A - \lambda B) y = 0 \quad (5)$$

se ref 1 (Bredenberg, 1976). Genom införande av stegvis pålastning och modifiering av böjstyvhets- och bäddmodulvärden som funktion av beräknade rörelser och ett beräknat anliggningsstryck mellan påle och jord i varje steg kan olinjära materialegenskaper beaktas. Inverkan av varierande geometriska förhållanden, exempelvis successivt ökande vinkeländringar i skarvsnitt, kan medräknas på liknande sätt. En närmare analys av en sådan beräkningsmodell faller dock utanför ramen för denna rapport.

### 2.1 Rak påle i material med konstant bäddmodul

Under förutsättning att pålen är lång, att bäddmodulen och böjstyvheten är konstant, att linjärt elastiska förhållanden råder och att strävan är ledat infästad i ändarna erhålls (ref 2, 3) (Forsell 1918, Granholm 1929)

$$F_k = 2\sqrt{kdEI} \quad (6)$$

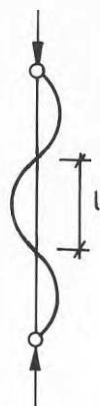


FIG 2 Knäckfigur

varvid längden  $l$  som beskriver avståndet mellan två närliggande inflexionspunkter för den sinuskurva som utgör knäckmoden beräknas ur uttrycket

$$l = \pi \sqrt[4]{\frac{EI}{kd}} \quad (7)$$

Utöver ovannämnda förutsättningar gäller också att mark och påle förutsätts spänningslösa vid lastens påförande samt att pålen är rak.

Rinkert (1960) (ref 4) har med ledning av försöksresultat och med hänsyn tagen till plastiska deformationer i lera kring stålpålar föreslagit

$$F_k = 1.4\sqrt{kdEI} \quad (8)$$

## 2.2 Initiellt utböjd påle

Broms (1967) (ref 5) har framhållit initialutböjningens betydelse för bärförmågans storlek och angivit en beräkningsmetod där en godtycklig initialutböjning beskrivs med Fourier-serier.

Till normalspänningar av axialkraften  $F$  skall i en böjd påle adderas en mot krökningen svarande böjspänning, dvs

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} \quad (9)$$

där  $A$  = pålens tvärsnittarea  
 $W$  = pålens böjmotståndsmoment  
 $M$  = böjmoment.

Böjmomentet kan beräknas ur den elastiska linjens ekvation

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI(x)} \quad (10)$$

som ger

$$M \approx \frac{EI(x)}{R(x)} \quad (11)$$

där  $R(x)$  = pålens krökningsradie, vilken kan erhållas ur differensapproximationen

$$\frac{1}{R(x)} \approx \frac{d^2y}{dx^2} \approx \frac{y_i - 2y_{i+1} + y_{i+2}}{(\Delta x)^2} \quad (12)$$

med beteckningar enligt FIG 3.

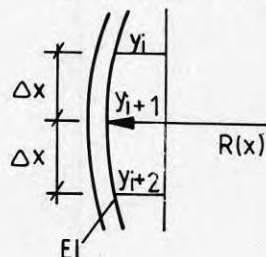


FIG 3 Krökning

Broms föreslår att böjmomentet  $M$  i formel 9 beräknas enligt uttrycket

$$M \approx M_0 \cdot \frac{F_k}{F_k - F} \quad (13)$$

där  $M_0$  är böjmoment i pålen innan belastningen  $F$  påförs. Detta uttrycks överensstämmelse med verkliga förhållanden beror av hur lika den initiella utböjningsfunktionen är knäckmodens sinuskurva enligt formel 7.

Vidare förutsätter beräkningsmetoden elastiska förhållanden varför maximalt tillåtet anliggningsstryck mellan jord och påle föreslås begränsat till  $4,5 c_u$  ( $c_u$ =jordens odränerade skjuvhållfasthet) när tillåtna spänningar i pålmaterialet läggs till grund för beräkning av tillåten pållast.

### 2.3 Inverkan av egenspanningar i pålmaterialet

Stålpålar kan utöver spänningar från krokighet orsakad av neddrivningen även förete egenspanningar från tillverkningen. Bernander och Svensk (1970) (ref 6) har behandlat frågan om pålars bärförmåga vid samtidig inverkan av spänningar av initiell utböjning och egenspanningar i pålmaterialet.

Beträffande egenspanningar uppskattas motsvarande reduktion i bärförmågan till endast ca 10% för en profiltyp som vanligen är i hög grad förknippad med tillverkningsegenspanningar, nämligen massiva valsämnen.

Sambandet mellan axiellast ( $F$ ) och utböjning ( $y$ ) anges till

$$F = F_k \cdot \frac{y}{y + \delta_0} \quad (14)$$

där  $\delta_0$  = initiell utböjning, som föreslås relaterad till en cirkelbåge med radien  $R_0$  genom tre konsekutiva inflexionspunkter för den tidigare nämnda sinusformade knäckningsfiguren, se FIG 4.  $F_k$  beräknas enligt formel 6.

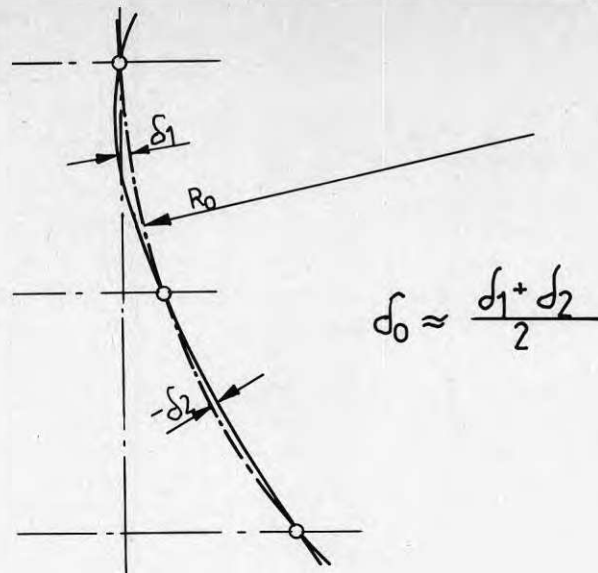


FIG 4 Deformationsfigur hos initialkrökt påle  
(Bernander, Svensk, 1970)

Den axialkraft ( $F_{gr\ddot{a}ns}$ ) som alstrar en spänning lika med sträckgränsen i pålmaterialet beräknas ur uttrycket

$$F_{gr\ddot{a}ns} = \frac{(\sigma_{stuk} - \Delta\sigma)A}{1 + \frac{y + \delta_0}{y} \cdot \frac{A}{W}} \quad (15)$$

där  $\sigma_{stuk}$  = pålmaterialets stukgräns

$\Delta\sigma$  = spänning som motsvarar initialdeformationen

Ett bivillkor är att sidorörelsen  $y$  ej blir så stor att förutsättningen om elastiska förhållanden upphör att gälla. En maximal rörelse =  $0.3 d$  där  $d$ =påle's diameter har föreslagits för långtidsförhållanden. Rekommendationen att relatera initialutböjningen till en cirkelbåge innebär, som framgår av formel 14, att en påle med konstant krökningsradie erhåller samma bärförmåga som en rak påle, bortsett från den spänningsökning den konstanta krökningen orsakar.

#### 2.4 Inverkan av skarvar

Den aktuella påltypens muffskarv medför dels ett visst glapp i skarven, dels ofta en viss vinkeländring orsakad av neddrivningen. Generellt sett minskar dessa omständigheter knäcklasten jämfört med en oskarvad påle.

Om pålhuvudet ej är förhindrat att röra sig transversellt, övergår vid i övrigt samma förutsättningar knäcklasten enligt formel 6 till

$$F'_k = \sqrt{kdEI} \quad (16)$$

dvs hälften av värdet som gäller för en vid huvudet styrd påle. Om en pålskarv i jorden betraktas som ledad och ej sidostyrd ger alltså formel (19) pålens knäcklast om pålen är lång och initieellt rak.

I verkligheten finns dock alltid en viss styvhet mot sidorörelse för en sådan skarv. Å andra sidan medför ofta skarvar en viss initiell vinkeländring, vilket medför en transversell kraft i skarvsnittet. Om vinkeländringen uppgår till  $n:1$  blir den sidokraft  $T$  som påverkar skarvsnittet

$$T = \frac{F}{\sqrt{n^2 + 1}} \approx \frac{F}{n} \quad (17)$$

Motsvarande böjmoment, sidorörelser och vinkeländring för skarvsnittet kan för elastiska jordförhållanden beräknas om påldelarna över och under skarvsnittet betraktas som balkar på elastiskt underlag, Heteny' (1941), ref 7. Skarvsnittets rörelse och vinkeländring för en viss last medför ytterligare spänningar, varför problemet är icke-linjärt även av geometriska orsaker. Genom att i beräkningarna påföra axiellast stegvis kan den axiella bärförmågan bestämmas varvid skarvsnittets inspänningsförhållanden och kontakttrycket mellan påle och jord i varje steg justeras med hänsyn till beräknade rörelser och spänningsnivåer.

Om skarven betraktas som ledad och varje pådel har längden minst  $4 L_e$  där

$$L_e = \sqrt[4]{\frac{4EI}{kd}} \quad (18)$$

kan varje del beräknas som en halvoändligt lång balk på elastiskt underlag påverkad av en punktlast i änden, Bredenberg och Broms 1978 (ref 8). För elastiska förhållanden gäller för en sådan balk  $p \approx \frac{F}{2n}$

$$\text{Böjmoment:} \quad M = 0.32 PL_e \quad (19)$$

$$\text{Sidorörelse:} \quad y = \frac{2P}{Lkb} \quad (20)$$

$$\text{Vinkeländring:} \quad y' = \frac{2P}{L^2_{kb}} \quad (21)$$

$$\text{Kontakttryck:} \quad p = \frac{2P}{Lk} \quad (22)$$

Tillåten belastning ges av villkoren att resulterande spänningar i pålmaterialet av axialkraft, böjmoment och tvärkraft ej får överstiga föreskrivna värden och



att kontaktrycket  $p$  högst får uppgå till 3 à 6  $c_u$ .  
Vinkeländringen  $y'$  orsakar en transversieell tilläggs-  
kraft

$$P' \approx \frac{F}{2y'} \quad (23)$$

som dock ofta kan försummas.

Sammanfattningsvis finner man således att en skarv teoretiskt nedsätter en påles knäcklast. Ett undre gränsvärde är en halvering av bärförmågan jämfört med en oskarvad påle, men en så stor reduktion torde normalt ej förekomma i praktiken. Den skarvade pålens knäcklast bestäms istället av ett samspel mellan ett flertal faktorer där bl a skarvarnas inspänningsförhållanden ingår som en variabel vilken är svår att kvantifiera för en viss påle. Som nämnts tidigare var ett av syftena med försöken att under verkliga förhållanden studera skarvarnas inverkan på pålarnas knäcklast.

## 2.5 Storleken av bäddmodulen $k_d$

Antagandet om en konstant bäddmodul  $k$  är som nämnts en approximation av de verkliga förhållandena. Bergfelt (1950) (ref 9) har från ett stort antal belastningsförsök omfattande ca 200 modellpålar av olika utformning beräknat  $k_d$  enligt formel 6 till ca 20  $c_u$ . Även för andra belastningsförsök i full skala har liknande resultat erhållits Bjerrum 1957 (ref 10) m fl. Variationer om ca  $\pm 50\%$  vid på så sätt beräknade knäcklaster enligt formel 6 är relativt vanliga. Värdet  $k_d = 20c_u$  antages vanligen svara mot långtidförhållanden medan  $k = 80c_u$  brukar användas för knäcklastberäkning för belastning med kort varaktighet.

Bäddmodulen  $k$  kan även beräknas enligt Vésic (1961) (ref 11)

$$k_d = 0.65 \sqrt[12]{\frac{E_{jord} d^4}{EI}} \cdot \frac{E_{jord}}{1-\nu^2} \quad (24)$$

där  $d$  = påldiameter

$\nu$  = jordens kontraktionstal

$E_{jord}$  = jordens elasticitetsmodul

Ofta antas därvid följande värden

$$\text{korttidslast} \begin{cases} E_{jord} = 50 c_u \\ \nu = 0 \end{cases} \quad (25a)$$

$$\text{långtidslast} \begin{cases} E_{jord} = 200 c_u \\ \nu = 0.5 \end{cases} \quad (25b)$$

Beräkning av  $k_d$  för mellanliggande tidpunkter  $k_{d,t}$  kan enligt Broms och Bredenberg (1978) (ref 8) uppskattas ur uttrycket

$$k_{d,t} \approx \frac{k_{d, \text{kort tid}}}{1 + \frac{\sqrt{t}}{d}} \quad (26)$$

där  $t$  = tid i år  
 $d$  = påldiameter i meter

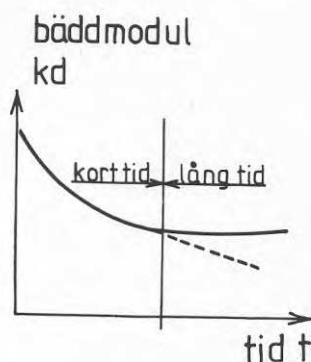


FIG 5 Variation av  $k_d$  som funktion av tiden

Därvid har antagits att lerans konsolideringskoefficient är  $1 \text{ m}^2/\text{år}$  och att konsolideringsdjupet motsvarar 1 påldiameter samt att konsolidering endast sker i horisontell led. Man finner då att "långtidsförhållanden" uppnås efter tiden ca  $5d^2$  år vilket för de aktuella försöken svarar mot tidsrymden någon vecka.

### 3 FÖRSÖKSUTRUSTNING OCH UTFÖRANDE

#### 3.1 Försöksplats, grundförhållanden

Till försöksplats valdes ett ängsområde vid Sättsjö på Lidingö norr om Stockholm. En vy över provplatsen visas på FIG 6. De olika försöksstationernas lägen framgår av Bilaga 3.



FIG 6 Vy över provplatsen

Marken består under 0,5 till 2,0 m torrskorpelera av 2 till 7 m lös lera med skjuvhållfastheten 8 à 12 kPa där det lägre värdet avser jordmaterialet närmast under torrskorpan, se Fig 7. Konsolideringskoefficienten  $c_v$  bestämd vid ödometerförsök varierar mellan (1 à 3)  $\times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ . Konflytgränsen (finlekstalet) är 70 à 80%. Leran underlagras av morän på berg.

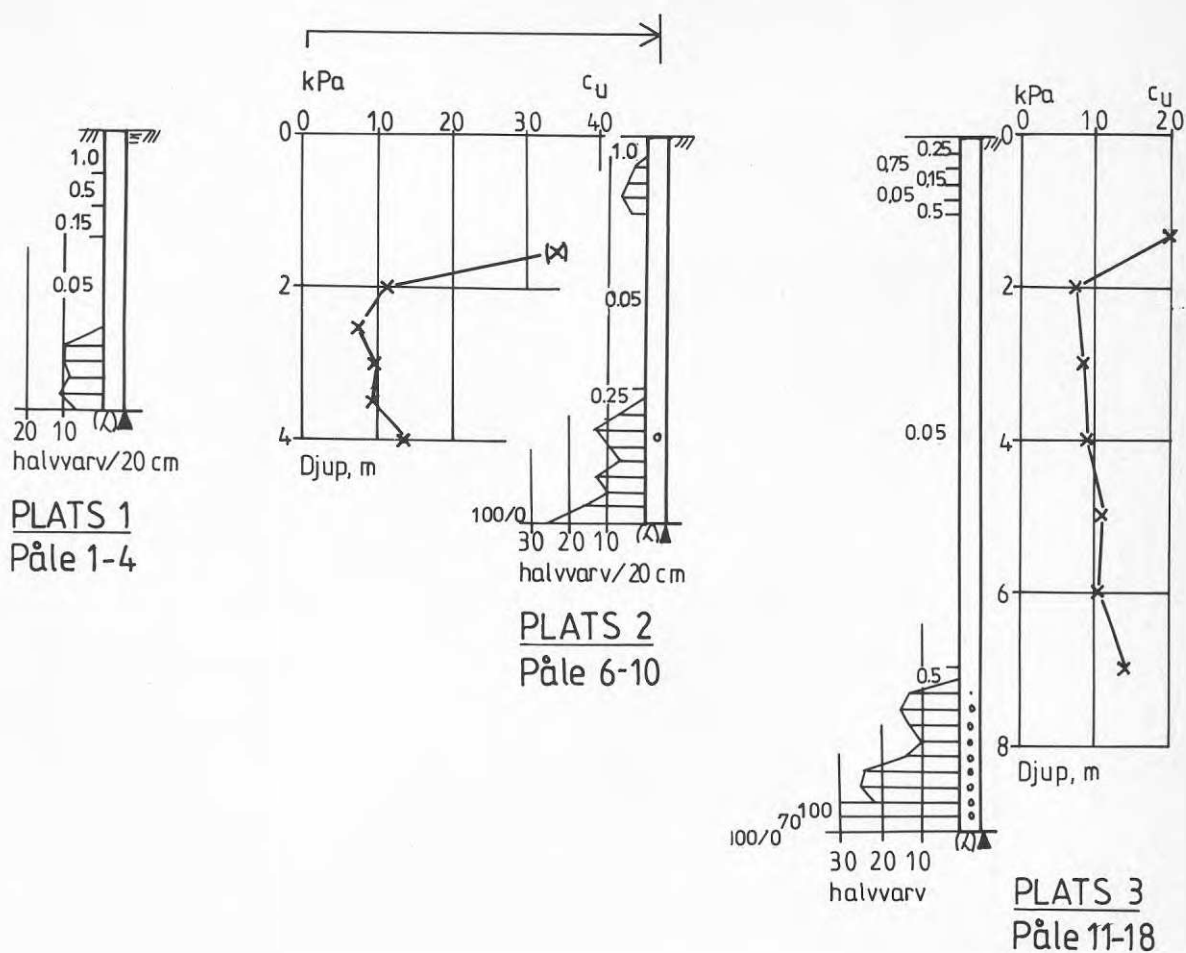


FIG 7 Geotekniska förhållanden på de olika försöksplatserna

### 3.2 Pålarnas utformning

Pålarnas utformning framgår av FIG 8. Tillverkning sker på Wirsbo Bruk och pälarnas levereras i 1, 2, 3 och 5 m längder. Skarvmuffen svetsas på överpålen innan leverans till arbetsplatsen. Vid skarvning träas överpålen skarvmuff över underpålen överände.

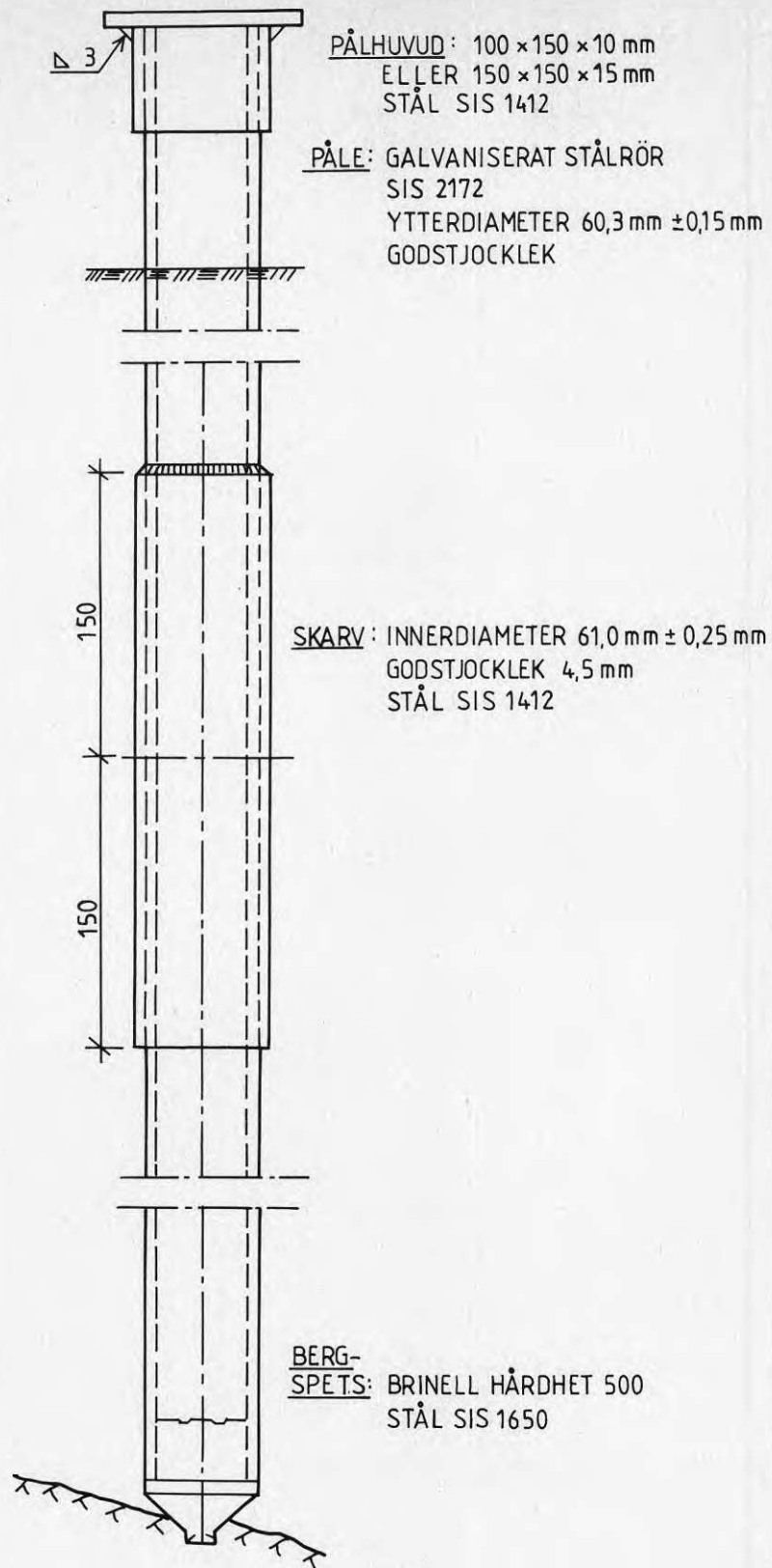


FIG 8 Dimensioner för pålhuvud, -skarv och bergspets



### 3.3 Slagutrustning

Pålarna slås vanligen med lätt trycklufthejare. Vid den akteuella provbelastningen används en dubbelverkande lufthejare av typ MacKiernan-Terry nr 2 med följande data

Nettovikt	155 kg
Kolvvikt	22 kg
Dynavikt	12 kg
Slaglängd	10,8 cm
Kolvlängd	34,0 cm
Kolvarea	83,0 cm <sup>2</sup>
Slagantal/min	ca 500
Energi/slag	220 Nm

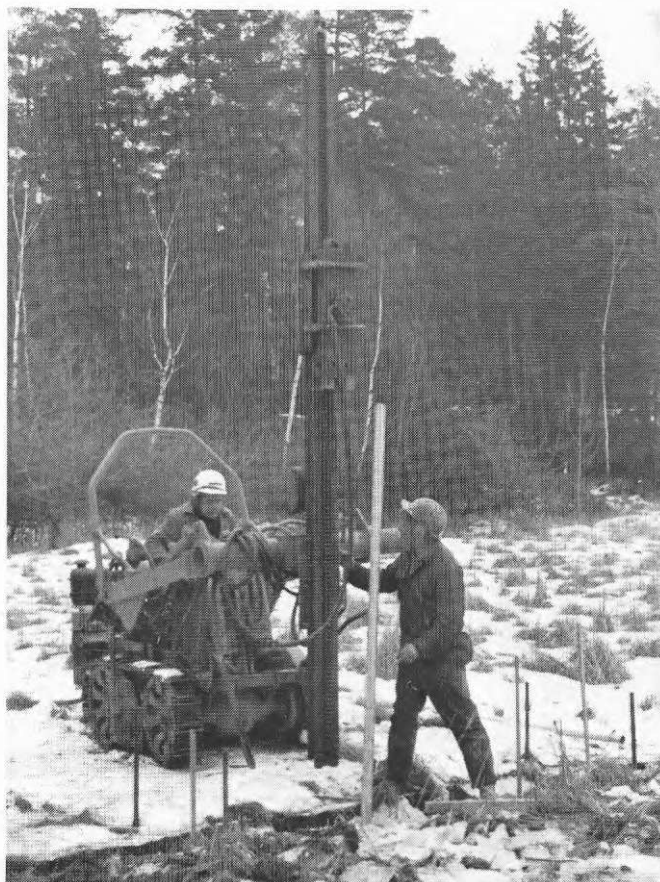
Värdena gäller ny hammare vid arbetsövertrycket 0,63 MPa. Kolvens anslagshastighet är ca 4,4 m/s. Aktuell luftmängd vid slagning är ca 5 m<sup>3</sup>/min. Mellan kompressor och hejare fanns ca 40 m Ø1" slang. Vid mätning med nålmanometer erhöles vid slagning följande övertryck

vid kompressor	0,63 MPa(6,3 kp/cm <sup>2</sup> )
vid hejare	0,52 MPa(5,2 kp/cm <sup>2</sup> )

Ett foto av den använda slagutrustningen visas på FIG 9. Hejaren är monterad i en 5 m bom på ett självgående larvburet pålningsaggregat av typ Schmidagh. Utrustningen betjänas av två man.

FIG 9

Slagutrustning



Som stoppslagskriterium valdes i enlighet med gällande normer högst 5 mm sjunkning per minut i 3 på varandra följande minuter med avtagande sjunkningstendens. För de flesta provpålarna var sjunkningshastigheten vid stoppslagning dock avsevärt mindre än 5 mm/minut.

Totalt slogs 18 pålar fördelade på de tre mätstationerna. Uppnådda slagdjup, skarvantal, skarvlägen m m visas i BILAGA 2:1-3.

### 3.4 Rakhetskontroll

Före nedslagning lades pålarna upp på upplag, varefter de horisontella avvikelserna till en raklinje (piano-tråd) mättes. Efter en sådan mätning vreds pålen  $90^\circ$  varefter mätningen upprepades. Den på så sätt uppmätta initialkrokigheten översteg aldrig 1 mm, vilket motsvarar en krökningsradie av minst ca 1000 m, dvs pålarna var praktiskt taget raka före nedslagningen.

Efter nedslagning försågs fyra pålar med ett invändigt plaströr, varefter inklinometermätning utfördes vid olika tillfällena. Plaströret måste anbringas då en invändig rörsöm hindrade inklinometermätning direkt i rören. Mellan stålrör och plaströr fanns ett spelrum om ca 3 mm, vilket försämrade noggrannheten för lutningsmätningarna.

Rör som skulle injekteras och därför inte kunde förses med plaströr (som ej kunde dras upp) kontrollerades i stället med lång tolk. Den använda tolken löpte utan svårighet i alla tolkade pålar.

### 3.5 Injektering

Efter slagning och invändig rensning fylldes pålarna med Std-cementbruk,  $v_{ct} = 0,5$  och 1-vikts% Intrusion Aid. Fyllningen skedde via pump och slang från botten av pålröret. Då rent bruk strömmade ut vid toppen fördes slangen sakta under pumpning uppåt tills pålen var fylld. För att kompensera för brukets sättning skedde ofta viss överfyllning inom en papphylsa som monterats i påltoppen.

Då bruket hårdnat kapades och avplanades pålarna med trissa till slutlig nivå, varefter pålhattar enligt FIG 8 kunde anbringas.

### 3.6 Provbelastning

En vy över försöksutrustningen visas på FIG 10 och i BILAGA 3. På pålplattan anbringades en 0,9 MN-domkraft. Belastning skedde via en handpump vars manometer medgav avläsningsnoggrannheten ca + 2 kN. Domkraften kalibrerades vid institutionen för Byggnadsstatik, KTH.

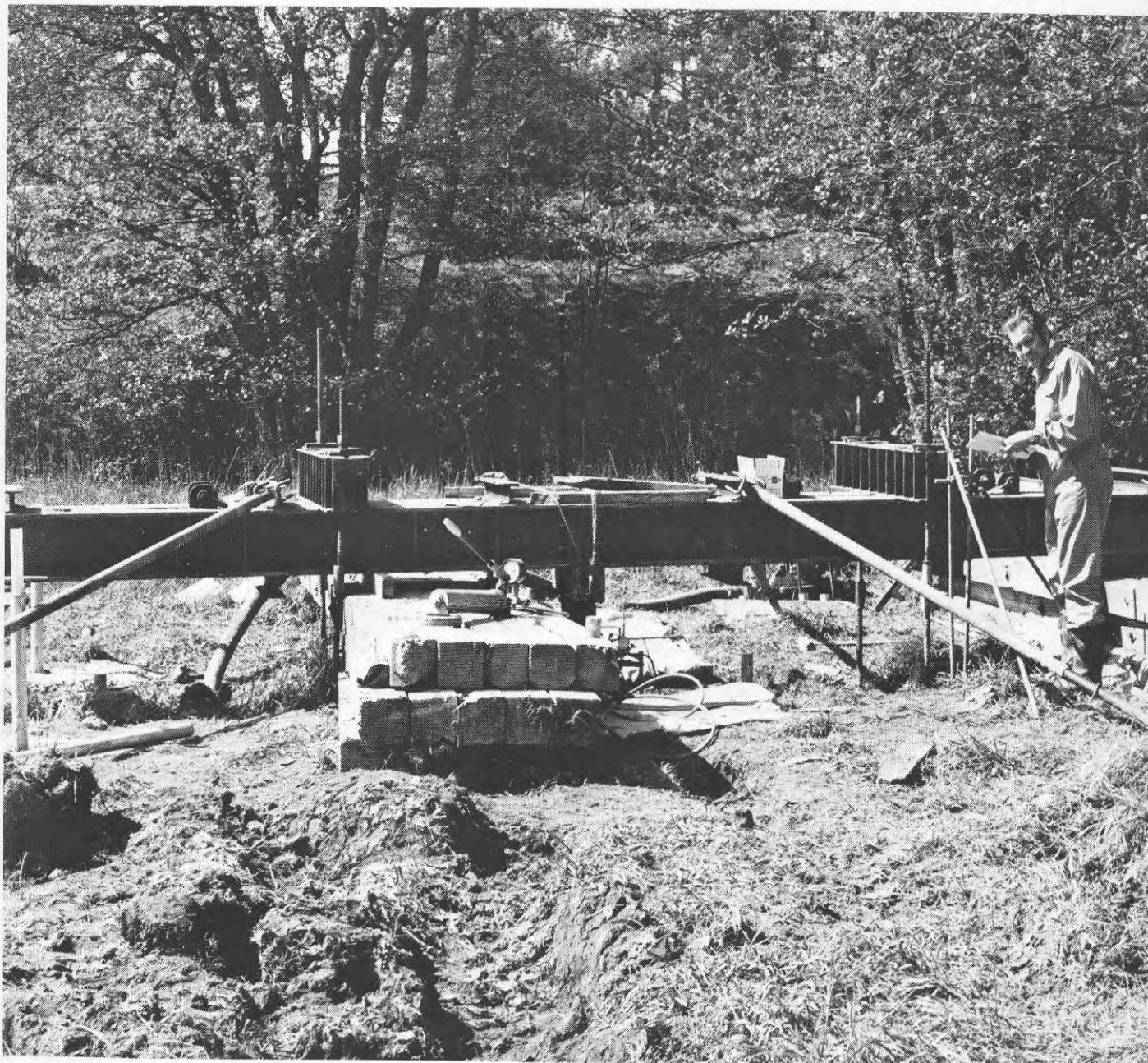


FIG 10 Mothållsram

Pålhuvudet styrdes ledat vid sin övre ände av en "korg" vars utformning framgår av FIG 11, där också placering av mätklockor m m visas. Styrordningen bultades fast i en betongplatta genom vilken pålarna löpte i  $\varnothing$  100 mm uppborrade hål. Uppmätta horisontella rörelser för mothållsramen översteg aldrig 1 à 2 mm.





FIG 11 Mät- och styranordningar vid påltopp

### 3.7 Lastprogram, kort- och långtidsbelastning

Vid korttidsbelastning skedde pålastning i steg om 30 à 40 kN med avlastning till 10 kN vid 100 kN, 200 kN etc. Varje laststeg vidmakthålls i 300 sek eller tills krypningshastigheten avtog. Vid 100 och 200 kN utfördes 100 lastcykler med amplituden 100-50 respektive 200-100 kN och 1 minut per cykel. Lastprogrammet visas också i BILAGA 4.

Efter brott skedde nedpressning så långt domkraften tillät med samtidig registrering av påförd kraft. Slutligen avlastades pålen och återfjädringen mättes.

Provb belastningen tog ca 2 à 4 timmar i anspråk för varje påle. Totalt provades på så sätt 13 pålar, varav 3 inte var betongfyllda.

Tre pålar, varav en var tom, långtidsbelastades. Laststegsnivå valdes här med ledning av respektive påles rörelser. Varje laststeg fick verka i 14 dygn.

### 3.8 Pålmaterialets bärförmåga

Vid tryckning i laboratoriepress av ett stort antal 10 cm långa rördelar erhöles följande medelvärden

	<u>Flytlast</u>	<u><math>\sigma_{f\%}</math></u>
Tomma rör	0,37 MN	0,10 à 0,11
Betongfyllda rör	0,51 MN	0,12 à 0,15

Den stora ökningen av flytlasten betongfyllningen medför kan delvis förklaras av den minskade tvärtöjning av den inneslutna betongen som det omslutande stålröret medför. Man kan notera att den experimentellt bestämda flytgränsen för tomma rörelement svarar mot ca 31% högre medelspänning än materialets nominella undre sträckgräns som är 320 MPa.



## 4 FÖRSÖKSRESULTAT

### 4.1 Resultatsammanställning

En sammanställning av pållängder ( $L$ ), skarvantal ( $m$ ), brott- och proportionalitetslast ( $F_B$  respektive  $F_{el}$ ), stoppslag samt brottstukning ( $B$ ) visas i Tabell 1.

Med brottlaster avses den last där pålskallen erhöj en plötsligt ökande rörelse. Proportionalitetslast avses den last där last- och sättningsskurvan blir uttalat icke-linjär. Till skillnad från förhållandena vid provbelastningar med grövre pålar där begreppet brottlaster ofta kan vara ganska svårtolkat, var vid de aktuella försöken med slanka pålar både brott- och proportionalitetslast mycket lätta att definiera för de flesta pålarna.

Vid konstant belastning på pålskallen uppkommer en tidsberoende rörelse, krypning, vars storlek beror på pållängd, belastningsnivå m m. Krypningen var i allmänhet av storleksordningen 0,01 à 0,05 mm vid 100 à 200 kN för tiden 0-300 s efter lastens påförande.

För vissa pålar vid mätstation 2 (påle 6-10) antyder liten eller obefintlig krypning och små rörelser samt höga brottlaster att mätvärden kan ha påverkats av skarvar belägna i ytligare hårda lager.

Det kan också nämnas att pålens fria del inom styrningsanordningen beräkningsmässigt nedsätter knäcklasten ca 20 kN för långa respektive ca 40 kN för korta pålar.

De uppmätta last-deformationssambanden för belastningsförsöken visas i BILAGA 5:1-17 där också krypdata för varje påle m m redovisas.

TABELL 1 Sammanställning av resultat

Påle nr	Pål-längd L(m)	Antal skarvar m (st)	Brott-last $F_B$ (MN)	Prop last $F_{el}$ (MN)	Stopp-slag (mm/min)	Brott-stukn $\epsilon_B$ %	Anm
KORTTIDSFÖRSÖK							
1	2,3	0	0,35	0,30	1-1-0	0,26	
2	2,3	0	0,47	0,43	0-0-0	0,30	
3	2,1	0	0,39	0,33	2-0-0	0,25	Ej knäckt
4	2,3	0	0,39	0,38	4-0-0	0,28	" "
6	5,7	1	0,51	0,40	2-1-1	0,18	
7	5,8	1	0,52	0,42	2-1-1	0,31	
8	5,7	2	0,56	0,43	1-0-1	0,24	
9	5,9	2	0,36	0,28	2-2-1	0,28	Tom
10	6,1	1	0,45	0,43	0-0-0	0,20	Tom
11	9,1	1	0,26	0,24	0-0-0	0,17	
12	10,3	1	0,42	0,40	1-0-0	0,16	
14	8,8	2	0,47	0,40	2-1-1	0,20	
15	8,7	4	0,30	0,24	3-2-2	0,22	
LÅNGTIDSFÖRSÖK							
13	8,3	2	0,30	0,24	3-1-0	0,21	
16	8,8	4	0,18	0,15	1-0-0	0,10	Ej knäckt
18	9,4	4	0,30	0,21	4-3-1	0,20	Tom

#### 4.2 Uppdragning av pålar

Efter det att belastningsförsöken avslutats drogs pålarna upp i den utsträckning detta var möjligt. Det var i flera fall inte möjligt att återfå hela pålen genom att den vid uppdragningen gick isär i någon av skarvarna.

Tre av de uppdragna pålarna (påle nr 3, 4 och 16) befanns vara raka efter uppdragningen. Brottorsaken kan här antagas vara att jordens bärförmåga vid pålspetsen uppnåtts till skillnad från övriga pålar där de uppdragna pålelementen krökts. Den relativt låga bärförmågan för påle nr 16, som ej var knäckt, kan tänkas bero på att pålens 4 skarvar reducerat spetskraften vid slagningen. På BILAGA 5 visas efter uppdragningen uppmätta krokigheter.

#### 4.3 Inklinometermätningar

I de ofyllda pålarna utfördes inklinometermätningar. Mätningarna redovisas på BILAGA 6:1-6:4. Som framgår av mätresultaten var vinkeländringar i skarvarna 1:150 till 1:200 vanligt förekommande. Mellan skarvarna var påldelarna i stort sett raka. Avvikelserna från en rät linje mellan två närbelägna skarvar för ett och samma 3 m långa pålelement översteg aldrig 1 å 3 mm.

Den maximala pållutningen räknat från en rät linje genom pålhuvud och -spets till lodlinjen var ca 4%. Detta torde representera en övre gräns för ofrivillig riktningsavvikelse då man slår vertikala pålar. Instrumentuppställning för inklinometermätningarna visas på FIG 12.



FIG 12 Inklinometermätning

#### 4.4 Slagförsök på pålspets och -skarvar

Pålskarvar och -spetsar måste kunna motstå långvarig slagning utan att skadas. Genom successiva ändringar av dessa detaljer har ökad hållbarhet för dessa detaljer kunnat uppnås.

Vid de aktuella försöken erhöll vissa pålar mer än 10.000 slag vilket svarar mot ca 20 min ihållande slagning. Inga skador på skarvar eller spetsar iaktogs. Det observerades att skarvarna blev mycket heta och att lera trängde in i pålar vid skarvsnittet vid långvarig slagning. Det är därför nödvändigt att rengöra pålarna invändigt före injekteringen.

#### 4.5 Stötvågsmätningar

För att erhålla en översiktlig bild av det dynamiska kraftspelet under slagningen utfördes mätning av stötkraftintensitet över och under skarven av en på påle nr 19 placerad 1 m lång pådel. Slagningen utfördes med lufthejare typ TEPP 100, vilken liknar den tidigare beskrivna hejaren Mc KIERNAN TERRY nr 2. Läget av mätpunkterna och ett typiskt mätresultat visas i FIG 13. Mätningarna skedde med hjälp av resistiva givare limmade på pålen och tvåkanals oscilloscop.

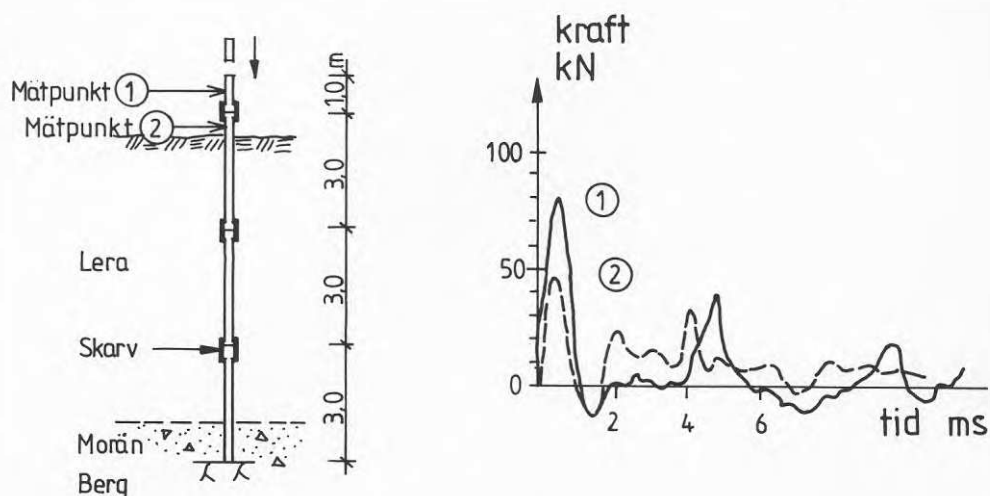


FIG 13 Resultat av stötvågsmätning, påle 19

Om två lika påldelar har full anliggning i ett skarvsnitt kommer en stötvåg att passera skarvsnittet utan reflexion eller distortion, Se Bredenberg 1976 (ref 12).

I det aktuella fallet kommer dock skarvhylsans massa att åstadkomma en viss distortion av den våg som passerar snittet och därmed också en viss reflexion. Vidare påverkar ojämna anliggningsytor o dyl kraftspelet i skarven mellan mätpunkterna på liknande sätt. Den uppmätta vågintensitetens belopp över skarven som maximalt uppmättes till 77 kN är således sannolikt större medan motsvarande mätvärde under skarvsnittet, ca 46 kN, är mindre än den maximala initiella vågintensitet hejaren åstadkom.

Vid pålspetsen sker en reflexion på så sätt att vågen reflekteras som en tryckvåg utan att vågformen ändras om pålspetsen står på oeftergivligt underlag respektive en dragvåg om underläget är mycket eftergivligt. I verkligheten fjädrar vid stoppslagning materialet under spetsen vanligen på ett sådant sätt att en dragreflex följd av en tryckreflex erhålls, Bredenberg 1977 (ref 13). Från den aktuella mätningen i FIG 13 kan successivt dämpade reflexioner svarande mot tidsrymden  $2 L/c = \text{ca } 4 \text{ ms}$  iakttagas. Här betecknar  $L$  pållängden och  $c$  våghastigheten, som för stål är ca  $5.200 \text{ m/s}$ .

Om intensiteten i den första våg som nådde pålspetsen var ca  $60 \text{ kN}$  kan den dynamiska spetskraften alltså ej ha överstigit ca  $120 \text{ kN}$ , vilket är en betydligt lägre kraft än pålarnas knäcklast. Emellertid, om pålspetsen därvid står på fast berg eller ett bärkraftigt block, blir självfallet knappast materialet under spetsen avgörande för pålens brottlast oavsett om vid slagningen uppnådd spetsspänning varit låg. För aktuella förhållanden blir därför en bedömning av pålarnas bärförmåga med ledning av sjunkningshastigheten vid stoppslagningen osäker.





## 5 ANALYS AV FÖRSÖKSRESULTAT

### 5.1 Knäcklast

Som nämnts tidigare kan pålarnas knäcklast med vissa förenklade förutsättningar beräknas ur uttrycket

$$F_k = 2\sqrt{kdEI} \quad (27)$$

där  $EI$  = böjstyvhet =  $70 \text{ kNm}^2$

$kd = 20c_u = 160 \text{ kPa}$  för långtidslast

$kd = 80c_u = 640 \text{ kPa}$  för korttidslast

där  $c_u$  = lerans odränerade skjuvhållfasthet som satts till  $8 \text{ kPa}$ , jämför utförd geundersökning, sid 22.

Med dessa värden erhålls

$F_k = 0,21 \text{ MN}$  (21 ton): långtidslast

$F_k = 0,42 \text{ MN}$  (42 ton): korttidslast.

I tabell 2 visas en jämförelse mellan beräknade och uppmätta knäcklast. Observera att de försök där pålarna var raka efter provbelastning, dvs ej hade knäckts, ej medräknats.

Som framgår av tabellen är för korttidsbelastning förhållandet mellan lägsta och högsta uppmätta brottlast ca 2, medan medelvärdet av de uppmätta knäcklasterna visar god överensstämmelse med beräknad last enligt Ekv 27. Om brottlasterna för påle 6, 7 och 8, som är i nivå med pålmaterialets bärförmåga, ej medräknas minskar medelvärdet från  $0,42 \text{ MN}$  till  $0,39 \text{ MN}$ .

Den relativt stora spridningen beror sannolikt delvis på olika initialkrokighet. Inverkan av sådana initialimperfectioner för varje enskild påle har dock ej kunnat utredas i detalj eftersom endast ett fåtal pålar kunde inklinometermätas.

Det framgår vidare av tabellerna 1 och 2 att en eller två skarvar ej synes påverka knäcklasten. Påle nr 15 med 4 skarvar hade dock lägre knäcklast ( $0,30 \text{ MN}$ ) än genomsnittet, vilket emellertid också gällde påle nr 11 ( $0,26 \text{ MN}$ ), som hade endast en skarv. Någon säker slutsats om inverkan av skarvavtal kan således knappast erhållas ur det begränsade försökmaterialet.

TABELL 2 Jämförelse mellan uppmätta och beräknade knäcklaster  
Enbart pålar med knäckbrott redovisas

Påle nr			
Korttidslast	$F_k$ , beräkn (MN)	$F_k$ , uppmätt (MN)	$F_k$ , uppmätt
			$F_k$ , beräknad
1	0,42	0,35	0,83
2	0,42	0,47	1,12
6	0,42	0,51	1,21
7	0,42	0,52	1,24
8	0,42	0,56	1,33
9	0,42	0,36	0,86
10	0,42	0,45	1,07
11	0,42	0,26	0,62
12	0,42	0,42	1,00
14	0,42	0,47	1,12
15	0,42	<u>0,30</u>	<u>0,71</u>
		Medel 0,42	Medel 1,01
Långtidslast			
13	0,21	0,30	1,43
18	0,21	0,30	1,43

Man kan notera att den uppmätta knäcklasten för långtidsbelastning vid påle nr 13 och 18 (0,30 MN) var ca 43% högre än den beräknade.

## 5.2 Brott vid pålspetsen

För 3 av 16 till brott belastade pålar erhöles ej knäckning, se tabell 3.

TABELL 3 Ej knäckta pålar

Pålar nr	Brottlast (MN)	Anm
3	0,39	-
4	0,39	Tom
16	0,18	-

Särskilt anmärkningsvärd är den låga brottlasten för påle nr 16 (0,18 MN), som stoppslogs till "nollsjunkning" i 2 minuter. En tänkbar förklaring är att pålens 4 skarvar inverkat dämpande vid slagningen så att motsvarande spetskraft blivit låg. Som framgår av Tabell 1 var pålens kompression vid brott endast 0,1%, vilket i stort sett är hälften av motsvarande värden för omgivande pålar. Detta kan bero på att pålspetsen vid neddrivningen hejdats av en sten och sedan givit vika vid den efterföljande statiska provbelastningen.





## 6 SLUTSATSER

### 6.1 Stuklast

En god överensstämmelse mellan uppmätt maximal bärförmåga (ca 0,5 MN eller 50 ton) och uppmätt axiell brottlast för betongfyllda 10 cm höga prover har erhållits. Motsvarande medelspänning för ofyllda rörelement var ca 30% högre än stålmaterialets undre nominella sträckgräns  $\sigma_{su}$ . Brottstukningen för pålarna var 2 à 3 ggr större än för 10 cm-proverna.

### 6.2 Knäcklast

Om pålarnas knäcklast definieras som den belastning då pålhuvudets rörelse ökar markant erhålls medelvärdet 0,36 MN för 11 knäckbrott vid korttidsförsök, som kan jämföras med motsvarande värde beräknat ur uttrycket

$$F_k = 2 \sqrt{kdEI} \quad \begin{array}{l} (kd=80c_u) \\ (c_u=8 \text{ kPa}) \end{array}$$

som blir 0,42 MN. Motsvarande avvikelser, ca 15% samt spridningen i de observerade knäcklasterna (lägst 0,24, högst 0,43 MN) kan antas bero på initiella skarvinkeländringar och andra liknande avvikelser från ideella förhållanden.

### 6.3 Spetsbrottlast

Då en Bjurströmpåle omges av lös lera till fast underlag kan praktiskt taget all last anses nedförd till pålspetsen. Där pålen neddrivits till kontakt med fast berg eller liknande kan därför bärförmågan antas begränsad av pålens knäck- eller stuklast.

Om pålen har många skarvar kan emellertid sannolikt neddrivningen i ogynnsamma fall hindras genom stopp på sten eller annat hinder vars bärförmåga är lägre än stuk- respektive knäcklasten. Den uppnådda dynamiska spetskraften kan teoretiskt bli maximalt lika med dubbla beloppet av den stötkraft hejaren förmår initiera i pålen. I verkligheten torde spetskraften normalt bli betydligt mindre beroende på dämpning längs pålen, fjädring vid spetsen m m, Fjelkner 1972, (ref. 14), Bredenberg 1978, (ref 15). För de lufthejare som normalt används för slagning av lätta stålpålar kan maximal spetskraft vid stoppslagning beräknas uppgå till storleksordningen 50 à 100 kN. En större slagkraft är med hänvisning till risken för alltför låg spetsbärförmåga önskvärd, men leder å andra sidan till starkt ökande miljö- och materialpåkänningar under stoppslagningen.



## 7 FÖRSÖKENS PRAKTISKA VÄRDE

### 7.1 Typgodkännande

Med ledning av de utförda försöken har Planverket i typgodkännande (BILAGA 7) tillsammans med vissa förutsättningar angivit tillåten belastning till 115 kN för normalt respektive 140 kN för exceptionellt belastningsfall. Om istället gällande föreskrifter för stålplåtar i Svensk Byggnorm 1975 lagts till grund för beräkning av tillåten last, skulle betydligt lägre värden erhållits. De erhållna erfarenheterna kan också tillämpas på andra, liknande typer av lätta plåtar.

Försöksresultaten belyser också det självklara men ibland förbisedda förhållandet att närbelägna plåtar av samma utformning som neddrivits på samma sätt kan ha relativt stor skillnad i brottlaster och deformationsegenskaper. Att basera tillåten belastning på en enstaka provpåle kan därför ge resultat som kan medföra antingen onödigt hög eller alltför låg säkerhet mot oacceptabla rörelser.

### 7.2 Konstruktiva synpunkter

Det är motiverat att undvika att utforma överbyggnadskonstruktioner på så sätt att bristande funktion hos en påle medför allvarliga konsekvenser. Vad som avses är exempelvis placering av enstaka plåtar under större punktlaster. Vid utformning av konstruktioner på slanka stålplåtar kan dessa ofta ej förutsättas fungera som fasta stöd utan plåtar bör istället betraktas som elastiska stöd. De utförda försöken anger inom vilka områden aktuella styvhetskonstanter bör väljas.

### 7.3 Stoppslagning

Som framhållits är bärförmågan för materialet vid pålspetsen ofta av avgörande betydelse för pålens brottlaster. Stoppslagning bör därför utföras med snabbslående hejare med så snabb och tung slagkolv som möjligt så att maximal möjlighet att nå fast berg eller annan bärkraftig nivå erhålls. Kännedom om bergytans läge och andra geotekniska förutsättningar ökar givetvis möjligheterna att välja rätt stoppslagningsnivå och -kriterium. Det är troligt att byggnormens stopp-sjunkningskrav om högst 5 mm/minut under 3 minuter i vissa fall kan vara på osäkra sidan. Som framgått av de utförda försöken kan emellertid inget klart samband mellan stoppsjunkning och brottlaster anges, varför frågan om vilken stoppsjunkning man i stället för SBN-75 bör tillåta tillsvärdare måste anses obesvarad.

#### 7.4 Rakhetskontroll, rengöring

Vid de utförda försöken kunde samtliga pålar tolkas med en 2 m lång tolk, vilket motsvarar en krökningsradie 200 m eller skarvvinkeländringen 1:200. En lämplig första kontrollåtgärd är ofta att sänka ned en ficklampa i pålen.

Vid långvarig slagning kan en mindre mängd lera tränga in i en påle vid skarvarna, vilket nödvändiggör invändig rengöring innan injektering utförs. Vid försöken användes för detta ändamål vatten och tryckluft.

## REFERENSER

Ref nr

- 1 Bredenberg H, Beräkning av balkar på elastiskt underlag. Byggmästaren nr 10, Vol 55, okt 1976, pp 36-44
- 2 Forssell C, Beräkning av pålar. Tidskriften Betong 1918, h 3.
- 3 Granholm H, On the elastic stability of piles surrounded by a supporting medium. IVA handlingar nr 89, 1929.
- 4 Rinkert A, Knäckning av stålplålar. Byggmästaren nr 1, Vol 39, 1960.
- 5 Broms B B, Allowable bearing capacity of initially bent piles. Proc. ASCE, Vol 89, nr SM5, pp 73-90, sept 1973.
- 6 Bernander S, Svensk I, Pålars bärförmåga i elastiskt medium under hänsynstagande till initialkrökning och egenpåningar. IVA Pålkommision 1969, Rapport 23.
- 7 Heteny M, Beams on elastic foundation. Michigan Press 1946.
- 8 Bredenberg H, Broms B B, Joints used for concrete piles in Sweden. Proc. Conf. on Piles 1979, Institution of Civil Engng, London.
- 9 Bergfeldt A, The axial and load bearing capacity and failure by buckling of piles in soft clay. Proc. 4th Int. Conf. of Soil Mech. a. Found. Eng. London 1957.
- 10 Bjerrum L, Norska erfarenheter av stålplålar till berg. Byggmästaren nr 1, Vol 38, 1959.
- 11 Vesic A B, Bending of beams resting on isotropic elastic solid. Proc. ASCE, Vol 87, nr EM2, pp 35-53, April 1961.
- 12 Bredenberg H, Stötkrafter i pålar. Byggmästaren nr 5, Vol 56, maj 1977, pp 32-37.
- 13 Bredenberg H, Stoppslagning av stålplålar på berg. Byggmästaren nr 6, Vol 57, juni 1978.
- 14 Fjelkner G, Slagning av stålplålar med tryckluft-hammare. Väg- och Vattenbyggaren nr 15, 1969.
- 15 Bredenberg H, Broms B B, Bjurström D, Load tests on slender pipe piles. Väg- och Vattenbyggaren nr 8-9, 1977





## SAMMANFATTNING

"Bjurströmpålen" består av ett galvaniserat stål-rör med 60 mm diameter godstjocklek 5 mm och med muffskarvar och bergspets. Pålen fylls efter nedslagning, rakhetskontroll och rengöring med cementbruk. Rapporten beskriver provbelastning till brott av 16 slanka stålpålar i lös lera.

Pållängderna varierade mellan 3 och 12 m. Av de 16 provbelastade pålarna erhöles knäckning i 13 fall. Tre långtidsförsök utfördes där varje laststeg vidmakthölls i 14 dygn. De övriga lastförsöken tog ca 3 å 4 tim/påle i anspråk.

Teoretisk knäcklast ( $F_k$ ) kan approximativt beräknas ur uttrycket

$$F_k = 2 \sqrt{kdEI}$$

där  $kd =$  bäddmodul  $\begin{matrix} 80 c_u & \text{för korttidslast} \\ 20 c_u & \text{för långtidslast} \end{matrix}$

$$EI = \text{pålens böjstyvhet} = 70 \text{ kNm}^2$$

$$c_u = \text{odränerad skjuvhållfasthet} = \text{ca } 8 \text{ kPa.}$$

Motsvarande knäcklast blir då beräkningsmässigt:

$$\text{korttidslast } F_k = 0,42 \text{ MN (42 ton)}$$

$$\text{långtidslast } F_k = 0,21 \text{ MN (21 ton)}$$

Dessa värden kan jämföras med de krafter som uppmättes då pålen erhöles snabbt ökande sjunkning vid pålhuvudet:

	Min (MN)	Max (MN)	Medel (MN)
Korttidsförsök	0,24	0,42	0,36
Långtidsförsök	0,21	0,24	0,22

Stuklasten för enbart stålröret bestämdes genom provtryckning av ett stort antal 10 cm höga påldelar till 0,37 MN, vilket är ca 30% mer än vad som svarar mot pålmaterialets undre sträckgräns som var ca 320 MPa. Motsvarande värde för betongfyllda 10 cm delar var 0,52 MN. Pålarnas brottstukning varierande mellan ca 0,2-0,3% till skillnad från 0,10-0,15% för påldelarna.

Vid inklinometermätningar i 4 olika pålar uppmättes skarvvinkeländringar på 1:150 till 1:200. Maximal lutning för en rät linje genom pålhuvud och spets var 4%.

Utförda stötvågsmätningar antyder relativt kraftig dämpning i pålskarvar, vilket kan vara förklaring till i ett fall (påle 16) uppmätt låg brottlast (0,18 MN) utan att knäckning inträffat, vilket kunde konstateras i samband med att pålarna drogs upp efter lastförsöken.

De utförda försöken har legat till grund för tillåten belastning enligt Planverkets typgodkännande där tillåten last satts till 0,115 respektive 0,14 MN (11,5 respektive 14,0 ton) för normalt respektive exceptionellt belastningsfall. En beskrivning av försöksresultat m m har tidigare redovisats i Väg- och vattenbyggaren nr 8-9, 1977 (ref 15).

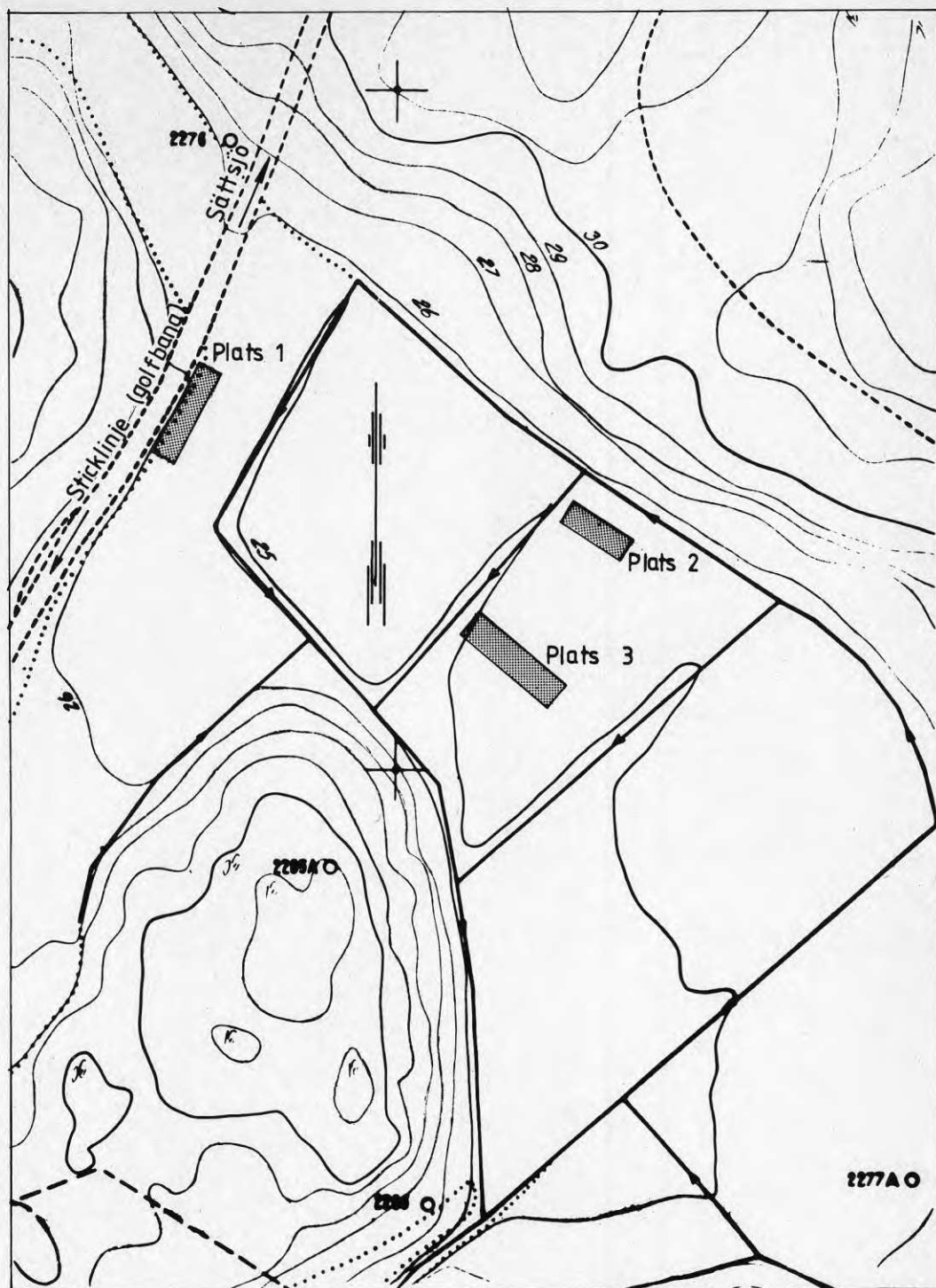
## SUMMARY

Slender pipe piles are mainly used in Sweden to support small houses and other light structures. One example is the so-called Bjurström-pile with an outside diameter of 6 cm. The ultimate bearing capacity of this pile when it has been driven through a layer of soft clay down to a layer of moraine or rock has been investigated.

The pile is called the "Bjurström Pile" after the inventor Gösta Bjurström. Sixteen piles were tested. Most of the piles failed by buckling. Results from stress wave measurements during driving, dynamic load tests on pile points and splices and inclinometer measurements are also described in the paper.





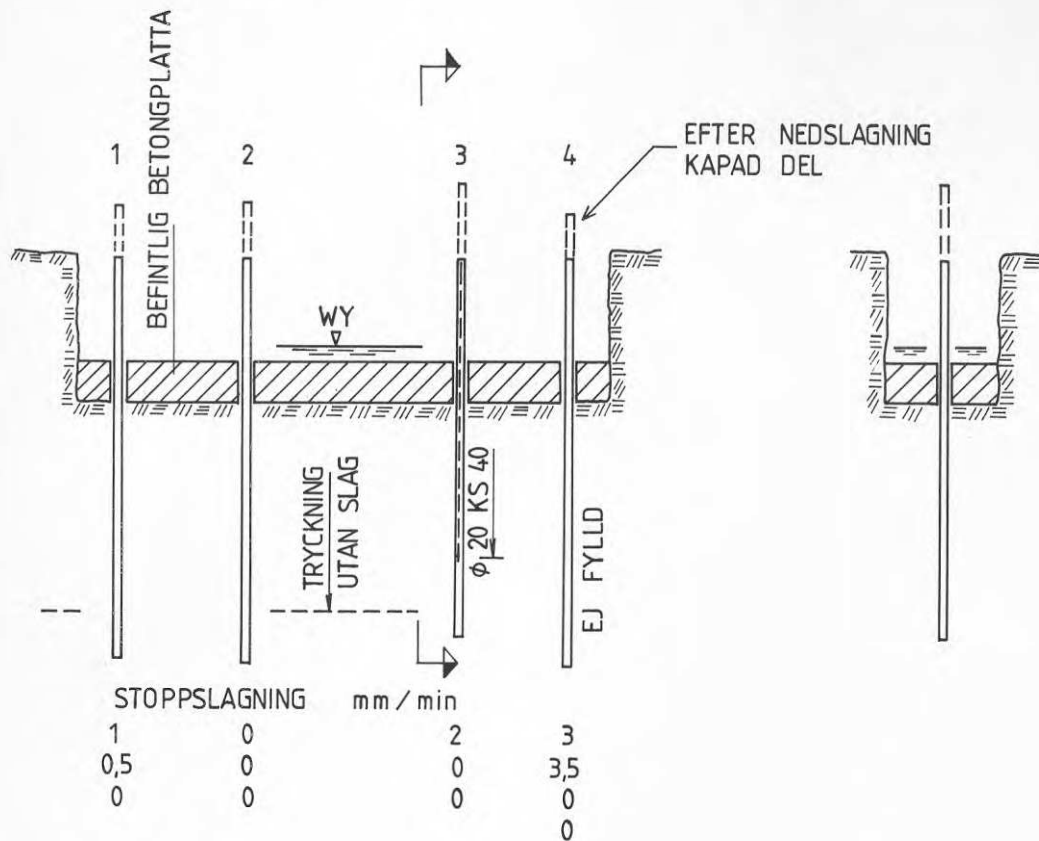


## PLAN ÖVER FÖRSÖKSOMRÅDE

PLAN FÖR PLATS 1-3 I DETALJ  
SE BILAGA 2:1 TILL 2:3

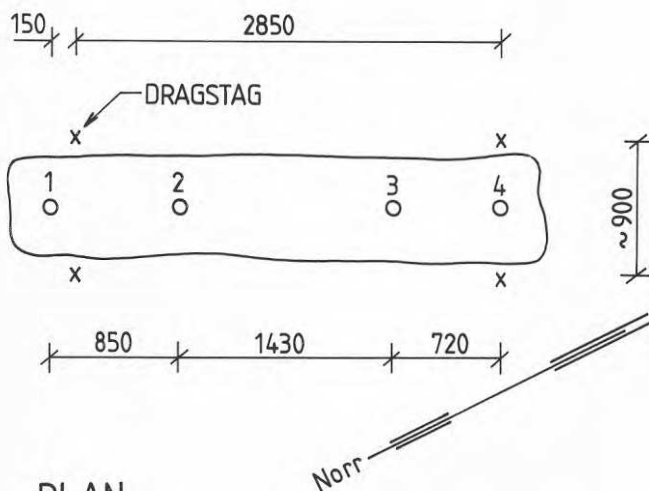
# INMÄTNING AV PÅLAR M.M

## Plats 1



ELEVATION

SEKTION



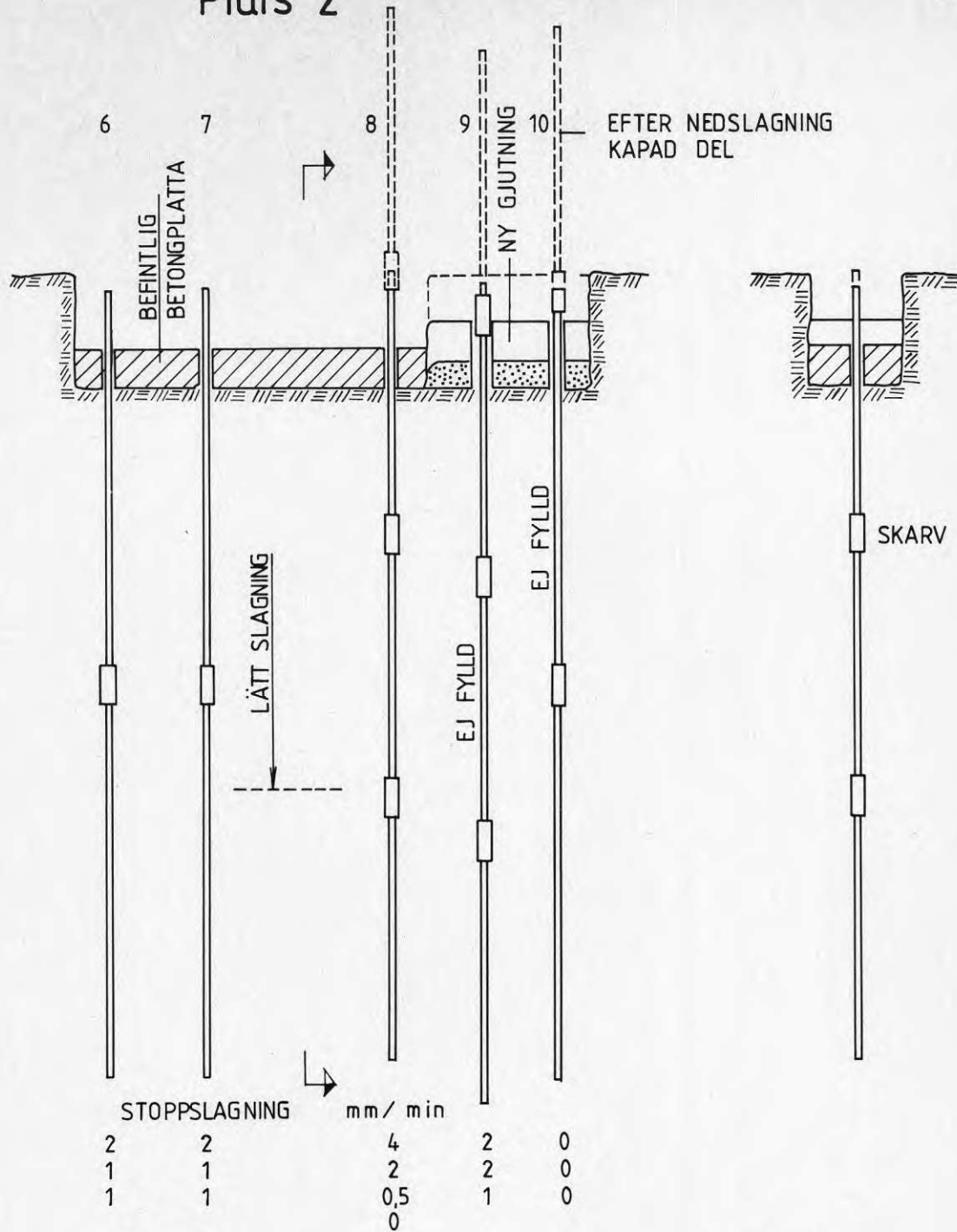
PLAN

PÅLARNA SLAGNA 1976-02-20  
 SLAGORDNING 4 - 3 - 2 - 1  
 DISTINKTA STOPP  
 HÅLTAGNING GENOM BETONGPLATTA,  
 φ 101, MED PIXI - BORR  
 MÅTT I mm.

# INMÄTNING AV PÅLAR M.M

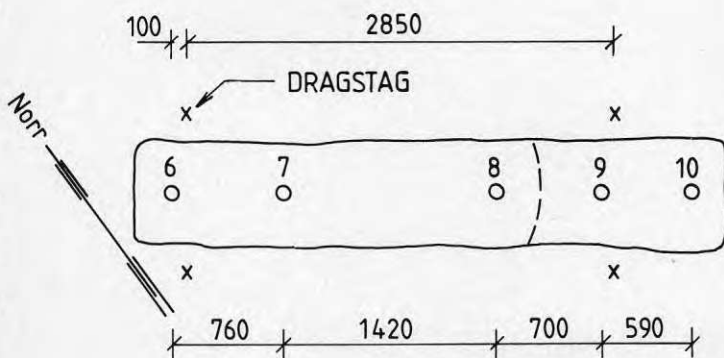
## Plats 2

730558 - 3  
BILAGA 2:2



### ELEVATION

### SEKTION



### PLAN

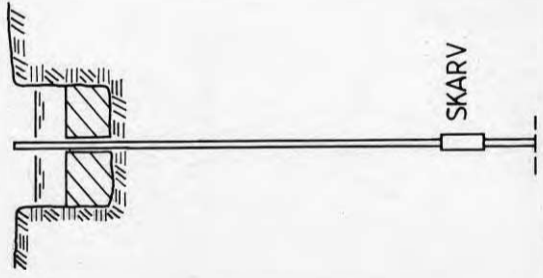
PÅLARNAS SLAGNA 1976-02-20  
 SLAGORDNING 8 - 7 - 6 - 9 - 10  
 PÅLAR 6 OCH 7 SLAGNA MED  
 KNEKT (2 m PÅLE)  
 "KRYPANDE" STOPP PÅ  
 ca. 20 cm STRÄCKA  
 HÅLTAGNING GENOM BETONGPLATTA,  
 Ø 101, MED PIXI-BORR  
 MÅTT 1 mm



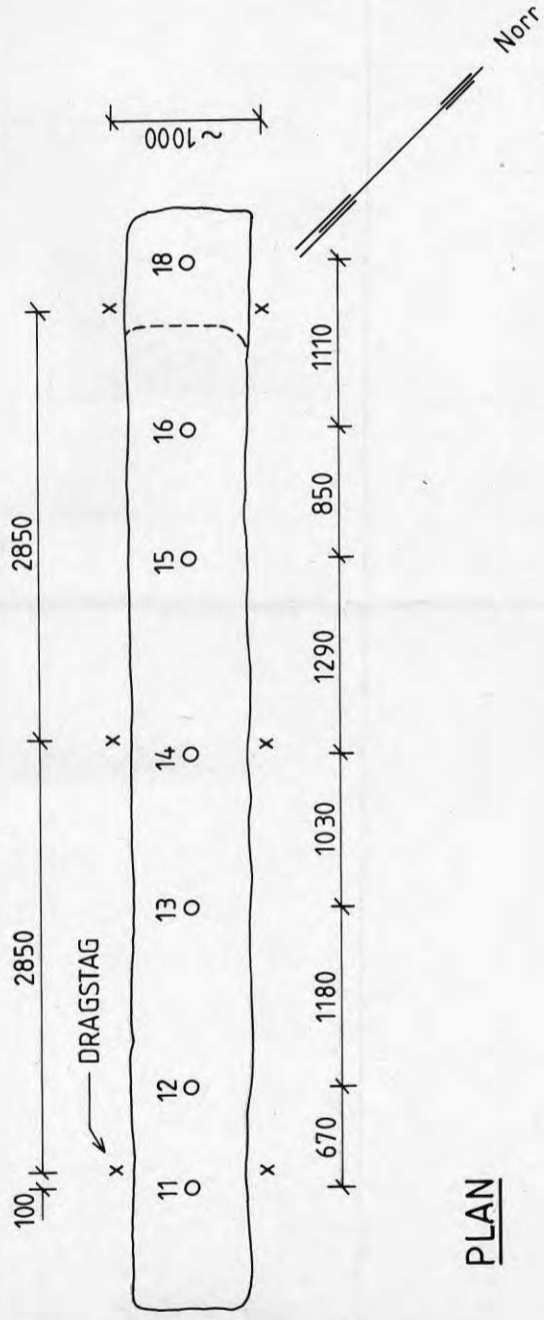
# INMÄTNING AV PÅLAR M.M Plats 3

PÅLAR 13-15 SLAGNA 1976-02-20  
ÖVRIGA PÅLAR SLAGNA 1976-02-23  
SLAGORDNING: 13-14-15; 12-11-16-18  
LÄNSHÅLLNING TILL ÖK BETONGPLATTA  
UNDER SLAGNING

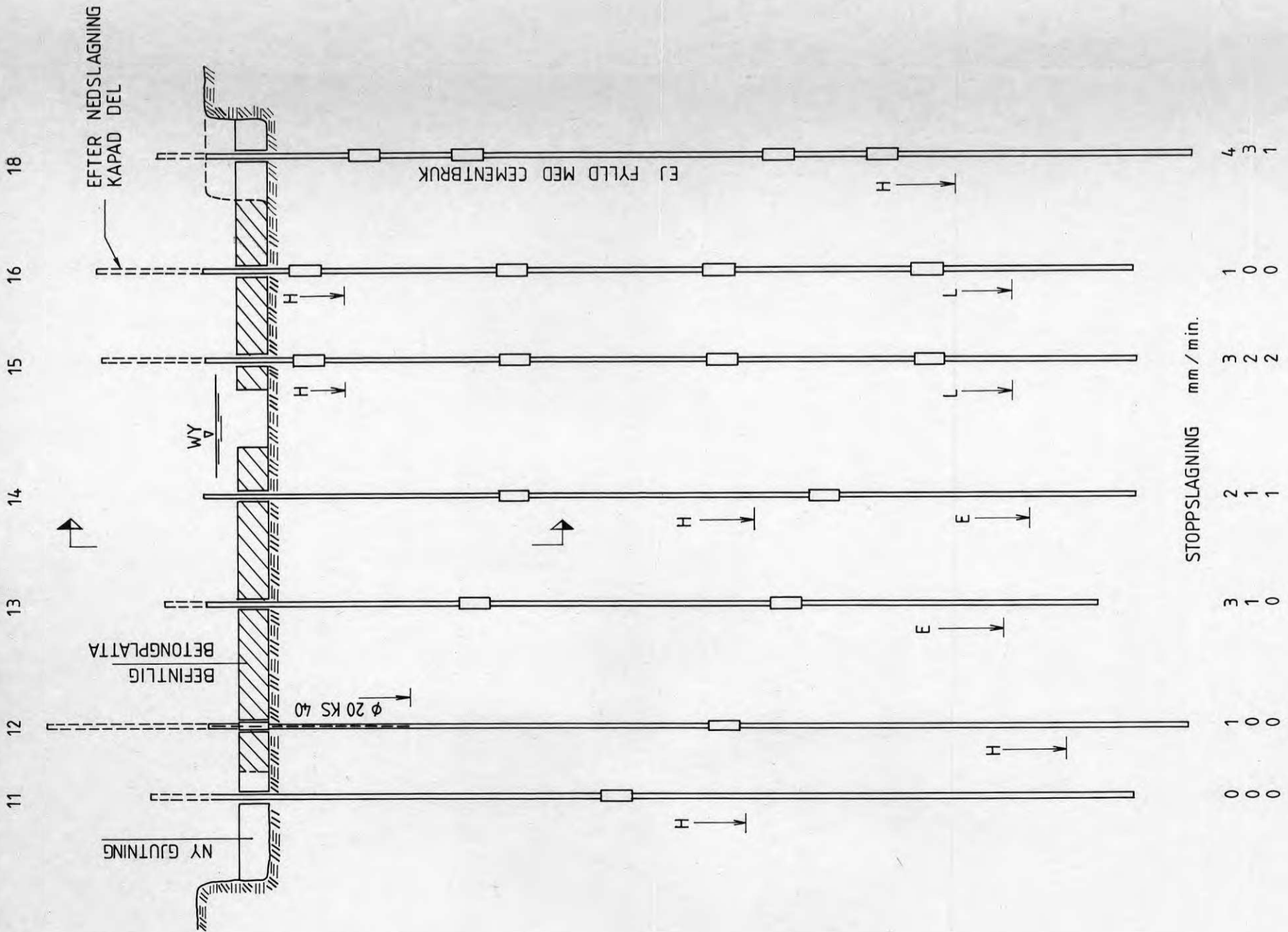
H = PÅLEN HANDTRYCKT TILL DENNA NIVÅ  
E = PÅLEN SJUNKER TILL DENNA NIVÅ AV EGENVIKT OCH VIKT AV PÅLINGSAGREGAT  
L = LÄTT SLAGNING  
FÖRST "FALSKT" STOPP, DÄREFTER BÖRJAR PÅLEN SJUNKA IGEN VID HÅRD SLAGNING, SEDAN SUCCESSIVT STOPP. TID FÖR STOPPSLAGNING ~ 15-20 min PER PÅLE  
MÅTT I mm



SEKTION

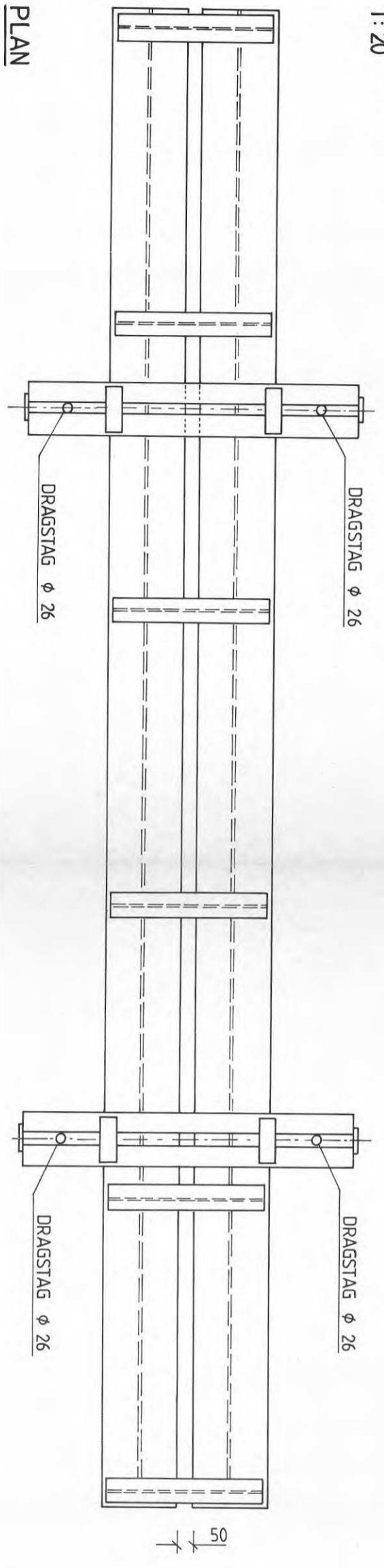
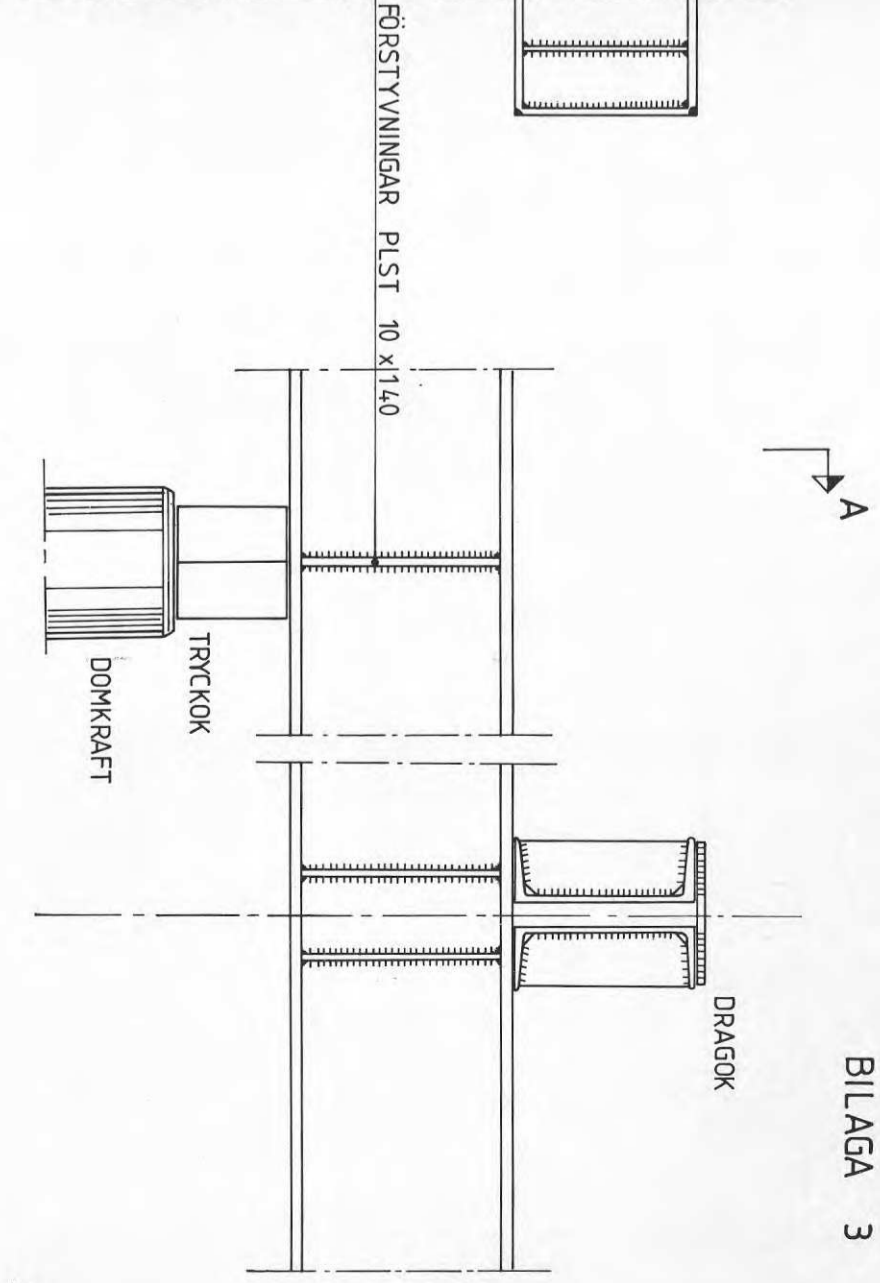
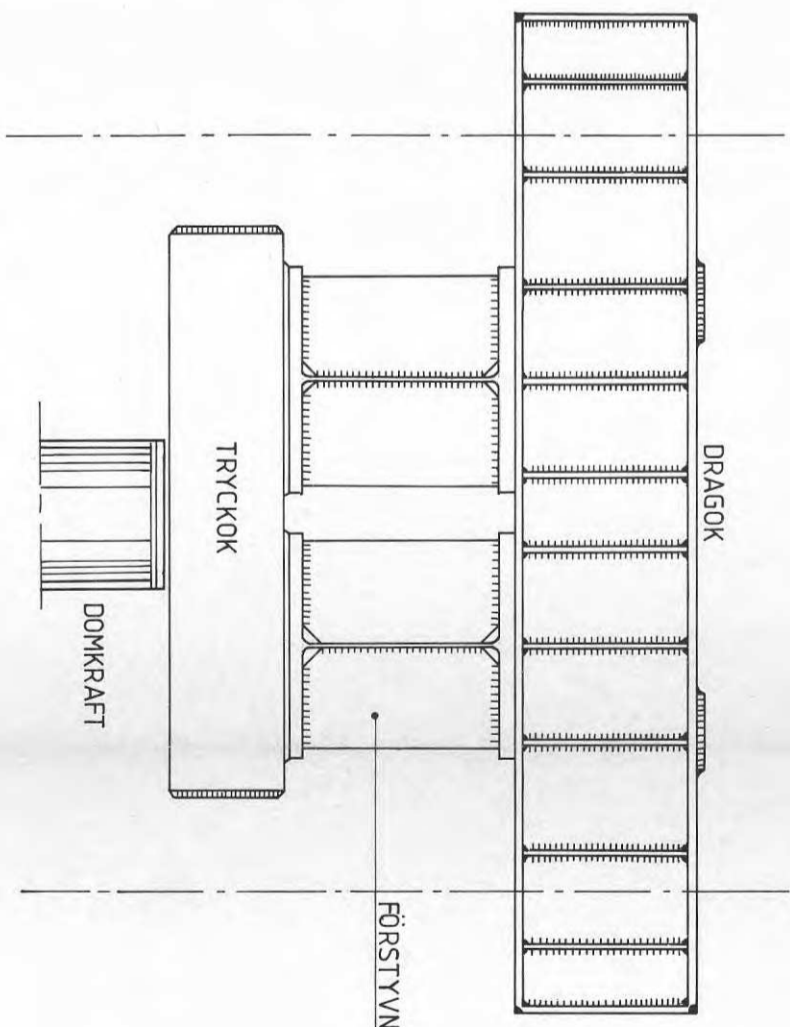
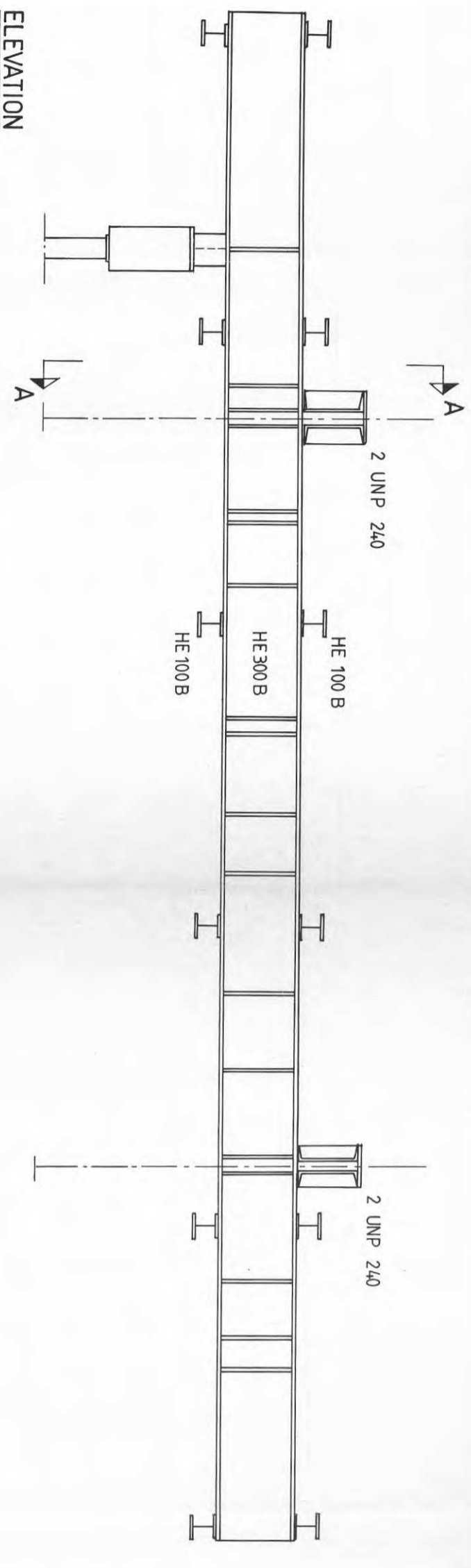


PLAN

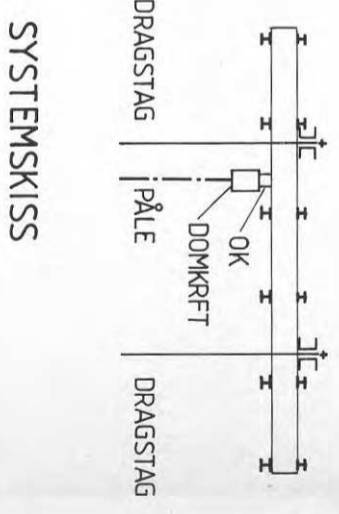


ELEVATION



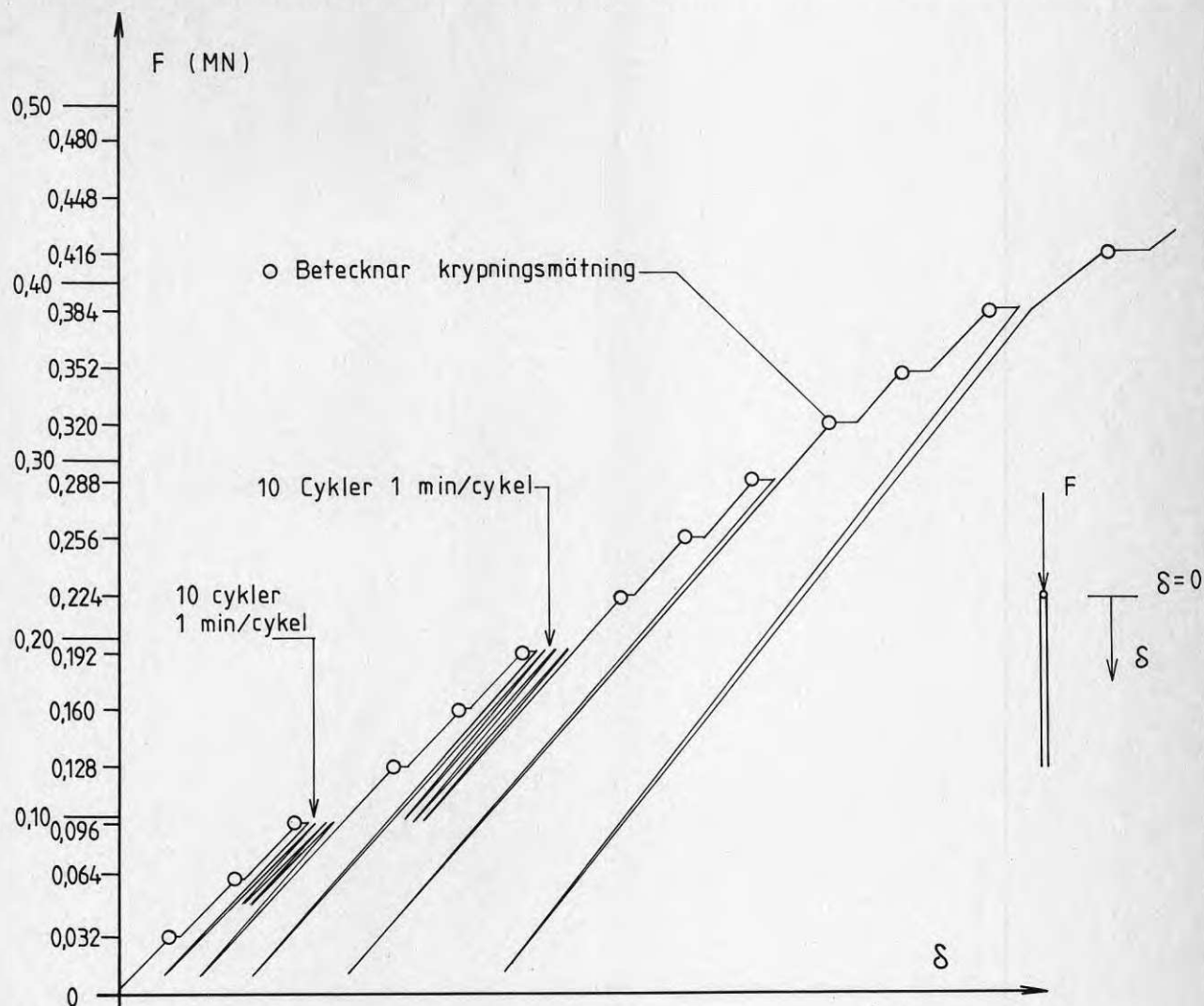


- PLATS 1 ○ 1 ○ 2
- PLATS 2 ○ 6 ○ 7
- PLATS 3:1 ○ 11 ○ 12
- PLATS 3:2 ○ 15
- 13
- 16
- 3 ○ 4 Ej fyllid
- 8 ○ 9 Ej fyllid ○ 10 Ej fyllid
- 14 ○ 18 Ej fyllid

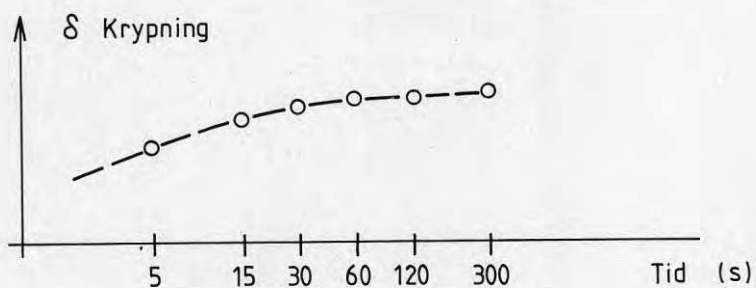


PÅLPLACERING

### LASTSCHEMA FÖR KORTTIDSFÖRSÖK

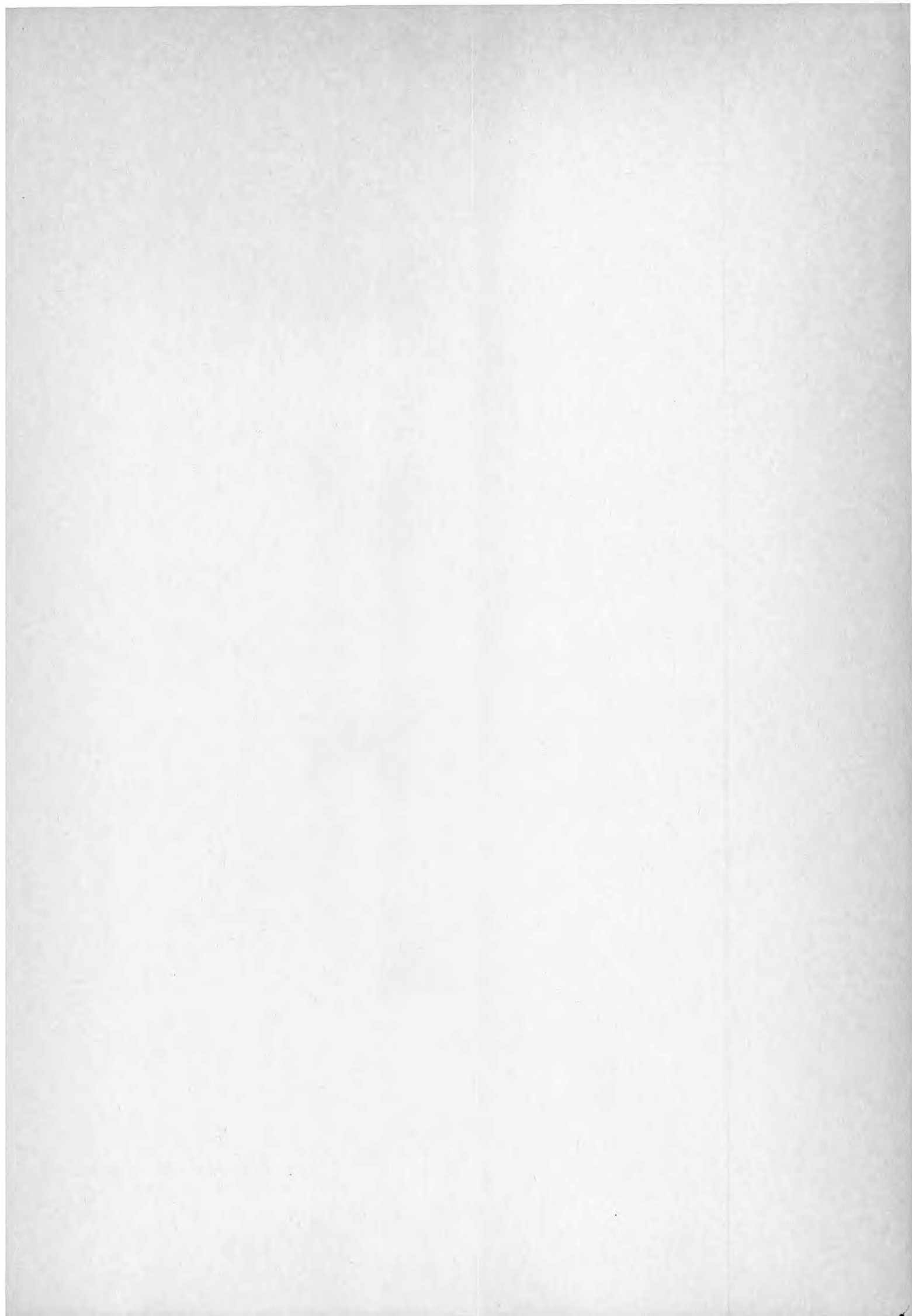


### LASTPROGRAM



KRYPNINGSMÄTNING VID KONSTANT LAST

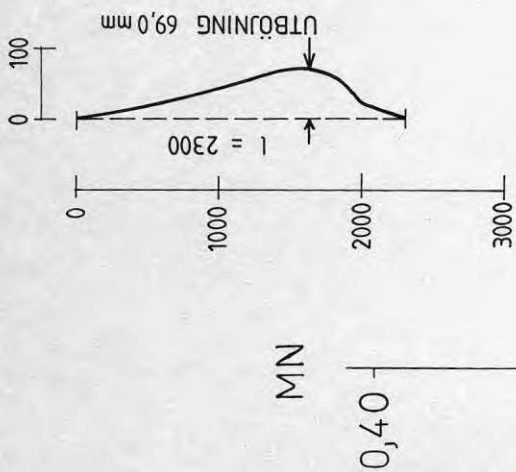








RESULTAT FRÅN UPPMÄTNING  
AV PÅLE EFTER UPDRAGNING



STOPPSLAGNING

SJUNKNING UNDER PERIOD	1	2	3
1	1	0,5	0
3	1	0,5	0

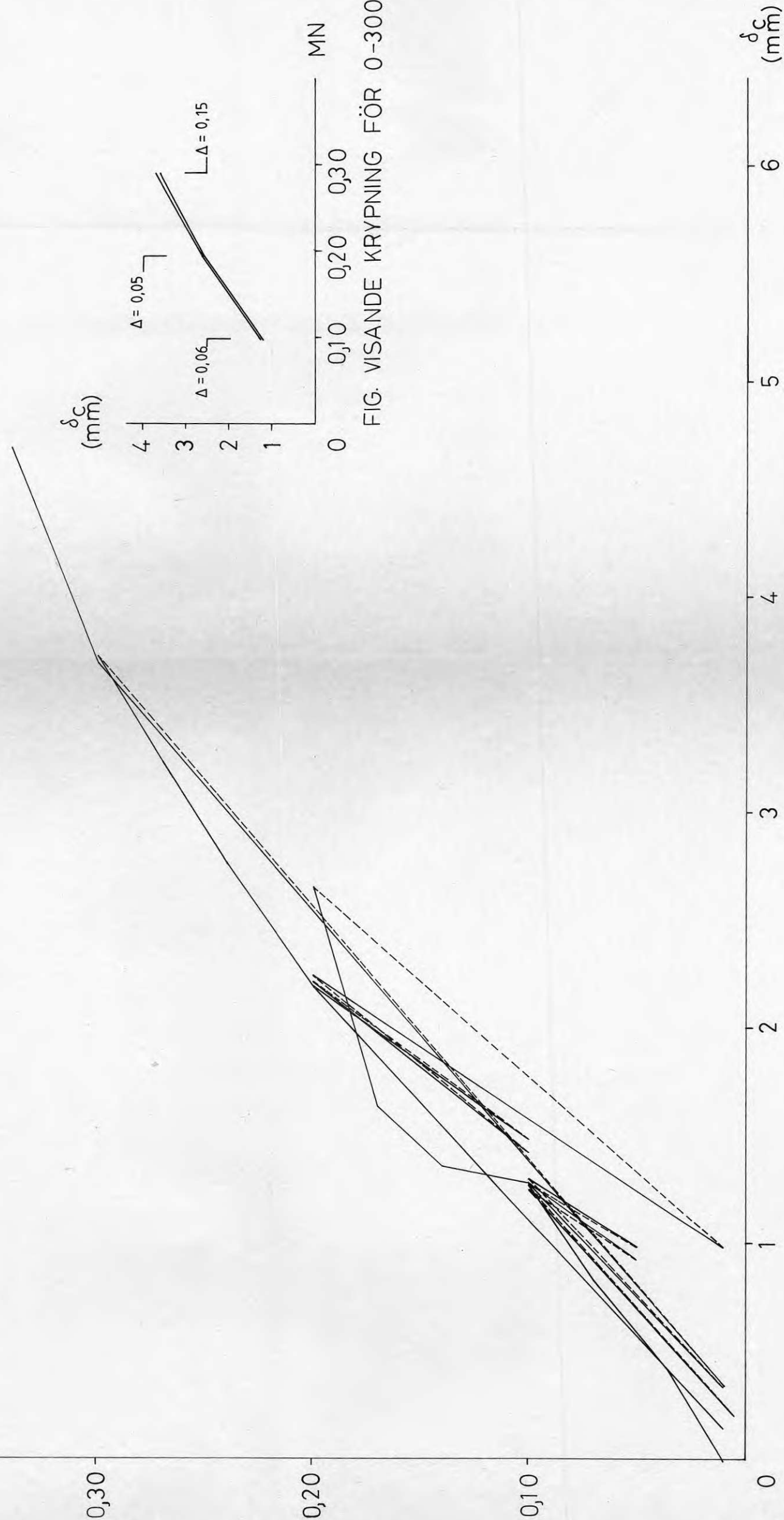


FIG. VISANDE KRYPNING FÖR 0-300 S

RESULTAT FRÅN UPPMÄTNING  
AV PÅLE EFTER UPPDRAGNING

STOPPSLAGNING

STOPPSLAGNING	1	MM / MIN
SJUNKNING UNDER SISTA PERIOD	3	MM
1	0	
2	0	
3	0	

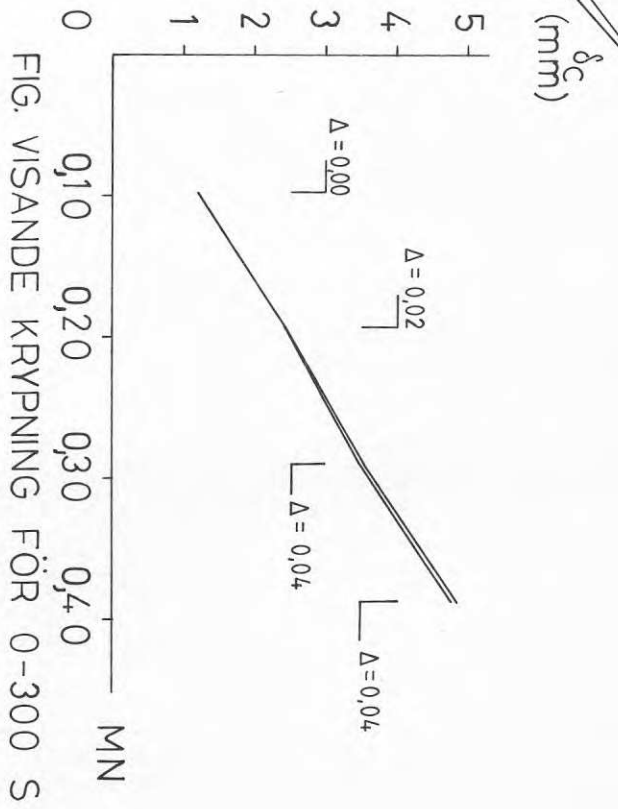
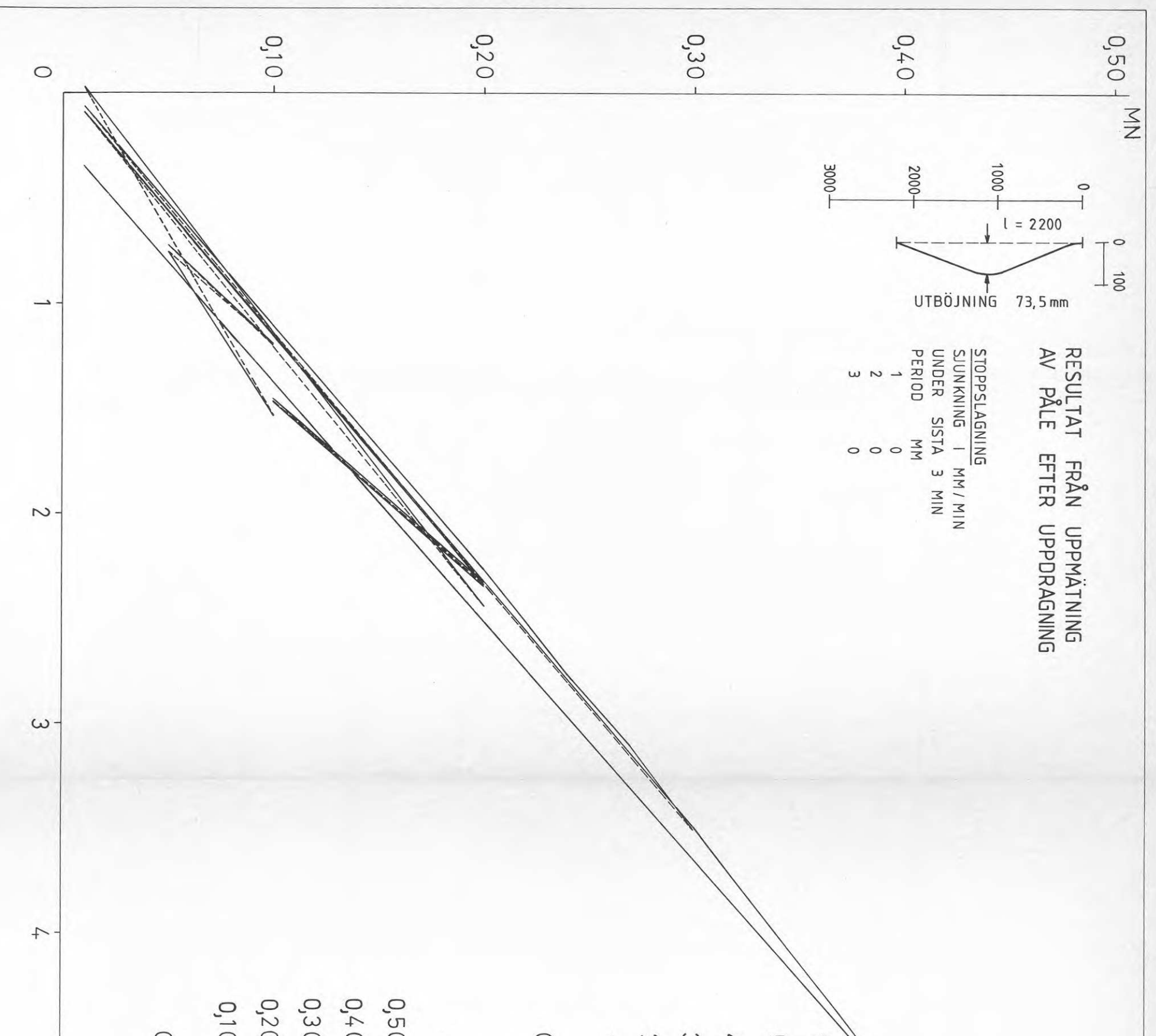
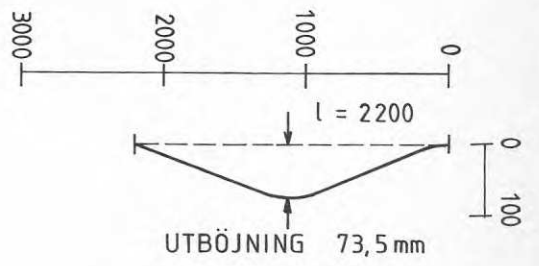


FIG. VISANDE KRYPNING FÖR 0-300 S

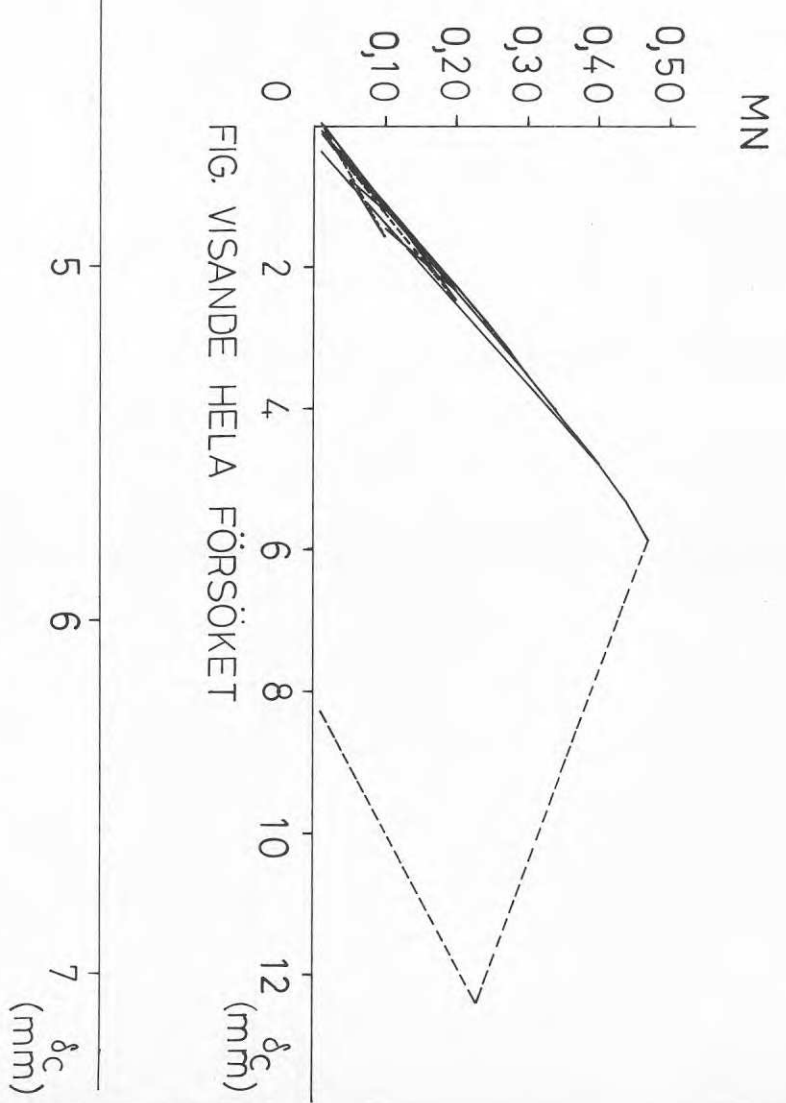
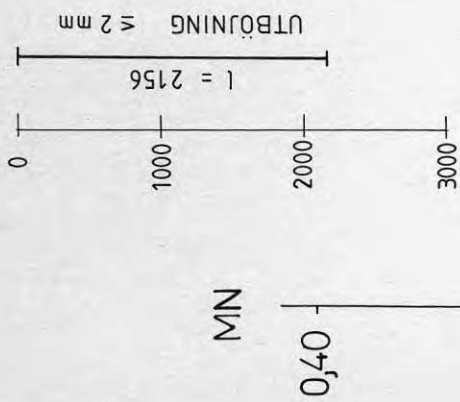


FIG. VISANDE HELA FÖRSÖKET

PÅLE Nr 2

RESULTAT FRÅN UPPMÄTNING  
AV PÅLE EFTER UPDRAGNING



STOPPSLAGNING

PERIOD	MM
1	2
2	0
3	0

SJUNKNING 1 MM/ MIN  
UNDER SISTA 3 MIN

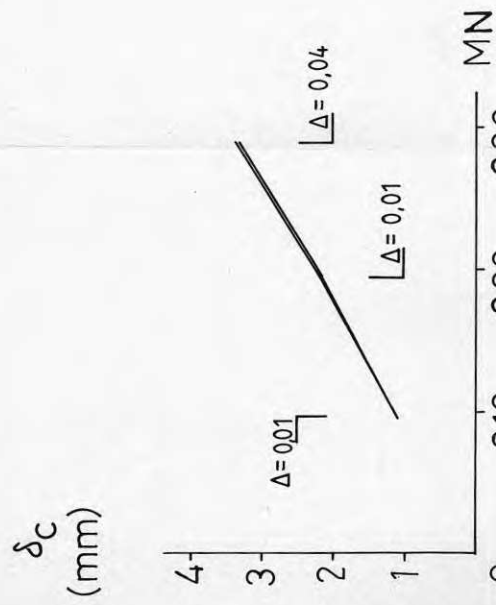


FIG. VISANDE KRYPNING FÖR 0-300 S

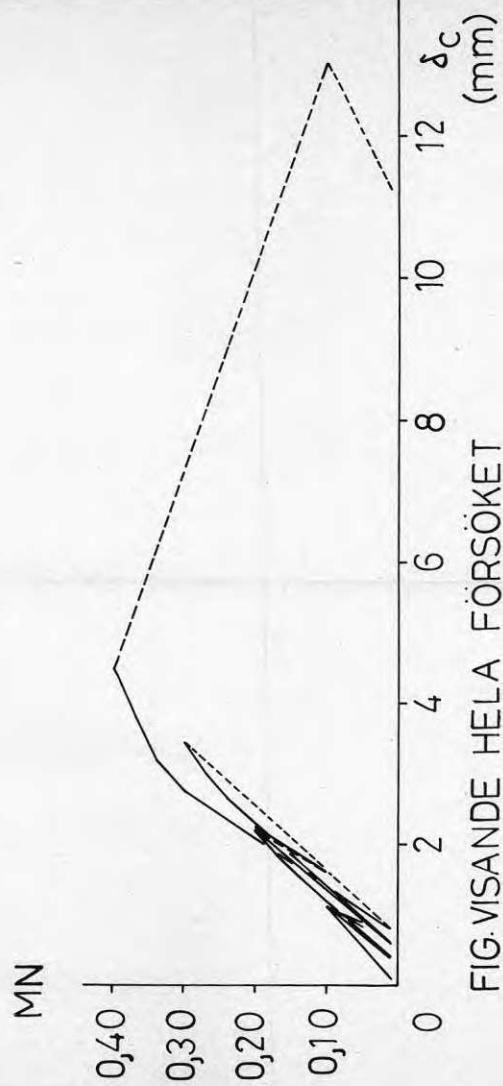
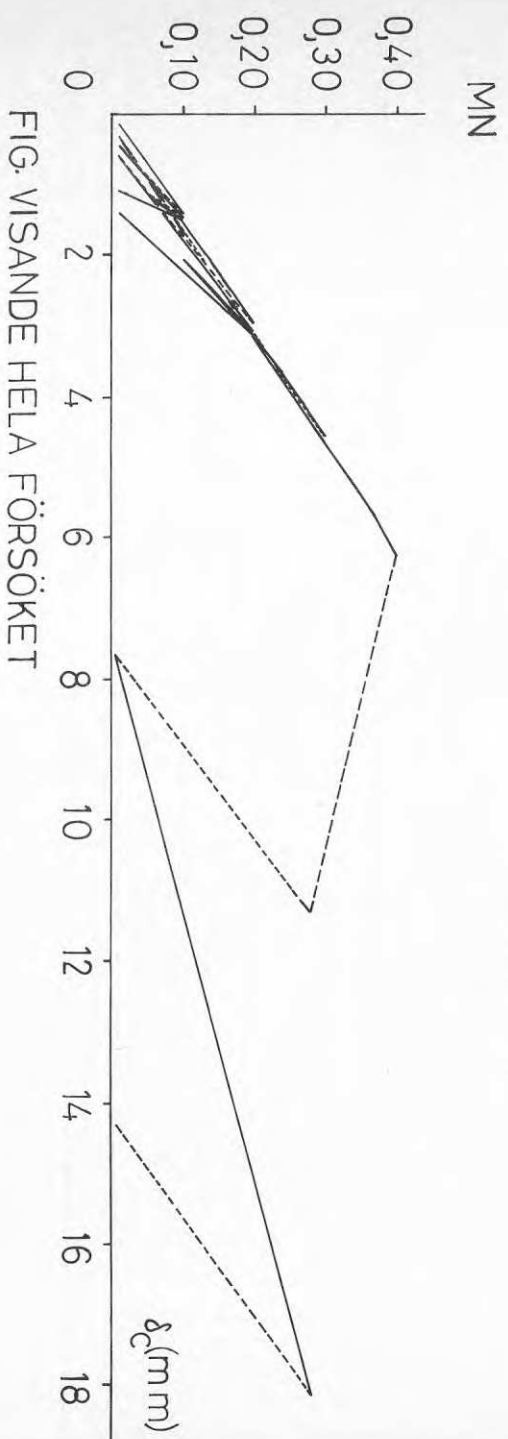
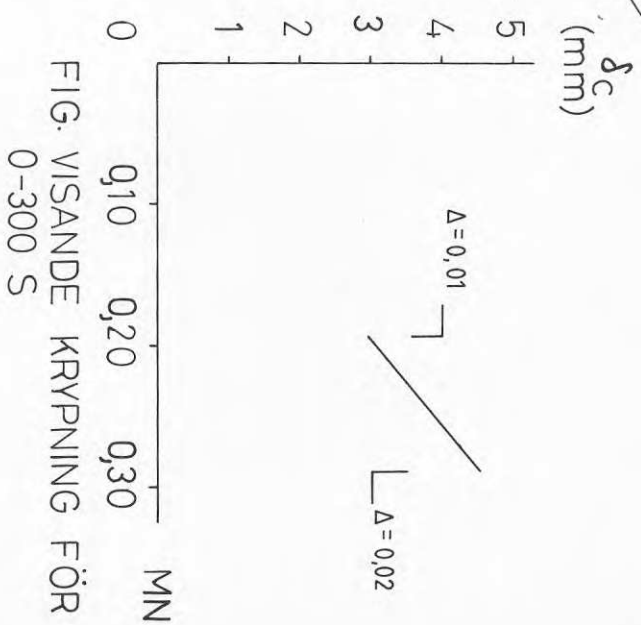
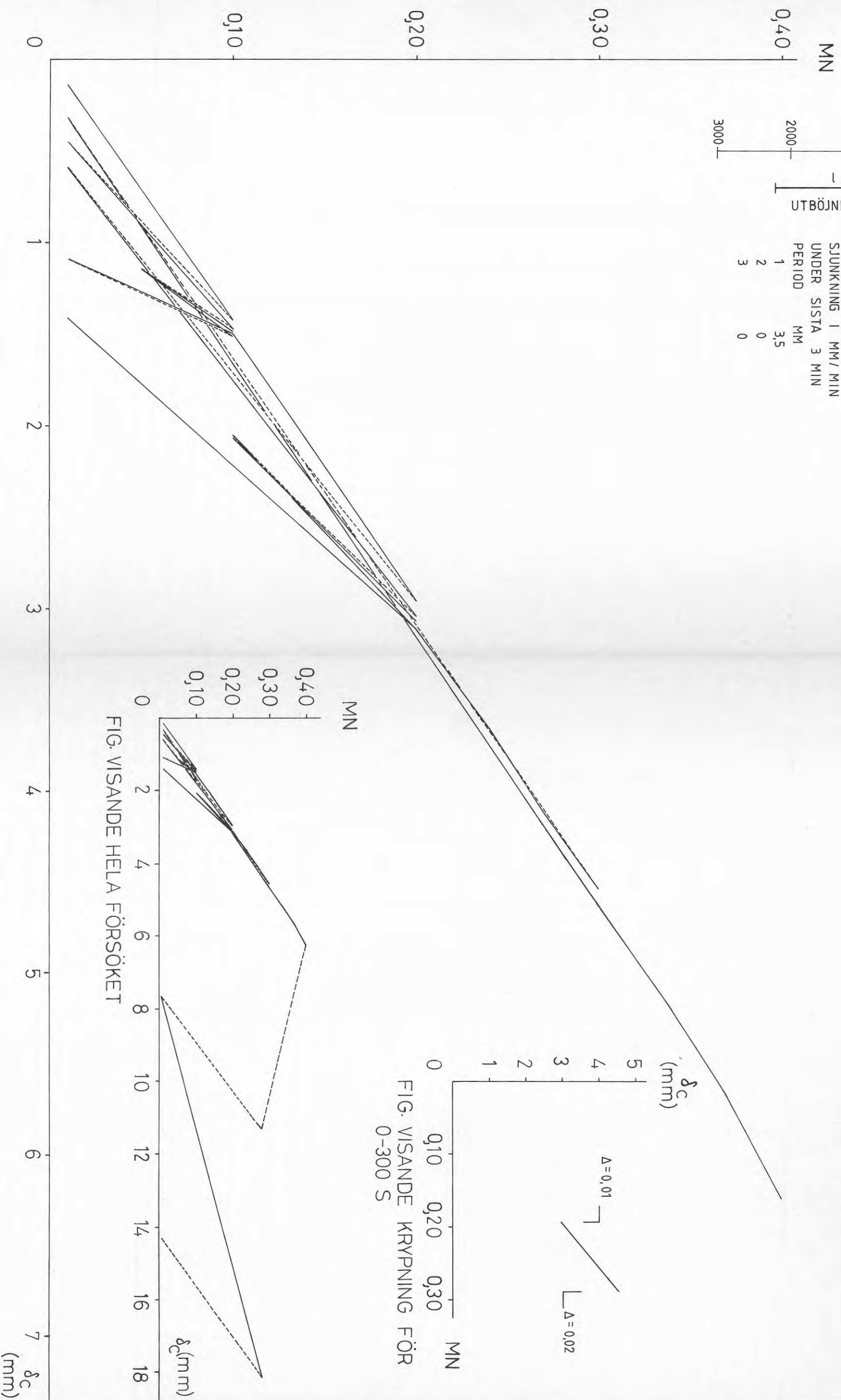
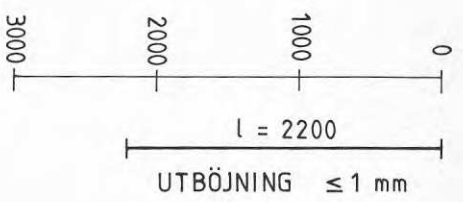


FIG. VISANDE HELA FÖRSÖKET

RESULTAT FRÅN UPPMÄTNING  
AV PÅLE EFTER UPPDRAGNING

STOPPSLAGNING

SJUNKNING UNDER PERIOD	1 MM / MIN	3 MM
1	3,5	0
2	0	0
3	0	0

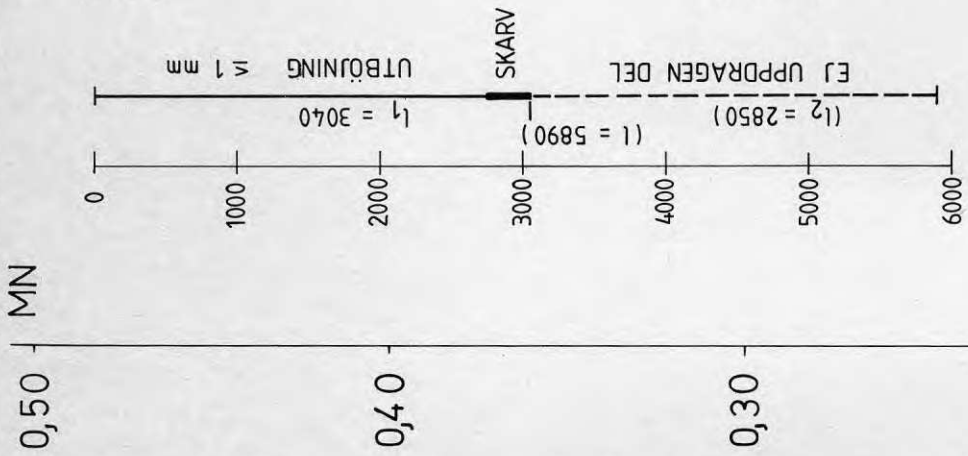


PÅLE Nr 4

Λ



RESULTAT FRÅN UPPMÄTNING  
AV PÅLE EFTER UPPDRAGNING



STOPPSLAGNING

PERIOD	MM	SJUNKNING 1 MM / MIN UNDER SISTA 3 MIN
1	2	
2	1	
3	1	

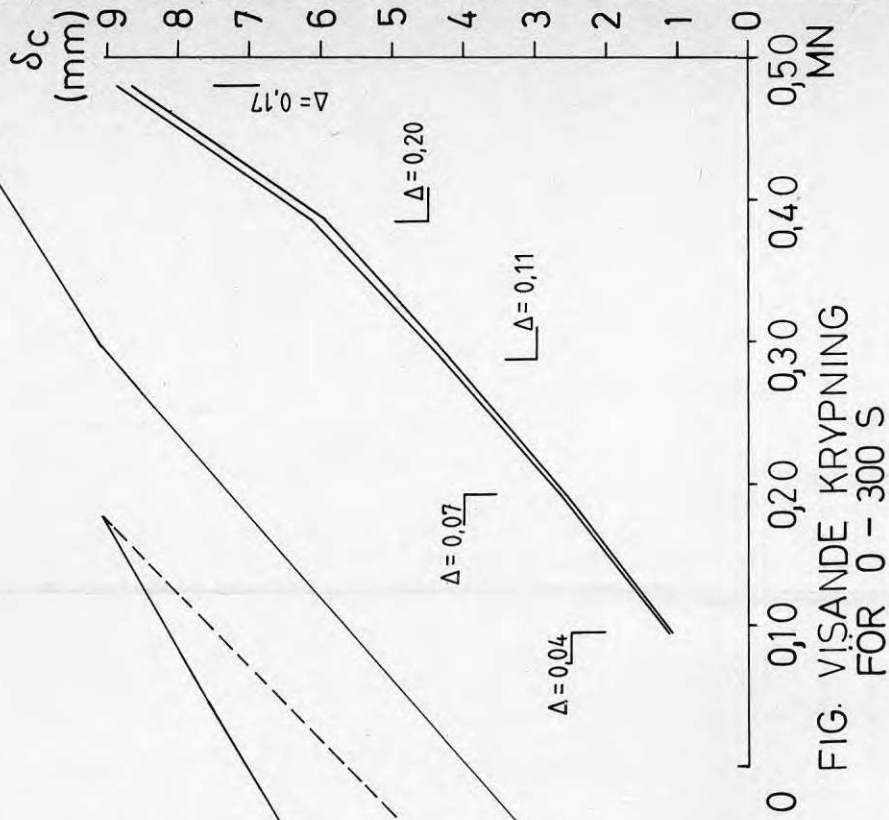


FIG. VISANDE KRYPNING  
FOR 0 - 300 S

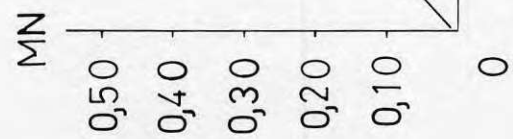


FIG. VISANDE HELA FÖRSÖKET



RESULTAT FRÅN UPPMÄTNING  
AV PÅLE EFTER UPPDRAGNING

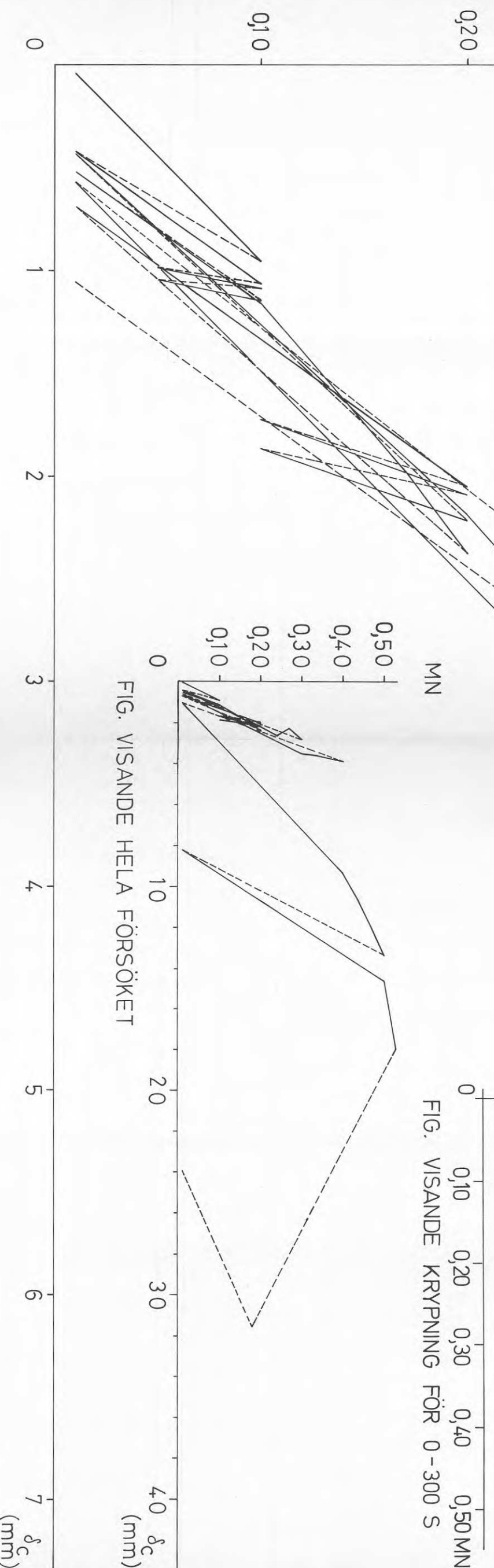
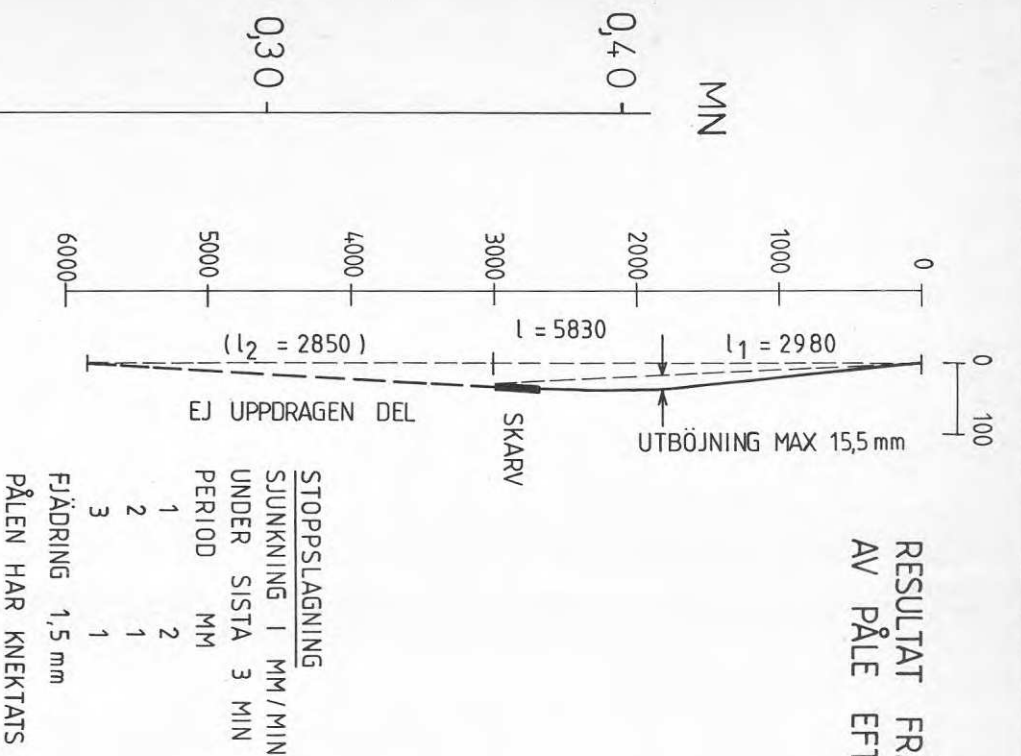


FIG. VISANDE HELA FÖRSÖKET

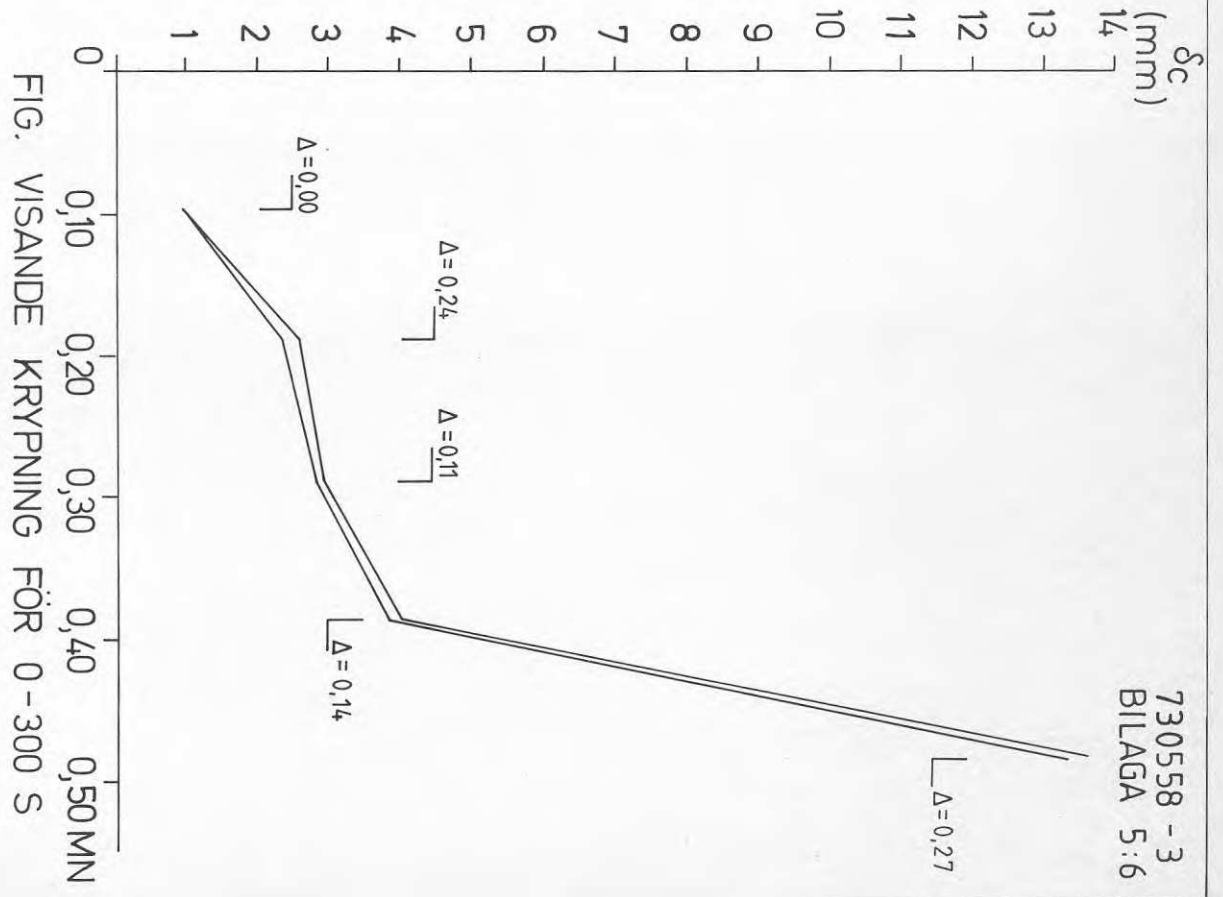


FIG. VISANDE KRYPPNING FÖR 0-300 S

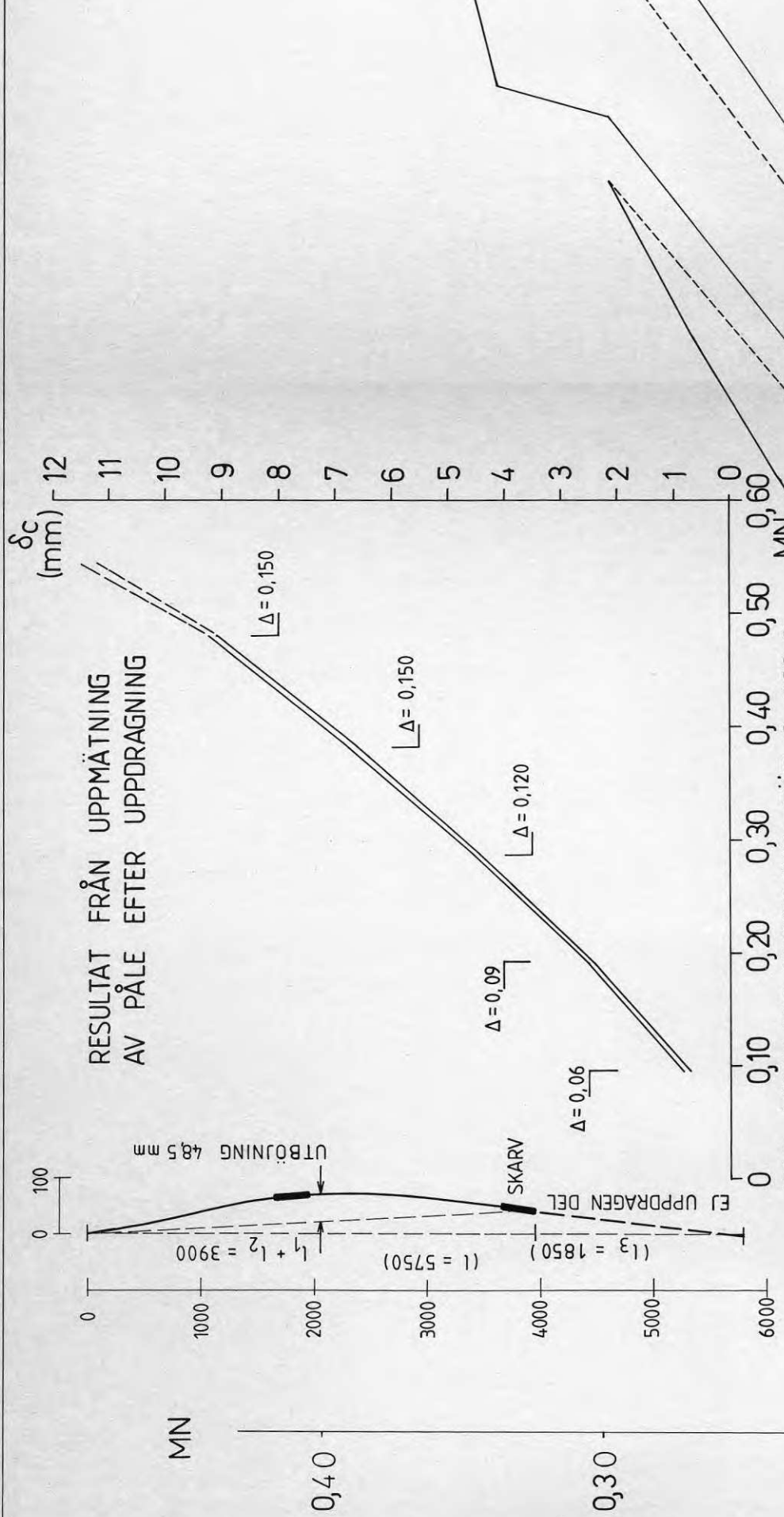


FIG. VISANDE KRYPNING FÖR 0-300 S

STOPPSLAGNING  
SJUNKNING I MM/MIN  
UNDER SISTA 3 MIN  
PERIOD MM

1	2	0.5	0
2	0.5		
3	0		

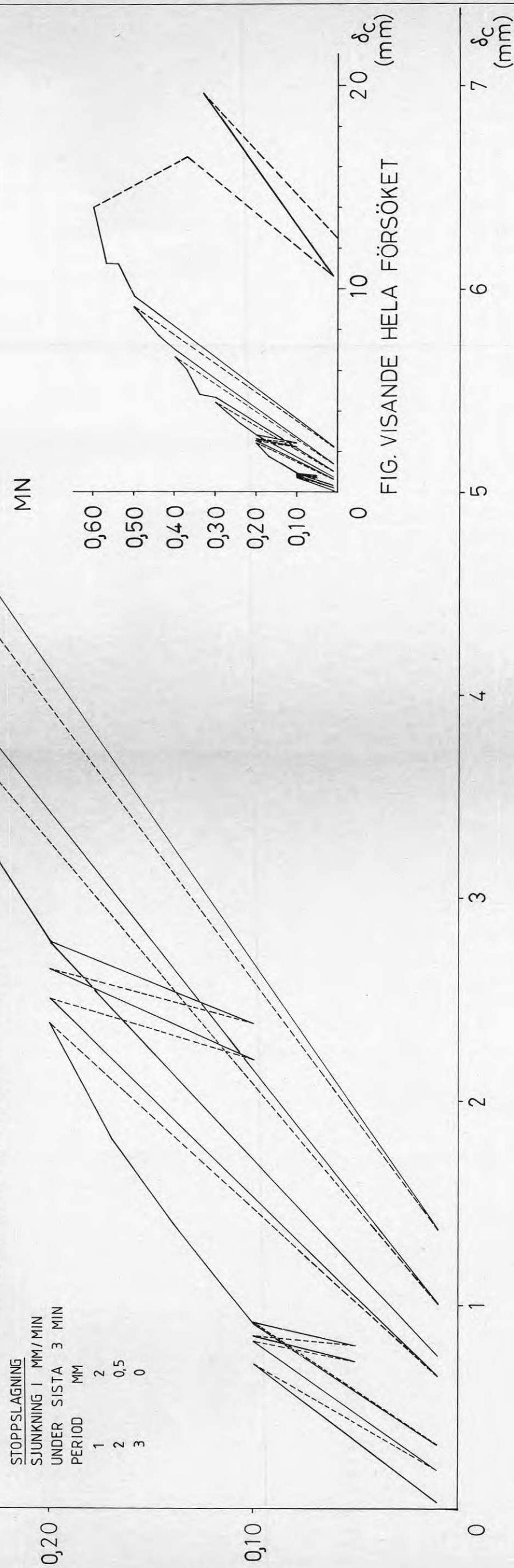
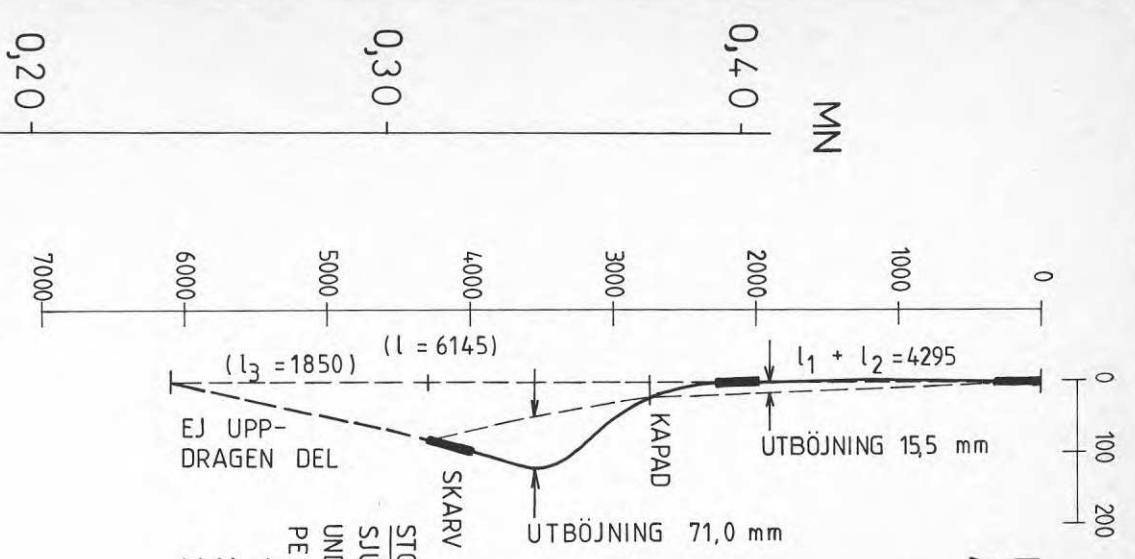


FIG. VISANDE HELA FÖRSÖKET

RESULTAT FRÅN UPPMÄTNING  
AV PÅLE EFTER UPPDRAGNING



STOPPSLAGNING	
SJUNKNING	1 MM/MIN
UNDER SISTA PERIOD	3 MIN
1	2
2	2
3	1

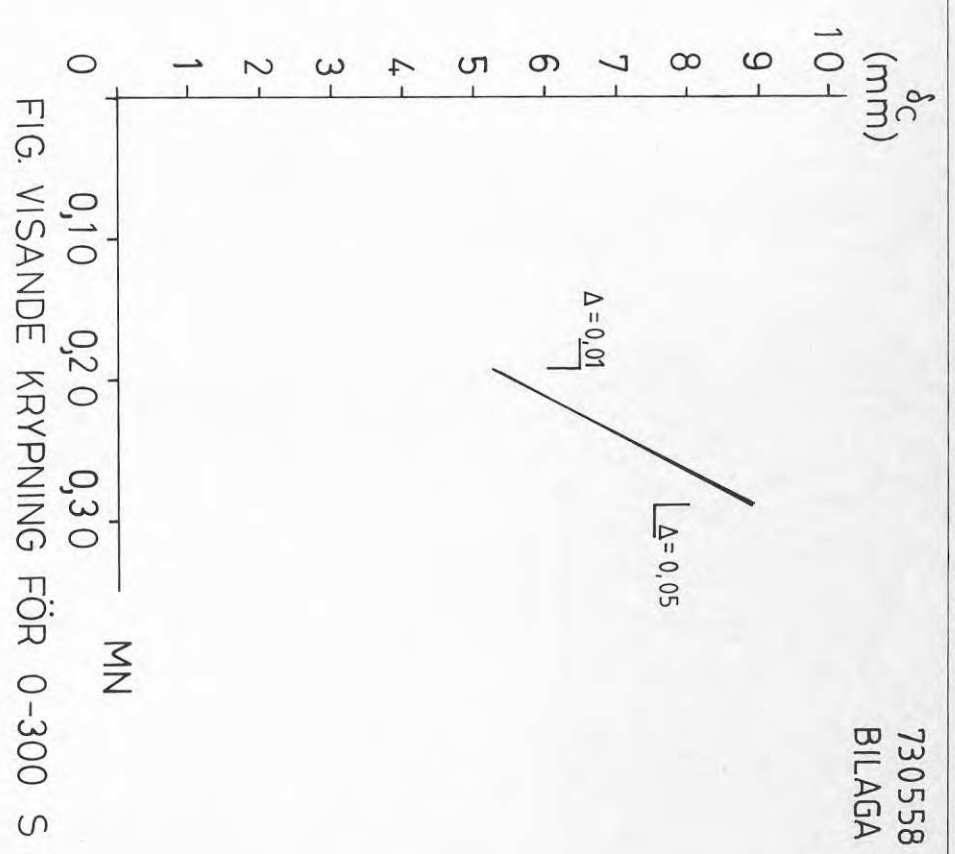


FIG. VISANDE KRYPNING FÖR 0-300 S

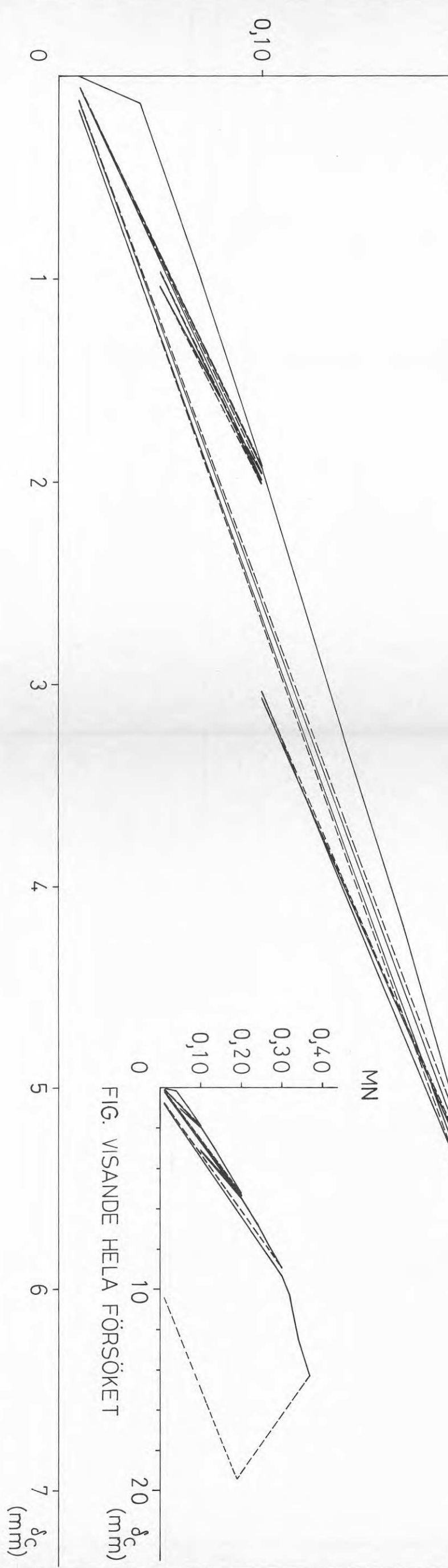


FIG. VISANDE HELA FÖRSÖKET

PÅLE Nr 9

N



RESULTAT FRÅN UPPMÄTNING  
AV PÅLE EFTER UPDRAGNING

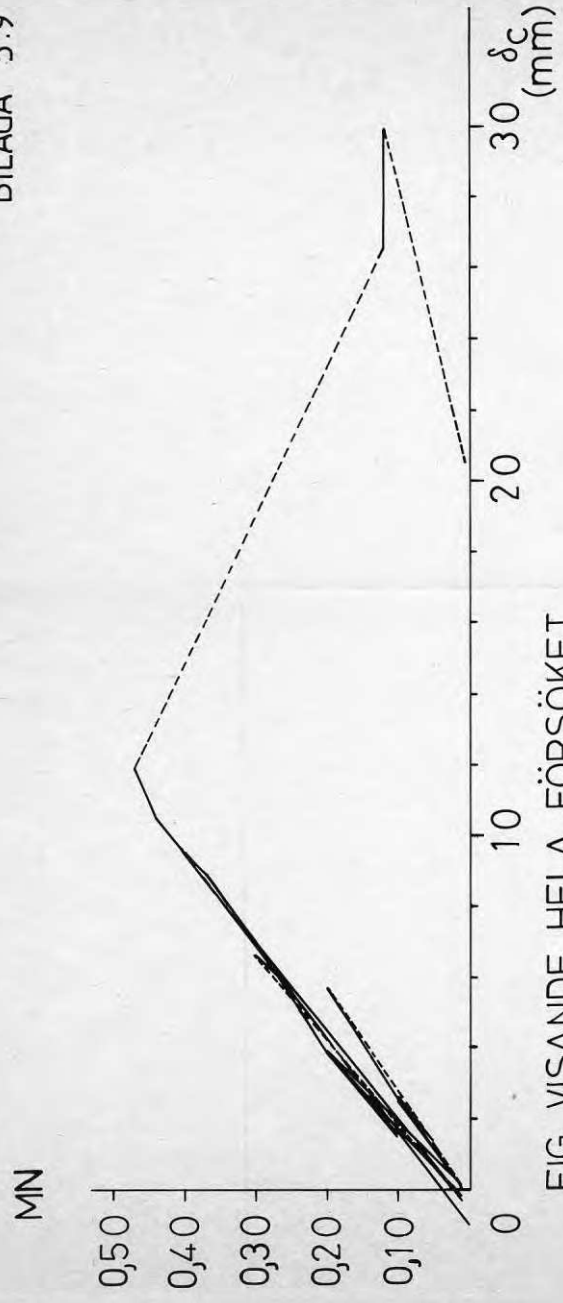
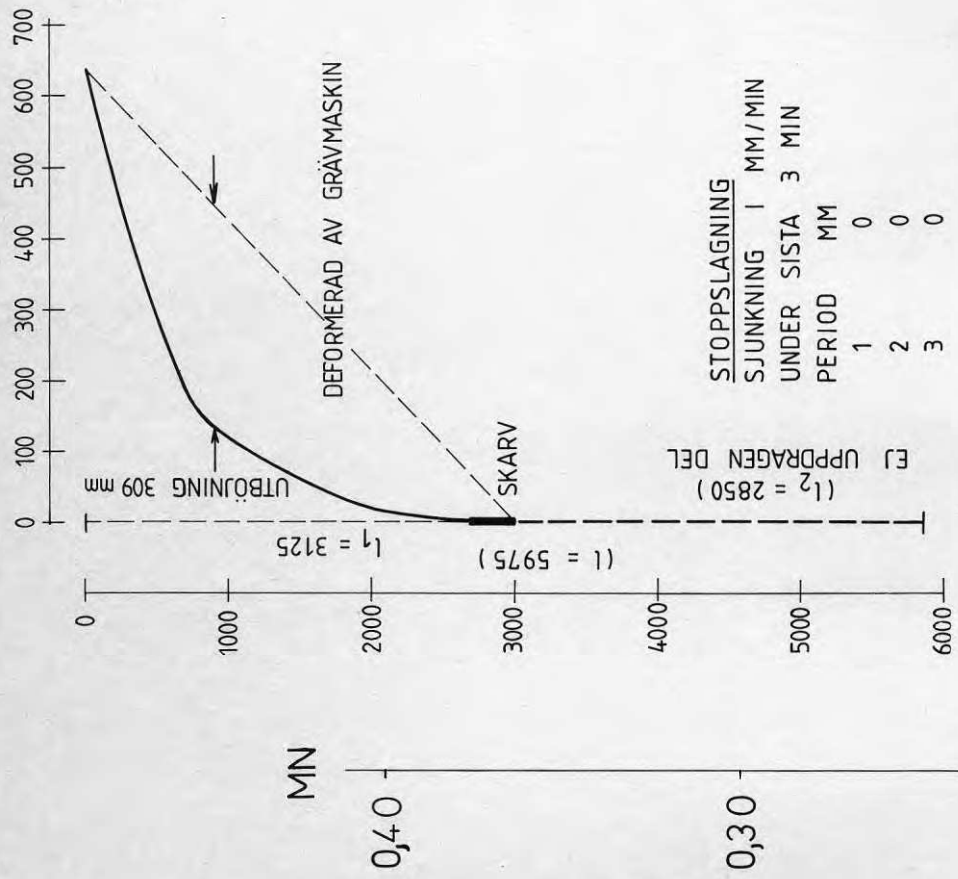


FIG. VISANDE HELA FÖRSÖKET

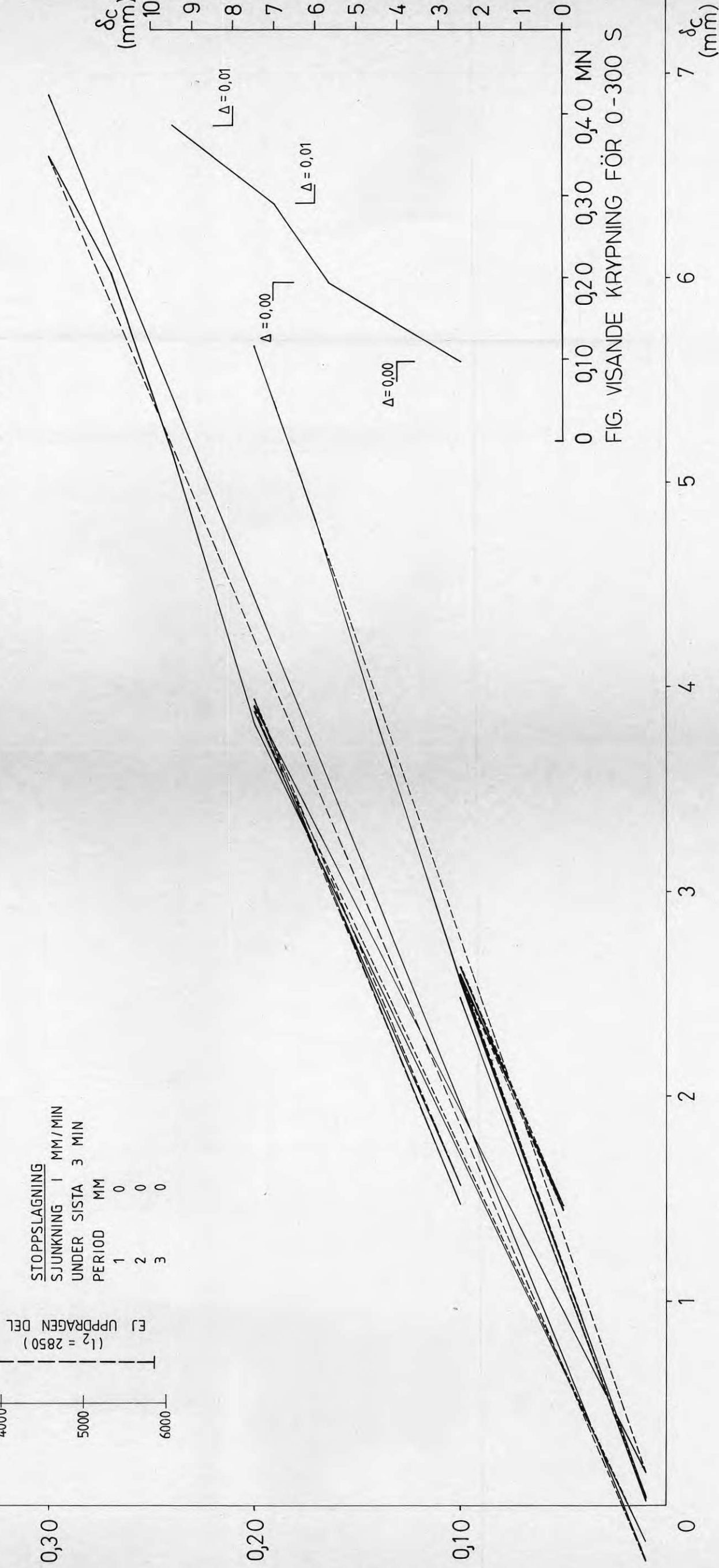


FIG. VISANDE KRYPNING FÖR 0-300 S

RESULTAT FRÅN UPPMÄTNING  
AV PÅLE EFTER UPPDRAGNING

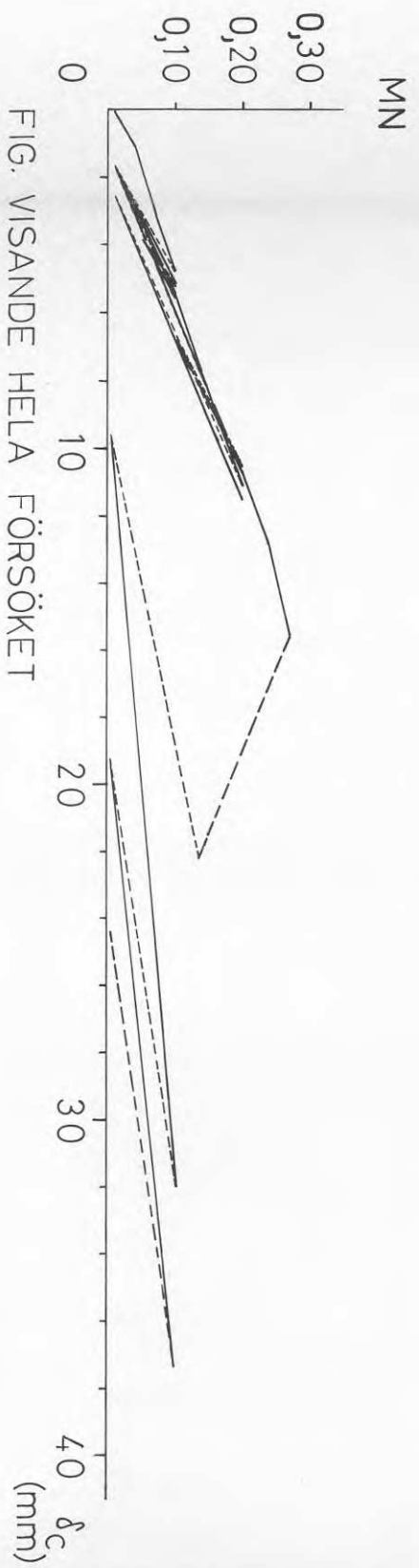
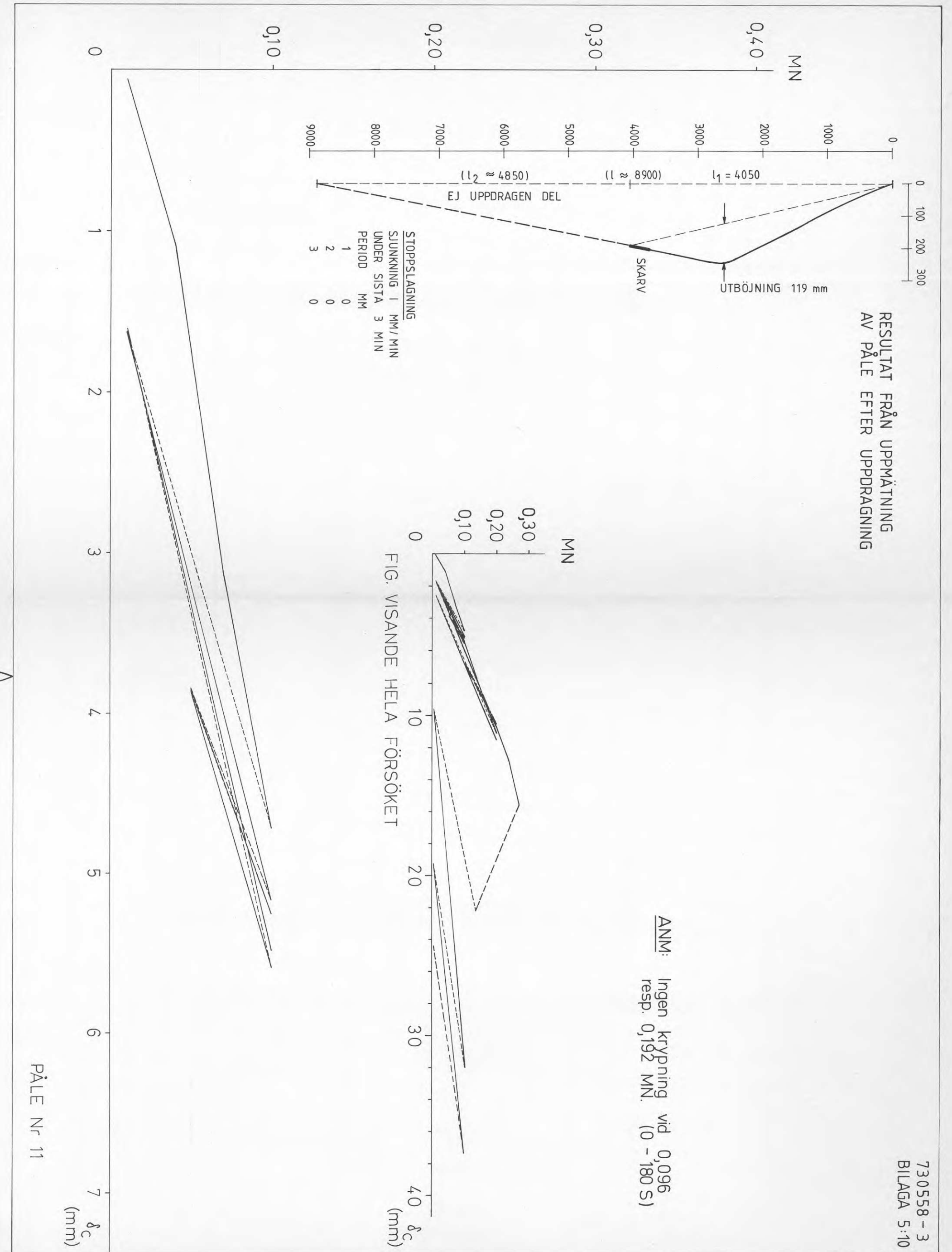


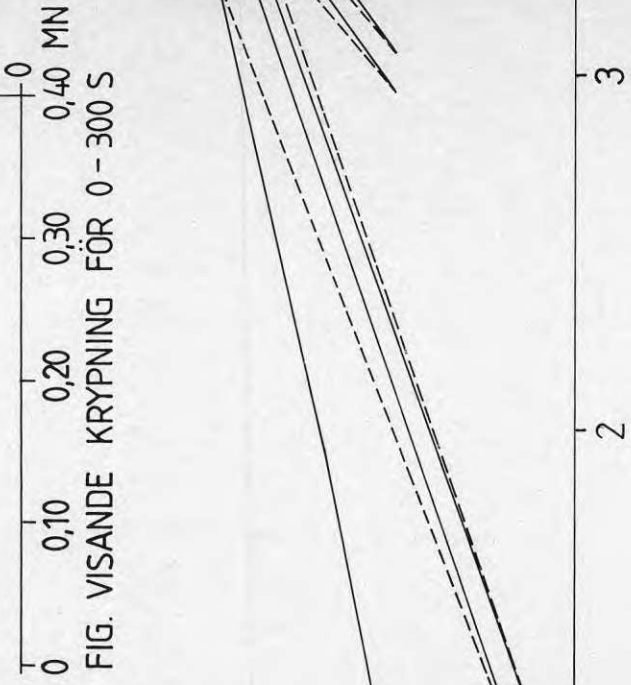
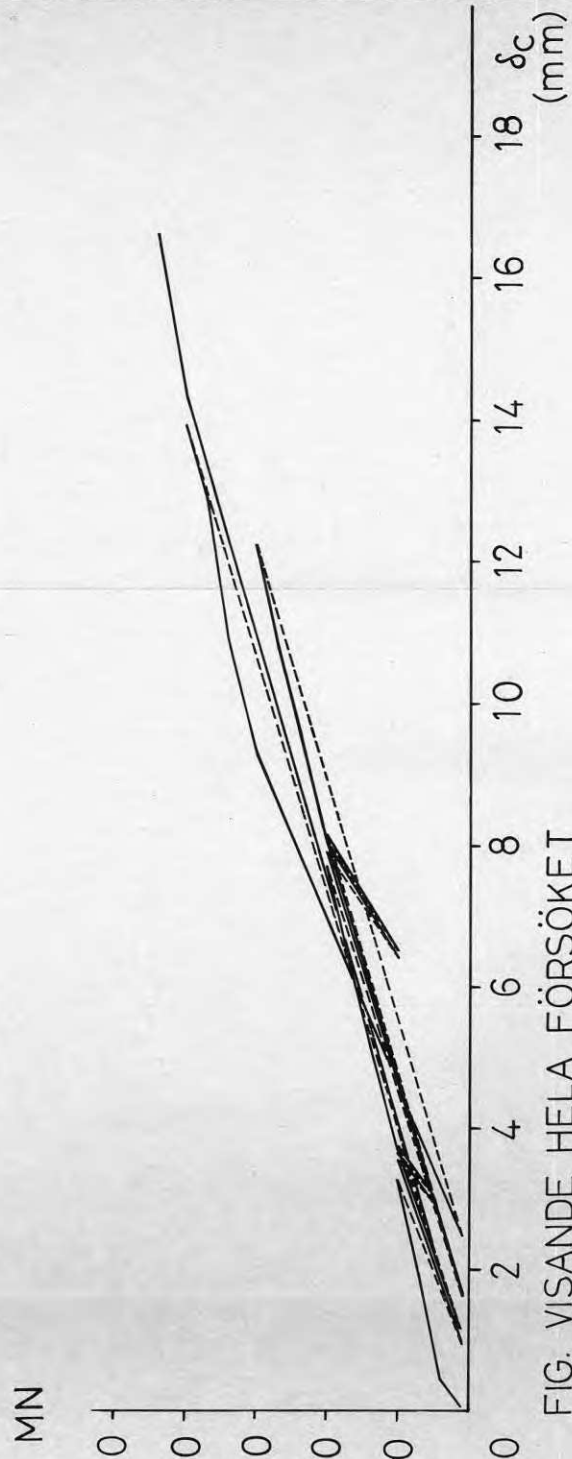
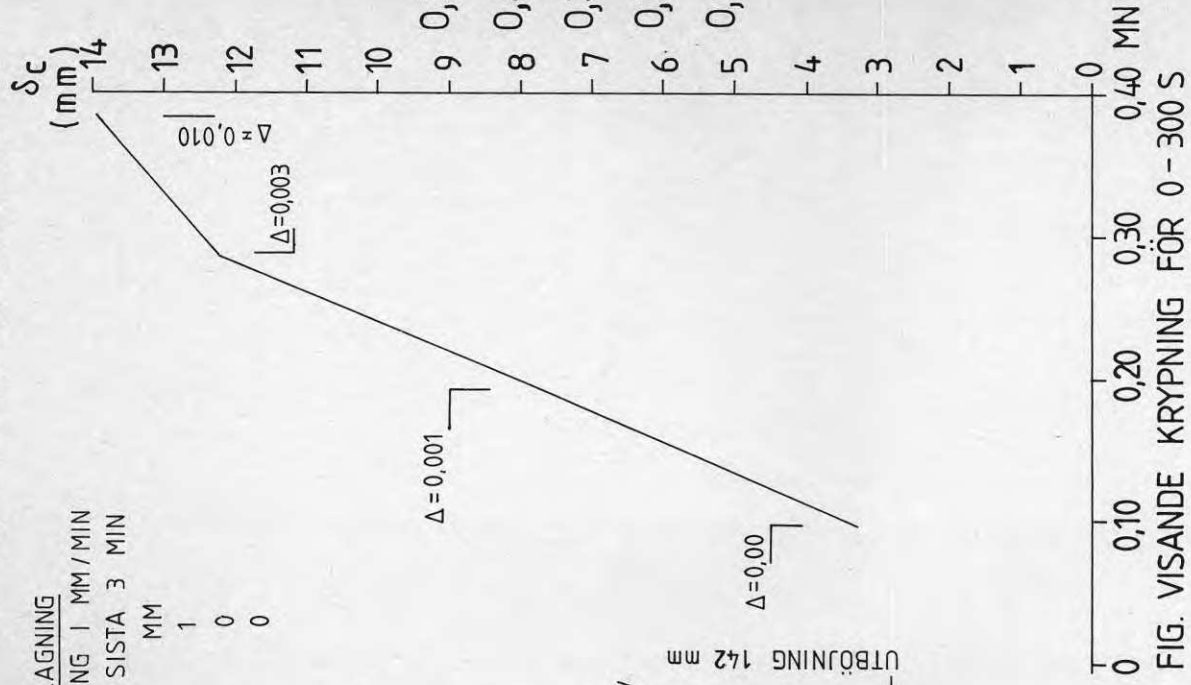
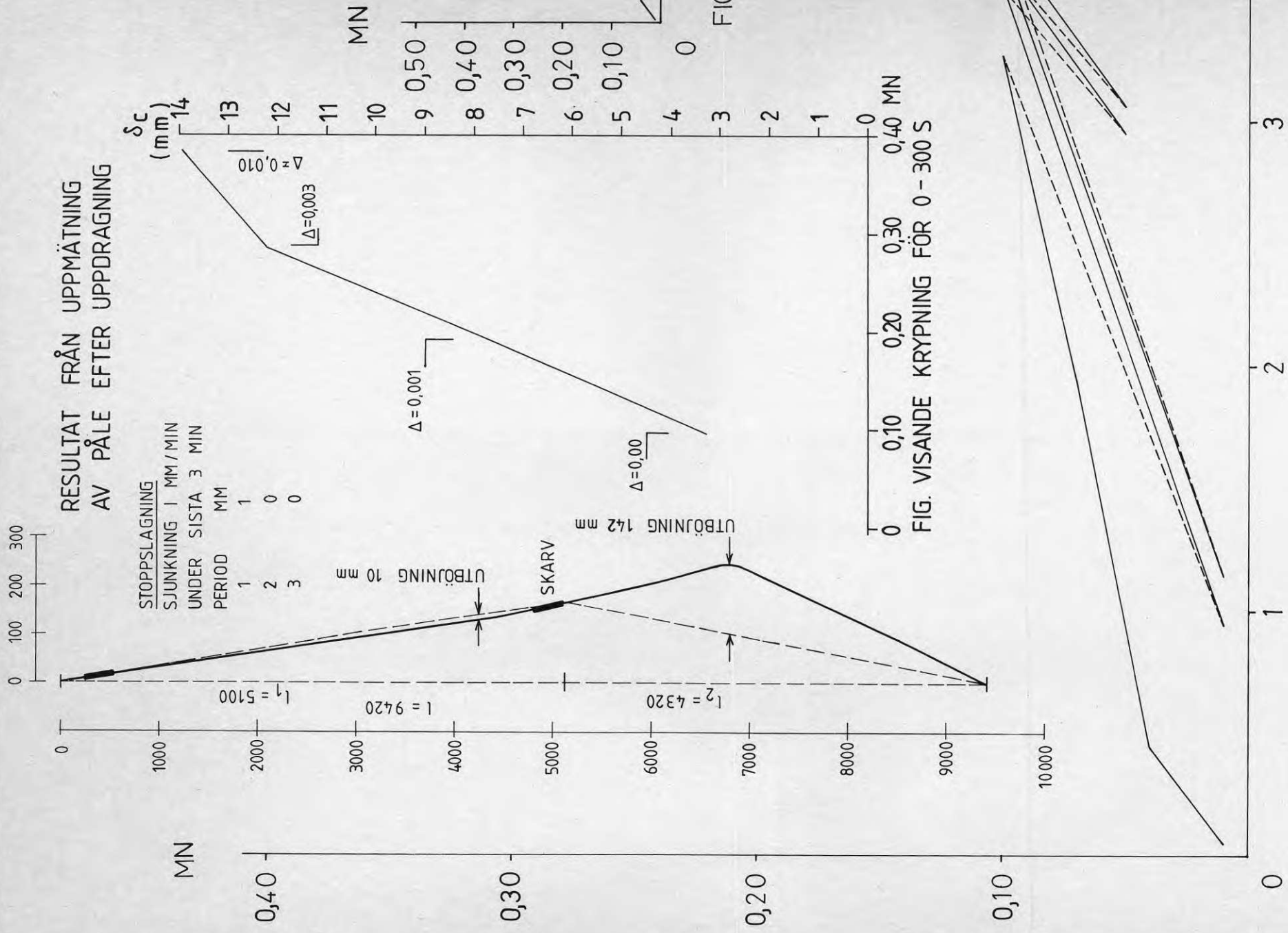
FIG. VISANDE HELA FÖRSÖKET

ANM: Ingen krypning vid 0,096  
resp. 0,192 MN. (0 - 180 S)

PÅLE Nr 11

$\delta_c$   
(mm)





RESULTAT FRÅN UPPMÄTNING  
AV PÅLE EFTER UPPDRAGNING

STOPPSLAGNING  
SJUNKNING 1 MM / MIN  
UNDER SISTA 3 MIN  
PERIOD MM

1	2
2	1
3	1

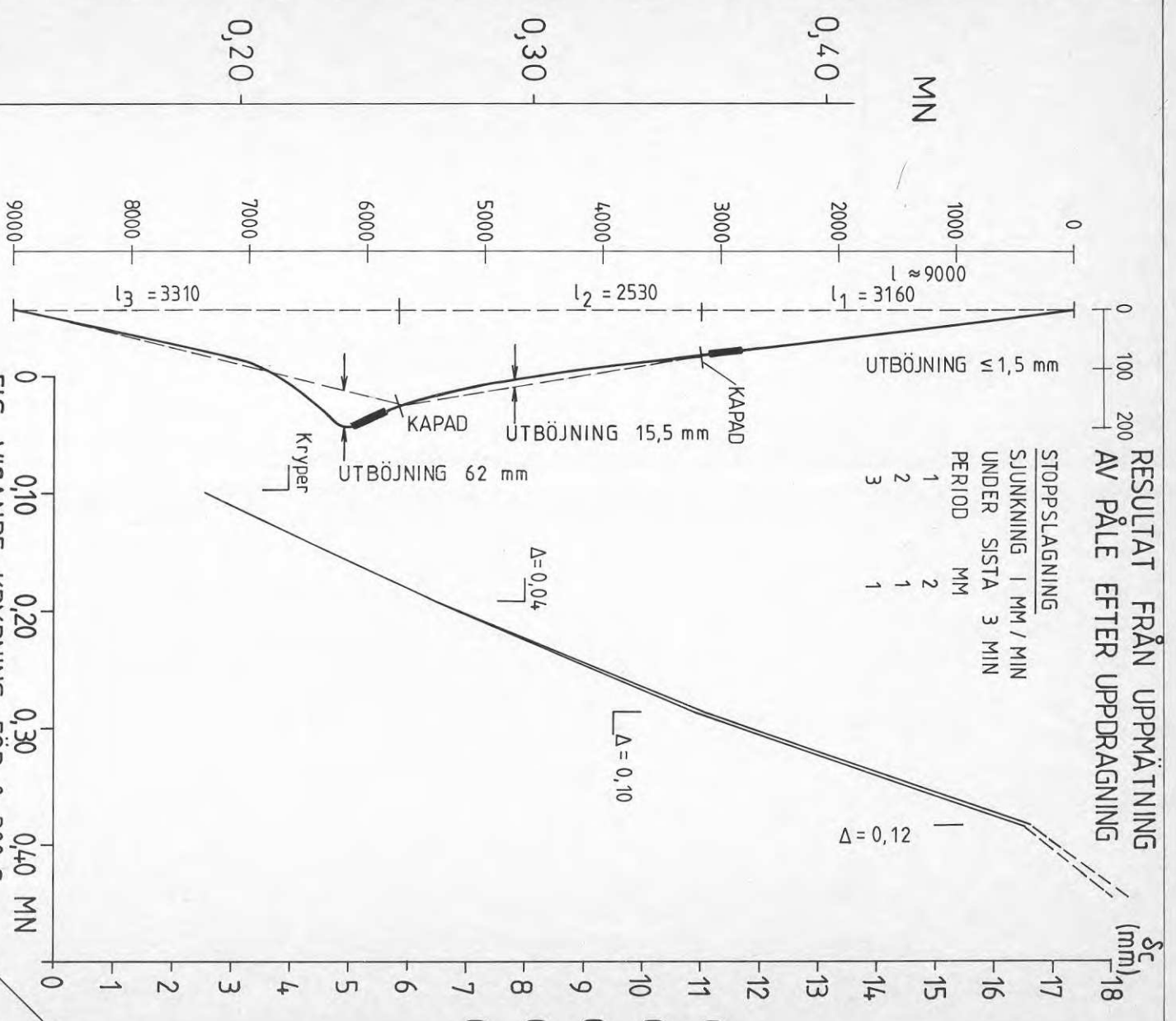


FIG. VISANDE KRYPNING FÖR 0-300 S

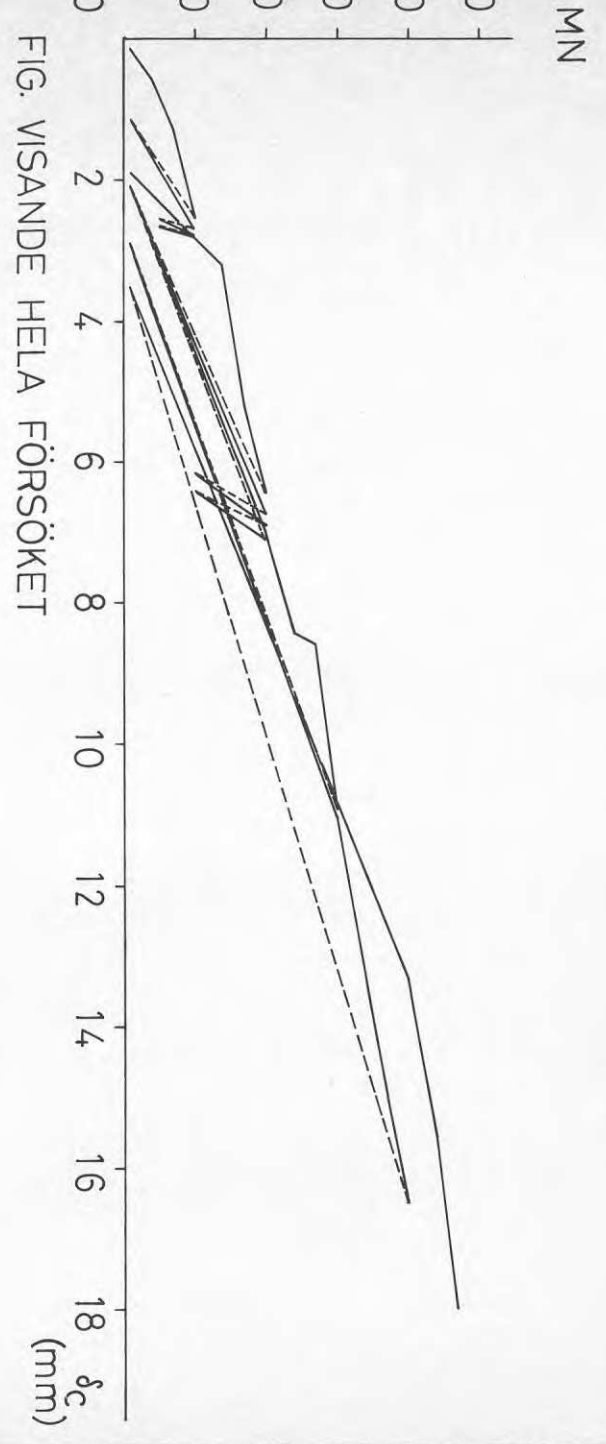
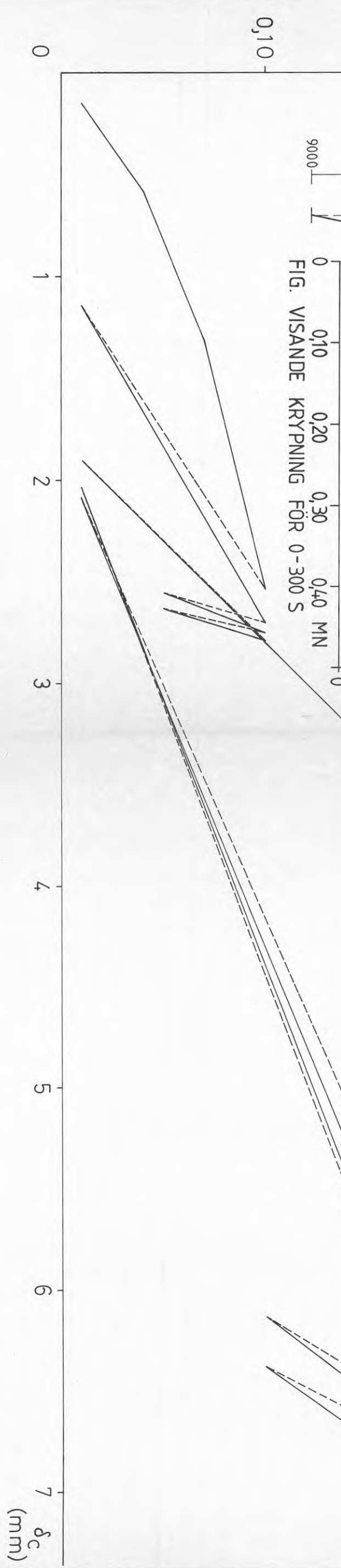
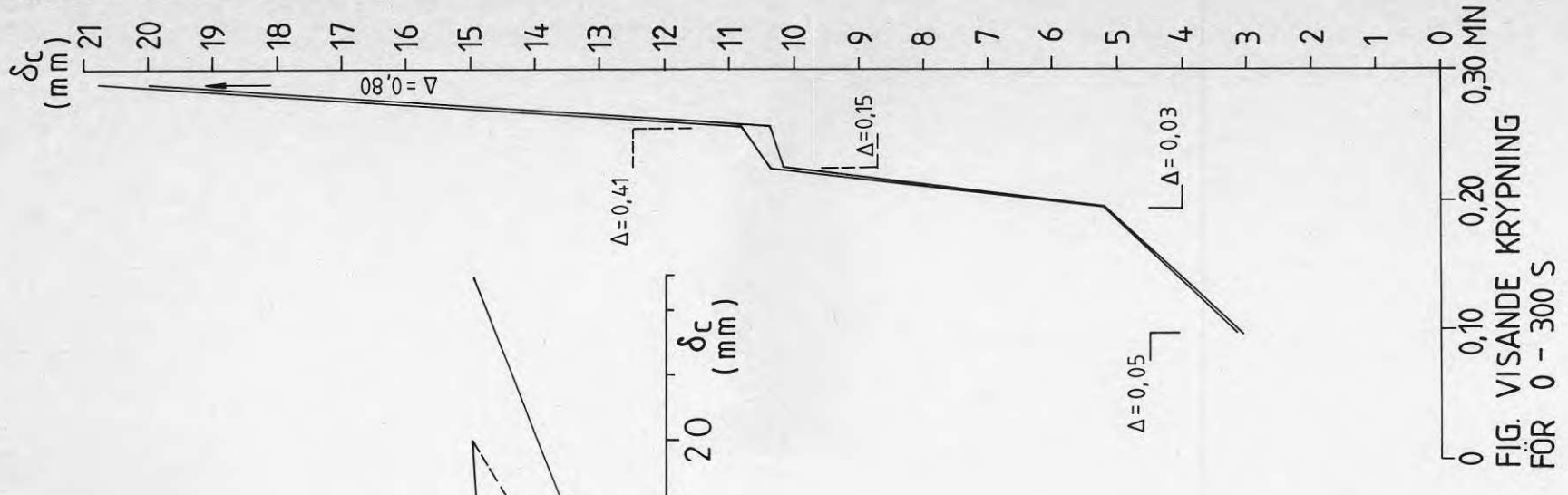
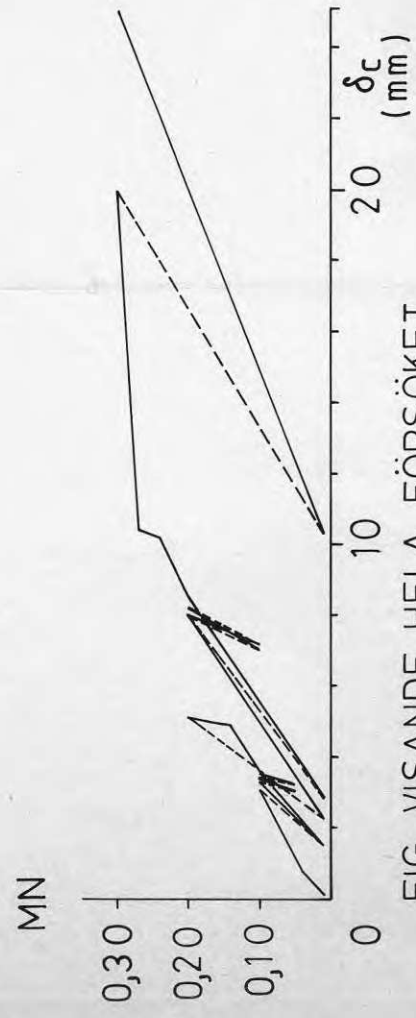
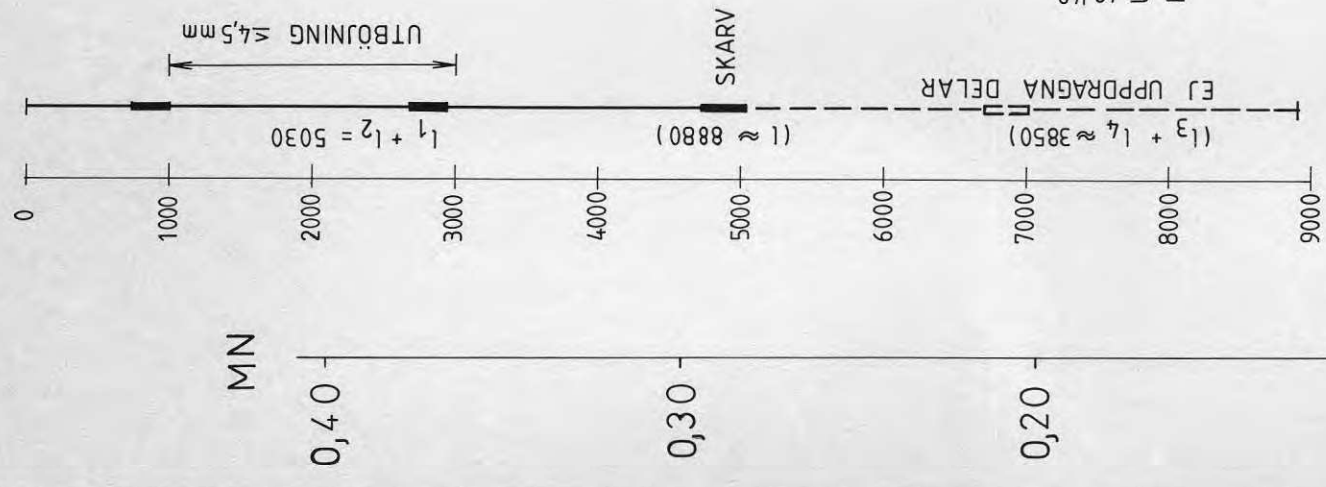


FIG. VISANDE HELA FÖRSÖKET



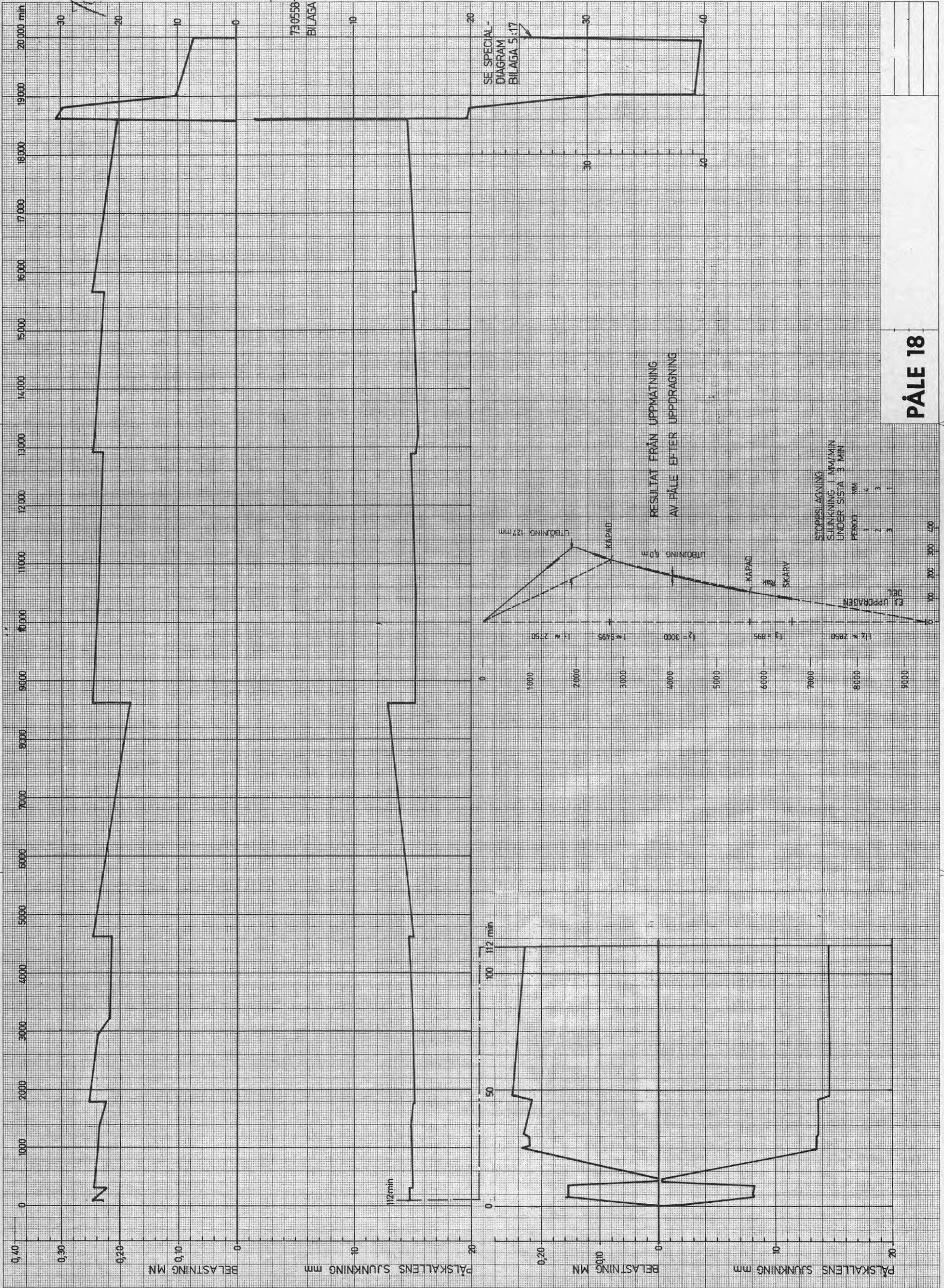
PÅLE Nr 14

RESULTAT FRÅN UPPMÄTNING  
AV PÅLE EFTER UPPDRAGNING





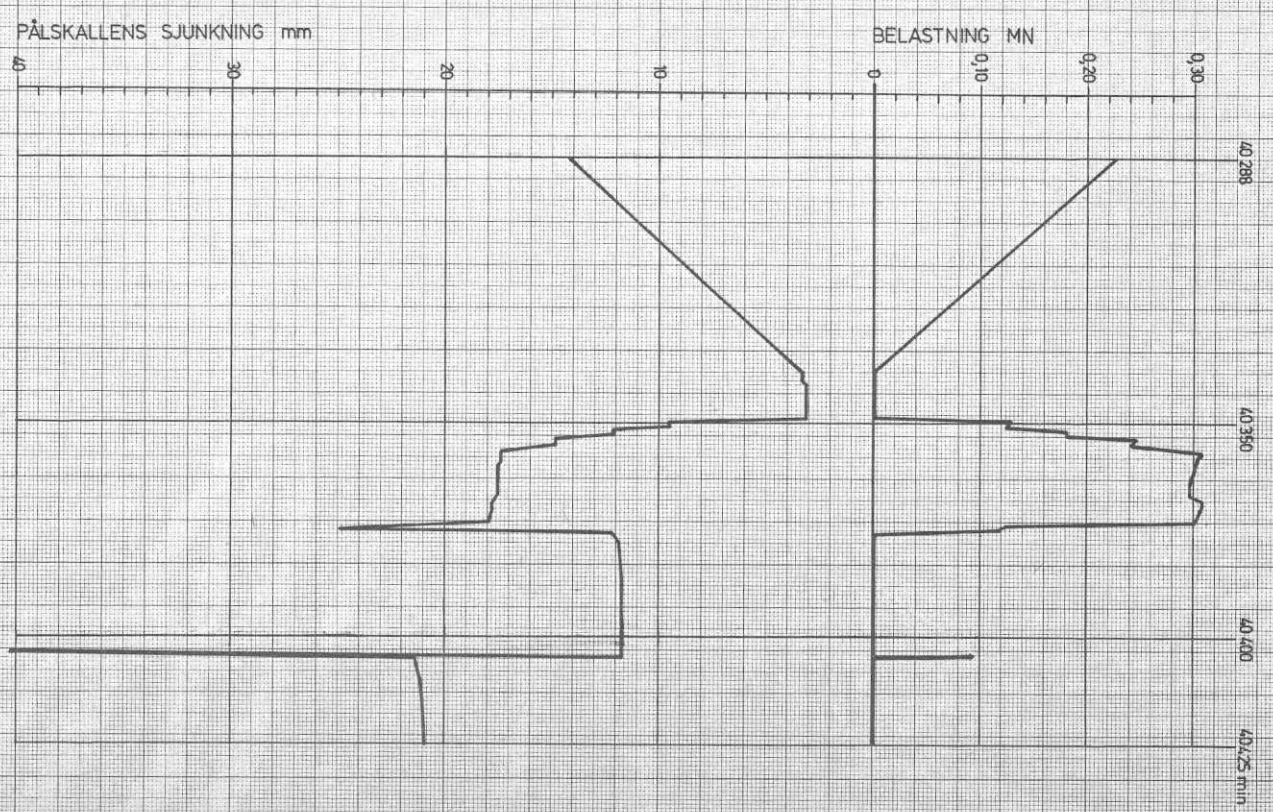




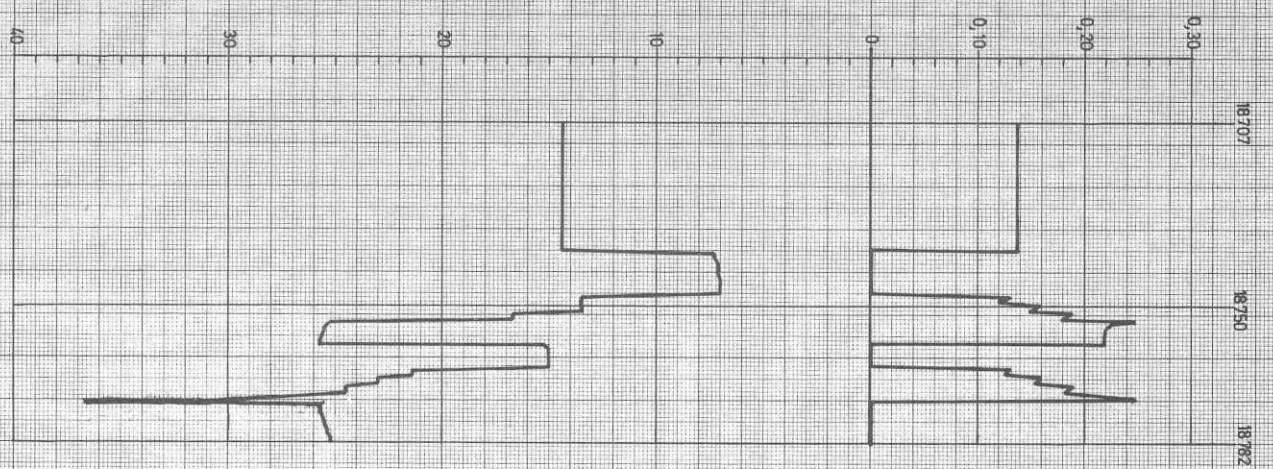
PÅLE 18



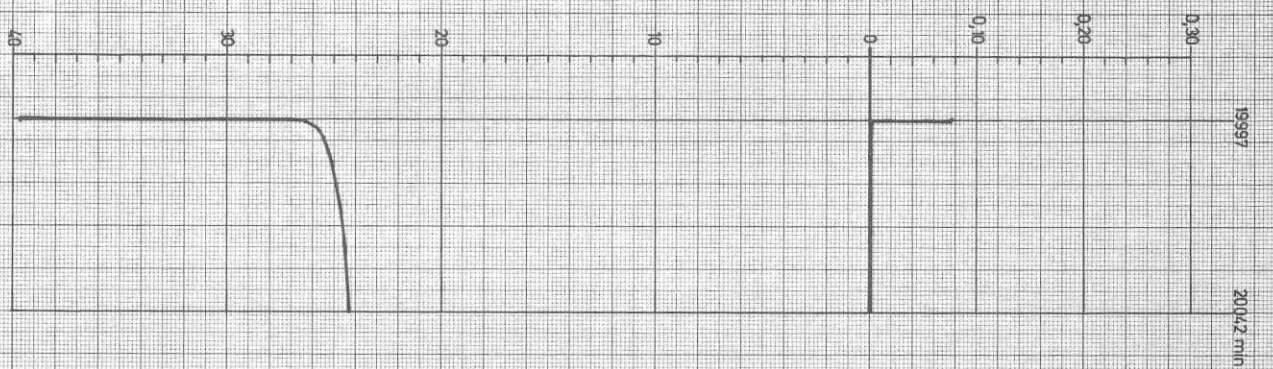
**PÅLE 13**



**PÅLE 16**



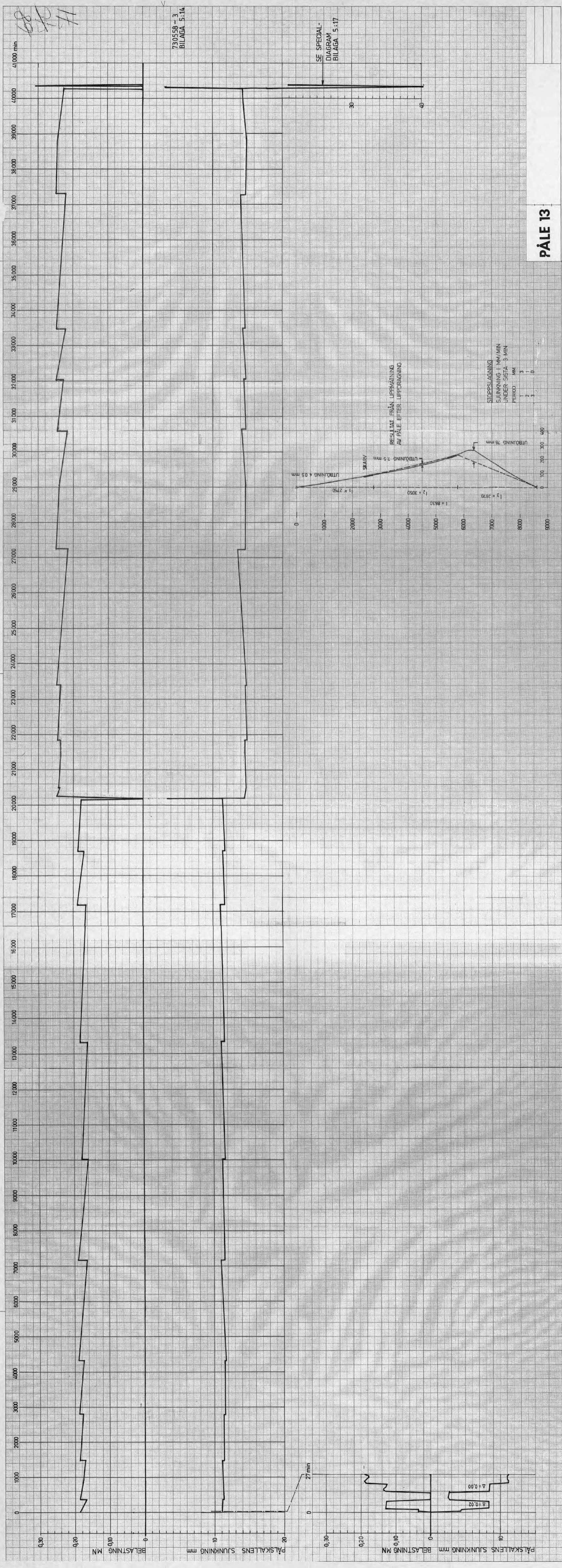
**PÅLE 18**



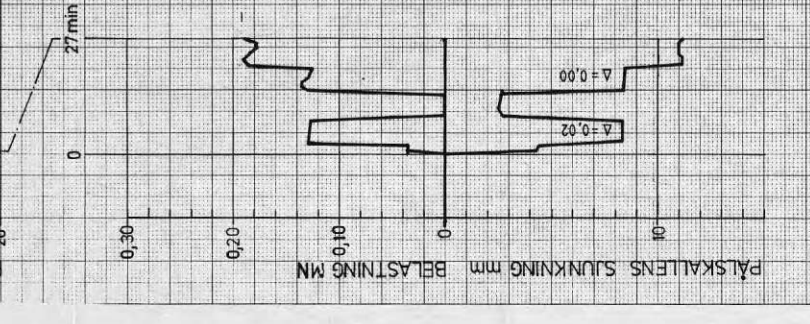
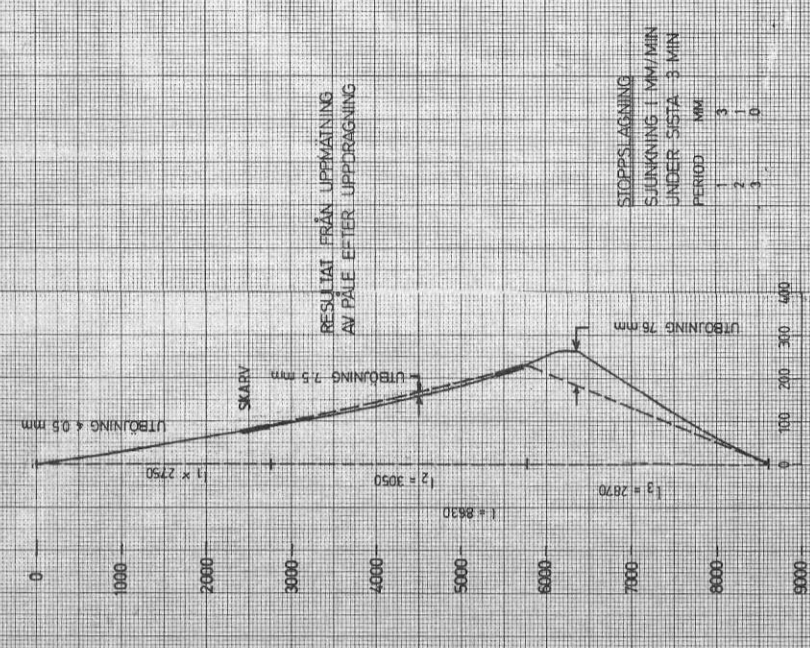
KRYPNING VID AVLASTNING

*Handwritten signature*

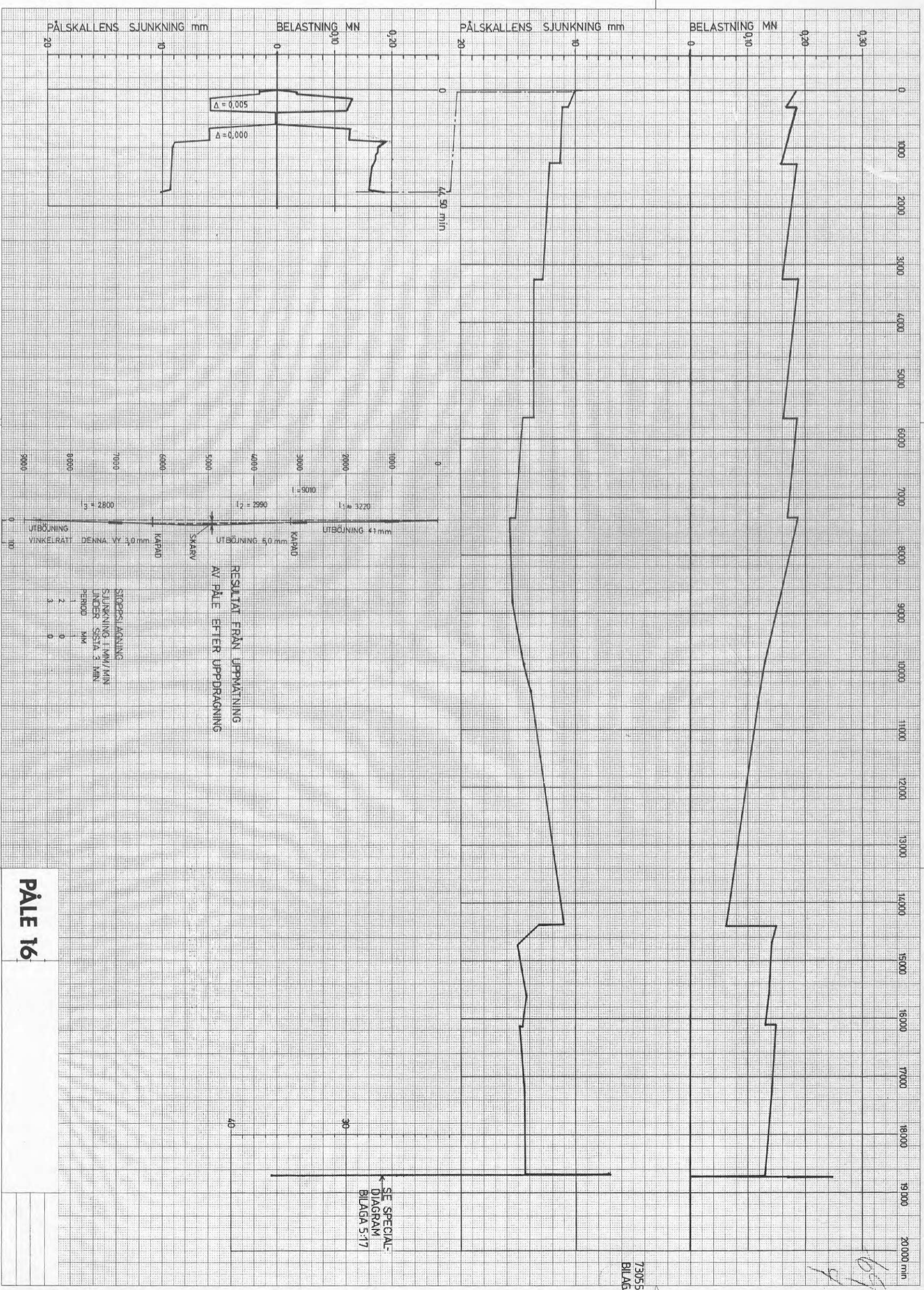




PÅLE 13





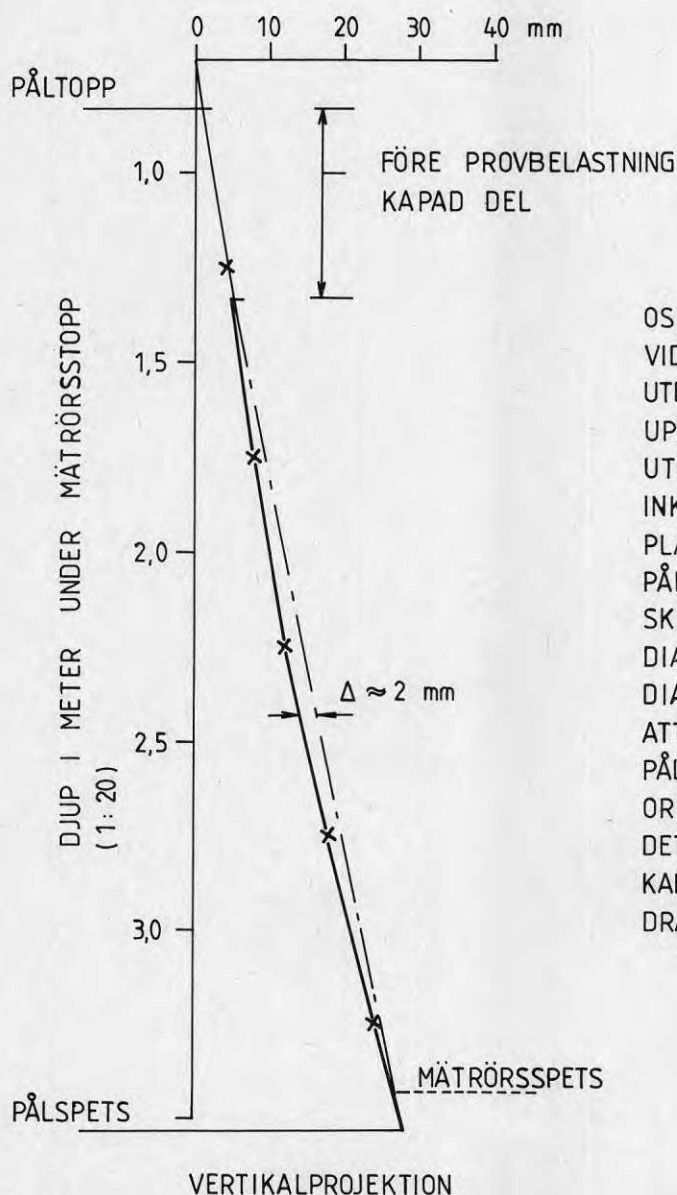
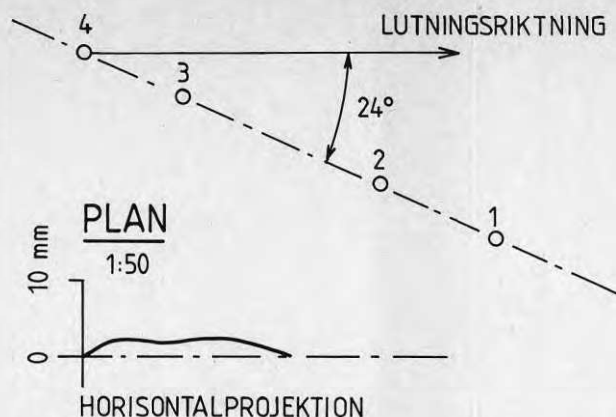


**PÅLE 16**

1	0
2	0
3	0

# INKLINOMETERMÄTNING

PÅLE 4, PLATS 1 EFTER SLAGNING

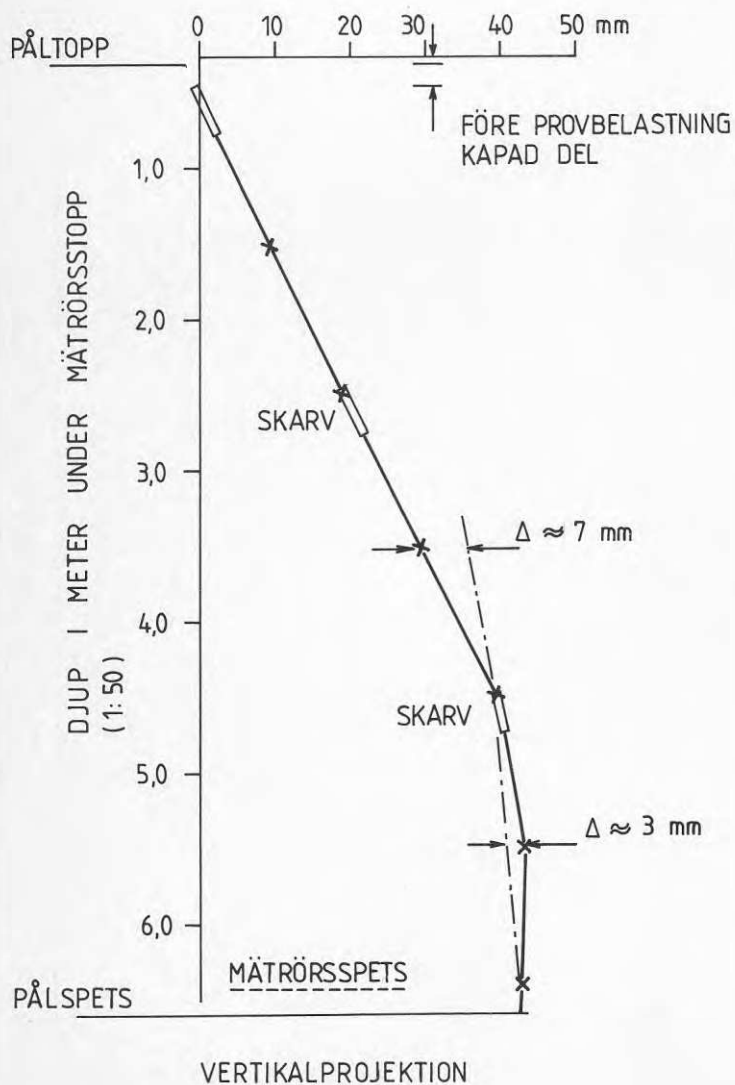
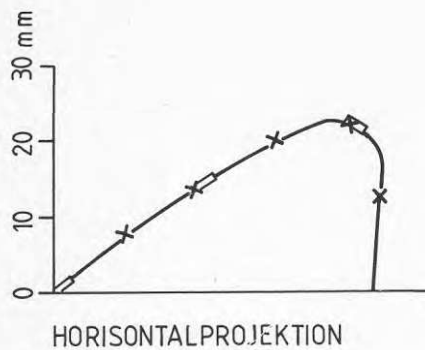
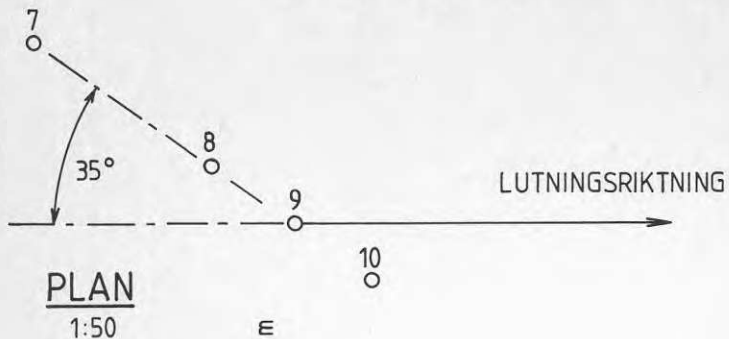


OSKARVAD PÅLE  
VID INKLINOMETERMÄTNING REGISTRERADES  
UTBÖJNINGEN TILL ca 2 mm. EFTER  
UPPDRAGNING AV PÅLEN UPPMÄTTES  
UTBÖJNINGEN TILL  $\leq 1$  mm.  
INKLINOMETERMÄTNINGEN UTFÖRDES I  
PLASTRÖR SOM FÖRUTSATTES FÖLJA  
PÅLENS FÖRÄNDRINGAR I RAKHET.  
SKILLNADEN MELLAN STÅLRÖRETS INNER-  
DIAMETER OCH PLASTRÖRETS YTTRE -  
DIAMETER ÄR ca. 6,6 mm. DETTA MEDFÖR  
ATT PLASTRÖRET ICKE EXAKT FÖLJER  
PÅLENS FÖRÄNDRINGAR I RAKHET, VILKET  
ORSAKAR DE AVVIKANDE MÄTRESULTATEN.  
DET SKALL ANMÄRKAS ATT PÅLEN ICKE  
KAN ÄNDRA FORM VID ELLER EFTER UPP-  
DRAGNING.



# INKLINOMETERMÄTNING

## PÅLE 9, PLATS 2 EFTER SLAGNING

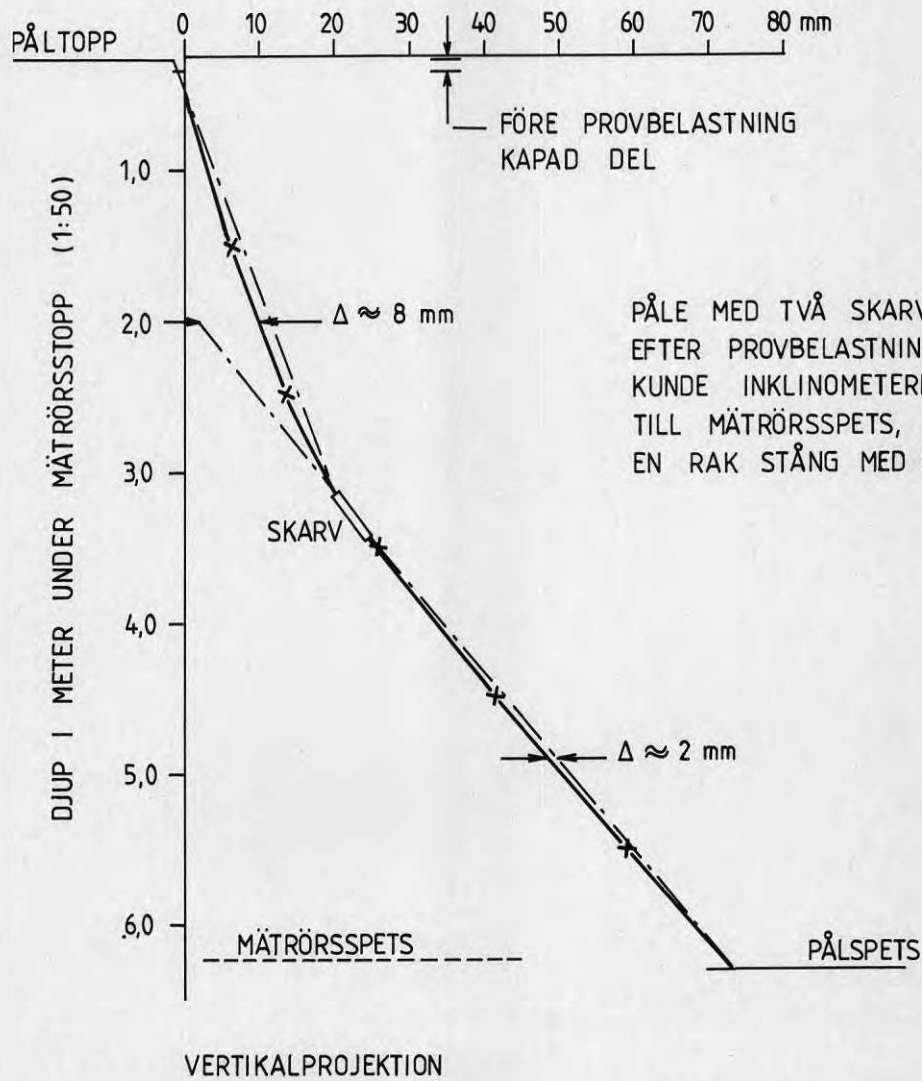
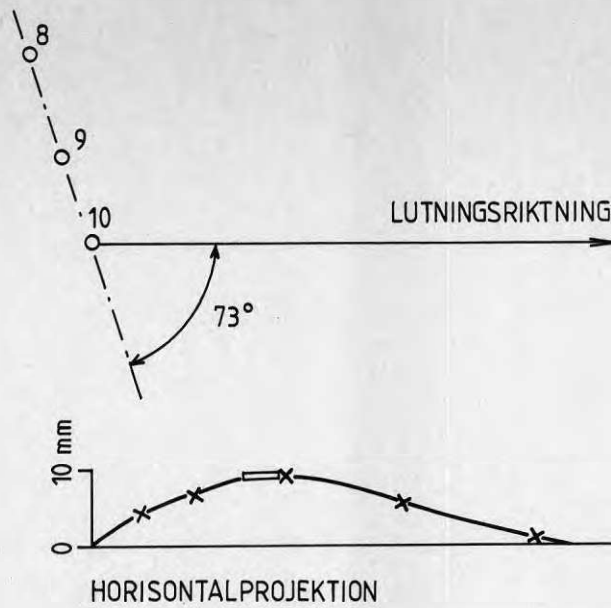


PÅLE MED TVÅ SKARVAR  
EFTER PROVBELASTNING  
(BROTT) KUNDE INKLI-  
NOMETERN EJ NEDFÖRAS  
TILL MÄTRÖRSSPETS, EJ  
HELLER EN RAK STÅNG  
MED DIAMETERN  $\phi 26 \text{ mm}$ .

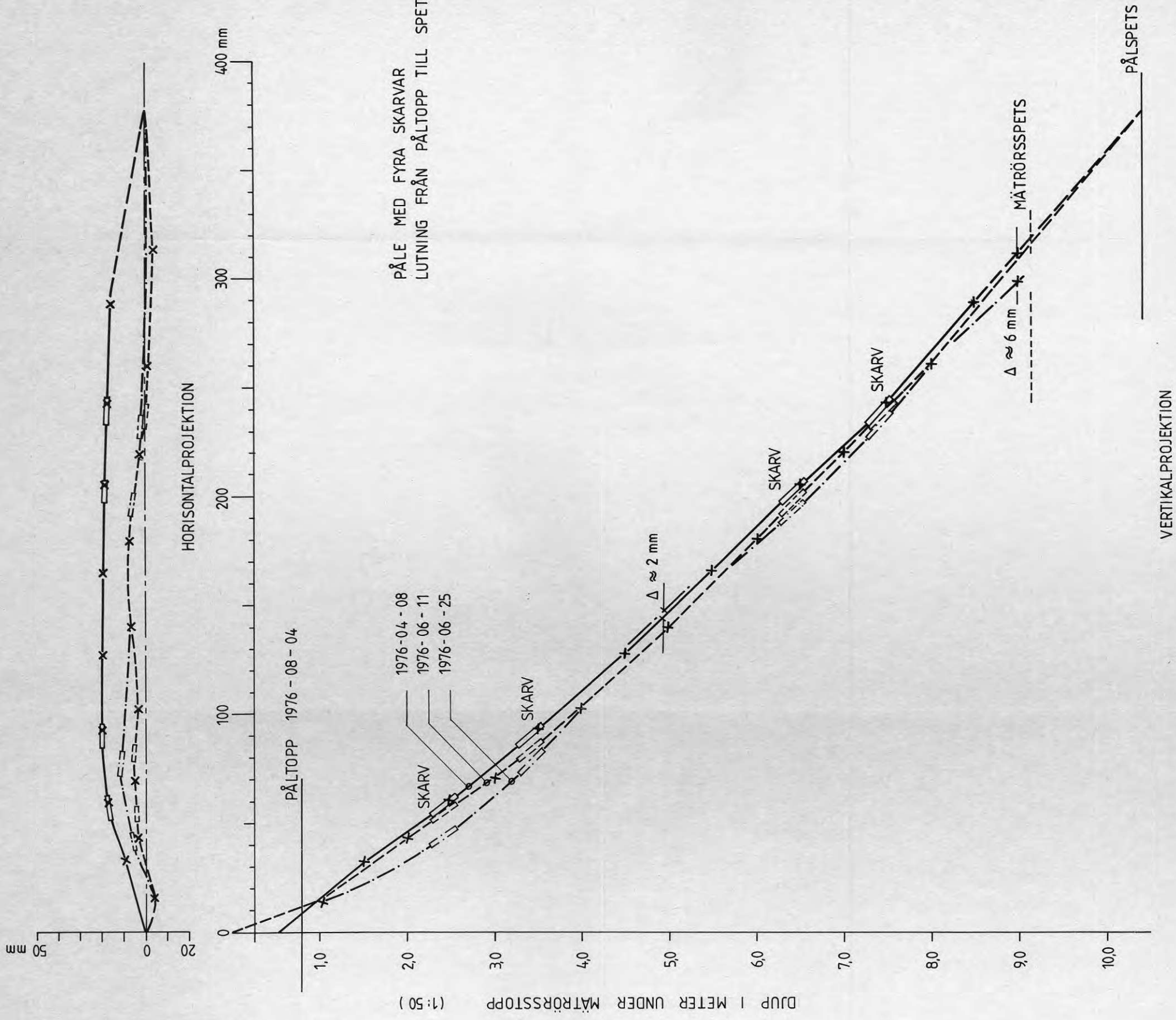


# INKLINOMETERMÄTNING

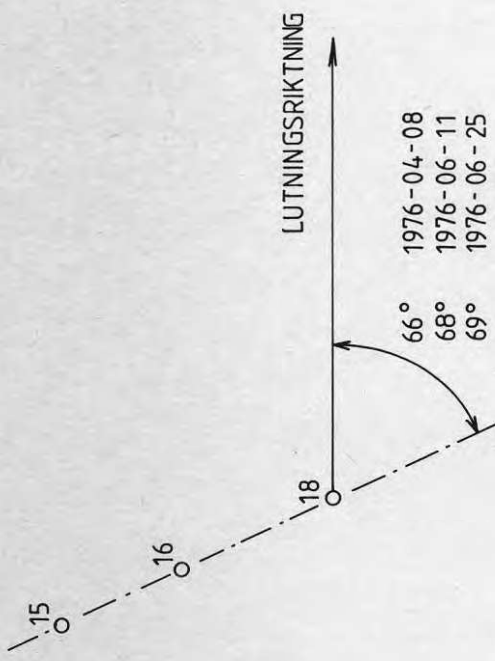
PÅLE 10, PLATS 2 EFTER SLAGNING







PÅLE MED FYRA SKARVAR  
LUTNING FRÅN PÅLTOPP TILL SPETS ~ 4%



LUTNINGSDIREKTION  
 66° 1976-04-08  
 68° 1976-06-11  
 69° 1976-06-25

VERTIKALPROJEKTION



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
730558-3 från Statens råd för byggnadsforskning till  
Bjurströms Geotekniska Byrå AB, numera ingående  
i Tyréns Företagsgrupp AB, Stockholm.**

**Art.nr: 6700553**

**Abonnemangsgrupp:  
V. Anläggningsteknik**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst, Box 7853  
103 99 Stockholm**

**R53: 1982**

**ISBN 91-540-3695-X**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Cirka pris: 25 kr exkl moms**