

MEDDELANDE NR 11

Bärförmåga hos pålar slagna
till släntberg

Av Bengt B. Broms

Statens Geotekniska Institut

1 november 1965

BEARING CAPACITY OF SLENDER CONCRETE
PILES SUPPORTED BY A SLOPING ROCK
SURFACE

De i meddelandet framförda åsikterna är författarens och be-
höver icke vara pålkommitténs ståndpunkt.

Pris 15:- kr.

Meddelandet ingår även i Statens Geotekniska Instituts serie
"Särtryck och preliminära rapporter" (nr 11).

Innehållsförteckning

	sida
English summary	1
Inledning	2
Bäddmodulen k_D	5
Beräkning av sidoutböjning, böjmoment och sidomotstånd	7
Sidoutböjning och böjmoment förorsakade av horisontalkraften H	8
Tilläggskrafter förorsakade av vertikalkraften V	13
Dimensionering av pålar, drivna till släntberg	17
Sammanfattning	21
Litteratur	22
Pålkommitténs handlingar	23

ENGLISH SUMMARY

Large bending moments develop frequently in slender point bearing piles, which are supported by a sloping rock surface. The resulting maximum bending moment has been calculated in this article in terms of an eccentricity ratio e/D of the applied load, where e is the eccentricity of the applied load and D is the side or diameter of the pile. It was found that the eccentricity ratio e/D was not influenced appreciably by pile size and that this ratio decreased with increasing coefficient of subgrade reaction kD .

The relationship between e/D and the coefficient of subgrade reaction kD is summarized in Table III. It can be seen in Table III, for example, that e/D is 0,21 when the coefficient of subgrade reaction kD is 60 t/m^2 . This coefficient corresponds to an undrained shear strength of about 3 t/m^2 for a soft clay. The values of e/D , which are given in Table III, can be used for the design of concrete piles. It must be remembered, however, that the computed values of e/D are based on several simplifying assumptions, which have not been substantiated by field measurements. The proposed method should therefore be used with care until enough experience has been gained.

The maximum bending moment develops close to the pile point. It is recommended that slender concrete piles which are driven through a layer of soft clay down to a sloping rock surface should be reinforced with respect to the eccentricity ratios given in Table III and for the lengths given in Table II. It is thus recommended, that a square concrete pile with 0.25 m side should be reinforced for a length of 5.20 m from the pile point when e/D is 0.21 and kD is 60 t/m^2 .

BÄRFÖRMÅGA HOS PÅLAR SLAGNA TILL SLÄNTBERG

INLEDNING

Vid slagning av pålar mot släntberg inträffar ofta brott vid pålens nedre del såsom visas i fig. 1. Denna brottorsak är vanlig för armerade betongpålar med låg armeringsprocent, när pålarna har slagits genom ett djupt lerlager med låg skjuvhållfasthet.

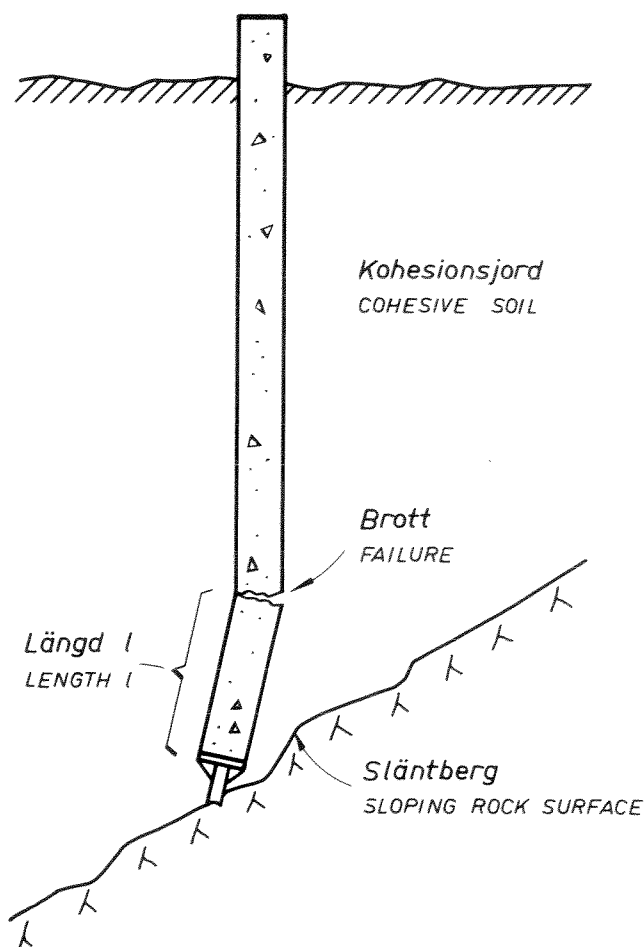


Fig. 1. BROTT VID PÅSLAGNING TILL SLÄNTBERG.

Fig. 1. Failure which takes place during driving of reinforced concrete piles to a sloping rock surface.

När en påle under nedslagning träffar en lutande bergyta, kommer spetsen att glida, om den ej omedelbart tränger ned i bergytan

eller får sidostöd av fasta jordlager. Det bör emellertid påpekas att pålar försedda med bergspets normalt tränger ned i berget utan glidning.

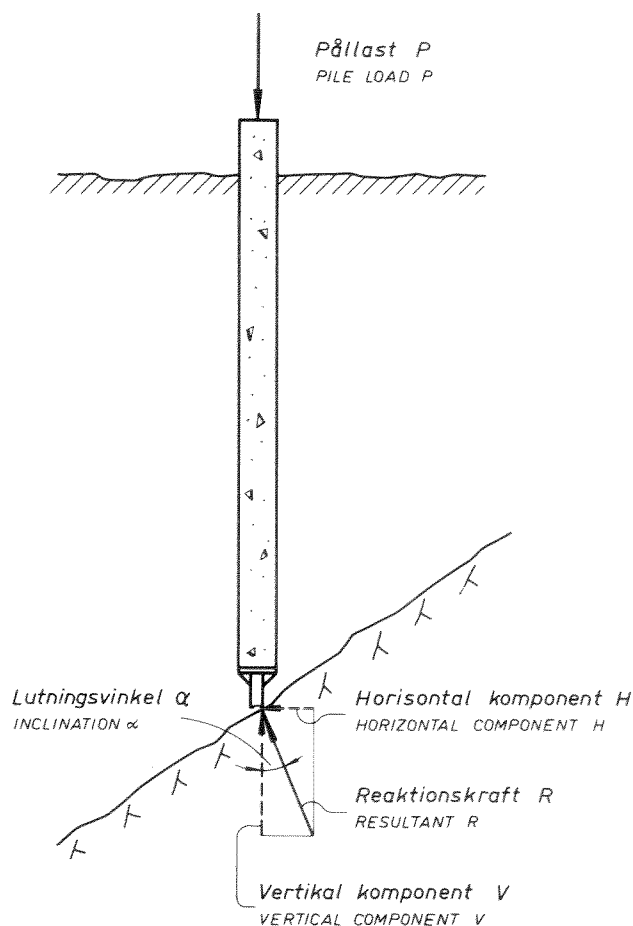


Fig. 2a. LASTFÖRDELNING VID SLAGNING TILL SLÄNTBERG.

Fig. 2a. Load distribution during driving of piles to a sloping rock surface.

Vid glidning kommer bergets reaktionskraft R (fig. 2a) ej att vara riktad längs pålens axel på grund av bl.a. friktion mellan bergdubb och berg utan avviker i den riktning som svarar mot vinkeln α . Pålen kommer härvid att glida utefter bergytan tills dess pålens sidomotstånd (som är beroende av dels jordens sidotryck, dels pålens böjstyvhet) är lika med reaktionskraftens horisontella komponent H , såsom visas i fig. 2b.

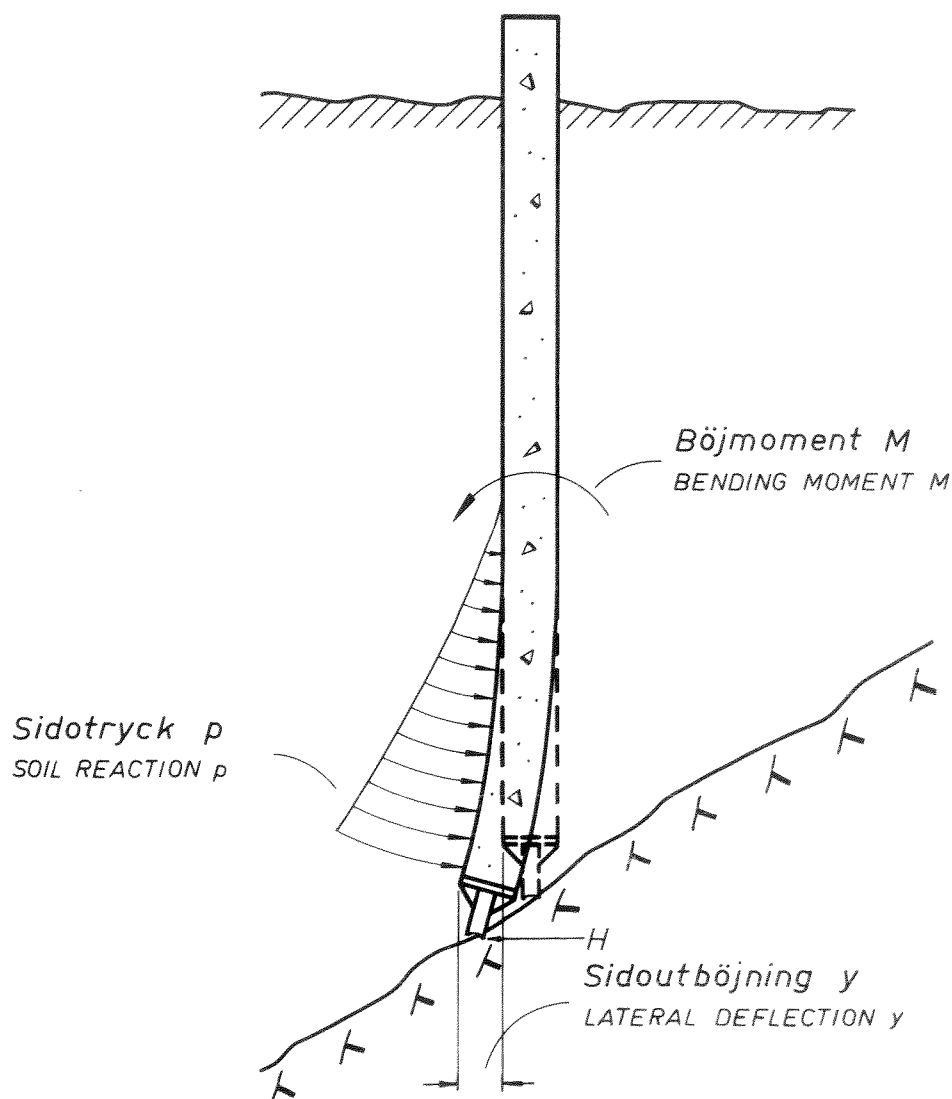


Fig. 2b. LASTFÖRDELNING VID SLAGNING TILL SLÄNTBERG.

Fig. 2b. Load distribution during driving of piles to a sloping rock surface.

Reaktionskraften förorsakar stora böjmoment i pålen och brott inträffar, när det maximala böjmomentet i pålen når dennas brotthållfasthet. I denna artikel redogöres för metoder, som kan användas för beräkning av de faktorer, som bidrager till den brotttyp som visas i fig. 1. Vidare diskuteras åtgärder som kan vidtagas för att minska risken för brott under nedslagning. Dessutom föreslås dimensioneringsregler för pålar slagna till släntberg.

BÄDDMODULEN k_D

En påles sidomotstånd (2) samt fördelning av böjmoment längs en sidobelastad påle kan beräknas, om man antager att den omgivande jordarten uppför sig som ett ideellt elastiskt material, dvs. om man antar att jordens reaktionstryck P (fig. 2b) är proportionellt mot pålens utböjning (3) enligt ekvationen:

$$q = k_D y \dots\dots\dots /1/$$

där q är jordens reaktionskraft per längdenhet, y är pålens sidoutböjning och koefficienten k_D är den s.k. bäddmodulen.

Bäddmodulen k_D är för ett kohesionsmateriel beroende av den omgivande lerans skjuvhållfasthet. Vid kortvariga belastningsfall (vilket motsvarar t.ex. förhållandena under själva nedslagningen) kan bäddmodulen k_D (1) utvärderas ur ekvationen

$$k_D = (32 \text{ till } 128) \tau_{fu} \dots\dots\dots /2/$$

där τ_{fu} är lerans odränerade skjuvhållfasthet. Det bör emellertid framhållas att stora svårigheter föreligger vid beräkning av bäddmodulen k_D . Antalet försöksvärden är mycket begränsade och spridningen hos de enskilda försöksvärdena är stor. På grund av lerans konsolidering sjunker bäddmodulen vid långvarig belastning. Denna minskning är relativt stor vid höga värden av lerans flytgräns eller finlekstal (w_F) på grund av hög kompressibilitet hos leran. För leror med normal till låg kompressibilitet ($w_F < 50$) beräknas bäddmodulen vid långvariga belastningsfall i en del fall ur ekvationen

$$k_D = 20 \tau_{fu} \dots\dots\dots /3/$$

Således blir bäddmodulen $k_D = 60,0 \text{ t/m}^2$ enligt ekv. /3/ för en lera med en odränerad skjuvhållfasthet av $3,0 \text{ t/m}^2$. I de fall då finlekstalet överstiger 50 uppskattas bäddmodulen ofta med en konventionell sättningsanalys. Därvid beräknas spänningsfördelningen med den s.k. 2:1 metoden.

Under antagande av att bäddmodulen växer linjärt med djupet under markytan (4) kan bäddmodulen för friktionsmateriel be-

räknas ur ekvationen

$$kD = n_h z \dots\dots\dots /4/$$

där z är avståndet under markytan och n_h en konstant, som är beroende av jordartens lagringstäthet och överlagringstrycket. Terzaghi (1955) har rekommenderat de värden på koefficienten n_h som visas i Tabell I.

Tabell I. Beräkning av koefficienten n_h efter Terzaghi (4)

Evaluation of coefficient n_h according to Terzaghi (4).

Relativ lagringstäthet (Relative Density)	Koefficienten n_h i t/m^3 (Coefficient n_h in t/m^3)		
	Lös (Loose)	Normal (Normal)	Tät (Dense)
Över grundvattenytan (Above ground water table)	250	750	2000
Under grundvattenytan (Below ground water table)	140	500	1200

Dessa värden av koefficienten n_h har beräknats ur statistiska belastningsförsök. Under neddrivning av pålar åstadkommer emellertid vibrationer en packning av jorden. På grund av dessa vibrationer är det möjligt att koefficienten n_h under nedslagningen kan antaga ett betydligt lägre värde än de som är angivna i tabell 1. Emellertid bör efter nedslagningen bäddmodulen överstiga de värden som är angivna. Därför bör dessa värden kunna användas utan risk vid beräkning av pålars bärförmåga efter nedslagningen. Om de i tabellen angivna värdena användes, är bäddmodulen $kD = 2.100 t/m^2$ vid pålens spets, när pållängden är 15 m, grundvattenytan är belägen vid markytan och friktionsmaterialet är löst lagrat. I det fall när materialet är tätt lagrat och grundvattenytan är belägen under pålspetsen, är $kD = 30.000 t/m^2$.

BERÄKNING AV SIDOUTBÖJNING, BÖJMOMENT OCH SIDOMOTSTÅND

Fördelning av sidoutböjning, böjmoment och sidomotstånd kan beräknas såsom visas i fig. 3. Den nedslagna pålen (fig. 3a) påverkas av bergets reaktionskrafter H och V . Dessa krafter verkar vinkelrätt mot resp. längs pålaxeln. För beräkningsändamål har först pålens sidoutböjning och pålens böjmoment undersökts, då pålen endast påverkas av den horisontella komponenten H , som illustreras i fig. 3b. Därefter har beräknats de tilläggskrafter som är förorsakade av axialkraften P , såsom visas i fig. 3c.

Belastning P

APPLIED LOAD P

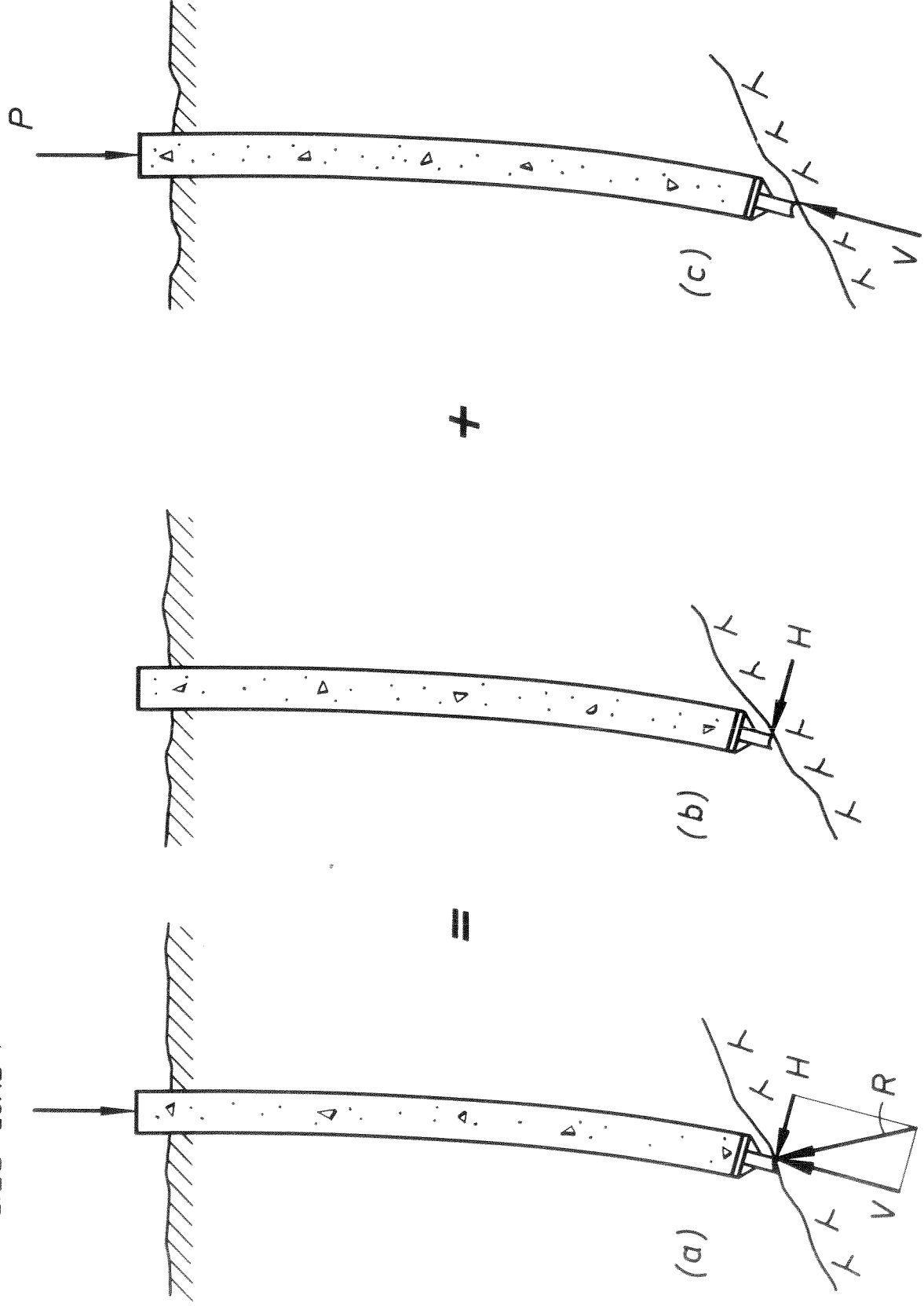


Fig. 3. BERÄKNING AV DET MAXIMALA BÖJMOMENTET HOS PÅLAR SLAGNA TILL SLÄNTBERG.

Fig. 3. Computation of maximum bending moment in piles driven to a sloping rock surface.

SIDOUTBÖJNING OCH BÖJMOMENT FÖRORSAKADE AV HORIZONTALKRAFTEN H.

Den sidoutböjning och de böjmoment som är förorsakade av horisontalkraften H har bestämts med samma metod som härletts för elastiskt understödda balkar (3). När denna metod användes, beräknas en påles böjmoment samt dess sidoförskjutning med hjälp av en koefficient β , som är definierad av uttrycket

$$\beta = \sqrt[4]{kD/4EI} \dots\dots\dots /5/$$

där EI är pålens böjstyvhet. Om en påles böjstyvhet uppskattas på grundval av den ospruckna betongens tvärsnittsarea och om armeringens inverkan försummas, är koefficienten $\beta = 0,293 \text{ m}^{-1}$ för en påle med kvadratisk tvärsnitt och sidan 25 cm och som drivits genom en kohesionsjordart med en genomsnittlig bäddmodul $kD = 20 \text{ t/m}^2$. I det fall då pålen är nedslagen i en jordart med en bäddmodul dD lika med 200 t/m^2 , 2.000 t/m^2 och 20.000 t/m^2 , är koefficienten β resp. $0,522 \text{ m}^{-1}$, $0,928 \text{ m}^{-1}$ och $1,655 \text{ m}^{-1}$.

I fig. 4, 5, 6 och 7 visas sidoutböjningen och böjmomentets fördelning längs en påle, som är belastad vid spetsen enbart av sidokraften H. Pålens sidoutböjning y har uttryckts i den dimensionslösa kvantiteten $y_k/H\beta$. På samma sätt har böjmomentet M i pålen uttryckts i den dimensionslösa kvantiteten $M\beta/H$. Beräkningar har utförts för de dimensionslösa pållängderna $\beta L = 2,0; 3,0; 4,0$ och $5,0$, där L är pålens totala längd. Den dimensionslösa längden $\beta L = 2$ motsvarar pållängden 2,8 m, när koefficienten $\beta = 0,293 \text{ m}^{-1}$ och pållängden 3,8 m, när koefficienten $\beta = 0,522 \text{ m}^{-1}$.

Man kan se av fig. 4a, 5a, 6a och 7a att sidoutböjningen vid pålens spets (uttryckt i den dimensionslösa kvantiteten $y, k/H\beta$) är i stort sett oberoende av pålens längd. (Spetsutböjningen minskar dock något, när pållängden βL ökar från 2,0 till 4,0). Man kan vidare se av fig. 4, att pålen är styv när den dimensionslösa längden $\beta L = 2$ och roterar kring en punkt, som är belägen ungefär en tredjedel av pålens längd under markytan. Dessutom framgår av fig. 6 och 7 att sidoutböjningarna ej påverkas, när den dimensionslösa längden ökar från 4 till 5 (dvs. att pålen kan betraktas som en oändligt lång påle, när pålens dimensionslösa

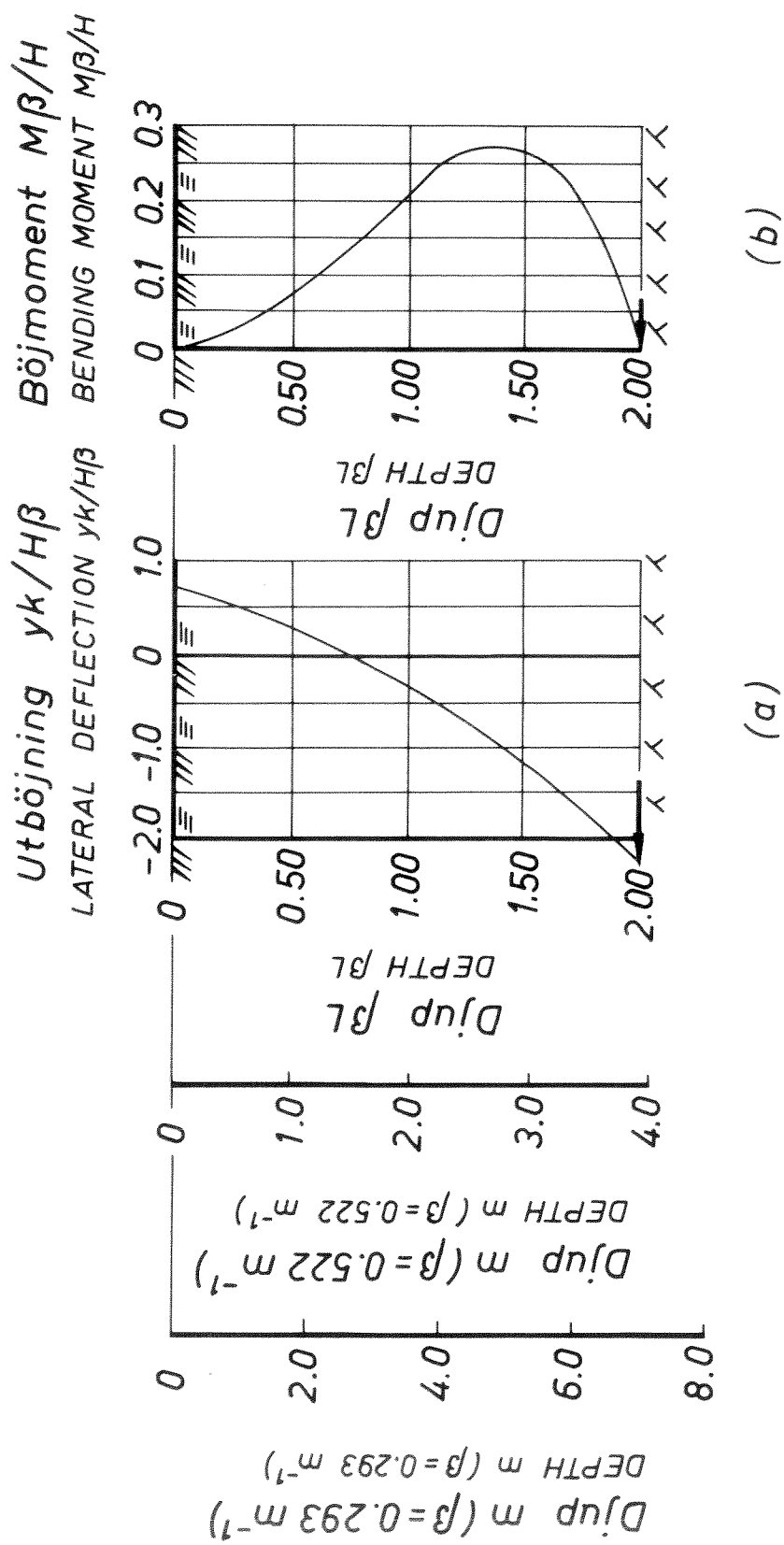


Fig. 4. UTBÖJNING OCH MOMENTFÖRDELNING AV SIDOBEASTAD PÅLE ($\beta L = 2.0$).
 Fig. 4. Distribution of lateral deflection and bending moment in a laterally loaded pile ($\beta L = 2.0$).

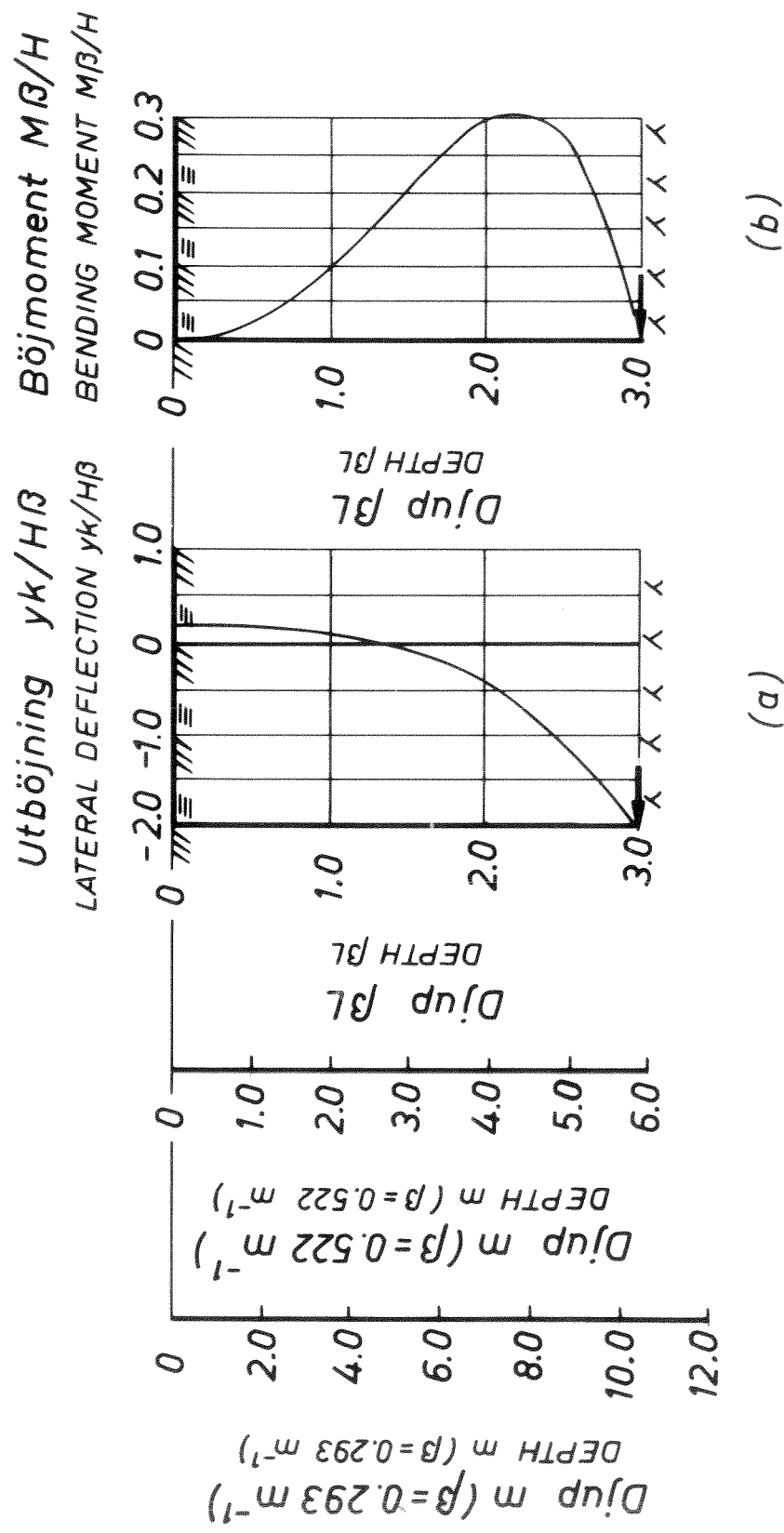


Fig. 5. UTBÖJNING OCH MOMENTFÖRDELNING AV SIDOELASTAD PÅLE ($\beta L = 3.0$).
 Fig. 5. Distribution of deflection and bending moment in a laterally loaded pile ($\beta L = 3.0$).

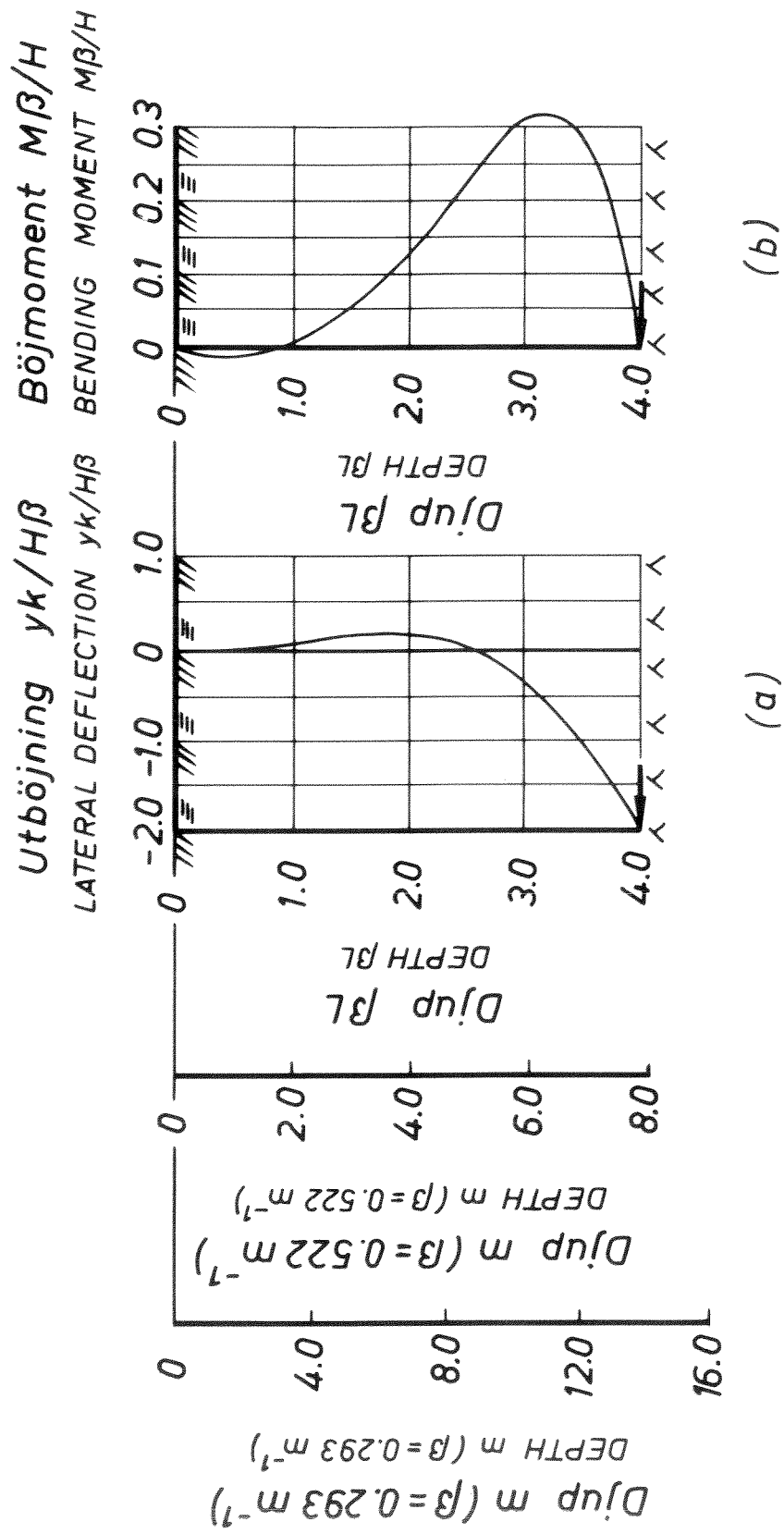


Fig. 6. UTBÖJNING OCH MOMENTFÖRDELNING AV SIDOBEIASTAD PÅLE ($\beta L = 4,0$).
 Fig. 6. Distribution of deflection and bending moment in a laterally loaded pile ($\beta L = 4,0$).

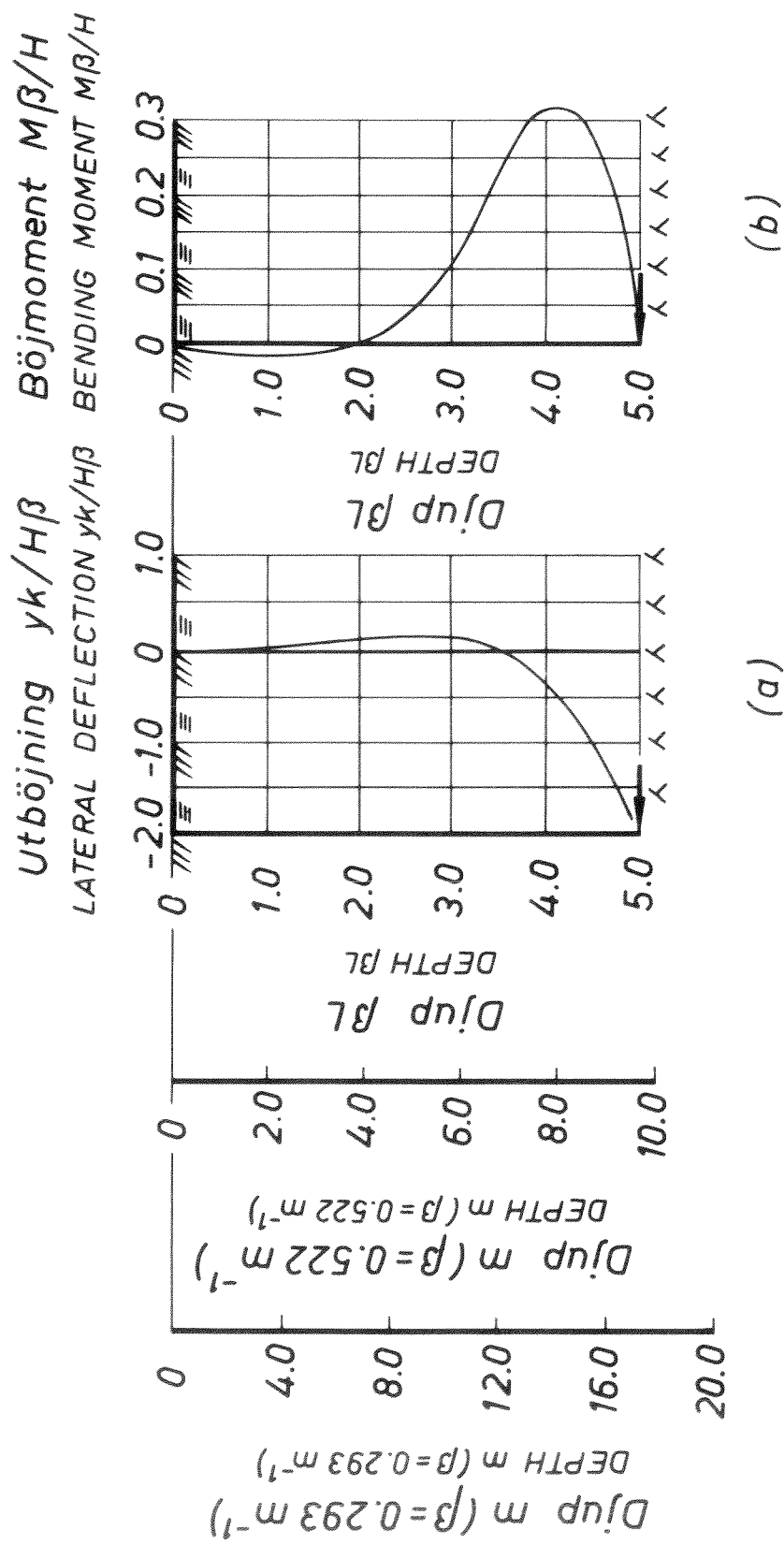


Fig. 7. UTBÖJNING OCH MOMENTFÖRDELNING I SIDOBELASTAD PÅLE ($\beta L = 5.0$).
 Fig. 7. Distribution of deflection and bending moment in a laterally loaded pile ($\beta L = 5.0$).

längd βL överstiger 4).

Pålens böjmoment uttryckt i den dimensionslösa kvantiteten $M\beta/H$ visas i fig. 4b, 5b, 6b och 7b såsom en funktion av pållängden βL . Det maximala böjmomentet inträffar för en oändligt lång påle på ett avstånd $\pi/4\beta$ från pålens spets (då pålens längd βL överstiger 4,0). Detta avstånd minskar något, när pålens längd minskar. När βL är mindre än 4,0 minskar det maximala böjmomentet något, när pållängden minskar, såsom även framgår av figurerna 4, 5, 6 och 7. Man kan vidare se att pålens böjmoment är litet, jämfört med pålens maximala böjmoment, på ett avstånd från pålens spets som motsvarar $2/\beta$. För att förhindra böjbrott bör pålen således armeras från pålens spets till $2/\beta$ från pålspetsen. Längden $2/\beta$ har beräknats i Tabell II för kvadratiska pålar med 0,25 m och 0,30 m sida vid olika värden på den omgivande jordens bäddmodul.

Tabell II

Erforderlig armeringslängd för att undvika brott intill spetsen vid slagning till släntberg.

(Required length of reinforcement to prevent failure close to pile point during driving to a sloping rock surface).

Bäddmodul k_D , t/m^2 (Coefficient of Subgrade Reaction k_D , t/m^2)	Skjuvhåll- fasthet τ_x τ_{fu} , t/m^2 (Shear Strength τ_{fu} , t/m^2)	Armeringslängd $2/\beta$, m (Length of Reinforcement $2/\beta$, m)	
		0,25x0,25 m påle (10x10 in pile)	0,30x0,30 m påle (12x12 in pile)
20	1,0	6,8	8,2
60	3,0	5,2	6,2
100	5,0	4,6	5,5
200	10,0	3,8	4,6
600	30,0	2,9	3,5
1000		2,5	3,0
2000		2,2	2,6
6000	Friktions- material	1,6	2,0
10000		1,4	1,7
20000	(Cohesionless soil)	1,2	1,5

x) Skjuvhållfastheten har antagits vara $1/20$ av bäddmodulen k_D .

(The shear strength has been evaluated as $1/20$ times the coefficient of subgrade reaction k_D)

Man kan dra den slutsatsen ur tabell II, att tämligen stora böjmoment utvecklas längs en stor del av den påle som slagits till släntberg genom en kohesionsjordart med låg skjuvhållfasthet, längs t.ex. 6,8 m vid skjuvhållfastheten $1,0 \text{ t/m}^2$ (tabell II). För att skydda en sådan påle mot böjbrott (fig. 1) är man således tvungen att armera pålen kraftigt längs hela dess längd, om pål-längden understiger omkring 7 m. I det fall då en påle är slagen genom ett friktionsmaterial utbildas stora böjmoment endast närmast själva pålspetsen, såsom framgår av den erforderliga armeringslängden (tabell II). Här är det tillräckligt att endast lokalt armera pålen för att undvika den brotttyp som visas i fig. 1. Det bör emellertid påpekas att det är mycket svårt att på grundval av sonderingsresultat och laboratorieundersökningar bedöma lämpligt värde på bäddmodulen kD . Försiktighet bör således iakttas vid tillämpning av denna beräkningsmetod. Systematiska fältförsök med främst sidobelastade pålar skulle vara av stort värde.

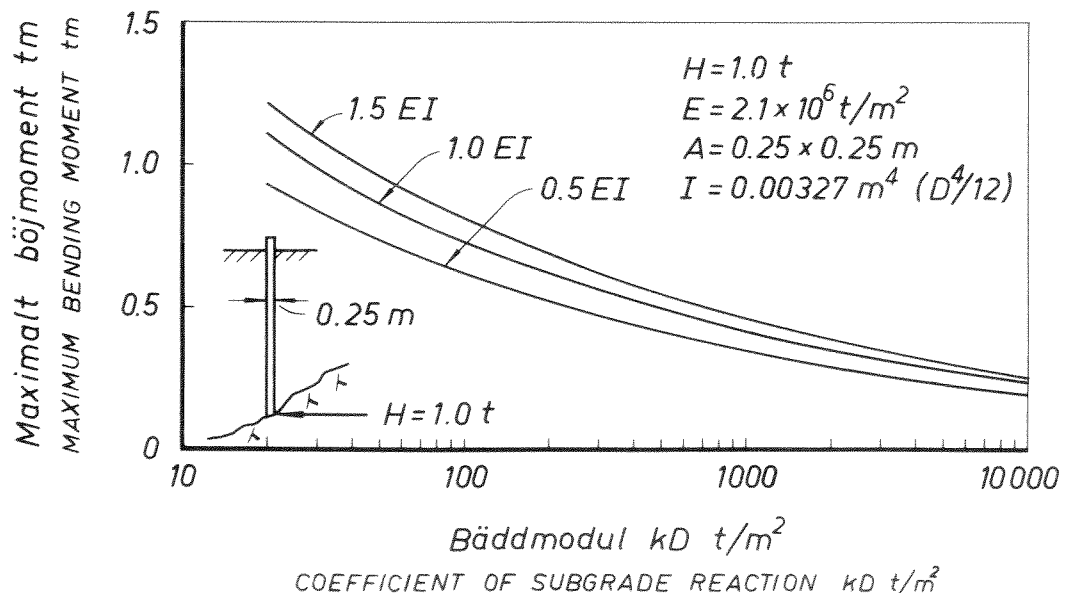


Fig. 8a. INVERKAN AV EN PÅLES BÖJSTYVHET PÅ DET MAXIMALA BÖJMOMENTET.

Fig. 8a. Influence of pile stiffness on maximum bending moment.

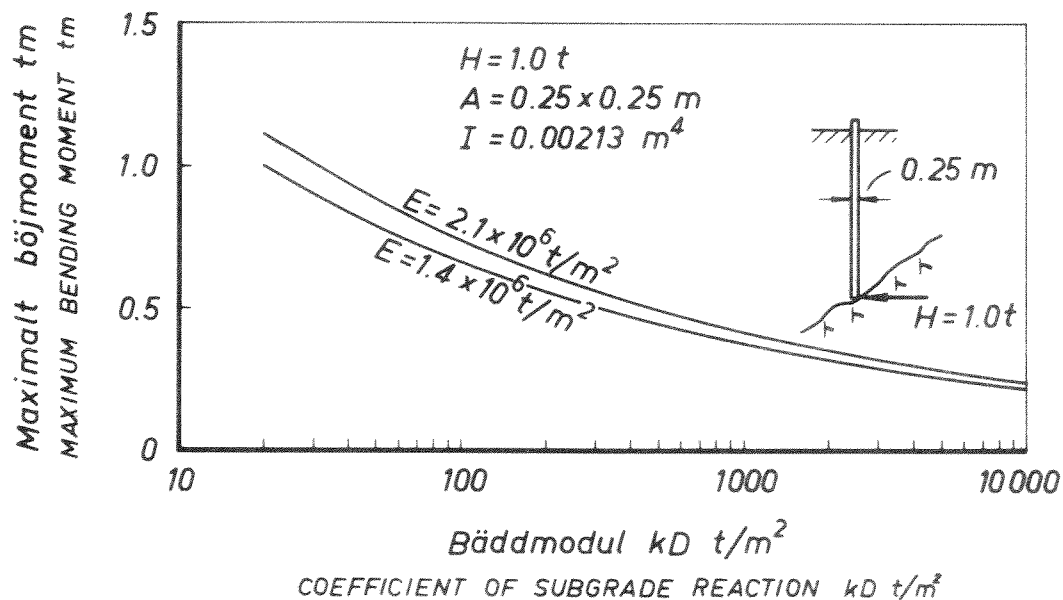


Fig. 8b. INVERKAN AV BETONGENS ELASTICITETSMODUL PÅ DET MAXIMALA BÖJMOMENTET.

Fig. 8b. Influence of modulus of elasticity of concrete on maximum bending moment.

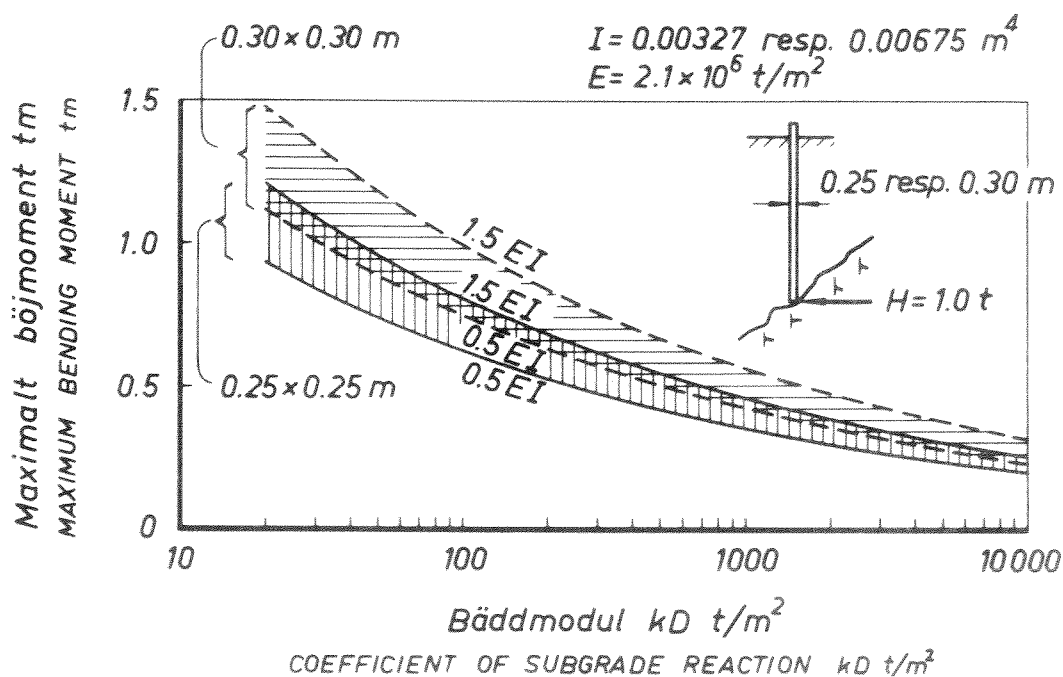


Fig. 8c. PÅLTVÄRSNITTETS INVERKAN PÅ DET MAXIMALA BÖJMOMENTET VID OLIKA VÄRDEN AV PÅLENS BÖJSTYVHET.

Fig. 8c. Influence of pile size on maximum bending moment at different pile stiffnesses.

För en oändligt lång påle är det maximala teoretiska böjmomentet lika med $0,3224 H/\beta$. Detta moment visas i fig. 8a, 8b och 8c såsom en funktion av den omgivande jordens bäddmodul, pålens böjstyvhetsmodul, betongens elasticitetsmodul och påltvärsnittets dimensioner. Pålens spets påverkas i detta fall av en horisontalkraft lika med 1,0 t. I fig. 8a visas det maximala böjmomentet för en fyrkantpåle 0,25 x 0,25 m, när pålens böjstyvhetsmodul är resp. 1,5 EI, 1,0 EI och 0,5 EI, där EI är pålens nominella böjstyvhetsmodul. Konstanten E är betongens elasticitetsmodul ($2,1 \times 10^6 \text{ t/m}^2$) och I är pålsektionens nominella tröghetsmoment. Den nominella böjstyvhetsmodulen EI har beräknats under antagande att betongen ej är sprucken och att armeringen ej bidrar till sektionens tröghetsmoment. Böjstyvhetsmodulen 1,5 EI motsvarar det fall då pålen är hårt armerad och pålen är osprucken. Man har således antagit att armering ökar pålsektionens tröghetsmoment med ca 50 %. Böjstyvhetsmodulen 0,5 EI motsvarar det fall, när pålen är sprucken och armeringsmängden är låg. Värdena 1,5 EI och 0,5 EI representerar ytterlighetsvärden för pålars böjstyvhetsmodul.

Man kan observera i fig. 8a att det maximala böjmomentet ökar med minskat värde av bäddmodulen. Det beräknade maximala böjmomentet är 1,1 tm, 1,62 tm, 0,35 tm och 0,20 tm i de fall, när pålen har drivits genom ett material med bäddmodulerna 20 t/m^2 , 200 t/m^2 , 2.000 t/m^2 resp. 20.000 t/m^2 .

Från fig. 8a kan vidare observeras att en ökning av böjstyvhetsmodulen från 1,0 EI till 1,5 EI ökar pålens maximala böjmoment med 11 % och att en minskning av böjstyvhetsmodulen från 1,0 EI till 0,5 EI förorsakar en minskning av det maximala böjmomentet med 16 %. Således har en ändring av pålens böjstyvhetsmodul ringa inverkan på pålens maximala böjmoment i jämförelse med en ändring av den omgivande jordens bäddmodul.

Fig. 8b visar inverkan av betongens elasticitetsmodul på det maximala böjmomentet hos en sidobelastad påle. En minskning av betongens elasticitetsmodul från $2,1 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ till $1,4 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ förorsakar en minskning av det maximala böjmomentet med omkring 10 %. Inverkan av betongens elasticitetsmodul på det maximala böjmomentet är således liten.

I fig. 8c visas en jämförelse mellan det maximala böjmomentet, som uppträder i pålar med $0,30 \times 0,30$ m resp. $0,25 \times 0,25$ m tvärsnittsarea. Denna jämförelse visar att det maximala böjmomentet ökar med ökad tvärsnittsarea.

Man kan dra den slutsatsen från fig. 8a, 8b och 8c att en påles maximala böjmoment är främst beroende av bäddmodulen kD och således av jordens deformationsegenskaper. För t.ex. en 15 m lång påle, som har en tvärsnittsarea av 25×25 cm och en böjstyvhet EI och som slagits ned genom löst lagrad sand när grundvattenytan är belägen vid markytan är det maximala böjmomentet lika med 31,3 % av det maximala böjmomentet för en nåle nedslagen genom ett kohesionsmaterial med skjuvhållfastheten $1,0 \text{ t/m}^2$. Således är det maximala böjmomentet i allmänhet betydligt större för pålar slagna genom kohesionsmaterial än för pålar slagna genom friktionsmaterial.

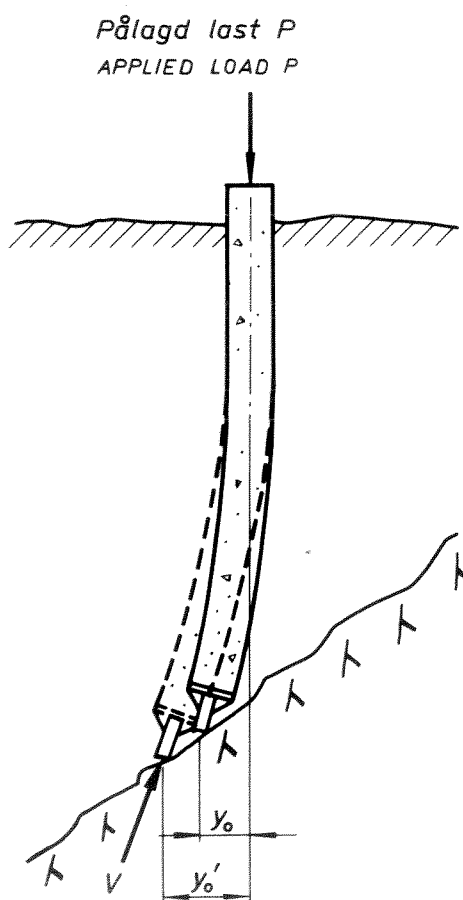


Fig. 9. ÖKNING AV SIDOUTBÖJNING FÖRORSAKAD AV AXIALKRAFTEN V .

Fig. 9. Increase of lateral deflection caused by the axial load V .

TILLÄGGSKRAFTER FÖRORSAKADE AV VERTIKALKRAFTEN V.

Vid glidning förorsakar kraften V en ökning av pålens sidoutböjning vid pålspetsen från y_0 till y_0' och av pålens maximala böjmoment från $M_{\max}$ till $M_{\max}'$. Denna ökning kan beräknas, om man antar att pålmaterialet samt den omgivande jorden uppför sig som elastiska material. På grund av brist på försöksresultat är det ej känt under vilka betingelser dessa antaganden är giltiga. Om emellertid dessa antaganden göres, kan man visa (1) att sidoförskjutningen y_0' kan beräknas ur sambandet (fig. 9).

$$y_0' \leq y_0 \cdot a_{\max} \dots\dots\dots /6/$$

där $a_{\max}$ är en multiplikationsfaktor, som är beroende av den minsta kritiska last $P_{\min}$ som förorsakar utknäckning av pålen. Multiplikationsfaktorn $a_{\max}$ kan beräknas ur ekvationen

$$a_{\max} = P_{\min} / (P_{\min} - P) \dots\dots\dots /7/$$

där P är den påförda lasten. När glidning kan äga rum är minsta kritiska lasten $P_{\min}$ teoretiskt lika med

$$P_{\min} = \sqrt{kDEI} \dots\dots\dots /8/$$

där EI är pålens styvhet. Denna kritiska last, som förorsakar utknäckning, är hälften av den som gäller för en påle, där sidoförskjutning är förhindrad vid pålspetsen.

Knäcklast $P_{\min}$
— — — — —

Knäcklasten $P_{\min}$ visas i fig. 10a, 10b och 10c som en funktion av den omgivande jordens bäddmodul, pålens böjstyvhet, betongens elasticitetsmodul och pålens dimensioner. Fig. 10a visar inverkan av pålens böjstyvhet på knäcklasten. Knäcklasten har beräknats för en påle med tvärsnittsarean 0,25 x 0,25 m och en böjstyvhet lika med 1,5, 1,0 och 0,5 gånger pålens nominella böjstyvhet EI. Pålens nominella böjstyvhet EI har beräknats under antagande att betongens elasticitetsmodul $E = 2,1 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ och att I är den ospruckna tvärsnittsareans tröghetsmoment, då hänsyn ej har

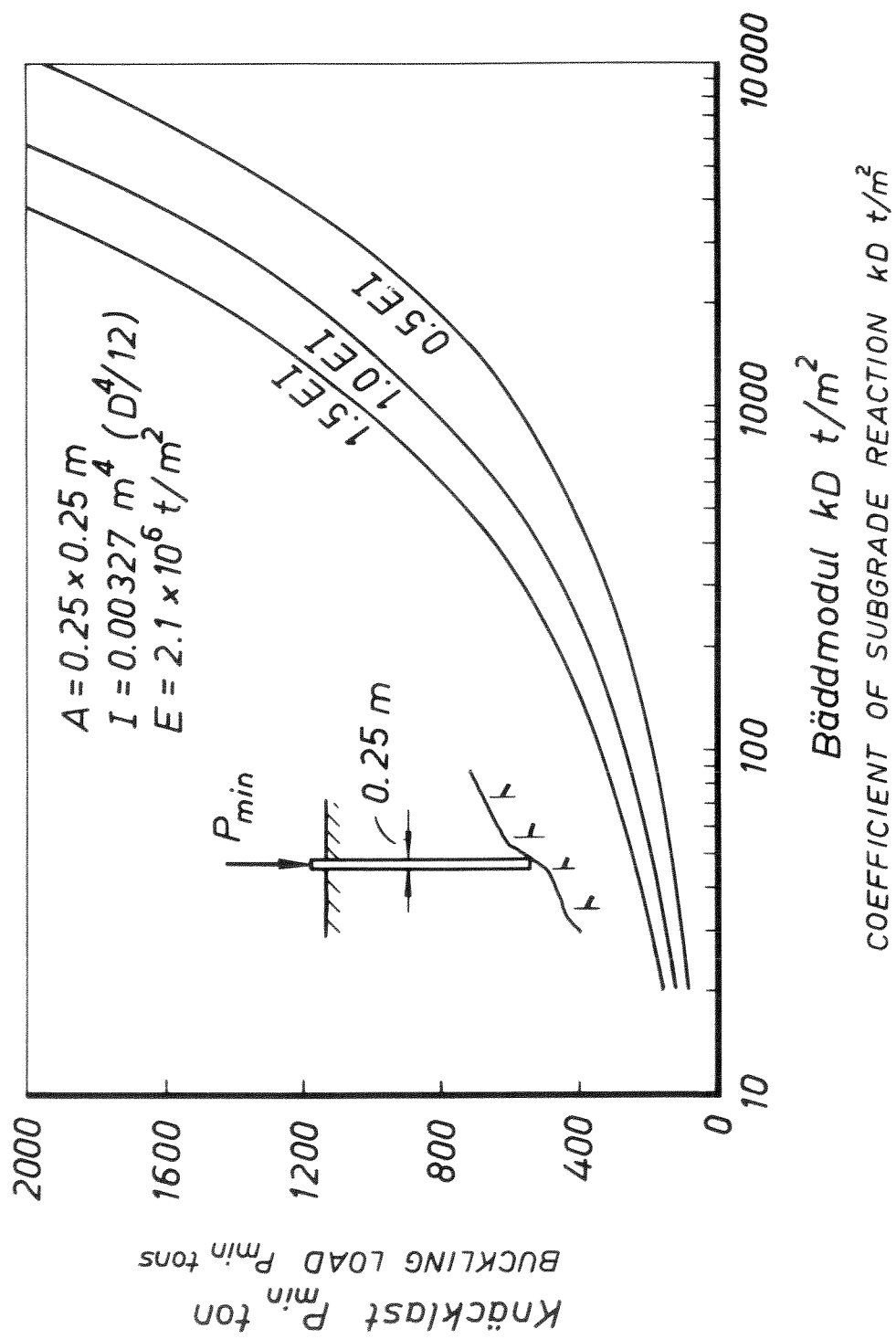


Fig. 10a. INVERKAN AV EN PÅLES BÖJSTYVHET PÅ KNÄCKLASTEN.

Fig. 10a Influence of pile stiffness on buckling loads.

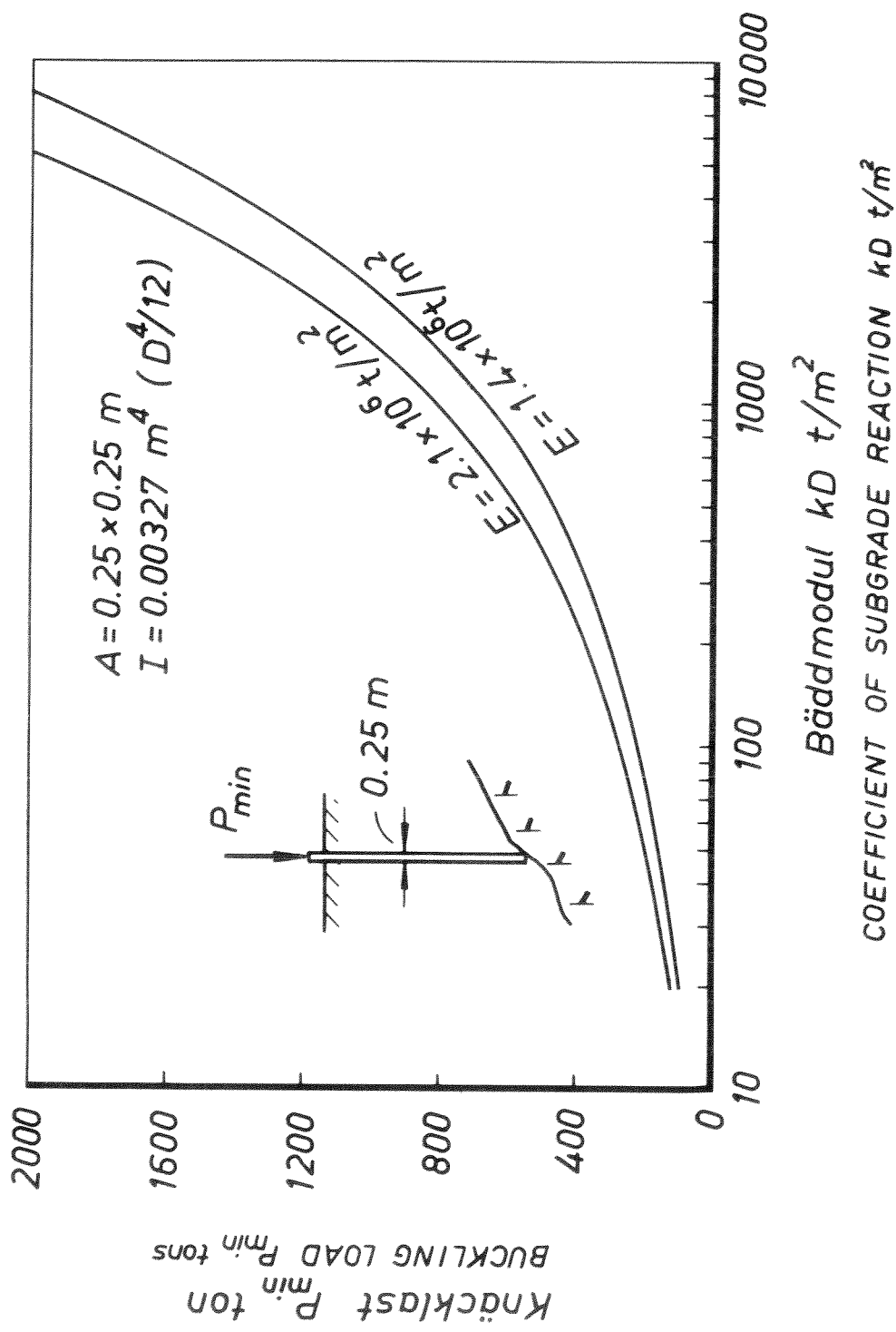


Fig. 10b. INVERKAN AV BETONGENS ELASTICITETSMODUL PÅ KNÄCKLASTEN.

Fig. 10b. Influence of modulus of elasticity of concrete on buckling loads.

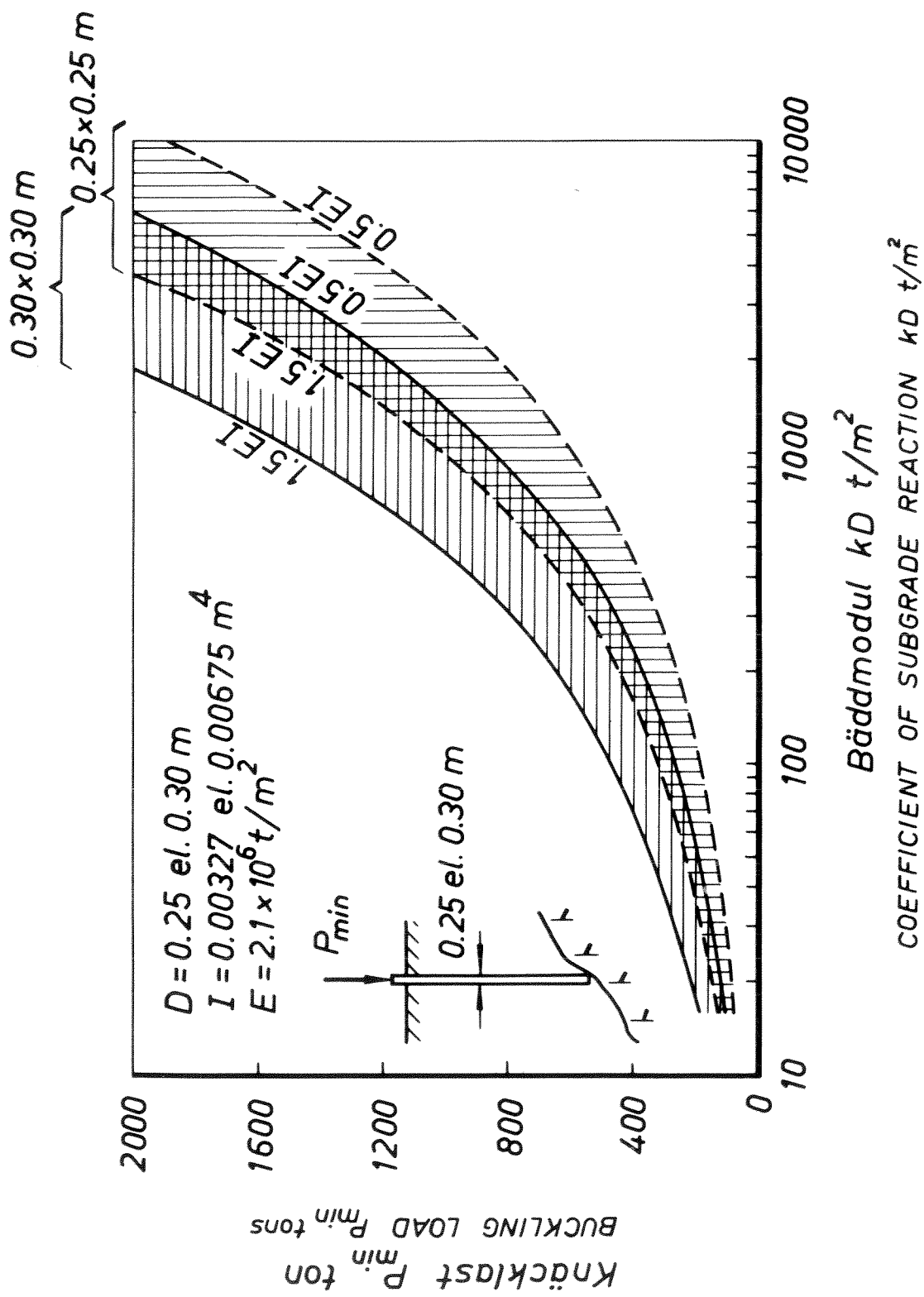


Fig. 10c. PÅLTVÄRSNITTETS INVERKAN PÅ KNÄCKLASTEN VID OLIKA VÄRDEN AV PÅLENS BÖJSTYVHET.

Fig. 10c. Influence of pile size on buckling loads at different values of the pile stiffness.

tagits till armeringen. Man kan se från fig. 10a att knäcklasten ökar med ökat värde av bäddmodulen k_D och att knäcklasten, när pålens böjstyvhetsmodul är $1,5 EI$, är betydligt större än den som motsvarar böjstyvhetsmodulen $0,5 EI$.

Knäcklasten P_{min} lika med 117 t, 371 t, 1170 t och 3710 t när pålens böjstyvhetsmodul är $1,0 EI$ och bäddmodulen k_D är respektive 20 t/m^2 , 200 t/m^2 , 2.000 t/m^2 och 20.000 t/m^2 .

I fig. 10b visas inverkan av betongens elasticitetsmodul på knäcklasten. En ändring av elasticitetsmodulen från $2,1 \times 10^6$ till $1,4 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ förorsakar en sänkning av knäcklasten med 18 %. Man kan således dra slutsatsen att betongens elasticitetsmodul relativt sett har stor inverkan på pålars knäcklast.

I fig. 10c visas en jämförelse mellan knäcklasten av en påle med $0,30 \times 0,30 \text{ m}$ respektive $0,25 \times 0,25 \text{ m}$ tvärsnitt. Knäcklasten har beräknats, när pålens böjstyvhetsmodul är lika med $1,5 EI$ och $0,5 EI$. Knäcklasten är lika med 168 t, 533 t, 1680 t och 5330 t för en kvadratisk påle med sidan 30 cm när pålens böjstyvhetsmodul är $1,0 EI$ och bäddmodulen är resp. 20 t/m^2 , 200 t/m^2 , 2.000 t/m^2 och 20.000 t/m^2 . En ökning av en påles tvärsnittsarea från $0,25 \times 0,25 \text{ m}$ till $0,30 \times 0,30 \text{ m}$ innebär en ökning av knäcklasten med 44 %. Knäcklasten ökar således snabbt med ökad tvärsnittsarea.

Multiplikationsfaktor a_{max} .

Multiplikationsfaktorn a_{max} visas i fig. 11 och 12 som en funktion av den omgivande jordens bäddmodul. I fig. 11a, 11b och 11c visas a_{max} för en kvadratisk påle med 25 cm sida vid en belastning av resp. 30 t, 45 t och 60 t. För varje belastningsfall har a_{max} beräknats för en böjstyvhetsmodul som är lika med $1,5 EI$, $1,0 EI$ och $0,5 EI$. Man kan se att a_{max} ökar med minskat värde av bäddmodulen. Denna ökning är störst vid axiellast 60 t. Vid en last av 45 t är a_{max} lika med resp. 1,62, 1,13, 1,04 och 1,02 när pålens böjstyvhetsmodul är $1,0 EI$ och bäddmodulen är resp. 20 t/m^2 , 200 t/m^2 , 2.000 t/m^2 och 20.000 t/m^2 .

Motsvarande värde på multiplikationsfaktorn a_{max} visas i fig. 12a,

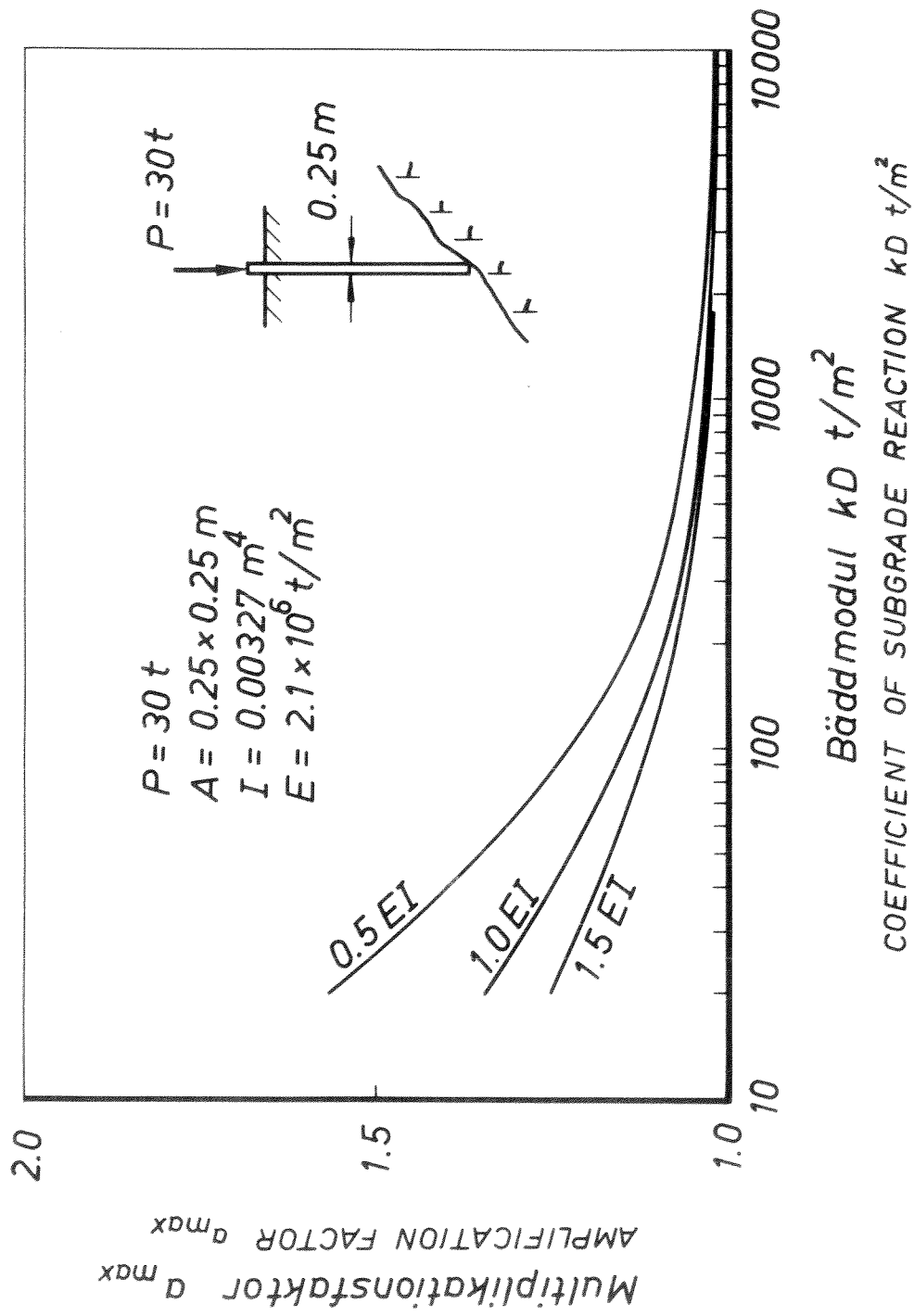


Fig. 11a. INVERKAN AV BÄDDMODULEN OCH BÖJSTYVHETEN PÅ MULTIPLIKATIONSFAKTORN a_{max} FÖR EN PÅLE MED TVÄRSNITTET $0,25 \times 0,25\text{ m}$ VID EN BELASTNING AV 30 TON .

Fig. 11a. Influence of coefficient of subgrade reaction and of pile stiffness on the amplification factor a_{max} for a pile with a cross-section of $0.25 \times 0.25\text{ m}$.

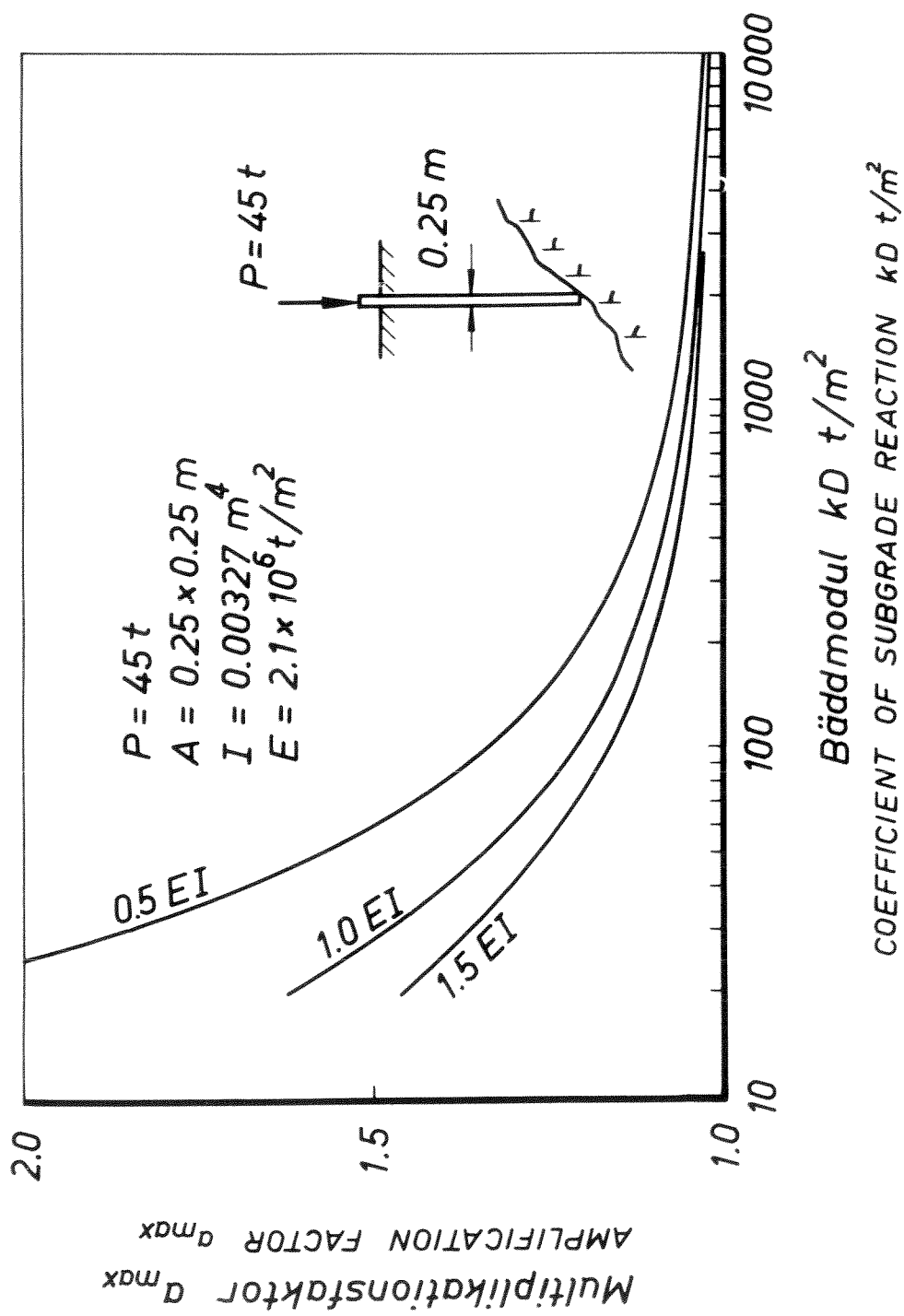


Fig. 11b. INVERKAN AV BÄDDMODULEN OCH BÖJSTYVHETEN PÅ MULTIPLIKATIONSFAKTORN a_{max} FÖR EN PÅLE MED TVÄRSNITTET $0.25 \times 0.25\text{ m}$ VID EN BELASTNING AV 45 TON.

Fig. 11b. Influence of coefficient of subgrade reaction and of pile stiffness on the amplification factor a_{max} for a pile with a cross section of $0.25 \times 0.25\text{ m}$ at an applied load of 45 tons.

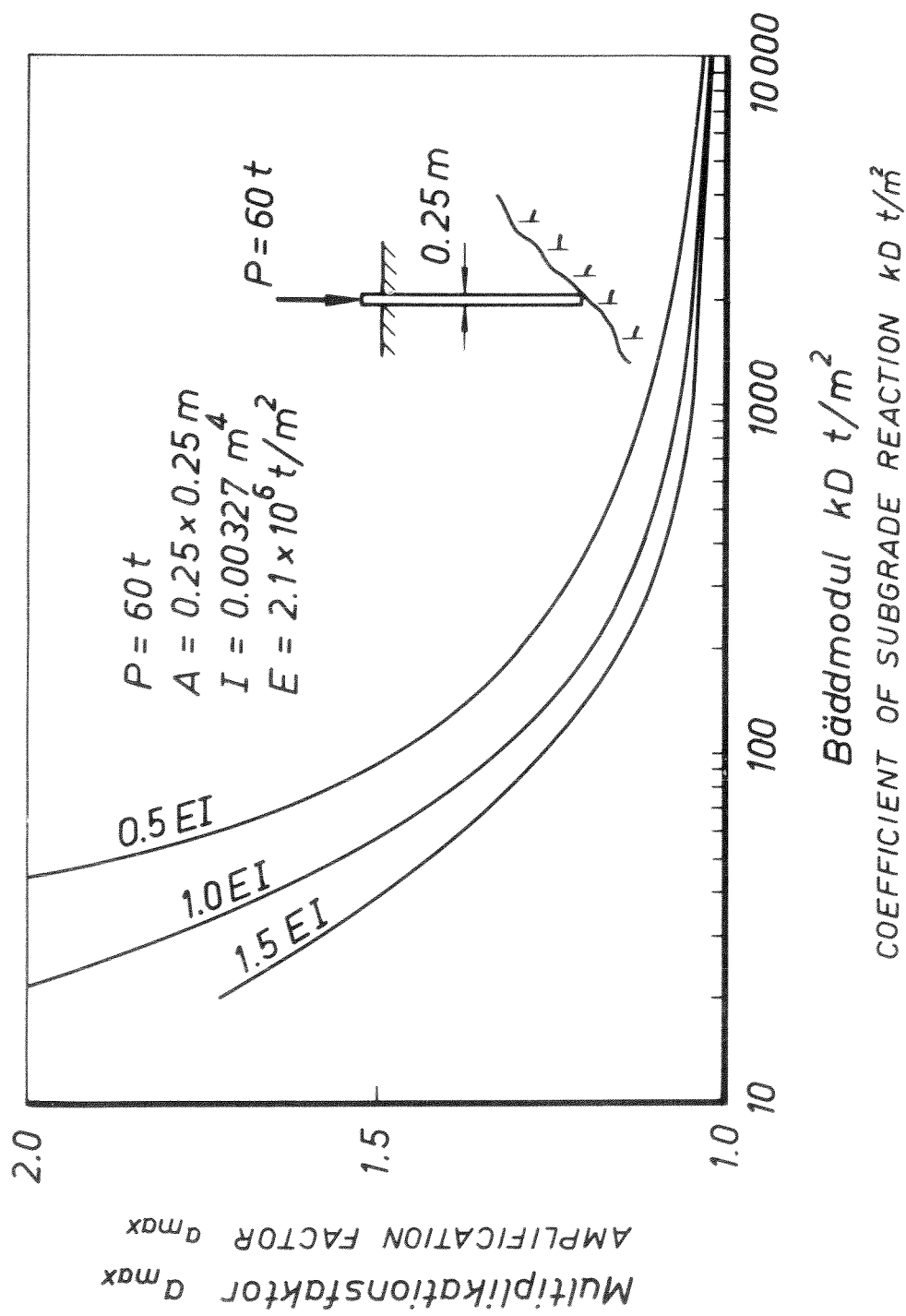


Fig. 11c. INVERKAN AV BÄDDMODULEN OCH BÖJSTYVHETEN PÅ MULTIPLIKATIONSFAKTORN q_{max} FÖR EN PÅLE MED TVÄRSNITTET $0,25 \times 0,25 \text{ m}$ VID EN BELASTNING AV 60 TON.

Fig. 11c. Influence of coefficient of subgrade reaction and of pile stiffness on the amplification factor q_{max} for a pile with a cross section of $0.25 \times 0.25 \text{ m}$ at an applied load of 60 tons.

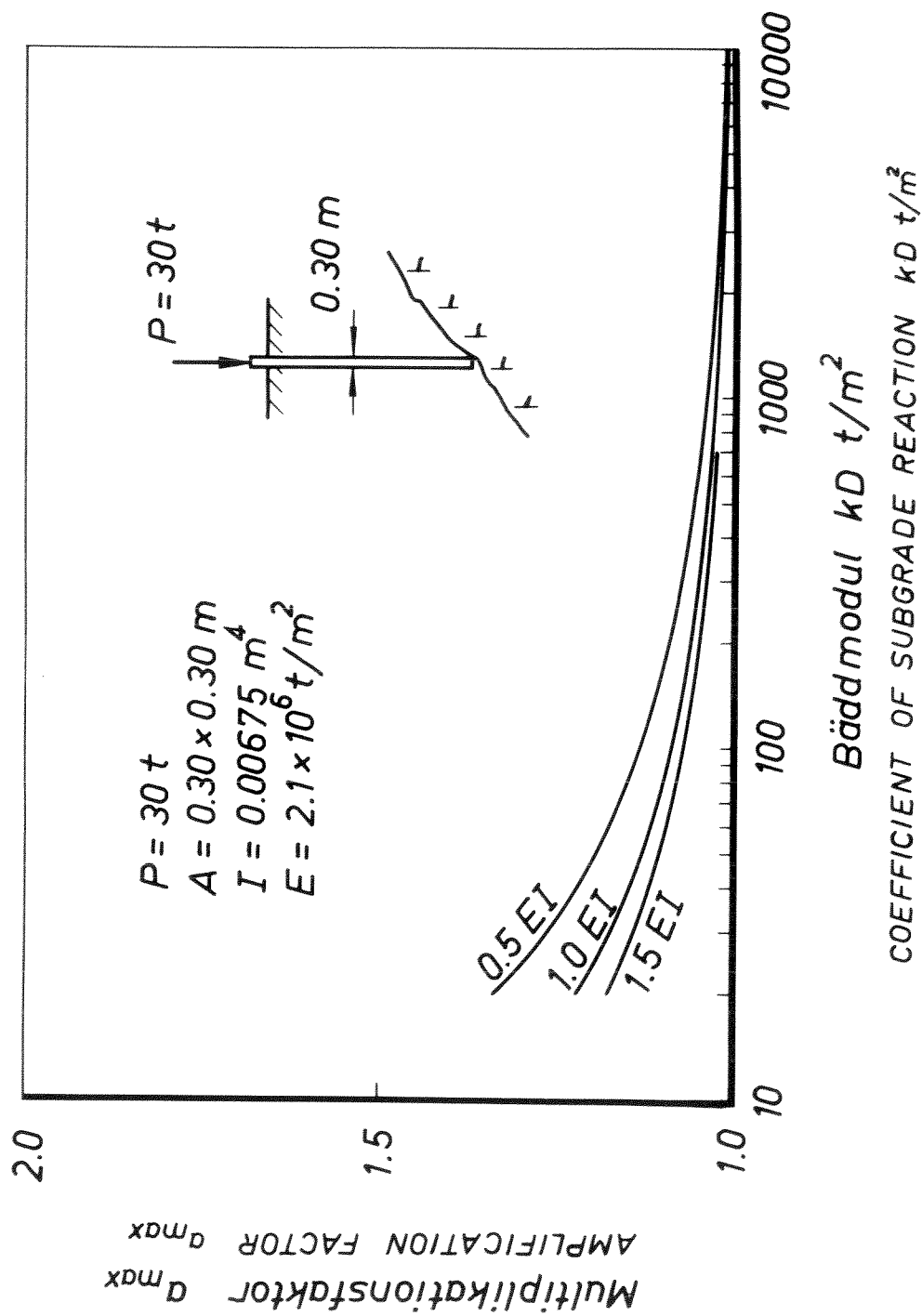


Fig. 12a INVERKAN AV BÄDDMODULEN OCH BÖJSTYVHETEN PÅ MULTIPLIKATIONSFAKTORN a_{max} FÖR EN PÅLE MED TVÄRSNITTET $0,30 \times 0,30 \text{ m}$ VID EN BELASTNING AV 30 TON.

Fig. 12a. Influence of coefficient of subgrade reaction and of pile stiffness and the amplification factor a_{max} for a pile with a cross section of $0,30 \times 0,30 \text{ m}$ at an applied load of 30 tons.

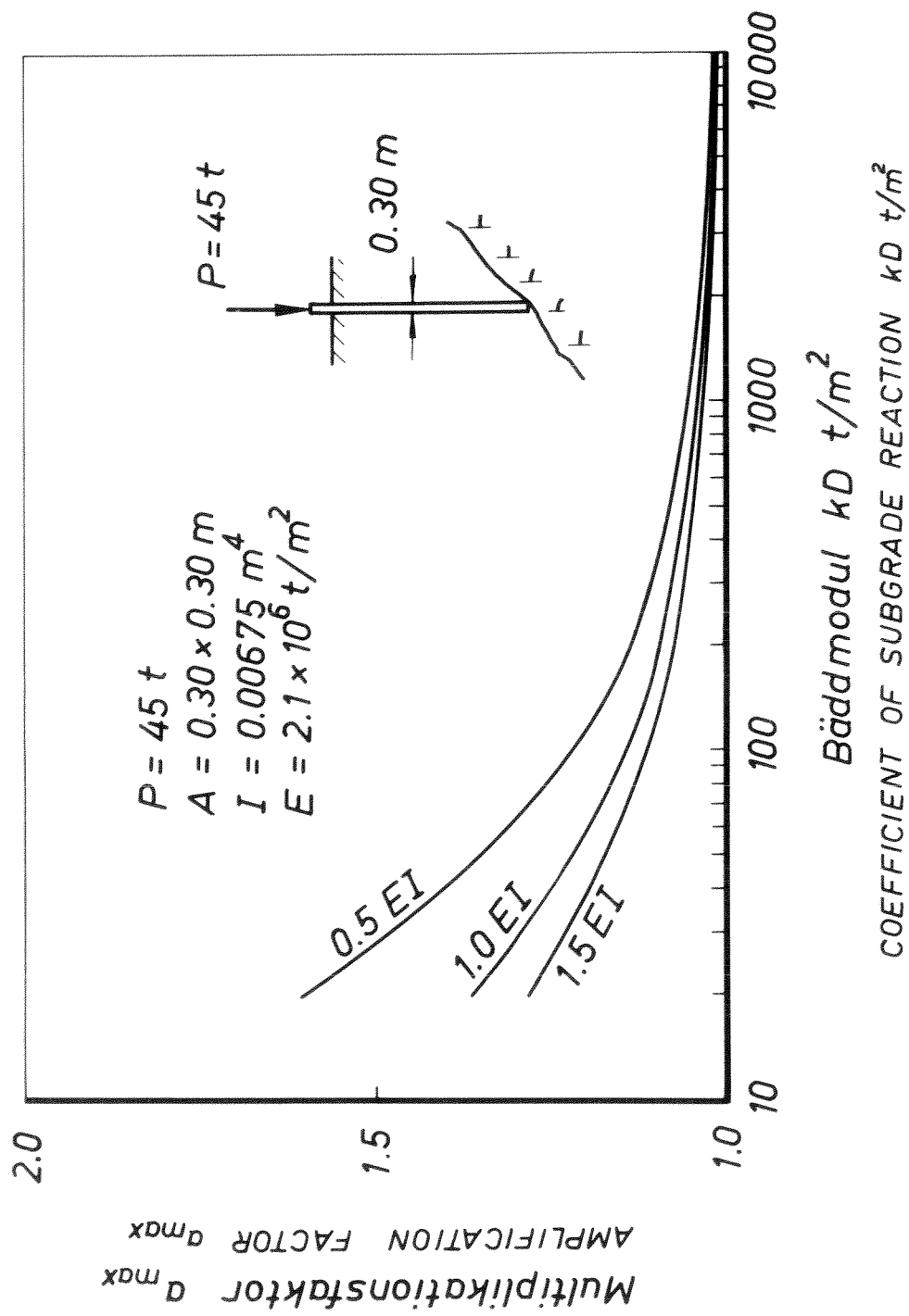


Fig. 12b. INVERKAN AV BÄDDMODULEN OCH BÖJSIVVHETEN PÅ MULTIPLIKATIONSFAKTORN a_{max} FÖR EN PÅLE MED TVÄRSNITTET $0.30 \times 0.30 \text{ m}$ VID EN BELASTNING AV 45 TON.

Fig. 12b. Influence of coefficient of subgrade reaction and of pile stiffness on the amplification factor a_{max} for a pile with a cross section of $0.30 \times 0.30 \text{ m}$ at an applied load of 45 tons.

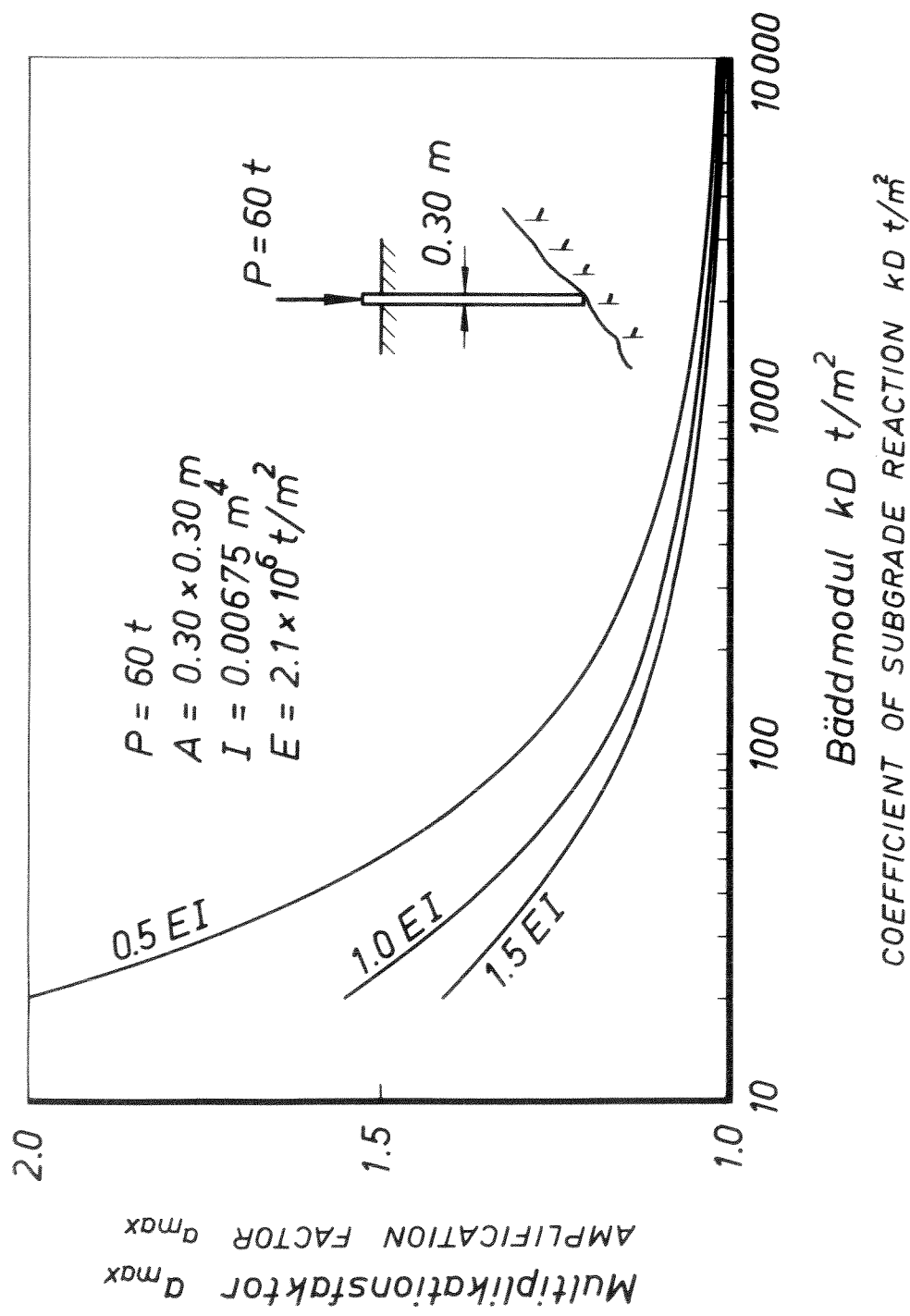


Fig. 12c INVERKAN AV BÄDDMODULEN OCH BÖJSTYVHETEN PÅ MULTIPLIKATIONSFAKTORN a_{max} FÖR EN PÅLE MED TVÄRSNITTET $0.30 \times 0.30 \text{ m}$ VID EN BELASTNING AV 60 TON.

Fig. 12c. Influence of coefficient of subgrade reaction and of pile stiffness on the amplification factor a_{max} for a pile with a cross section of $0.30 \times 0.30 \text{ m}$ at an applied load of 60 tons.

12b och 12c för en kvadratisk påle med sidan 30 cm. Vid en pållast av 40 ton är $a_{\max}$ lika med resp. 1,31, 1,08, 1,02 och 1,01 när pålens böjstyvhetsmodul är 1,0 EI och bäddmodulen är resp. 20 t/m², 200 t/m², 2.000 t/m² och 20.000 t/m². Även i detta fall ökar $a_{\max}$ således snabbt med minskat värde av jordens bäddmodul. Emellertid är värdet av $a_{\max}$ betydligt mindre i detta fall än för en påle med 25 cm sida.

Om man antar att bäddmodulen $k_D = 20 \tau_{fu}$ motsvarar värdena 20 t/m² och 200 t/m² skjuvhållfastheterna 1,0 t/m² resp. 10 t/m². Bäddmodulen 2.000 t/m² motsvarar bäddmodulen hos en löst lagrad sand på ett djup av omkring 15 m, när grundvattenytan är belägen vid markytan. När grundvattenytan är belägen under pålens spets är motsvarande djup omkring 8 m.

Man kan således dra slutsatsen att $a_{\max}$ kan sättas lika med 1,0 för pålar som slagits genom friktionsmaterial (dvs den ökning av sidoutböjningen som är förorsakad av axialkraften V kan försummas). Multiplikationsfaktorn $a_{\max}$ är i allmänhet betydligt större än 1,0 för pålar som slagits genom kohesionsmaterial (dvs den ökning av sidoutböjningen som är förorsakad av axialkraften V är i allmänhet stor och kan ej försummas).

Maximalt böjmoment

Axialkraften V åstadkommer en ökning av det maximala böjmomentet från $M_{\max}$ till $M_{\max}^1$. Man kan visa att (1)

$$M_{\max}^1 \leq M_{\max} a_{\max} \dots\dots\dots /9/$$

där $a_{\max}$ kan bestämmas ur ekvationerna /6/ och /7/. Således ökar det maximala böjmomentet för en fyrkantpåle med sidan 0,25 m med 52 %, 12 %, 4 % resp. 2 % när bäddmodulen k_D är 20 t/m², 200 t/m², 2.000 t/m² och 20.000 t/m² vid en tillåten last av 40 t och en böjstyvhetsmodul av 1,0 EI. Motsvarande ökning är 31 %, 8 %, 2 % och 1 % för en fyrkantpåle med sidan 0,30 m. Det har här antagits att pålen kan glida utefter den lutande bergytan. När glidning är förhindrad blir pålens knäcklast dubbelt så stor som den knäcklast som tidigare har beräknats.

Vid förhindrad utglidning och en tillåten last av 40 t. ökar det maximala böjmomentet för en fyrkantpåle med sidan 0,25 m. med 2 %, 6 %, 2 % resp. 1 % när bäddmodulen k_D är 20 t/m², 200 t/m², 2000 t/m² och 20.000 t/m². Motsvarande ökning för en fyrkantpåle med sidan 30 cm är 14 %, 4 %, 1 % och 0,5 %.

Det maximala böjmomentet är således beroende av pålens styvhet, den omgivande jordartens bäddmodul och horisontalkraften H . Om horisontalkraften sättes lika med 5 % av den påförda lasten, blir det maximala böjmomentet 6,7 tm vid en påförd last av 40 ton och 4,4 tm vid en påförd last av 30 ton för en betongpåle med tvärsnittsarean 0,25 x 0,25 m och böjstyvheten EI . Det har här antagits att pålen drivits genom ett kohesionsmaterial med odränerad skjuvhållfasthet τ_{fu} av 1,0 t/m² ($k_D = 20$ t/m²). De maximala böjmomenten 6,7 tm och 4,4 tm motsvarar en lastexcentricitet av cirka 0,16 m vid en tillåten belastning av 30 resp. 40 ton.

Denna jämförelse visar att det maximala böjmomentet för en kohesionsjordart med låg skjuvhållfasthet är främst beroende av pålens last och till stor del oberoende av pålens dimensioner vid samma belastning. Orsaken till detta förhållande är att den förändring av pålens böjmoment som är förorsakad av en ökning av pålens styvhet kompenseras av en motsvarande minskning av multiplikationsfaktorn a_{max} .

DIMANSIONERING AV PÅLAR, DRIVNA TILL SLÄNTBERG

Det har här visats att stora böjmoment uppträder i pålens nedre del i de fall när pålen är slagen till släntberg och pålen förskjutes i sidled. Böjmomentets storlek är beroende av pålens styvhet EI, den omgivande jordartens bäddmodul kD och horisontalkraften H.

En påles styvhet och den omgivande jordens bäddmodul kan beräknas eller uppskattas. Horisontalkraften H är däremot svår att beräkna, då den är beroende av bergytans lutning, bergmaterialets hårdhet och pålspetsens utformning. Emellertid synes det rimligt att dimensionera en påle så, att den kan motstå en horisontalkraft, som utgör en viss del av pålens tillåtna bärförmåga. Storleken av denna horisontalkraft bör väljas så, att antalet pålar som måste ersättas på grund av brott under nedslagning blir måttlig, dvs bortslagningsprocenten bör vara rimlig. I de flesta fall blir de lokala jordartsförhållandena utslagsgivande.

I avsikt att utveckla lämpliga dimensioneringsregler föreslås vid slagning till släntberg att pålen dimensioneras på så sätt att den kan motstå en horisontalkraft som är lika med 5 % av pålens tillåtna last då bergets genomsnittliga lutning överstiger 25 grader eller då pålen slagits genom en jordart som är normalblockig eller blockrik. Denna horisontalkraft har valts helt godtyckligt. Det föreslås således att en påle bör dimensioneras för en horisontalkraft lika med 2 ton, när pålens tillåtna last är 40 ton.

Den föreslagna dimensionerande horisontalkraften H förorsakar ett böjmoment $M_{\max}^1$. Detta böjmoment motsvarar en viss excentricitet e av den påförda lasten P. Excentriciteten e kan beräknas på vanligt sätt ur ekvationen:

$$e = M_{\max}^1 / P \dots\dots\dots /10/$$

Excentriciteten e kan även uttryckas i den dimensionslösa kvantiteten e/D, där D är pålens sida eller diameter. Således är

$$e/D = M_{\max}^1 / PD \dots\dots\dots /11/$$

I fig. 13a, 13b, 13c, 14a, 14b och 14c visas den relativa lastexcentriciteten e/D som en funktion av bäddmodulen kD . Relativa excentriciteten e/D har beräknats i fig. 13 för en kvadratisk påle med 0,25 m sida vid pållasterna 30, 45 och 60 t. Vid varje belastning har excentriciteten beräknats vid en böjstyvhets hos den belastade pålen av 1,5, 1,0 och 0,5 EI. Man kan se från fig. 13 att den påförda lastens relativa excentricitet e/D ökar snabbt med minskat värde av bäddmodulen och att denna ökning är speciellt stor vid stora påförda laster. Man kan vidare se ur fig. 13 att variationer i pålens styvhet ej har någon nämnvärd inverkan på den påförda lastens excentricitet. Detta förhållande beror på att den ökning av pålens böjmoment som är förorsakad av ökad böjstyvhet kompenseras av en motsvarande minskning hos multiplikationsfaktorn $a_{\max}$. Detta har till följd att excentriciteten e/D i stort sett endast är en funktion av bäddmodulen kD och den påförda lasten P .

I fig. 14 visas en jämförelse mellan relativ excentricitet för kvadratiske pålar med 0,30 m resp. 0,25 m sida. Man kan se från fig. 14a att skillnaden mellan lastexcentriciteten e/D hos de två pålarna vid en last av 30 t. är liten även vid låga värden av bäddmodulen. När bäddmodulen $kD = 60 \text{ t/m}^2$ är $e/D = 0,20$ för en kvadratisk påle med 0,25 m sida och 0,19 för en påle med 0,30 m sida. Vid en belastning av 60 t (fig. 14c) är skillnaden något större mellan lastexcentriciteten för de två påldimensionerna vid små värden av bäddmodulen. När bäddmodulen $kD = 60 \text{ t/m}^2$, är t.ex. excentricitetstalet $e/D = 0,21$ för en påle med 0,30 m sida och 0,25 för en påle med 0,25 m sida.

I Tabell III har gjorts en sammanställning av excentricitetstalet e/D för pålar med genomsnittsarean 0,25 x 0,25 m och 0,30 x 0,30 m vid en belastning av 45 t resp. 60 t. Denna jämförelse visar att excentricitetstalet e/D praktiskt taget ej påverkas av pålens dimensioner, när bäddmodulen överstiger 60 t/m^2 .

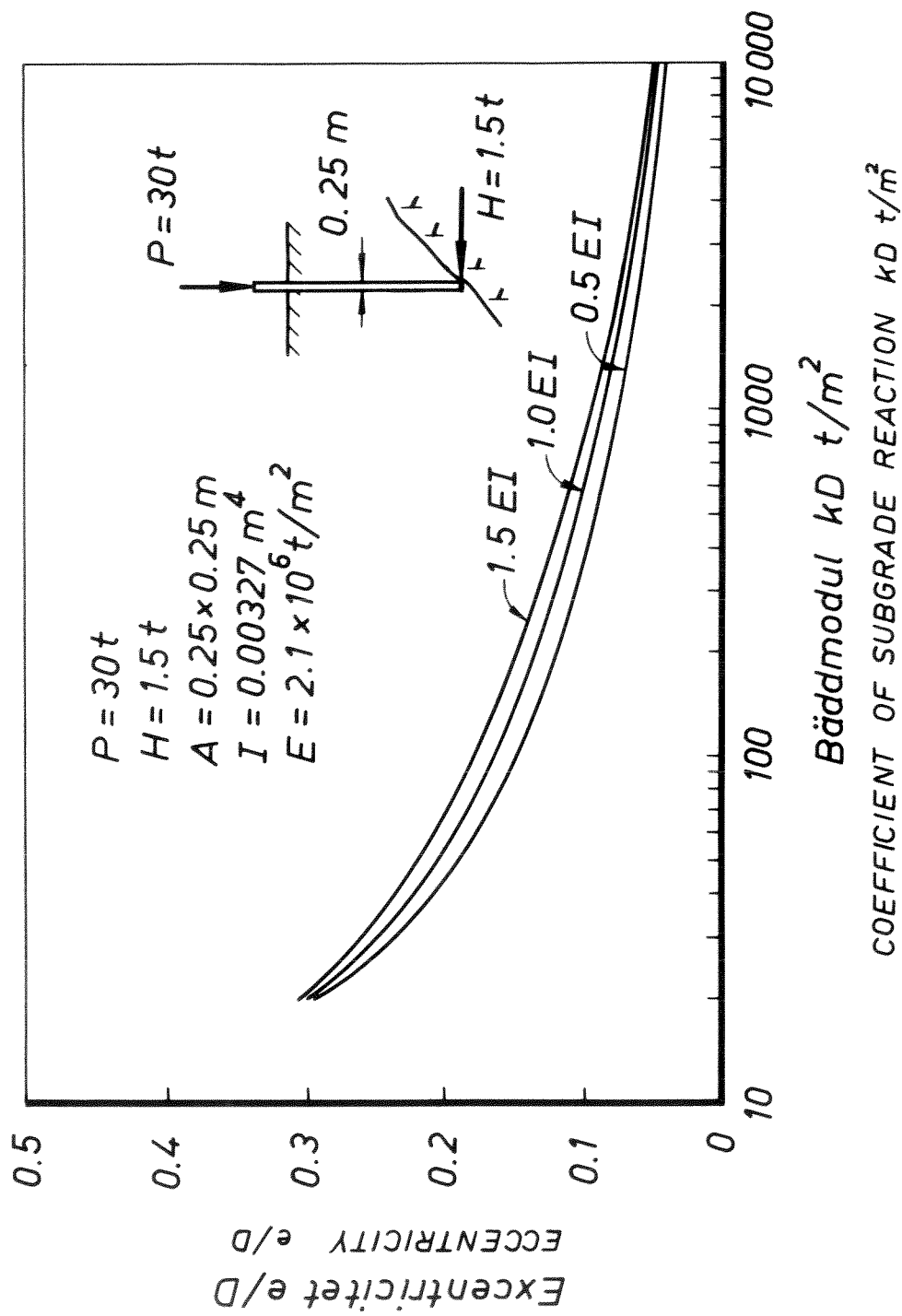


Fig. 13a. INVERKAN AV BÄDDMODULEN OCH BÖJSTYVHETEN PÅ EXCENTRICITETSTALET e/D FÖR EN PÅLE MED TVÄRSNITTET $0,25 \times 0,25\text{ m}$ AT AN APPLIED LOAD OF 30 TONS.

Fig. 13a. Influence of coefficient of subgrade reaction and of pile stiffness on the eccentricity e/D for a pile with a cross section of $0.25 \times 0.25\text{ m}$ at an applied load of 30 tons.

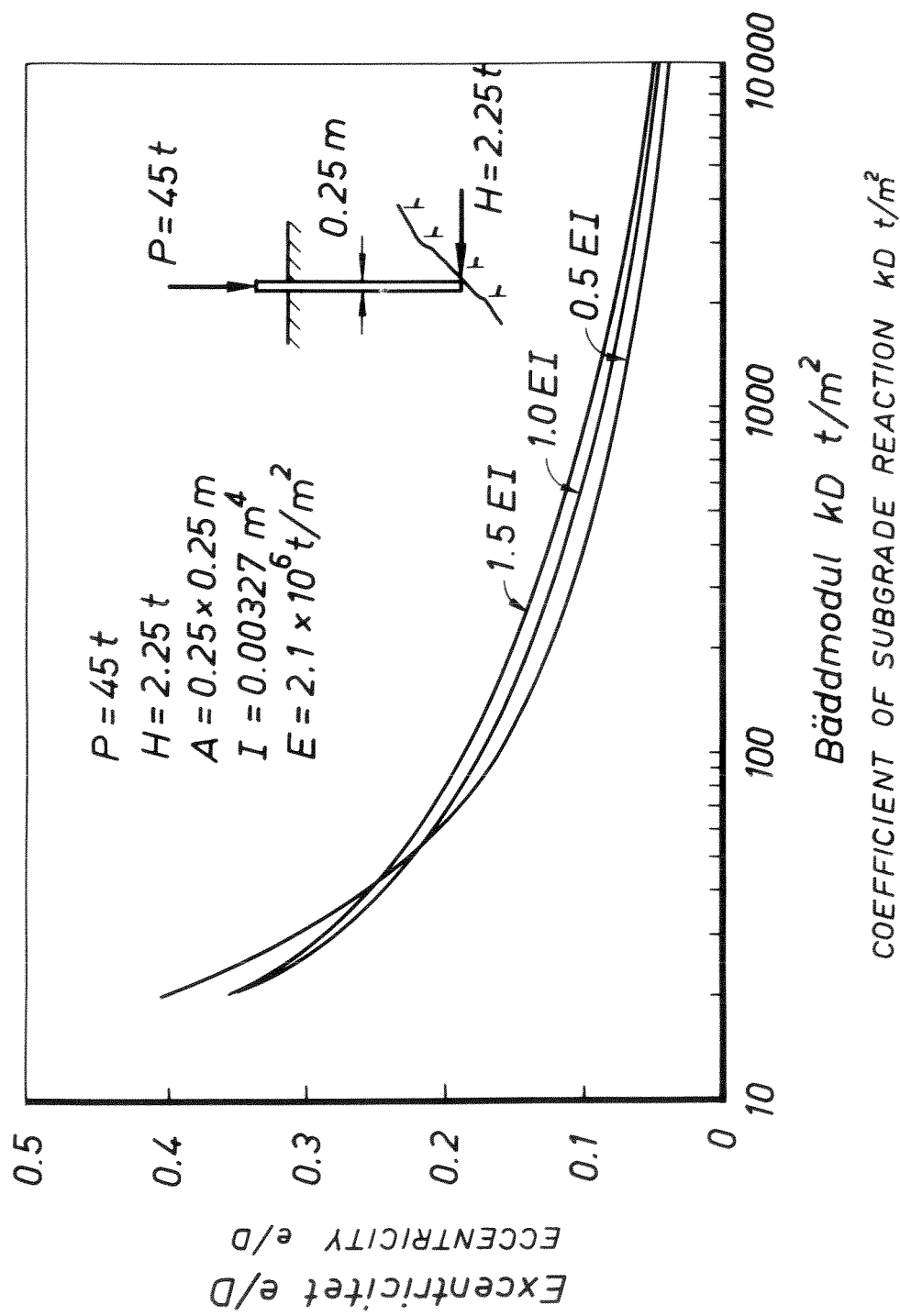


Fig. 13b. INVERKAN AV BÄDDMODULEN OCH BÖJSTYVHETEN PÅ EXCENTRICITETSTÅLET e/D FÖR EN PÅLE MED TVÄRSNITTET $0.25 \times 0.25 \text{ m}$ VID EN BELASTNING AV 45 TON.

Fig. 13b. Influence of coefficient of subgrade reaction and of pile stiffness on the eccentricity e/D for a pile with a cross section of $0.25 \times 0.25 \text{ m}$ at an applied load of 45 tons.

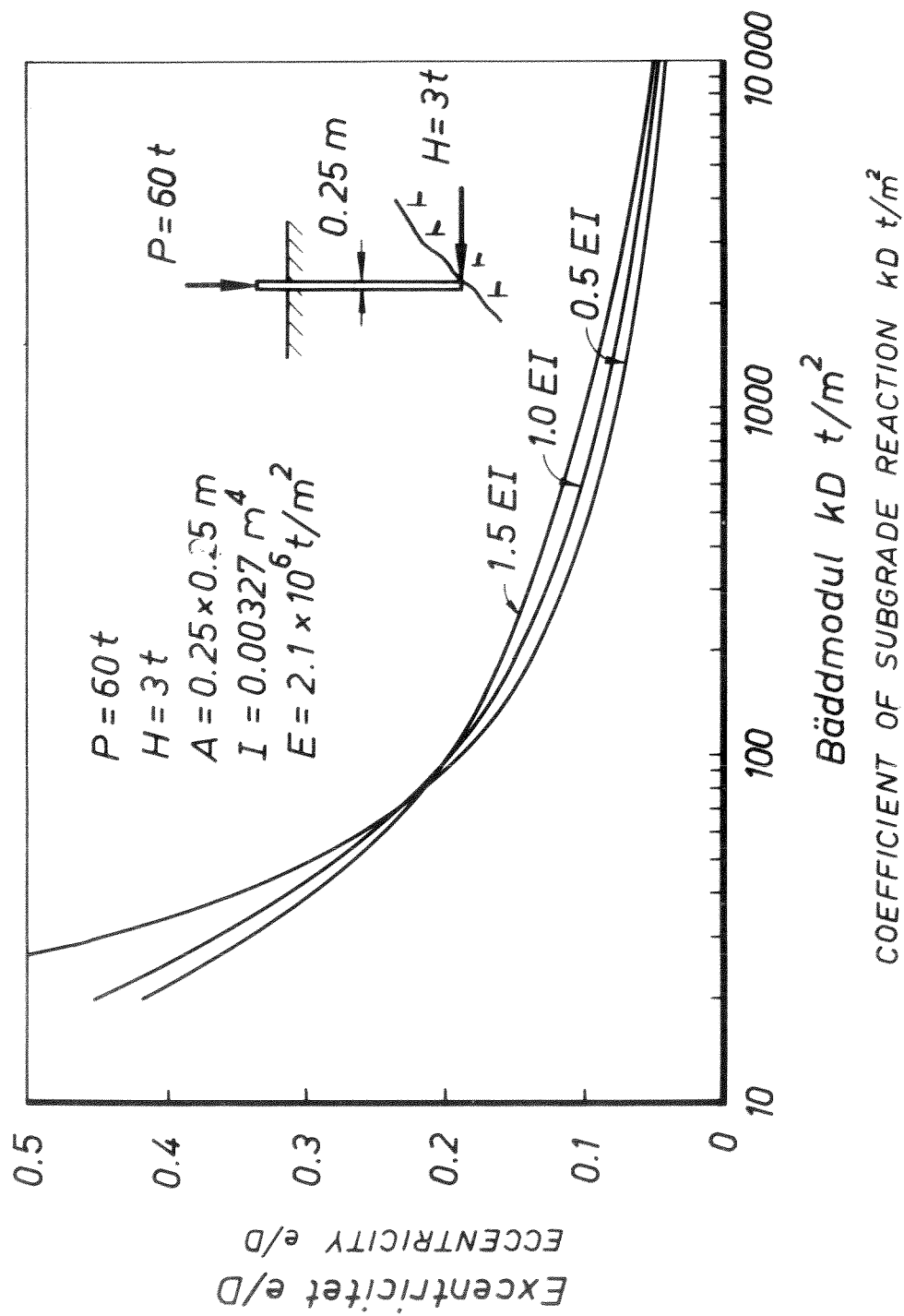


Fig. 13c. INVERKAN AV BÄDDMODULEN OCH BÖJSTYVHETEN PÅ EXCENTRICITETSTALET e/D FÖR EN PÅLE MED TVÄRSNITTET $0.25 \times 0.25 \text{ m}$ VID EN BELASTNING AV 60 TON.

Fig. 13c. Influence of coefficient of subgrade reaction and of pile stiffness on the eccentricity e/D for a pile with a cross section of $0.25 \times 0.25 \text{ m}$ and an applied load of 60 tons.

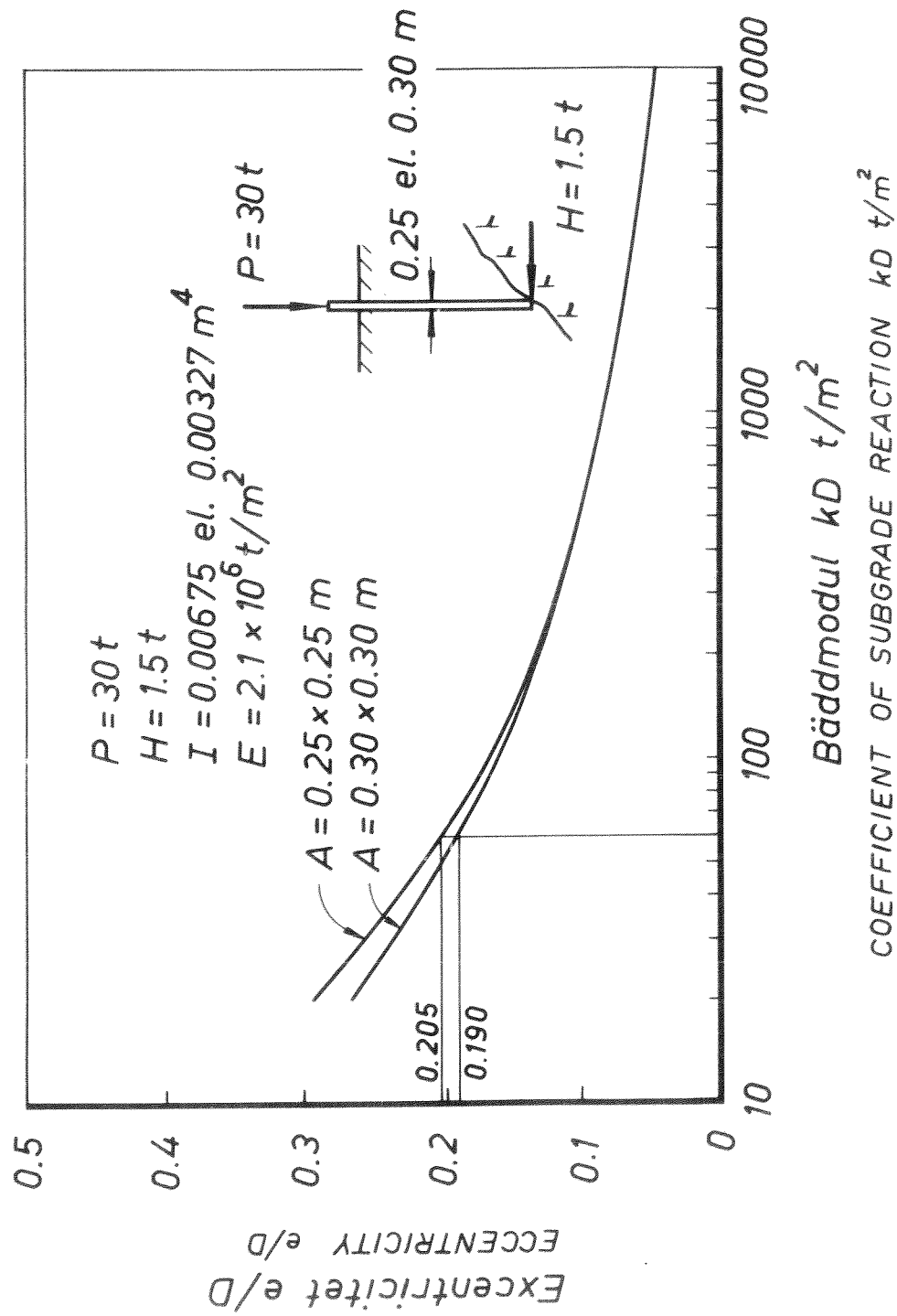


Fig. 14a. JÄMFÖRELSE AV EXCENTRICITETSTALET e/D FÖR PÅLAR MED TVÄRSNITTET $0,30 \times 0,30 \text{ m}$ OCH $0,25 \times 0,25 \text{ m}$ VID EN BELASTNING AV 30 TON .

Fig. 14a. Comparison of the eccentricity e/D between piles with a cross section of $0.30 \times 0.30 \text{ m}$ and $0.25 \times 0.25 \text{ m}$ at an applied load of 30 tons .

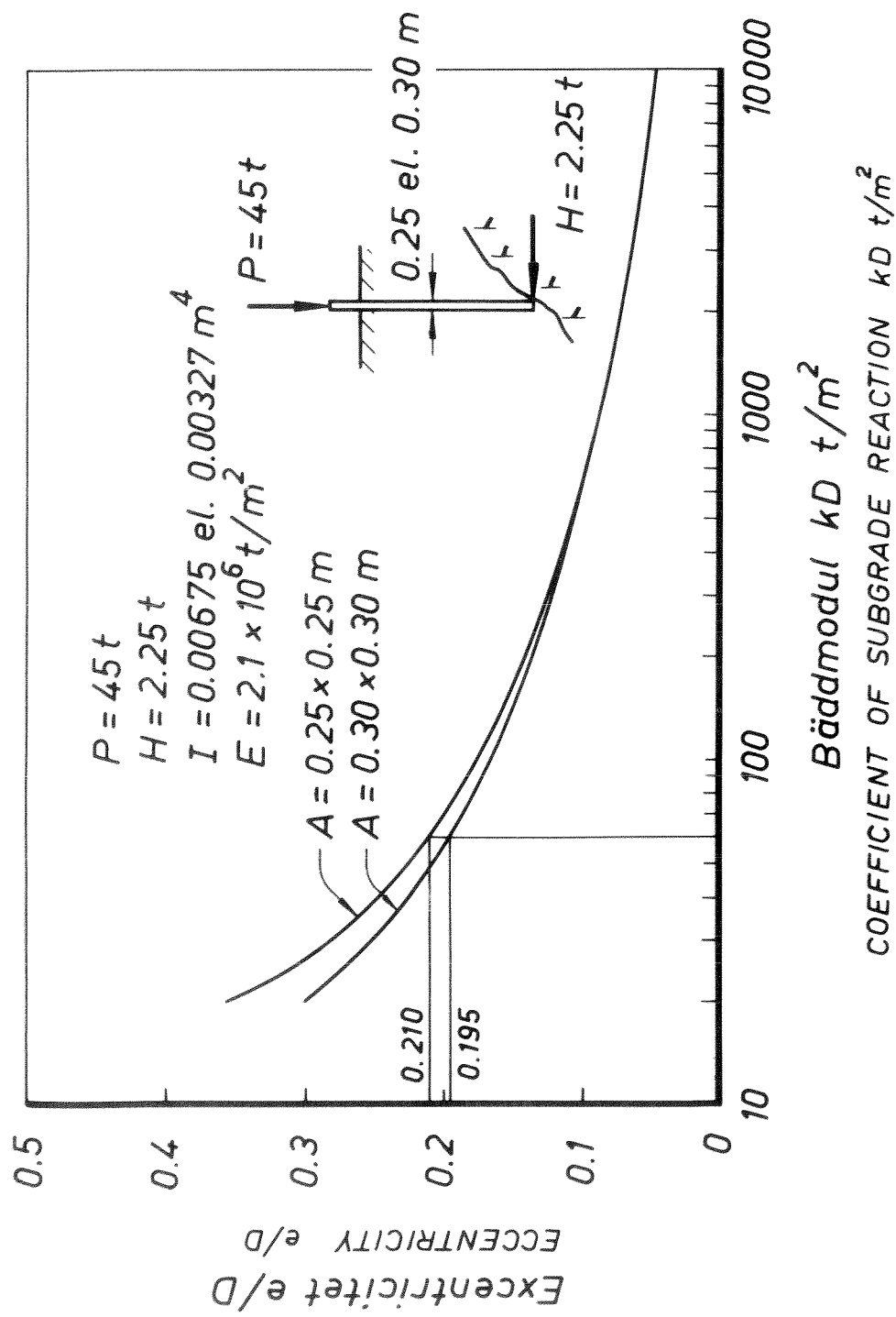


Fig. 14b. JÄMFÖRELSE AV EXCENTRICITETSTALET e/D FÖR PÅLAR MED TVÄRSNITTET $0,30 \times 0,30\text{ m}$ OCH $0,25 \times 0,25\text{ m}$ VID EN BELASTNING AV 45 TON.

Fig. 14b. Comparison of the eccentricity e/D between piles with a cross section of $0,30 \times 0,30\text{ m}$ and $0,25 \times 0,25\text{ m}$ at an applied load of 45 tons.

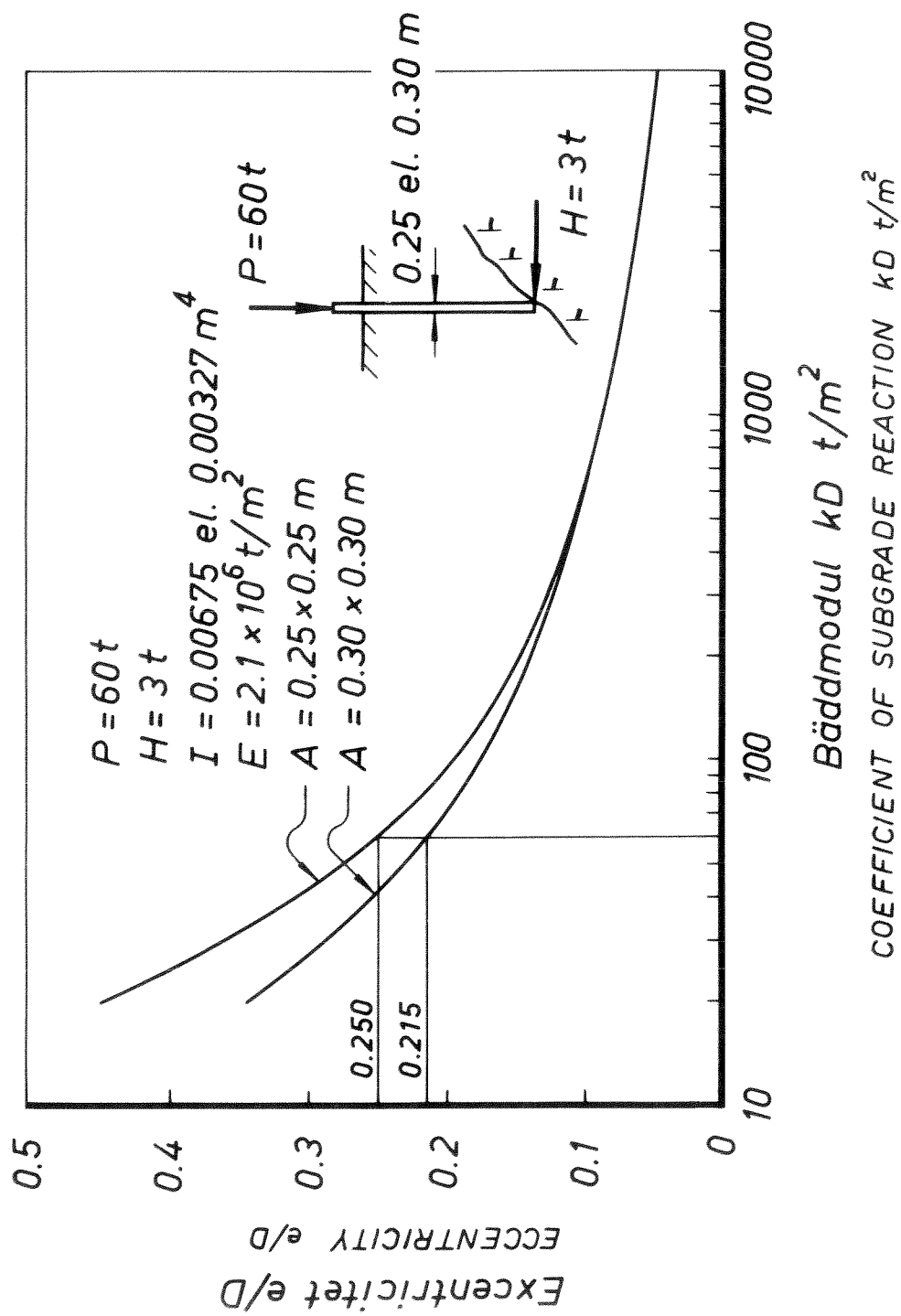


Fig. 14c. JÄMFÖRELSE AV EXCENTRICITETSTALET e/D FÖR PÅLAR MED TVÄRSNITTET $0,30 \times 0,30$ OCH $0,25 \times 0,25$ m VID EN BE-
LASTNING AV 60 TON.

Fig. 14c. Comparison of the eccentricity e/D between piles with a cross section of 0.30×0.30 m and 0.25×0.25 m at an applied load of 60 tons.

Tabell III

Jämförelse av excentricitetstalen för pålar med tvärsnittsarean
0,25 x 0,25 m och 0,30 x 0,30 m vid en belastning av 45 resp. 60 ton.
 (Comparison of the eccentricity ratio between piles with the cross-
 sections 10 x 10 in and 12 x 12 in at the applied loads of 45 and 60
 tons, respectively)

Bäddmodul kD, t/m ² (Coefficient of Subgrade Reaction, kD, t/m ²)	Skjuvhåll- fasthet x) τ_{fu} t/m ² (Shear Strength τ_{fu} , t/m ²)	Excentricitetstal, e/D (Eccentricity Ratio, e/D)	
		0,25x0,25 m påle vid 45 ton last (10x10 in pile at 45 ton load)	0,30x0,30 m påle vid 60 ton last (12x12 in pile at 60 ton load)
20	1,01	0,35	0,34
60	3,0	0,21	0,21
100	5,0	0,17	0,17
200	10,0	0,14	0,14
600	30,0	0,10	0,10
1000		0,08	0,08
2000	Friktions- material	0,07	0,07
6000		0,05	0,05
10000		0,04	0,04
20000		0,04	0,04

- x) Skjuvhållfastheten har antagits vara 1/20 av bäddmodulen kD.
 (Shear strength has been evaluated as 1/20 times the coefficient
 of subgrade reaction kD)

Det bör påpekas i detta sammanhang att bestämningen av bäddmodulen
 ur ekv. /3/ och /4/ är osäker, enär ytterst få mätningar har utförts.

Vidare har det här helt godtyckligt antagits att horisontalkraften
 H är 5 % av den påförda lasten P. I det fall horisontalkraften är
 2,5 % av lasten P är excentricitetstalet e/D endast 50 % av det som
 anges i tabell III. Det har vidare antagits att den påförda lasten
 P nedföres till pålens spets. Emellertid överföres vid låga belast-
 ningar huvudparten av P till den omgivande jorden genom mantelfriktion,

när pålen först belastas och endast en ringa del nedföres till pålspetsen. Allteftersom konsolidering sker av den omgivande jorden minskar mantelfriktionen och en relativt stor del av den påförda lasten P överföres genom pålspetsen.

När markytan är belastad av fyllnadsmassor, kan relativt stora sättningar äga rum. De av fyllnadsmassorna orsakade sättningarna kan åstadkomma att belastningen vid pålspetsen kan betydligt överstiga den påförda nyttiga pållasten (negativ mantelfriktion). Den totala påhängskraften på samtliga pålar bör dock ej överskrida fyllnadsmassornas totala vikt. Hänsyn måste tagas till denna negativa mantelfriktion vid dimensionering av en sådan påle.

Det maximala böjmomentet och excentricitetstalet e/D är, som redan nämnts, till stor del beroende av den omgivande jordens bäddmodul. Särskilt vid låga värden av bäddmodulen kan det maximala böjmomentet bli stort. Därför är det synnerligen angeläget att utveckla tillförlitliga metoder för beräkning och mätning av bäddmodulen hos leror med låg skjuvhållfasthet. En sådan metod är t.ex. att vid brott av den typ som visas i fig. 1 mäta avståndet från pålens spets till brottstället (avståndet l som visas i figuren). Som tidigare omtalats inträffar brott på ett avstånd $\pi/48 (0,795/\beta)$ från pålplatsen, när böjmomentet i pålen når ett maximum. Koefficienten β kan därefter bestämmas ur sambandet

$$\beta = 0,785/l \dots\dots\dots /12,$$

Det maximala böjmoment $M_{\max}$ ($0,3224 H/\beta$ hos en påle, som är påverkad av horisontallasten H , är indirekt proportionell mot koefficienten och kan med ledning av ekv. /12/ utvärderas ur ekvationen

$$M_{\max} = 0,412 Hl \dots\dots\dots /13,$$

Ur denna ekvation är det även möjligt att uppskatta koefficienten β genom att mäta avståndet l (avståndet från pålspetsen till brottstället) hos en påle, där brott har skett.

Sammanfattning

Det maximala böjmomentet har uttryckts i relationstalet e/D , där e är lastens excentricitet och D är pålens sida. Relationstalet e/D har sammanställts i tabell III för kvadratiska pålar med 0,25 eller 0,30 m sida vid olika värden av den omgivande jordens bäddmodul. Excentricitetstalet e/D påverkas ej av pålens dimensioner. Det minskar dock med ökat värde av jordens bäddmodul. Exempelvis är excentricitetstalet $e/D = 0,21$ när bäddmodulen $kD = 60 \text{ t/m}^2$. (Detta värde av bäddmodulen motsvarar en skjuvhållfasthet av ca 3 t/m^2). De värden av excentricitetstalet e/D som är angivna i tabell III kan användas för dimensionering av betongpålar, slagna till släntberg. Det bör emellertid påpekas att de beräknade värdena av lastexcentriciteten är baserade på ett antal antaganden. Den föreslagna metoden bör därför endast användas under noggrann kontroll tills dess tillräcklig erfarenhet har vunnits.

De böjmoment som är förorsakade av en påles sidoutböjning uppträder endast närmast pålspetsen. Det rekommenderas att pålar dimensioneras för de excentricitetstal som visas i tabell III och att de bör armeras utmed en sträcka från pålspetsen som är angiven i tabell II. Sålunda får man t.ex. att en påle med sidan 0,25 m bör armeras för excentricitetstalet 0,21 på en sträcka av 5,2 m från pålens spets, när bäddmodulen $kD = 60 \text{ t/m}^2$.

LITTERATUR

- (1). Broms, B.B. "Allowable Bearing Capacity of Initially Bent Piles," Proc. ASCE, Vol. 89, No. SM5, 1963, s. 73-90.
- (2). Broms, B.B. Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils, Proc. ASCE, Vol. 90, No. SM2, 1964, s. 27-63.
- (3). Heteñyi, M. "Beams on Elastic Foundation," The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1946, 255 s.
- (4). Terzaghi, K. "Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction," Géotechnique, Vol. V, 1955, s 297-326.

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN

PÅLKOMMITTÉN

Meddelanden

Nr 1.	Slagningsprov av pålskor med bergdubbar	1963
2.	Provpålning för broar inom blivande Olskroks- och Gullbergsmoten i samband med byggande av Europaväg 6 genom Göteborg	1964 (slut)
3.	Jämförelse mellan moment, krökningsradie och sprickvidd i betongpålar slagna genom lös lera till släntberg vid Tingstadsleden, Göteborg	1964
4.	Pålprovning för järnvägsbro vid Vännäs	1964
5.	Beräkningsmetoder för sidobelastade pålar	1965
6.	Brottlast för snett belastade pålar	1965
7.	Beräkning av vertikala pålars bärförmåga	1965
8.	Provpålning mot släntberg vid Skansen Lejonet, Göteborg	1965
9.	Inverkan av armeringsmängd, förspänning och fallhöjd på sprickrisken hos betongpålar vid slagning	1965
10.	Bärförmågan hos armerade betongpålar slagna till fast bergbotten	1965
11.	Bärförmåga hos pålar slagna till släntberg	1965

Övrigt

Slagning och provbelastning av långa betongpålar. Försök vid Gubbero i Göteborg. Statens Råd för Byggnadsforskning, rapport nr 99	1964
Slagning av långa betongpålar. Statens Institut för Byggnadsforskning, informationsblad 1964:26	1964