

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

SYSTEMPÅLAR

STÖDPÅLAR AV HÖGHÅLLFASTA, KORROSIONSKYDDADE STÅLRÖR, SLAGNA MED LÄTTA HÖGHASTIGHETSHEJARE

Anvisningar för beräkning av dimensionerande bärförmåga

Anders Fredriksson

Sven Hultsjö

Håkan Stille

Stockholm 1989



rapport 81

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

SYSTEMPÅLAR

STÖDPÅLAR AV HÖGHÅLLFASTA, KORROSIONS-
SKYDDADE STÅLRÖR, SLAGNA MED LÄTTA
HÖGHASTIGHETSHEJARE

Anvisningar för beräkning av dimensionerande
bärförmåga

Anders Fredriksson

Sven Hultsjö

Håkan Stille

Pris 150:-

Pålkommissionen rapport 81
Stockholm november 1989

**SYSTEMPÅLAR
STÖDPÅLAR AV HÖGHÅLLFASTA, KORROSIONSSKYDDADE STÅLRÖR,
SLAGNA MED LÄTTA HÖGHASTIGHETSHEJARE**

Anvisningar för beräkning av dimensionerande bärförmåga

	Sid
SAMMANFATTNING	5
1 STÖDPÅLAR AV KORROSIONSSKYDDADE HÖGHÅLLFASTA STÅLRÖR	7
1.1 Inledning	7
1.2 Pålsystem	9
1.3 Erfarenheter	10
1.4 Dimensioneringskrav	11
1.5 Underlag för typgodkännandeansökningar	11
2 BÄRIGHET VID PÅLSPETS	13
2.1 Bakgrund	13
2.2 Lätta hejare	14
2.2.1 Hejarkonstruktion	
2.2.2 Överföring av stötvåg till påle	
2.2.3 Skarvförluster	
2.3 Jordmodell för stötbelastning	22
2.3.1 Inledning	
2.3.2 Plastisk modell	
2.3.3 Elasto-plastisk modell	
2.3.4 Icke linjär modell	
2.3.5 Jämförelse mellan teori och praktik	
2.4 Val av stoppslagningskriterier	32
2.4.1 Generella stoppslagningskriterier	
2.4.2 Bestämning av statisk bärighet med dynamisk provb belastning	

3	BÄRIGHET HOS PÅLSKRAFT MED HÄNSYN TILL OMGIVANDE JORD OCH PÅLMATERIAL	36
3.1	Inledning	36
3.2	Förslag till beräkningsmetod	37
3.2.1	Inledning	
3.2.2	Pålens bärighet med hänsyn till omgivande jord	
3.2.3	Val av arbetskurva för jordmotståndet	
3.2.4	Pålens bärighet med hänsyn till pålmaterial	
3.2.5	Beräkningsgång	
3.2.6	Jämförelse mellan finita differensberäkning och den föreslagna beräkningsmetoden	
3.2.7	Inverkan av egenspanningar i pålelementen	
3.2.8	Val av initialkrokighet vid beräkning av bärighet	
3.3	Dimensionering enligt partialkoefficientmetoden	57
3.3.1	Beräkningsgång	
3.3.2	Val av parametervärden	
3.4	Exempel på beräknad dimensionerande bärförmåga	62
4	FÖRSLAG TILL KVALITETSSÄKRINGSPROGRAM FÖR TYPGODKÄNDA PÅLSYSTEM	66
4.1	Inledning	66
4.2	Kvalitetssäkringsprogram	66
4.2.1	Beskrivning av pålsystem	
4.2.2	Områden för kvalitetssäkring, QA	
4.2.3	Organisation	
4.2.4	Personal	
4.2.5	Systemfrågor	
4.2.6	Materialegenskaper	
4.2.7	Materielegenskaper	
4.2.8	Utförandeskedet	
4.2.9	Dokumentation	
4.2.10	Inköpsrutiner	
4.2.11	Rutiner vid avvikelser	

REFERENSLISTA	77
----------------------------	-----------

Appendix A	Bestämning av stukgräns för pålrör
Appendix B	Inklinometermätning av rörpålar på olika arbetsplatser
Appendix C	Jordens egenskaper, variationskoefficient
Appendix D	Beräkning av dimensionerande pållast enligt β - metoden
Appendix E	Sändlista vid remissgranskning

SAMMANFATTNING

Följande principiella nyheter föreslås införas i framtida typgodkännanden av rörpålesystem, nämligen

- o pålarna betraktas som system, med ej utbytbara komponenter som material, utrustning för neddrivning och stoppslagning, modeller för beräkning av dimensionerande bärförmåga, förprovningar etc
- o för varje pålsystem införs ett kvalitetssäkringsprogram, som en del av dess typgodkännande
- o dimensionerande bärförmåga, när pålen står i lös lera, görs beroende av pålens verkliga krökning efter stoppslagning.

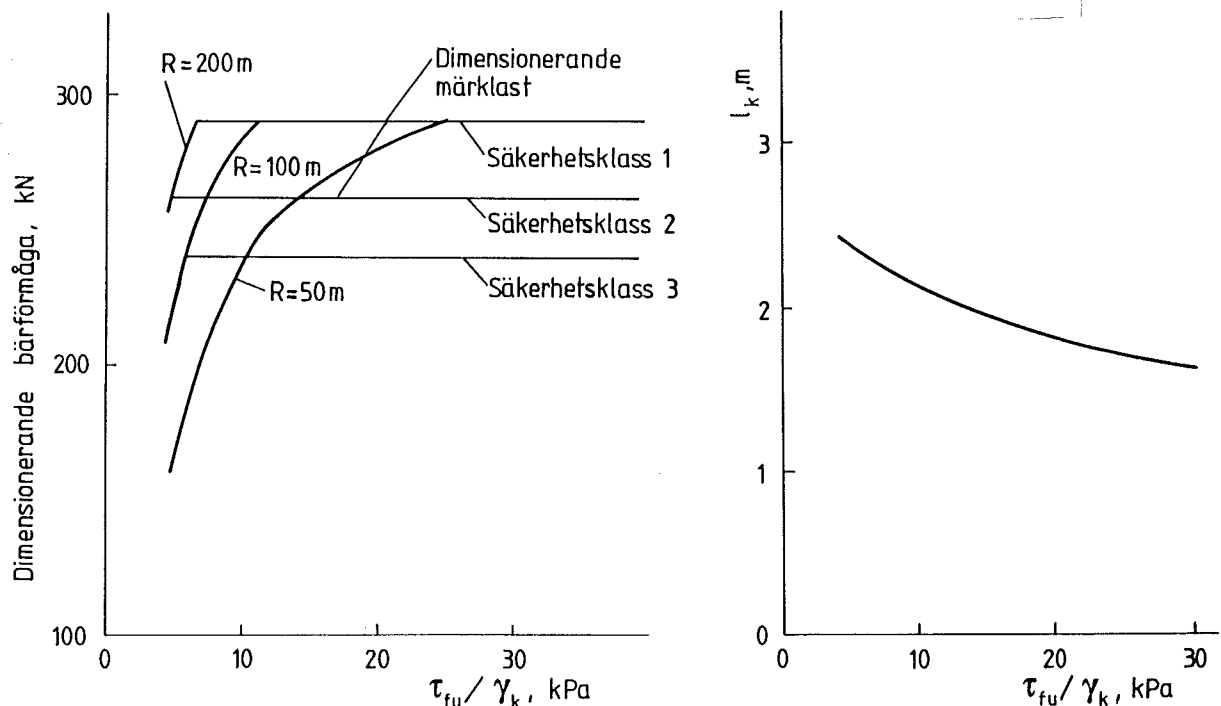
Varje pålsystem skall beskrivas i följande handlingar som utgör en del av typgodkännandet, se avsnitt 1.5.

- o En beskrivning av kvalitetssäkringsprogramet (QA-manual). QA-manualen upprättas enligt kapitel 4 i denna rapport.
- o Ett faktablad över pålsystemet med tillhörande typritning. Detta faktablad skall vara avsett för konstruktörer, geotekniker, pålningskontrollanter, byggnadsinspektörer och andra som behöver tillgång till fakta om pålsystemet.

Faktabladet skall innehålla följande uppgifter:

- o Dimension på pålrör med angivande av toleransgränser.
- o Karakteristiskt värde på hållfasthet hos pålröret.
- o Dimensioner för skarvhylsa med angivande av toleransgränser.
- o Kapningskrav för pålrör.
- o Typ av korrosionsskydd med dimensioner samt uppgift om de korrosionsmiljöer, där pålen kan användas.
- o Dimensioner för pålskor.
- o Dimensioner för topplatta.
- o Placering av pålar, såsom minsta centrumavstånd och minsta möjliga avstånd till vägg.
- o Specifikation för neddrivnings- och stoppslagningsutrustning. Angivelse av tryck och flöde till hejare vid stoppslagning.

- o Generella stoppslagningskriterier för att nå en bärförmåga som motsvarar märklasten och kriteriernas giltighetsområden (jordprofiltyp). Med märklast avses dimensionerande bärförmåga i BFS säkerhetsklass 2 under förhållanden, där pålskaftets bärighet med hänsyn till omgivande jord ej är dimensionerande.
- o Beskrivning av tillvägagångssätt för att bestämma stoppslagningskriterier vid förhållanden som avviker från vad som beskrivits under ovanstående punkt.
- o Diagram som anger dimensionerande bärförmåga och elastisk knäcklängd som funktion av dimensionerande skjuvhållfasthet hos omgivande lera och krökningsradien mätt på elastisk knäcklängd. Diagrammet kan principiellt se ut som i figur 1.
- o Angivande av minsta krökningsradie, som kan accepteras.
- o Vägledning om hur dimensionerande skjuvhållfasthet väljs beroende på den geotekniska undersökningens omfattning och på jordförhållandena.
- o Utförande av rakhetskontroll vid olika val av dimensionerande krökningsradie.
- o Sätt för märkning av pålelementen.
- o Organisation (företag), som utför och ansvarar för pålsystemet.
- o Hänvisning till QA-manual.



Figur 1 Dimensionerande bärförmåga.

1 STÖDPÅLAR AV KORROSIONSSKYDDADE HÖGHÅLLFASTA STÅLRÖR

1.1 INLEDNING

Stödpålar av korrosionsskyddade, höghållfasta stålrör, slagna med lätta höghastighetshejare började användas i Sverige vid mitten av 70-talet. År 1977 utfärdade Statens Planverk de första typgodkännandena för sådana pålar, eller snarare pålsystem, eftersom man redan då gjorde en koppling mellan pålrör, tillhörande hejare, beräkningsteori m m å ena sidan och tillåten last å den andra. Sedan dess har de aktuella pålsystemens användning ökat kraftigt främst för grundförstärkning av befintliga hus (trånga arbetsplatser) och innerstadsgrundläggning (skonsamhet).

I det följande kommer vi med beteckningen systempålar och pålsystem att avse stödpålar av korrosionsskyddade, höghållfasta stålrör, slagna med lätta höghastighetshejare.

De aktuella pålsystemen skiljer sig på många sätt radikalt från traditionell påslagning med tunga fallhejare. Detta har medfört att nya beräkningsmodeller, mätmetoder, analyser och inte minst synsätt på "tillåten last" fått utvecklas kontinuerligt under pålsystemens livstid. Dessa har legat till grund för nya och förnyade typgodkännanden.

Under 1986/87 hade flera likartade ansökningar om typgodkännanden inlämnats till Statens Planverk av olika svenska (systempåle-)entreprenörer. Verket önskade en koordinering av de olika ansökningarna, vilka skiljde sig åt i väsentliga detaljer.

Vid den aktuella tidpunkten var principerna kända i den nya "byggnormen", d v s Nybyggnadsregler till Plan- och Bygglagen, där byggnadsverk skall konstrueras utifrån dimensionerande bärförmåga med delsäkerhetsfaktorer för samtliga ingående osäkerheter i stället för "tillåten last" med totalsäkerhetsfaktor lagd på någon enstaka materialegenskap. Det var därmed ett gemensamt intresse för verket och de sökande företagen att typgodkännandena utformades i anslutning till den nya normen. Detta är dock ett omfattande och kvalificerat arbete, eftersom det kräver helt nya kombinationer av synsätt från t ex Stålbyggnadsbestämmelsernas respektive avsnitt om grundläggning (se kapitel 3). Detta utgjorde ett annat gott skäl för ett branschgemensamt arbetssätt.

Med syftet att utreda alla relevanta frågor samt att ge anvisningar med generell giltighet inom definierade gränser för beräkning av dimensionerande bärförmåga för system med stödpålar av korrosionsskyddade höghållfasta stålrör, slagna med lätta höghastighetshejare, bildade därför de berörda systempålningföretagen under våren 1987 en projektgrupp med:

Besab	Klas Eliasson
BINAB	Dick Asterö och Staffan Hintze
Bygg-Förstärkarna AB	Tore Andersson
AB Grundförstärkningar	Sven Hultsjö (projektledare)
Stabilator AB	Björn Lundahl och Erling Magnusson

Till gruppen knöts experter på de vetenskapliga/tekniska områden, som kunde förväntas bli aktuella att studera:

Per-Evert Bengtsson	SGI och IVAs Pålkommision
Anders Fredriksson	ADG Grundteknik AB
Göran Holm	SGI och IVAs Pålkommision
Mogens Lorentsen	KTH, inst för Brobyggnad och AB Jacobson & Widmark
Håkan Stille	KTH, inst för Jord- och Berg- mekanik och SKANSKA

ADG Grundteknik AB har ansvarat för figurer, utskrift samt slutlig sammanställning och redigering.

Avsikten är att projektresultaten skall kunna godtas av Boverket som ett principiellt underlag för framtida typgodkännanden av pålsystem. De skall kompletteras med specifikationer utformade enligt anvisningarna i rapporten för vart och ett av de pålsystem, som prövas. Specifikationerna utformas av de företag, som svarar för respektive pålsystem och ingår ej i rapporten.

Projektet har finansierats genom dels utvecklingsanslag 7030 från SBUF, vilket täckt experternas och deras institutioners kostnader enligt normal konsulttaxa, dels IVAs Pålkommision/SGI, som ej belastat projektet med kostnader för Per-Evert Bengtssons och Göran Holms arbete. Tillhandahållande av erfarenheter, utförda provningar, utförande av nya provningar på arbetsplatser och laboratorier samt allt övrigt arbete i projektet har utförts av entreprenörerna utan ekonomisk ersättning.

IVAs Pålkommision tillsatte under våren 1987 en specialgrupp, "Knäckningsgruppen", vars uppgift är att studera en av projektets delfrågor (bärighet hos pålskaft med hänsyn till omgivande jord- och pålmaterial) från generell pålnings-synpunkt. Per-Evert Bengtsson och Anders Fredriksson som medverkar i det aktuella projektet är medlemmar även i Knäckningsgruppen, varför ett informellt och ovärderligt informationsutbyte kontinuerligt kunnat ske. Detta har påverkat projektarbetet och medfört att dess resultat väl harmonierar med kommande normsynsätt.

IVAs pålkommision har därtill låtit rapporten remissgranskas enligt sändlistan i appendix E. Trots kort granskningstid har de flesta tillfrågade återkommit med rättelser, påpekanden och synpunkter, vilka tacksamt mottagits och inarbetats i den föreliggande rapporten.

Sedan resultaten av projektets arbete börjat kunna överblickas, har gruppen haft löpande underhandskontakter med Jan Ahlberg och Jan Wennerstrand på Statens Planverk, numera Boverket, vilka tillfört synnerligen värdefulla erfarenheter och synpunkter.

Byggentreprenörerna har genom Kurt Sjökvist löpande följt arbetet i projektet och har givit det allt det stöd och bistånd, som begärts.

Projektgruppen har arbetat parallellt med de olika delfrågorna i mindre arbetsgrupper. Hela gruppen har samlats till regelbundna arbetsmöten för utbyte av information och för consensusbeslut om kommande inriktning av arbetet.

Projektledaren vill här rikta ett stort tack till alla medverkande både för de stora arbetsinsatserna och beredvilligheten att ställa resurser, erfarenheter, kunskap och tanke-skräpa till projektets förfogande.

1.2 PÅLSYSTEM

Stödpålar av korrosionsskyddade, höghållfasta stålrör, vilka neddrivs och stoppslås med lätta höghastighetshejare är väsensskilda från konventionella slagpålar, varför de förstnämnda sedan starten prövats genom typgodkännanden från Statens Planverk.

Typgodkännandena har utformats så att pålen måste ingå i ett komplett system med regler för tillverkning, arbetsutförande, slagningsutrustning, stoppslagningsregler och kontroll. Det är viktigt att detta systemtänkande bibehålles och förstärks för att misslyckanden skall undvikas.

Ett komplett pålsystem består av de ej utbytbara komponenterna:

- o Beräkningsmodell, dels för pålens "märklást", dels för dimensionerande bärförmåga i de fall kriterier för godkännande ej innehålls.
- o Pålrör med angiven dimension, hållfasthet, rakhet och korrosionsskydd.
- o Övriga tillbehör som pålskor, topplåtar.
- o Kringutrustning, t.ex. rakhetsmätare, kaputrustning etc.
- o Tillhörande neddrivningsutrustning.
- o Kriterier för stoppslagning.
- o Kriterier för rakhet efter stoppslagning.

- o Organisation för utförande av systempålar.
- o Personal med erfarenhet och kompetens att utföra systempålning.
- o Kvalitetssäkringsprogram inkl bl a Kontrollprogram enligt Nybyggnadsreglerna.

1.3 ERFARENHETER

Stödpålar av höghållfasta stålrör, som neddrivs och stoppslås med lätta höghastighetshejare, är numera helt dominerande för grundförstärkning av befintliga byggnader. Deras användning för skonsam nybyggnadsgrundläggning ökar. Branschen har ca 15 års erfarenhet av dessa pålsystem. I tabell 1.1 framgår dimensioner och stålqualiteter för de hitintills använda pålrören. Märklaster för dessa pålsystem varierar från 120 till 300 kN.

Tabell 1.1 Pålrörnsdimensioner

Dimensioner	stålarea	I	Påltyp
mm	m ²	m ⁴	
φ 60.3 * 5.0	8.69 * 10 ⁻⁴	35.5 * 10 ⁻⁸	Bjurströmspåle
φ 76.1 * 4.0	9.06 * 10 ⁻⁴	59.1 * 10 ⁻⁸	Binab-, Besab- o Stålplastpåle
φ 76.1 * 5.0	11.20 * 10 ⁻⁴	70.9 * 10 ⁻⁸	Bjurströms- o Binabpåle
φ 88.9 * 5.1	13.50 * 10 ⁻⁴	116.3 * 10 ⁻⁸	Bjurströmspåle
φ 101.6 * 5.6	16.90 * 10 ⁻⁴	195.2 * 10 ⁻⁸	Stålplastpåle

Under 1987 användes ca 160 000 meter systempålar i Sverige. Utvecklingen beträffande slagna pålmetrar under de sista fem åren sammanfattas i tabell 1.2.

Tabell 1.2 Utförd mängd systempålar 1983 - 1987

År	Totalt
	m
1983	84 400
1984	112 900
1985	134 900
1986	138 100
1987	161 500

Fördelningen av pålar slagna i olika jordförhållanden visas i tabell 1.3. Som framgår används ca 75% av systempålarna vid sådana jordförhållanden att pålarna blir spetsbärande.

Tabell 1.3 Fördelning av pålmetrar på olika jordprofiltyper.

Profiltyp	procentuell fördelning
Lös lera på berg, morän eller fastare friktionsjord	75
Fyllning, ibland genomborrad med foder-rör, på åsmaterial, typ Gamla Stan i Stockholm	15
Silt	5
Sand, grus	5

1.4 DIMENSIONERINGSKRAV

Dimensionerande bärförmåga bestäms av lägsta bärförmåga enligt någon av följande brottyper.

- o Pålmaterialbrott (stukning av pålrör, böjbrott i lös jord eller lokal buckling).
- o Bärighetsbrott (d v s. brott i jorden under pålspetsen och kring pålen).

För varje brotttyp skall sannolikheten för brott ligga under normens krav genom val av lämpliga delsäkerhetsfaktorer (partialkoefficienter).

1.5 UNDERLAG FÖR TYPGODKÄNNANDEANSÖKNINGAR

Framtida ansökningar om typgodkännanden av pålssystem med höghållfasta, korrosionsskyddade stålrör stoppslagna med höghastighetshejare med hänvisning till de definitioner av "pålssystem" och de sammankopplade beräkningsmodeller och kontrollåtgärder, som redovisas i denna rapport, skall förutom rapporten för varje enskilt pålssystem omfatta

- o Dokumentation av systemet i faktablad och typritning enligt sammanfattningen i rapportens början.

- o Kvalitetssäkringsprogram (QA-manual) med omfattning, provningsmetoder, provningsfrekvenser, dokumentation etc enligt kapitel 4 nedan.
- o Underlag för bestämning av generellt stoppkriterium enligt avsnitt 2.4 nedan.
- o Underlag för angivna gränser för acceptabel korrosionsmiljö i förhållande till systemets korrosionsskydd.
- o Dokumentation av uppmätta stötkrafter i pålen under slagning med påsystemets föreskrivna hejare.
- o Dokumentation av provad stukhållfasthet enligt Appendix A.
- o Övrig dokumentation av praktisk erfarenhet, provpålning, provbelastning etc för påsystemet, vilken klargör frågor ovan eller i övrigt belyser systemets funktion.

2 BÄRIGHET VID PÅLSPETS

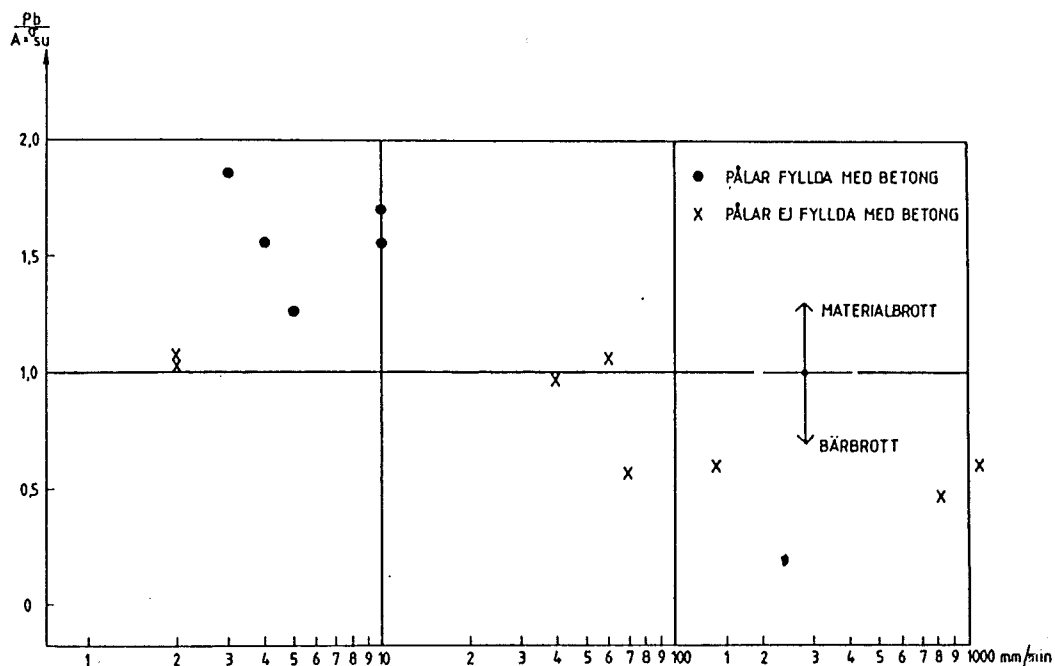
2.1 BAKGRUND

Den påförda axiallasten på en påle kan tas upp av omgivande jord på två sätt, dels längs pålskaftet genom mantelfriktion, dels vid spetsen genom spetsbärighet. De typgodkända rörpålarna överför sin last till jorden i huvudsak genom spetsbärighet. För att säkerställa erforderlig statisk spetsbärighet slås pålen tills ett stoppslagningskriterium motsvarande en maximalt tillåten permanent sjunkning per minut uppfylls. Resonemangen i detta kapitel avser endast pålar, som är i huvudsak spetsbärande. Denna begränsning har alltid gällt för de generella stoppslagningskriterier som angivits i typgodkännandena och det finns ej underlag att nu vidga deras giltighet.

De typgodkända rörpålarna slås med lätta slagdon med hög anslagshastighet. Ett väsentligt skäl är att åstadkomma en skonsam pålningsteknik, som kan användas t ex vid grundförstärkning av befintliga byggnader. Med lätta slagdon kan pålning därtill utföras i trånga utrymmen.

Valet av slagningsutrustning och stoppslagningskriterium för ett objekt i känslig miljö är en balansgång mellan kraven att å ena sidan slå pålarna så djupt att högsta säkerhet och beständighet erhålls, å den andra att pålningen i sig ej onödigtvis skall skada omgivningen eller pålarna.

Vid utvecklingen av rörpålarna under 1970-talet bestämde man stoppslagningskriterierna genom att slå pålarna till en viss sjunkning per minut och sedan bestämma den statistiska bärigheten genom statisk provbelastning, se exempel figur 2.1.



Figur 2.1 Samband mellan stoppslagningskriterium och statisk bärighet. (Stille och Lundqvist, 1977).

Undersökningar visade att stödpålar i jordprofiler motsvarande lös lera på morän eller fast lagrad friktionsjord, stoppslagna till en sjunkning av 5 mm/min, fick en statisk spetsbärighet som översteg pålskaftets bärighet. Stoppslagningskriteriet 5 mm/min har använts för alla de i marknaden förekommande typgodkända rörpålesystemen oberoende av vilken hejare som använts.

Erfarenheterna från senare utförda projekt där statiska provbelastningar eller dynamisk provbelastning med fallhejare har utförts, verifierar att den statiska jordbärigheten för pålar stoppslagna till sjunkningen 5 mm/min är större än pålskaftets bärförmåga när pålen i huvudsak är spetsbärande.

Vid val av slagdon och stoppslagningskriterium för en påle är det viktigt att känna till vilka faktorer som påverkar slutresultatet, d v s den statiska bärförmågan. Detta är speciellt viktigt när man arbetar med lätta snabbslående slagdon eftersom marginalerna är mindre. Erfarenheterna från slagning med tunga fallhejare kan inte direkt överföras till slagning med lätta snabbslående hejare.

För att nå ett bra och jämnt resultat vid stoppslagning med lätta slagdon måste varje del som påverkar slutresultatet studeras och i möjligaste mån optimeras. De viktigaste faktorerna som påverkar resultatet är följande:

- o Slagdonets konstruktion och egenskaper.
- o Överföring av stötkraften till pålen.
- o Förluster när stötvågen fortplantas längs pålen, i huvudsak vid passage av skarvar.
- o Jordens respons vid pålspetsen för den dynamiska stötbelastningen.

I det följande kommer inverkan av de olika faktorerna att studeras, en teoretisk modell för val av stoppslagningskriterium att ställas upp samt ett praktiskt tillvägagångssätt för bestämning av stoppslagningskriterier att presenteras.

2.2 LÄTTA HEJARE

2.2.1 Hejarkonstruktion

För att driva och stoppslå rörpålar används lätta luft- eller hydrauldrivna hejare, vilka i olika omfattning modifierats för denna användning. De är ursprungligen konstruerade för brytning och bilning av hård eller tjälad jord, betong, sten och andra hårda material. De kännetecknas därför av hög slagfrekvens, hög kolvhastighet och hög slagenergi.

Vid val av lämplig hejare för rörpålar är följande faktorer viktiga:

- o slagkolvens vikt
- o slagkolvens area
- o slagkolvens längd
- o dynans massa
- o energiinnehåll per slag
- o slagfrekvens
- o hejarens totalvikt.

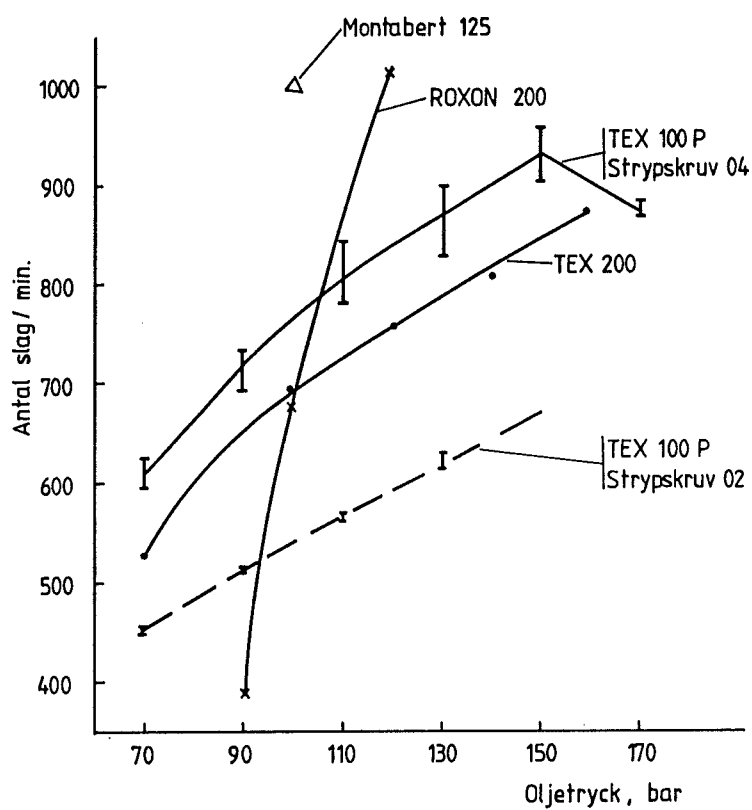
I tabell 2.1 visas data för de vanligast förekommande hejarna.

Tabell 2.1

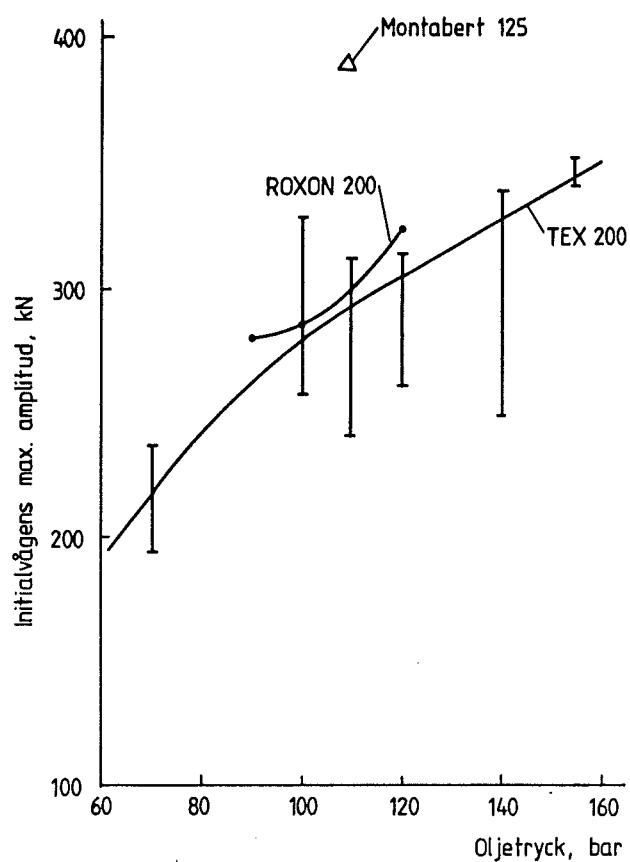
Hejare	Kolvvikt kg	Anslags- hastighet m/s	Kolvlängd m	Impedans kNs/m	Vikt kg	driv- medium
BRH 90 A	8.3	10.0	0.495	93		olja
BRH 125	11.4	10.0	0.385	158	252	olja
KRUPP 110	12.0	9.8	0.44	148		olja
KRUPP 200	24.0	8.2	0.530	240	400	olja
MKT 3	31.0	5.5	0.905	180	305	luft
PH 5	55.0	3.2	0.400	727	400	luft
ROXON 200	9.5	10.0	0.510	101	320	olja
ROXON 400	19.5	10.2	0.405	234	450	olja
TEP 41	2.5	9.8	0.120	109	59	luft
TEP 100	12.6	5.2	0.320	207	180	luft
TEP 401	34.5	4.7	0.390	465	450	luft
TEX 100P	3.7	10.0	0.415	52		olja
TEX 250	12.1	9.7	0.445	144	240	olja

Hejarnas slagfrekvens varierar med drivmediets tryck. I figur 2.2 visas resultatet av en undersökning av slagfrekvensens variation med oljetrycket för olika hydraulhejare. Det framgår av figuren att vissa hejares slagfrekvens är starkt beroende av oljetrycket. Även amplituden hos stötvågen som genereras i pålen kommer att variera med oljetrycket, se figur 2.3.

Det är alltså viktigt att även specificera det oljetryck som hejaren skall ha under stoppslagningen, för att uppnå jämn kvalitet på stoppslagningen.



Figur 2.2 Samband mellan slagfrekvens och oljetryck till hejaren.



Figur 2.3 Samband mellan initialstötstångens maxamplitud och oljetryck till hejaren. Rörpåle ϕ 101.6 * 5.6.

Sammanfattning: Hejarens och kraftkällans kondition skall med jämna mellanrum kontrolleras vad gäller

- o oljetryck vid hejaren
- o hejarens slagfrekvens
- o amplitud på stötvågen i pålen.

Kontrollen kan lämpligen utformas så att en påle slås på en provplats med kända geotekniska förhållanden varvid drivningshastigheten före och under stoppslagningen mäts och dokumenteras. Resultatet jämförs med en referensslagning med utrustningen i topptrim. Alternativt kontrolleras hejarens kondition genom stötvågsmätning där slagfrekvens och amplitud hos stötvågen mäts.

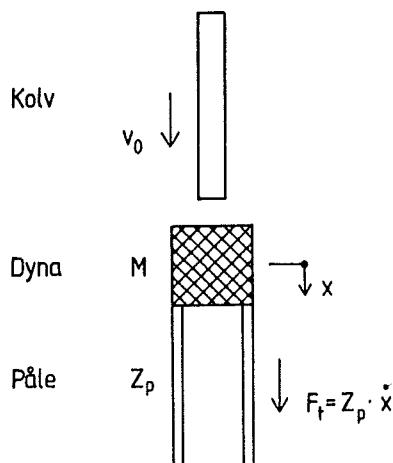
2.2.2 Överföring av stötvåg till påle

I tryckluftshejare eller hydraulhejare utgörs hejaren av en långsmal kolv som slår på en dyna av stål, vilken ligger an mot pålen. I figur 2.4 visas en schematisk bild över systemet hejare - dyna - påle. Följande jämviktsekvation kan uppställas:

$$Z_h \cdot (\dot{v} - \dot{x}) = Z_p \cdot \dot{x} + m \cdot \ddot{x} \quad (2.1)$$

Z_h och Z_p är hejarens respektive pålens impedans. Impedansen $Z = E \cdot A / c$, där E är stålets elasticitetsmodul, A är arean och c är ljudets gånghastighet i stål (5100 m/s). v är hejarens hastighet och x , $\dot{x}$, $\ddot{x}$ anger pålens förflyttning. Dynan modelleras som en stel kropp med massan m , eftersom dess stålarea är mycket större än pålens och hejarens areor.

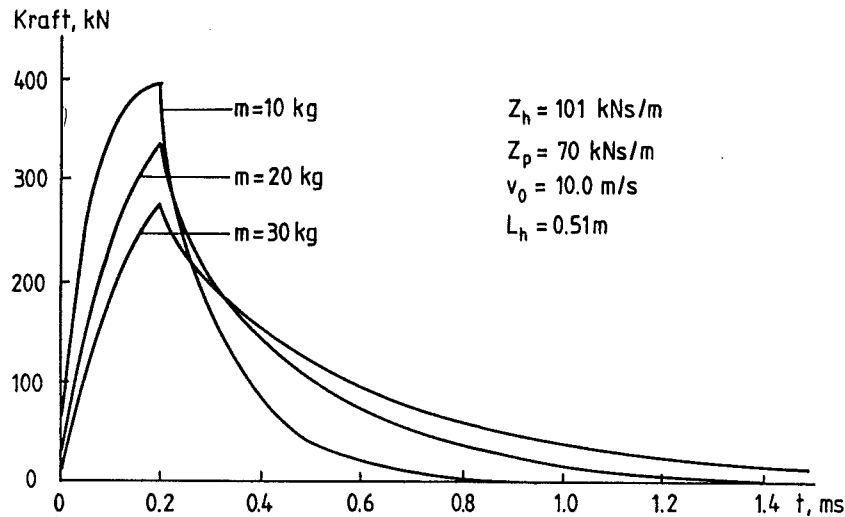
Utgående från begynnelsevillkoret $\dot{x}(0) = 0$, $\ddot{x}(0) = 0$ och $v = v_0$ kan man med differensräkning räkna ut hur stötkraften i pålen utbildas som funktion av tiden. De parametrar som påverkar



Figur 2.4 Modell över systemet kolv - dyna - påle.

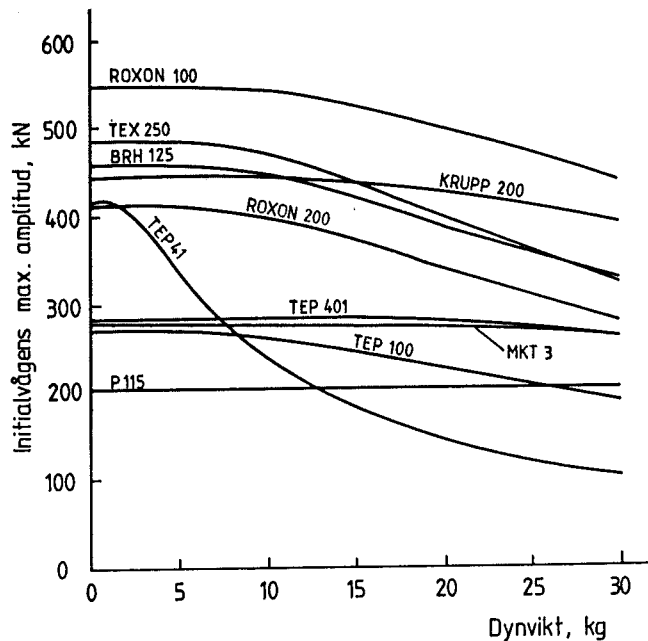
stötkraftens utseende och maxamplitud är hejarens begynnelsehastighet v_0 , dynans massa m , samt kolvens och pålens impedans Z_h och Z_p . I marknaden förekommande tryckluftshejare har en anslagshastighet mellan 3 och 6 m/s, medan hydraulhejare vanligen har en anslagshastighet mellan 8 och 10 m/s.

Dynans vikt påverkar stötvågens maxamplitud och utseende i pålen. I figur 2.5 visas hur stötvågens utseende ändras med ökande dynvikt.



Figur 2.5 Beräknade initialstötvågor vid olika dynvikter.

I figur 2.6 visas hur dynvikten påverkar stötvågens maxamplitud för olika hejare. Dynans vikt bör alltså göras så låg som möjligt. En praktisk vikt är 10 - 20 kg.



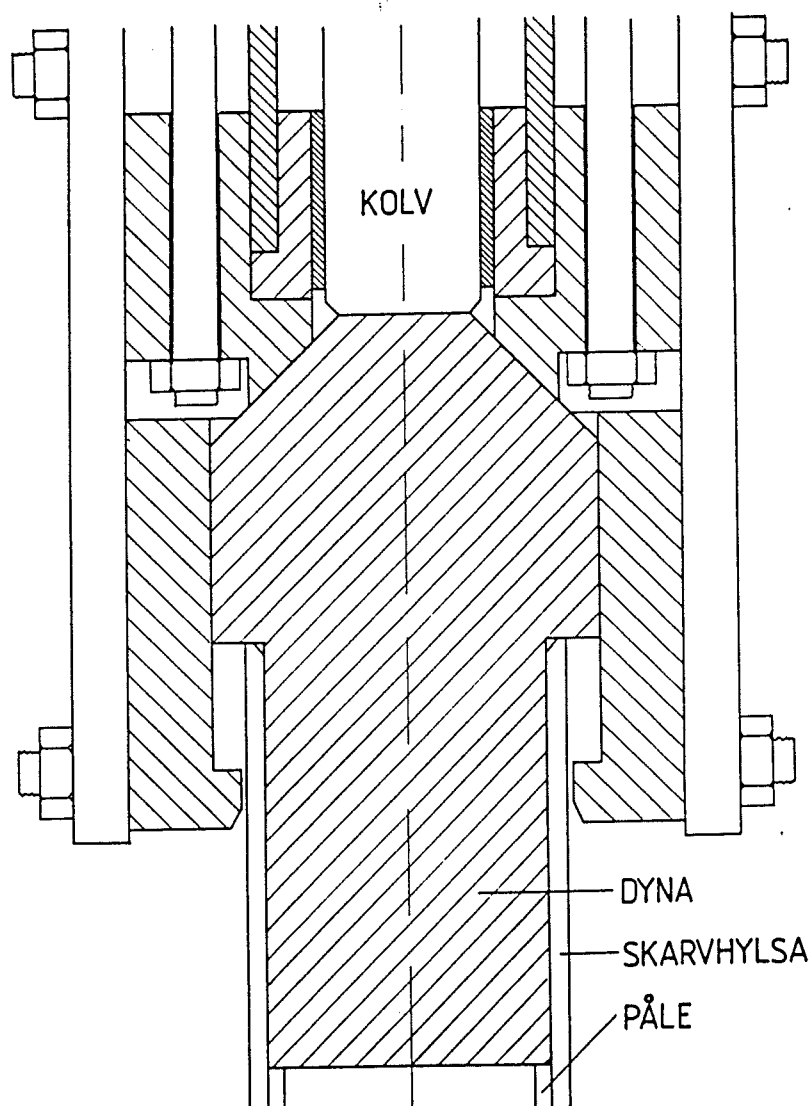
Figur 2.6 Beräknad maxamplitud vid slagning med olika hejare och dynvikter, $Z_p = 70$ kNs/m.

För att överföra stötvågen till pålen så effektivt som möjligt, måste hejarens styrning i förhållande till pålen vara god. Bäst resultat fås när hejaren styrs i gejder jämfört med när den används som 'friryttare'. Kan hejaren dessutom belastas med extra vikt ökar effektiviteten.

Genom att bygga om underdelen på de vanligen använda hejarna så att dynan blir en integrerad del av hejaren, se figur 2.7, kan förlusten av energi vid överföringen av stötkraften till pålen minimeras. Dessutom minskas hejarens längd, vilket är en fördel vid pålning i trånga utrymmen.

Sammanfattning: Viktiga faktorer som påverkar överföring av stötkraft till pålen är

- o Dynans vikt (så låg som möjligt)
- o Hejarens styrning i förhållande till pålen
- o Om hejaren kan belastas med extra vikt.



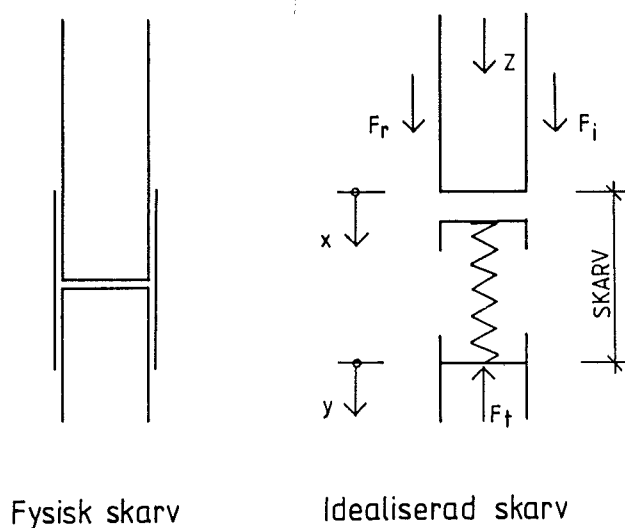
Figur 2.7 Detalj av styrning för dyna.

2.2.3 Skarvförluster

Varje diskontinuitet, som stötvågen passerar på sin väg till pålspetsen, påverkar dess utseende och medför energiförluster. Skarvarna i rörpålarna har avgörande inverkan på den stötvåg som når pålspetsen. Skarven i befintliga rörpålesystem utgörs av en skarvhylsa som styr pålelementen i förhållande till varandra. Skarvhylsan är endera svetsad till det ena pålelementet eller limmad till båda.

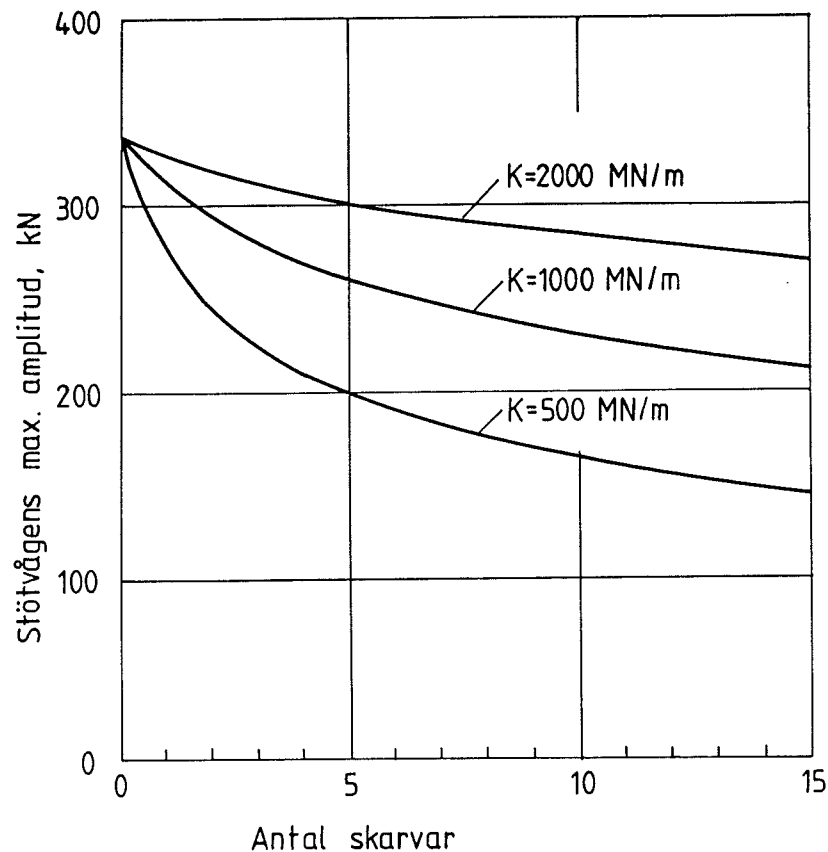
Flera olika teoretiska modeller för skarvens uppförande kan tänkas. En tidigare undersökning av skarvkonstruktionen på stålplastpålen, har visat att man med god noggrannhet kan modellera dämpningen i skarvarna med en fjädermodell enligt figur 2.8 (Stille och Fredriksson, 1982). Undersökningen visade att skarvens dynamiska styvhet varierade mellan 200 och 2000 MN/m.

Avgörande för skarvens egenskaper är hur god anliggning som fås mellan pålsegmentets ändytor. Detta styrs av ändytornas planhet och vinkelräthet mot pålens längdaxel samt den styrning som skarvhylsorna ger.



Figur 2.8 Modell av pålskarv.

Stötvågens maxamplitud och utseende efter passage av ett antal skarvar beror på fördelningen av skarvegenskaperna längs pålen. I figur 2.9 visas beräknade maxamplituder efter passage av ett antal skarvar med samma egenskaper. Det framgår av figuren att de första skarvarna har störst inverkan, därefter har stötvågen omformats så att den passerar skarvarna med mindre förluster som följd. På grund av den statistiska fördelningen av skarvarnas egenskaper borde man för beräkningar kunna använda ett medelvärde av skarvegenskaper och anta att alla skarvar har denna egenskap. De tidigare utförda mätningarna tyder på att medelstyvheten hos skarvkonstruktionen hos stålplastpålen är ca 1000 MN/m.



Figur 2.9 Beräknad maxamplitud efter passage av skarvar.
 $Z_h = 100 \text{ kNs/m}$, $Z_p = 70 \text{ kNs/m}$, $v_0 = 10 \text{ m/s}$.

Från slagningssynpunkt är det bra om skarvkonstruktionen inte kan uppta dragkrafter, eftersom det då bara blir den nedersta skarven som dras isär av dragkraftsreflexen, när spetsmotståndet är lågt. Övriga skarvar kommer då inte att påverkas. Eftersom stötvågens längd är kort vid slagning med höghastighetshejare blir även dragreflexerna korta och förmår inte att öppna skarven mer än att nästa stötvåg kan slå ihop den.

Problem kan uppstå om man först slår en skarvad påle med en tyngre utrustning, som ger längre stötvågor och därmed öppnar skarvarna mer, och därefter övergår till att slå pålen med en lättare utrustning som då inte förmår att slå ihop skarvarna. Liten kraft kommer då att passera den isärdragna skarven och pålen kommer bara att stå och fjädra.

Sammanfattning: Viktiga egenskaper hos skarven från drivnings- och stoppslagningssynpunkt är

- o Ändytornas planhet
- o Ändytornas vinkelräthet mot pålens längdaxel
- o Skarvhylsans styrförmåga (möjlig vinkeländring i skarven)
- o Vidare skall samma utrustning användas för drivning och stoppslagning.

2.3 JORDMODELL FÖR STÖTBELASTNING

2.3.1 Inledning

Deformationsegenskaperna och hållfastheten är i jord, liksom i andra material, beroende av belastningshastigheten. Jordens respons kan därför delas upp i en statisk del och en del som är beroende av deformationshastigheten. Detta synsätt ligger till grund för många modeller som beskriver systemet påle - jord under slagning.

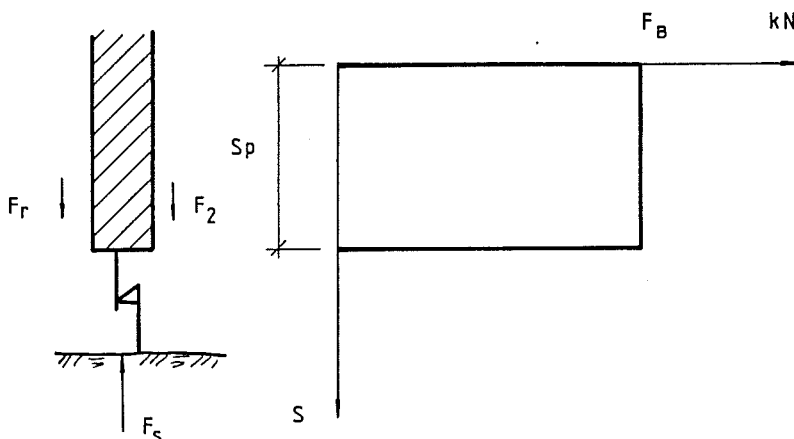
2.3.2 Plastisk modell

Grunden för denna modell är att en kvarstående sjunkning uppkommer vid stoppslagning endast om jordens brottlast överskridits under stötbelastningen. Denna modell för systemet påle - jord kan beskrivas enligt figur 2.10. När belastningen på jorden uppgår till F_B fås permanent sjunkning utan lastökning. För stålpålar kan samband mellan initialvåg, F_i , pålspetsens brottlast, F_B , och den permanenta nedträngningen, S_p , beräknas, se t ex Bygg G13:37. För idealplastisk spetsrespons, modell enligt figur 2.2 och rektangulär initialvåg erhålls sambandet:

$$F_B = 2 \cdot F_i \cdot \frac{S_p}{f \cdot t_0} \cdot Z_p \quad (2.2)$$

där f är slagfrekvensen, t_0 initialvågens varaktighet och Z_p är pålens akustiska impedans ($E \cdot A / C$). Denna modell ger ett största värde på spetsbärigheten som är lika med $2 \cdot F_i$ vid noll-sjunkning.

Denna modell är lämplig för tunga fallhejare där jordens elastiska respons har liten inverkan på den permanenta sjunkningen. Denna modell ligger till grund för stoppslagning villkor för stödpålar av betong i pålningsklasserna B och C enligt SBN 1975:8.



Figur 2.10 Plastisk pålspets - jord modell.

2.3.3 Elasto-plastisk modell

En vanlig modell är där jordens respons modelleras med en fjäder, en dämpare och en friktionskoppling enligt figur 2.11. För denna modell kan jämviktsekvationen för spetsen tecknas

$$F_s = k \cdot y + c \cdot \dot{y} = F_i + Z_p \cdot (\dot{x} - \dot{y}) \quad \text{när } k \cdot y < F_B \quad (2.3)$$

och

$$F_s = F_B + c \cdot \dot{y} = F_i + Z_p \cdot (\dot{x} - \dot{y}) \quad \text{när } k \cdot y > F_B \quad (2.4)$$

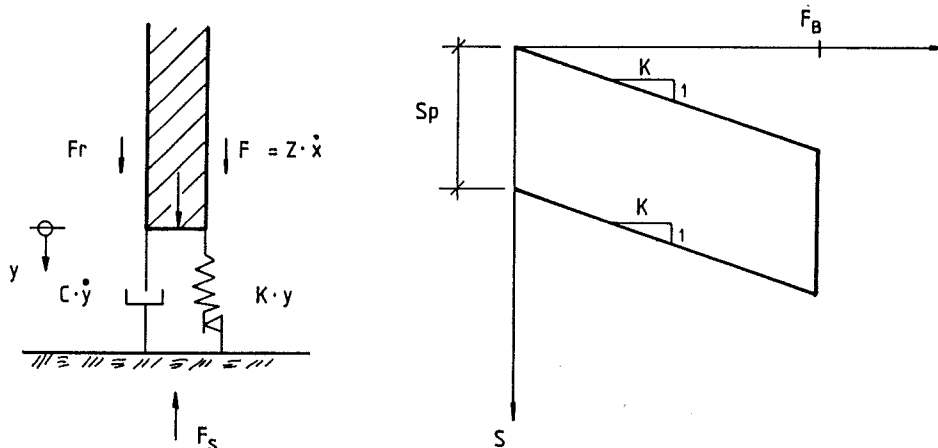
För ett känt utseende på initialvågen, F_i , kan spetsens rörelse och därmed den kvarstående nedträngningen, S_p , beräknas. Fjäderkonstanten, k , och dämparvärdet, c , kan för ett cirkulärt fundament inbäddat i ett elastiskt medium beräknas enligt Lysmer och Rickard till

$$k = 11.4 \cdot r_0 \cdot v_s^2 \quad (2.5)$$

$$c = 0.85 \cdot \frac{k \cdot r_0}{v_s} \quad (2.6)$$

där r_0 är den belastade areans radie, v_s är skjuvvågs-hastigheten i mediet och dess densitet. Denna modell ger också ett maxvärde på spetsbärigheten som vid nollsjunkning kan bli lika med $2 \cdot F_i$ om stötvågen har tillräcklig varaktighet.

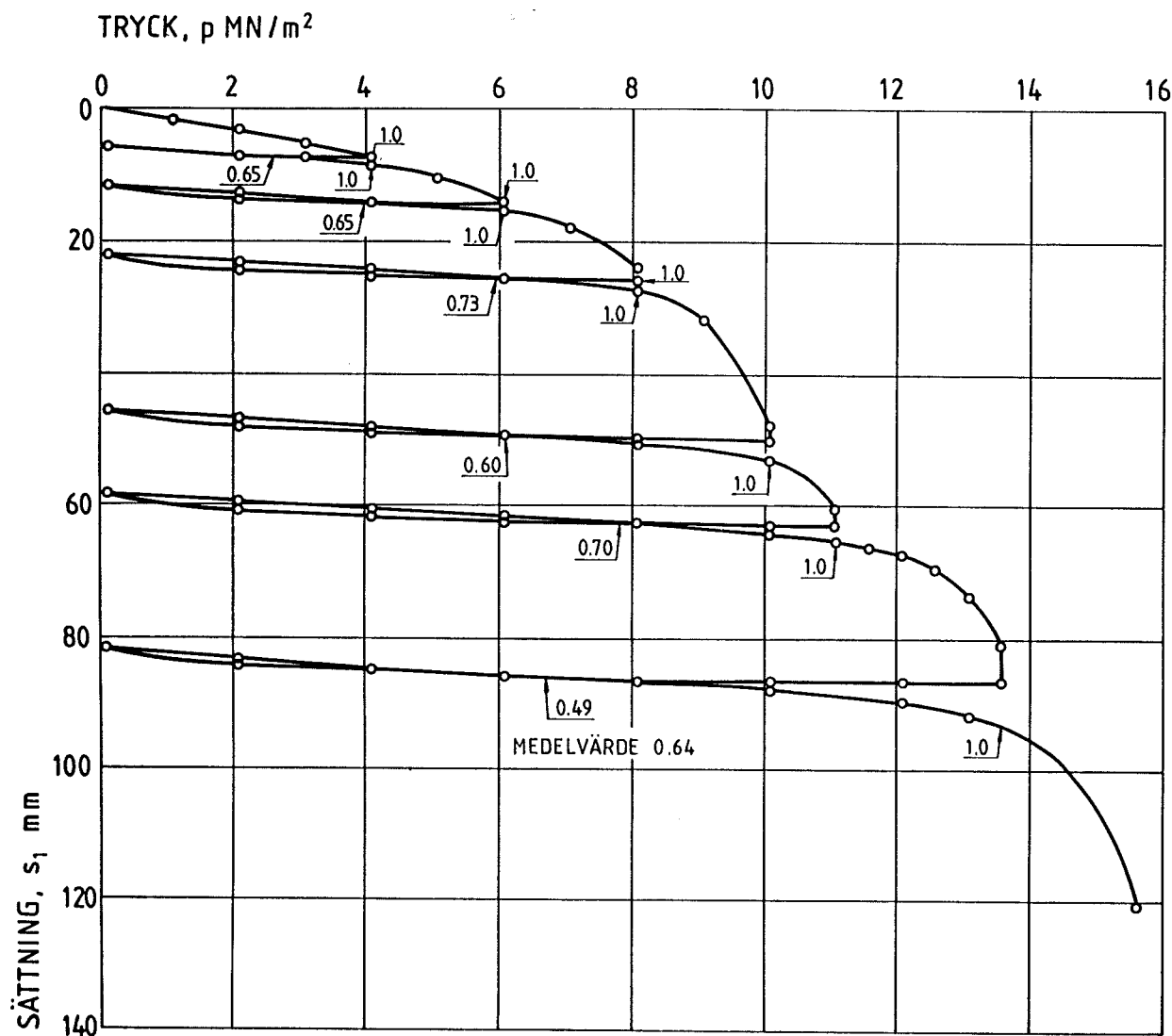
Detta slags modeller används i flera datorprogram för simulering av påslagning, program typ CAPWAP. Modellerna används för att tolka stötvågsmätningar utförda med tyngre fallhejare och tar hänsyn både till jordens elasto-plastiska och hastighetsberoende respons.



Figur 2.11 Elasto-plastisk påspets - jord modell.

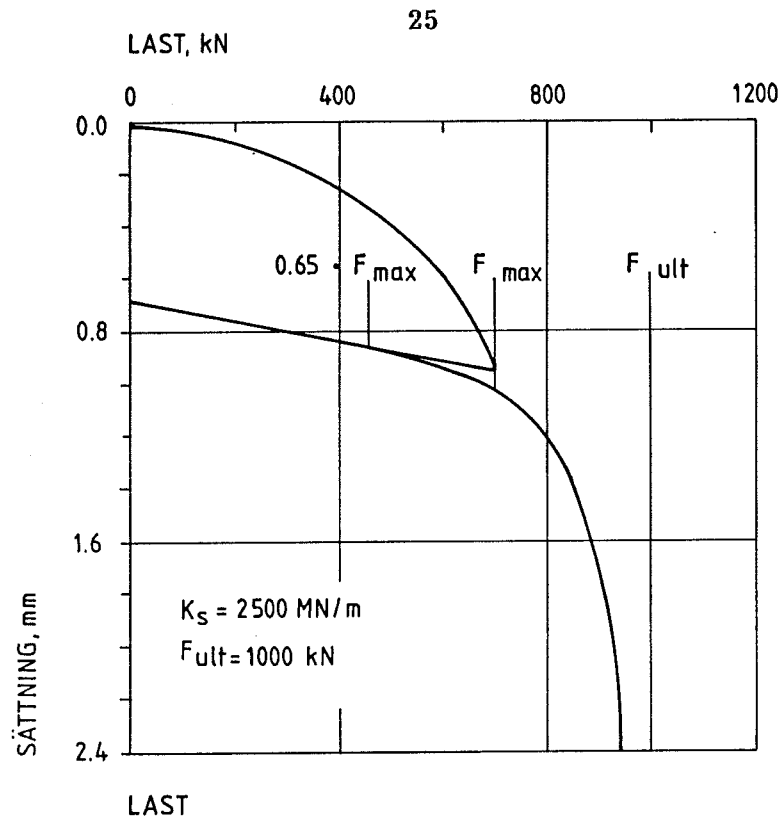
2.3.4 Icke linjär modell

Vid cyklisk statisk belastning av en pålspets uppstår kvarstående sjunkning även vid lastnivåer som understiger brottlasten, se figur 2.12 (Eresund 1972). Återbelastningskurvan är i stort linjär upp till en nivå lika med 60 procent av den tidigare belastade nivån.



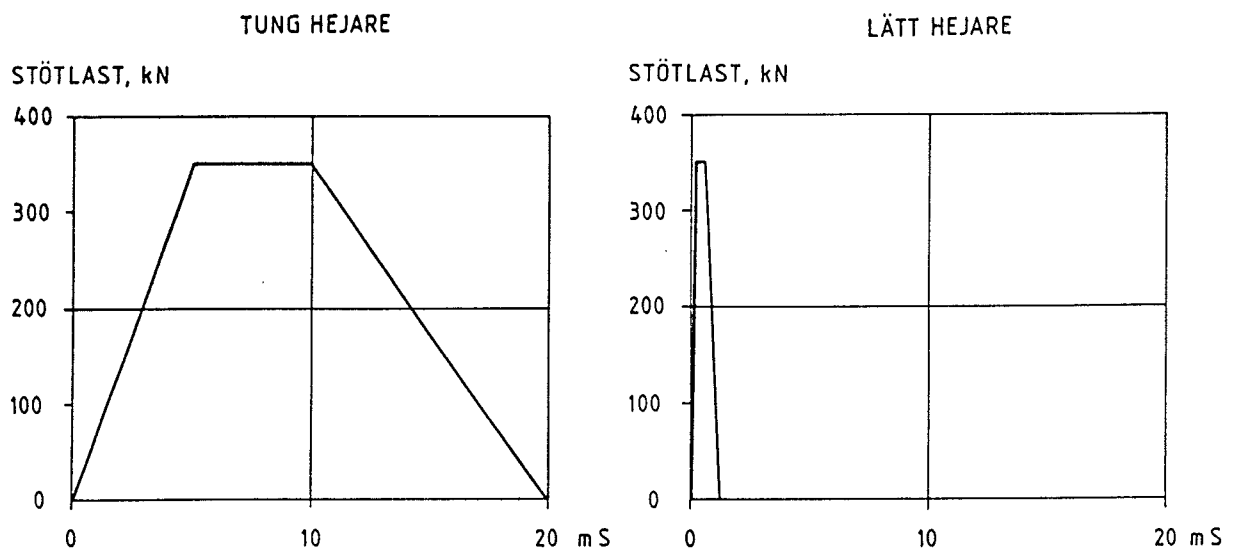
Figur 2.12 Last-deformationskurvor vid cyklisk belastning.

En mer realistisk modell för pålspetsens statiska respons är en last-deformationskurva enligt figur 2.13. Kurvan är sammansatt av en linjär del och en icke-linjär hyperbolisk del. Vid avlastning uppför sig jorden elastiskt. På samma sätt som för den elasto-plastiska modellen kan spetsens rörelse beräknas för ett känt utseende på initialvägen, F_i , med hjälp av differensräkning.



Figur 2.13 Ickelinjär spets - jord modell.

För två olika typer av stötblastningar på ett cirkulärt fundament, en från en lätt hejare och en från en tung hejare, se figur 2.14, har beräkningar utförts med den spetsmodell som visas i figur 2.13. Brottlasten, F_B , har varierats från 350 kN till 2 100 kN medan initialstyvheten har hållits konstant lika med 2500 MN/m. Dämparvärdet c , vid en viss tidpunkt, har beräknats ur last-deformationskurvans tangent vid den aktuella lastnivån enligt ekvation 2.6.

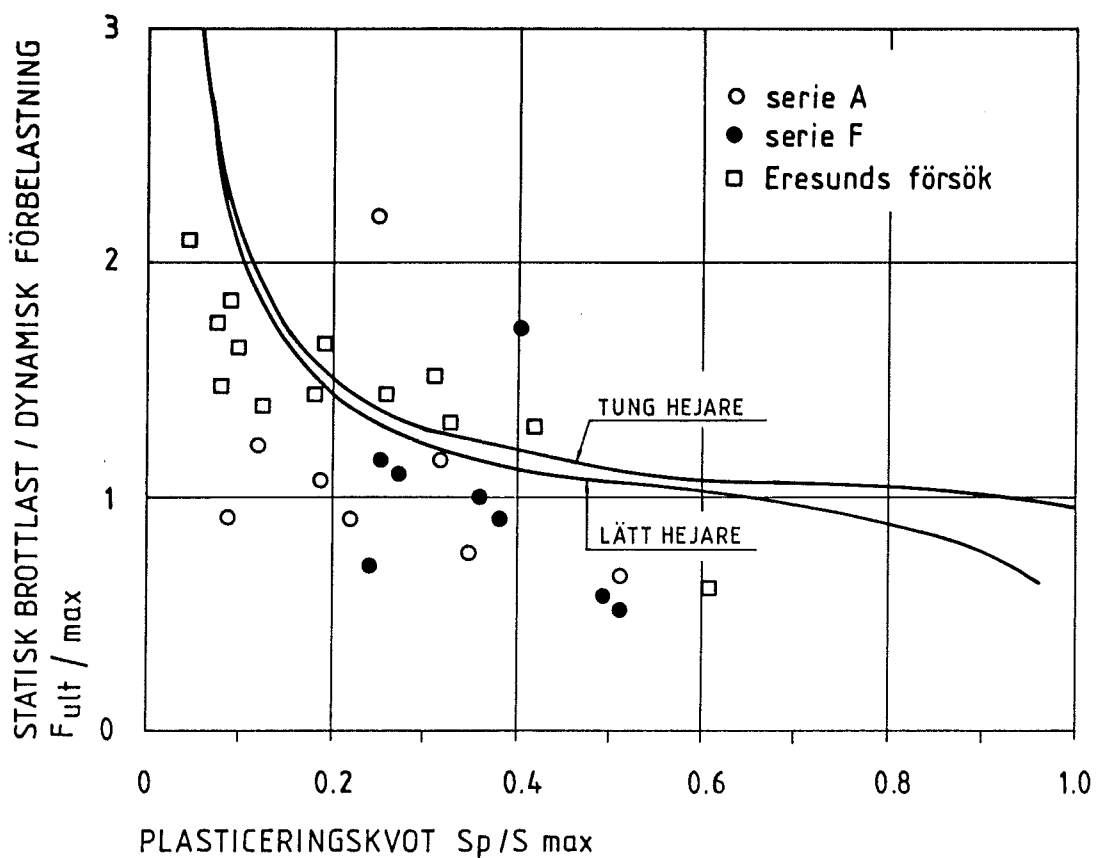


Figur 2.14 Stötblastningens utseende från tung respektive lätt hejare.

I figur 2.15 jämförs dessa beräkningar med data från försök med dynamisk förbelastning (Berggren 1981). Beräkningarna visar samma trend som försöksdata. Skillnaden mellan beräkningar för de olika långa stötvågorna är liten. Detta tyder på att det finns ett unikt samband mellan plasticeringskvot, $S_p/S_{\max}$, och kvoten $F_B/F_{\max}$ för jordar med samma initialstyvhet.

Den presenterade modellen skiljer sig från övriga modeller ovan genom att den beaktar den kvarstående sjunkningen även för lastnivåer som inte överskrider den statiska bärigheten.

Vid slagning med höghastighetshejare utsätts pålspetsen för 800 - 1000 på- och avlastningar per minut. Storleken av den permanenta sjunkning som sker under varje på- och avlastning är ett mått på hur långt från den statiska brottlaster som den aktuella belastningsnivån ligger.



Figur 2.15 Jämförelse mellan teoretiska beräkningar och försöksdata (Berggren 1981).

2.3.5 Jämförelse mellan teori och praktik

Stötvågsmätningar vid jämförande slagning mellan lätta snabb-släående hejare och slagning med fallhejare finns dokumenterade för tre olika platser, se sammanställning tabell 1. Därutöver har bärighetsverifikation av produktionspålar utförts i många projekt med hjälp av dynamisk provbelastning med tung frifalls-hejare och utvärdering enligt CASE-metoden. Resultaten från dessa provningar motsäger ej dem, som redovisas i tabell 2.1 nedan.

Den mobiliserade statiska spetslasten, R_S , vid slagning med fallhejare har utvärderats enligt CASE-metoden. Den verkliga statiska bärigheten är troligen mycket större eftersom den permanenta sjunkningen per slag vid slagning med fallhejarna är noll eller mycket liten. I tabellen framgår att förhållandet mellan den mobiliserade statiska spetslasten, R_S , och den uppmätta dynamiska spetslasten, R , vid stoppslagning med de snabbslående hejarna varierar mellan 1.5 och 3.5.

De snabbslående hejarna förmår alltså att stoppslå pålarna till en statisk spetsbärförmåga som är upp till 2 à 3 gånger större än den dynamiska spetslast som uppkommer vid själva stoppslagningen. Hur kan detta vara möjligt?

Tabell 2.1 Jämförelse mellan statisk spetsbärighet R_S och dynamisk spetsbärighet R , vid slagning med lätt snabbslående respektive tung fallhejare.

Kv Fröja, Uppsala: Bjurströmspåle ϕ 88.9 x 5.1 mm

Krupp 110 kolvvikt 12 kg	$R = 328 \text{ kN}$	12 mm/min
	$R = 338 \text{ kN}$	4 mm/min
Fallhejare 275 kg	$R_S = 504 \text{ kN}$	0 mm/slag
Fallhöjd 2.0 m	$R_S/R = 1.5$	

Kv Vett & Vapen, Norrköping: Besabpåle ϕ 76.1 x 4.0 mm

TEP 100 kolvvikt 12.6 kg	$R = 127-158 \text{ kN}$	5 mm/min
Fallhejare 278 kg	$R_S = 427-445 \text{ kN}$	0 mm/slag
Fallhöjd 2.0 m	$R_S/R = 2.7-3.5$	

Järva Krog, Stockholm: Stålpåle ϕ 101.6 x 5.6 mm

TEX 200 kolvvikt 12.1 kg	$R = 258-300 \text{ kN}$	5 mm/min
Fallhejare 275 kg	$R_S = 607-630 \text{ kN}$	1.3 mm/slag
Fallhöjd 2.0 m	$R_S/R = 2.0-2.4$	

Erfarenhet från provbelastningar till brott med varierande belastningshastighet visar att jordens bärförmåga ökar med ökande belastningshastighet. Förhållandet mellan statisk bärighet och dynamisk bärighet är alltså mindre än 1.0. Utvärdering av den statiska bärförmågan enligt CASE-metoden bygger på detta antagande. Den dynamiska spetskraften som erhålls vid stötvågsmätningen reduceras enligt ekvation 2.7 för att ge den statiska bärförmågan

$$R_s = R - J_c \cdot Z \cdot \dot{y} \quad (2.7)$$

där J_c är dämpfaktorn, $\dot{y}$ pålspetsens hastighet och Z pålens dynamiska impedans. För att den statiska bärförmågan som erhålls enligt ekvation 2.7, skall vara lika med den verkliga statiska bärförmågan, fordras att det verkligen sker brott vid pålspetsen under den dynamiska belastningen. Detta är i överensstämmelse med den elasto-plastiska modellen enligt 2.3.3. Ett mått på om det sker brott eller inte är storleken på den kvarstående sjunkningen efter den dynamiska belastningen. Vid liten kvarstående sjunkning har ej brott skett, och den verkliga statiska bärförmågan är större än vad ekvation 2.7 anger.

Erfarenheter från försök med dynamisk förbelastning (Berggren 1981), figur 2.15, visar att den statiska bärigheten både kan vara större eller mindre än den dynamiska belastning, som jorden utsatts för, beroende på förhållandet mellan kvarstående och maximal deformation, S_p/S_{max} vid det dynamiska belastningsförsöket. Den icke linjära modellen enligt avsnitt 2.3.4 ger denna respons.

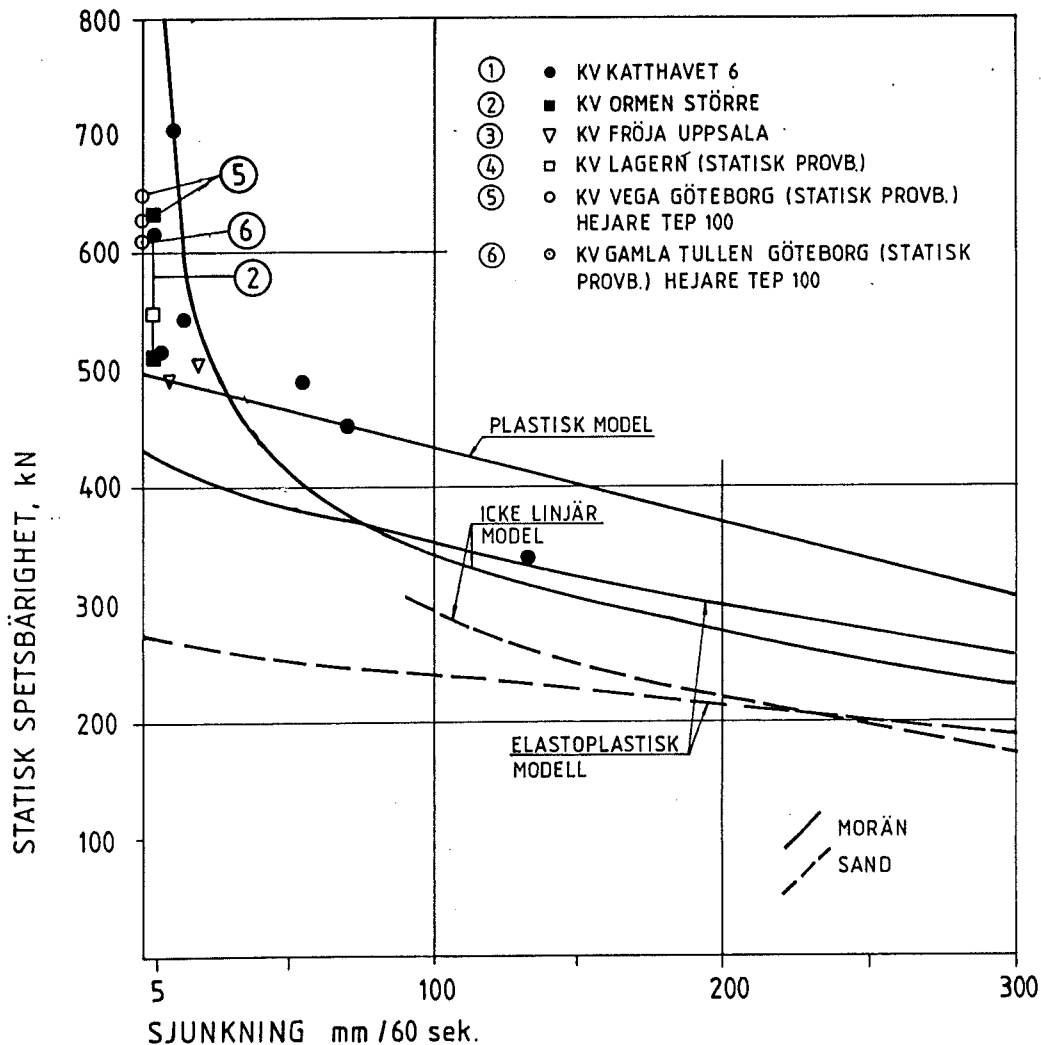
Den sjunkning som vi mäter upp vid stoppslagning med de snabbslående hejarna beror inte på plastiska deformationer på grund av att vi överskridit den dynamiska brottlaster. Den härrör i stället från den kvarstående deformation vi även får vid upprepade av- och pålastning vid lastnivåer som väsentligt understiger brottlaster. Ju mindre sjunkningen är dess högre är den statiska brottlaster i förhållande till den dynamiska last, som belastat pålspetsen under stoppslagningen.

För tre påltyper, Stålplastpåle ϕ 101.6 x 5.6 mm, Stålplastpåle ϕ 76.1 x 4.0 mm och Bjurströmspåle ϕ 88.9 x 5.1 mm finns det dokumenterande bestämmningar av den statiska spetsbärigheten för pålar som slagits till varierande sjunkning per minut. Bärigheten har bestämts med statisk provbelastning eller dynamisk provbelastning med tung hejare (275-350 kg) och Case-utvärdering.

De utförda mätningarna tyder på att vid sjunkningar som understiger 100 - 150 mm/min så har vi en statisk brottlaster som överstiger den dynamiska belastning som belastat pålspetsen vid slagningen med de lätta hejarna.

I figur 2.16 visas uppmätta förhållanden mellan sjunkning och statisk spetsbärighet för Bjurströmspåle ϕ 88.9. Pålarna är i huvudsak slagna med hydraulhejaren Krupp 110.

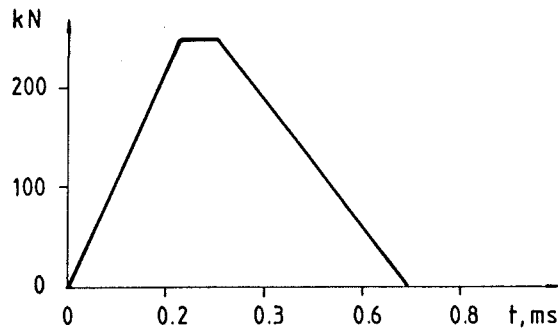
BJURSTRÖMS PÅLE $\phi 88.9 \times 5.1$ mm
HEJARE KRUPP 110 350 slag/min.



Figur 2.16 Samband mellan statisk bärighet och sjunkning per minut för Bjurströmspåle $\phi 88.9 \times 5.1$ mm.

I figuren redovisas också teoretiskt beräknade samband mellan statisk spetsbärighet och sjunkning per minut med de tre ovan genomgångna modellerna. Beräkningarna redovisas för två jordar med olika initialstyvhet, dels morän, $k = 250\,000$ kN/m ($v_s = 500$ m/s), dels sand, $k = 40\,000$ kN/m ($v_s = 200$ m/s). Den statistiska spetsbärigheten för sanden har antagits variera i intervallet 30 - 300 kN och för moränen i intervallet 100 - 800 kN. Dessa värden svarar mot de spetstryck man kan uppmäta i dessa jordar vid trycksondering.

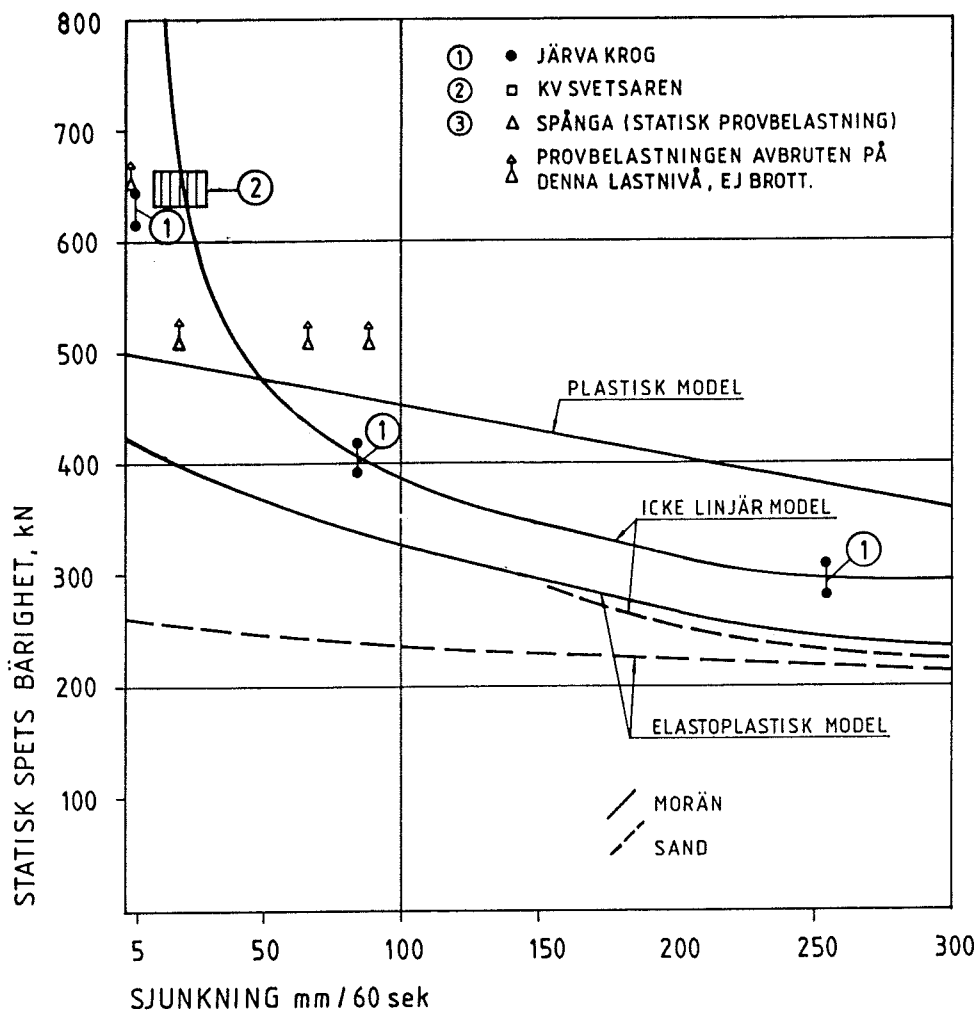
Stötvågens maxamplitud har ansatts till 250 kN och dess utseende enligt figur 2.17. Det visade utseendet gäller när stötvågen har passerat ett antal skarvar och når pålspetsen.



Figur 2.17 Stötvåg från Krupp 110 vid pålspets.

I figur 2.18 redovisas motsvarande uppmätta och beräknade samband för Stålplastpåle ϕ 101.6 5.6 mm. Pålarna är stopplagna med hydraulhejaren TEX 200, som ger en stötvåg med ungefär samma utseende som den i figur 2.17.

HEJARE TEX 200 750 SLAG/MINUT

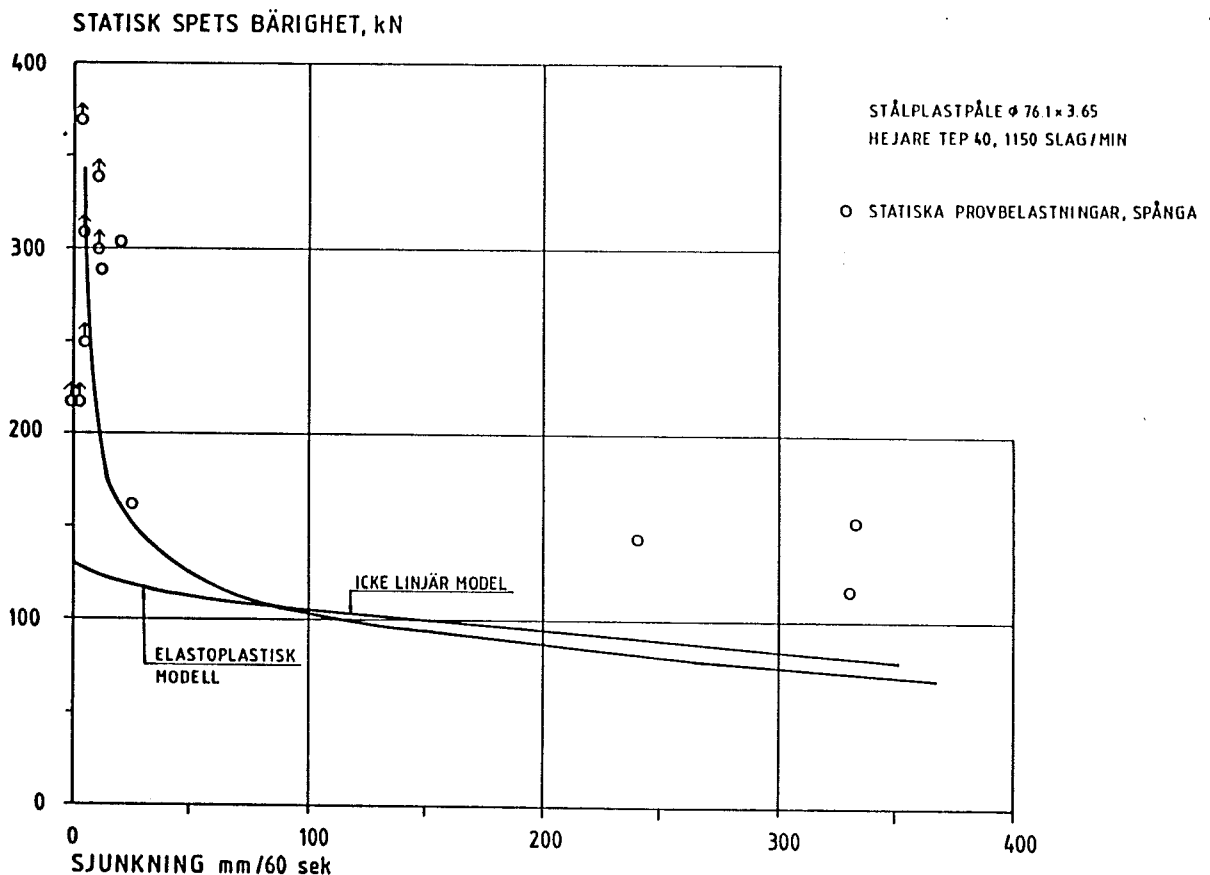


Figur 2.18 Samband mellan statisk bärighet och sjunkning per minut för Stålplastpåle ϕ 101.6 * 5.6 mm.

I figur 2.19 redovisas motsvarande beräkningar för Stålplastpåle $\phi 76.1 \times 4.0$ mm.

Det framgår av figur 2.16 och figur 2.18 att bärförmågan beräknad enligt den plastiska modellen överskattas vid stora sjunkningar och underskattas vid små. Den elasto-plastiska modellen ger realistiska värden vid stora sjunkningar men underskattar bärigheten vid små sjunkningar. Den icke linjära modellen ger ett realistiskt samband över hela sjunkningsregistret 0 - 300 mm/60 sek. Denna modell ger en drastisk ökning av bärigheten för en sjunkning som understiger 50 mm/60 sek. Detta stämmer med erfarenheterna från statistiska provbelastningar och jämförande slagning med lätta hejare och tyngre fallhejare.

Ovanstående beräkningar är giltiga under förutsättning att stötvågen har en maxamplitud av 250 kN när den når pålspetsen för Bjurströmspåle 88.9×5.1 och Stålplastpåle 101.6×5.6 respektive 120 kN för Stålplastpåle 76.1×4.0 . Vid slagning i jordprofiler där stötvågen kan dämpas mycket längs pålen gäller inte ovanstående beräkningar.



Figur 2.19 Samband mellan statisk bärighet och sjunkning per minut för Stålplastpåle $\phi 76,1 \times 3.65$ mm.

Sammanfattning:

- o Vid bedömning av den statiska spetsbärighet, som en rörpåle får vid stoppslagning med en höghastighetshejare, måste man ta hänsyn till att den sjunkning som uppmäts härrör från små kvarstående sjunkningstillskott vid varje på- och avlastningscykel.
- o Vid låga sjunkningar per minut är den statiska bärigheten större än den dynamiska belastning, som pålspetsen utsatts för under stoppslagningen.
- o Sjunkningskriterier för bestämning av bärförmågan vid slagning med en viss hejare kan bara ställas upp för slagning i jordprofiler där omgivande jord inte dämpar stötvågen under stoppslagningen.

2.4 VAL AV STOPPSLAGNINGSKRITERIER

2.4.1 Generella stoppslagningskriterier

Det är svårt om inte omöjligt att bestämma ett sjunkningskriterium vid stoppslagning med höghastighetshejare som garanterat ger en bestämd bärighet i **alla** förekommande typer av jordprofiler. Avgränsas emellertid giltigheten till vissa typer av jordprofiler kan generella stoppslagningskriterier bestämmas. En sådan avgränsning kan vara följande profiltyper:

- o Lera, som övergår i morän eller fast lagrad friktionsjord på berg, pålen kan vara slagen eller borrad genom fyllning.
- o Löst lagrad friktionsjord, som relativt distinkt övergår i fast morän.

Det bör särskilt uppmärksammas att vid användning av pålsystemen med generella stoppslagningskriterier är det ett absolut krav att jordprofilen och typ av material vid pålspetsen på arbetsplatsen är känd samt - givetvis - att den överensstämmer med endera av de ovan angivna. I alla andra fall måste ett stoppslagningskriterium bestämmas på plats genom provbelastning av provpålar, se avsnitt 2.4.2.

De ovan angivna profilerna täcker huvudparten av rörpålarnas användningsområde i Sverige. Erfarenheterna visar att hittills använda stoppkriterier med något enstaka undantag ej lett till bärighetsbrott. Problem skulle teoretiskt kunna uppstå vid slagning genom mäktiga friktionsjordlager, men har alltså ej noterats. Däremot kräver stoppslagning i "fjädrande" jordar (såsom siltig morän, moränlera) eller finkorniga jordarter (falskt pålstopp) särskild uppmärksamhet och stoppkriteriet bör i sådana fall alltid baseras på särskild utredning. I dessa fall torde därtill lätta höghastighetshejare vara mindre lämpliga för stoppslagning till hög dimensionerande bärförmåga.

Tillvägagångssättet för bestämning av generella stoppslagningskriterier bör vara följande:

- o Provnings utförs på en plats med den aktuella profiltypen.
- o Vid stoppslagning med aktuell hejare och påle utförs stötvågmätning och hejarens kondition kontrolleras, se avsnitt 2.2.1.
- o Stoppslagningskriteriet väljs så att den dynamiska spetsbelastningen under stoppslagningen blir minst lika stor som den önskade statiska bärigheten. (Den dynamiska spetsbelastningen bestäms ur stötvågmätningar).
- o Ett antal pålar, ca 5 st, slås till en sjunkning, som är dubbelt så stor som det avsedda stoppkriteriet och den statiska bärförmågan, R_S , bestäms genom statisk provbelastning eller dynamisk provbelastning, se 2.4.2.

Den dimensionerande bärförmågan beräknas enligt

$$R_D = \frac{0.6 \cdot R_S}{\gamma_n} \quad (2.7)$$

där γ_n är beroende av säkerhetsklass och sätts till 1.2, 1.1 eller 1.0 enligt Nybyggnadsregler BFS 1988:18.

R_S kan högst uppgå till

$$R_S = f_{yk} \cdot A \quad (2.8)$$

där f_{yk} är stålets hållfasthetsvärde (karakteristiskt värde) och A är pålens tvärsnittsarea.

2.4.2 Bestämning av statisk bärighet med dynamisk provbelastning.

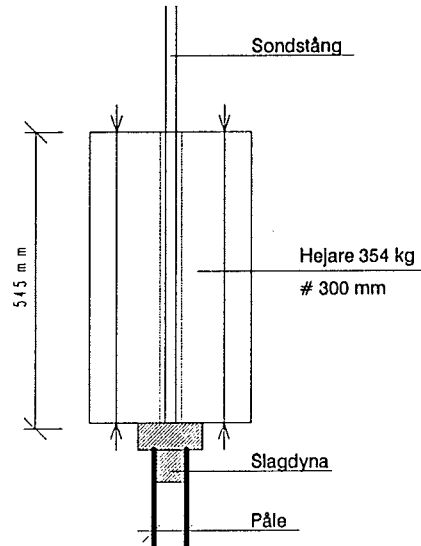
Ett alternativ till att bestämma den statiska bärförmågan genom statisk provbelastning är att utföra en dynamisk provbelastning med en fallhejare och utvärdera den statiska bärigheten med CASE - metoden, se även avsnitt 2.3.5 och Bygg kapitel G13:37. Förfarandet kan användas för att bestämma sjunkningskriterier vid stoppslagning med höghastighetshejare, se avsnitt 2.4.1.

Den fallhejare som skall användas måste vara tillräckligt tung för att kunna mobilisera spetsbärigheten. Lämplig vikt är 200 - 400 kg eller 10 - 20 ggr pålens vikt per meter.

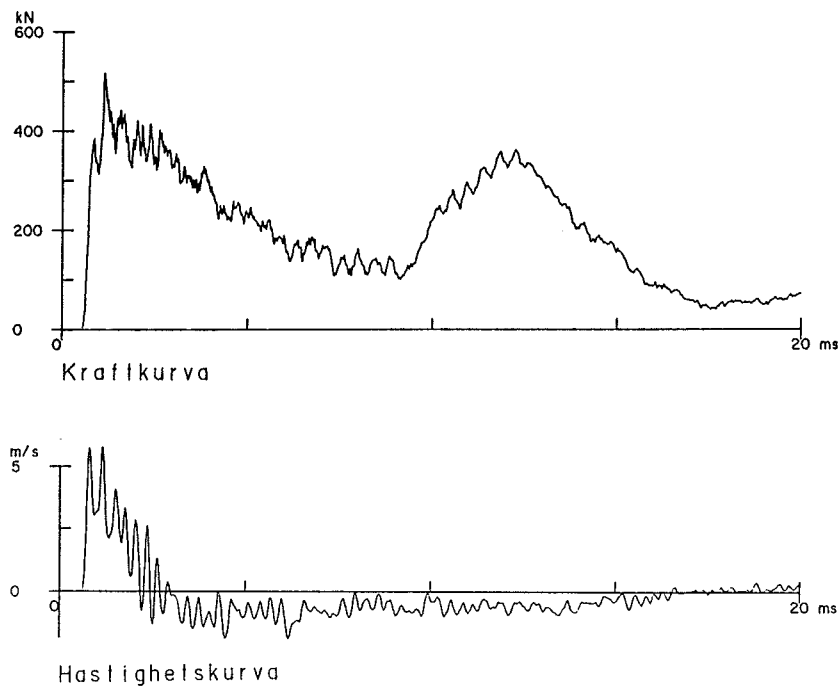
Den tillgängliga fallhöjden måste vara i storleksordningen 1.5 - 2.5 m beroende på påltyp och jordförhållanden.

I figur 2.20 visas en schematisk bild på en fallhejare som använts vid dynamisk provbelastning även i trånga utrymmen.

I figur 2.21 visas resultatet från en dynamisk provbelastning av en Stålpåle $\phi 101.6 \times 5.6$ slagen i friktionsjord. Pålen är slagen och stoppslagen med höghastighetshejare TEX 250. Pålens längd är 32 m. Den dynamiska provbelastningen har utförts med en frifallshejare vars vikt är 370 kg och med en fallhöjd av 2.0 m.

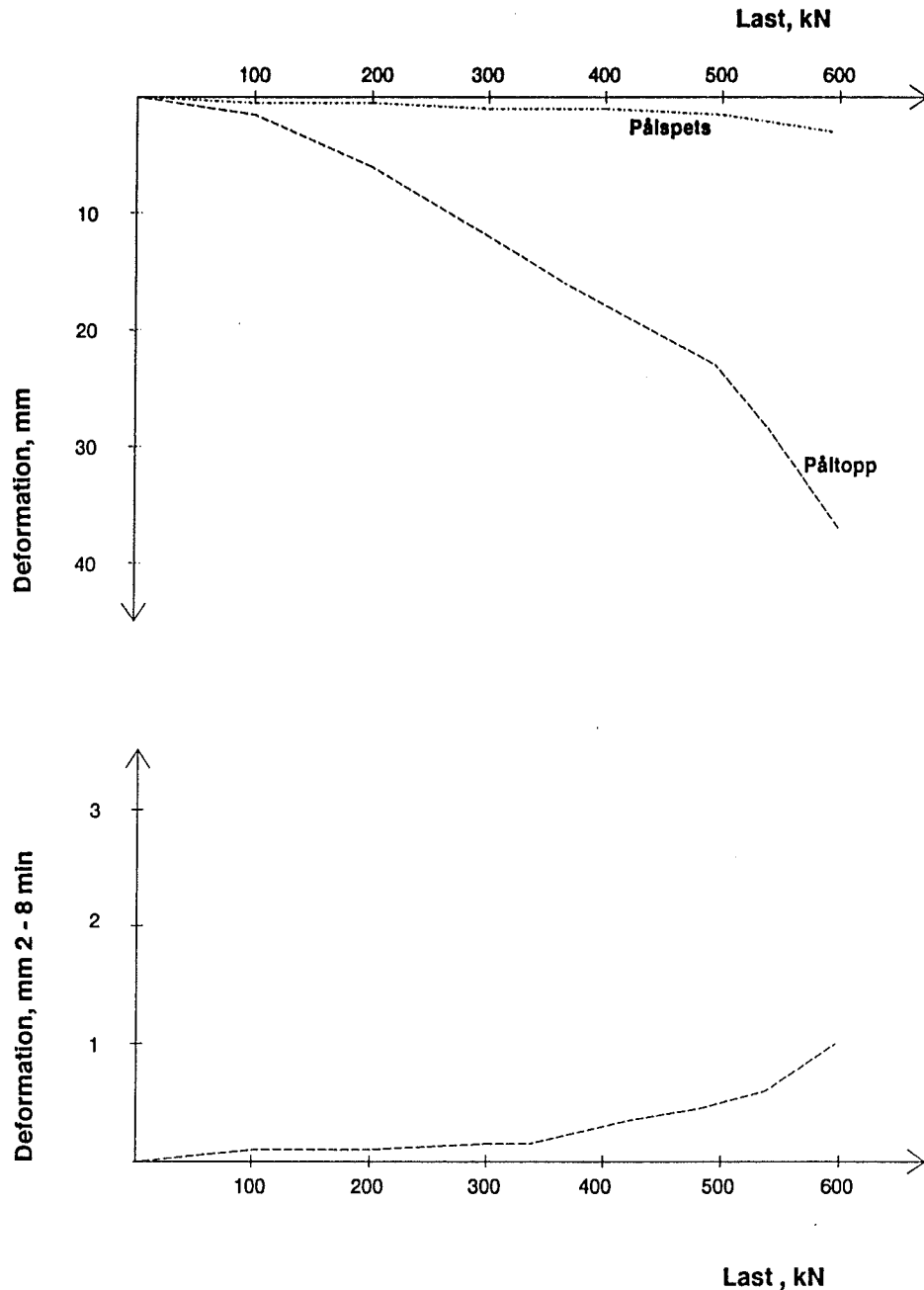


Figur 2.20 Fallhejare för dynamisk provbelastning.



Figur 2.21 Resultat av kraft- och hastighetsmätning vid dynamisk provbelastning.

I figur 2.22 visas som ett exempel resultatet av en statisk provbelastning som utförts på samma påle som testats genom dynamisk provbelastning. Provb belastningen avbröts vid en last på 600 kN därför att pålen skulle användas i konstruktionen. Det framgår att den statiska bärigheten är minst lika stor som den dynamiska provbelastningen visade.



Figur 2.22 Resultat av statisk provbelastning.

3 BÄRIGHET HOS PÅLSKAFT MED HÄNSYN TILL OMGIVANDE JORD OCH PÅLMATERIAL

3.1 INLEDNING

Vid typgodkännande av befintliga rörpålar har tillåten last bestämts med hänsyn till stålqualitet och stoppslagingsregler.

Med hänsyn till stålqualitet har tillåten last satts till

$$P_{till} = \sigma_{till} \cdot A \quad (3.01)$$

där σ_{till} ligger i intervallet

$$100 \text{ MPa} \leq \sigma_{till} \leq 180 \text{ MPa}$$

Tillåten spänning har satts till högst halva sträckgränsen för stålet i pålen.

Risken för knäckning har för rörpålar beaktats genom att tillåten last begränsats till

$$P_{till} = \sqrt{E \cdot I \cdot 20 \cdot \tau_{fu}} \quad (3.02)$$

där $E \cdot I$ är pålens böjstyvhet.

Ett krav har varit att varje påle efter stoppslagning skall kontrolleras vad avser rakhet. Acceperade gränser har varit större krökningsradie än 150 m och mindre skarvvinkeländring än 1:150.

Formeln 3.02 har kalibrerats mot provbelastningar. Vid tolkning av utförda provbelastningar på rörpålar är det svårt att avgöra om knäckning eller ren stukning av pålen har skett eftersom knäcklasten för korttidslast även i lösa leror är av samma storleksordning som stuklasten. Försök på modellpålar, (Bergfelt, 1963), visar god överensstämmelse mellan uppmätta knäcklasten och dubbla lasten enligt formel 3.02.

Fullskaleförsök med provbelastning av slagna pålar visar en märkbar höjning av brottlasten för pålar, som fyllts med betong eller cementbruk, jämfört med ofyllda. Förklaringar är t ex betongens förmåga att uppta axiell last, dess bidrag till (den sammansatta) sektionens böjmotstånd och att den försvårar lokal buckling av röret. Fastän beräkningsmodellerna ej tar hänsyn till de positiva effekterna av betongfyllning, förutsätts att systempålar fylls med betong/cementbruk före användning i byggnadsverk.

I det följande behandlas de faktorer som inverkar på pålens bärförmåga med hänsyn till omgivande jord samt presenteras en beräkningsmetod för bärigheten.

3.2 FÖRSLAG TILL BERÄKNINGSMETOD

3.2.1 Inledning

En beräkningsmetod för pålars bärighet med hänsyn tagen till knäckning eller böjbrott i lös lera bör innefatta följande faktorer

- o den omgivande lerans deformationsegenskaper
- o den omgivande lerans brottlast för horisontalbelastning
- o pålens initialkrokighet efter stoppslagning
- o pålmaterialets sträckgräns
- o egenspanningar i pålelementen.

I de följande avsnitten härleds en enkel handberäkningsmetod, där ovanstående faktorer beaktas.

En förutsättning för beräkningsmetoden är att pålens initialkrokighet inte ger upphov till något initieellt böjmoment i den obelastade pålen. Detta antagande kan för pålar i lös lera motiveras på grund av följande:

- o Initialkrokigheten uppkommer i huvudsak genom vinkeländring i skarvar under slagningen och ej genom ren böjning av pålen. Till detta kommer ursprungselementens initialkrokighet. Avståndet mellan skarvarna i en rörpåle är vanligtvis endast ca 1.0 - 2.0 m. Det finns alltså 1 à 2 skarvar på den kritiska knäcklängden.
- o Under slagning genom leran sker en omrörning av denna runt pålen varför endast obetydliga horisontalkrafter kan byggas upp mellan pålen och leran. Efter slagningen rekonsoliderar leran runt pålen och återtar sin ursprungliga hållfasthet.

3.2.2 Pålens bärighet med hänsyn till omgivande jord

Beräkning av teoretisk bärighet för en tryckt initieellt rak sträva omgiven av ett elastiskt medium kan göras enligt den kända formeln

$$P = 2 \cdot \sqrt{E \cdot I \cdot k} \quad (3.1)$$

där $E \cdot I$ = strävans böjstyvhetsmoment och k är bäddmodulen för pålen i det omgivande mediet. Förutsättningen för ekvation 3.1 är att såväl strävan som det omgivande mediet är elastiskt.

För en initieellt krokig sträva kan sambandet mellan utböjning och last tecknas (Bernander och Svensk, 1970)

$$P = 2 \cdot \sqrt{E \cdot I \cdot k} \cdot \frac{1}{1 + \delta_0/Y_0} \quad (3.2)$$

Förutsättningen är att strävan har en sinusformad initial-utböjning med maxvärdet δ_0 och att tillskottsutböjningen vid lasten P är sinusformad med maxvärdet Y_0 .

När y växer närmar sig ekvation 3.2 den teoretiska knäcklasten enligt 3.1.

En viktig begränsning är att det omgivande mediet är elastiskt.

För att ta hänsyn till en realistisk arbetskurva för det omgivande mediet, enligt figur 3.1, kan man införa en sekantmodul k_s i ekvation 3.2. Denna sekantmodul minskar ju större del av det omgivande mediet längs pålen som plasticeras, se figur 3.2.

Ett sätt att bestämma sekantmodulen k_s vid en viss utböjning Y_0 , är att välja k_s så att det totala motståndet mot strävan från det omgivande mediet blir detsamma som om den verkliga arbetskurvan enligt figur 3.1 användes, d v s

$$\int_0^{x_B} q_B \cdot dx + \int_{x_B}^{1/2} k \cdot Y_0 \cdot \cos(\pi \cdot x/l) \cdot dx =$$

$$= \int_0^{1/2} k_s \cdot Y_0 \cdot \cos(\pi \cdot x/l) \cdot dx$$

$$x_B = 0 \text{ om } Y_0 < Y_B$$

eller

$$x_B = 1/\pi \cdot \arccos(Y_B/Y_0) \text{ om } Y_0 > Y_B$$

Efter lösningen erhålls

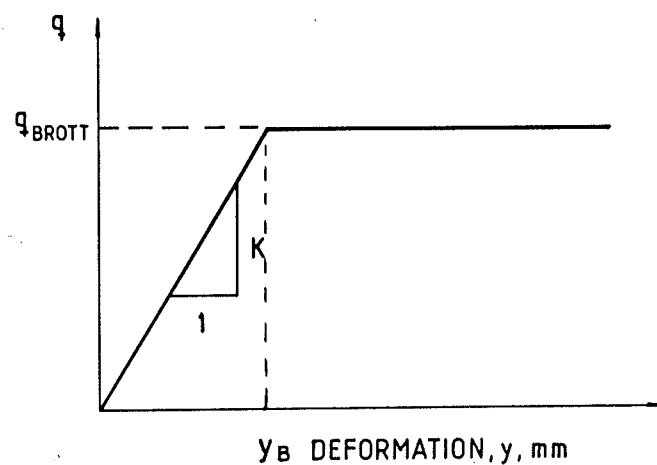
$$k_s = k \cdot \Phi(Y_0)$$

$$\text{där } \Phi(y_0) = \frac{q_B \cdot x_B \cdot \pi}{1 \cdot y_0 \cdot k} + 1 - \sin(\pi \cdot x_B / l) \quad (3.3)$$

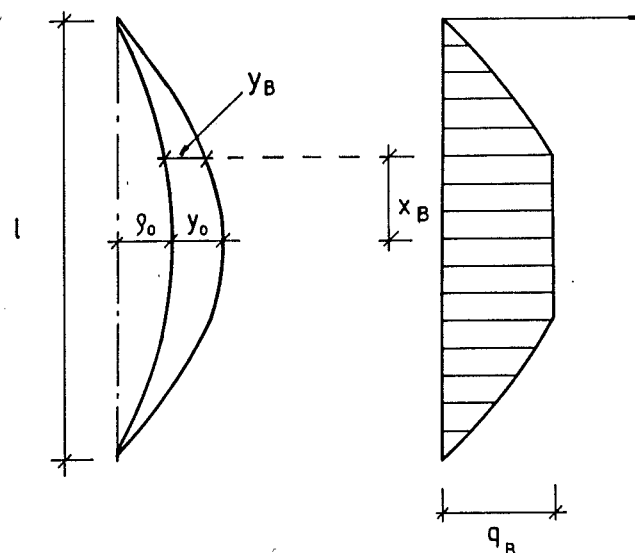
Insättning av 3.3 i ekvation 3.2 ger

$$P = 2 \cdot \sqrt{E \cdot I \cdot k \cdot \Phi(y_0)} \cdot \frac{1}{1 + \delta_0 / y_0} \quad (3.4)$$

där $\Phi(y_0)$ är lika med 1.0 så länge som y_0 är mindre än $y_B = q_B / k$, därefter beräknas $\Phi(y_0)$ enligt ekvation 3.3.



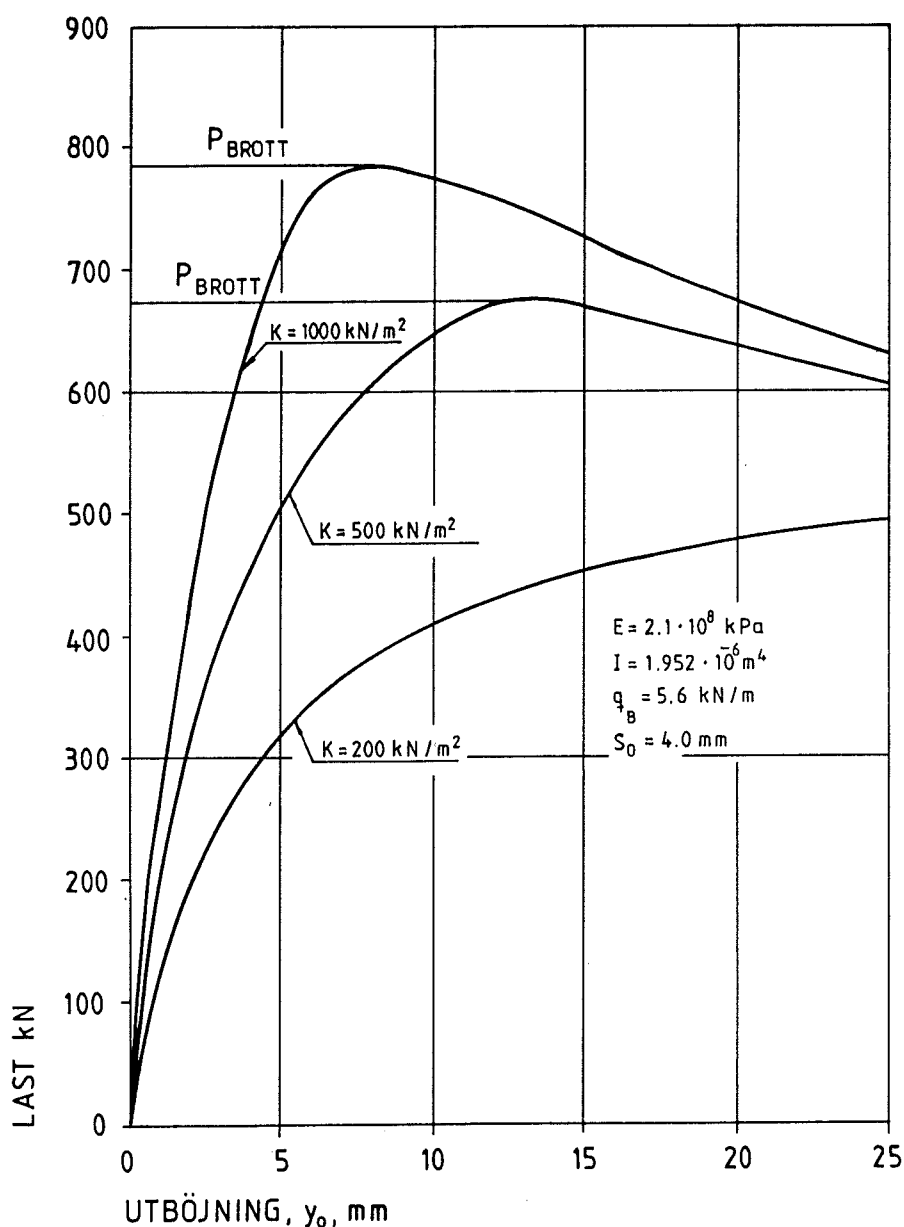
Figur 3.1 Samband mellan pålens utböjning och reaktion från omgivande medium.



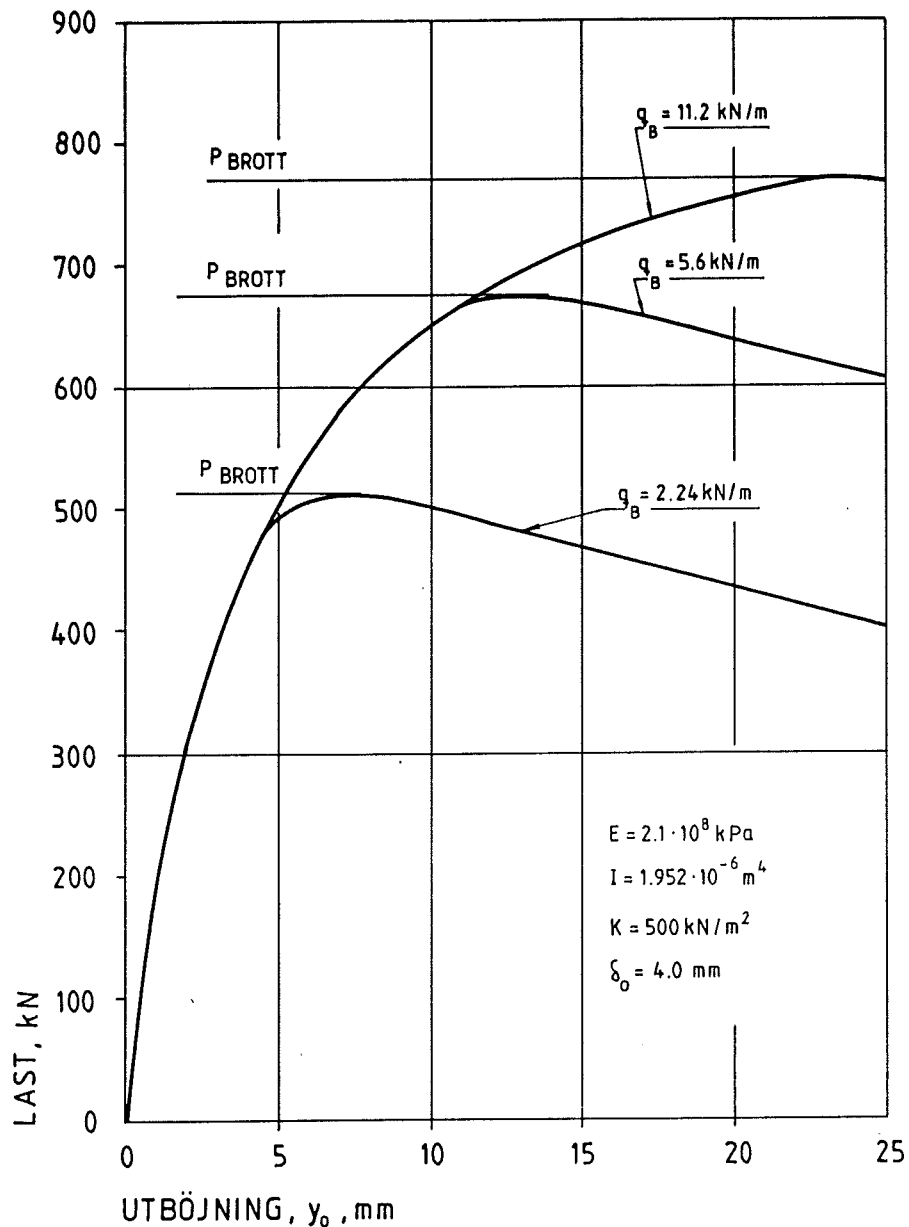
Figur 3.2 Reaktion från det omgivande mediet (leran) efter det att plasticering påbörjats.

I figur 3.3 visas exempel på beräknade samband mellan utböjning och last på en påle enligt ekvation 3.4. Beräkningen har utförts för tre olika värden på bäddmodulen men med samma brottlast hos det omgivande mediet. Det framgår av figuren att pålens bärförmåga är beroende av den omgivande jordens deformationsegenskaper.

I figur 3.4 visas motsvarande beräkning där bäddmodulen hålls konstant men där brottlasten för horisontalbelastning på det omgivande mediet varierar. Vid en jämförelse mellan figurerna framgår det att en procentuellt lika stor ändring i bäddmodulen respektive mediets brottlast ger samma förändring i den beräknade bärförmågan.



Figur 3.3 Samband mellan utböjning och last på pålen för olika styvheter hos det omgivande mediet.



Figur 3.4 Samband mellan utböjning och last på pålen för olika brottlaster hos det omgivande mediet.

3.2.3 Val av arbetskurva för jordmotståndet

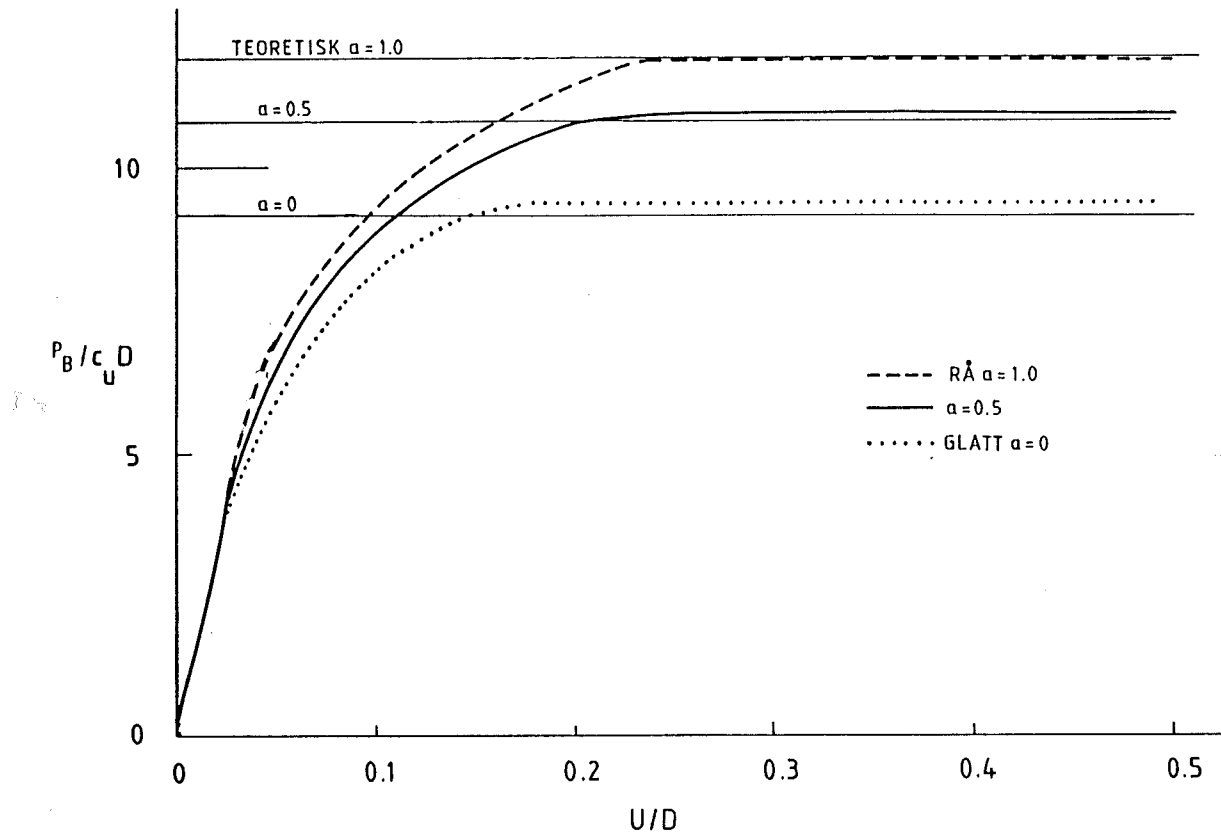
Den teoretiska brottlasten, q_B , vid horisontalförskjutning av ett cirkulärt påsegment under plant töjningsförhållande i ett material med bara kohesion, har framtagits av Randolph och Houlsby, 1984. De presenterade lösningar för olika råheter hos pålen enligt nedan.

$$q_B = (\pi + 2 \cdot \cos(\theta) + 4 \cdot (\cos(\tfrac{1}{2} \cdot \theta) + \sin(\tfrac{1}{2} \cdot \theta))) \cdot D \cdot \tau_{fu} \quad (3.5)$$

Där $\theta = \arcsin(\alpha)$ och $\alpha = 0$ för en glatt påle och $\alpha = 1$ för en rå påle.

Kooijman och Vermeer, 1988, har jämfört dessa lösningar med elasto-plastiska finita element analyser, se figur 3.5. Brottlasten varierar inom nedanstående gränser beroende på pålens råhet.

$$q_B = (9.3 - 12.0) \cdot D \cdot \tau_{fu} \quad (3.6)$$



Figur 3.5 Jämförelse mellan finita element beräknade last-deformationskurvor och teoretiska brottlaster.

Överensstämmelsen mellan finita element beräkningarna och de teoretiska lösningarna är god. De i figur 3.5 visade last-deformationskurvorna kan antas gälla för kortvariga belastningar.

Den undersökningsmetod, som mest efterliknar förhållandena vid horisontalförskjutning av ett pålsegment, är pressometerförsöket. Den erhållna tryck-deformationskurvan vid pressometerförsöket kan emellertid inte användas direkt. Den största skillnaden mellan ett pålsegments arbetskurva och pressometerförsök är i uppmätt brottlast. Brottlasten för ett cirkulärt pålsegment som horisontalbelastas i lera varierar under odränerade förhållanden enligt

$$q_B = (9 - 12) \cdot D \cdot \tau_{fu}$$

För pressometerförsök kan följande uttryck tecknas för gränstrycket, p_L , (Briaud, Smith and Meyer, 1982)

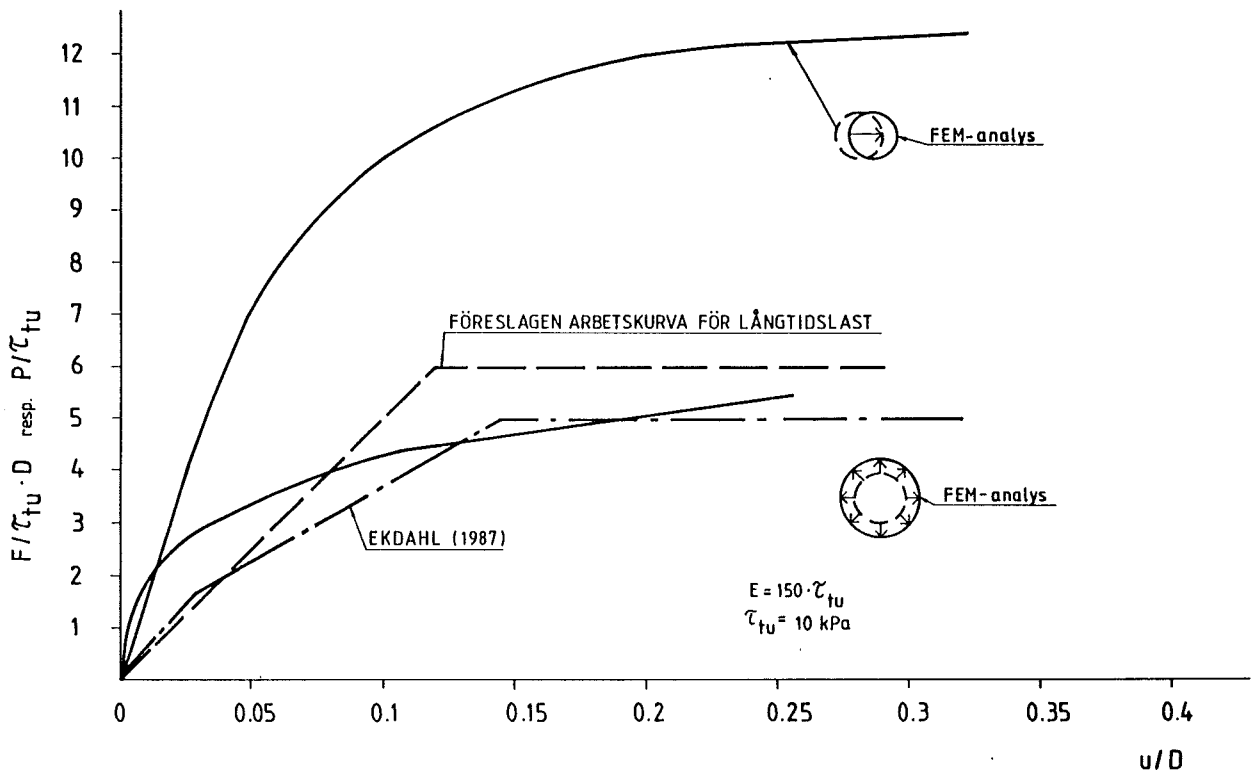
$$p_L = (1.0 + \ln G/\tau_{fu}) \cdot \tau_{fu} \quad (3.7)$$

där G är lerans skjuvmodul. Vid normala förhållanden d v s $G/\tau_{fu} = 50$ fås

$$p_L = 4.91 \cdot \tau_{fu} \quad (3.8)$$

I figur 3.6 visas beräknade tryck-deformationskurvor med finita elementmetoden för ett horisontalbelastat påsegment med diametern 76.1 mm och ett pressometerförsök med diametern 44.0 mm. De erhållna brottrycken stämmer väl med ovanstående teoretiska gränstryck. Utseendet på tryck-deformationskurvorna för pressometerförsöket och påsegmentet är olika. Pressometerkurvan är linjär upp till $1.0 - 1.5 \cdot \tau_{fu}$ nedan kurvan för påsegmentet är linjär upp till $5.0 - 6.0 \cdot \tau_{fu}$. När kurvan övergår till den icke linjära formen plasticeras delar av leran. Den första plasticeringen sker alltså vid en relativt lägre lastnivå vid pressometerförsöket än för det horisontalbelastade påsegmentet.

Vid val av bäddmodul och brottlast måste man ta hänsyn till den krypning och konsolidering, som kommer att ske runt pålen, när den verkar med en horisontallast mot leran. Problemet är mycket

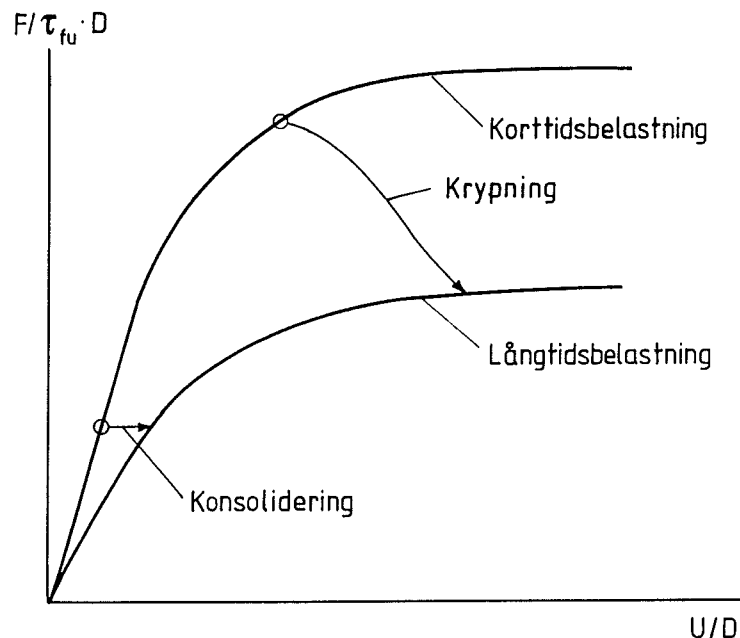


Figur 3.6 Beräknade tryck-deformationssamband för horisontalbelastat påsegment och pressometerförsök.

komplikerat och ofullständigt utrett. Det principiella förloppet visas i figur 3.7. Leran kryper mer ju större del av dess skjuvhållfasthet som har utnyttjats. När totalsäkerheten mot brott är större än ca 1.5 kan krypningen i regel försummas. Överfört på ett horisontalbelastat pålsegment motsvarar detta att under en lastnivå på ca

$$q_B = 6 \cdot D \cdot \tau_{fu} \quad (3.9)$$

kan krypningen försummas. Denna nivå stämmer med den lastnivå, under vilken jordens respons är elastisk enligt finita element analyserna, se figur 3.7. För lastnivåer i intervallet $6 - 12 D \cdot \tau_{fu}$ kan krypningen leda till stora deformationer. I detta intervall sker krypning och konsolidering parallellt. Konsolideringen ökar hållfastheten och kan på så sätt minska risken för krypbrott. En övre utnyttjad lastnivå på $6 \cdot D \cdot \tau_{fu}$ är en gräns på säkra sidan för att undvika krypbrott.



Figur 3.7 Principiella skillnaden mellan last-deformationskurva för korttidslast och långtidslast.

Konsolidering sker även vid lägre lastnivåer, varför bäddmodulen måste minskas vid låga lastnivåer jämfört med korttidslast (odränerade förhållanden). I samband med provbelastningar till brott av slanka stålplåtar har bäddmodulen utvärderats, se tabell 3.1. Man har därvid antagit initieellt raka plåtar vilket innebär att brottlasten utvärderas såsom direkt proportionell mot roten ur bäddmodulen och sålunda oberoende av initialkrokigheten och plåtmaterialets hållfasthet. Det är därför förklarligt att bäddmodulsvärden mellan $9 \tau_{fu}$ och $80 \tau_{fu}$ finns rapporterade i litteraturen, eftersom man ej beaktat de ovan nämnda faktorerna eller det förhållandet att jordens motstånd har ett elasto-plastiskt beteende.

Tabell 3.1 Uppmätta värden på bäddmodulen k i uttrycket
 $P_k = 2 \cdot \sqrt{k \cdot E \cdot I}$.

k rekommenderad	k uppmätt	Referens
$34 \cdot \tau_{fu}$	$(15 - 49) \tau_{fu}$	Bjerrum / Brandtzaeg och Harboe (1957)
$20 \cdot \tau_{fu}$	$(10 - 30) \tau_{fu}$	Bergfeldt (1963)
$9 \cdot \tau_{fu}$	$(7 - 10) \tau_{fu}$	Stille et al. (1976)
$80 \cdot \tau_{fu}$	$(31 - 142) \tau_{fu}$	Bredenberg (1982)
$20 \cdot \tau_{fu}$	$(40) \tau_{fu}$	korttid långtid Bredenberg (1982)

Lutningen på den ur finita element analysen erhållna last-förskjutningskurvan i intervallet $0 - 6 \cdot D \cdot \tau_{fu}$, se figur 3.6, motsvarar en bäddmodul lika med $175 \cdot \tau_{fu}$. Detta värde motsvarar en korttidslast.

I figuren 3.6 visas också den arbetskurva som Ekdahl presenterade vid Pålkommissionens årsmöte 1987. Denna arbetskurva är baserad på japanska erfarenheter av pressometerförsök. Knäet på denna arbetskurva motsvarar det kryptryck som uppmättes vid pressometerförsöket och stämmer bra med den lastnivå, där leran börjar plasticera enligt finita element beräkningarna, se figur 3.6. Detta kryptryck skulle uppnås vid en lastnivå lika med $5.0 - 6.0 \cdot D \cdot \tau_{fu}$ för ett cirkulärt, horisontalbelastat pålsegment, om finita element analyserna är representativa för belastningssituationen.

Ett värde på bäddmodulen lika med

$$k = 50 \cdot \tau_{fu} \quad (3.10)$$

för långtidslast är således på säkra sidan.

Genom horisontalbelastningsförsök på pålar, pressometerförsök för långtidslast och modellstudier kan man successivt förbättra sin kunskap om en realistisk arbetskurva för jordmotståndet.

3.2.4 Pålens bärighet med hänsyn till pålmaterialet

Vid en sinusformad tillskottsutböjning

$$y = y_0 \cdot \cos(\pi \cdot x/l) \quad (3.11)$$

kan tillskottsmomentet längs pålen beräknas enligt

$$M = E \cdot I \cdot y'' = E \cdot I \cdot y_0 \cdot \pi^2/l^2 \cdot \cos(\pi \cdot x/l) \quad (3.12)$$

Momentet är maximalt för $x = l/2$

$$M_{\max} = E \cdot I \cdot \pi^2 \cdot y_0 / (l^2) \quad (3.13)$$

Insättes $l = \pi \cdot \sqrt[4]{E \cdot I / k}$ fås

$$M_{\max} = \sqrt{E \cdot I \cdot k} \cdot y_0 \quad (3.14)$$

Omformning av ekvation 3.2 ger

$$\sqrt{E \cdot I \cdot k} \cdot y_0 = \frac{P \cdot (y_0 + \delta_0)}{2} \quad (3.15)$$

insättning i 3.14 ger

$$M_{\max} = \frac{P \cdot (y_0 + \delta_0)}{2}$$

Den största tryckspänningen i pålen vid axiallasten P blir

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{A} + \frac{P \cdot (y_0 + \delta_0)}{2 \cdot W} \quad (3.16)$$

Om brott definieras inträffa när största tryckspänningen blir lika med pålmaterialets sträckgräns, σ_{su} , kan bärigheten beräknas enligt (omskrivning av 3.16)

$$P = \frac{\sigma_{su} \cdot A}{1 + (y_0 + \delta_0) \cdot A / (2 \cdot W)} \quad (3.17)$$

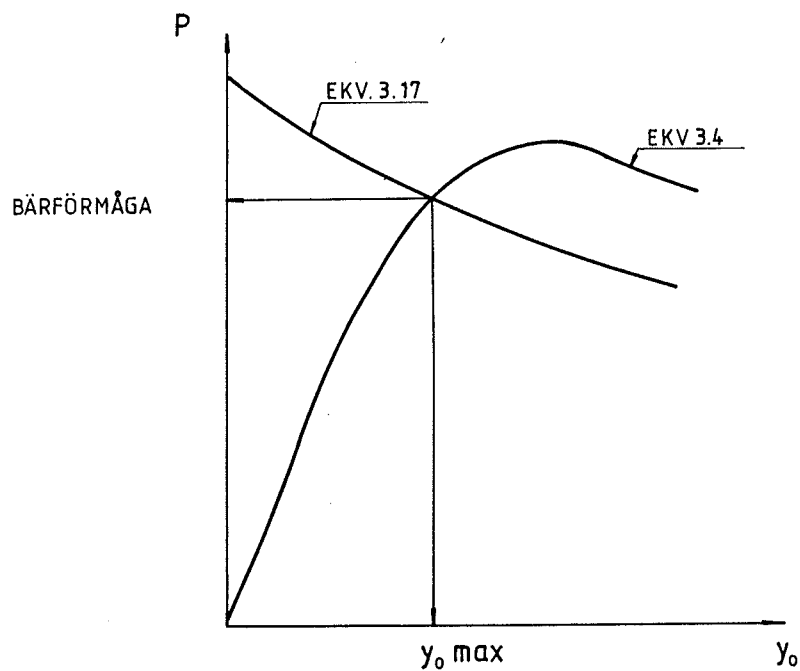
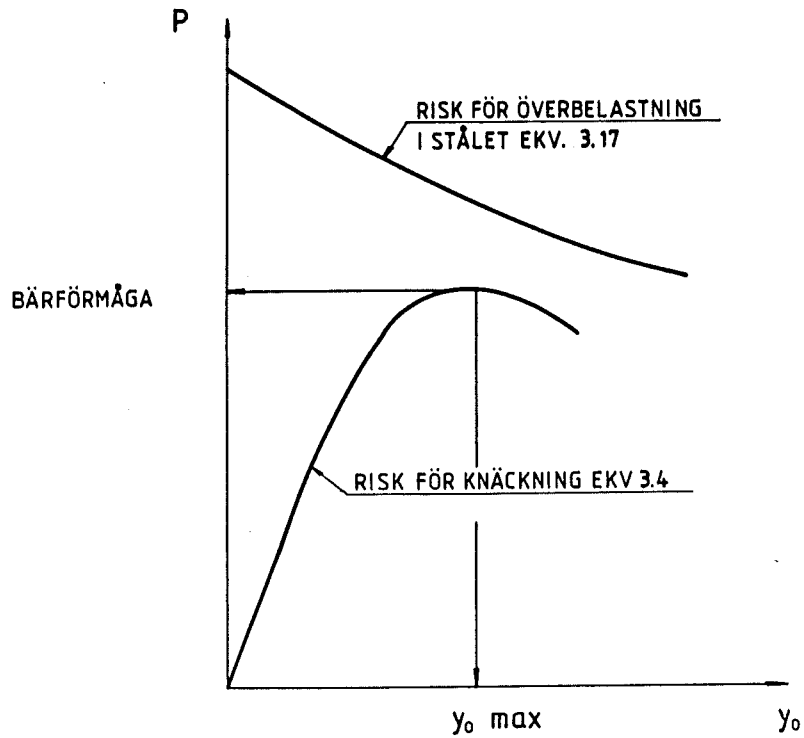
3.2.5 Beräkningsgång

Vid beräkning av en påles bärformåga i lera används ekvationen 3.4 och 3.17, se nedan.

$$P = 2 \cdot \sqrt{E \cdot I \cdot k \cdot \Phi(y_0)} \cdot \frac{1}{1 + \delta_0 / y_0}$$

$$P = \frac{\sigma_{su} \cdot A}{1 + (y_0 + \delta_0) \cdot A / (2 \cdot W)}$$

Två olika fall kan då inträffa, antingen är risken för knäckning eller risken för överskridande av pålmaterialets bärförmåga avgörande. Detta illustreras i figur 3.8.

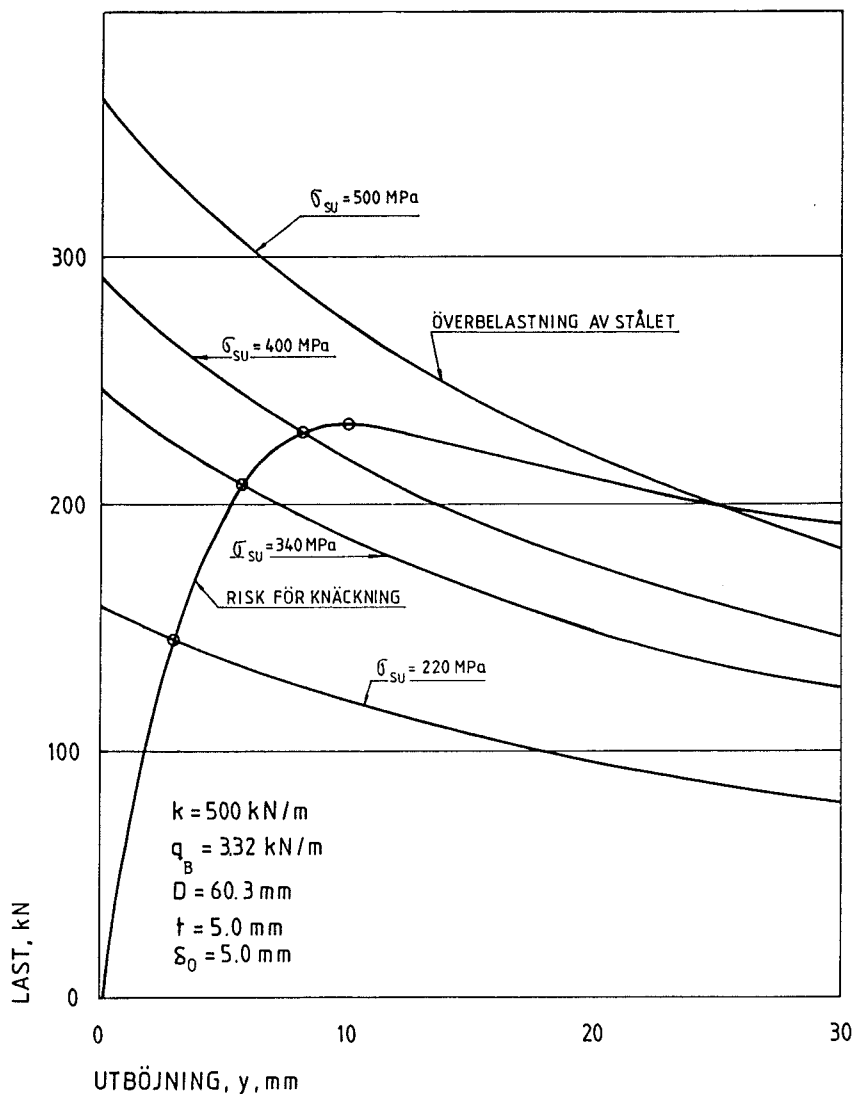


Figur 3.8 De två möjliga brottfallen.

Följande beräkningsprocedur kan användas för att beräkna pålens bärförmåga.

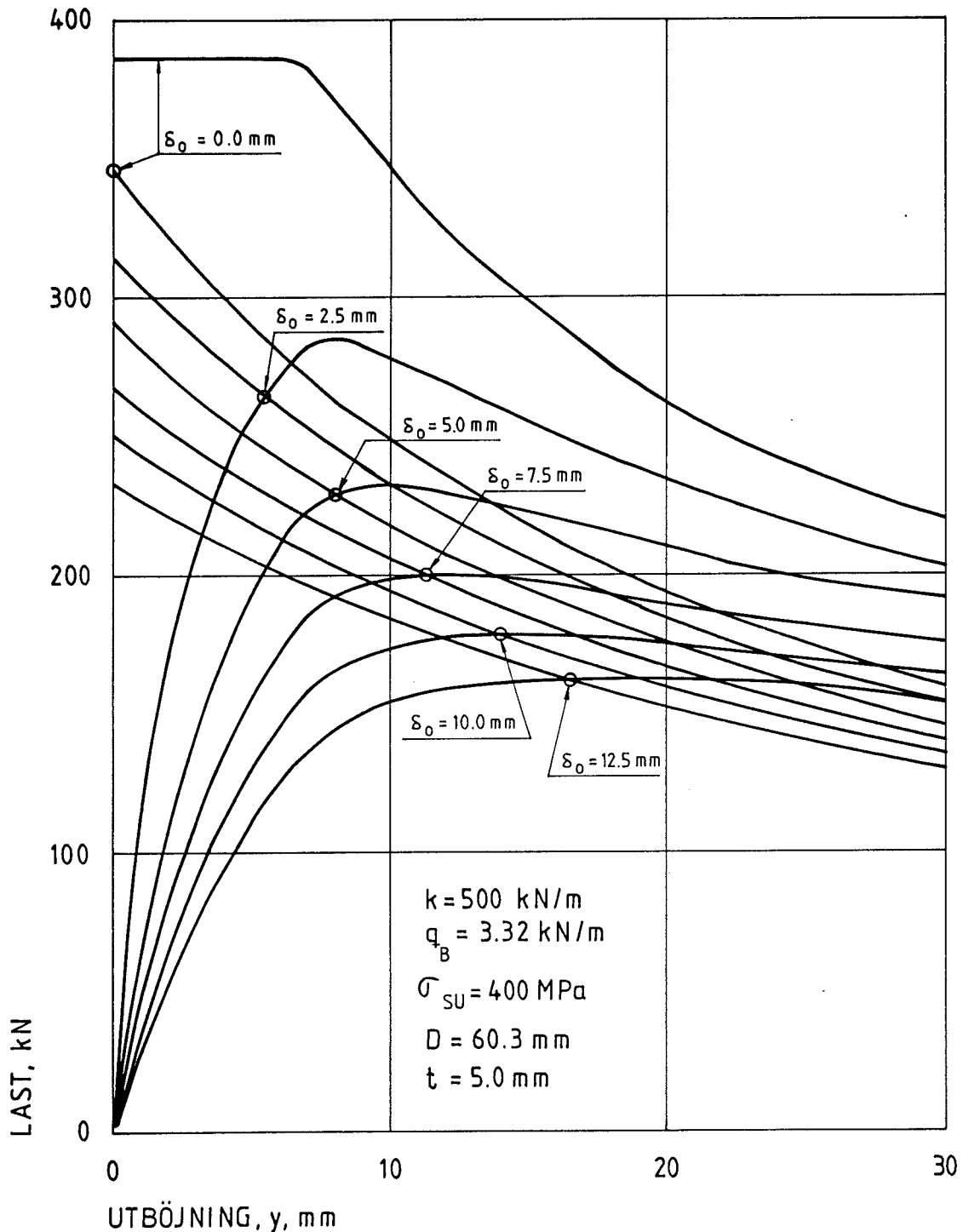
- 1 Beräkna det y_0 som ger största bärförmågan, P , enligt ekvation 3.4.
- 2 Om detta y_0 ger en överbelastning av stålet, d v s om P enligt ekvation 3.17 är mindre än P enligt ekvation 3.4, så minskas y_0 tills dess att ekvation 3.4 och 3.17 ger samma bärförmåga, P .

I figur 3.9 visas sambandet mellan last och utböjning, ekvation 3.4, för en rörpåle med en sinusformad initialutböjning av 5.0 mm. Pålen är omgiven av lera med bäddmodulen 500 kN/m och brottrycket 3.32 kN/m. Ekvation 3.17 för stål med olika sträckgränser finns inlagda i figuren. Bärförmågan erhålls i den punkt där kurvorna skär varandra. Bärförmågan är starkt beroende av stålets sträckgräns, se figur 3.9, upp till den nivå, där knäckningen bestämmer bärförmågan.



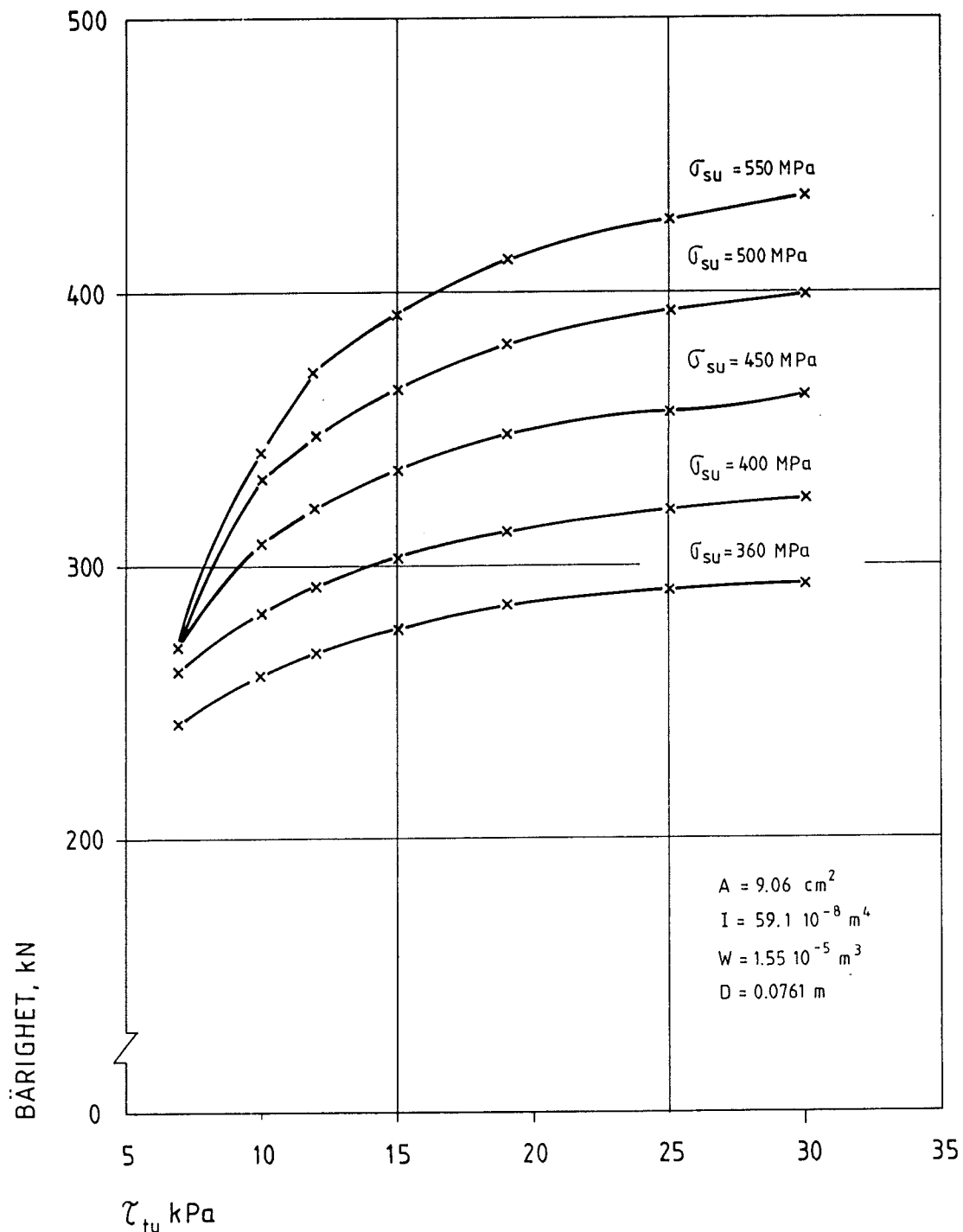
Figur 3.9 Beräknat samband mellan last och utböjning för rörpåle.

I figur 3.10 visas motsvarande beräkningar för rörpålar med olika pilhöjd på den sinusformade initialutböjningen. Pålmaterialet har samma sträckgräns. Den första avvikelser från en helt rak påle har den största inverkan på bärförmågan, sedan minskar inverkan vid ökade pilhöjd. En ökning av pilhöjden från 0 till 5 mm minskar bärförmågan med 117 kN, medan en ytterligare ökning från 5 till 10 mm endast ger 50 kN i minskning av bärförmågan.



Figur 3.10 Beräknat samband mellan last och utböjning för rörpåle med varierande initialutböjning.

I figur 3.11 visas beräknad bärighet enligt ekvation 3.4 och 3.17 för en rörpåle med en sinusformad initialkrokighet, som motsvarar en krökningsradie lika med 150 m räknat på den elastiska knäcklängden. Beräkningarna har utförts för olika sträckgränser hos pålmaterialet. Vid låga sträckgränser hos pålmaterialet blir ekvation 3.17 avgörande för bärigheten. Väljer man ett material med hög sträckgräns blir ekvation 3.4 avgörande vid låga skjuvhållfastheter hos den omgivande leran, se figur 3.11, d v s lerans bärighet blir avgörande för pålens bärighet.



Figur 3.11 Beräknad bärighet för rörpåle av olika stålqualitet.

3.2.6 Jämförelse mellan finit differensberäkning och den föreslagna beräkningsmetoden

Handberäkningar enligt ekvation 3.4 och 3.17 har jämförts med beräkningar utförda med ett dataprogram för beräkning av axialbelastade pålar enligt finita differensmetoden. Teorin bakom programmet finns beskriven i en avhandling av Mazindrami 1979. Per-Evert Bengtsson, SGI, har modifierat programmet för att ta med effekten av jordens brottlaster på det böjande momentet.

I tabell 3.2 redovisas en jämförelse för en påle med följande data:

$$\begin{aligned} A &= 9.06 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 & I &= 59.1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4 \\ W &= 1.55 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 & D &= 0.0761 \text{ m} \\ E &= 2.1 \cdot 10^8 \text{ kPa} \end{aligned}$$

En sinusformad initialkrokighet med en våglängd lika med den elastiska knäcklängden har antagits. Initialutböjningens pilhöjd har valts så att den motsvarar en krökningsradie lika med 150 m räknat på den elastiska knäcklängden. Vid beräkningen med finita differensprogrammet har fyra våglängder modellerats med totalt 40 segment. Som framgår av tabellen fås exakt överensstämmelse mellan handberäkningen och det finita differensprogrammet.

Tabell 3.2

Bäddmodul kN/m	Brottlaster kN/m	Elastisk knäcklängd m	δ_0 mm	ekv 3.4, 3.17 kN	Differens- program, kN
350	2.9299	2.424	4.9	242.8	242.8
500	4.1855	2.217	4.1	260.6	260.7
600	5.0226	2.119	3.7	268.9	268.9
750	6.2783	2.004	3.3	277.2	277.2
1000	8.371	1.865	2.9	285.5	285.5
1250	10.4638	1.763	2.6	291.0	291.1
1500	12.5565	1.685	2.4	294.7	294.7

3.2.7 Inverkan av egenspanningar i pålelementen

Vid dimensionering för knäckning skall enligt BSK hänsyn tas till inverkan av egenspanningar i konstruktionselementen. Egenspanningarnas storlek är beroende av profilens utseende och tillverknings sätt. Beräkning med hänsyn till egenspanningar kan utföras på två olika sätt enligt nedan:

- A Beräkning enligt andra ordningens teori med verkliga egenspanningar och verkliga krokigheter.

- B Beräkning enligt andra ordningens elasticitetsteori varvid egenspanningarna beaktas genom att räkna med en förstorad initialkrokighet och genom reduktion av konstruktions-elementets böjstyvhet, $E \cdot I$.

Metod A kräver tillgång till FEM-program, som tar hänsyn till plasticering av tvärsnittet medan metod B kan användas vid handberäkningar.

Den förstorade initialkrokigheten och reduktionen av böjstyvheten $E \cdot I$ väljs enligt tabell 3.3 nedan, där grupptillhörighet bestäms enligt Tabell 6:233 i BSK, se figur 3.12.

Alternativt och bättre baseras beräkningen på hållfasthetsvärden erhållna vid provning av helt pålsegment, se provningsmetod Appendix A. Pålen klassas i detta fall till grupp a.

Tabell 3.3

	Fiktiv initialkrokighet	Reducerad böjstyvhet
Rör grupp a	$\delta_F = 0.0003 \cdot l$	$E \cdot I_{red} = E \cdot I \cdot 0.9$
Rör grupp b	$\delta_F = 0.0013 \cdot l$	$E \cdot I_{red} = E \cdot I \cdot 0.9$
Rör grupp c	$\delta_F = 0.0025 \cdot l$	$E \cdot I_{red} = E \cdot I \cdot 0.9$

Den fiktiva initialkrokigheten, δ_F , enligt tabell 3.2 adderas till den verkliga geometriska krokigheten, δ_G . Den så erhållna initialkrokigheten

$$\delta_0 = \delta_G + \delta_F$$

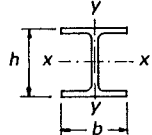
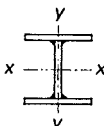
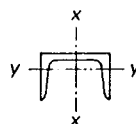
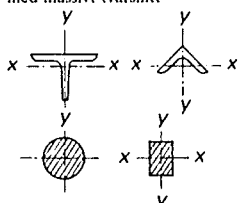
och den reducerade böjstyvheten användes vid bärlighetsberäkningen. Den fiktiva initialkrokigheten, δ_F , räknas på den elastiska knäcklängden, l_k .

Nedan redovisas ett beräkningsexempel där man tar hänsyn till egenspanningar i pålmaterialet. Följande påldata har använts:

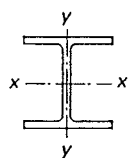
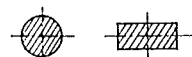
$$\begin{array}{ll} A = 9.06 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 & I = 59.1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4 \\ W = 1.55 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 & E_{red} = 1.89 \cdot 10^8 \text{ kPa} \\ D = 0.0761 \text{ m} & k = 50.0 \cdot \tau_{fu} \text{ kN/m} \\ q_B = 5.5 \cdot D \cdot \tau_{fu} \text{ kN/m} & R = 150 \text{ m} \end{array}$$

Tabell 6:233. Indelning av stänger beroende på tvärsnittstyp för bestämning av ω_c .

1. Stänger med tvärsnittsdelar med största godstjocklek 40 mm

Stång och tvärsnittstyp	Förutsättningar	Grupp
Cirkulärt rör eller fyrkantrör 	Varmformat eller avspänningsglödgat rör	a
	Rör svetsat i fyra hörn eller svetsat av två U-stänger	b
	Övriga rör	c
Valsad stång med I-tvärsnitt 	Knäckning i styva riktningen (tvärsnittsrotation kring x-x) $h/b > 1,2$ $h/b \leq 1,2$ Knäckning i veka riktningen (tvärsnittsrotation kring y-y) $h/b > 1,2$ $h/b \leq 1,2$	a b b c
Svetsad stång med I-tvärsnitt 	Knäckning i styva riktningen (tvärsnittsrotation kring x-x) Knäckning i veka riktningen (tvärsnittsrotation kring y-y)	b c
Valsad eller svetsad stång med U-tvärsnitt 	Knäckning med tvärsnittsrotation kring x-x y-y	b c
Valsad eller svetsad stång med T-tvärsnitt och vinkel-tvärsnitt och valsad stång med massivt tvärsnitt 	Stång med godstjocklek ≤ 20 mm Stång med godstjocklek ≤ 40 mm	b c

2. Stänger med tvärsnittsdelar med godstjocklek 40–100 mm

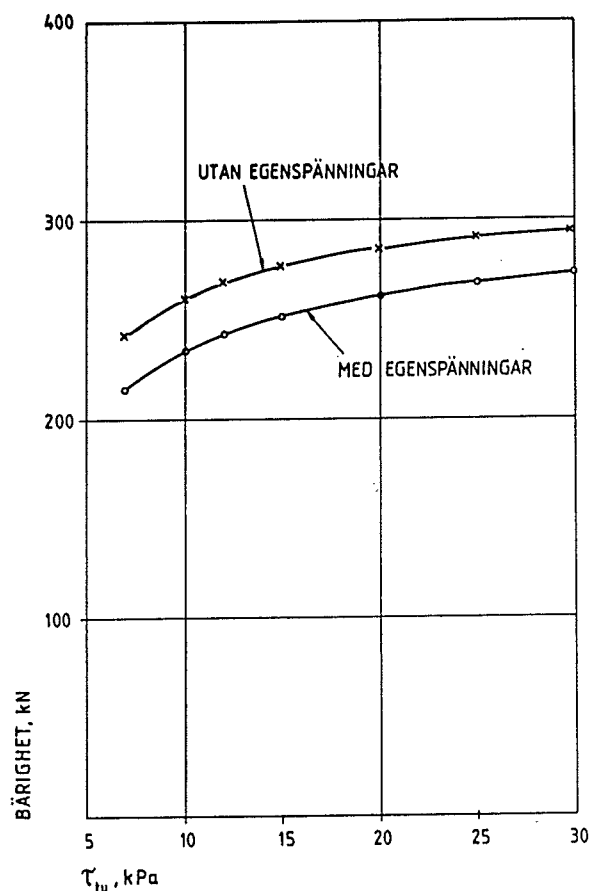
Stång och tvärsnittstyp	Förutsättningar	Grupp
Stång med I-tvärsnitt 	Valsad stång:	
	Knäckning med tvärsnittsrotation kring x-x	d
	Knäckning med tvärsnittsrotation kring y-y	d
	Svetsad stång av valsad plåt:	
	Knäckning med tvärsnittsrotation kring x-x	c
	Knäckning med tvärsnittsrotation kring y-y	d
	Svetsad stång av valsad plåt med termiskt skuren kant	c
Stång med massivt tvärsnitt 		c

Figur 3.12 Tabell 6:233 i BSK.

Den geometriska initialkrokigheten motsvarar en krökningsradie lika med 150 m räknat på den elastiska knäcklängden. Pålröret har antagits tillhöra grupp b enligt tabell 3.2. I tabell 3.4 sammanfattas beräkningsförutsättningarna. Den beräknade bärigheten med hänsyn till egenspanningar och den utan egenspanningar jämförs i figur 3.13. Det framgår av figur 3.13 att en konstant reduktion av bärigheten fås inom hela skjuvhållfasthetsintervallet 7 - 30 kPa för denna kombination av pål- och materialdata. Andra kombinationer kan ge andra resultat beroende på om ekvation 3.4 eller ekvation 3.17 blir avgörande för bärigheten.

Tabell 3.4

τ_{fu} kPa	k kN/m ²	α_B kN/m	l m	δ_F mm	δ_G mm	δ_0 mm
7	350.	2.9299	2.3613	3.1	4.6	7.7
10	500.	4.1855	2.1598	2.8	3.9	6.7
12	600.	5.0226	2.0636	2.7	3.5	6.2
15	750.	6.2783	1.9516	2.5	3.2	5.7
20	1000.	8.3710	1.8162	2.4	2.7	5.1
25	1250.	10.4638	1.7177	2.2	2.5	4.7
30	1500.	12.5565	1.6411	2.1	2.2	4.3



Figur 3.13 Inverkan av egenspanningar i pålröret.

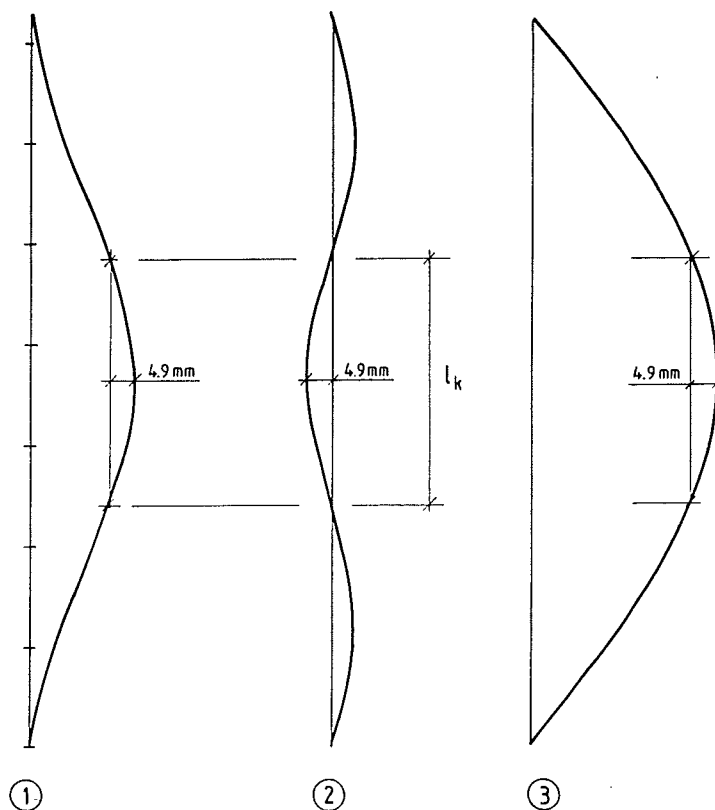
3.2.8 Val av initialkrokighet vid beräkning av bärighet

I appendix B redovisas inklinometermätningar utförda i rörpålar på olika arbetsplatser. Mätningarna har utförts i pålarna efter stoppslagning.

Vanligtvis har pålen fått en utböjning i **en** riktning, se appendix B. Det är ovanligt att utböjningskurvan har bukter åt olika håll. Vilken initialutböjning skall man anta i sina beräkningar av bärigheten? För att studera detta har beräkningar utförts med det i 3.2.6 nämnda finita differens programmet för tre olika initialutböjningskurvor enligt figur 3.14. Kurva 1 är sammansatt av två överlagrade sinuskurvor, kurva 2 av tre halva sinusvågor och kurva 3 av en halv sinusvåg. Pålens längd har satts till tre gånger den elastiska knäcklängden, och pålen har delats in i 30 pålsegment. Pilhöjden för de olika sinuskurvorna har valts så att pilhöjden, δ_0 , på en längd lika med den elastiska knäcklängden motsvarar en krökningsradie lika med 150 m enligt nedan.

$$R = \frac{l_k \cdot l_k}{8 \cdot \delta_0}$$

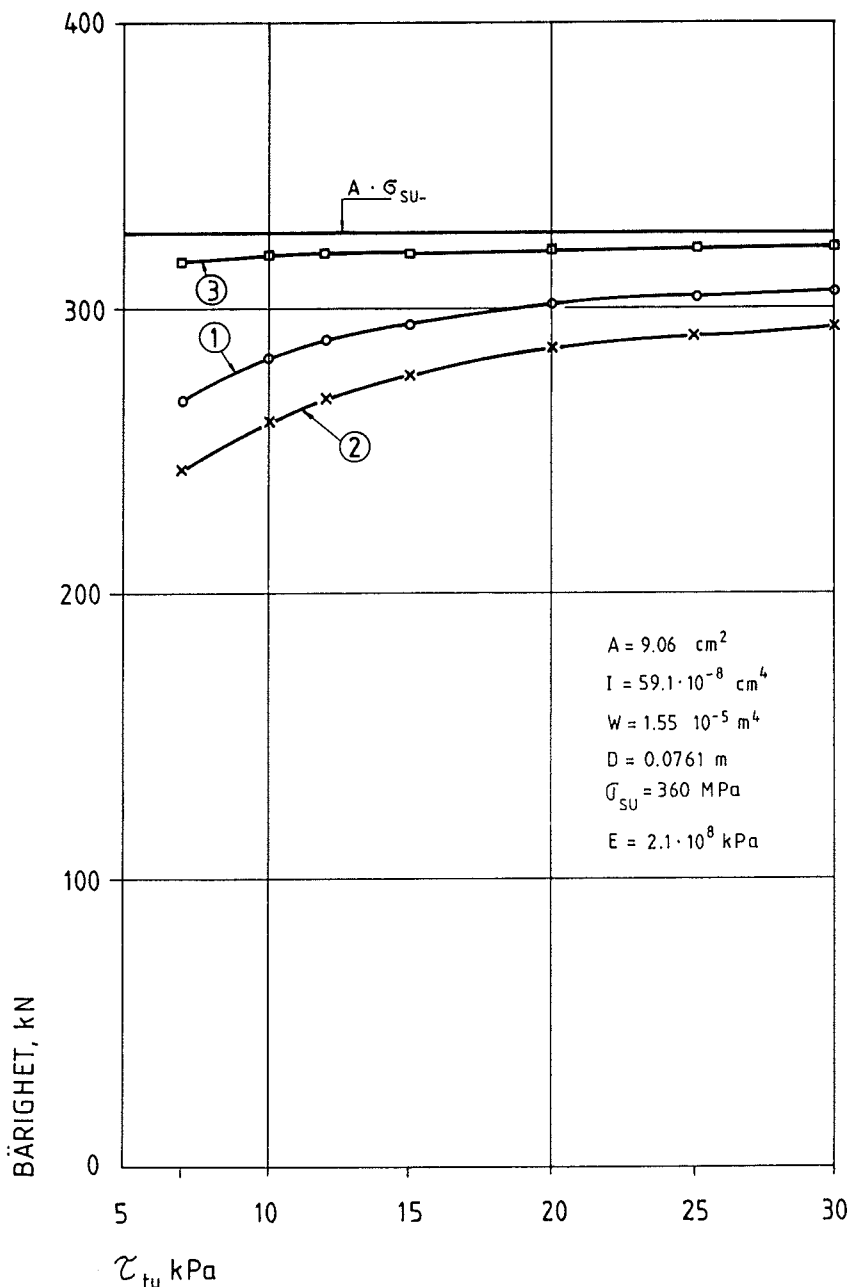
De tre initialutböjningskurvorna i figur 3.14 motsvarar alltså alla en krökningsradie lika med 150 m mätt på den elastiska knäcklängden.



Figur 3.14 Antagna initialutböjningskurvor.

Resultatet av beräkningarna visas i figur 3.15. Utböjningskurva 3 ger den högsta bärigheten och avvikelserna från den maximala bärigheten (arean · sträckgränsen) är liten. Alternativ 1 ger lägre bärighet och utböjningskurva 2, som är affin med knäckkurvan, ger den lägsta bärigheten. Bärighetsskillnaden är ca 28 procent mellan kurva 3 och 2 vid en skjuvhållfasthet hos leran på 7 kPa.

Känner man inte utböjningskurvans riktiga form längs pålen måste man utgå från det farligaste alternativet d v s en initialutböjning affin med knäckkurvan. Detta kommer alltid att ge ett resultat på säkra sidan. För detta fall räcker det med att studera en halv sinusvåglängd d v s ekvation 3.4 och ekvation 3.17 kan användas.



Figur 3.15 Beräknad bärighet för olika utböjningskurvor.

Med ledning av ovanstående beräkningar kan följande riktlinjer ges för val av dimensionerande geometrisk initialkrokighet.

- o Den elastiska knäcklängden beräknas för pålen

$$l_k = \pi \cdot \sqrt[4]{E \cdot I / k}$$

- o Pilhöjden för initialkrokigheten på en längd lika med den elastiska knäcklängden bestäms ur mätningar. Följande samband mellan krökningsradie, R , och pilhöjden, δ_G , antas gälla

$$\delta_G = \frac{l_k \cdot l_k}{8 \cdot R}$$

- o Sinusformad geometrisk initialkrokighet med pilhöjden δ_G på knäcklängden antas vid beräkning av bärligheten enligt ekvation 3.4 och ekvation 3.17.

3.3 DIMENSIONERING ENLIGT PARTIALKOEFFICIENTMETODEN

3.3.1 Beräkningsgång

För en detaljerad beskrivning av partialkoefficientmetoden hänvisas till Rapport nr 50, Statens Planverk, 1982.

Vid dimensionering enligt partialkoefficientmetoden skall den beräknade bärförmågan R vara större än den beräknade belastningen S , d v s

$$R - S > 0 \quad (3.22)$$

vilket för pålar innebär att kraven på säkerhet både mot knäckning och överbelastning av stålet måste vara uppfyllda, d v s

$$\frac{2 \cdot \sqrt{E \cdot I \cdot k \cdot \Phi(Y_0)}}{1 + \delta_0 / Y_0} - a \cdot G - b \cdot Q > 0 \quad (3.23a)$$

och

$$\frac{\sigma_{su} \cdot A}{1 + (\delta_0 + Y_0) \cdot A / (2 \cdot W)} - a \cdot G - b \cdot Q > 0 \quad (3.23b)$$

där

- o G är permanent last
- o Q är variabel last
- o a och b är belastningskoefficienter som beskriver hur stor del av lasterna som överförs till enskild påle

Vid dimensionering enligt partialkoefficientmetoden ersätts de ingående storheterna med sina dimensioneringsvärden d v s

$$\frac{2 \cdot \sqrt{\frac{E_k}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot I_n \cdot \frac{k_k \cdot \Phi(\gamma_0)}{\gamma_n \cdot \gamma_k}}}{1 + (\delta_{0k} \cdot \gamma_\delta) / \gamma_0} - a \cdot \gamma_G \cdot G_k - b \cdot \gamma_Q \cdot Q_k > 0 \quad (3.24a)$$

$$\frac{\frac{f_{yk}}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot A_n}{1 + (\delta_{0k} \cdot \gamma_\delta + \gamma_0) \cdot A_n / (2 \cdot W_n)} - a \cdot \gamma_G \cdot G_k - b \cdot \gamma_Q \cdot Q_k > 0 \quad (3.24b)$$

där laststorheter har ersatts av sina karakteristiska värden multiplicerade med en partialkoefficient d v s

$$S_d = S_k \cdot \gamma_s \quad (3.25)$$

Parametrarna för beräkning av bärförmågan har ersatts av sina respektive karakteristiska värden dividerade med en partialkoefficient och ett säkerhetsindex för aktuell konstruktionsklass

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \quad (3.26)$$

Geometriska storheter såsom A och W används i beräkningen med sina nominella värden. Det dimensionerande tröghetsmomentet, I_n , motsvarar det nominella värdet reducerat till 90 % för att beakta egenspanningar, se avsnitt 3.2.7.

Utböjning γ_0 är en variabel och skall sättas till det värde som ger största möjliga bärförmåga enligt ekvation (3.24a och 3.24b). Två olika fall kan då inträffa. Antingen är risken för knäckning eller risken för överskridande av stålets bärförmåga dimensionerande.

Följande beräkningsprocedur används för att beräkna pålens dimensionerade bärförmåga.

- 1 Beräkna $y_{0,max}$ med hänsyn till risken för knäckning.
- 2 Om detta ger en överbelastning av stålet minskas y_0 tills såväl risken för knäckning som överbelastning i stålet ger samma värde på dimensionerande bärförmåga, R_d .
- 3 Därefter kontrolleras att pålarna ej överbelastas d v s

$$R_d - a \cdot \gamma_G \cdot G_k - b \cdot \gamma_Q \cdot Q_k > 0 \quad (3.27)$$

- 4 Om pålarna överbelastas ändras lastfaktorerna a och b så att enskild påle ej överbelastas (dvs fler pålar måste slås).

3.3.2 Val av parametervärden

Karakteristiska värden och värden på partialkoefficienter väljs enligt Nybyggnadsregler BFS 1988:18.

Säkerhetsklass

γ_n är beroende av säkerhetsklassen och sätts till 1.2, 1.1 eller 1.0 enligt kap 6:1 i Nybyggnadsregler BFS 1988:18.

Stålets egenskaper

Karakteristiskt värde på stålets elasticitets modul, E, är $2.1 \cdot 10^5$ MPa och för hållfastheten väljs 0.05-fraktilen i den statistiska fördelningen för stålets sträckgräns, allt enligt BSK.

Det karakteristiska värdet för stålets hållfasthet skall vara giltigt för pålmaterialet efter stoppslagning. För tryckspänningar se appendix A.

γ_m för stålets hållfasthet väljs enligt BSK till 1.0. Om den undre toleransgränsen ger en större minskning av bärförmågan än 6% jämfört med nominella mått, skall γ_m sättas till 1.1.

Detta kontrolleras med följande villkor för cirkulära rör:

$$1.5 \cdot \frac{\delta_\phi}{\phi_m} + 0.5 \cdot \frac{\delta_t}{t} < 0.06 \quad (3.28)$$

där δ_ϕ och δ_t är mot toleransgränserna svarande måttavvikelser, ϕ_m är medeldiametern och t är godstjockleken.

Initialutböjningen

Den initiella krokigheten, δ_0 , är sammansatt av den verkliga geometriska krokigheten, δ_G , och en fiktiv krokighet, δ_F , beroende av egenspanningar i pålmaterialet, se avsnitt 3.2.7.

$$\delta_0 = \delta_G + \delta_F \quad (3.13)$$

Den verkliga geometriska krokigheten skall beaktas på olika sätt beroende på typ och omfattning av rakhetskontrollen efter stoppslagningen.

- o Vid inklinometermätning av alla pålar:

Den största pilhöjden, δ_G , bestäms på en längd lika med den elastiska knäcklängden, l_k . Detta värde användes sedan vid beräkning av varje enskild påles bärförmåga. Partialkoefficienten, γ_δ , sätts till 1.0.

- o Vid tolkning av alla pålarna med tolk:

Utföres rakhetskontrollen med tolk, som passerar ned genom pålen när dess krökningsradie är större eller lika med R_T , utvärderas den geometriska krokigheten enligt följande

$$\delta_G = \frac{l_k \cdot l_k}{8 \cdot R_T} \quad (3.29)$$

där l_k är pålens elastiska knäcklängd. Partialkoefficienten, γ_δ , sätts till 1.0. Pålar som tolken inte passerar kasseras.

De i appendix B redovisade uppmätta krokigheterna från ett antal pålningsobjekt kan användas som ledning vid val av tillåten krokighet vid projekteringen. Strängare krav på rakhet ger större dimensionerande bärförmåga men också ett större antal pålar som ej kan godkännas. Svårare geotekniska förhållanden med tjock, stenig fyllning på lös lera ger en större initialkrokighet.

Jordens egenskaper

Jordens motstånd mot utböjning $k(y)$ beror på utböjningens storlek och jordens skjuvhållfasthet. Styvheten kan tecknas

$$k(y) = k_1(\tau_{fu}) \cdot \Phi(y) \quad (3.30)$$

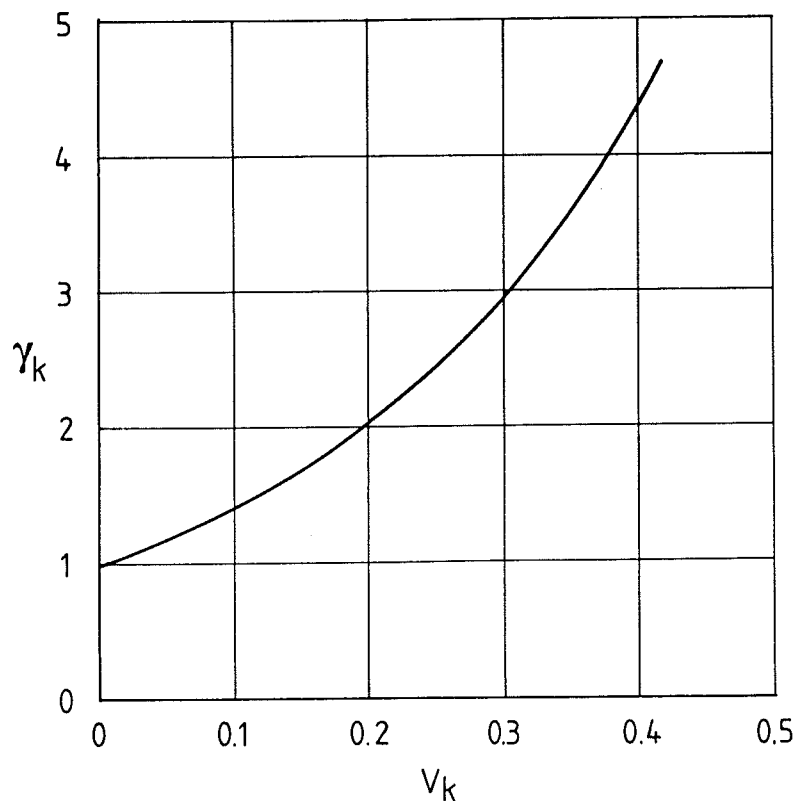
Faktorn $k_1(\tau_{fu})$ är direkt proportionell mot skjuvhållfastheten, se avsnitt 3.2.3.

Karakteristiskt värde på $k(y)$ beräknas med ett karakteristiskt värde på τ_{fu} motsvarande medelvärdet på lerans skjuvhållfasthet. Motsvarande partialkoefficient γ_k är beroende av variationen i lerans skjuvhållfasthet, samt omfattningen av provtagningen. Vidare skall beaktas att motståndet mot utböjningen snarare är relaterat till medelvärdet av lerans skjuvhållfasthet beräknad över knäcklängden l_k , än enstaka låga värden. De rekommendationer som lämnas nedan vid val av γ_k måste beaktas som preliminära. Utökad forskning och bearbetning av data måste till för att slutgiltiga rekommendationer skall kunna göras.

Partialkoefficienten γ_k bestäms enligt följande:

- 1 Undersökningens omfattning i form av antalet provpunkter, avståndet till provpunkterna och lerans inhomogenitet bestämmer enligt appendix C värdet på v_k (variationskoefficienten på lerans skjuvhållfasthet räknat som medelvärde över knäcklängden).
- 2 Värdet på γ_k bestäms sedan ur nedanstående figur 3.16. Figur 3.16 är baserad på de högsta värdena som erhöles vid de jämförande analyserna mellan β -metoden och partialkoefficientmetoden enligt appendix D.

Faktorn $\Phi(y)$ beror på påldimensionen och utböjningen och betraktas som ett deterministiskt värde.



Figur 3.16 Förhållande mellan partialkoefficienten, γ_k , och variationskoefficienten, v_k , för lerans skjuvhållfasthet räknat som medelvärde över knäcklängden.

Laster

Det karakteristiska värdet på den permanenta lasten, G , är medelvärdet räknat på konstruktionens nominella mått och medelvärdet på materialets tyngd.

Partialkoefficienten γ_G sätts till

- 1.0 om G verkar ogynnsamt
- 0.85 om G verkar gynnsamt
- 1.15 om G dominerar

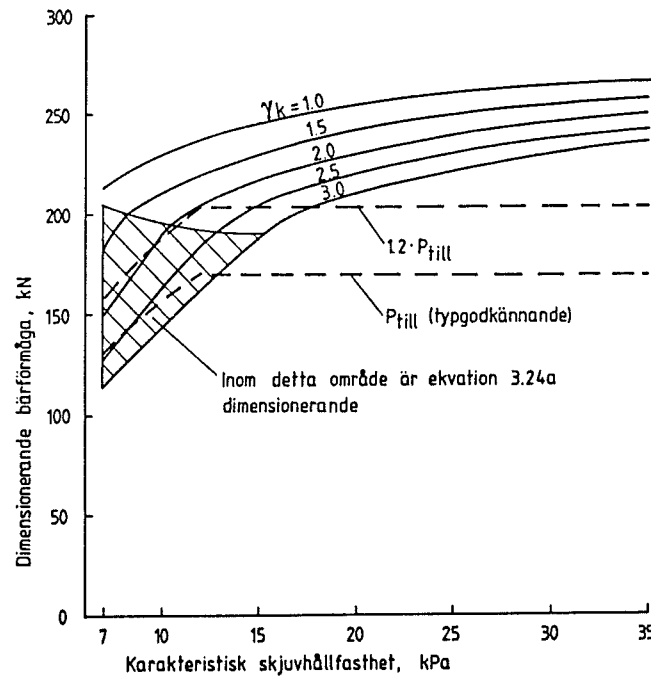
Det karakteristiska värdet på Q_k väljs så att det motsvarar 0.98-fraktilen i den statistiska fördelningen, se Nybyggnadsregler BFS 1988:18 kap 6:1. Partialkoefficienten γ_Q sätts till 1.3 för en variabel last. Vid kombinationer av flera laster, se Nybyggnadsregler kapitel 6:1.

3.4 EXEMPEL PÅ BERÄKNAD DIMENSIONERANDE BÄRFÖRMÅGA

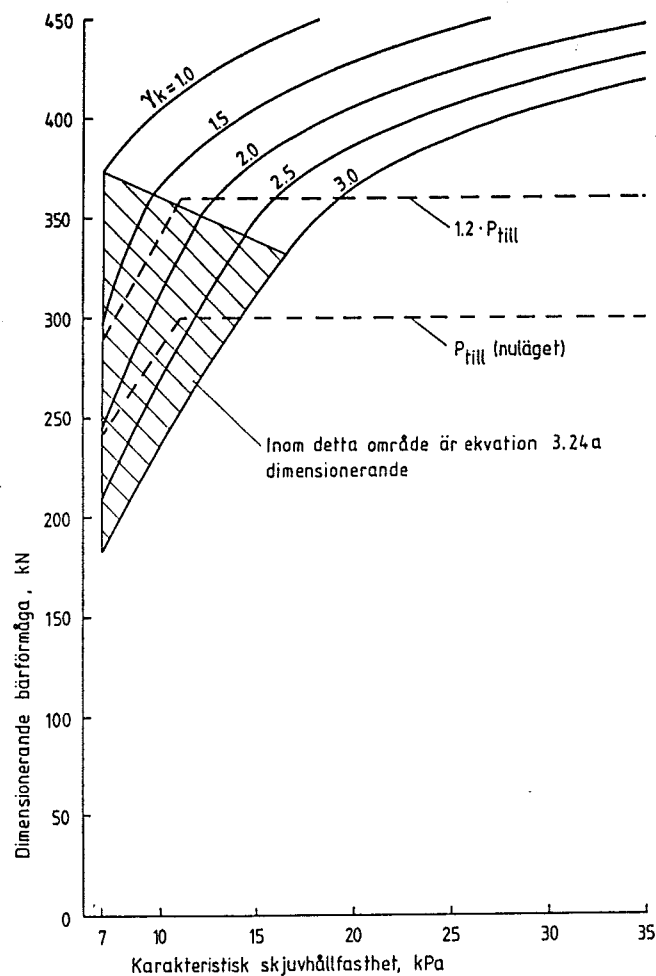
I detta avsnitt redovisas dimensionerande bärförmåga beräknad med partialkoefficientmetoden (ekvation 3.24 a och b) och med de rekommendationer, som är givna för de olika ingående parametrarna. Rakhetskontroll förutsätts ske med en tolk som passerar genom pålen om krökningsradien är större än 150 m, och alla pålar tolkas. γ_m har satts till 1.0, och rörpålarna antas tillhöra grupp a vad gäller egenspanningar. Egenspanningar i pålmaterialet förutsätts ha kontrollerats rutinmässigt enligt Appendix A. I figur 3.17 - 3.22 jämförs de framräknade bärförmågorna med tidigare tillåtna laster enligt typgodkännanden samt den schablonregel som anger att den dimensionerande bärförmågan är ca 1.2 ggr värdet på tillåten last enligt äldre synsätt.

Normalt värde på γ_k bör vara 1.5 - 2.0, vilket innebär att den dimensionerande bärförmågan i stort korresponderar mot äldre tillåtna laster vad gäller materialutnyttjande.

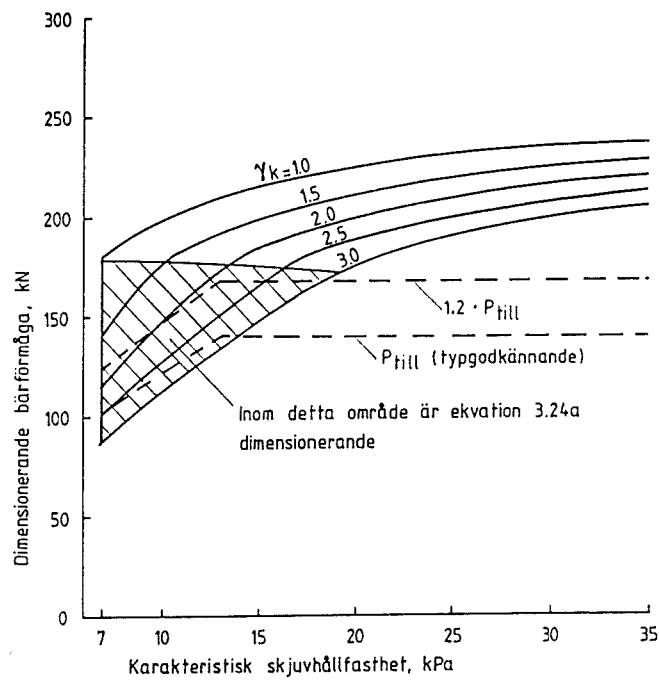
De nya beräkningsreglerna innebär jämfört med de tidigare ett något högre materialutnyttjande vid hög skjuvhållfasthet samt, i vissa fall, ett lägre materialutnyttjande vid låg skjuvhållfasthet i leran.



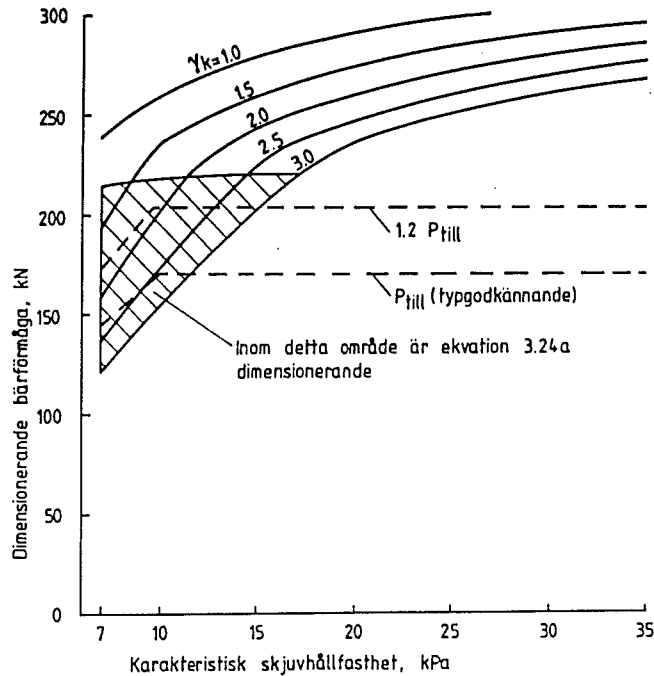
Figur 3.17 Dimensionerande bärförmåga för påle $\phi 76.1 \cdot 4.0$, $f_{yk} = 360$ MPa, $\gamma_n = 1.1$.



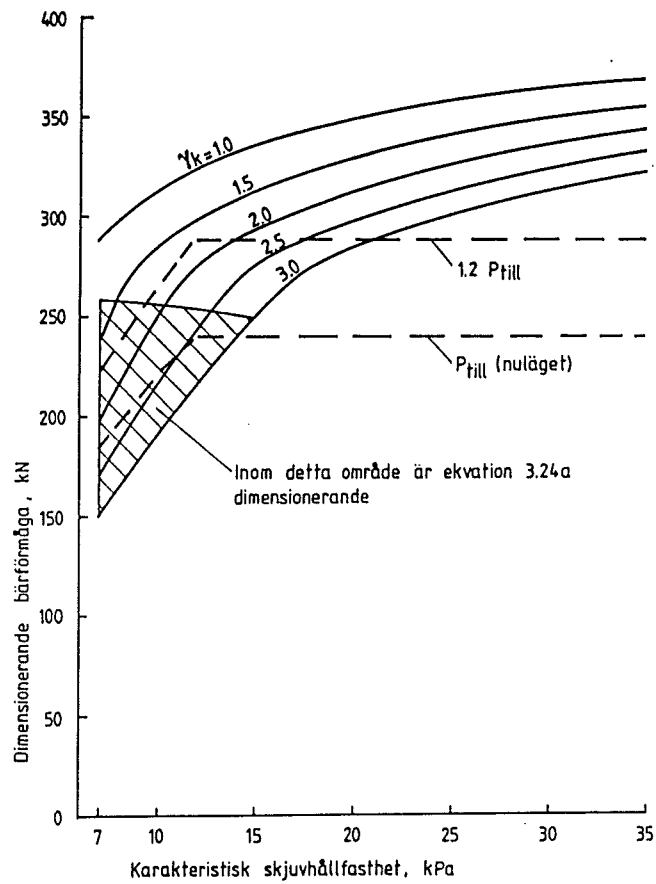
Figur 3.18 Dimensionerande bärförmåga för påle $\phi 101.6 \cdot 5.6$, $f_{yk} = 360$ MPa, $\gamma_n = 1.1$.



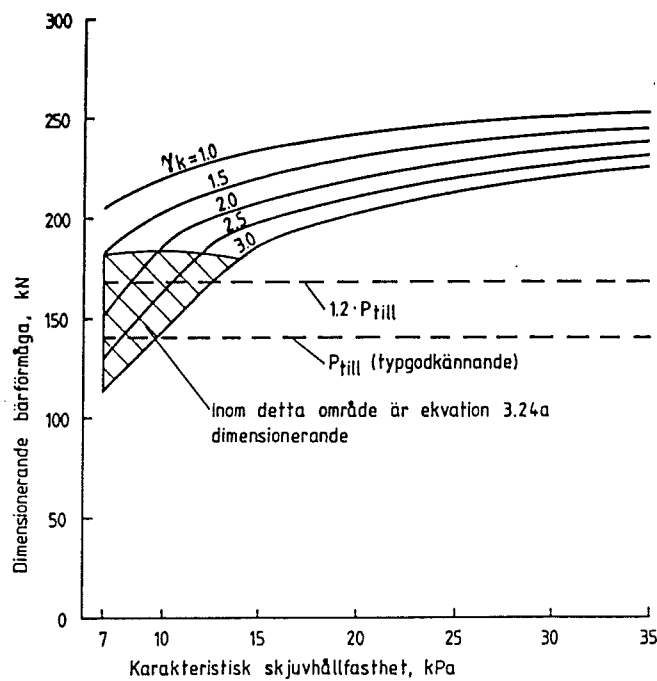
Figur 3.19 Dimensionerande bärförmåga för påle $\phi 60.3 \cdot 5.0$, $f_{yk} = 340$ MPa, $\gamma_n = 1.1$.



Figur 3.20 Dimensionerande bärförmåga för påle $\phi 76.1 \cdot 5.0$, $f_{yk} = 340$ MPa, $\gamma_n = 1.1$.



Figur 3.21 Dimensionerande bärförmåga för påle $\phi 88.9 \cdot 5.1$, $f_{yk} = 340$ MPa, $\gamma_n = 1.1$.



Figur 3.22 Dimensionerande bärförmåga för påle $\phi 76.1 \cdot 4.0$, $f_{yk} = 340$ MPa, $\gamma_n = 1.1$.

4 FÖRSLAG TILL KVALITETSSÄKRINGSPROGRAM FÖR TYPGODKÄNDA PÅLSYSTEM

4.1 INLEDNING

Kvalitetssäkringens (QA, Quality Assurance) mål är ytterst att säkerställa att utlovad dimensionerande last kan utnyttjas på varje topplatta, som överlämnas till slutanvändaren i ett pålningsprojekt.

Kvalitetssäkringen skall inriktas dels på själva pålningsutförandet, dels på inköp och tillverkning av pålmaterial, dels på övergripande systemfrågor av typen att i produktionen endast använda det material och den utrustning, som använts vid förprovning av systemet och vid definition av godkännandekriterier etc. För att säkerställa QA-arbetets status, förutsätts att det organiseras i de producerande bolagen parallellt med deras organisation för produktion och ekonomiskt ansvar.

För varje pålsystem förutsätts att en namngiven person blir kvalitetsansvarig. Denne skall däremot ej vara ekonomiskt ansvarig för produktionen av pålar och bör heller ej vara anställd av det företag som utför pålsystemet. Han ska likt en revisor granska och kontrollera att kvalitetsarbetet bedrivs enligt uppställda instruktioner och standards samt avge en årlig "revisionsberättelse" över kvalitetsarbetet.

Eftersom kvalitetssäkringen är en del av typgodkännandet för ett pålsystem, skall tillståndsmyndigheten - Boverket, eller den institution som Boverket utser - utöva tillsyn över kvalitetsarbetet för samtliga pålsystem genom att mottaga de årliga "revisionsberättelserna" och godta eller underkänna dem. Vidare förutsätts Boverket, eller den av Boverket utsedda institutionen, vid behov initiera och verka för ändrade eller nya krav.

I figur 4.1 visas samspelet mellan de inblandade parterna och personerna inom kvalitetssäkringsprogrammet.

I det följande presenteras de olika punkter som ett kvalitets-säkringsprogram för ett pålsystem skall innehålla.

4.2 KVALITETSSÄKRINGSPROGRAM

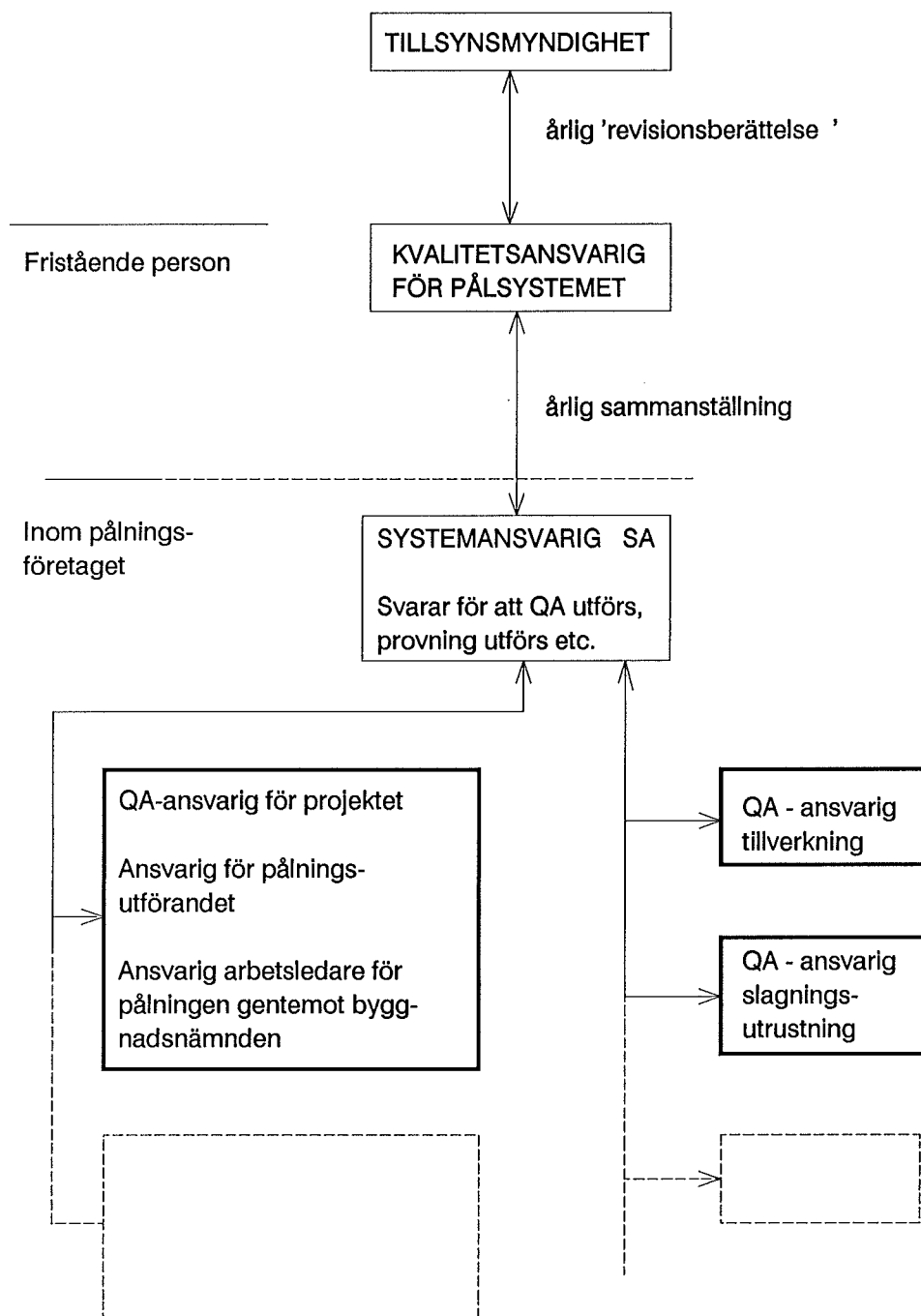
Kvalitetssäkringsprogrammet för ett pålsystem skall presenteras i en QA-manual som är en del av typgodkännandet. QA-manualen skall innehålla nedanstående punkter.

4.2.1 Beskrivning av pålsystem

Ett pålsystem består av:
(se även Sammanfattning)

- o Pålrör med angiven dimension, hållfasthet, rakhet och korrosionsskydd

- o Övriga tillbehör som pålskor, topplattor etc
- o Tillhörande slagningsutrustning
- o Kringutrustning, t ex rakhetsmätare, kapningsutrustning etc
- o Mätningar och provningar av pålssystemets relevanta tekniska egenskaper



Figur 4.1 Samspelet mellan ansvariga inom kvalitetssäkrings-programmet.

- o Kriterier för godkännande av utförd påle till pålsystemets dimensionerande bärformåga, "märkläst"
- o Beräkningsmodell dels för "märkläst", dels för dimensionerande bärformåga, i de fall generella kriterier och gränsvärden för godtagande ej innehålls
- o Organisation för utförande av systempålar
- o Personal med erfarenhet och kompetens att utföra systempålning
- o Kvalitetssäkringsprogram

4.2.2 Områden för kvalitetssäkring, QA

- o Organisation
- o Personal
- o Systemfrågor
- o Materialegenskaper
- o Materiegenskaper
- o Utförandeskedet
- o Dokumentation
- o Inköpsrutiner
- o Rutiner vid avvikelser

4.2.3 ORGANISATION

Pålsystemet tillhandahålls på marknaden i form av nedslagna pålar med garanterade egenskaper av ett bolag, som bl a ansvarar för att föreliggande kvalitetssäkringsprogram kontinuerligt följs.

Det förutsätts att någon myndighet (eller den myndigheten delegerar) utövar tillsyn, kontroll och revision av att kvalitetskontrollen utförs enligt programmet.

För pålsystemet skall en namngiven person vara kvalitetsansvarig. Hans uppgift är att upprätta QA-standards, -manualer och -instruktioner, samt att fortlöpande utöva kontroll av och tillsyn över att dessa följs vid produktion av pålsystemet.

I bolaget skall finnas en (eller flera med t ex geografiskt ansvar) systemansvarig person, SA, som i bolagets namn svarar för att QA utförs. SA svarar därtill direkt för att externa provningar utförs, journalförs och bedöms samt i förekommande fall för att åtgärder vidtas vid fel och avvikelse. SA fattar alla beslut angående pålsystemets användning med överskridande av gränsvärden etc.

Vidare skall det finnas en QA-ansvarig (eller flera) för bolagets tillverkningsprocesser för material och materiel. Den QA-ansvarige rapporterar till SA.

För varje projekt, där pålsystemet används, skall en namngiven person vara QA-ansvarig. Den QA-ansvarige för projektet rapporterar till SA.

4.2.4 Personal

:1 Kvalitetsansvarig

Den kvalitetsansvarige skall ha kunskap om och erfarenhet av QA för tekniska system. Han skall dessutom ha erforderlig fackkunskap om materialprovning, pålsystemet och dess användning.

Han skall i denna funktion godkännas av tillsynsmyndigheten. Funktionen i bolaget är vid sidan om linjeansvaret för produktionen och kan närmast liknas vid en revisors eller controllers.

:2 Systemansvarig, SA

SA skall ha dokumenterad teoretisk kunskap samt erfarenhet och teknisk kompetens för att ansvara för pålsystemets QA. SA skall ha linjeansvaret för produktionen av pålsystemet.

Erfarenheten och kompetensen skall bl a avse:

- o Relevanta "byggnormer", Nybyggnadsregler till PBL etc
- o Grundläggningsteknik
- o Geoteknik
- o Pålars funktion
- o Beräkningsmodellen, som ligger till grund för pålsystemets dimensionerande bärförmåga och tillhörande gränsvärden
- o Pålsystemets praktiska användning
- o Pålsystemets tillverkningsprocesser

:3 QA-ansvarig för projektet

Den projektansvarige skall ha erforderlig erfarenhet och kompetens samt ha erforderlig kunskap om hela pålsystemet.

Den projektansvarige skall vara ansvarig för hela pålningsutförandet samt bör även vara ansvarig arbetsledare för pålningen gentemot byggnadsnämnden.

Kompetenskraven omfattar bl a:

- o Förtrogenhet med "byggnormens" relevanta delar
- o Förtrogenhet med pålsystemets användning
- o Förtrogenhet med gränsvärden och kriterier inklusive kunskap om deras teoretiska bakgrund
- o Kunskap om grundläggningsteknik och geoteknik

:4 QA-ansvarig för tillverkning

QA-ansvarig för tillverkning skall ha erforderlig erfarenhet och kompetens för dessa uppgifter samt erforderlig kunskap om hela pålsystemet.

:5 Övrig projektpersonal

Vid utförande av pålsystempålar skall i varje projekt delta minst en yrkesman med ett års erfarenhet av detta slags pålar och med genomgången utbildning om pålsystemet och dess QA.

:6 Övrig tillverkningspersonal

Tillverkningspersonalen skall ha erforderlig yrkesskicklighet och genomgått utbildning om pålsystemet och dess QA.

4.2.5 Systemfrågor**:1 Pålsystem**

Pålsystemet ska vara utformat med dimensionerande bärförmåga och gränsvärden för:

- o maxsjunkning vid stoppslagning, stoppslagningskriterier för pålsystemet väljs enligt riktlinjer i kapitel 2
- o stukgräns i stålet
- o samhörande gränsvärden för initialkrokighet och skjuvhållfasthet i omgivande mark. Dimensionerande bärförmåga beräknas enligt metoder i avsnitt 3.2.

:2 Kriterier

Kriterier enligt 4.2.5:1 ska uppfyllas med kontrollåtgärder enligt detta QA-program.

:3 Utprovning

Pålsystemet ska vara erforderligt utprovat med provpålning, provbelastning och övrig fullskalemätning omfattande:

- o stoppkriterium (fullskaleprov på pålar i olika geotekniska förhållanden, slagna till valt kriterium)
- o kraftmätning i påle under slagning vid stoppsjunkning
- o mätning av slagningsförluster i skarv och efter flera skarvar.

:4 Anvisning

Pålsystemet ska ha erforderliga anvisningar för slutanvändaren, framför allt beträffande gränsdragningen mellan pålsystemet och normal, objektsbunden projektering. Pålsystemet ska innehålla anvisningar om nödvändiga respektive lämpliga föreskrifter och arbetsritningar, som projektören skall/bör utforma för att systempålen skall fungera som avsett i det färdiga byggnadsverket. Nödvändiga anvisningar är gällande Byggnorm, säkerhetsklass m m som utgör bas för dimensionerande märklast samt krav på geoteknisk undersökning etc. Lämpliga anvisningar är t ex sådana, som avser korta pålar eller pålar i särskilt korrosiv miljö.

4.2.6 Materialegenskaper

:1 Hållfasthet

Rätt stålqualität dokumenteras med verkscertifikat för samtliga leveranser enligt accepterad provningsnorm (gäller alla komponenter i pålsystemet).

Rätt stukgräns provas och dokumenteras genom tryckprov på ett stickprov per 2000 meter levererat pålmaterial från rörverket. Om möjligt ska stickprovsbitarna kopplas till rörverkets tillverkning, så att prov ur samma råmaterial till verket kan jämföras med varandra. Syftet är att kunna identifiera och särbehandla en eventuell rörsats med otillfredsställande provvärden. Provningsen utförs enligt Appendix A.

Rätt härdning av bergdubb kontrolleras och dokumenteras enligt accepterad provningsnorm på stickprov (1 per 1000 stycken).

:2 Korrosionsskydd

Tjockleken på zinkskikt kontrolleras och dokumenteras enligt accepterad provningsnorm, t ex SS 3583.

:3 Dimensioner

:31 Pålrör

Rätt ytterdiameter kontrolleras genom uppmätning på stickprov (1 per 2000 styck) ur alla rörleveranser. Minst fyra diameterr mätts på varje mätsektion. Samtliga skall ligga inom pålsystemets angivna tolerans.

Rätt godstjocklek kontrolleras genom uppmätning på stickprov (1 per 2000 styck) ur alla rörleveranser. Godstjockleken mäts på minst fyra ställen, jämnt fördelade runt omkretsen. Samtliga mätningar skall ligga inom pålsystemets angivna tolerans.

Rätt rakhet kontrolleras genom mätning på 1 stickprov per 2000 meter pålrör. Mätning utförs genom att ett provstycke läggs upp på stöd med två meters avstånd och kontrolleras genom mätning mot rätskiva med två meters längd. Provstycket rullas runt så att mätning sker av största avstånd. Max avstånd mellan rätskiva och pålrör får uppgå till vad som motsvarar att röret är cirkelkrökt med pålsystemets dimensionerande gränsvärde för initialkrokighet.

Kapsnittens vinkelräthet kontrolleras genom kontinuerlig okulär besiktning av fixturer, inställningar etc i kapmaskinen. Vidare kontrolleras maskinen okulärt beträffande slitage. Samtliga utförda kapsnitt avsynas beträffande grader, onormala klingspår etc.

:32 Hylsor

Rätt innerdiameter och godstjocklek kontrolleras genom uppmätning på stickprov. Frekvens och krav enligt :31 ovan.

Rätt längd och fasning kontrolleras genom mätning på stickprov (1 per 2000 styck) ur alla leveranser. Samtliga mätningar på en leverans skall ligga inom pålsystemets angivna toleranser.

:4 Sammansättning

Konstruktionssvetsar i skarvar kontrolleras med röntgen enligt accepterad provningsmetod. Provning utförs på 1 per 1000 styck ur varje leverans. Samtliga skall uppfylla provningsmetodens godkännandekrav.

Svetsar i samtliga pålskor och topplåtar etc granskas okulärt.

4.2.7 Materielegenskaper

:1 Slagningsutrustning

All slagningsutrustning (hejare inkl ev dynor, styrningar etc, kraftkälla och slangar med kopplingar) skall överensstämma med den, som användes vid systemprovning enligt 4.2.5:3.

Kontrollslagning utförs med all utrustning minst 1 gång per 1000 drifttimmar dock minst en gång per kalenderår. Kontrollslagning sker genom att en påle drivs på en provplats med kända geotekniska förhållanden varvid drivningshastigheten omedelbart före och under stoppslagning mäts och dokumenteras. Avvikelsen från förväntat värde får uppgå till max 25%.

Alternativt mäts stötkraften direkt i en tillräckligt lång påle under pågående stoppslagning och jämförs med den motsvarande mätning, som legat till grund för typgodkännandet. Avvikelsen får uppgå till max 20%.

:2 Hejare med tillbehör

Alla hejare kontrolleras i samband med service och reparation samt minst 1 gång per 1000 drifttimmar med avseende på slitage, etc. Vidare mäts vid varje kontrolltillfälle slagfrekvensen vid korrekt inställt arbetstryck- och flöde. Avvikelsen får uppgå till högst 15% från nominellt värde.

:3 Kraftkälla

Alla kraftkällor kontrolleras i samband med service och reparation samt minst 1 gång per 1000 drifttimmar med avseende på slitage samt funktion hos reglerutrustning och mätare.

:4 Kaputrustning

Den utrustning, som används för att färdigkapa pålar på arbetsplatser, granskas okulärt före varje projekt med avseende på förslitning i fixturer eller annat, som påverkar kapsnittets vinkelräthet eller planhet.

:5 Utrustning för rakhetsmätning

Utrustningens överensstämmelse med specifikationer och dess funktion kontrolleras omedelbart före användning.

4.2.8 Utförandeskedet**:1 Kontroll av arbetshandlingar**

Den QA-ansvarige för projektet kontrollerar i förväg:

- o att projekteringen uppfyller pålsystemets krav (dimensionerande bärförmåga, geotekniska förhållanden etc) och rapporterar eventuella avvikelser till SA för beslut om åtgärder.
- o om arbetsritningarna innehåller krav på specialutförande (dragarmering, särskild topplatta eller dylikt).
- o om projekteringen är rimlig beträffande pålens anslutning till bärande konstruktioner, fysiska förhållanden för pålningen etc och kontaktar i motsatt fall projektören.
- o att bygglov finns, om projektet kräver sådant, samt att ansvarig arbetsledare är anmäld till och godkänd av Byggnadsnämnden.

:2 Kontroll under pålningen

Den QA-ansvarige för projektet kontrollerar:

- o att använd utrustning överensstämmer med den i pålsystemet specificerade

- o att pålmaterialet är det specificerade (märkning av pålelement resp skotyp och topplatta enligt arbetsritning)
- o att pålarna slås i rätt antal, på rätt plats och i rätt lutning enligt arbetsritning
- o att skarvar utformas enligt specifikation. Speciellt kontrolleras att skarvar vid drivning i lös jord eller under montering i luft eller vatten slås ihop och att de säkras mot isärslagning (-glidning) innan pålskon möter erforderligt motstånd
- o att stoppslagning utförs enligt typkrav
- o att efterslagning utförs enligt typkrav och arbetsritning
- o att ev specialutföranden enligt arbetsritning utförs
- o att pålarna kapas vinkelrätt och på avsedd höjd enligt arbetsritning
- o att pålspetsen kommer på rimlig nivå i förhållande till grundförhållandena och intillstående pålar
- o att rakhetskrav uppfylls
- o att ev avvikelser från typkrav eller överskridande av dimensionerande gränsvärden rapporteras till SA, att beslut om åtgärder fattas av SA samt att åtgärderna vidtas och dokumenteras
- o att ev avvikelser från förväntat utförande dokumenteras och i förekommande fall analyseras
- o att protokoll upprättas över varje påle och tillställs Byggnadsnämnd (i förekommande fall) och beställare.

4.2.9 Dokumentation

:1 Inköp

SA ansvarar för:

- o att bolaget journalför sina inköp av material till pål-systemet
- o att certifikat över externt utförda provningar åtföljer varje leverans
- o att leveransens godtagande/underkännande dokumenteras samt att i förekommande fall åtgärder vid underkännande dokumenteras

:2 Produktion

SA ansvarar för:

- o att bolaget följer upp och journalför sin produktion av systempålar, bl a som underlag för provningsfrekvens
- o att produktionen dokumenteras projektvis i form av pålprotokoll med angivande av ev avvikelser från typutförandet samt dokumentation av åtgärder i anledning därav. Denna dokumentation arkiveras i 10 år.

:3 Intern provning

SA ansvarar för:

- o att internt utförd stickprovskontroll sker i omfattning enligt 4.2.6:3 och att provningsfrekvensen stäms av mot journaler över materialinköp och produktion.
- o att godkännande/underkännande av leverans eller motsvarande med utgångspunkt från provningsresultaten dokumenteras samt att i förekommande fall åtgärder vid underkännande dokumenteras.

:4 Materialprovning

SA ansvarar för:

- o att provningar sker i omfattning enligt 4.2.6:1 och dokumenteras med angivande av godkännande/underkännande samt i förekommande fall åtgärder vid underkännande.

:5 Redovisning

SA ansvarar för att journaler, provningsresultat etc arkiveras i minst 5 år. SA upprättar kalenderårsvis en sammanställning över:

- o materialinköp
- o produktion
- o utförda provningar
- o provresultat samt vidtagna åtgärder vid underkända prov
- o provningsfrekvens i förhållande till inköp och produktion.

Sammanställningen revideras av den kvalitetsansvarige för pålsystemet. Denne fogar till sammanställningen en rapport över hur QA bedrivits, vilka ändringar i rutiner, som ev införts, samt sin sammanfattande bedömning av QA-arbetet - ett slags revisionsrapport.

Sammanställningen inges till tillsynsmyndigheten och skall där behandlas förtroligt.

Dokumentationen skall vara omedelbart tillgänglig på bolaget för tillsynsmyndighetens representant.

4.2.10 Inköpsrutiner

SA ansvarar för att bolaget vid alla inköp till pålsystemet specificerar dimensionerande kvaliteter och dimensioner samt att leveransen i förekommande fall även omfattar dokumenterad provning.

Inköpsavtal skall vara skriftliga.

4.2.11 Rutiner vid avvikelser

Om leverans av exempelvis pålrör vid tryckprovning eller dimensionskontroll inte uppfyller krav på stukgräns eller dimensioner, skall leveransen specialmärkas och tas ur produktionen. Avvikelsen rapporteras till SA. SA beslutar om åtgärder samt dokumenterar vilka åtgärder som vidtas.

Vid den årliga redovisningen till den kvalitetsansvarige för pålsystemet anges vilka åtgärder som vidtagits med den underkända leveransen.

Samma rutiner skall gälla vid avvikelser för pålskor, bergdubbar och pålskarvar.

REFERENSER

- Andersson, J., Olsson, L. och Stille, H., 1984. Beslutsmodeller för förundersökningar. Bergytebestämning med kriging. BeFo 81:1/84.
- BSK. Bestämmelser för stålkonstruktioner. Statens Planverk 1987.
- Bergfeldt, A., 1957. The axial and lateral load bearing capacity and failure by buckling of piles in soft clay. Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. London, 1957.
- Bergfeldt, A., 1963. Armeringsstänger som pålar. Föredrag vid armeringsdagen den 8 nov 1963.
- Berggren, B., 1981. Grävpålar på friktionsjord - sättningar och bärförmåga. Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Berglars, B., Hellman, L. och Rehnman, S-E., 1984. Stålpålars bärförmåga och stoppslagningskrav. Bygg & Teknik 7/1984.
- Bernander, S. och Svensk, I., 1970. Pålars bärförmåga i elastiskt medium under hänsyntagande till initialkrökning och egenspanningar i pålmaterialet. IVA Pålkommisionen. Särtryck och preliminära rapporter nr 23.
- Bjerrum, L., 1959. Norska erfarenheter av stålpålar till berg. Byggmästaren 1959, nr 1.
- Bohm, H. och Stjerngren, U., 1981. Grundförstärkning i Gamla Stan, Stockholm. BFR R39:1981.
- Brandtzaeg, A. och Harboe, E., 1957. Buckling tests of slender steel piles in soft, quick clay. International Conference on Soil Mechanics, 4. London. Proc.b.2 s 19-23.
- Bredenberg, H., 1980. Stötvågsdämpning i pålar, BFR R26:1980.
- Bredenberg, H., 1982. Provb belastning av slanka stålpålar i lös lera. Resultat av belastningsförsök. Byggeforskningsrådet R53:1982.
- Bredenberg, H., 1982. Test loading of point bearing piles. Doktorsavhandling, Tekniska högskolan i Stockholm.
- Briaud, J.L., Smith, T.D. och Meyer, B., 1982. Design of laterally loaded piles using pressuremeter test results. Symp. on the pressuremeter and its main applications, Paris 1982.
- Ekdahl, U., 1987. Knäckning av stålpålar. Föredrag vid IVA Pålkommisionens årsmöte 1987.

- Eresund, S., 1972. Sättningar hos cirkulära, stela fundament på friktionsjord. Inverkan av dynamisk förbelastning. Statens institut för Byggnadsforskning, Stockholm, Rapport R41:1972.
- Ersvik, O. och Wennerstrand, J., 1987. Studie av krysspålar i lera med hänsyn tagen till andra ordningens effekter och olinjära materialegenskaper för stål och lera. Stockholm 1987.
- Fjellkner, G., 1977. Stålpålars bärförmåga. IVA Pålkommisionen. Meddelande nr 16, 1977.
- Handboken Bygg. Konstruktionsteknik. Liberförlag Stockholm 1985.
- Hansbo, S. 1981. Grundläggning av byggnader och maskinfundament.
- Heteny, M., 1961. Beams on elastic foundation. Michigan press, 1961.
- Imai, T. och Konno, M., 1976. Relations between LLT measurement results and soil engineering properties. Chapter 5 OYO Technical Note TN-13, 1976.
- Kooijman, A.P. och Vermeer, P.A., 1988. Elastoplastic analysis of laterally loaded piles. Num. Methods in Geomechanics, Innsbruck 1988.
- Lysmer, J och Richart, F.E., 1966. Dynamic response of footings to vertical loading. Soil Mech. and Found. Div. Proc. ASCE vol 92, No. SM1, 1966.
- Olsson, L., 1986. Användning av β - metoden i geotekniken. Doktorsavhandling Tekniska högskolan i Stockholm, 1986.
- Randolph, M.F och Houlsby, G.T., 1984. The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil. Geotechnique 34. No 4 613-623.
- Rinkert, A., 1960. Knäckning av stålpålar. Byggmästaren nr 1, Vol. 39, 1960.
- Stille, H. et al., 1976. Stålpålar i lera. Rapport JOB No 4. Inst. för jord- och Bergmekanik, KTH.
- Stille, H och Lundqvist, G., 1977. Stålpåle i lera, Kompletterande provning.

APPENDIX A

BESTÄMNING AV STUKGRÄNS FÖR PÅLRÖR

THE ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF AERONAUTICAL
STRUCTURES AND MATERIAL

S-100 44 STOCKHOLM
SWEDEN

Axial loading in compression
of piles made from high strength
thin walled tubes

Stockholm february 1989



Karl-Axel Olsson
D.Sc.



Mats Roslund
M.Sc.

<u>CONTENTS</u>	page
Introduction	3
Test procedure	4
The edges	6
Results from compression tests	9
P- ϵ diagrams	10
Summary	12
Test program	13
The test report format	14

Introduction

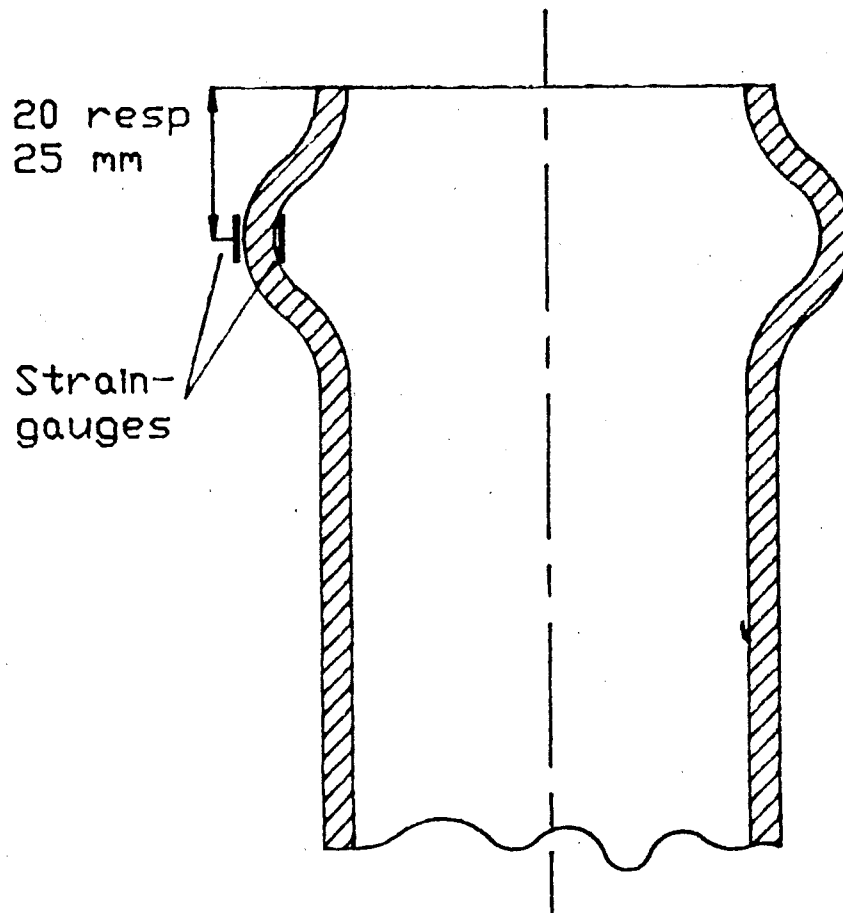
The following investigation has been undertaken to determine if there is an easy, unambiguous way to determine the "yield limit" for "thin walled tubes" commonly used in light weight pile systems. 3" and 4" steel tubes, were supplied by AB Grundförstärkningar for the initial tests,

Axial loading in compression has been conducted for specimens with length diameter ratio of 1.0 and 2.0. Different types of buckling phenomena have been studied, and in two cases, the specimens were instrumented with strain gauges. In the rest of the cases, only the load-deformation-curves ($P - \delta$) were determined.



TEST PROCEDURE.

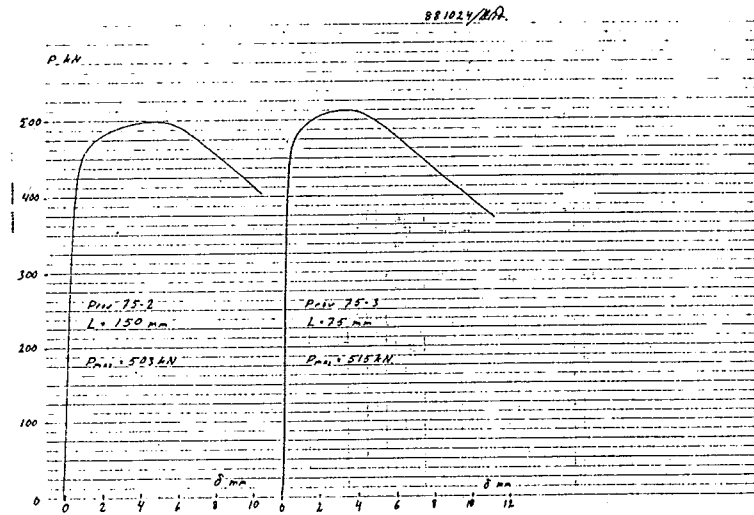
Tests were done on pipes with length diameter ratio of 1.0 and 2.0. The tests were done using a 2000 kN compression testing machine with constant deformation speed of 1 mm/min. The test specimen was placed between the parallel crossheads in the compression testing machine. The edge behaves as a clamped boundary condition. The load is measured with four load cells under the lower crosshead, with an accuracy better than 0.5 % of the actual load. The displacement of the crosshead was measured with a dial indicator (Showa) with an accuracy of ± 0.005 mm. Strain was measured in tests ϕ 75-4 and ϕ 100-4 using Showa strain gauges N11FA5-120-11 ($R = 120 \Omega$, gauge factor 2.05). Gauges were bonded to both the inner and outer surface, 20 mm and 25 mm from the ends of the specimens for the 75 mm and 100 mm pipe respectively



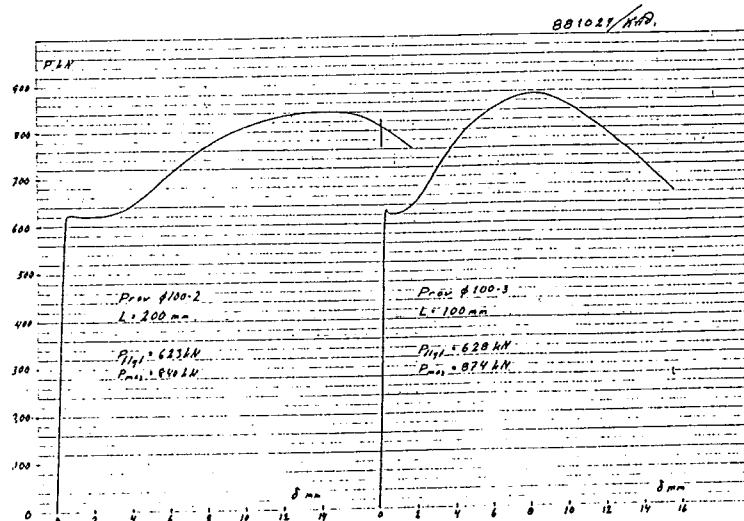
The strain gauges were connected to an amplifier (Betatron 8000) and an 8-channel recorder (W+W 500).

A:5

Note that there is higher yield and ultimate loads for the shorter pipes due to the stiffening effects from the contact surface at the ends of the pipe.



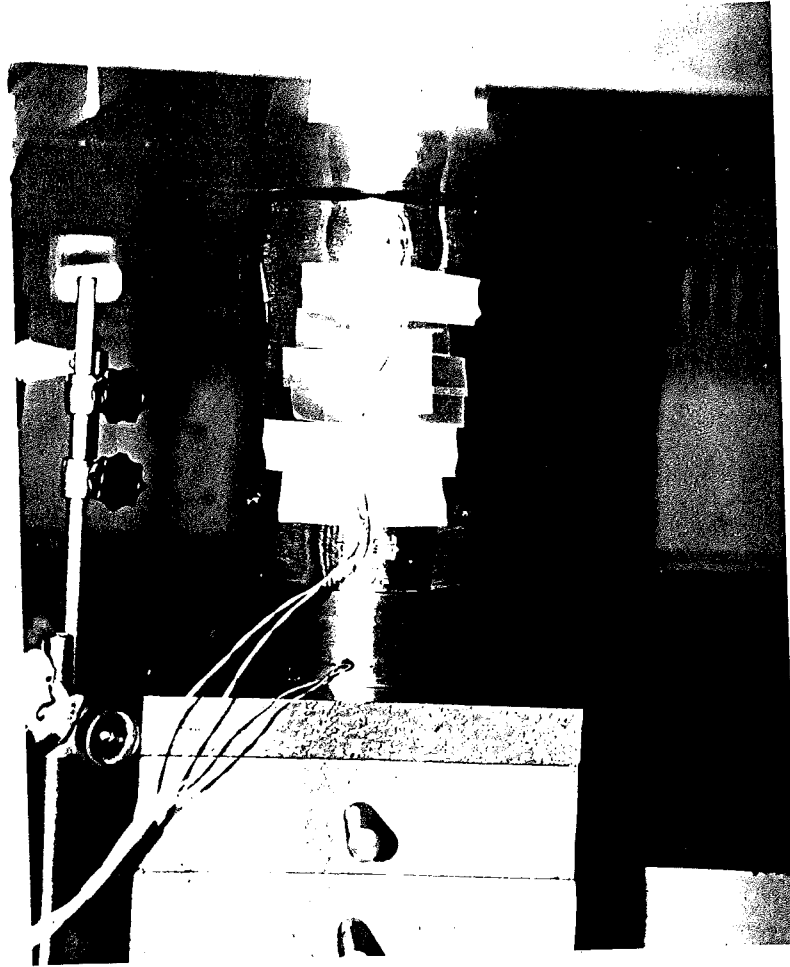
Pipes ϕ 75 mm, length 150 and 75 mm



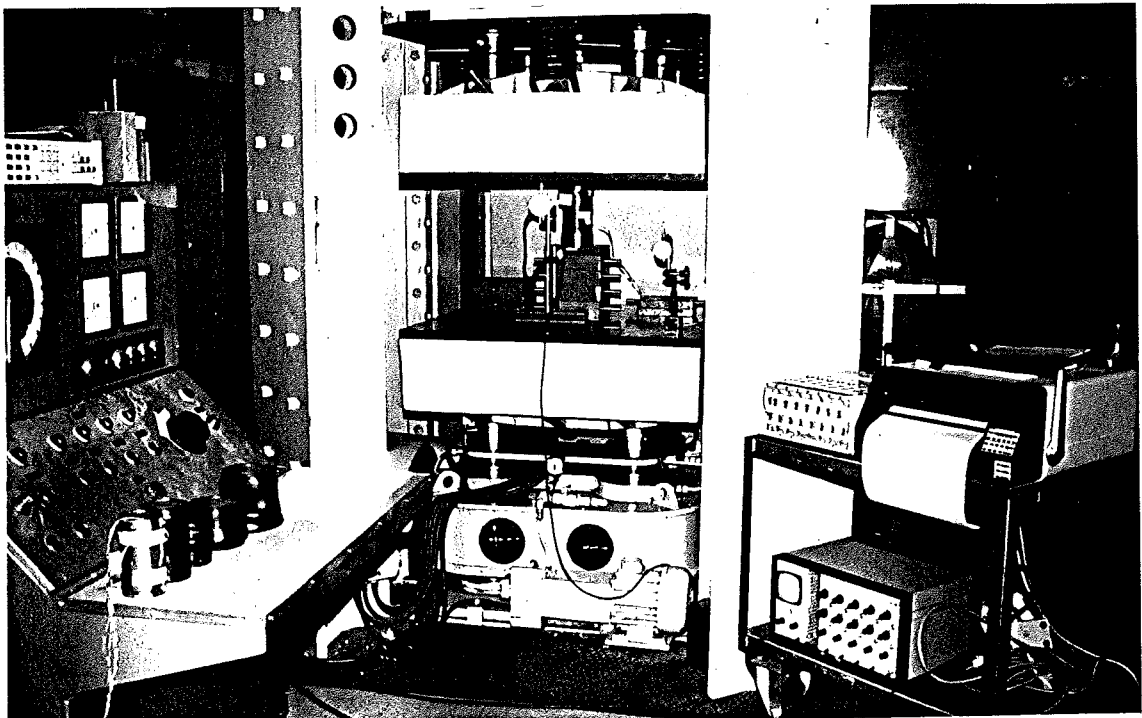
Pipes ϕ 100 mm, length 200 and 100 mm

The edges.

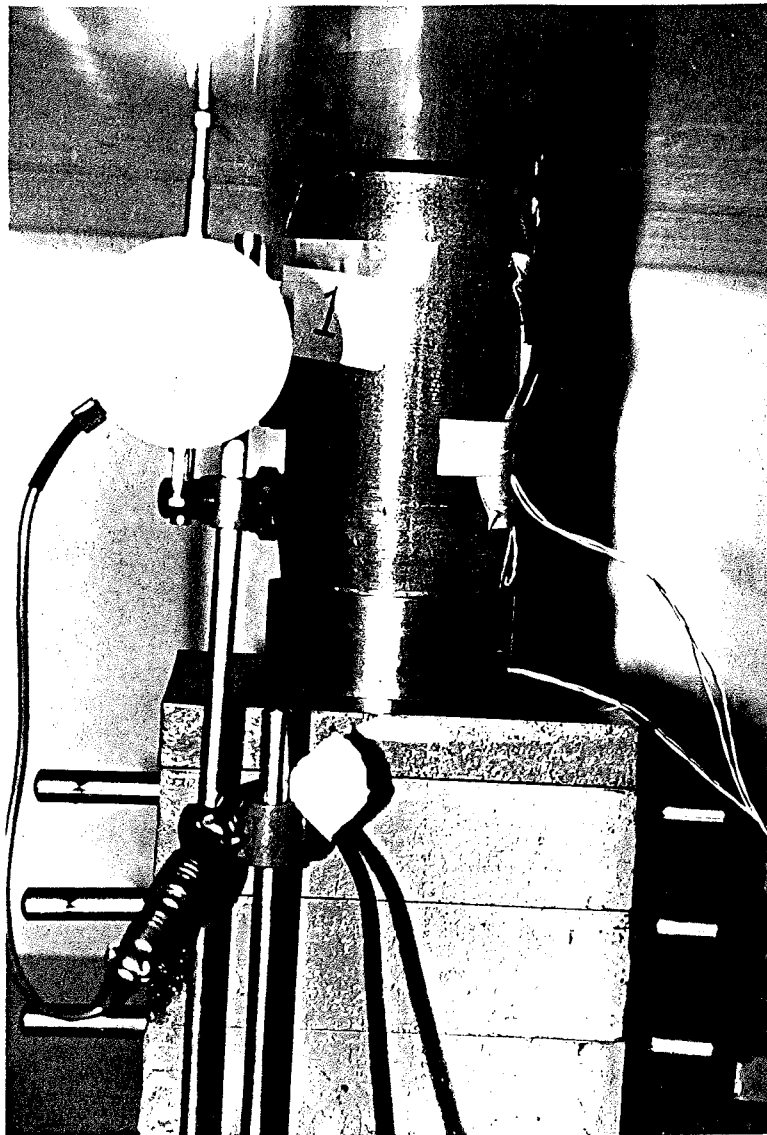
The pipe edges were face-ground. Strain gauges were mounted on both the inside and the outside of the pipes.



The pipe was placed in a 2000 kN compression testing machine.

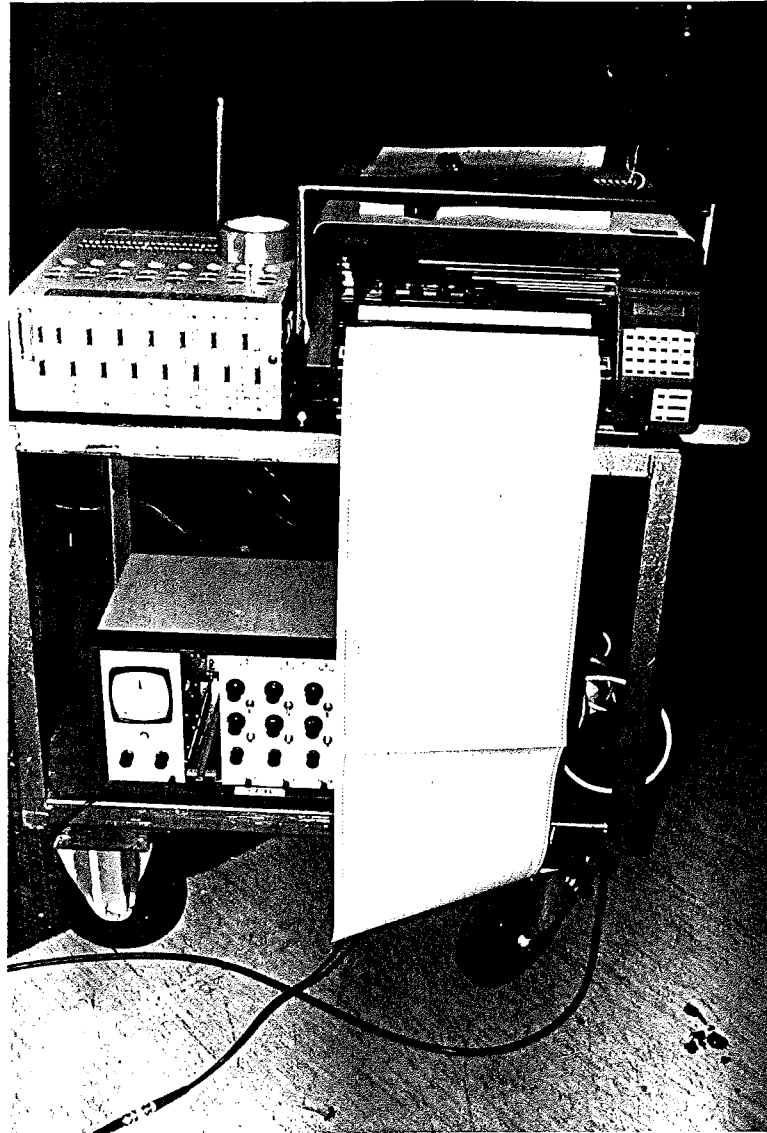


A dial indicator (Showa) was placed between the plane-parallel plates of the machine, to measure the total deformation δ .



The deformation speed, was set to 1 mm/min. The results were recorded on an 8-channel plotter type W+W 500 sp.

The load cells in the test machine were connected to and controlled the paper feed while the dial-indicator and the strain gauges were connected to and controlled the pens in the recorder.

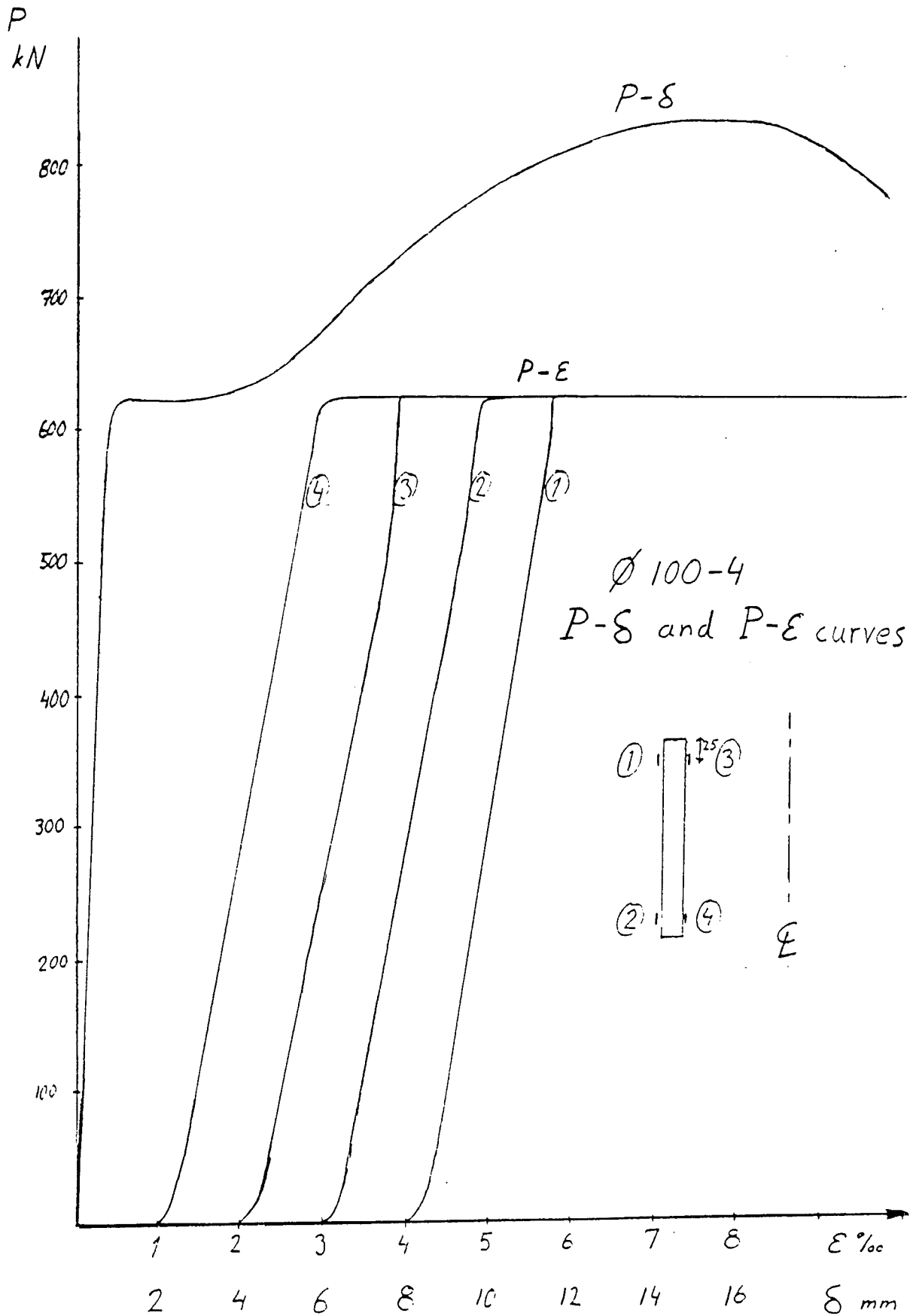


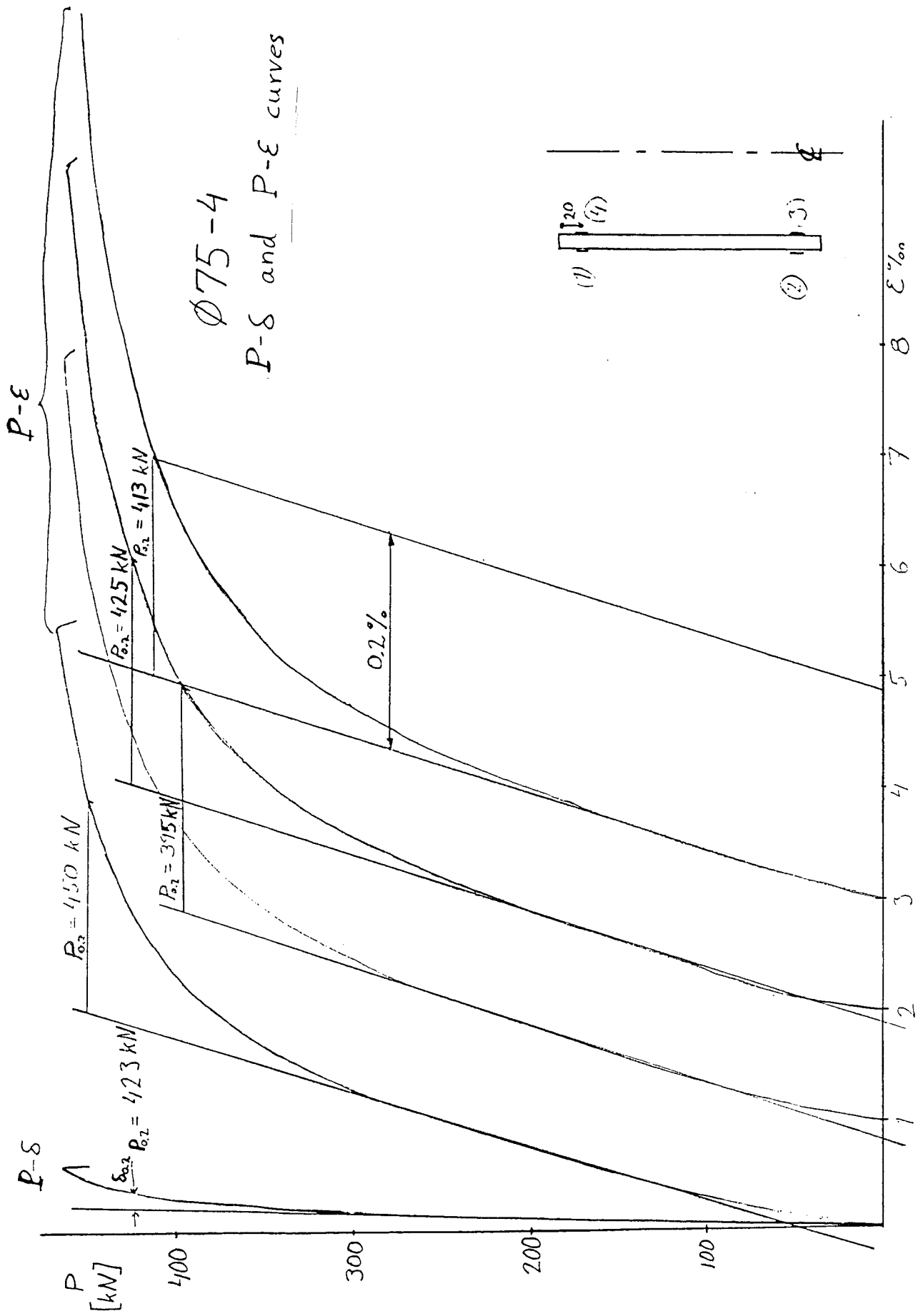
Results from the tests with the ϕ 100 mm pipes shows that P_{yield} is the critical load. The critical load is lower than P_{yield} For the ϕ 75 mm pipes. Instead of P_{yield} the value $P_{0.2}$ is reported which is the force necessary to deform the pipe 0.2 %. During buckling, the strain gauges were effected by the local buckling behavior, but the mean of all the strain gauges agreed with the dial-indicator data.

Results from compression tests.

date	batch	Length	D _{out}	D _{in}	D _{mean}	t	A	P _{yield}	σ_{yield}	P _{max}	σ_{max}
		mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	kN	MPa	kN	MPa
09 23	$\phi 75-1$	150	76.7	68.1	72.4	4.3	920			510	554
10 24	$\phi 75-2$	150	76.7	68.1	72.4	4.3	920			503	547
10 24	$\phi 75-3$	75	76.7	68.1	72.4	4.3	920			515	560
11 11	$\phi 75-4^*$	150.5	76.7	68.3	72.5	4.2	957			520	543
09 23	$\phi 100-1$	200	101.8	90.4	96.1	5.7	1721	618	359	843	490
10 24	$\phi 100-2$	200	101.8	90.4	96.1	5.7	1730	623	360	840	485
10 24	$\phi 100-3$	100	102.0	90.4	96.2	5.8	1753	628	358	874	498
11 11	$\phi 100-4^*$	200	101.8	90.2	96.0	5.8	1749	600	343	810	463

* with strain gauges





Summary:

The P- δ diagrams are totally different for the two pile dimensions. The $\phi 100$ piles have a distinct P_{yield} -level. $P_{\text{crit}} < P_{\text{yield}}$ for the $\phi 75$ piles, thus instead of P_{yield} , another significant level must be selected. It was possible to decide the $\sigma_{0.2}$ -limit, by mounting strain gauges on both inner and outer surface of the pipes. $\sigma_{0.2}$ is the stress that gives the specimen a permanent deformation of 0.2 %. The total deformation of the specimen was determined by a dial indicator. The dial indicator gave the same 0.2%-level as the mean value of the strain gauge results, indicating that use of a dial indicator to determine $\sigma_{0.2}$ is acceptable.

Test program for steel pipes, for use as foundation piles.

While testing the compression strength:

- the length of the specimens are two times the diameter.
- The edges must be plane-parallel.
- The crossheads must be parallel.
- The compression test machine must have a constant deformation speed to avoid collapse of the specimen when reaching P_{crit} .
- The deformation speed will be held constant at 1 mm/min.
- The deformation δ will be determined by a dial indicator.

In the tests, P_{yield} , P_{max} and $\delta_{P_{max}}$ will be recorded in a P- δ -diagram. If P_{crit} is lower than P_{yield} , $P_{0.2}$ should be used instead. $P_{0.2}$ is the force that gives the specimen a permanent deformation of 0.2 %.

The test report format is as follows:

1. Front page with reference to this report and information on dimensions, date of testing and the signature of the person conducting the test.

2. Tables like this:

Pipes ϕ *** mm Length *** mm				
Batch	nr	P _{yield} kN	P _{max} kN	$\delta_{P_{max}}$ mm
xxxxxxx	1	***	***	***
	2	***	***	***
	.	.	.	.
	.	.	.	.
	.	.	.	.
	n	***	***	***
Mean value		***	***	***
Standard deviation		**	**	**
xxxxxxx	1	***	***	***
	2	***	***	***
	.	.	.	.
	.	.	.	.
	.	.	.	.

3. P- δ curves from all tests

APPENDIX B

B.1 INKLINOMETERMÄTNING AV RÖRPÅLAR PÅ OLIKA ARBETSPLATSER

Inom SBUF-projektet har befintliga inklinometermätningar utförda i rörpålar inom olika pålningsprojekt sammanställts. Dessa mätningar har kompletterats med mätningar på några nya arbetsplatser. I detta appendix redovisas mätningarna. I tabell B1 och B2 redovisas utvärderad krökningsradie på längden 2.0 m för påldelen i lera respektive minsta krökningsradien för pålarna slagna helt i fyllning och friktionsmaterial.

Tabell B1 Utvärderad minsta krökningsradie på längden 2.0 m i den del av pålen som omges av lera.

Plats, påltyp, skarvavstånd jordprofil, slagningsutrustning.	Kröknings- radie.
Kv Katthavet, Stockholm Bjurströmspåle ø 88.9 * 5.1 mm 9 st Skarvavstånd 1.5 m 3 - 6 m friktionsjord 3 - 5 m lera 2 - 5 m friktionsjord morän Hejare Krupp 110.	108 - 254 m
Kv Fröja, Uppsala Bjurströmspåle ø 88.9 * 5.1 mm 2 st Skarvavstånd 2.0 m 1 - 2 m torrskorpelera 17 - 18 m lera 3 - 4 m friktionsjord Hejare Krupp 110.	89 - 113 m
Kv Svetsaren, Solna Stålplastpåle ø 101.6 * 5.6 mm 8 st Skarvavstånd 2.0 m 2 m fyllning 1 - 2 m lera 3 - 5 m friktionsjord morän. Hejare Tex 250.	105 - 373 m

Tabell B2 Utvärderad minsta krökningsradie på längden
2.0 m för pålar slagna i fyllning och friktions-
jord.

Plats, påltyp, skarvavstånd, slagningsutrustning.	krökningsradie
--	----------------

Karlavägen, Sundbyberg
Stålplastpåle
ø 76.1 * 4.0 mm
Skarvavstånd 1.0 m.
Hejare Tex 40.

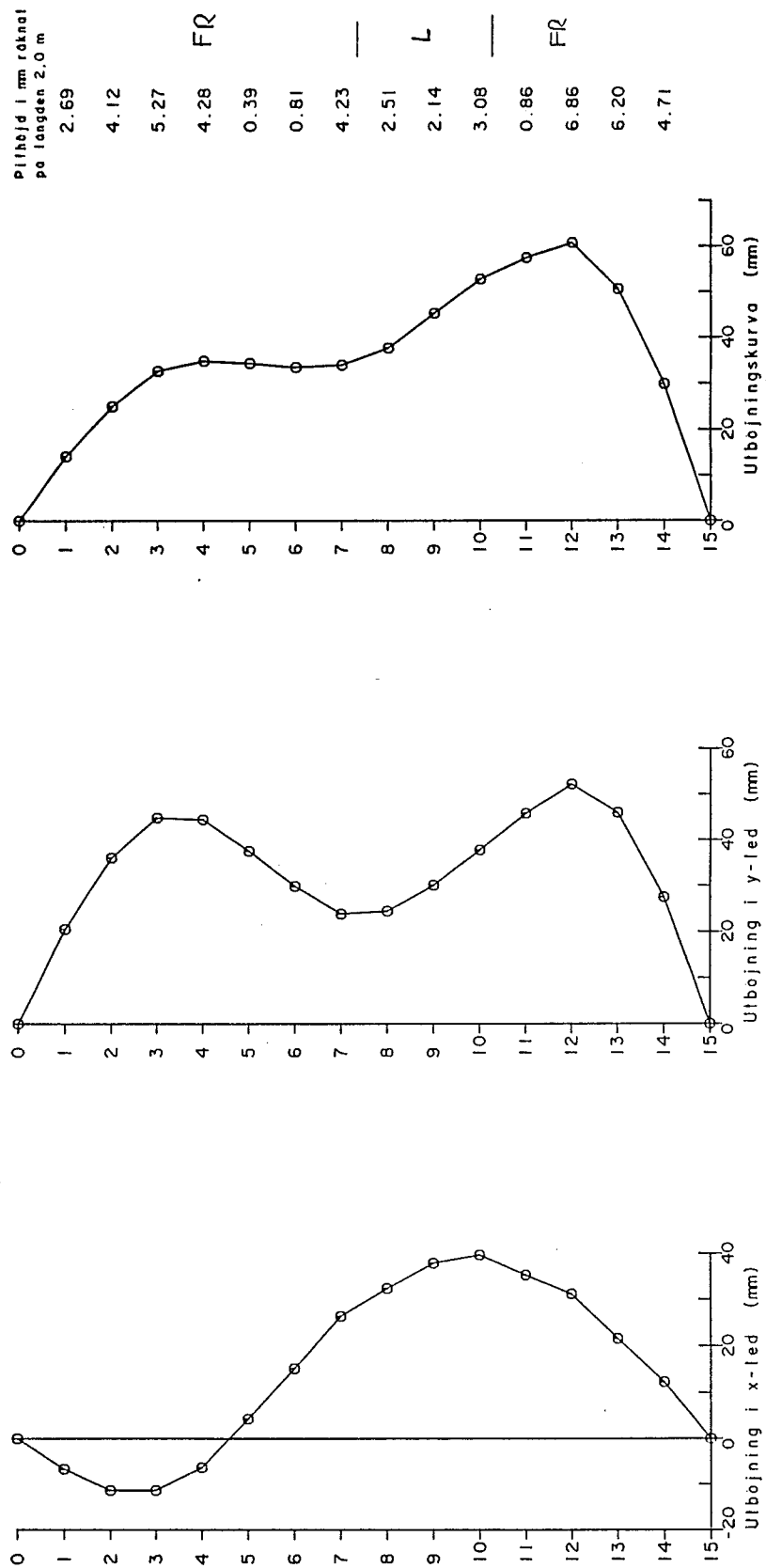
57 - 195 m

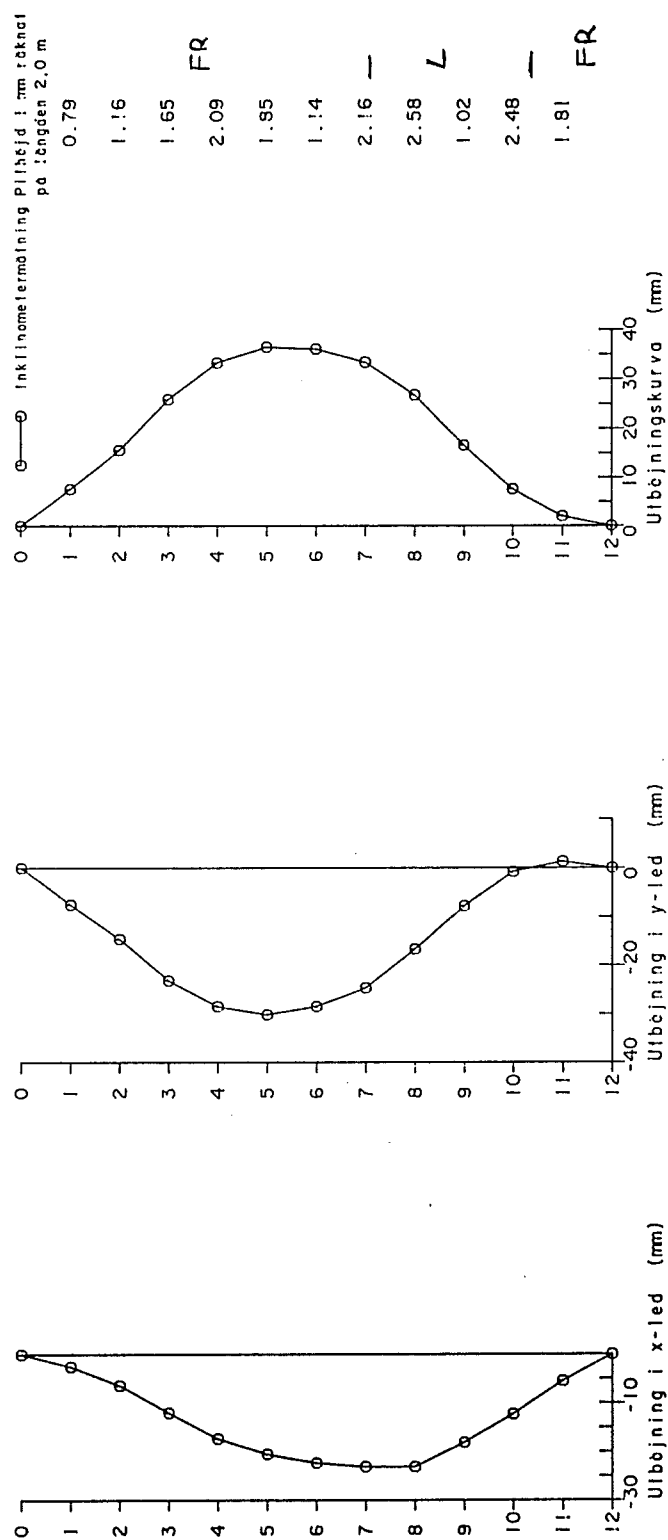
Kv Pyramus, Stockholm
Bjurströmspåle
ø 76.1 * 5.0 mm
Skarvavstånd 1.0 m.
Hejare Krupp 110.

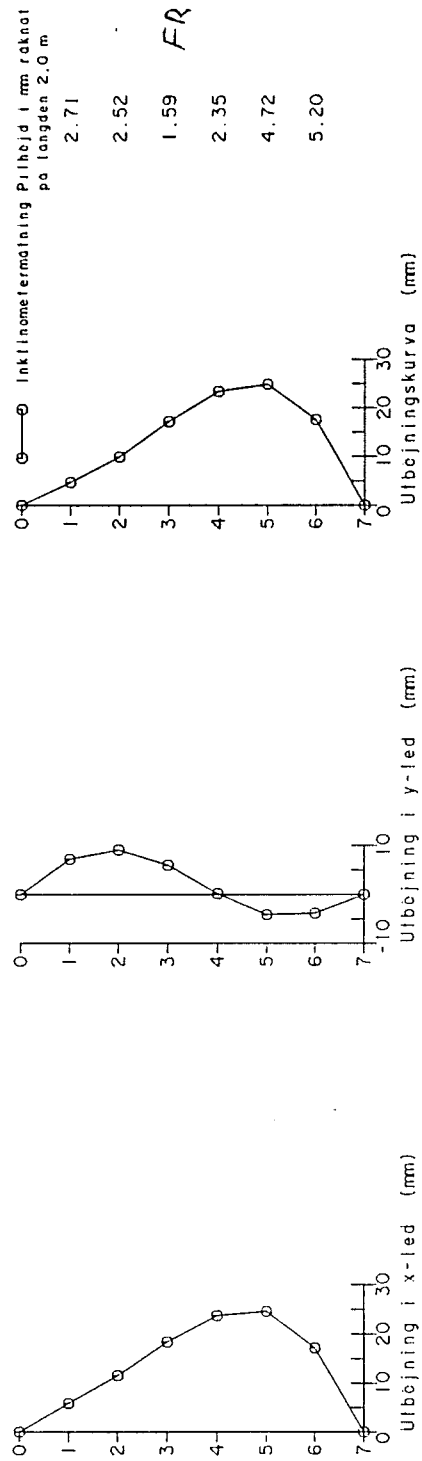
28 - 95 m

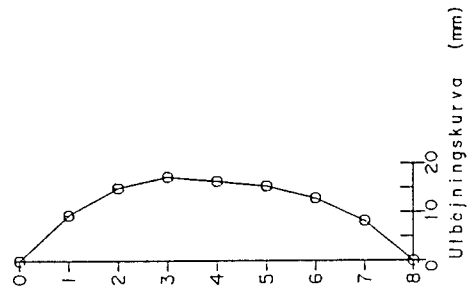
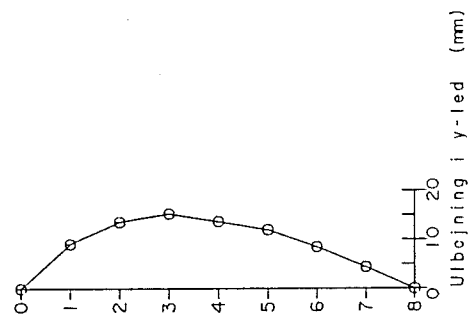
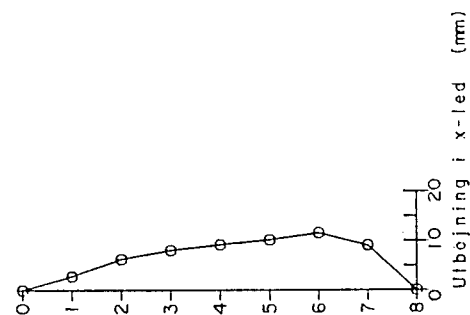
INKLINOMETERREDOVISNING

KV. KATTHAVET NR 6 PALE 350



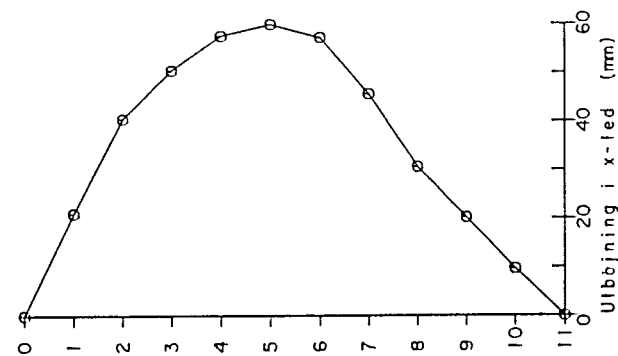
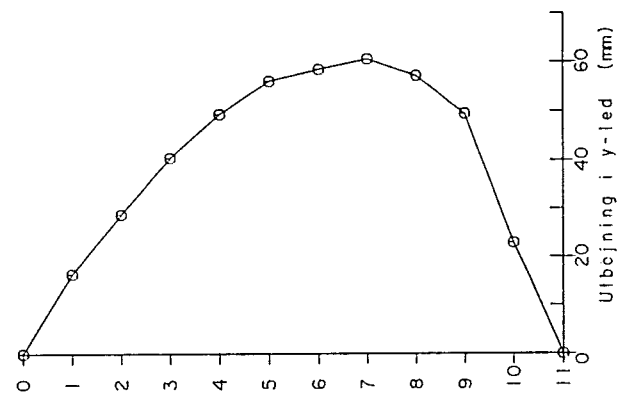
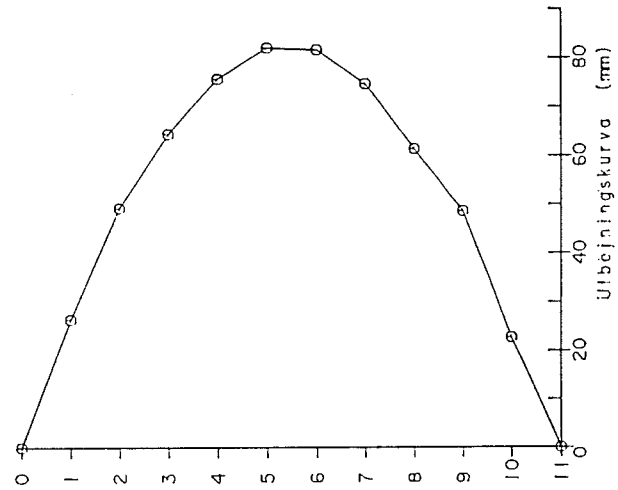






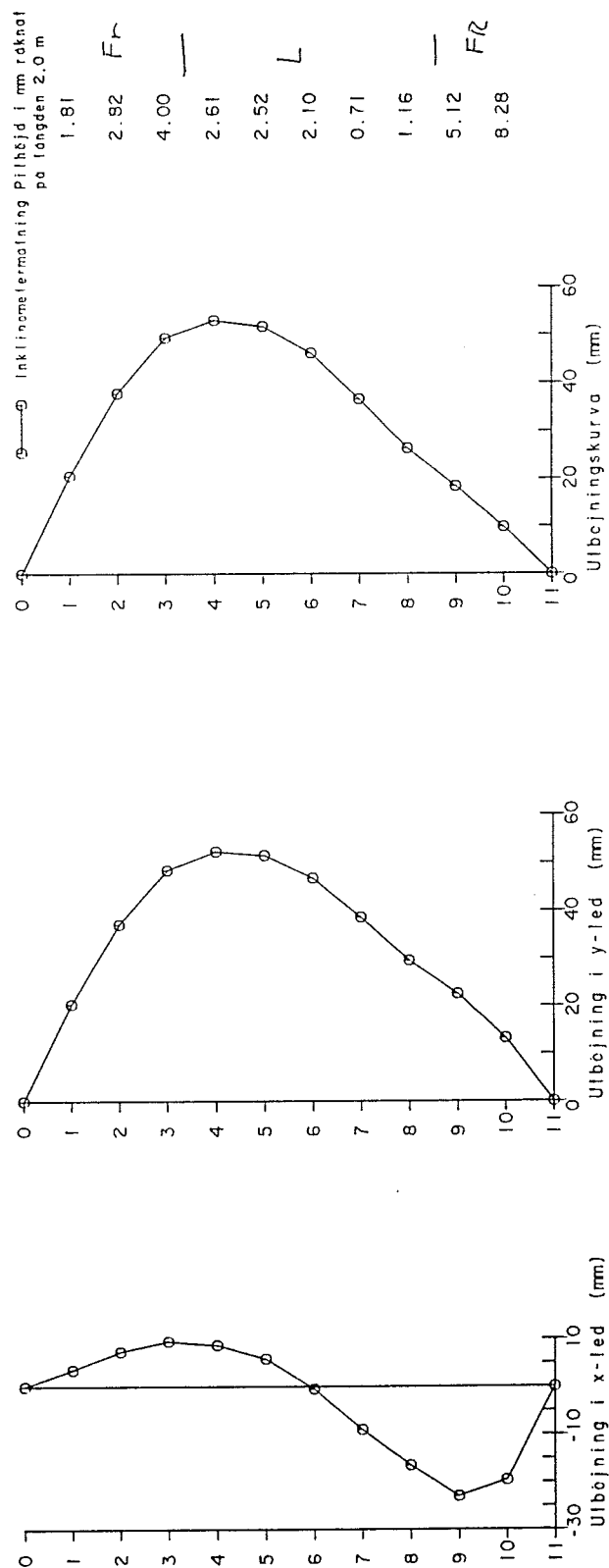
Pilhöjd i mm räknat på längden 2.0 m	
2.36	FR
1.62	FR
1.68	—
0.05	L
0.97	—
1.97	FR
3.29	—

Pilhöjd i mm räknat
på längden 2,0 m



INKLINOMETERREDOVISNING

KV KVATTHAVET NR 6 PÅLE 469

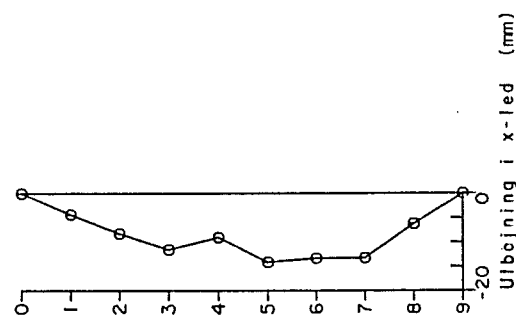
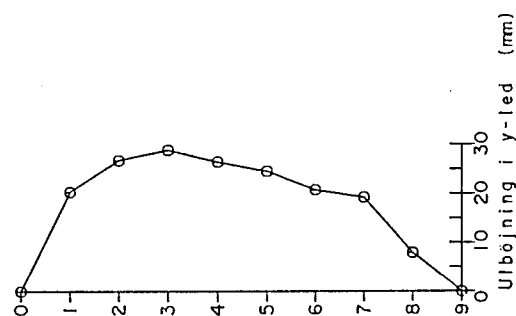
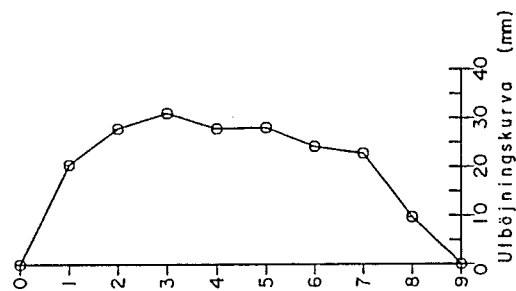


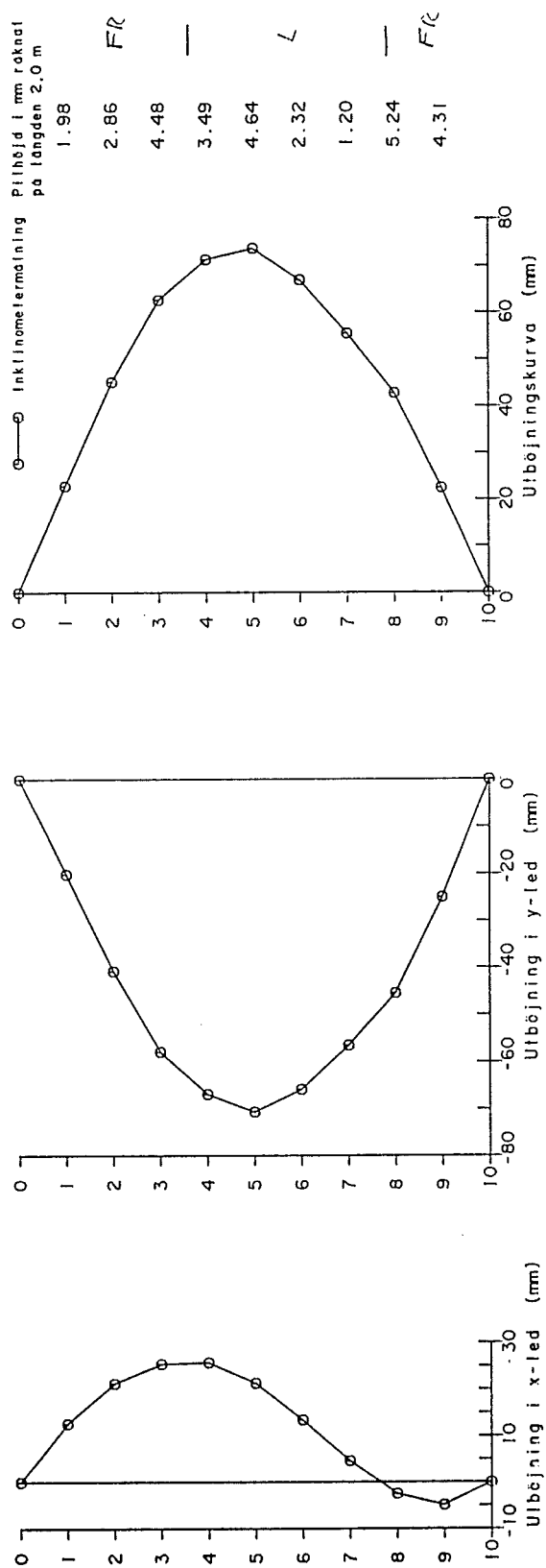
INKLINOMETERREDOVISNING

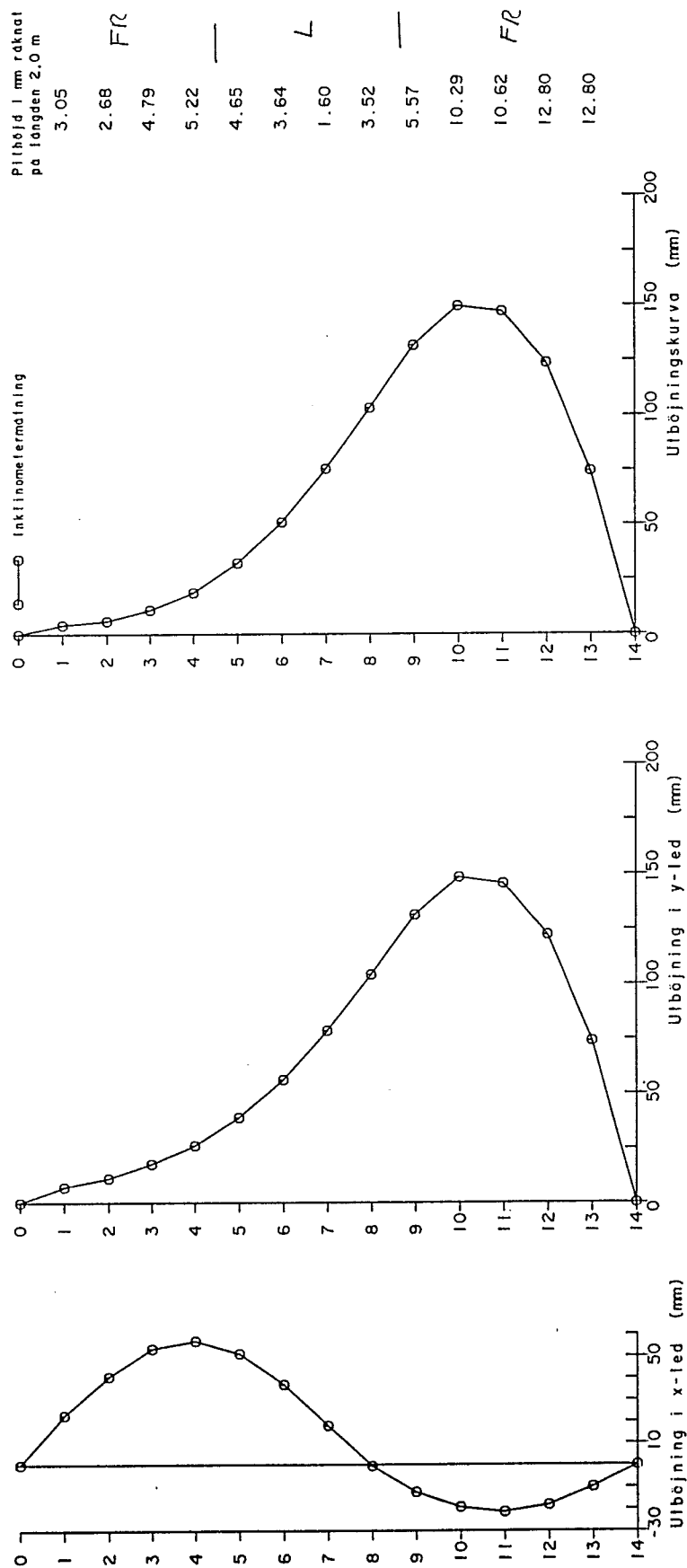
KV KATTHAVET NR 6 PALE 477

Pilhöjd i mm räknat
på längden 2.0 m

6.95	2.19	FR
3.70	3.70	—
3.83	3.12	L
1.21	1.21	—
5.98	5.98	FR
1.74	1.74	—

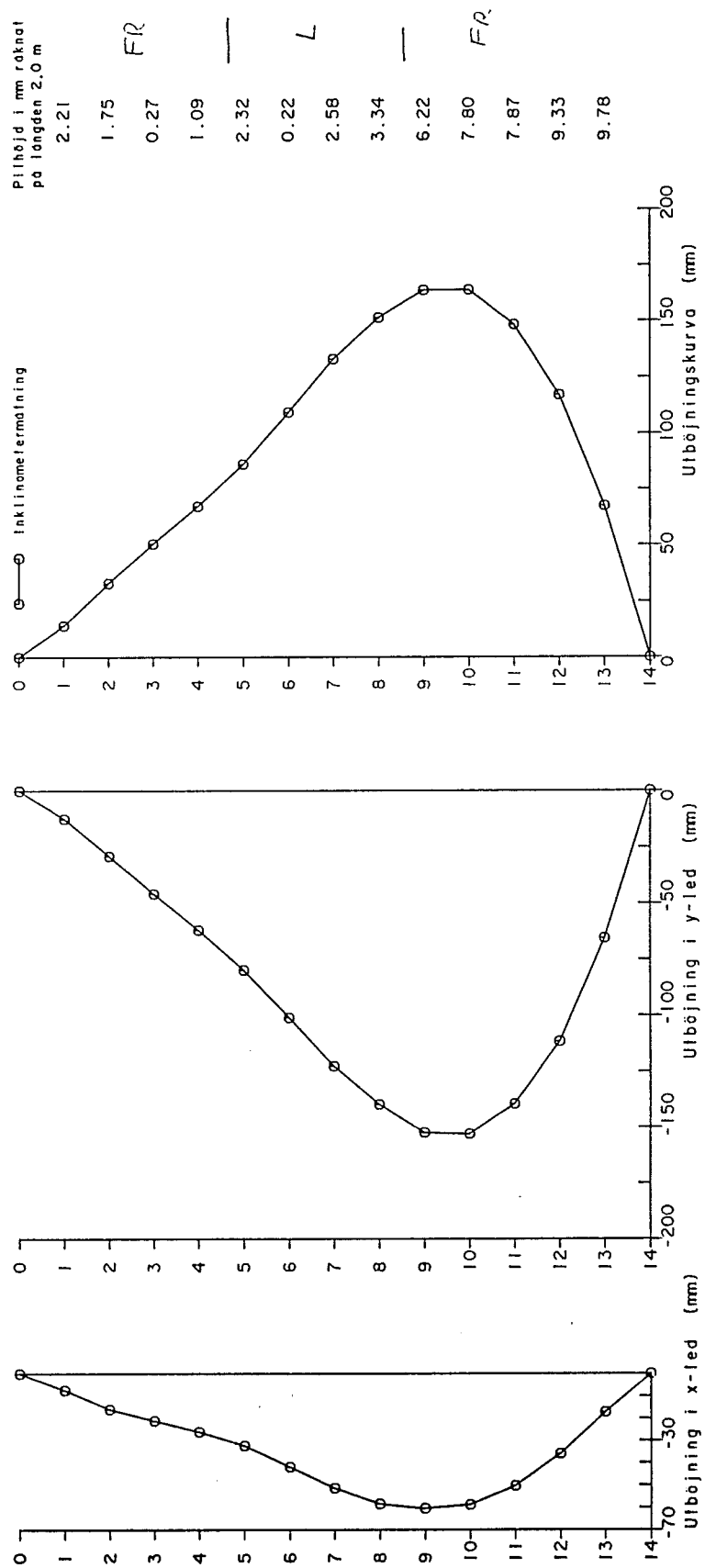






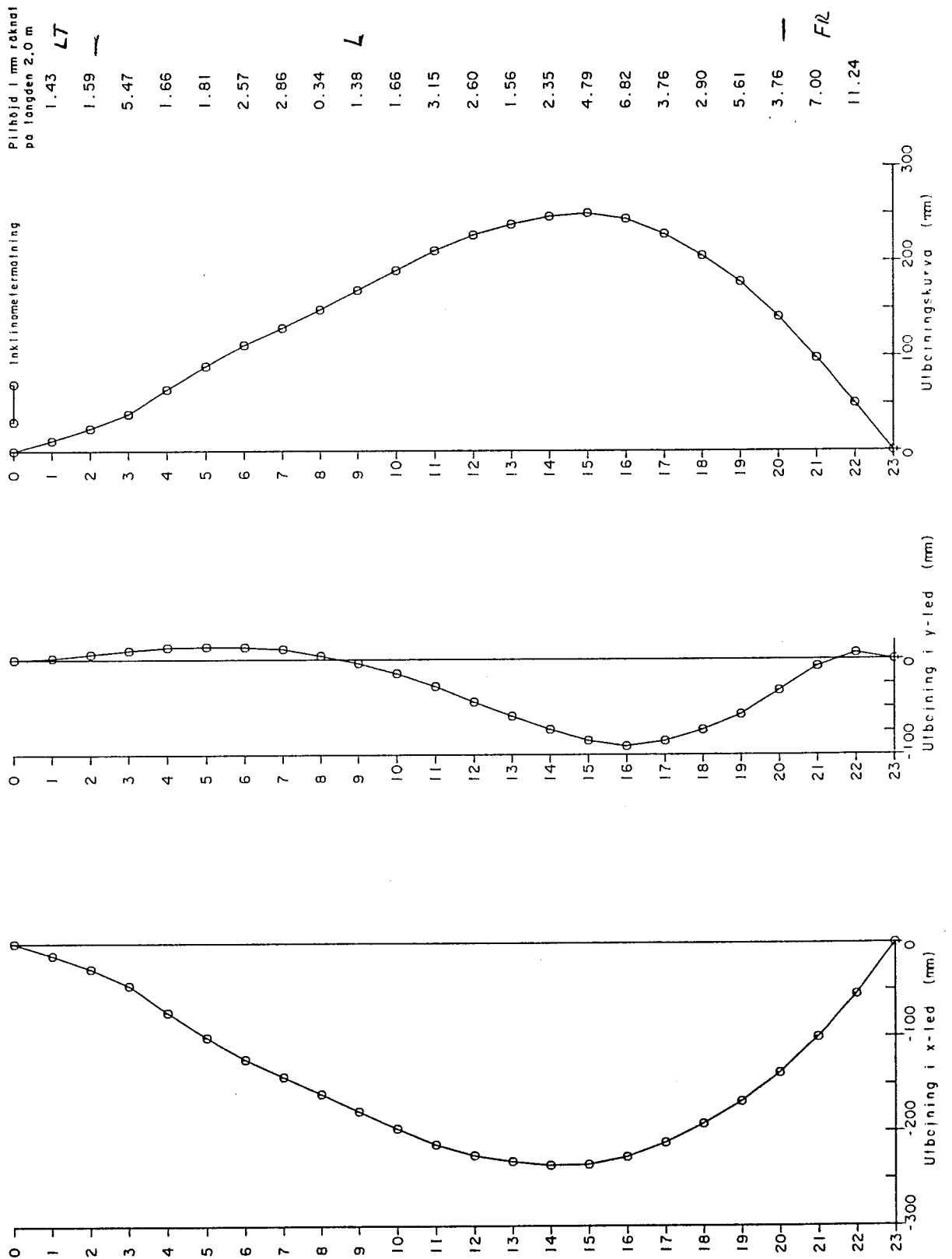
INKLINOMETERREDOVISNING

KV KATTHAVET NR 6 PALE 535



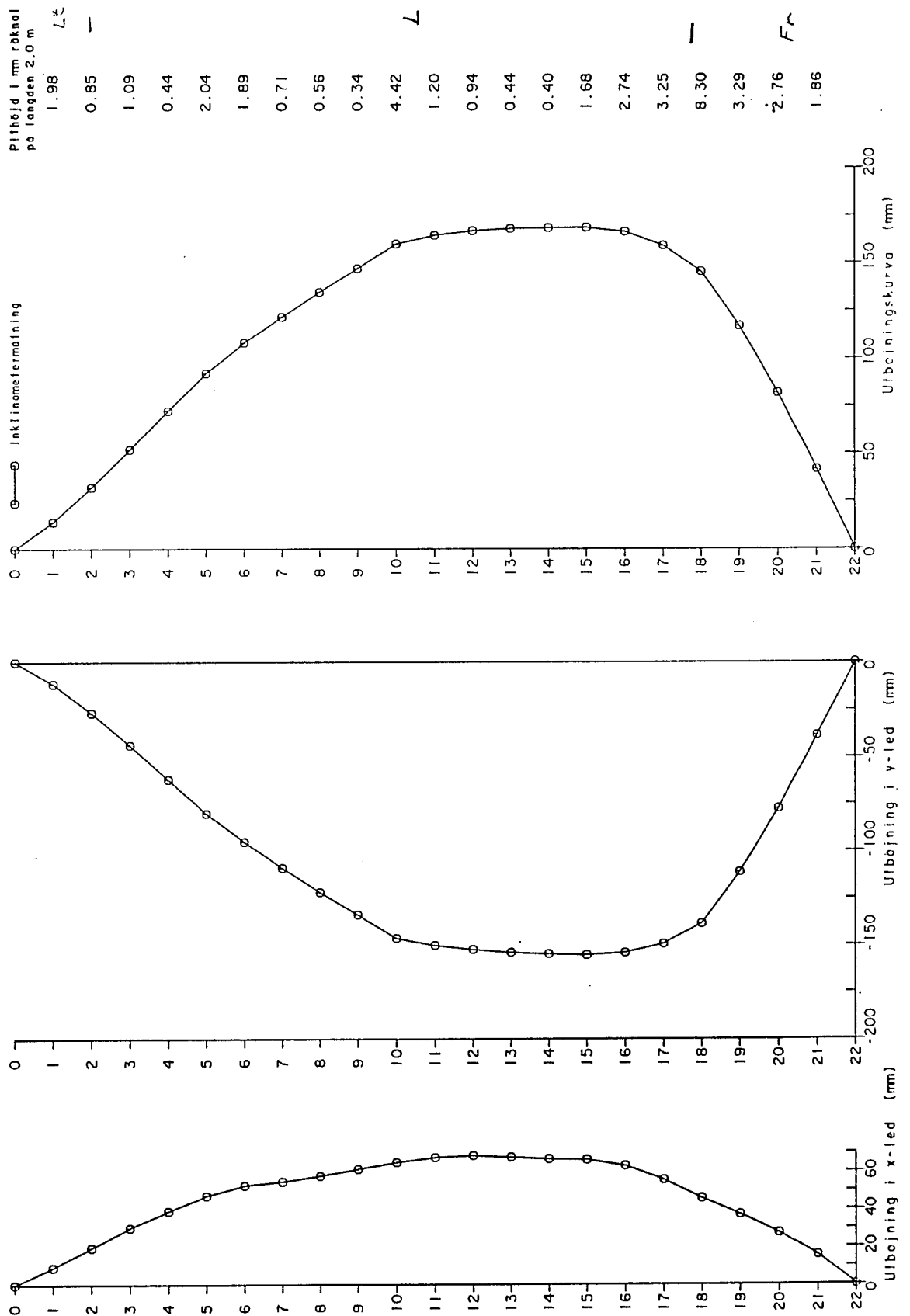
INKLINOMETERDOVISNING

KV FRÖJA 3, UPPSALA, PÅLE I.



INKLINOMETERREDOVISNING

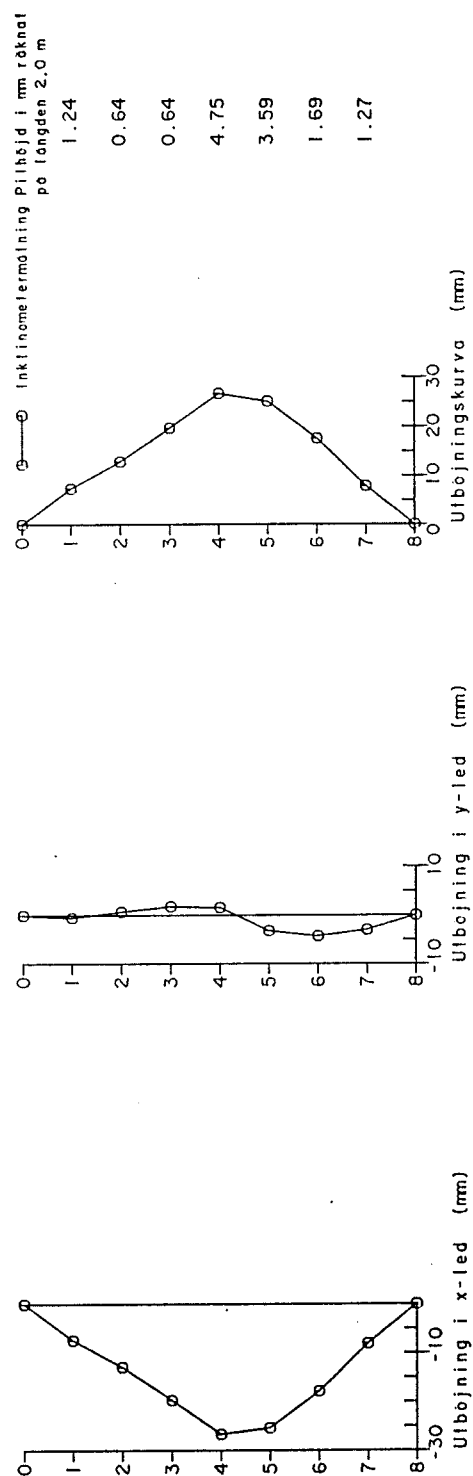
KV FRÖJA 3, UPPSALA, PÅLE 18.



INKLINOMETERREDOVISNING

PALE 458

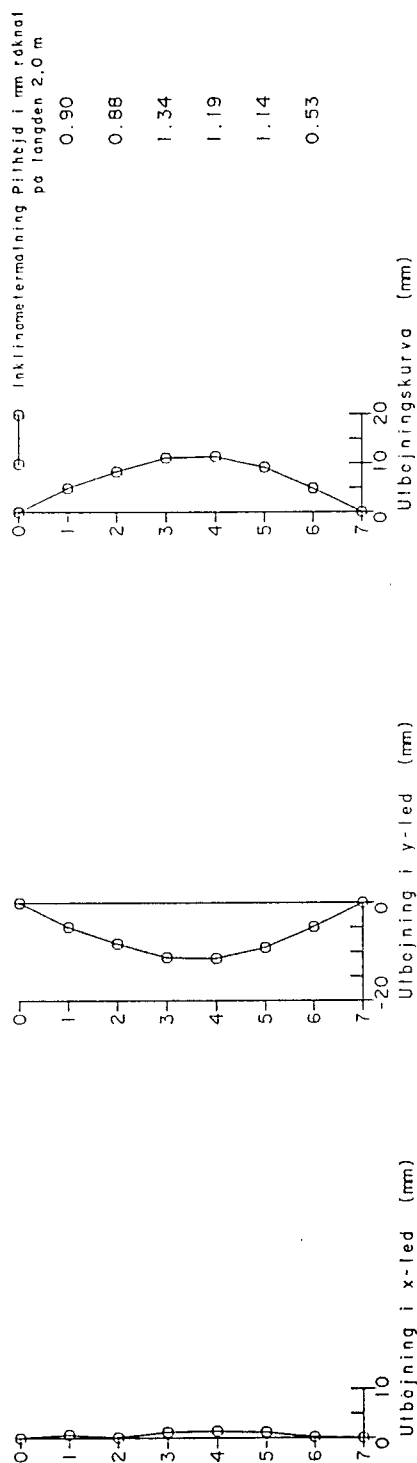
KV SVETSAREN SOLNA



INKLINOMETERREDOVISNING

PALE 459

KV SVETSAREN SOLNA

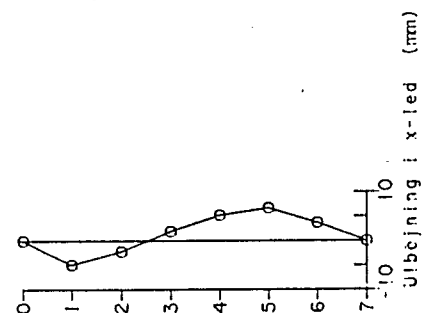
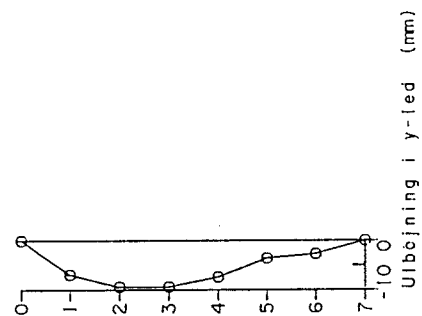
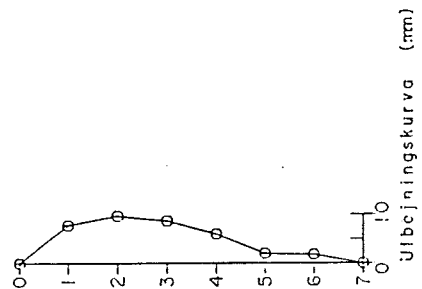


INKLINOMETERREDOVISNING

PÅLE 461

KV SVETSAREN SOLNA

Pilhöjd i mm räknat
på längden 2.0 m



INKLINOMETERREDOVISNING

PÅLE 462

KV SVETSAREN SOLNA

Pilhög i mm räknat
på längden 2.0 m

3.76

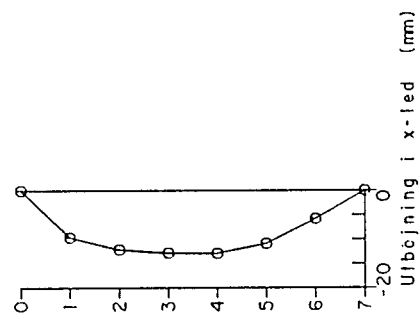
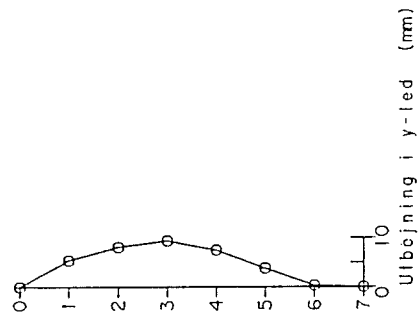
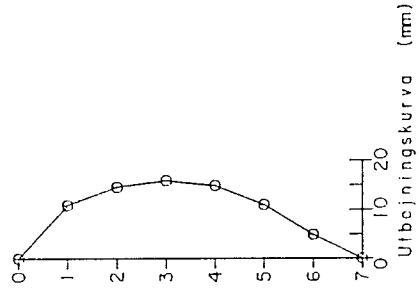
1.18

1.61

1.43

1.49

1.63



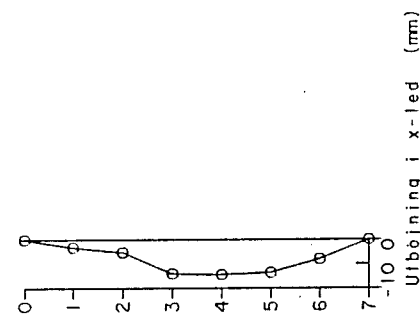
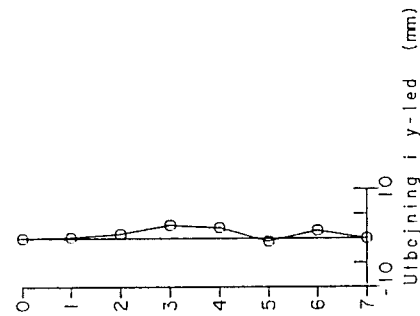
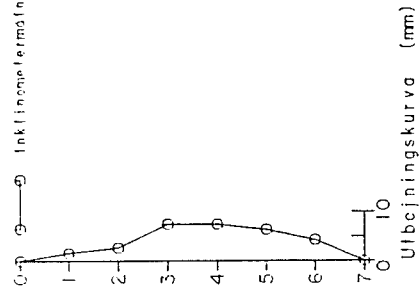
INKLINOMETERREDOVISNING

PÅLE 479

KV SVETSAREN SOLNA

Inklinometermätning
på längden 2.0 m

0.38
1.79
2.37
1.16
2.73
1.94



INKLINOMETERREDOVISNING

PALE 480

KV SVETSAREN SOLNA

Storlek i mm räknat
på längden 2.0 m

0.47

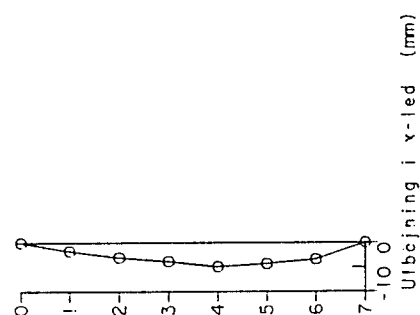
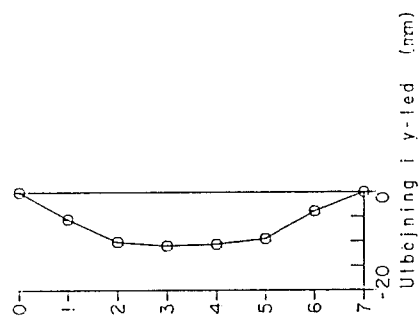
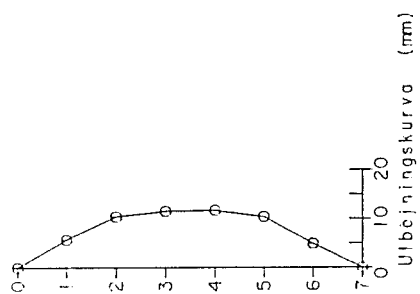
1.93

0.55

0.95

2.28

1.52



INKLINOMETERREDOVISNING

PÅLE 482

KV SVETSAREN SOLNA

Pilhöjd i mm räknat
på längden 2,0 m

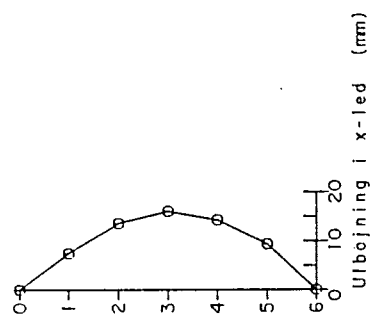
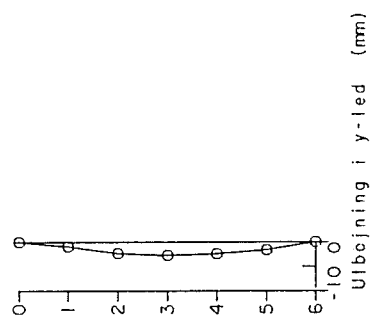
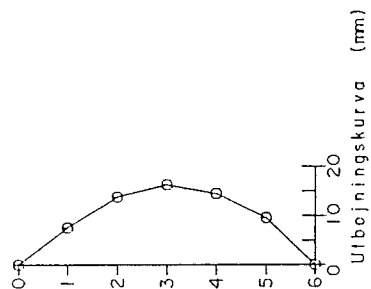
0.79

1.88

2.14

1.56

2.32



INKLINOMETERREDOVISNING

PALE 483

KV SVETSAREN SOLNA

Slithöjd i mm räknat
på längden 2,0 m

2.95

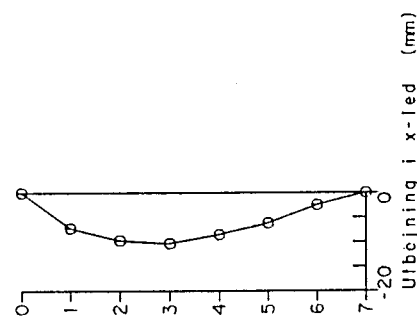
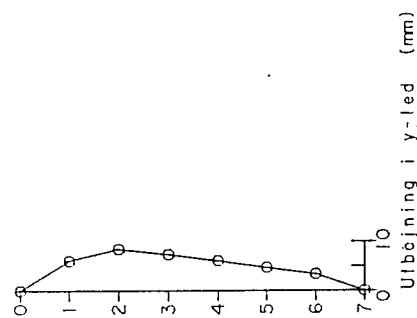
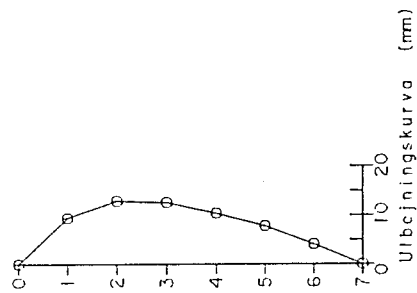
2.04

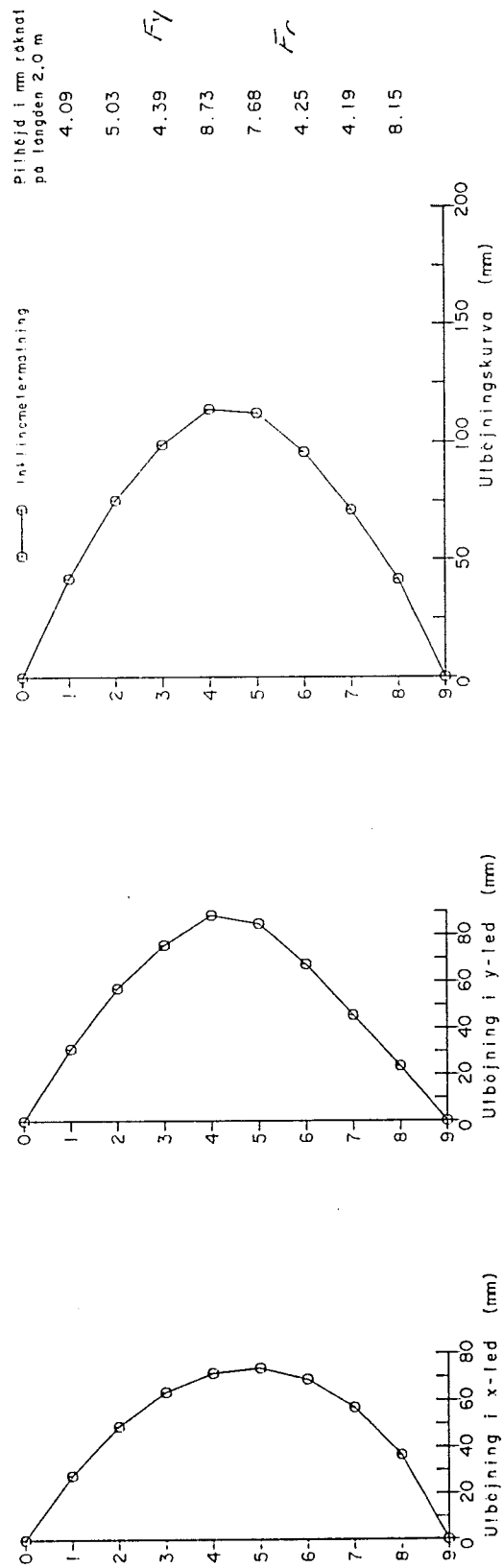
1.17

0.26

0.74

1.19

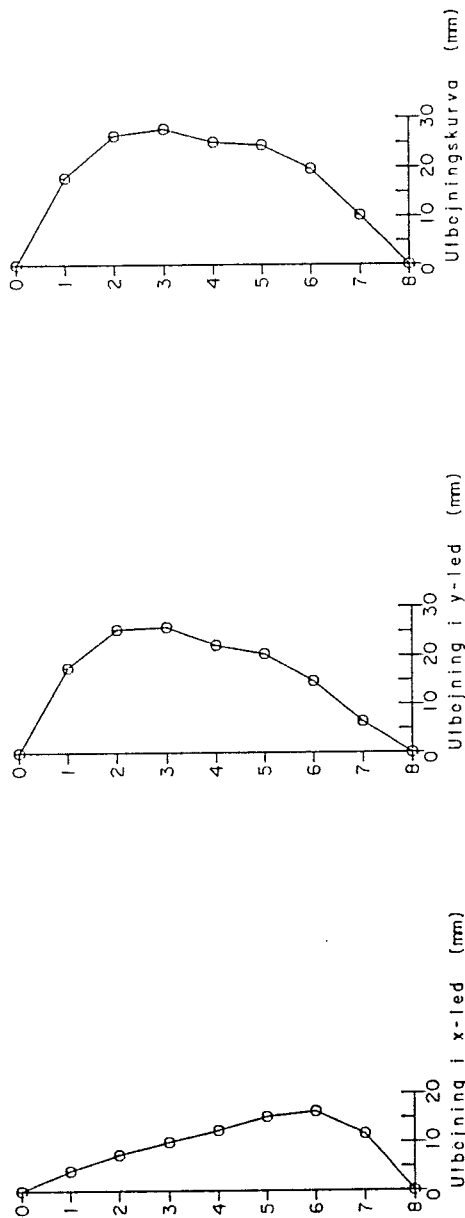




Pilthjld i mm rdktat
på längden 2,0 m

4.95
 F_y

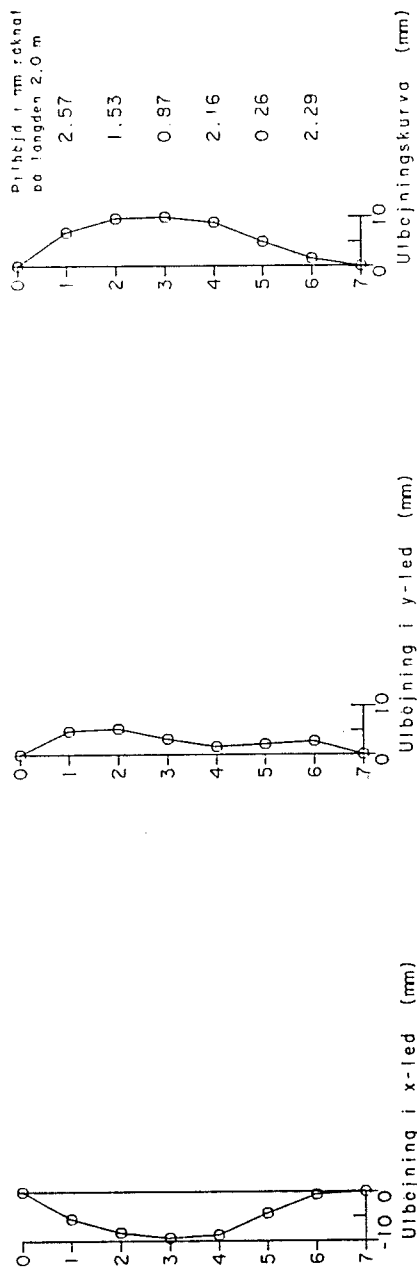
3.67
2.12
1.03
2.11
3.15
3.69
 F_x



INKLINOMETERDOVISNING

SUNDBYBERG KARLAVÅGEN 44 POLE 3

A



INKLINOMETERREDOVISNING

SUNDBYBERG KARLAVAGEN 44 PÅLE 4

Stilhet i mm räknat
på längden 2,0 m

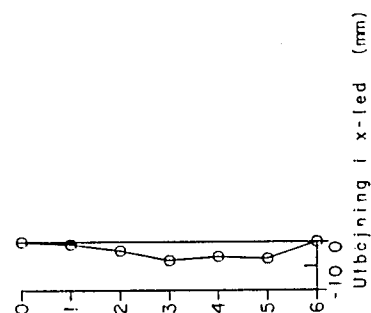
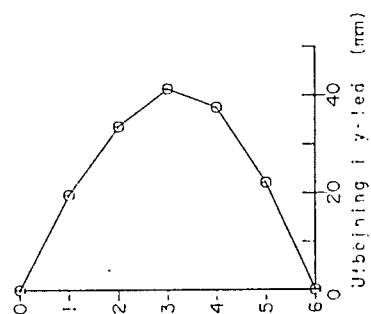
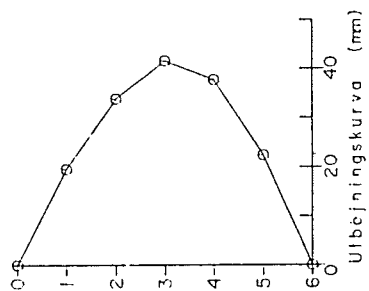
2.83 F_y

3.20

5.94 F_z

5.81

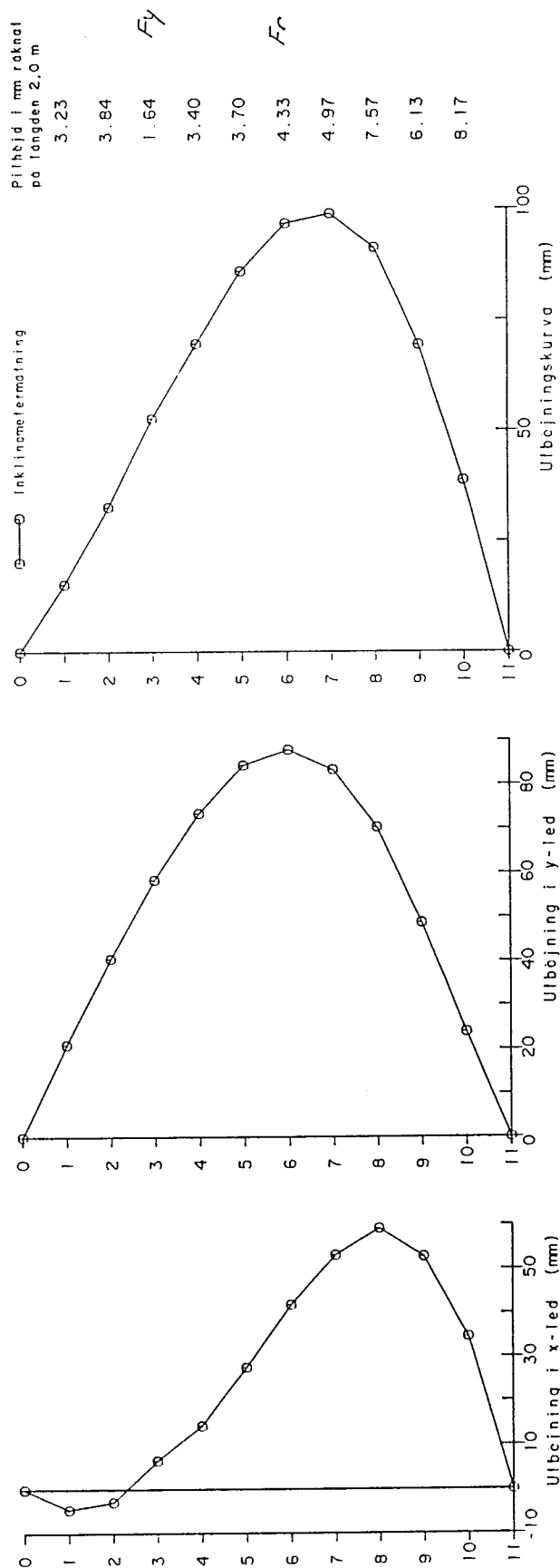
3.89

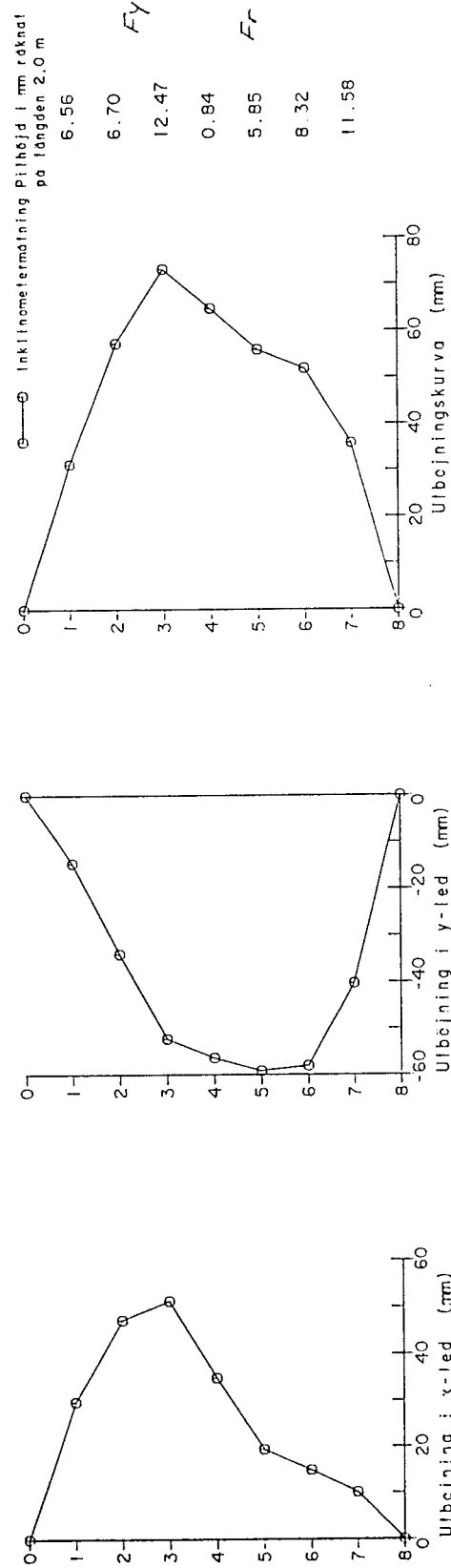


INKLINOMETERREDOVISNING

NYBROGATAN 34 PÅLE 1

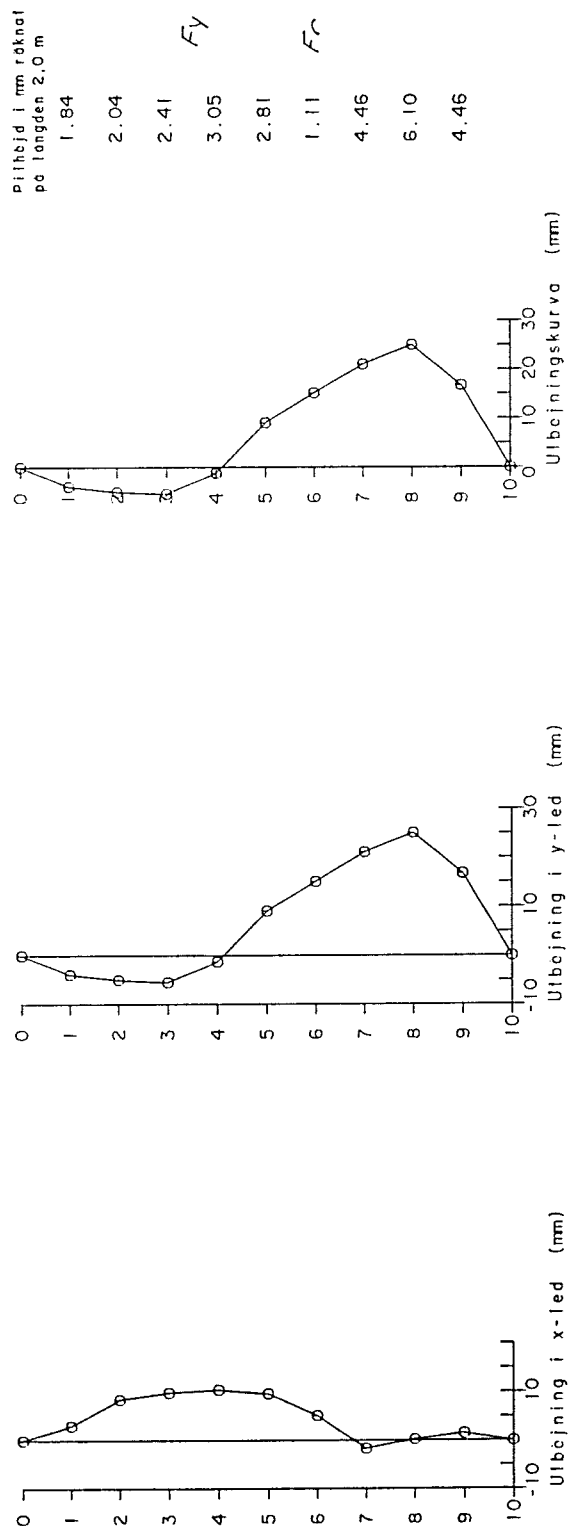
B:27

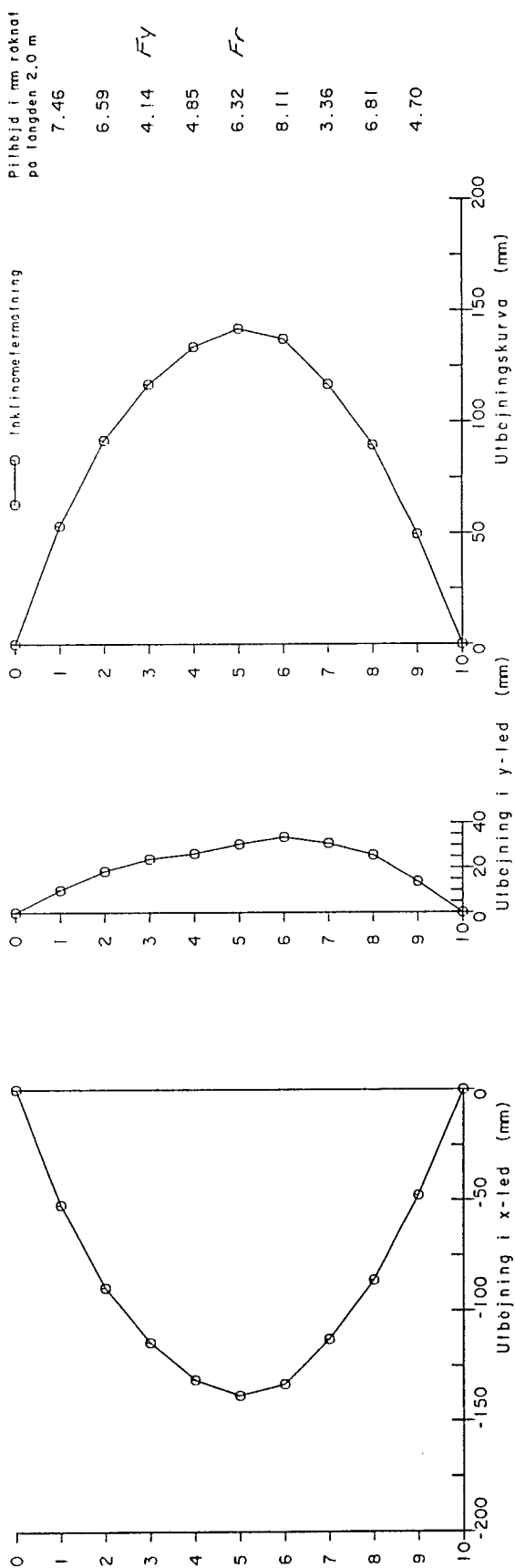


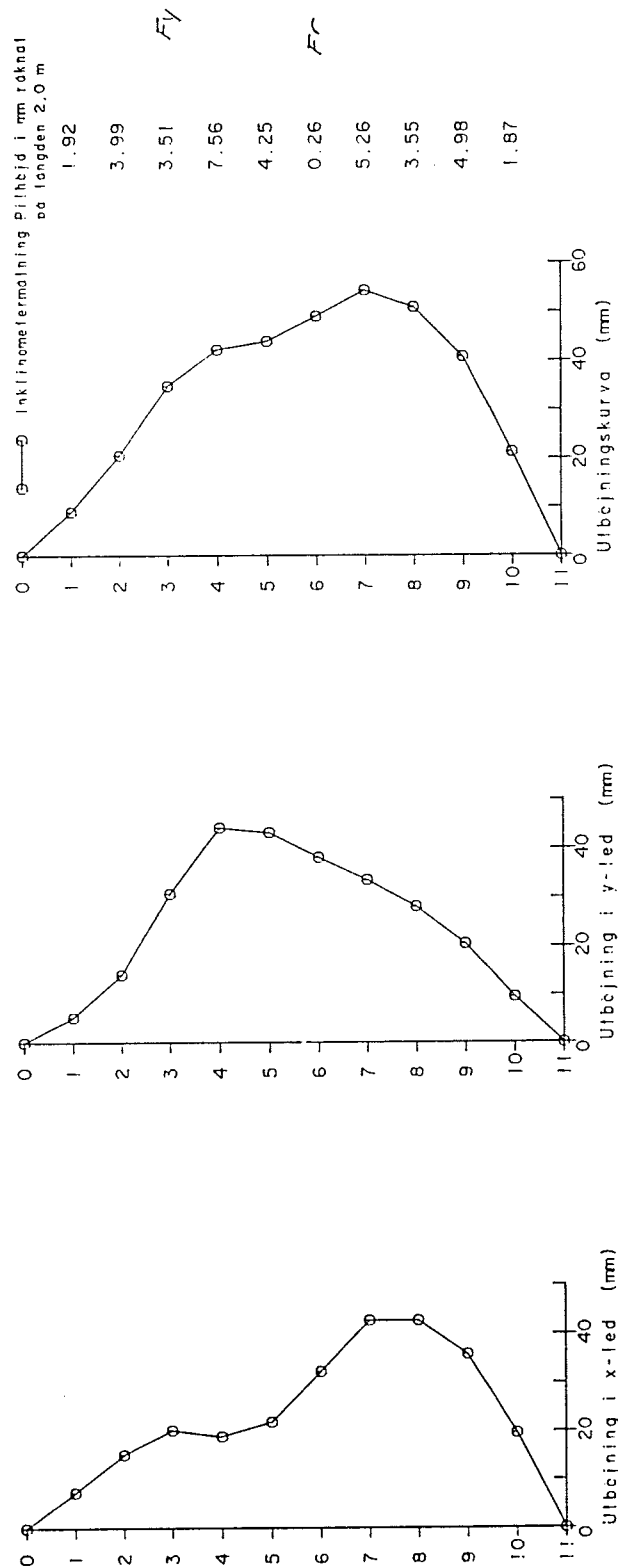


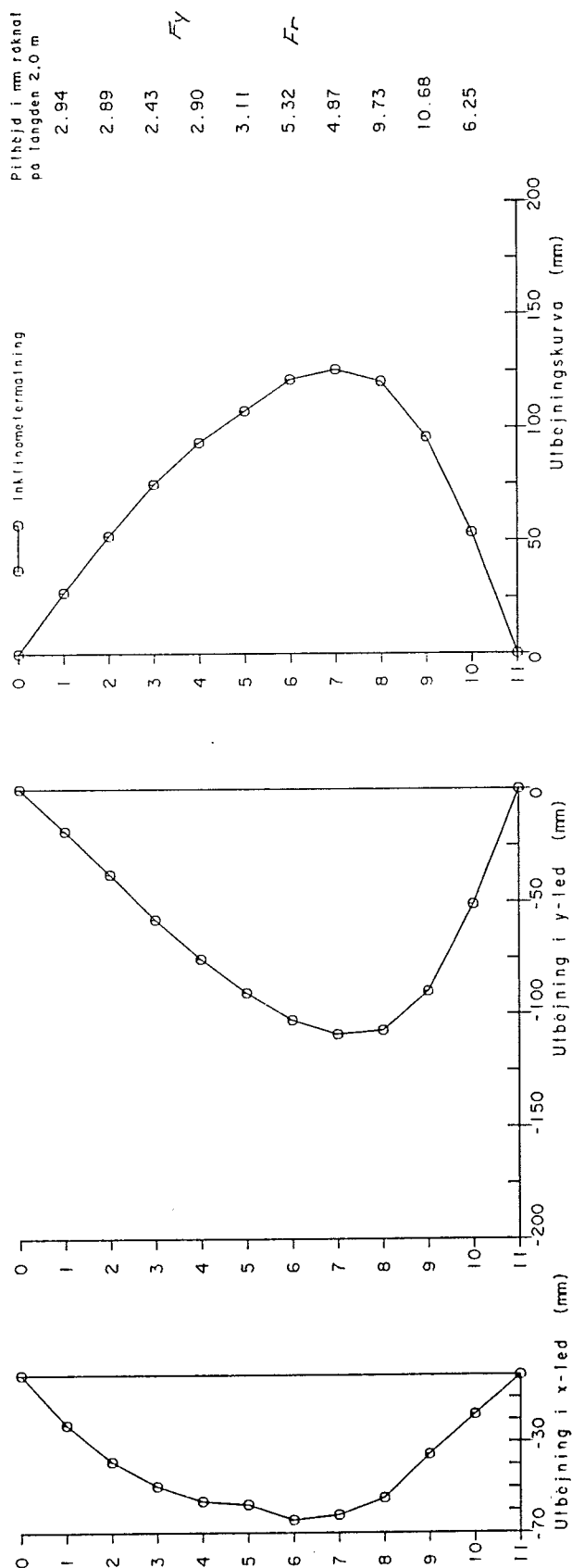
INKLINOMETERREDOVISNING

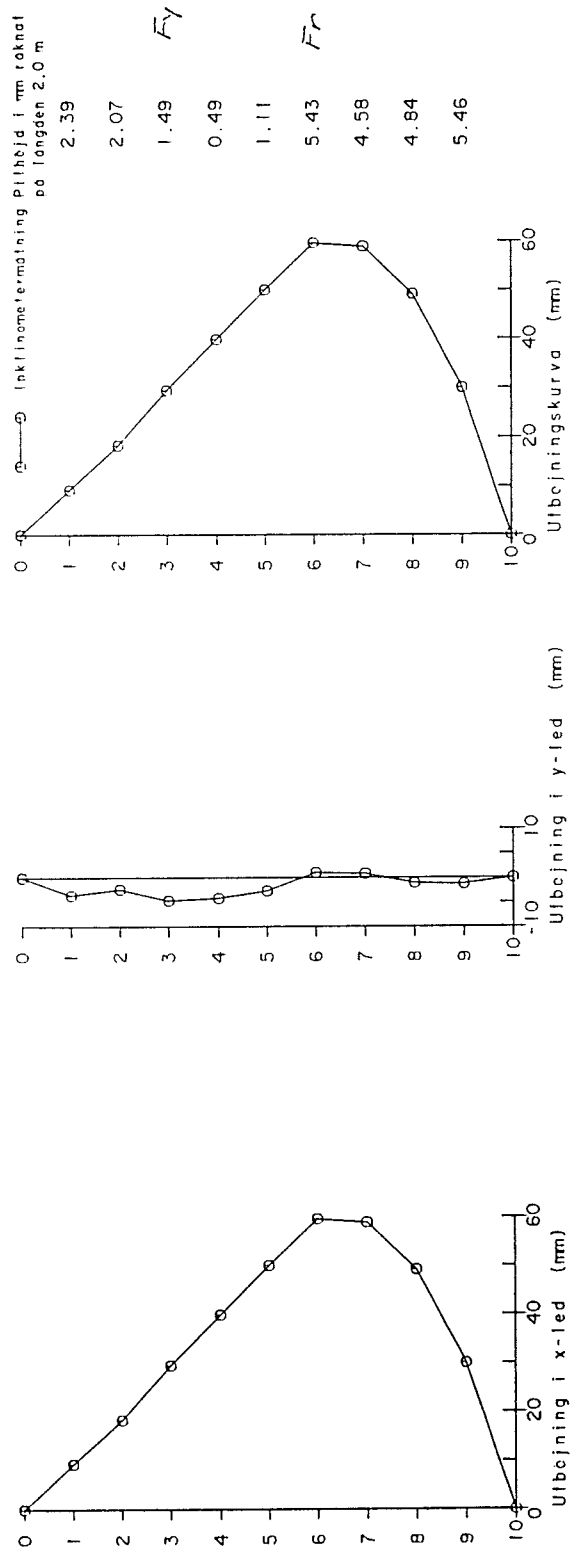
NYBROGATAN 34 PÅLE 3

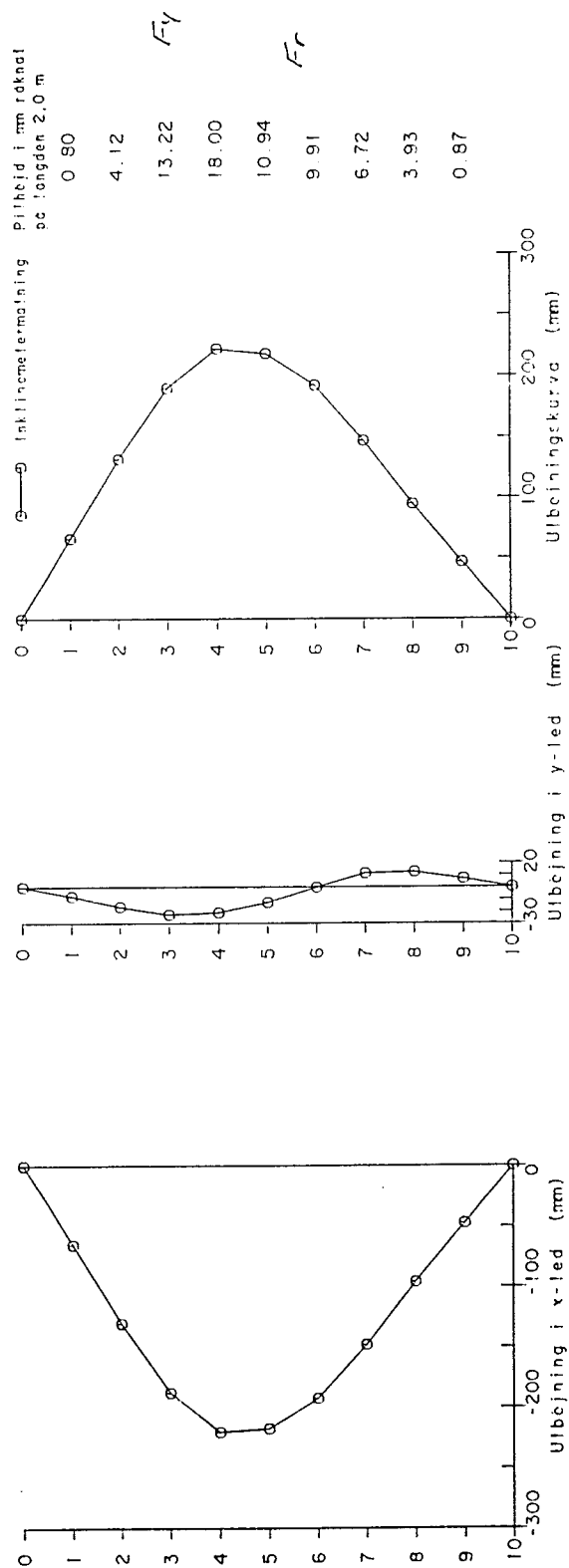


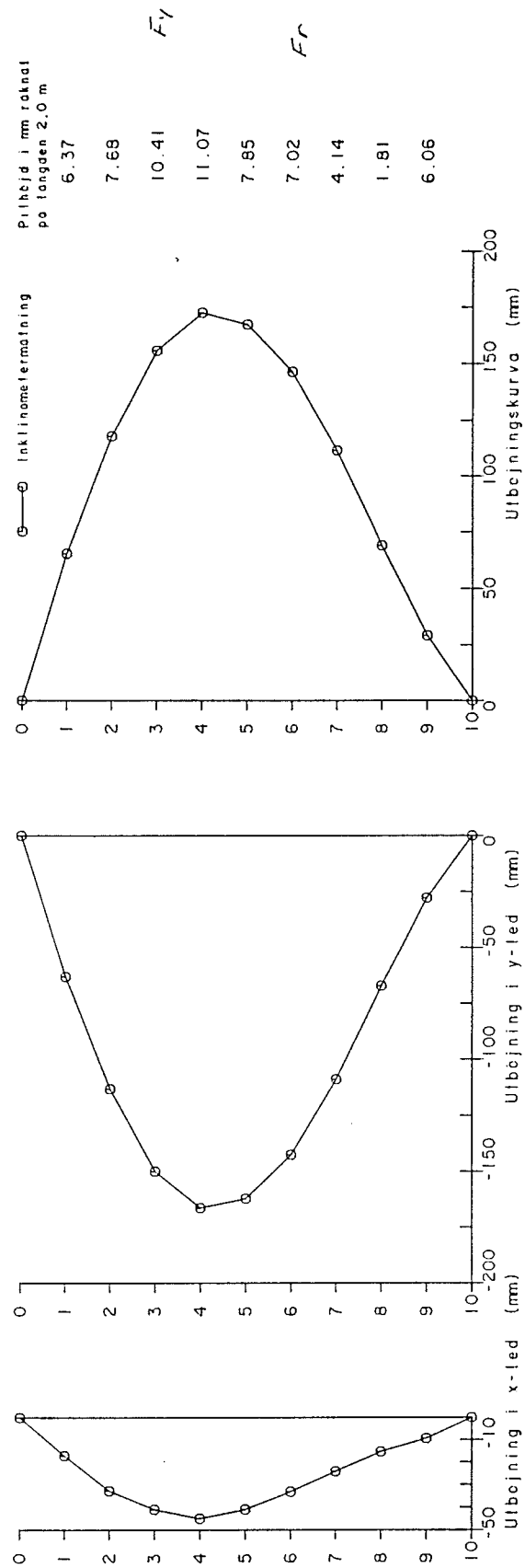






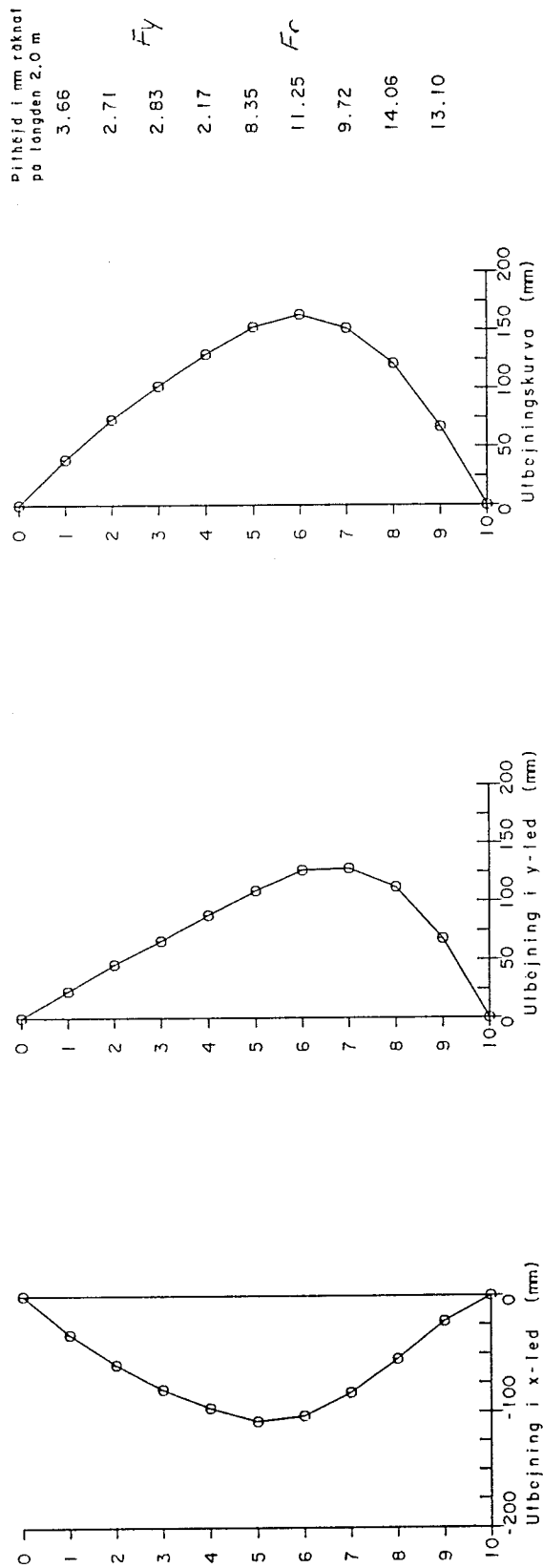






INKLINOMETERREDOVISNING

NYBROGATAN 34 PÅLE 10



APPENDIX C

C.1 JORDENS EGENSKAPER, VARIATIONSKOEFFICIENT

Geotekniken ställer speciella krav på utformning av sannolikhetsbaserade dimensioneringsmetoder. Den modell som används för att beskriva partialkoefficienten för lerans hållfasthet måste beakta följande:

- o Bestämning sker av hållfastheten genom fåtalsprovning
- o Utvärdering sker ofta med stöd av tidigare erfarenheter
- o Problemet känslighet för variationer.
- o Möjligheter att jämma ut lokala avvikelser

Idag existerar det ingen jordmodell som på ett entydigt sätt beaktar dessa förhållanden. Olika förslag har presenterats (se exempelvis Olsson 1986) men värdet av dessa har ännu ej prövats i praktiskt bruk.

Jordmodellen skall försöka besvara hur variansen av skjuvhållfastheten beror på antalet prov, avståndet till närmaste provpunkt, medelvärdesbildningen vertikalt över ett avstånd motsvarande knäcklängden och hur medelvärdet varierar i planet.

En stokastisk teori som kan användas i detta sammanhang är kriging som bygger på variogrammet $\gamma(s)$. Variogrammet uttrycker ett mått på variationen av hållfasthetsskillnaden mellan två punkter som befinner sig s meter ifrån varandra (se exempelvis Andersson et al 1984).

Kriging kan sedan användas för att skatta hållfastheten i en punkt utgående från hållfasthetsbestämningar i undersökningspunkterna samt beräkna felet i uppskattningen. På detta sätt kan man beräkna hur felet beror på avståndet till undersökningspunkten samt antalet undersöknings punkter.

Strikt måste $\gamma(s)$ skattas från fältdata i området man undersöker. I detta sammanhang kan man dock använda sig av erfarenhetsvariogram, speciellt som det är rimligt att antaga att variogrammet kan vara lika för liknade geologiska miljöer.

För att i detta sammanhang överhuvudtaget kunna ge några riktlinjer har variogrammet för en lerundersökning i Uppsala beräknats. På basis av detta har sedan felet i skattad hållfasthet och motsvarande variationskoefficient beräknats. Dessa har sedan avrundats mot säkra sidan och presenterats i en tabell såsom förslag till variationskoefficienter att använda vid beräkning av partialkoefficienter för lerans skjuvhållfasthet vid bärighetsberäkning.

Självklart är basen ej tillräcklig för att några långtgående slutsatser skall kunna dras. En fortsatt utredning av metodiken

är därför viktig och en försiktighet vid användning anbefalls tills ytterligare erfarenheter har erhållits.

C.2 BERÄKNADE VARIATIONSKOEFFICIENTER FÖR MEDELVÄRDET PÅ LERANS SKJUVHÅLLFASTHET ÖVER EN KNÄCKLÄNGD (ca 3 m)

Fältdata kommer från en plats belägen söder om Uppsala. I samband med byggnation undersöktes leran i 7 vingborrhål och 3 kolvborrhål, se plan, figur C.1. Uppmätta hållfasthetsvärden visas i figur C.2 och C.3. Medelvärde mellan +0.5 och -2.5 m beräknades och deras variationer i förhållande till varandra har beräknats och redovisas i följande variogram, se figur C.4.

Med hjälp av det uppskattade variogrammet har därefter variationskoefficienten beräknats och redovisas i nedanstående tabell. De redovisade värdena måste användas med stor försiktighet, speciellt vid de större avstånden till närmaste borrhunkt.

Tabell 1. Variationskoefficienten för medelvärdet på lerans skjuvhållfasthet, räknat på knäcklängden (ca 3.0 m).

	Avstånd till närmaste borrhunkt		
	s<10 m	10 m<s<20 m	s>20 m
1 borrhunkt	$v_k = 0.15$	0.20	0.30
2 borrhunkter	$v_k = 0.10$	0.15	0.25
3 borrhunkter	$v_k = 0.08$	0.13	0.25

Vidare har variationskoefficienten beroende av större värden på variogrammet uppskattats, något som motsvaras av inhomogenare lerförhållanden. Värden redovisas i tabell 2. Det bör än en gång påpekas att dessa värden måste användas med försiktighet tills ytterligare erfarenhet har erhållits.

Tabell 2. Variationskoefficienten för inhomogen lera och tillämpad på knäckningsberäkning.

	Avstånd till närmaste borrhunkt		
	s<10m	10 m<s<20 m	s>20 m
1 borrhunkt	$v_k = 0.22$	0.30	0.35
2 borrhunkter	$v_k = 0.16$	0.25	0.35
3 borrhunkter	$v_k = 0.14$	0.13	0.25

C:3

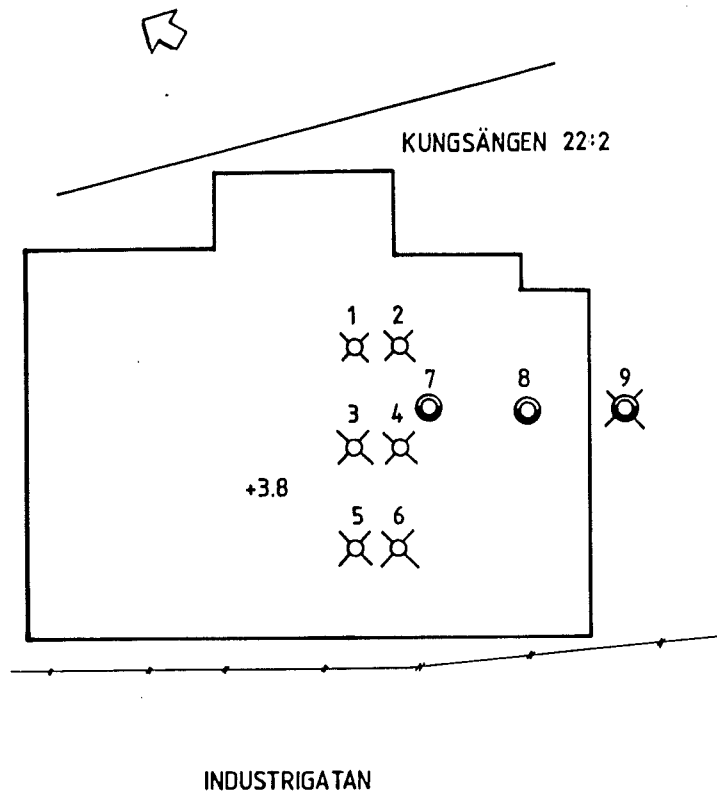


FIG C.1 Plan över borrhåll.

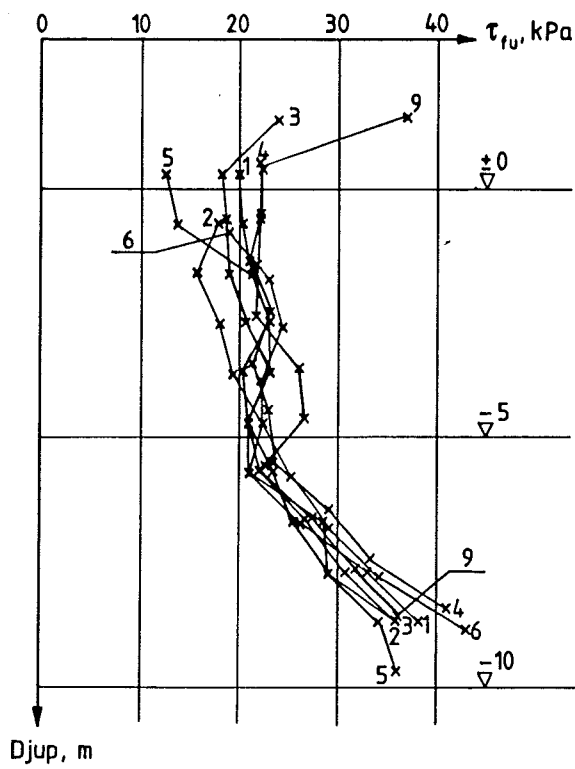


FIG C.2 Vingborrhål.

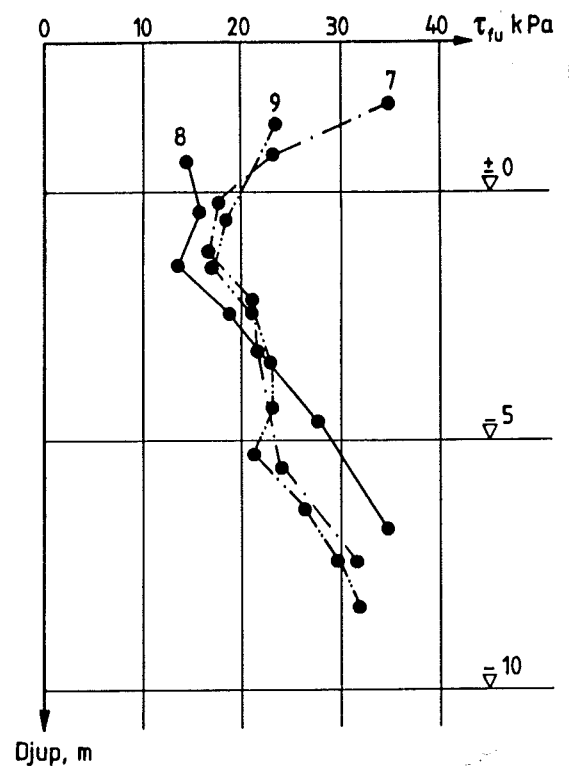


FIG C.3 Kolvborrhål.

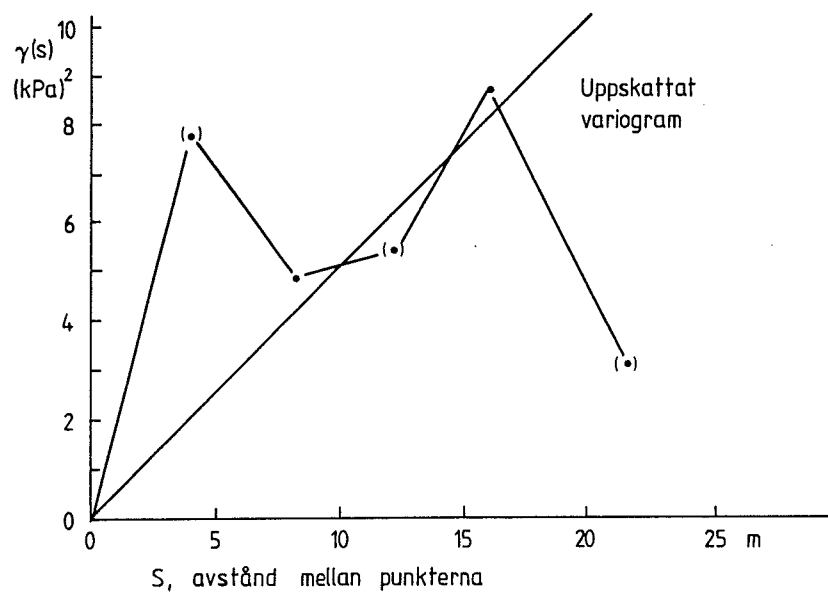


FIG C.4 Uppskattat variogram.

APPENDIX D

D.1 BERÄKNING AV DIMENSIONERANDE BÄRFÖRMÅGA ENLIGT β -METODEN.

Alternativt till en dimensionering enligt partialkoefficientmetoden kan den så kallade β -metoden användas. Detta innebär att man utgående från värden på egenskapernas statistiska fördelning såsom typ av fördelning, medelvärde och variationskoefficient kan man beräkna dimensionerande bärförmåga vid givet värde på säkerhetsindex β . För en beskrivning av metoden hänvisas till Rapport nr 50, Statens Planverk, 1982.

I det följande studeras dimensionerande bärförmåga enligt ekv. 3.24 med β -metoden

Det villkor som skall vara uppfyllt blir då

$$\Theta = R^* - a \cdot G^* - b \cdot Q^* = 0 \quad (D.1)$$

där

$$R^* = \frac{2 \sqrt{E^* \cdot I^* \cdot k^* \cdot \Psi}}{\delta_0^* \left(1 + \frac{\delta_0^*}{Y_0} \right)} \quad (D.2)$$

$$G^* = \mu_G \cdot (1 + \alpha_G \cdot \beta \cdot V_G) \quad (D.3)$$

$$Q^* = \mu_Q \cdot (1 + \alpha_Q \cdot \beta \cdot V_Q) \quad (D.4)$$

och

$$E^* = \mu_E \cdot e^{\alpha_E \cdot \beta \cdot V_E} \quad (D.5)$$

$$I^* = \mu_I \cdot e^{\alpha_I \cdot \beta \cdot V_I} \quad (D.6)$$

$$k^* = \mu_k \cdot e^{\alpha_k \cdot \beta \cdot V_k} \quad (D.7)$$

$$\delta^* = \mu_\delta \cdot e^{\alpha_\delta \cdot \beta \cdot V_\delta} \quad (D.8)$$

Lasterna antas normalfördelade och övriga parametrar logaritmskt normalfördelade.

α_i är en faktor som beskriver respektive egenskaps betydelse för problemet, och V är respektive egenskaps variationskoefficient = standardavvikelse / medelvärde. (σ_i / μ_i).

$$\alpha_i = - \frac{\kappa_i}{\sqrt{\sum \kappa_i^2}} \quad (\text{D.09})$$

och där

$$\kappa_i = \left(\frac{\delta \theta}{\delta i} \right)^* \cdot (i)^* \cdot V_i \quad (\text{D.10})$$

dvs i vårt fall

$$\kappa_E = \left(\frac{\delta \theta}{\delta E} \right)^* \cdot E^* \cdot V_E = \frac{1}{2} R^* \cdot V_E \quad (\text{D.11})$$

$$\kappa_I = \left(\frac{\delta \theta}{\delta I} \right)^* \cdot I^* \cdot V_I = \frac{1}{2} R^* \cdot V_I \quad (\text{D.12})$$

$$\kappa_k = \left(\frac{\delta \theta}{\delta k} \right)^* \cdot I^* \cdot V_k = \frac{1}{2} R^* \cdot V_k \quad (\text{D.13})$$

$$\kappa_\delta = \left(\frac{\delta \theta}{\delta \delta} \right)^* \cdot \delta^* \cdot V_\delta = - R^* \cdot \frac{\frac{\delta_0^*}{Y_0}}{1 + \frac{\delta_0^*}{Y_0}} \cdot V_\delta \quad (\text{D.14})$$

$$\kappa_G = \left(\frac{\delta \theta}{\delta Q} \right)^* \cdot \mu_G \cdot V_G = - a \mu_G \cdot V_G \quad (\text{D.15})$$

$$\kappa_Q = \left(\frac{\delta \theta}{\delta Q} \right)^* \cdot \mu_Q \cdot V_Q = - b \mu_Q \cdot V_Q = - a \mu_G \cdot v \cdot V_Q \quad (\text{D.16})$$

För att lösa ut de dimensionerande värdena löses ekvationssystemet iterativt enligt följande

D:3

1. Gissa $\alpha_E, \alpha_I, \alpha_k, \alpha_\delta, \alpha_Q, \alpha_G$ så att $\sum \alpha_i^2 = 1$
2. Beräkna $E^*, I^*, k^*, \delta^*, Q^*, G^*$
3. Beräkna R^* och a
4. Beräkna $\kappa_E, \kappa_I, \kappa_k, \kappa_\delta, \kappa_Q, \kappa_G$
5. Beräkna $\sqrt{\sum \kappa_i^2}$
6. Beräkna nya $\alpha_E, \alpha_Z, \alpha_k, \alpha_\delta, \alpha_Q, \alpha_G$
7. Jämför nya α_i med gamla α_i om skillanden är för stor gör om 2-7.
8. Beräkna $E^*, I^*, k^*, \delta^*, Q^*, G^*$
9. Beräkna R^* och a

D.2 JÄMFÖRANDE BERÄKNINGAR MELLAN β -METODEN OCH PARTIAL-KOEFFICIENTMETODEN

Genom att jämföra lösningarna enligt β -metoden och partialkoefficientmetoden kan man beräkna vilken partialkoefficient som erfordras för att ge samma värde på den dimensionerade bärformågan dvs

$$R^* = \frac{2 \sqrt{\frac{E_k}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot I_n \cdot \frac{k_k(Y_0)}{\gamma_n \cdot \gamma_k}}}{1 + \frac{\delta_{0,k} \cdot \gamma_\delta}{Y_0}} \quad (D.17)$$

$$\sqrt{\gamma_k} = \frac{\frac{2}{\gamma_n} \cdot \sqrt{\frac{E_k}{\gamma_m} \cdot I_n \cdot k_k(Y_0)}}{(1 + \frac{\delta_{0,k} \cdot \gamma_\delta}{Y_0}) \cdot R^*} \quad (D.18)$$

eller om övriga faktorer är ekvivalenta så blir

$$\gamma_k = \frac{k_k(y_0)}{\gamma_n \cdot \mu_k \cdot e^{\alpha \cdot \beta \cdot V_k}} \quad (D.19)$$

och om medelvärdet väljs till karakteristiskt värde

$$\gamma_k = \frac{e^{-\alpha \cdot \beta \cdot V_k}}{\gamma_n} \quad (D.20)$$

Av detta framgår klart γ_k s beroende av variationskoefficienten för k dvs v_k .

Jämförande beräkningar med β -metoden och partialkoefficient-metoden har utförts för att kalibrera partialkoefficienten, γ_k . Beräkningarna har utförts med följande ingångsdata:

$$V_G = 0.05$$

$$V_Q = 0.40$$

$$V_E = 0.02$$

$$V_I = 0.05$$

$$V_\delta = 0.00$$

Beräkningsresultatet framgår av fig D.1 - D.6. Ur figurerna framgår att påldimensionen ej påverkar resultatet. Vidare har kvoten μ_Q/μ_G relativ liten inverkan, eftersom egenvikten är den helt dominerande lasten för de flesta objekt, där aktuella stålrörspålar används dvs $\mu_Q/\mu_G < 0.2$.

Säkerhetsklassen ger viss påverkan och ett något oväntat resultat så till vida att γ_k minskar med ökande säkerhetsklass. Förklaringen ligger i det förhållande att faktorn γ_n (1.0 - 1.2) ger en överkompensering i förhållande till vad en ökning av β -värdet från 3.8 till 4.8 medför.

I tabellen nedan redovisas de sålunda beräknade värden på γ_k för $\mu_Q/\mu_G = 0.0$ för olika värden på variationskoefficienten v_k och β . I tabellen anges också inom parantes teoretiskt framräknade värden enligt ekv. D.20, $\alpha = -0.9$.

Tabell D.1. Beräknade värden på γ_k .

	$v_k = 0.1$		0.2		0.3		0.4	
$\beta = 3.8$	1.40	(1.40)	2.05	(1.98)	3.00	(2.78)	4.45	(3.92)
$\beta = 4.3$	1.20	(1.33)	1.85	(1.97)	2.90	(2.90)	4.40	(4.27)
$\beta = 4.8$	1.05	(1.28)	1.70	(1.98)	2.80	(3.05)	4.60	(4.69)

Den teoretiska modellen enligt ekv. D.20 ger en god överensstämmelse utom vid låga värden på v_k och höga säkerhetskrav där de teoretiska värdena ligger ca 20 % på säkra sidan .

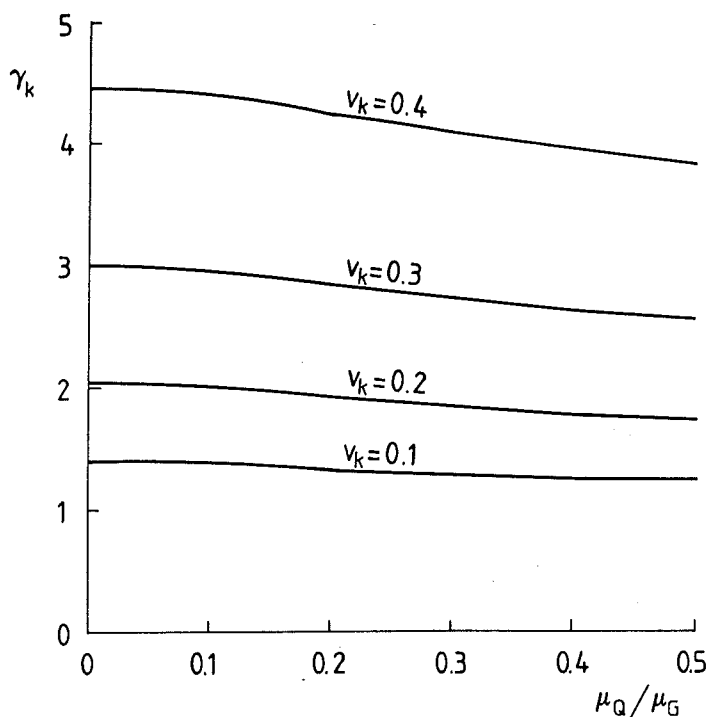


Fig D.1 Partialkoefficient för stålplastpåle
 $\phi 76.1 \cdot 4.0$ mm, säkerhetsklass 1.

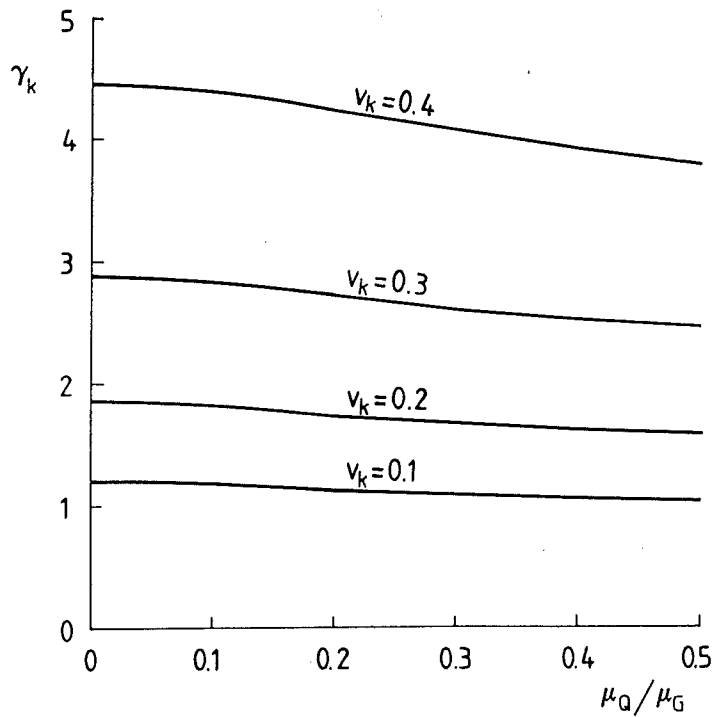


Fig D.2 Partialkoefficient för stålplastpåle $\phi 76.1 * 4.0$, säkerhetsklass 2.

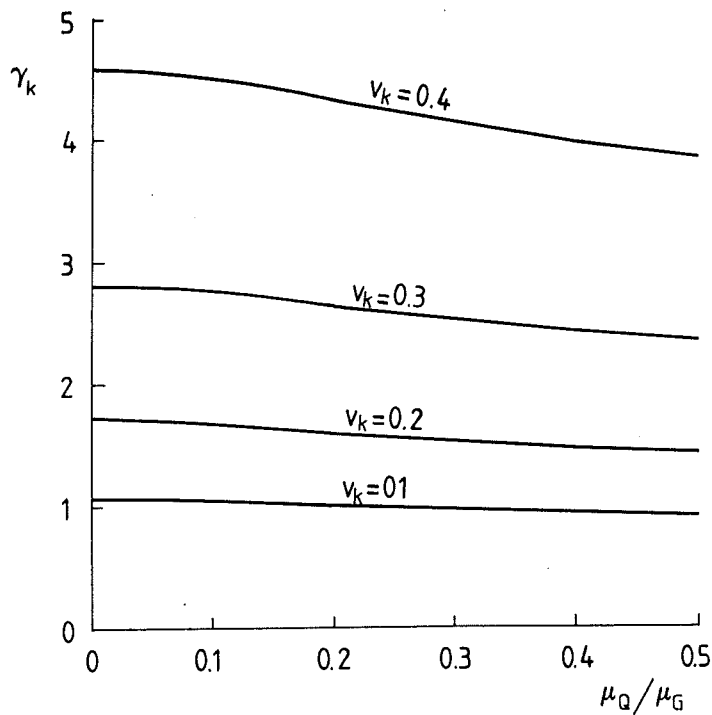


Fig D.3 Partialkoefficient för stålplastpåle $\phi 76.1 * 4.0$, säkerhetsklass 3.

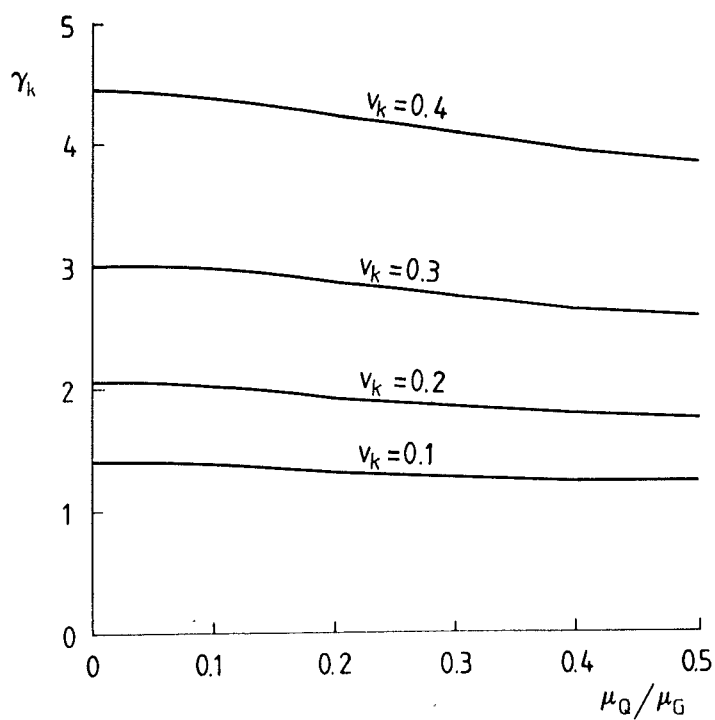


Fig D.4 Partialkoefficient för stålplastpåle $\phi 101.6 * 5.1$, säkerhetsklass 1.

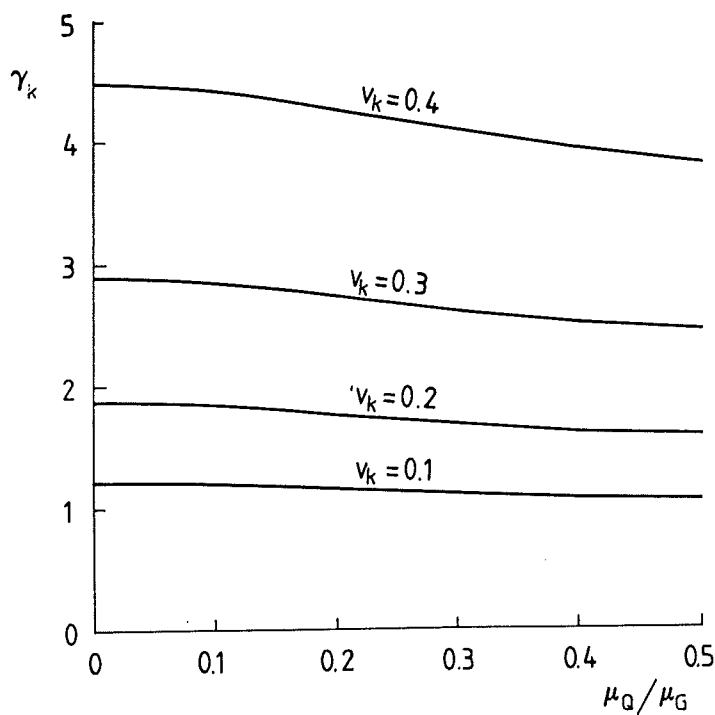


Fig D.5 Partialkoefficient för stålplastpåle $\phi 101.6 * 5.6$, säkerhetsklass 2.

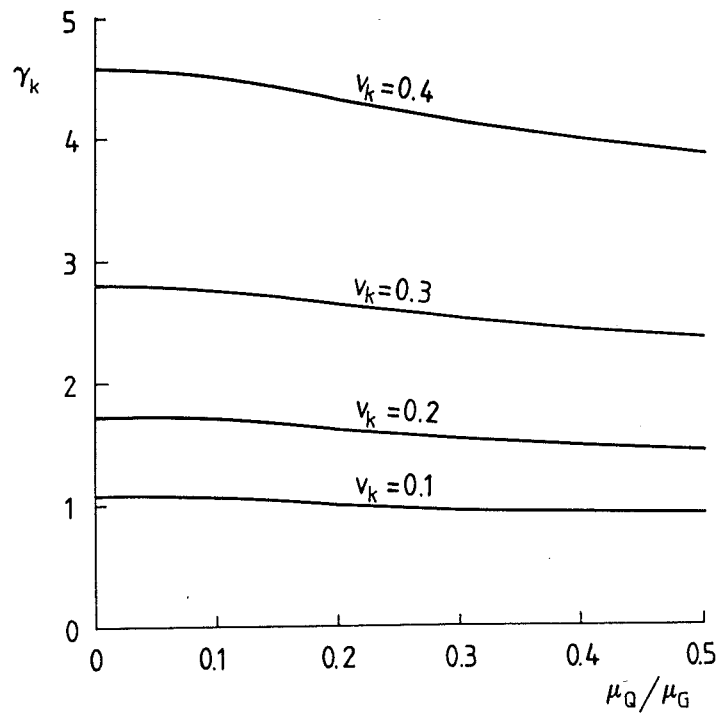


Fig D.6 Partialkoefficient för stålplastpåle
 $\phi 101.6 * 5.6$, säkerhetsklass 3.

APPENDIX E**E.1 Sändlista vid remissgranskning**

Åke Bengtsson	ELU-konsult
Ulf Bergdahl	SGI
Stig Bernander	SKANSKA
Thorild Blomdahl	Hercules
Sven-Erik Rehnman	KTH
Jan Wennerstrand	
Lars Östlund	
Håkan Bredenberg	Bredenberg Geo
Per Löfling	Vägverket
Lars Hellman	Lars Hellman Byggråd AB
C-J Grävare	Europile Pålningsteknik AB
Bo Berglars	PiD
Sölve Johansson	VBK
Lars Olsson	Tyrens
Jan-Erik Olsson	Smedjebacken Boxholm Stål AB