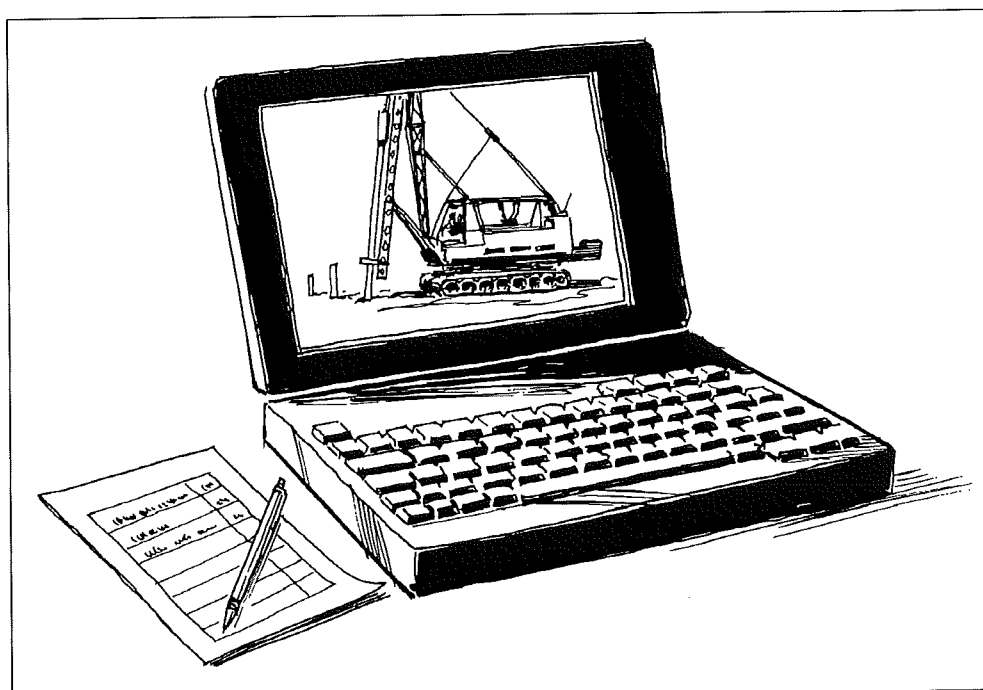


INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research



Datorsimulering av påslagning

Bo Berglars
Carl-John Grävare
Per Löfling
Lars Weiner

rapport 92

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

rapport 92

Datorsimulering av påslagning

Bo Berglars
Carl-John Grävare
Per Löfling
Lars Weiner

Linköping 1993

Rapport	IVA Pålkommisionen 581 93 Linköping
Beställning	Statens geotekniska institut Biblioteket Tel. 013-11 51 00 Fax. 013-13 16 96
ISSN	0347-1047
ISRN	IVA/PAL/R-93/92-SE
Upplaga	400 ex
Tryck	Tryck-Center, Linköping, december 1993

Förord

Denna rapport har tagits fram för att visa möjligheter och tillvägagångssätt vid datorsimulering av påslagning. Rapporten vänder sig främst till projektörer/konstruktörer för vilka datorsimulering bör vara ett användbart verktyg i projekteringen av pågrundläggningar.

Rapporten behandlar datorsimuleringens möjligheter, ger en historik över beräkningsmodeller för påslagning samt visar arbetsgången vid projektering av pågrundläggning med praktikexempel på datorsimulering. Vidare ges förslag till hur kvaliteten på simuleringsresultat kan förbättras samt metoder för att bestämma ingångsdata.

Rapporten har tagits fram av en arbetsgrupp inom IVA Pålkommissionen, bestående av

- | | |
|---------------------|-------------------------------------|
| - Bo Berglars | <i>PiD Piling Development AB</i> |
| - Carl-John Grävare | <i>Pålanalys AB</i> |
| - Per Löfling | <i>Vägverket</i> |
| - Lars Weiner | <i>Statens geotekniska institut</i> |

med Per Löfling som ordförande. Ett särskilt tack riktas till

- | | |
|--------------------|--------------------------|
| - Bo Berggren | <i>KM</i> |
| - Håkan Bredenberg | <i>Bredenberg Geo AB</i> |
| - Leif Jendeby | <i>NCC/CTH</i> |
| - Jan Romell | <i>Skanska AB</i> |
| - Lennart Svensson | <i>J&W</i> |

som bidragit med värdefulla synpunkter under arbetets gång och till Jan Lindgren, Statens geotekniska institut, som gett rapporten dess slutliga språkdräkt och utformning.

Borlänge i oktober 1993

Bo Berglars Carl-John Grävare Per Löfling Lars Weiner

Innehåll

FÖRORD	3
SUMMARY	6
SAMMANFATTNING	7
1. SIMULERINGSTEKNIKENS MÖJLIGHETER	9
1.1. Projektering av pålgrundläggning	
1.2. Drivbarhet	
1.3. Bärförmåga	
1.4. Verifiering av bärförmåga	
2. HISTORIK OCH MODELLER	13
2.1 Historik	
2.2 Modeller för bedömning av påslagning	
2.3 Jämförelse mellan olika metoder	
3. ARBETSGÅNG VID PROJEKTERING	29
4. PRAKTIKEXEMPEL	31
4.1 Betongpåle - simuleringsexempel 1	
4.2 Betongpåle - simuleringsexempel 2	
4.3 Stålpåle - simuleringsexempel 3	
4.4 Stålpåle - simuleringsexempel 4	
5. KAN KVALITETEN PÅ SIMULERINGSRESULTATEN FÖRBÄTTRAS?	60
5.1 Allmänt	
5.2 Kalibrering av ingångsdata med hjälp av simulering av utförda pålningsprojekt	
6. REKOMMENDERADE INGÅNGSDATA	62
6.1 Allmänt	
6.2 Jordens egenskaper	
6.3 Pålens egenskaper	
6.4 Slagningsutrustningens egenskaper	
7. REFERENSER	72

Summary

In computer simulation of piling work, the pile driving operation is reproduced with the aid of a computational model of the stress wave sequence in the pile. The model simulates the piledriving equipment (the pile) and the effect on the surrounding material (soil/rock). Force-displacement interaction between pile and soil is described in terms of skin friction and end bearing capacity, resilience (quake) and damping.

Results of computer simulation

- ☐ Permanent set as a function of number of blows (drivability of the pile).
- ☐ Stresses in the pile during pile driving.
- ☐ Bearing capacity of the pile as a function of permanent set.

However, computer simulation is not a suitable method for determining the bearing capacity of the pile as a function of the depth in soil. Instead, this forms input data in computer simulation.

Applications of computer simulation of piling work

- ☐ Choosing an optimal combination of pile, piledriving equipment and load capacity/bearing capacity under given geotechnical conditions.
- ☐ Determining driving criteria for verification of the bearing capacity of the pile.

Computer simulation can also be used in:

- ☐ Producing programmes for test piling and dynamic test loading.
- ☐ Quality assurance when analysing dynamic test loading (evaluation of bearing capacity with the CASE method or by signal matching of measured stress waves). Here, simulation can be used to show how changes in pile cross-section, E-modulus, joint play and hammer performance influence the stress wave sequence in the pile.

Computer simulation is an excellent method for determining a cost-optimised combination of pile and piledriving equipment in each foundation project.

Sammanfattning

Vid utformning av en pålad grundkonstruktion skall verifieras att kraven i brott- och bruksgränstillstånden och kravet på beständighet är uppfyllda. Detta innebär bl a att pålgruppens och den enskilda pålens dimensionerande lastkapacitet och dimensionerande bärförmåga skall vara större än eller lika med dimensionerande lasteffekt under konstruktionens utförande och användning. Eller enklare uttryckt: pålen skall tåla både lasten i den färdiga konstruktionen och slagningen vid installationen samt kunna överföra lasten till jord eller berg med godtagbara deformationer.

Datorsimulering av påslagning innebär att slagning av en påle simuleras med hjälp av en beräkningsmodell av stötvågsförloppet i pålen. Modellen beskriver vågalstraren (slagningsutrustningen), mediet (pålen) och kopplingen till omgivningen (jorden/berget). Kraft- rörelsesamband mellan påle och jord beskrivs med mantel- och spetsbärförmåga, fjädring och dämpning.

Resultat av datorsimuleringen är:

- ☐ antal slag för att slå pålen till visst djup (pålens drivbarhet).
- ☐ spänningar i pålen vid slagningen.
- ☐ pålens bärförmåga som funktion av kvarstående sjunkning.

Datorsimulering är dock ingen metod för att bestämma pålens bärförmåga som funktion av djupet i jord - detta är i stället indata vid datorsimuleringen.

Datorsimulering av påslagning kan användas till att:

- ☐ välja optimal kombination av påle, slagningsutrustning och lastkapacitet/bärförmåga under givna geotekniska förhållanden.
- ☐ bestämma sjunkningskrav för verifiering av pålens bärförmåga.

Pålens drivbarhet påverkar lastkapaciteten hos pålen (upprepad belastning genom slagning sänker pålmaterialets hållfasthet). Genom datorsimulering av slagning kan pålens lastkapacitet som funktion av nedslagningsdjupet beräknas för olika slagningsutrustningar och fallhöjder. I stoppslagningssskedet analyseras vilka metoder för verifiering av bärförmåga som medför lasteffekter (spänningar) i pålen, högst lika med dess lastkapacitet. Ett effektivt utnyttjande av pålmaterialet förutsätter att slagningsutrustning och slagningssätt väljs så att lastkapaciteten för slagning inte överskrids, då en bärförmåga lika med lastkapaciteten i den färdiga konstruktionen verifieras. Att hitta optimal kombination av påle, slagningsutrustning, slagningssätt och verifieringsmetod är normalt inte möjligt utan simulering av påslagning.

Datorsimulering kan också användas till att:

- ❑ ta fram program för provpålning och dynamisk provbelastning.
- ❑ säkra kvaliteten vid analys av dynamisk provbelastning (utvärdering av bärförmåga enligt CASE-metoden eller genom signalmatchning av uppmätta stötvågor). För detta ändamål kan simulering visa hur förändringar av pålens tvärsnittsytta, E-modul och skarvglapp samt slagningsutrustningens funktion, t ex effektivitet, påverkar stötvågsförloppet i pålen.

Resultaten från datorsimulering kan aldrig bli bättre än kvaliteten på ingångsdata. Största osäkerheten finns i bestämningen av jordens egenskaper samt i slagningsutrustningens funktion. Här kan dock osäkerheten minskas genom systematisk erfarenhetsåterföring av resultat från jämförelser av simulering och efterföljande pålning. Nya geotekniska undersökningsmetoder som är bättre lämpade att bestämma jordens egenskaper för pålning bör också prövas - lovande resultat har erhållits från stötvågsmätning på hejarsondstänger.

Datorsimuleringstekniken är ett utmärkt hjälpmedel att finna en kostnadsoptimal kombination av påle och slagningsutrustning för varje enskilt grundläggningsobjekt.

1. Simuleringsteknikens möjligheter

I och med att tekniken med stötvågmätning på pålar infördes i större skala på 1980-talet har kunskapen om påslagningsprocessen ökat avsevärt, framförallt vad gäller att verifiera bärförmåga och att utreda orsaker till "oförklarligt" beteende hos pålar under slagning.

Nästa steg är att kunna förutse resultat, t ex hur många slag behövs för att driva pålen till ett visst djup, håller pålen för stoppslagningen och är det möjligt att verifiera bärförmågan med den valda slagningsutrustningen?

Allt detta är möjligt genom datorsimulering av påslagningen och dessutom i många fall nödvändigt för att hitta en kostnadsoptimal kombination av påle och slagningsutrustning för det aktuella fallet.

1.1. Projektering av pålgrundläggning

Vid projektering av en pålgrundläggning görs följande:

- 1/ Dimensionerande lasteffekt på den pålade grundkonstruktionen bestäms. Lasteffekt kan härröra från laster från den uppburna konstruktionen och från påtvingade rörelser.
- 2/ Dimensionerande lasteffekt på enskild påle beräknas utifrån antal och placering av pålar och med hänsyn till eventuella påhängskrafter från jorden.

Brottgränstillstånd:

- 3/ Påle med tillräcklig dimensionerande lastkapacitet för slagning och i färdig konstruktion väljs. (Lastkapacitet är pålelementets förmåga att som pelare betraktad ta last).
- 4/ Metod för verifiering av pålens bärförmåga väljs (förmåga att överföra lasteffekt på påle till jord/berg utan brott eller skadlig deformation).

Bruksgränstillstånd:

- 5/ Pålelementets dimensionerande lastkapacitet kontrolleras.
- 6/ Pålgruppens sättning beräknas. Är den acceptabel?

Utförandeskedet:

7/ Omgivningspåverkan bedöms och eventuella restriktioner vid utförandet anges.

Vid val av påle gäller ej enbart att studera om pålelementet som pelare kan ta upp den dimensionerande lasteffekten utan också att studera om pålelementet kan motstå de påkänningar som uppkommer vid installationen, och om det är möjligt att installera pålen till det djup som den geotekniska analysen visat behövs för att klara pålens bärförmåga. Detta brukar benämnas pålens drivbarhet.

Påkänningarna i pålen beror på:

- geotekniska förhållanden på platsen
- vald slagningsutrustning och fallhöjd.

Pålens avsedda bärförmåga uppnås genom att pålen slås till

- ☐ ett djup, som bestäms genom geostatiska beräkningar eller provbelastningar
- ☐ ett sjunkningskriterium (t.ex. antal mm/10 slag vid viss fallhöjd och hejarvikt) som bestäms genom simulering av påslagningen eller genom dynamiska provbelastningar
- ☐ en kombination av ovanstående.

Det ingår i projekteringen av en pålgrundläggning att bestämma lämplig slagningsutrustning, slagningssätt och verifieringsmetod för den valda påltypen. I många fall är det aktuellt med verifiering av både bärförmåga och lastkapacitet (integritet) genom dynamisk provbelastning efter installationen.

Projektets storlek och svårighetsgrad påverkar arbetsinsatsen vid projekteringen, arbetsutförandet och kvalitetskontrollen. Vid ett projekt med en liten okänslig industribyggnad på oskarvade pålar slagna till morän som överlagras av normalkonsoliderad lera kan Nybyggnadsreglernas [18] anvisningar enligt Geoteknisk Klass 1 (GK1) användas. När pålens lasteffekt närmar sig pålens lastkapacitet och de geotekniska förhållandena är mer komplicerade utförs dimensionering enligt Geoteknisk Klass 2 eller 3. Datorsimulering är då ett utmärkt hjälpmedel.

1.2. Drivbarhet

Efter preliminärt val av påltyp används simuleringsprogrammet för att studera:

- *lämplig slagningsutrustning*
- *spänningar som uppkommer vid installationen*
- *om det är möjligt att driva pålen till avsett djup/bärförmåga*

En geoteknisk undersökning ger ej direkt information om en påles drivbarhet. Efter en geostatisk beräkning av pålens slutliga bärförmåga görs en bedömning av hur stor del av

detta motstånd som verkar under slagningen. Denna bedömning är relativt osäker men en simulering ger ändå värdefulla uppgifter om

- *antal slag som fordras för att driva pålen till avsedd längd/bärförmåga*
- *drag- och tryckpåkänningar i pålen under slagningen*
- *överförd energi till pålen*

Efter första simuleringen studeras

- *om vald påle klarar påkänningarna (pålens lastkapacitet vid slagning)*
- *om vald slagutrustning klarar att slå pålen till avsett djup/bärförmåga*

Om inte - välj ny påle och/eller slagutrustning.

Dimensionering av en **påles lastkapacitet vid slagning** kan för betongpåle göras enligt BBK 79 [1] med antagandet att knäcklängden $l_c/h = 5$ (om pålen ej har lång fri längd vid slagningen), och att effektiva kryptalet $f_{ef} = 1$. Karakteristiska värden för ingående materials hållfasthetsvärden väljs som för korttidslaster och olyckslaster. Dessutom skall utmattning studeras.

Dimensionering av en stålpåles lastkapacitet för slagning kan göras enligt beräkningsekvationer i IVA Pålkommisionen Rapport 84 [2]. Värden hos jord, dvs bäddmodul respektive brottlast ökas från statiska till dynamiska värden enligt:

$$\text{Bäddmodul} = 50 \cdot C_{uk} \text{ (statiskt) blir } = 175 \cdot C_{uk} \text{ (dynamiskt)}$$

$$\text{Brottlast} = 6 \cdot D \cdot C_{uk} \text{ (statiskt) blir } = 9 \cdot D \cdot C_{uk} \text{ (dynamiskt)}$$

Exempel på beräkning av en stålpåles dimensionerande lastkapacitet vid slagning, se simuleringsexempel 4.

1.3. Bärförmåga

Efter val av påle och slagutrustning och när sjunkningen skall användas som verifiering av pålens bärförmåga kommer simuleringstekniken till användning.

Simuleringen ger som resultat antalet slag per meter vid olika karakteristiska bärförmågor. Den karakteristiska bärförmågan skall sedan divideras med partialkoefficienter för att ge dimensionerande bärförmåga. Partialkoefficienternas storlek beror på

- slagningsutrustning
- kunskap om geotekniken
- kontrollens omfattning vid utförandet.

1.4 Verifiering av bärförmåga

Bärförmågan kan verifieras på olika sätt. Om pålarna i huvudsak är mantelburna beror bärförmågan i första hand på pålens längd i jord och jordens egenskaper längs pålen. Om pålarna är spetsburna är jordens egenskaper intill spetsen avgörande för bärförmågan.

Längd som mått på bärförmågan

För mantelburna pålar verifieras bärförmågan genom geostatisk beräkning eller provbelastning. Dynamisk provbelastning med stötvågsmätning och utvärdering av mätresultaten med hjälp av signalmatchning, t.ex. med CAPWAP, är av ekonomiska skäl den i marknaden dominerande metoden. Eftersom osäkerheten är större vid geostatisk beräkning än vid provbelastning är den geostatiska beräkningen endast aktuell där jordens egenskaper är väl kända och provbelastning är kostsam på grund av tidsfaktorn (t.ex. pålar i kohesionsjord) eller vid mindre projekt med små lasteffekter.

Spetsmotståndet som mått på bärförmågan

Vid verifiering av bärförmågan för spetsburna pålar användes av tradition sjunkningen vid en viss fallhöjd och hejarvikt som mått på pålens bärförmåga. Traditionellt har stoppslagningstabellen i SBN Godkännanderegler 1975:8 använts [22]. I NR [18] finns för geoteknisk klass 1 regler för stoppslagning. I geoteknisk klass 2 kan regler enligt SBN 1975:8, Byggvägledningen [6] eller Pålgrundläggningshandboken [19] användas. I denna klass (GK2) är simulering av påslagning ett bra alternativ, eftersom platsspecifika parametrar för jorden och den aktuella slagningsutrustningen används istället för en generell metod.

En annan metod att bestämma sjunkningskriterium är att göra provpållning med provbelastning (vanligen dynamisk). Denna metod kan användas i alla geotekniska klasser och anpassar sjunkningskriteriet till de uppmätta förhållanden som råder på arbetsplatsen. För såväl mantel- som spetsburna pålar kan bärförmågan också verifieras genom provning och statistisk bearbetning av uppmätta bärförmågevärden

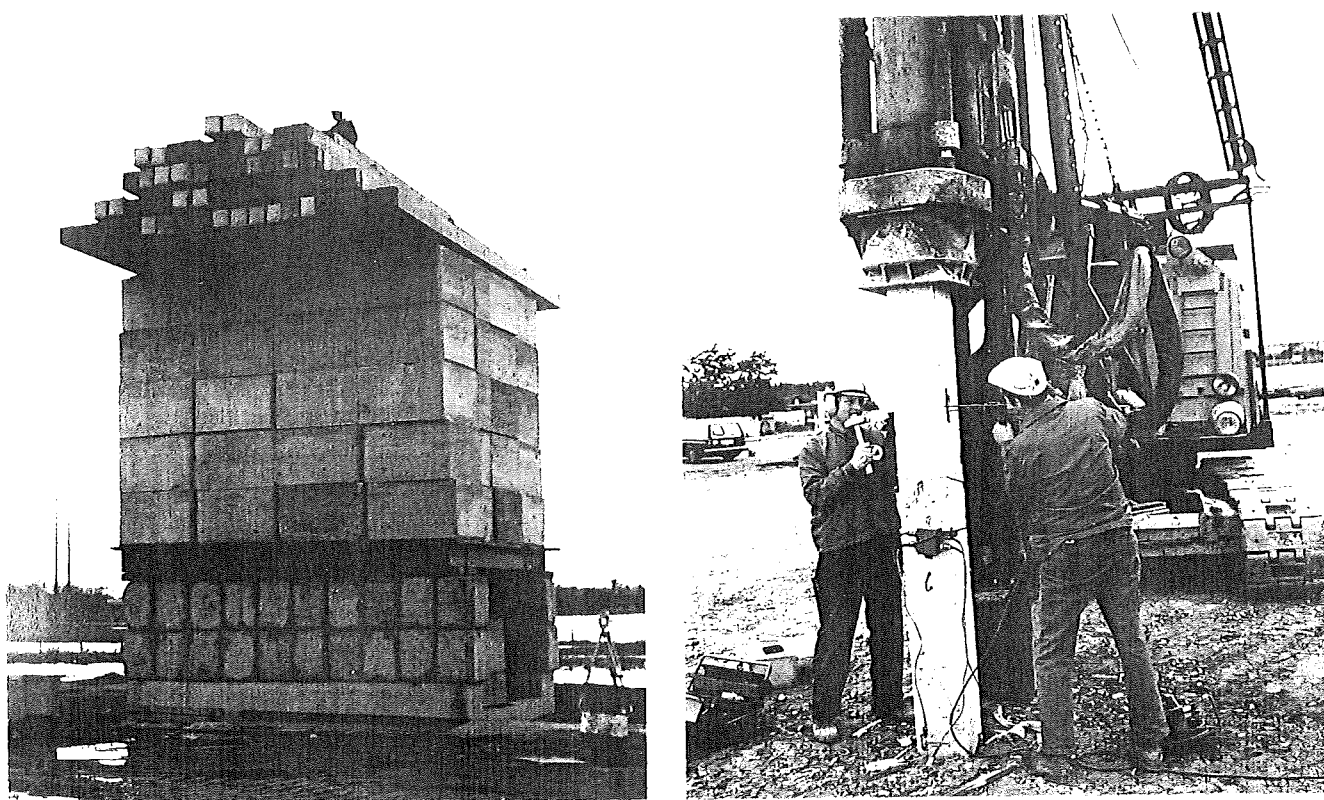
2. Historik och modeller

Metoder att med datorsimulering av påslagning upprätta stoppslagningsregler håller succesivt på att ersätta de gamla pålformlerna och används som alternativ till dynamisk provning. Stötvågsmätningar (dynamiska provbelastningar) har ofta ersatt de förhållandevis dyra och komplicerade statiska provbelastningarna.

För att bedöma bärförmåga hos pålar finns idag mer än 400 olika typer av empiriska pålformler. Dessa pålformler, vilka normalt utprovats genom jämförelse med statiska provbelastningar, ger god noggrannhet. Detta under förutsättning att hejarens, pålens och jordens egenskaper ej ändras från de förhållanden som gällde vid utprovningen.

Mellan olika länder varierar reglerna för hur pålar skall slås. Normalt krävs att statiska provbelastningar utförs för att verifiera bärförmågan.

Under de senaste 30 åren, då datorkapacitet och mätelektronik utvecklats, har metoder som datorsimulering och stötvågsmätningar utvecklats till att fungera som praktiska hjälpmedel för förståelse av pålars funktion i jord.



Figur 1. Exempel på skillnad mellan statisk- och dynamisk provbelastning.

2.1 Historik

Påslagning och grundläggning med pålar har använts i mer än 12 000 år. Det har således under lång tid funnits ett intresse av att förstå påslagningsprocessen och att skapa regler/normer för påslagning. Redan 1867 presenterade De Saint-Venant [8] en teori för att beräkna vågutbredning /stötvågor i långsmala kroppar (endimensionell vågutbredning). De första kända försöken att använda denna vågteori till att förstå påslagning gjordes av David Isacs (1931) och E. N. Fox (1932). De jämförde existerande påslagningsformler med teoretiska beräkningar enligt vågteori.

År 1932-1938 utförde Glanville, Grime samt Fox [14] stötvågsmätningar på betongpålar i London för att bestämma stötpulsens storlek. Det var mycket otillfredsställande att inte veta kraftspelet vid slagning av pålar så att man kunde förhindra den kraftiga bortslagning som inträffade så fort det blev svårare slagningsförhållanden. Spänningar i pålar uppmättes med piezoelektriska kraftgivare. Givare och mätsystem byggdes upp speciellt för dessa provningar. De resultat som erhöles visade att energiformler inte fungerade som hjälpmedel för bedömning av påslagning. För bestämning av kraftspelet jämfördes mätresultat med resultat från vågteorin. Förklaringar erhöles till varför pålarna gick sönder. Riktlinjer kunde därmed ges till hur pålarna borde slås.

Utan hjälp av datorer är det närmast omöjligt att från matematiska ekvationer beräkna och förstå stötvågsförlopp i pålar. År 1942 utvecklade De Juhasz [7] en teori för att grafiskt kunna beräkna stötpulser. H. C. Fischer presenterade 1960 [11] en vidareutveckling av den s.k. Grafodynamiska metoden för beräkning av stötpulser i pålar. Med H. C. Fischers arbete infördes olika jordmodeller för påslagning och t.ex. förhållandet mellan en påles last mot dess sjunkning kunde beräknas. H.C. Fischers teori är bakgrund till stoppslagningsregler enligt Svensk Byggnorm 1975:8 [22]. Beräkningsmodell samt resultat av utförda beräkningar presenterades av L. Hellman 1967 [16].

Både De Juhasz och H. C. Fischer utvecklade metoder för att på grafisk väg lösa den endimensionella vågekvationen. Beräkning sker enligt den kontinuerliga modellen, dvs hammare/påle betraktas som kontinuerliga kroppar. Beräkning utförs enbart i diskreta punkter där det existerar areaförändringar, eller i punkter där krafter från jorden påverkar pålen.

År 1960 presenterade E. A. L. Smith [21] en datormodell för beräkning av påslagning enligt den endimensionella vågteorin. Hammare/dyna/påle delades upp i element av massor och fjädrar. Jorden påverkar pålen i diskreta punkter i form av elementbärförmåga, fjädring och dämpning. Till skillnad från den kontinuerliga modellen, enligt De Juhasz och H. C. Fischer, kräver Smith's datormodell beräkningar vid varje masspunkt, oavsett om där existerar någon förändring av stötpulsen eller ej.

Från E.A.L. Smith's datormodell av påslagning har det utvecklats ett stort antal datorprogram. Många universitet och konsultföretag som sysslar med geoteknik och grundläggning har utvecklat egna datorprogram. Normalt bibehålls Smith's grundekvationer och synsätt, det som tillkommit har varit vissa förändringar hos jordmodellen alternativt

att datorfiler införts i programmen för modellering av olika hejare (t.ex. dieselhejare). WEAP är ett sådant datorprogram som fått stor allmän spridning. Programmet utvecklades i USA av Goble & Rausche med medel från Federal Highway Administration (1976) [15]. I WEAP finns en datafil med ett stort antal hejare, som dieselhejare, ånghejare, tryckluftshejare och frifallshejare. Datorprogrammet ger dessutom rekommendationer angående värden på dämpning, fjädring etc. hos jorden.

Datorprogram har även utvecklats för den kontinuerliga modellen, enligt De Juhasz och Fischer. Antalet datorprogram är dock betydligt färre än datorprogram enligt E.A.L. Smith. Nämnas kan datorprogram från Atlas Copco/Uppsala Universitet (1969) [24] respektive TNO (Nederländerna).

Förutom datorprogram för endimensionell vågutbredning har även mer komplexa program för 2- respektive 3-dimensionell vågutbredning utvecklats. Påslagning kan dock huvudsakligen karaktäriseras till att vara en endimensionell vågutbredningsprocess. Datoranalyser enligt 2- respektive 3-dimensionell vågutbredning ger endast ringa tillskott i kunskap för förhållanden vid "normal" påslagning. Skall däremot specialproblem lösas som t.ex. stötvågsförlopp vid areaförändringar i hammare respektive pålar, där den endimensionella teorin ej är applicerbar, då har dessa program sin givna plats.

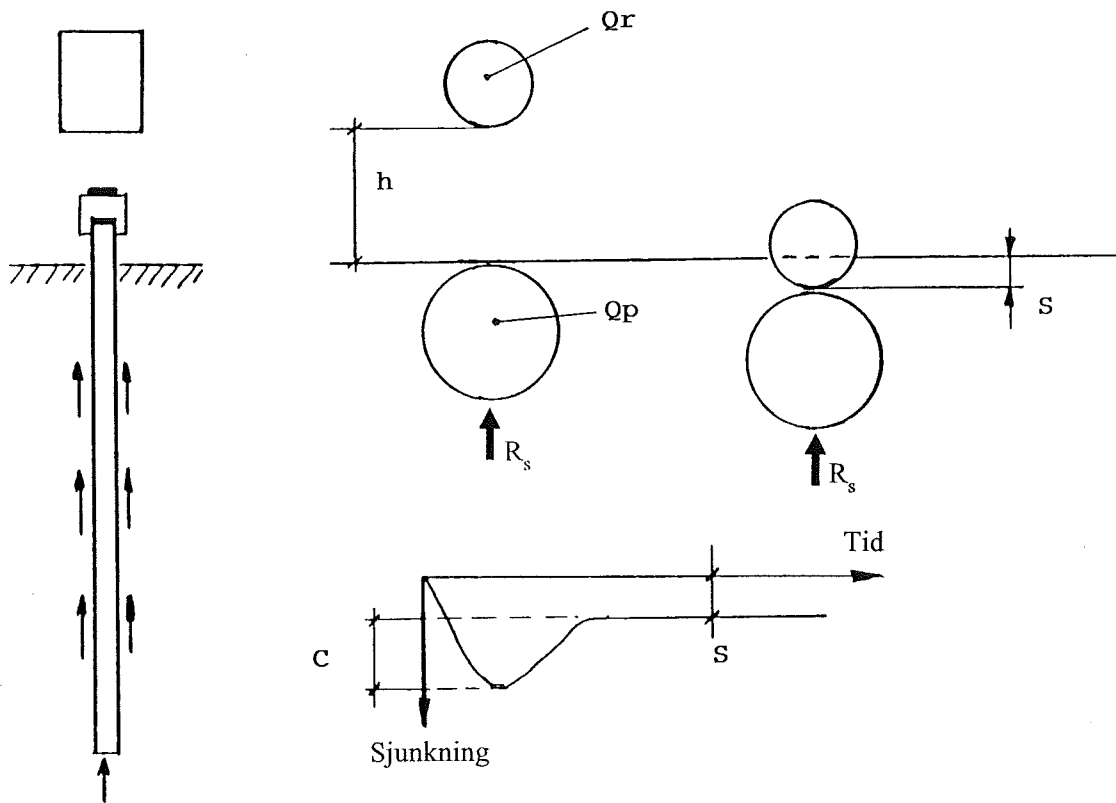
Datorprogram för studie av påslagning enligt finita element metoden (FEM) bör dock ge möjlighet att bättre förklara jordbeteenden än de enkla modellerna man använder vid datorsimulering enligt E.A.L. Smith. FEM-datorprogram kräver dock stor minneskapacitet och beräkningar tar lång tid. På sikt bör dock dessa typer av datoranalyser bättre kunna förklara och beskriva påslagningen såsom process än den enkla endimensionella vågbetraktelsen.

2.2 Modeller för bedömning av påslagning

2.2.1 Empiriska och dynamiska påslagningsformler

Merparten av de påslagningsformler som existerar är härledda från Newton's lag om energiöverföring mellan kroppar som stöter emot varandra. Newton varnade själv för att använda denna teori till påslagning och det är ej förvånande att dessa formler, som inte beaktar vågutbredning, i vissa lägen ger mycket stora felaktigheter. Under andra förhållanden fungerar dock energiformler bra, t.ex. för korta pålar som slås med tunga hammare. Verkningsgraden hos hammaren måste dock vara känd.

FIG. 2 visar de antaganden som gjorts av påslagning för de dynamiska påslagningsformlerna. Den tillförda energien från hammaren skall motsvaras av pålens sjunkningsenergi samt eventuellt även fjädringsenergi. Modellen beaktar enbart energiöverföring mellan masspunkter och tar ej hänsyn till vågutbredning. Olika korrektionsfaktorer införs på energiöverföringen som t.ex. skillnad mellan massor, stötkoefficienter, verkningsgrad, fjädring. Olika koefficienter används för olika typer av hejare.



Figur 2. Modell av påslagning enligt energibetraktelse.

■ Empirisk formel enligt Gates (1957) [11].

Gates empiriska formel har tagits fram genom statiska provbelastningar på 130 pålar.

$$R_s = 117 \sqrt{Q_r \cdot h \cdot \eta} \log \frac{254}{s} \quad \text{Ekv. 1}$$

R_s = bärförmåga kN
 Q_r = hejarens tyngd, kN
 η = verkningsgrad 0,8
 h = nominell fallhöjd, m
 s = sjunkning i mm

■ Dynamisk pålformel enligt Engineering News [11].

Tillsammans med Hileys formel är denna pålningsformel den vanligast förekommande. Enligt FIG. 2 erhålls pålens bärförmåga, R_s , enligt energiformeln:

$$R_s = \frac{Q_r \cdot h}{s + \frac{c}{2}} \quad \text{Ekv. 2}$$

R_s = bärförmåga, kN

Q_r = hejarens tyngd, kN

h = nominell fallhöjd, mm

s = sjunkning, mm per slag

c = pålens + jordens fjädring vid påhuvudet, mm

Pålens sjunkning och fjädring mäts.

För beräkning av tillåten last divideras ovanstående beräkning av bärförmåga med en säkerhetsfaktor. Normalt värde på denna säkerhetsfaktorn är $F \approx 6,0$.

■ Dynamisk pålformel enligt Hiley [11]

$$R_s = \frac{Q_r \cdot h}{s + \frac{c}{2}} \cdot \frac{Z + (COR)^2}{Z + 1} \quad \text{Ekv. 3}$$

$Z = Q_r / Q_p$

Q_p = pålens + dynans tyngd, kN

COR = stötkoefficient, 0,5 för fallhejare

Övriga beteckningar enligt ekv. 2 ovan.

Vid beräkning av tillåten last utförs division med säkerhetsfaktor. Normalt värde på säkerhetsfaktorn är $F \approx 4 - 5$.

■ Dynamisk pålformel enligt Krüger (1917) [11].

Denna pålningsformel var den mest använda i Sverige innan stoppslagningsregler enligt SBN 1975:8 infördes. Formeln är identisk med Hiley's formel om stötkoefficient sätts till 0,5 samt att verkningsgrad införs.

$$R_s = \eta \cdot \frac{Q_r + 0,25 \cdot Q_p}{Q_r + Q_p} \cdot \frac{Q_r \cdot h}{e + 0,5 \cdot c} \quad \text{Ekv. 4.}$$

η = verkningsgrad, som sätts till 1,0 för frifallshejare, 0,8 för linhejare

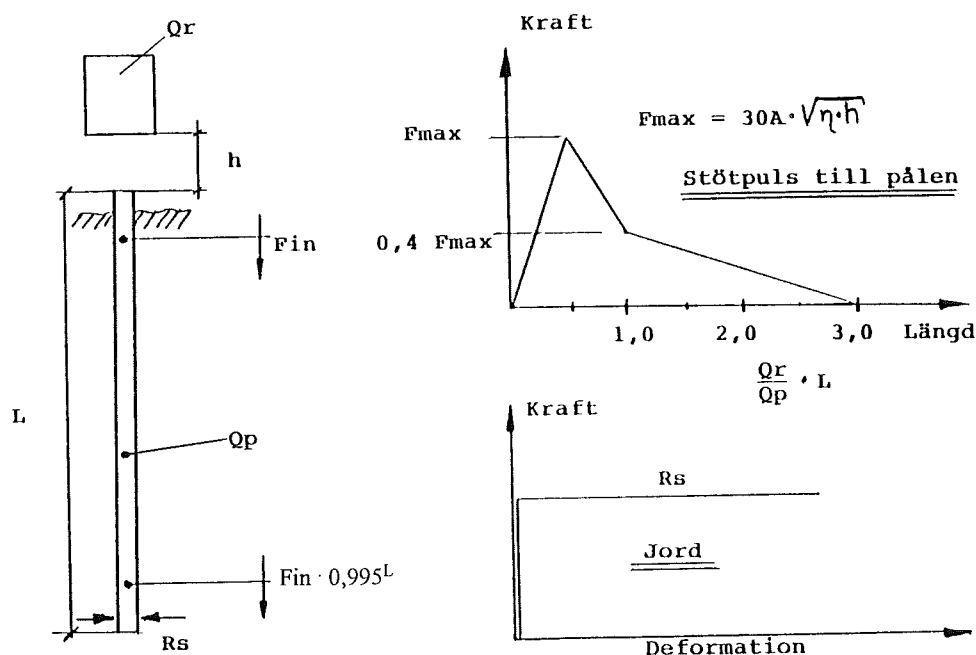
e = sjunkning, mm per slag

Övriga beteckningar enl. ekv. 2 och 3 ovan.

Vid beräkning av tillåten last utförs division med en säkerhetsfaktor $F \approx 4$

■ Stötvågsformel för bestämning av bärförmåga enligt SBN 1975:8 [22].

SBNs stoppslagningstabell för betongpålar [22] bygger på ett stötvågsteoretiskt tänkande. Stötpulsen till pålen antas ha ett utseende som beror av hammare/påle/fallhöjd, enligt FIG. 3. Denna stötpuls vandrar ned till pålspetsen där jordens bärförmåga antas vara samlad. Jorden fungerar stelt/plastiskt utan dämpning. Är stötpulsen till pålen större än 50 % av pålens bärförmåga sjunker pålen, se [16]. Stoppslagningsreglerna enligt SBN 1975:8 är beräknade enligt denna modell. Ursprungligen upprättades stoppslagningsreglerna för stoppslagning av 250 x 250 mm betongpålar till 3-faldig säkerhet. Denna påltyp var den vanligast förekommande. För pålar med dimension 235 x 235 & 270 x 270 mm gjordes extrapolation. Vid beräkning av tillåten last enligt denna jordmodell utförs division med en säkerhetsfaktor av storlek $F \approx 3,3$.

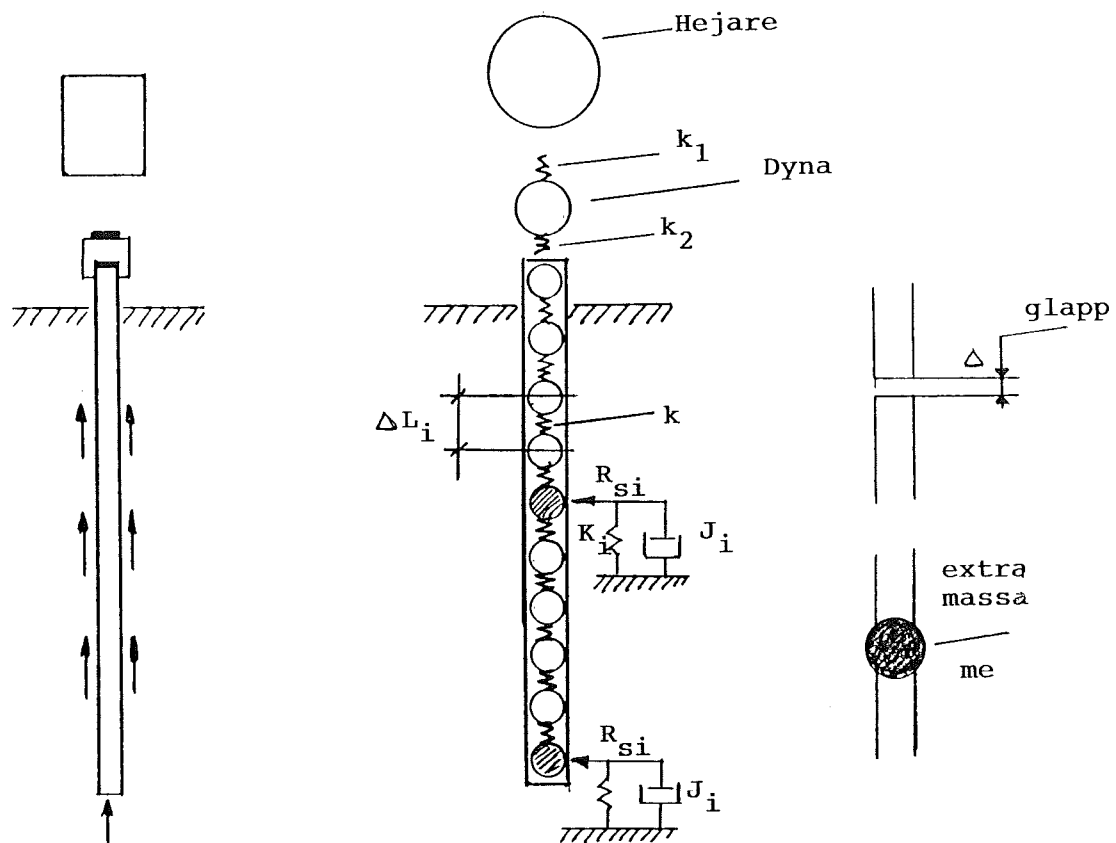


Figur 3. Modell för beräkning av last/sjunkningssamband hos pålar enligt SBN 1975:8.

2.2.2 Datorsimulering av påslagning enligt E.A. Smith

År 1960 presenterade E.A.L. Smith [21] en numerisk modell för att beräkna stötvågor i pålar. Med datorns hjälp kan stötpulsen (kraft, hastighet, rörelse, energi etc.) beräknas i valfri del av pålen. Pålens bärförmåga som funktion av kvarstående sjunkning kan bestämmas med en noggrannhet som är överlägsen någon energibetraktelseformel, förutsatt att jordens egenskaper är någorlunda väl kända. Detta beroende på att Smith's modell tar hänsyn till det faktiska skeendet vid påslagning vilket är en vågutbredningsprocess.

Vid datorberäkningen delas hejaren, dynan samt pålen upp i element bestående av massor och fjädrar. Jorden påverkar pålen i diskreta punkter i form av elementbärförmåga, fjädring och dämpning. Modell av hejare, dyna samt påle och jord, se FIG. 4.



Figur 4. Modell av påslagning enligt E.A. Smith.

Modell av påle

Pålen delas upp i element, ΔL_i , vilka kan vara konstanta eller variera längs pålen. Massan för varje pålelement, $m = \rho \cdot A \cdot \Delta L_i$ respektive storlek på fjädrar, $k = EA/\Delta L_i$, beräknas av programmet. Varierar pålens tvärsnitt kommer även fjädring och massor att variera. I pålmodellen finns normalt även möjlighet att införa extra punktmassor (m_e) eller glapp.

De extra punktmassorna kan modellera den extra massa som införs mellan påle och knekt eller mellan påldelar för att hålla dessa samman under slagningen, vilket är vanligt vid offshorepålning. Skarvar till slanka stålpålar kan modelleras som extra masspunkter. De slanka pålarnas skarvar ger ofta ett betydande masstillskott. Modellering kan även ske av jordplugg vid pålspetsen när öppna stålpålar slås.

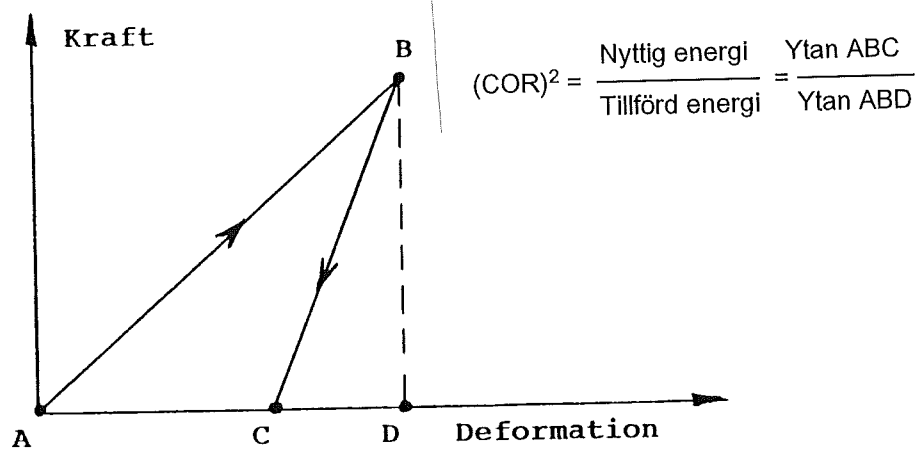
Modellering av glapp kan göras antingen såsom ett fysiskt glapp mellan påldelar eller enbart så att dragkrafter ej kan överföras mellan segmenten, t.ex. mellan påle och knekt eller som vid slagning av stålpålar med ej dragstarka skarvar.

Modell av hejare och dyna

Dynan modelleras normalt som en masspunkt och två fjädrar, en fjäder mellan hejare och dyna (trækubben) och en mellan dyna och påle (dynträ). Hejaren modelleras oftast

såsom en punktmassa, om denna är en kompakt fallhejare, lufthejare eller ånghejare. För mer komplicerade hejare såsom dieselhejare krävs en mer utvecklad modell bestående av fler masspunkter och fjädrar. Vid modellering av en dieselhejare beaktas ej enbart hammarens slag mot dynan/pålen utan även kompressionsfas och explosionsfas hos gasblandningen olja-luft. Datorprogrammet WEAP innehåller ett stort antal datafiler för olika dieselhejare där detta beaktas.

De fjädrande elementen i dynan (trä, plast etc.) modelleras enligt FIG. 5. En storhet som beskriver dynors energidämpning och som används vid datorsimulering av olika dynmaterial är stöttelet "coefficient of restitution", "COR", vars definition framgår av FIG. 5. Storleken på stöttelet har utprovats för olika dynmaterial via slagpendelförsök.

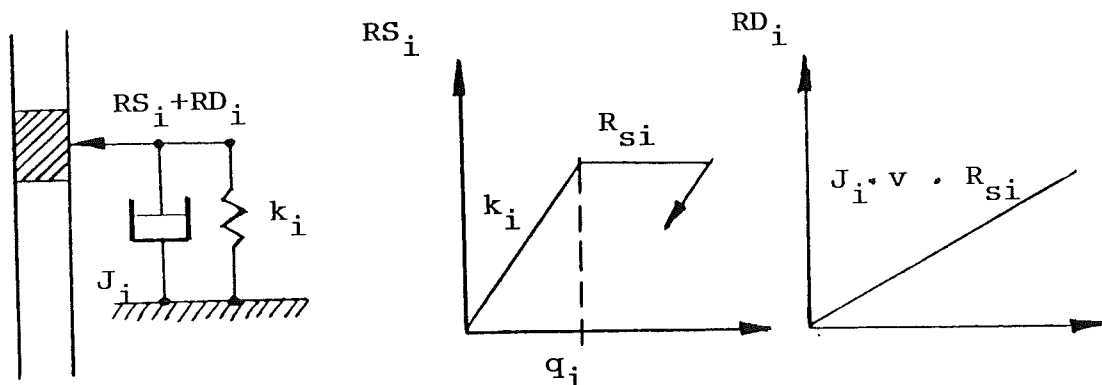


Figur 5. Modell av fjädrande material i dyna.

Ett dynmaterial som har lågt värde på stötkoefficienten, COR, överför mindre energi till pålen än ett material med stor stötkoefficient.

Modell av jord

Enligt den av E.A.L. Smith använda modellen av jord [21] modelleras denna som elementbärförmåga, fjädring och dämpning (FIG. 6), detta oavsett om det existerar mantelfriktion eller spetsmotstånd. Elementbärförmåga, fjädring och dämpning kan varieras valfritt längs pålen.



Figur 6. Modellbetraktelse av jord enligt Smith.

Den **statiska bärförmågan** för elementet, R_{si} , uppnås när detta förflyttas sträckan q_i (quake), därefter sjunker elementet utan att bärförmågan ökar. Den statiska och dynamiska kraften från jorden mot pålen beskrivs enligt ekvationer nedan:

$$RS_i = \frac{u_i}{q_i} \cdot R_{si} \quad \text{för } u_i < q_i$$

$$RS_i = R_{si} \quad \text{för } u_i > q_i$$

RS_i = mobiliserad statisk kraft
 u_i = elementets rörelse
 R_{si} = elementbärförmåga.
 q_i = fjädring (quake) hos elementet

Den **dynamiska kraften** mot pålen från jorden beskrivs av dämpningsvärde samt hastighet hos elementet. Normalt används fyra typer av dämpningskrafter enligt:

a) Standard Smith damping (vanligast)

$$RD_i = \frac{u_i}{q_i} \cdot R_{si} \cdot J_s \cdot v_i$$

b) Smith dämpning men konstant värde, R_{si} , och ej beroende på om detta mobiliseras eller ej.

$$RD_i = R_{si} J_s v_i$$

c) Case dämpning

$$RD_i = J_{ci} Z_i v_i$$

d) Exponentiell dämpning

$$RD_i = J_s R_{si} v_i^N$$

med beteckningar enligt:

RD_i = dynamisk kraft från jorden
 v_i = elementets hastighet
 J_s = Smith dämpning
 J_c = Case dämpning
 Z_i = pålens vågimpedans (AE/c)
 N = exponent (vanligtvis 0,2 för sand och 0,18 för lera enligt Litkouhi, S. & Poskitt, T.J. (1980). Damping constant for pile driveability calculation. Geotechnique, vol 30, no 1)

Den vanligaste modellen för dämpning är standard Smith dämpning enligt punkt a). Denna dämpningsmodell rekommenderas generellt såvida det ej existerar stor erfarenhet av någon annan typ av dämpning.

2.3 Jämförelse mellan olika metoder

Det bästa sättet att bestämma en påles bärförmåga som funktion av dess sjunkning är att göra stötvågsmätningar direkt på arbetsplatsen med aktuell påltyp och hejare. Utförs ej stötvågsmätningar kan slagningsregler och bärförmåga mot sjunkning uppskattas med någon påslagningsformel eller hellre med datorsimulering av påslagningen. I FIG. 7 och 8 visas exempel på hur bärförmåga mot sjunkning beräknas med olika metoder. I figurerna jämförs beräknad bärförmåga mot sjunkning enligt:

- Datorsimulering av hejare/påle/jord enligt datorprogram WEAP. Hejaren är en 40 kN frifallshejare med antagen verkningsgrad av 80 %. Pålen är betongpåle 270 x 270 mm av längd 10 m (FIG. 7) respektive längd 50 m (FIG. 8).
- Stötvågsformel för bestämning av bärförmåga enligt SBN 1975:8 med antagen stötvåg till pålen samt jord utan fjädring och dämpning (modell enligt FIG. 3). Stötpulsen som vandrar ned i pålen dämpas med 0,5 % per meter.
- Krügers pålformel, vilken var den vanligast förekommande påslagningsformeln i Sverige innan SBN 1975:8 infördes.
- Engineering News påslagningsformel vilken tillsammans med Hiley's formel är den mest använda påslagningsformeln utomlands.

Ingående data för simulering enl. WEAP:

Hejare: frifall 40 kN, effektivitet 80 %

Dyna: 2,5 kN

Hejare/dyna: Styvhet $k = 8\,000$ kN/mm
Avrundning (RO) = 1,0 mm
Stötkoefficient (COR) = 0,8

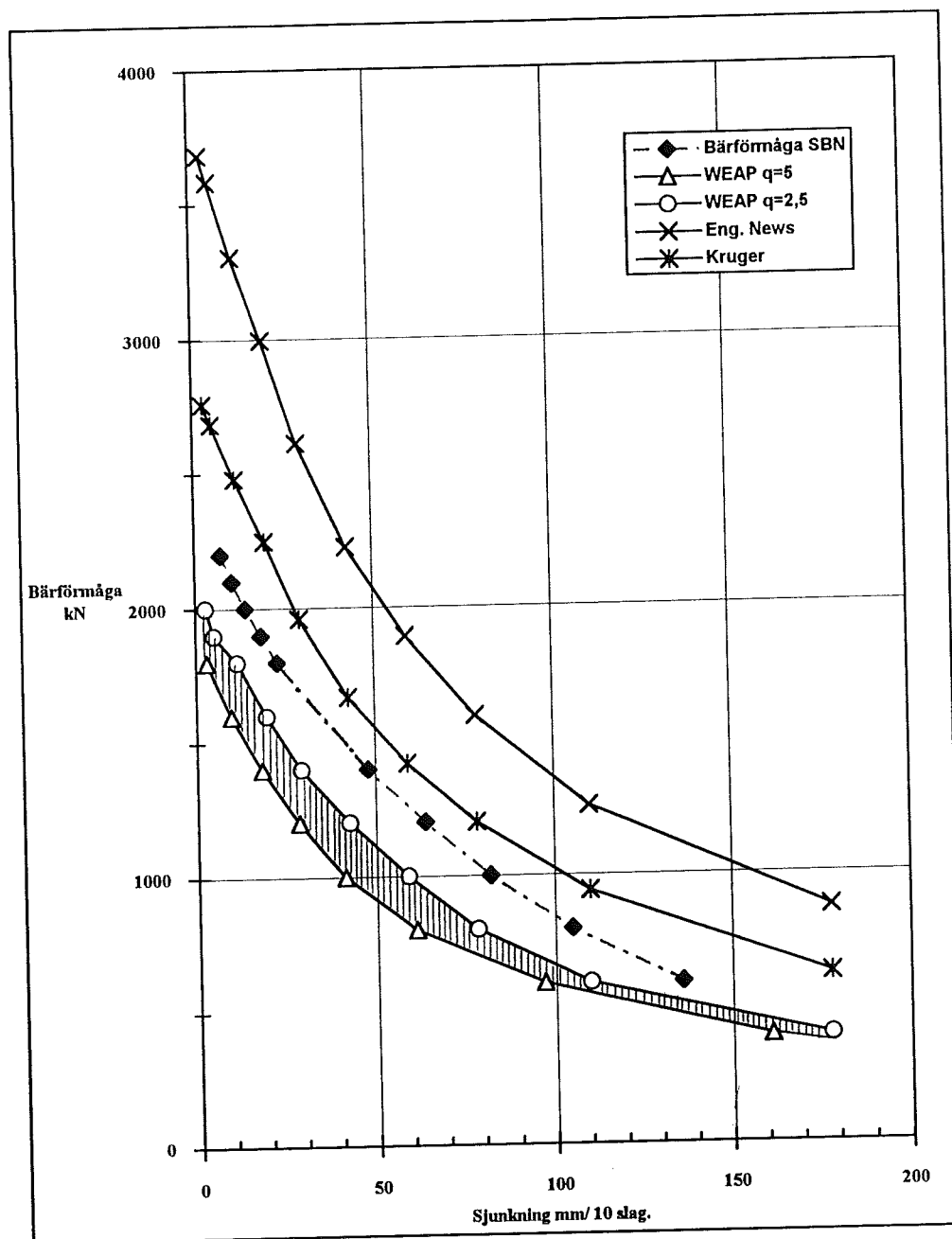
Dyna/påle: Styvhet $k = 800$ kN/mm
Avrundning (RO) = 2,0 mm
Stötkoefficient (COR) = 0,8

Påle: Area = 729 cm²
E-modul = 40 000 MPa
Tunghet = 24,5 kN/m³
Materialdämpning 3 %
Pålen indelas i element med längd 1,0 m

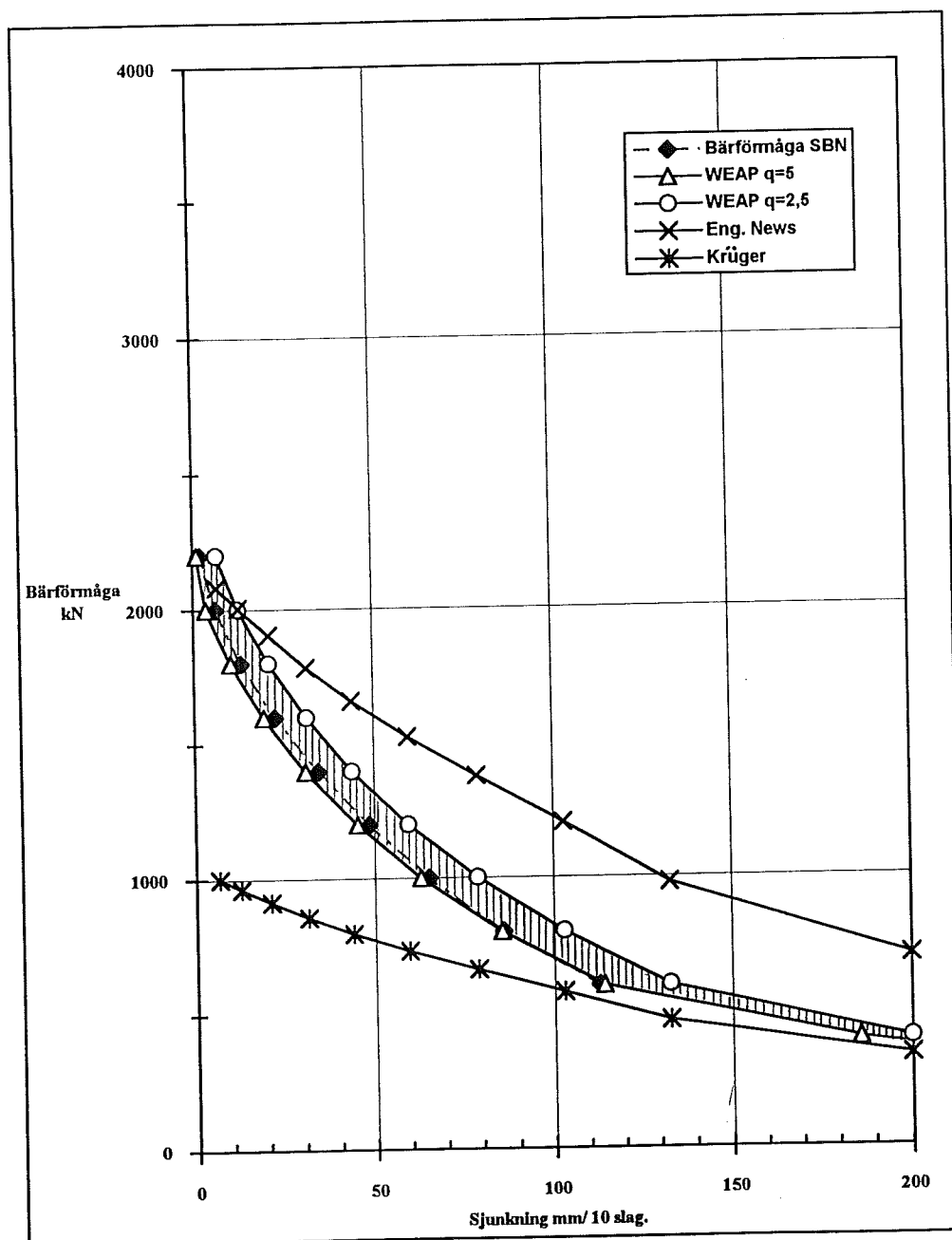
Jord: Smith dämpning, $J_s = 0,3$
Fjädring (quake) $q = 2,5$ mm resp 5 mm 99 % av bärförmågan är spetslast.

I påslagningsformler t.ex. Eng. News respektive Krüger skall värden på pålens sjunkning och fjädring införas i ekvationer. Dessa värden på sjunkning respektive fjädring är hämtade från datorsimuleringen enligt WEAP med jordfjädring $q = 2,5$ mm.

FIG. 7 visar beräkning av bärförmåga/som funktion av kvarstående sjunkning för en 10 meter lång betongpåle som slås med en 40 kNs frifallshejare. Pålen har dimensionen 270 x 270 mm. Fallhöjden är 40 cm, dvs stoppslagningsfallhöjd enligt SBNs stoppslagningstabell för B600-pålar. Hejaren förväntas ha en effektivitet av 80 %.



Figur 7. Utvärdering av bärförmåga mot sjunkning. Betongpåle 270 x 270 mm, med längd 10 m. Spetsburen. Frifallshejare 40 kN, fallhöjd 40 cm.



Figur 8. Utvärdering av bärförmåga mot sjunkning. Betongpåle 270 x 270 mm, längd 50 m. Spetsburen. Frifallshejare med fallhöjd 50 cm.

Det streckade området i FIG.7 visar datorsimulering av slagning enligt datorprogram WEAP. Spetsfjädring (quake) har varierats mellan 2,5 och 5,0 mm. Jorddämpning har satts till $J_s = 0,3$. Dämpning och fjädring beror av jordtyp och påldimension. Ovan valda värden på fjädring och dämpning kan förväntas vara realistiska under förutsättning att pålen slås till små sjunkningsvärden $S < 50$ mm/10 slag i fast morän. Vid större sjunkningsvärden är det troligt att både fjädringsvärden och dämpningsvärden är något högre.

Eng. News pålformel respektive Krügers formel överskattar bärförmågan inom hela sjunkningsintervallet. Vid dimensionering enligt formler ovan utförs normalt division med en säkerhetsfaktor. Säkerhetsfaktorn är vanligtvis 6,0 för Eng. News och 4,0 för Kreugers formel.

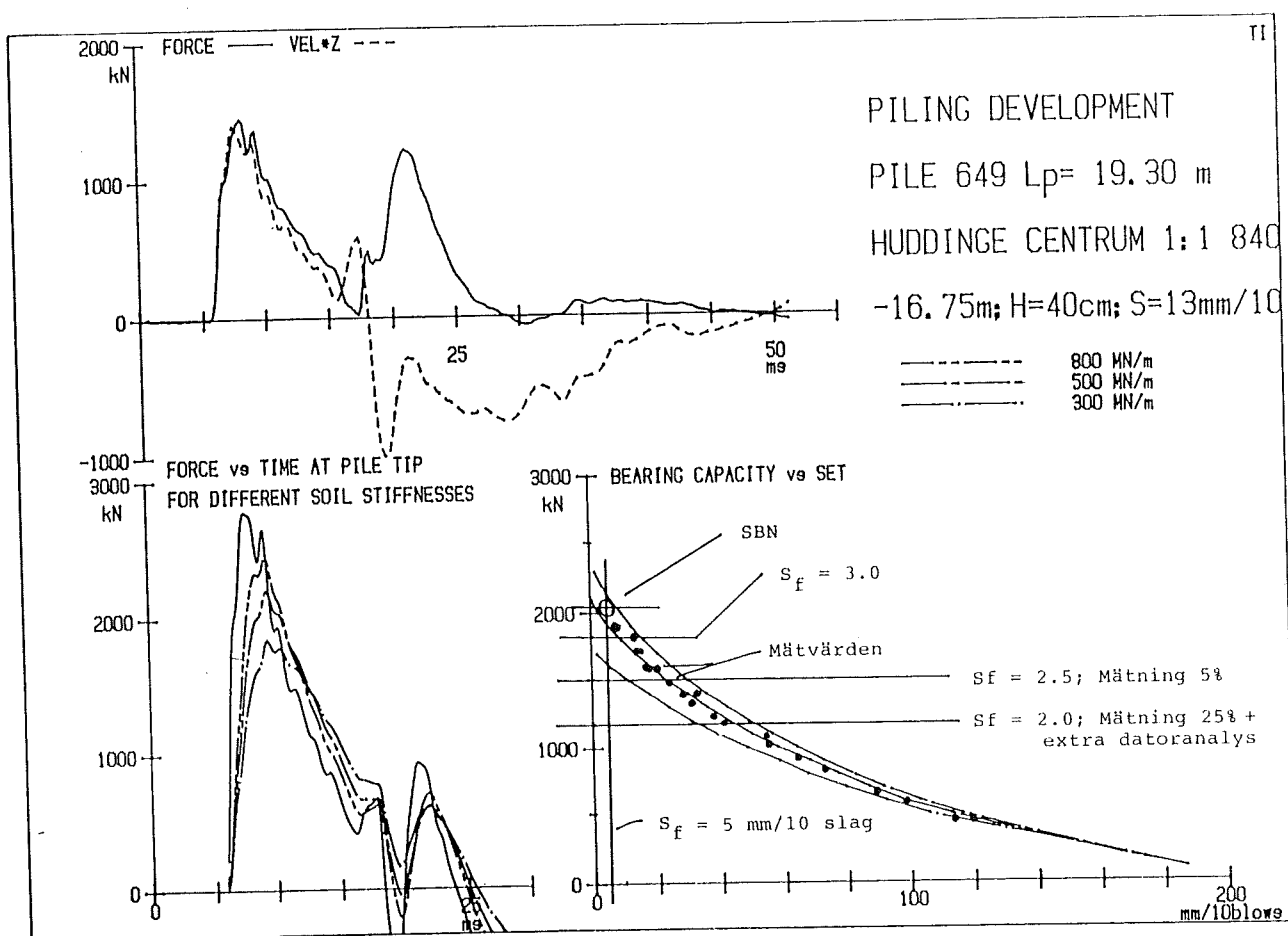
SBNs stötvågsmodell och jordmodell övervärderar även denna bärförmågan jämfört med datorsimuleringen enligt WEAP. I SBN-modellen beaktas ej jordens fjädring och dämpning. Stötpulsen till pålen är även denna antagen enligt FIG. 3. Modellen bygger dock på ett stötvågsteoretiskt tänkande och fungerar förhållandevis väl. Pålar vilka stoppslås till sjunkning 7 mm/10 slag erhåller enligt SBN-modellen bärförmågan 2 200 kN. Tillåten last för en dylik påle är 600 kN enligt stoppslagningstabell i SBN 1975:8.

FIG. 8 visar en beräkning av bärförmåga mot kvarstående sjunkning för en 50 m lång betongpåle som slås med en 40 kN frifallshejare. Fallhöjden är 50 cm dvs. stoppslagningsfallhöjd enligt SBN's stoppslagningstabell. Pålen är i enlighet med FIG. 7 helt spetsburen. Det streckade området i FIG. 8 visar datorsimulering av slagning enligt datorprogram WEAP. Spetsfjädring har varierats mellan 2,5 och 5,0 mm. Jorddämpning har satta till $J_s = 0,3$.

Påslagningsformeln Eng. News övervärderar bärförmågan framför allt vid stora sjunkningar. Krügers pålformel undervärderar bärförmågan vid långa pålar och detta beroende på att det i ekvationen finns en term med en massrelation mellan hejare och påle, se EKV. 4 vilken ej har något samband med ett stötvågsteoretiskt tänkande. Stoppslagning av långa pålar enligt Krügers formel ställer krav på mycket höga fallhöjder om pålens kapacitet skall kunna utnyttjas. Stoppslagningsfallhöjderna blev orealistiskt höga och medförde stor bortslagning.

Utvärdering av bärförmåga/sjunkning enligt SBNs stötvågs- och jordmodell ligger inom intervallet för datorsimuleringen. Att övervärdering här ej sker beror av att pålen är 50 meter lång och att stötpulsen dämpas 0,5 % per meter.

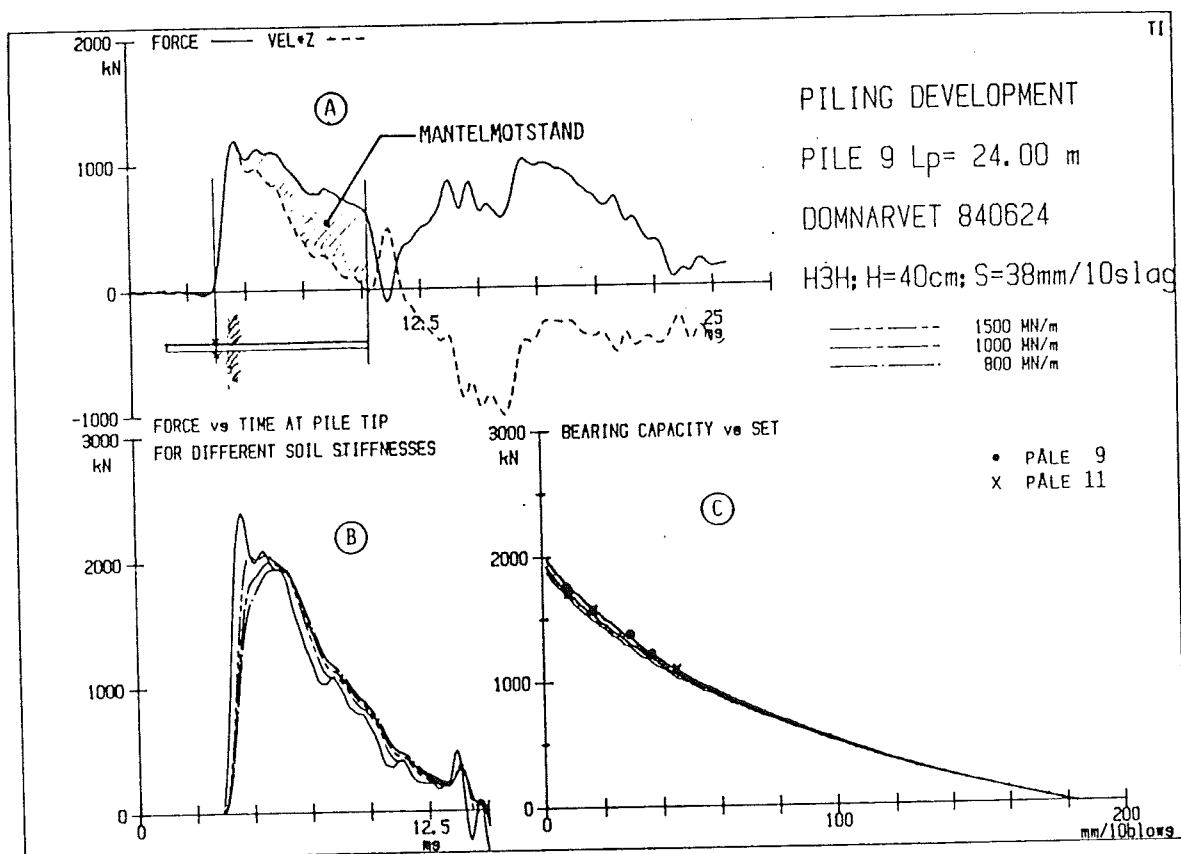
FIG. 9 visar stötvågsresultat från provpållning med B600-pålar i Huddinge Centrum. Pålarna slås med frifallshejare 30 kN från fallhöjd 40 cm. Figuren redovisar datorberäknad bärförmåga/sjunkning samt mätresultat från stötvågsmätning vid olika sjunkningsvärden. Datorsimuleringen är utförd med datorprogram PiD-Wave vilket utvecklats av PiD-Uppsala i samarbete med Studio Geotecnico Italiano. Datorprogrammet fungerar motsvarande WEAP enligt Smith's datormodell för datorsimulering hejare/dyna/påle/jord alternativt kan uppmätt stötvågssignal användas som insignal till programmet. I FIG. 9 resp. 10. utnyttjas uppmätt stötvågssignal som insignal till datorprogrammet och beräkning görs av relationen bärförmåga mot sjunkning. Pålarna behandlas som spetsburna pålar. Jorden modelleras med spetsdämpning enligt Case. Fjädringen vid spetsen (quake; mm.) har ersatts med fjäderstyvhet (k ; MN/mm) under pålen. Pålarna har en varierande längd mellan 15 och 25 m. och stoppslås inom en sträcka av ca 3 m. i morän (sjunkningsvärden från ca 100 mm/10 slag till 10 mm/10 slag). Jorden har modellerats med fjäderstyvhet $k = 800$ MN/m till $k = 300$ MN/m, dämpning $J_{case} = 0,4$. Stoppslagning enligt SBN dvs. slagning till sjunkning 7 mm/10 slag gav en bärförmåga högre än 2 000 kN.



Figur 9. Stoppslagning av B600-pålar i Huddinge centrum med hejare Uddcomb H3H. Fallhöjd 40 cm. Datorberäkning av bärförmåga mot sjunkning enl. PID-Wave med vald fjäderstyvhet hos jord av $K = 800, 500$ resp. 300 MN/m och dämpning $J_c = 0,4$. Jämförelser med erhållna resultat från stötvågsmätningar.

FIG. 10 a och b visar andra exempel på provpålning, stötvågsmätningar och datorberäkningar av bärförmåga mot sjunkning. Figurerna är hämtade från en provpålning vid Domnarvet i Borlänge. På arbetsplatsen slogs stålpålar (110×110 mm) dels med 30 kNs frifallshejare och dels med tryckluftshejare BSP 600 N (slagkolv 201 kg). Pålar-na hade en längd av 18 - 24 m och slogs i mycket fast morän.

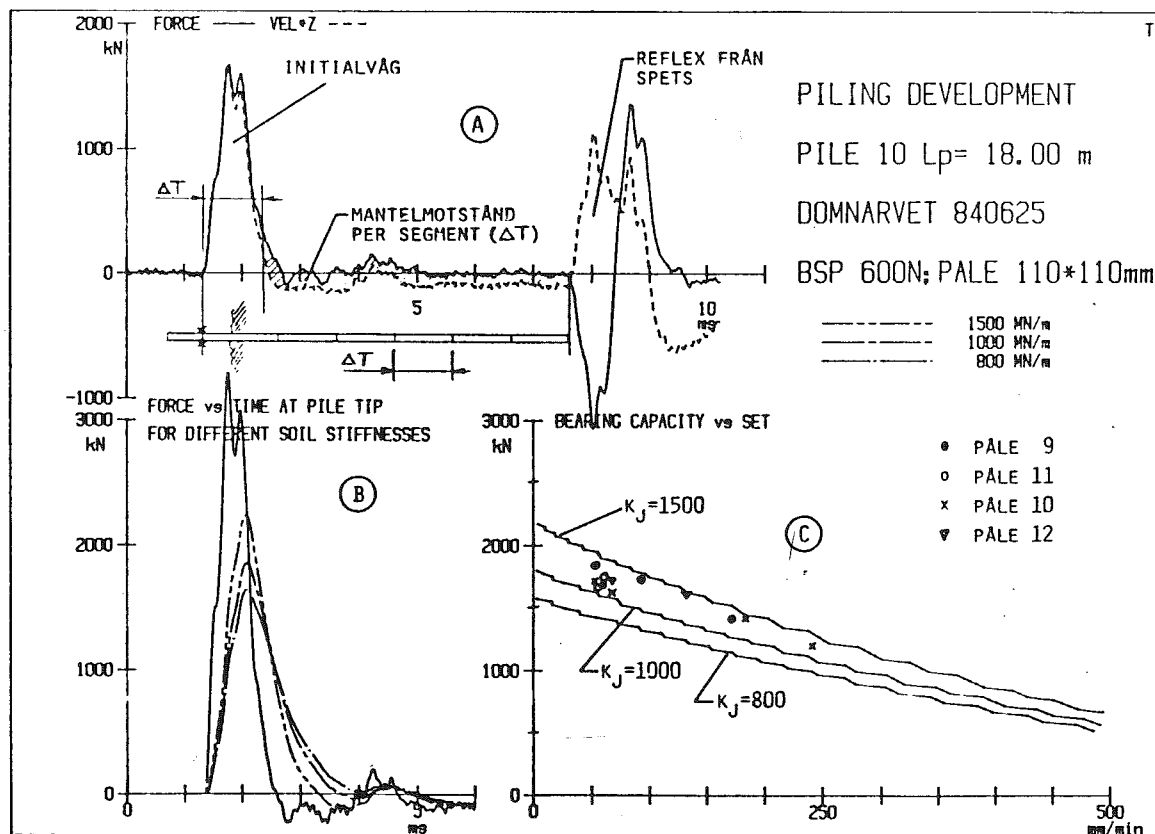
FIG. 10a. visar stötvågsmätning och datorberäkning av bärförmåga/sjunkning vid slagning med 30 kN's frifallshejare. Pålar som var stoppslagna till sjunkningar 10 mm/10 slag uppvisade en bärförmåga av ca 1 700 - 1 800 kN. Stoppslagna pålar provslogs därefter med tryckluftshammare BSP 600 N. Sjunkningen blev 50 - 100 mm/min.



Figur 10 a. Provpålning vid Domnarvet i Borlänge. Slagning av stålpålar 110 x 110 mm med 30 kNs frifallshejare. Datorsimulering av bärförmåga mot sjunkning enligt PID-Wave. Jämförelse med erhållna resultat från stötvågsmätningar.

FIG. 10 b. visar stötvågsmätning och datorberäkning av bärförmåga mot sjunkning vid slagning med BSP 600 N. Enligt figuren överensstämmer uppmätta värden på bärförmåga mot sjunkning väl med teoretiskt framräknade värden. Observera att relationen bärförmåga mot kvarstående sjunkning enligt FIG. 10.b blir kraftigt påverkad av jordens fjädring (fjäderstyvhet) om pålen slås med en lätt hejare. Tryckluftshejarens slagkolv har en vikt som motsvarar 2,1 meter påle.

Slås pålen däremot med en tung hejare (30 kN) enligt FIG. 10.a får variationer hos jordens fjädring ringa inflytande. Frifallshejaren 30 kN motsvaras av ca 31 meter påle.



Figur 10 b. Provpålning vid Domnarvet i Borlänge. Slagning av stålplålar 110 x 110 mm med tryckluftshejare BSP 600 N.

3. **Arbetsgång vid projektering**

1. Bestäm **dimensionerande lasteffekt** i brottgränstillstånd och acceptabel deformation.
2. Bedöm **jordens pålbarhet** med ledning av de geotekniska undersökningarna.
3. Välj **påltyp** och bestäm pålens egenskaper (se kap 6.3).
4. Beräkna pålens **dimensionerande lastkapacitet**. Denna är beroende av bland annat pålens drivbarhet (antal slag och spänningsnivåer), integritetskontrollens omfattning och jordens sidomotstånd.
5. Utvärdera **jordens egenskaper** ur de geotekniska undersökningarna (mantelfriktion, spetsmotstånd, fjädring, dämpning och tillväxtfaktor) enligt kap 6.2. Beräkna bärförmågan som funktion av längden.
6. Beräkna erforderlig **karakteristisk bärförmåga** för aktuella verifieringsmetoder, förutsatt att pålens lastkapacitet utnyttjas. Erforderlig karakteristisk bärförmåga är beroende av bland annat slagningsutrustning, metod att bestämma bärförmågan och provningens omfattning.
7. Kontrollera att pålens **dimensionerande lastkapacitet** för slagning är tillräcklig för att uppnå erforderlig karakteristisk bärförmåga för varje aktuell verifieringsmetod.
8. Välj **slagningsutrustning** och bestäm dess slagningstekniska egenskaper (se kap 6.4). Välj slagningssätt (fallhöjd).
9. Beräkna pålens drivbarhet genom **simulering** av slagning.

Resultat: • slagnings/sjunkningsdiagram
 • påkänningar i pålen

10. Beräkna **deformation** på grundläggningsnivån av lasteffekt i bruksgränstillstånd. Är den acceptabel?
11. Är pålens **drivbarhet** den förutsatta eller måste ny beräkning av pålens dimensionerande lastkapacitet göras? (återkoppling till 4)
12. Måste **slagningsutrustningen/slagningssätt** ändras med hänsyn till påkänningar i pålen under slagning? (Återkoppling till 8)
13. Med vilka **verifieringsmetoder** är det möjligt att nå erforderlig karakteristisk bärförmåga? (Återkoppling till 7)

14. Om verifiering genom *sjunkningskrav bestämd genom simulering* är aktuell:
 - Välj stoppslagsfallhöjd så att pålens bärförmåga mobiliseras utan att lastkapaciteten för slagning överskrides
 - simulera "stoppslagning" med den valda fallhöjden och med jordens egenskaper vid drivning och bestäm godtagbar kvarstående sjunkning.
15. Är vald påltyp, slagningsutrustning och verifieringsmetod *optimal*?
16. Gör en *känslighetsanalys* med tanke på osäkerheten hos slagningsutrustningens och jordens egenskaper (hejarens effektivitet, jordens fjädring och tillväxtfaktorer etc)
 - ange största/minsta sannolika pållängd med tillhörande slagningsarbete för olika verifieringsmetoder och slagningsutrustningar.
 - ange minsta djup till vilken man med säkerhet kan driva pålen med aktuella slagningsutrustningar.

4. Praktikexempel

4.1 Betongpåle - simuleringsexempel 1

Betongpålar 270 x 270 mm skall slås för en dimensionerande lasteffekt av 300 kN/påle. Det har fastslagits av beställaren att $\gamma_{Rd} \cdot \gamma_{mp} \cdot \gamma_n = 3$. Den karakteristiska bärförmågan blir då 900 kN. Pålens dimensionerande lastkapacitet är tillräcklig också för slagning. Ett sjunkningskriterium skall framtagas. Pålen skall slås i 3 meter lös lera som överlagrar silt och sand. Ca 15 meter under marknivå finns ett moränlager. Mantelmotståndet vid slagning antages vara 90 kN (10 %). Fördelningen antages vara rätlinjigt ökande med djupet.

Pålens egenskaper för simuleringen (6.3):

- Area= 729 cm²
- Elasticitetsmodul= 40 000 MPa
- Tunghet= 24,5 kN/m³
- Längd= 30 m
- Pålen delas in i 20 element

Slagningsutrustning: 3 tons linhejare

- Effektivitet=0,5
- Dynans tyngd 3,5kN
- Slagkubbens Elasticitetsmodul 5 000 MPa
- " Area 706 cm²
- " Tjocklek 100 mm
- Dynträts Elasticitetsmodul 200 MPa
- " Area 729 cm²
- " Tjocklek 25 mm (dynträt måste vara ihopslaget med minst 300 slag).

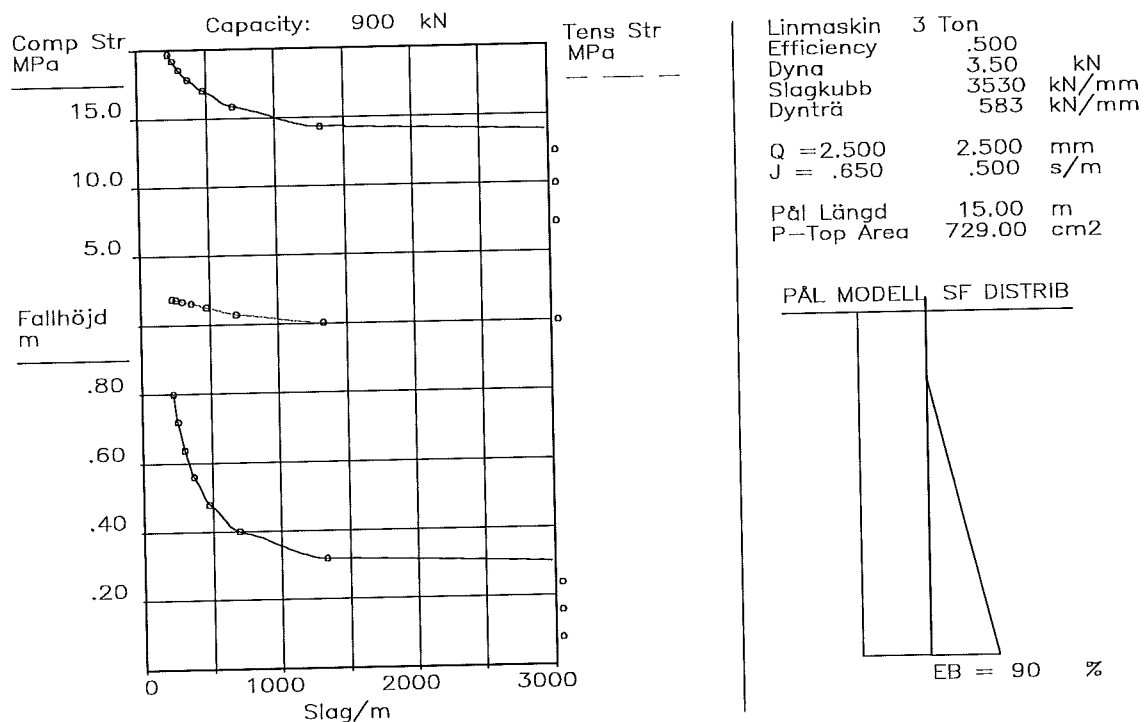
För att undersöka vilken fallhöjd som skall användas görs först ett prov med 900 kN motstånd och varierande fallhöjd.

Tabell 1. Resultat från första simuleringen. Varierande fallhöjd.

Rut (kN)	Slag/m (bpm)	Fallhöjd (m)	Drag- påkänning (MPa)	Element nr i, vid tid t (ms)	Tryck- påkänning (MPa)	Element nr i, vid tid t (ms)	Överförd energi (kJ)
900	9999	0.08	.00	(1, 0)	7.17	(9, 11)	1.0
900	9999	0.16	.00	(1, 0)	9.96	(9, 10)	1.9
900	6889	0.24	.00	(1, 0)	12.33	(9, 10)	2.8
900	1326	0.32	-.08	(9, 25)	14.33	(10, 10)	3.7
900	695	0.40	-.75	(7, 25)	15.87	(9, 9)	4.6
900	478	0.48	-1.27	(7, 25)	17.05	(9, 9)	5.5
900	368	0.56	-1.57	(6, 25)	17.89	(9, 9)	6.3
900	303	0.64	-1.73	(6, 25)	18.58	(9, 9)	7.2
900	259	0.72	-1.82	(7, 25)	19.21	(9, 9)	8.0
900	228	0.80	-1.88	(7, 25)	19.74	(9, 9)	8.9

G R L W E A P -
SIMULERINGSEXEMPEL BETONGPÄLAR

93 07 02



Figur 11. Resultat från första simulering. Betongpåle 270 x 270 mm. Varierande fallhöjd.

Simuleringsresultat anger bl.a. antal slag per meter för olika fallhöjd. För att minimera problemen med jordmodellen vid stora sjunkningar väljes en sjunkning på ca 15-20 mm/10 slag, vilket motsvarar ca 500 till 700 slag per meter. Ur TABELL 1 väljer vi ett slagantal inom detta intervall. Vid 40 cm fallhöjd ger simuleringen 695 slag per meter. Vi väljer denna fallhöjd.

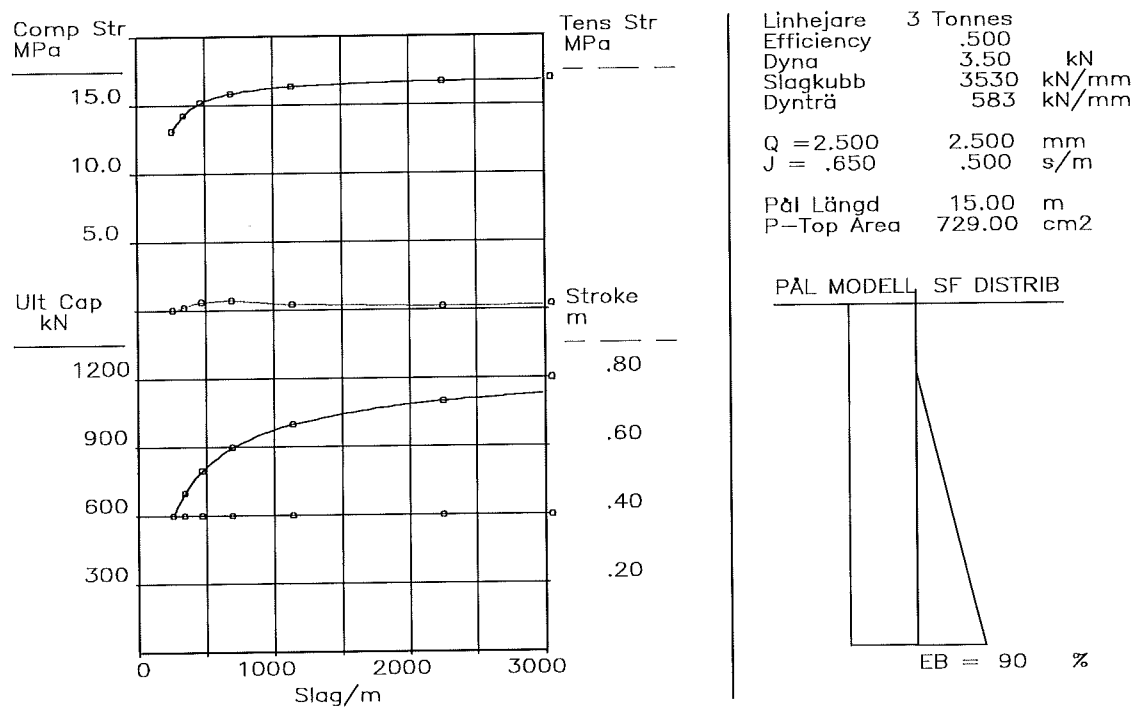
Efter att fallhöjden valts görs en ny simulering för varierande bärförmåga för att studera känsligheten av sjunkningen som mått på bärförmåga. Resultatet visas i TABELL 2 och FIG. 12.

Tabell 2. Resultat från andra simuleringen. Varierande bärförmåga.

Rut (kN)	Slag/m (bpm)	Fallhöjd (m)	Drag (MPa)	i,t	Tryck (MPa)	i,t	Energi i påle (kJ)
600	259	0.40	.00	(1, 0)	13.10	(9, 9)	4.7
700	343	0.40	-.24	(4, 25)	14.25	(9, 9)	4.7
800	473	0.40	-.61	(6, 25)	15.21	(9, 9)	4.6
900	695	0.40	-.75	(7, 25)	15.87	(9, 9)	4.6
1000	1137	0.40	-.43	(7, 25)	16.36	(10, 9)	4.6
1100	2251	0.40	-.28	(8, 24)	16.74	(10, 10)	4.6
1200	5551	0.40	-.43	(3, 21)	16.96	(10, 10)	4.5

G R L W E A P —
SIMULERINGSEXEMPEL BETONGPÅLAR

93 07 02



Figur 12. Resultat från andra simuleringen. Betongpåle 270 x 270 mm. Varierande bärförmåga.

Vårt stoppslagningskriterium blir följande: Den maximala sjunkningen vid stoppslagning av pålarna får vara 14 mm/10 slag för 3 taljor (= 3x10 slag) med avtagande tendens för en dimensionerande lasteffekt på 300 kN och karakteristisk bärförmåga på 900 kN. Fallhöjden skall vara 40 cm med 3 tons linhejare.

4.2 Betongpåle - simuleringsexempel 2

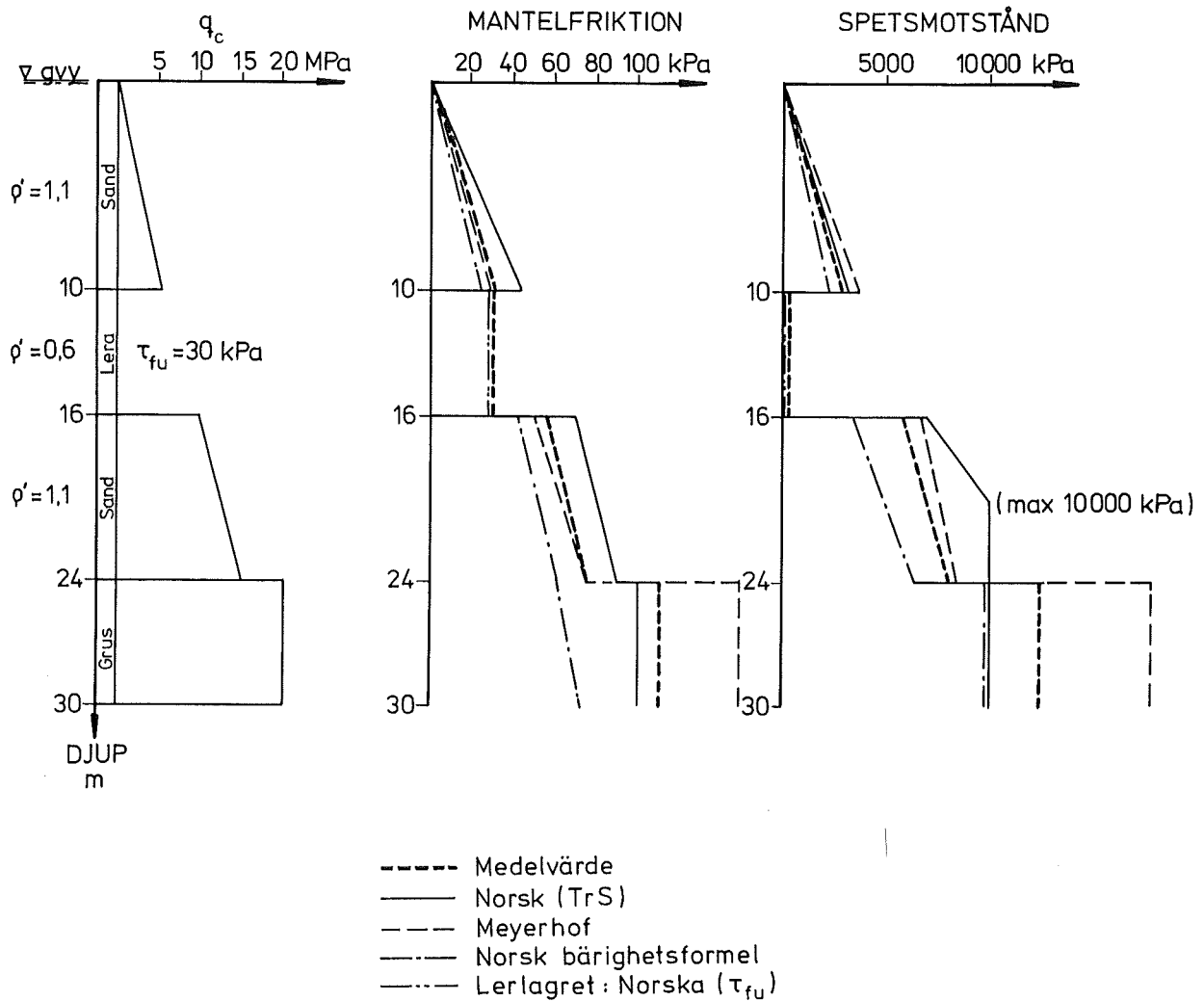
Exemplet bygger på typgodkännande nr 3198/89 [23] och följer arbetsgången i kapitel 3.

1. Dimensionerande lasteffekt på grundläggningsnivån är 42 MN. Byggnaden dimensioneras i säkerhetsklass 2.
2. Den geotekniska undersökningen ger följande information om jordlagren: överst ca 10 meter sand med mycket låg till låg relativ fasthet som överlagrar ca 6 meter halvfast normalkonsoliderad lera. Från ca 16 meter under markytan finns ett sandlager med hög relativ fasthet som vid ca 24 meters djup övergår till grus med mycket hög relativ fasthet. Jorden bedöms vara pålbar med konventionella betongpålar och slagningsutrustningar.
3. Påle 270 x 270 mm med betong K50 armerad med 8 $\varnothing$ 12 mm, ks 60 väljs. Pålens egenskaper för simuleringen (kapitel 6.3):
 - Area= 729 cm²
 - Elasticitetsmodul= 40 000 MPa
 - Tunghet= 24,5 kN/m³
 - Längd= 30 m
4. Vald påltyp har dimensionerande lastkapacitet 704 kN i SK2 om jorden kan antas fri från block och sten. Om pålen fordrar mindre än 3 000 slag blir lastkapaciteten 805 kN och göres dessutom integritetskontroll på 25 % av antalet pålar blir lastkapaciteten 905 kN. I detta fall kan jorden antas vara fri från block och sten men det finns risk för att slagantalet kan bli ganska stort.

Efter inmätning kan felslagning av pålen innebära att den dimensionerande lasteffekten ökar med ca 10 % och projekterad lastkapacitet väljs därför till ca 630 kN. Det betyder att 67 st pålar kan klara byggnadens dimensionerande lasteffekt på 42 MN.

5. Utvärdering av jordens egenskaper.

Jordprofil och sonderingsmotstånd vid spetstrycksondering visas i FIG. 13. Mantelfriktion och spetsmotstånd har beräknats med några av metoderna som presenteras i kapitel 6. Resultaten har ritats in i FIG. 13. Därefter har medelvärdet för de olika metoderna använts för att beräkna bärförmågan som funktion av längden i jord (vid bestämning av "medelvärdet" kan de använda beräkningsmetoderna viktas olika om man bedömer att de har olika tillförlitlighet. I detta fall har vi dock valt ett rent medelvärde). I exemplet har också bedömts hur stor del av det beräknade motståndet som verkar under slagningen. Antagna värden redovisas i TABELL 3.



Figur 13. Sonderingsresultat samt beräknad mantelfriktion och spetsmotstånd.

Tabell 3. Antagna värden för jorden.

Djup (m)	Mantel Friktion (kN/m)	Spets Last (kN)	Mantel "Quake" (mm)	Spets "Quake" (mm)	Mantel Dämpning (s/m)	Spets Dämpning (s/m)
10,00	27,5	210	2,50	2,50	0,160	0,500
10,10	27,5	50	2,50	2,50	0,600	0,500
16,00	27,5	50	2,50	2,50	0,600	0,500
16,10	68,7	420	2,50	2,50	0,160	0,500
24,00	96,2	500	2,50	2,50	0,160	0,500
24,10	150,0	800	2,50	2,50	0,160	0,500
30,00	150,0	800	2,50	2,50	0,160	0,500

Vid simuleringen antages att 80 % respektive 100 % av motståndet verkar under slagningen, vilket ger tillväxtfaktor på 1,25 och 1,0.

6. Den erforderliga karakteristiska bärförmågan (R_k) är beroende av metod som användes för att verifiera pålens bärförmåga.

$$R_k = R_d \cdot \gamma_{Rd} \cdot \gamma_{mp} \cdot \gamma_n$$

R_d är pålens dimensionerande bärförmåga

γ_{Rd} , γ_{mp} och γ_n är partialkoefficienter som beror på verifieringsmetod och säkerhetsklass (se typgodkännandet).

Om enbart sjunkningen som mått på bärförmågan, framtagna genom simulering, används som verifiering (förenklad metod) blir $\gamma_{Rd} = 2,1$ vid linmaskin och 1,7 för frifallshejare. γ_{mp} bör väljas till 1,3. $\gamma_n = 1,1$ i säkerhetsklass 2.

Om dynamisk provbelastning utförs på 5 % av pålarna, dock minst 4 st (Metod I), blir $\gamma_{Rd} = 2,1$ vid linmaskin och 1,7 för frifallshejare. γ_{mp} bör väljas till 1,2. $\gamma_n = 1,1$ i säkerhetsklass 2.

Om dynamisk provbelastning utförs på 5 % av pålarna, dock minst 4 st, och produktionskontroll på 25 % av pålarna blir $\gamma_{Rd} = 1,6$ vid linmaskin och 1,4 för frifallshejare. γ_{mp} bör väljas till 1,1. $\gamma_n = 1,1$ i säkerhetsklass 2.

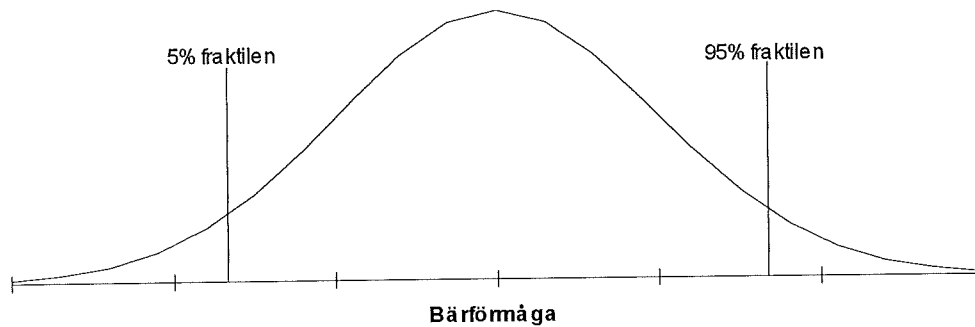
I TABELL 4 är erforderliga karakteristiska bärförmågor uträknade för olika hejare och verifieringsmetoder.

Verifiering med hjälp av simulering innefattas ej i typgodkännandet 3198/89. De angivna γ -faktorerna är ett förslag.

Tabell 4. Dimensionerande och karakteristisk bärförmåga vid olika hejare och verifieringsmetoder.

Pålmaskin	Dimensionerande bärförmåga, R_d (kN)	Krav på karakteristisk bärförmåga, R_k		
		Förenklad* metod (kN)	Metod 1 (kN)	Metod 2 (kN)
Linhejare	704	2114	1951	1363
"	805	2417	2231	1558
"	905	2718	2509	1752
Frifallshejare	704	1711	1580	1193
"	805	1957	1806	1364
"	905	2200	2031	1533

* Simulering



Figur 14. Schematisk frekvensfunktion av bärförmåga.

7. Pålens dimensionerande lastkapacitet för slagning.

Enligt typgodkännandet är den karakteristiska bärförmågan (R_k) 5 %-fraktilen av bärförmågan. Detta betyder att vissa av pålarna sannolikt erhåller större bärförmåga och på grund av att slagkraften i hejaren kan variera kan påkänningen i pålen bli större än vid karakteristisk bärförmåga.

Antages att variationskoefficienten av bärförmågan är 10 % och att bärförmågan är normalfördelad kommer

- medelvärde av bärförmågan att vara $R_{medel} = R_k / (1 - (0,1 \cdot 1,67))$
- och 5% av pålarna att ha bärförmågan lägst $(1 + (0,1 \cdot 1,67)) \cdot R_k / (1 - (0,1 \cdot 1,67))$

Om 95 %- fraktilen antas vara den maximala kraft i pålen under slagningen bör lastkapaciteten för slagning överstiga detta värde. Lastkapaciteten för slagning kan beräknas från BBK-79 [1], formel 6-16 med $l_c / h = 5$ och kryptalet $k_f = 1$, $f_{cc} = f_{ck} / 1,2$ (olyckslast) och $f_{st} = f_{yk}$ (olyckslast) vid normal slagning. Om risk för knäckningen vid slagning föreligger beräknas knäcklängden. För vald påle blir lastkapaciteten för slagning 2 449 kN. I TABELL 5 visas erforderlig lastkapacitet för slagning beräknad enligt ovan för olika verifieringsmetoder och hejare.

Tabell 5. Erforderlig dim. lastkapacitet för slagning vid olika hejare och verifieringsmetoder.

Pålmaskin	Dimensionerande bärförmåga (kN)	Erforderlig dim. lastkapacitet för slagning		
		Förenklad Metod (kN)	Metod 1 (kN)	Metod 2 (kN)
Linhejare	704	2962	2734	1909
"	805	3387	3126	2183
"	905	3807	3515	2455
Frifallshejare	704	2398	2213	1671
"	805	2742	2531	1910
"	905	3082	2845	2148

Understrykningarna visar de fall då erforderlig dim. lastkapacitet vid slagning vald påles.

Tabellen visar att sjunkningen som verifieringsmetod (förenklad metod) enbart kan användas med frifallshejare och vid en dimensionerande bärförmåga av 704 kN.

8. Slagningsutrustningens egenskaper.

För att klara slagningen med mindre risk för bortslagning väljs frifallshejare:

Typ: Banut 4 ton

Effektivitet=0,8

Fallhöjd varierar under drivningen. Väljs till 0,15 m vid lätt slagning och ökas för att vid avslutningen vara 0,50 m.

Dynans tyngd 1,95 kN

Slagkubbens Elasticitetsmodul 5 000 MPa

” Area 706 cm²

” Tjocklek 100 mm

Dynträts Elasticitetsmodul 200 MPa

” Area 729 cm²

” Tjocklek 25 mm (dynträt måste vara ihopslaget med minst 300 slag).

Tabell 6. Hejarens fallhöjd vid olika djup.

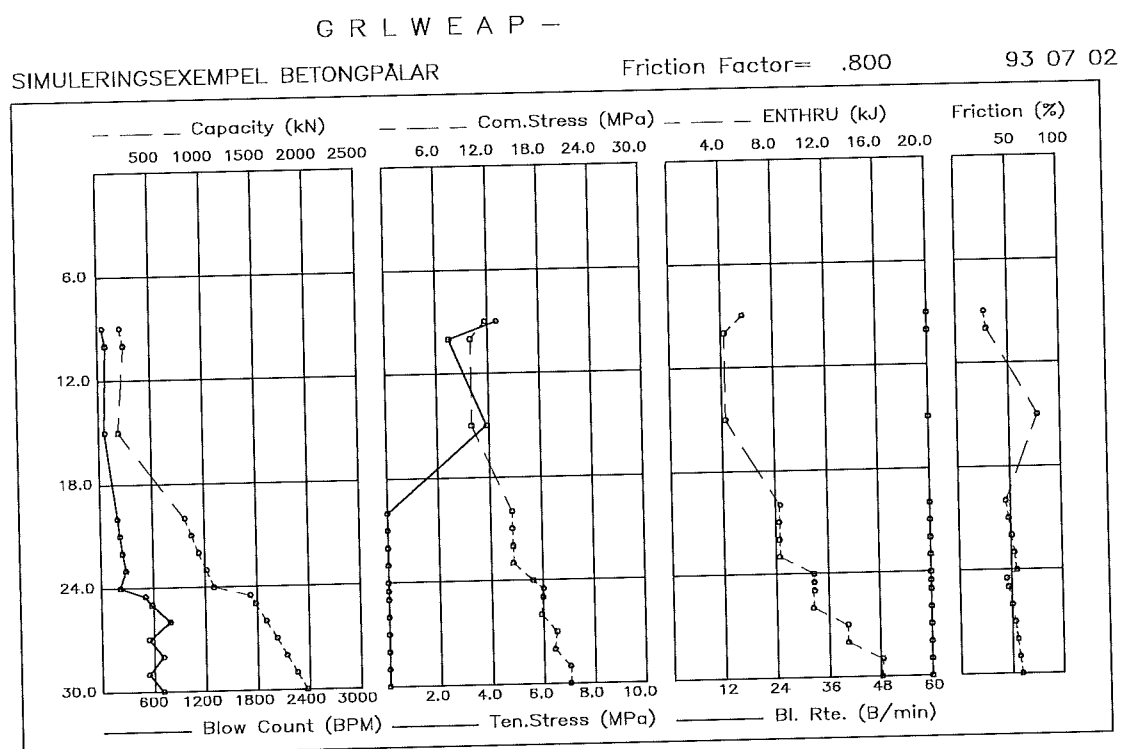
Djup (m)	9	10	15	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Fallhöjd (m)	0,3	0,15	0,15	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6

9. Simulering av slagningen utförs med antagna indata. Resultaten av simuleringen redovisas i TABELL 7 och 8 samt FIG. 15 och 16 för tillväxtfaktor N_s lika med 1,25 resp. 1,0. Resultaten visar att pålarna kan slås till erforderlig karakteristisk bärförmåga (1 711 kN) utan att för stora drag eller tryckspänningar uppstår (se TABELL 7). Fallhöjden måste då anpassas efter pålens sjunkning. Längden blir 26-28 meter. Totalt antal slag till erforderlig bärförmåga blir ca 4 100 slag.

Tabell 7. Simuleringsresultat vid tillväxtfaktor 1,25.

Djup (m)	Rut (kN)	Friktkn (kN)	Tillväxtfaktor: 1,25		Max tryck (MPa)	Max drag (MPa)	Överförd energi (kJ)
			Spetslast (kN)	Slag/m			
9.0	211.7	58.0	153.7	58.2	11.716	-4.344	5.7
10.0	249.4	73.7	175.8	89.5	10.028	-2.505	4.3
15.0	188.2	146.5	41.6	67.6	10.029	-3.913	4.3
20.0	814.9	371.6	443.3	194.1	14.519	.000	8.4
21.0	881.5	425.9	455.6	220.0	14.532	.000	8.3
22.0	947.7	481.3	466.4	250.8	14.549	.000	8.3
23.0	1018.7	540.4	478.4	291.4	14.554	.000	8.3
24.0	1092.0	601.8	490.2	218.3	16.848	.000	10.9
24.5	1438.3	650.2	788.1	508.9	18.007	.000	10.9
25.0	1486.3	697.9	788.5	581.4	17.950	.000	10.9
26.0	1585.0	794.5	790.5	797.4	17.779	.000	10.8
27.0	1683.7	891.4	792.3	553.2	19.537	.000	13.5
28.0	1779.7	987.0	792.7	711.8	19.326	.000	13.5
29.0	1878.4	1084.2	794.2	542.6	21.070	.000	16.2
30.0	1974.4	1179.9	794.5	708.6	21.093	.000	16.1

Totalt antal slag 6 056 till 30 meters djup.



Figur 15. Grafisk framställning av simuleringsresultat vid tillväxtfaktorn 1,25 (80 % av statiska motståndet vid slagningen).

Tabell 8. Simuleringsresultat vid tillväxtfaktorn 1,0.

Djup (m)	Rut (kN)	Frikt (kN)	Tillväxtfaktor: 1,0		Max tryck (MPa)	Max drag (MPa)	Överförd energi (kJ)
			Spetslast (kN)	Slag/m (bpm)			
9.0	229.5	73.5	156.0	61.6	11.716	-4.086	5.7
10.0	271.4	93.3	178.1	97.8	10.028	-2.208	4.3
15.0	232.2	189.2	43.0	81.9	10.049	-3.175	4.3
20.0	911.2	466.3	444.9	234.5	14.580	.000	8.3
21.0	991.3	534.2	457.1	276.2	14.585	.000	8.3
22.0	1071.4	603.5	467.9	330.0	14.601	.000	8.2
23.0	1157.1	677.3	479.7	408.5	14.606	.000	8.2
24.0	1245.5	754.1	491.4	293.0	16.902	.000	10.8
24.5	1603.3	814.1	789.3	869.9	17.904	.000	10.8
25.0	1663.3	873.7	789.7	1107.7	17.773	.000	10.8
26.0	1786.0	994.5	791.5	2216.9	17.484	.000	10.8
27.0	1908.7	1115.5	793.2	1233.7	19.266	.000	13.4
28.0	2028.7	1235.1	793.6	2311.8	19.255	.000	13.4
29.0	2151.4	1356.4	794.9	1440.5	21.104	-.006	16.1
30.0	2271.4	1476.2	795.2	3327.7	21.124	-1.071	16.0

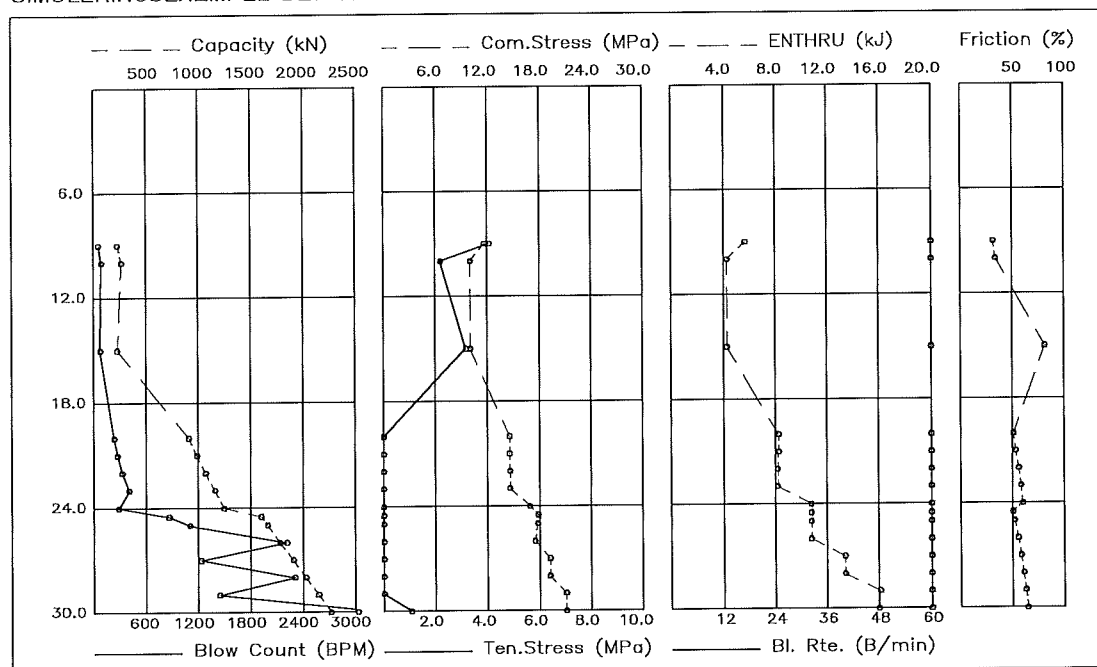
Totalt antal slag 13 080 till 30 meters djup.

G R L W E A P -

SIMULERINGSEXEMPEL BETONGPÄLAR

Friction Factor= 1.000

93 07 02



Figur 16. Grafisk framställning av simuleringsresultat vid tillväxtfaktorn 1,0.
(100 % av statiskt motstånd vid slagningen).

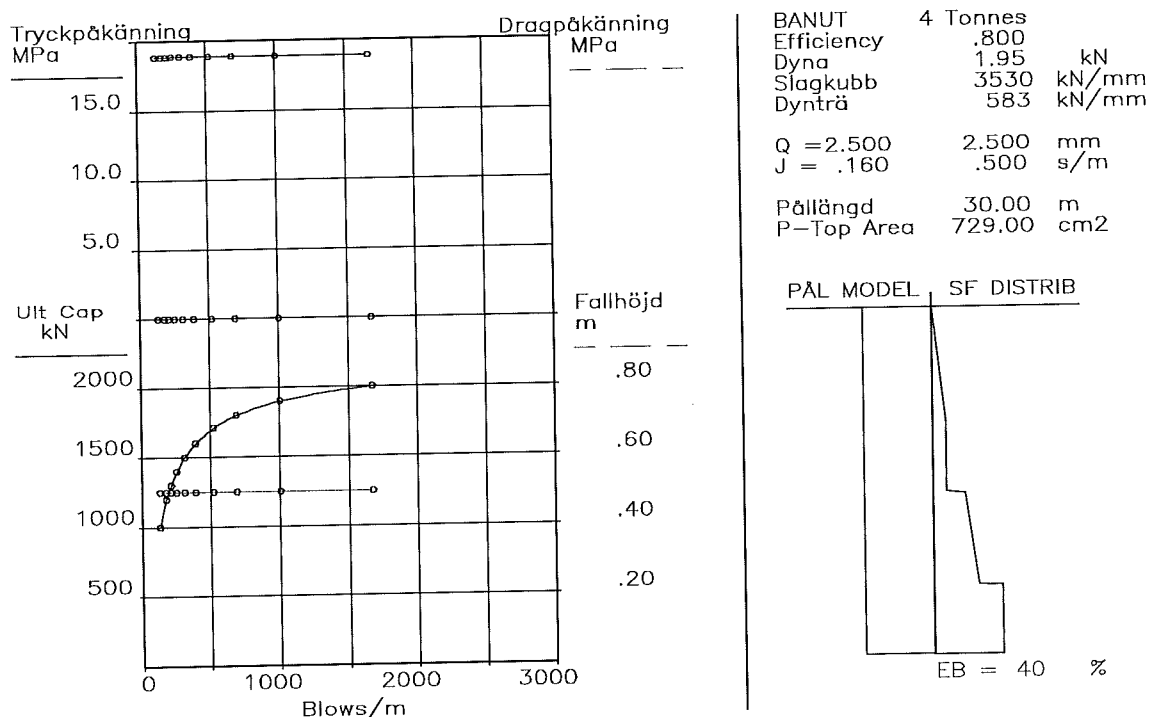
10. Maximala deformationen i en påle kan beräknas som elastiska hoptryckningen av pålen för dimensionerande lasteffekten plus deformation i jorden vid pålens spets. Beräkning kan göras med hjälp av IVA Pålkommisionens Rapport 83 "Beräkning av pålars last-rörelsesamband med utgångspunkt från sonderingsdata" [5].
11. Slagningen i det övre sandskiktet bör göras med 0,15 m fallhöjd eftersom dragpåkänningen blir stor ($\approx 4,0$ MPa) med exemplets fallhöjd 0,3 m. Slagantalet kan bli stort men hänsyn har redan tagits till detta vid beräkning av pålens lastkapacitet.
12. Slagningsutrustningen klarar att slå pålarna men fallhöjden skall hållas låg vid stor sjunkning.
13. Sjunkningskriterium framtaget med simulering kan användas för att verifiera dimensionerande bärförmåga.
14. Avslutande slagning skall utföras med fallhöjden 50 cm och sjunkningen skall understiga 19 mm/10 slag under de 50 sista slagen.

Tabell 9. Sjunkningen vid olika bärförmågor.

Bärförmåga (kN)	Slag/m (bpm)	Fallhöjd (cm)	Dragpåkänning (MPa)	Tryckpåkänning (MPa)
1000	131,1	50	.00	18,88
1200	178,7	50	.00	18,89
1300	211,8	50	.00	18,90
1400	254,5	50	.00	18,90
1500	311,6	50	.00	18,91
1600	391,3	50	.00	18,91
1711	524,5	50	.00	18,92
1800	690,6	50	.00	18,93
1900	1007,2	50	.00	18,93
2000	1670,4	50	.00	18,94

G R L W E A P
SIMULERINGSEXEMPEL BETONGPÅLAR

93 07 02



Figur 17. Grafisk framställning av tabell 9.

15. Påltypen och slagningsutrustning är användbar för att erhålla en karakteristisk bärförmåga $R_k = 1\,711$ kN. Om verifiering enligt metod 1 i typgodkännandet används kan vid samma dimensionerande bärförmåga ca 3 meter kortare påle erhållas. Om metod 2 användes blir dimensionerande bärförmåga 820 kN och då kan antalet pålar minskas med 16 st för samma längd, eller också kan pålarna slås cirka ca 4 meter kortare.
16. Pålarna kommer sannolikt att komma ner i gruslagret. Längd ca 26 - 28 meter. Pålarna kan slås till ca 28 meter med antagna fallhöjder.

4.3 Stålpåle - simuleringsexempel 3

4.3.1 Beskrivning av objekt

Till ett pappersbruk i Tyskland skall Vibrex stålrör $\varnothing$ 457 x 15/25 mm slås med dieselhejare D36 genom sand/silt till stopp i mycket fast sand. Efter stoppslagning av stålrören skall dessa fyllas med betong och armering varefter stålrören vibreras upp. Vibrexpålen är således en jordgjuten betongpåle.

Krav på stoppslagningen är att pålarnas geotekniska bärförmåga i den fasta sanden skall vara större än 2 x 1400 kN (2-faldig säkerhet).

Preliminära stoppslagningsregler skall beräknas med datorsimulering för kontroll av lämplig hejare.

Vid start av objektet skall provpålning utföras med stötvågsmätningar på stålrören. Statiska respektive dynamiska provbelastningar skall senare göras även på de färdiga betongpålarna.

4.3.2 Geoteknik

De översta 12-14 m består av löst lagrad sand/silt med vissa tunnare lager av fast lagrad sand. Spetsmotståndet enligt CPT mätningarna varierar normalt mellan 2-6 MPa. Den därunder liggande fasta sanden uppvisar mycket hög fasthet. CPT-mätningarna visar spetsmotstånd på 30-50 MPa.

4.3.3 Stålpålar

Vibrex stålrör har dimensionen 457 x 15/25 mm med lös pålsko. Pålen har längden 17 m. Pålens godstjocklek på de översta 10 metrarna är 15 mm, därunder är godstjockleken 25 mm.

4.3.4 Hejare

Pålarna slås med dieselhejare Delmag D36 - 02. Hejaren är inställd för att hela tiden kunna slå med max energi dvs. förbränningstrycket är inställt på högsta värde. Den slagenergi som hammaren ger till pålen är dock helt beroende på jordens och pålens egenskaper. Dieselhejaren slår med låg fallhöjd om jordens hållfasthet är liten. När sedan pålen tränger in i allt fastare jord ökar även hejarens fallhöjd. För beskrivning av en dieselhejares funktion se WEAP-manual alternativt manualer från tillverkare.

Tabell 10. Data på hejare D36; (ID 17).

Beteckning	Enhet	Värde
Hejarvikt	kN	35,5
Vikt slagplatta	kN	8,7
Dynvikt	kN	7,5
Max. fallhöjd	m	3,22
Min. fallhöjd	m	1,58
Effektivitet	%	72
IFUEL SET	-	1
<u>Hejare/Dyna</u>		
Styvhet	kN/mm	50 000
Avrundning	mm	3,0
Stötkoefficient (COR)	-	0,8
<u>Dyna/Påle</u>		
Styvhet	kN/mm	50 000
Avrundning	mm	1,0
Stötkoefficient	-	0,8

4.3.5 Data på jord för datorsimulering

Pålarna bedöms vid drivning vara huvudsakligen spetsburna. 95% av bärförmågan bedöms vara spetslast.

Påslagningen datorsimuleras för jord enligt:

a) Med värden enligt rekommendation i WEAP-manualen:

Spets: fjädring: (quake) = $D/120 = 3,8$ mm
dämpning: $J_s = 0,5$ (Smith)

Mantel: fjädring: (quake) = 2,5 mm
dämpning: $J_s = 0,15$

b) Enligt data från stötvågsmätningar och analys (CAPWAP-typ analys) på ett antal provpålar slagna med hejare IHC S - 70; D 30; D 36 - 02.

Spets: fjädring (quake) 2,6 - 3,5 % av diametern dvs 12 mm resp. 16mm.
dämpning: $J_s = 0,10$

Mantel fjädring: (quake) = 2,5 mm
dämpning: $J_s = 0,5$

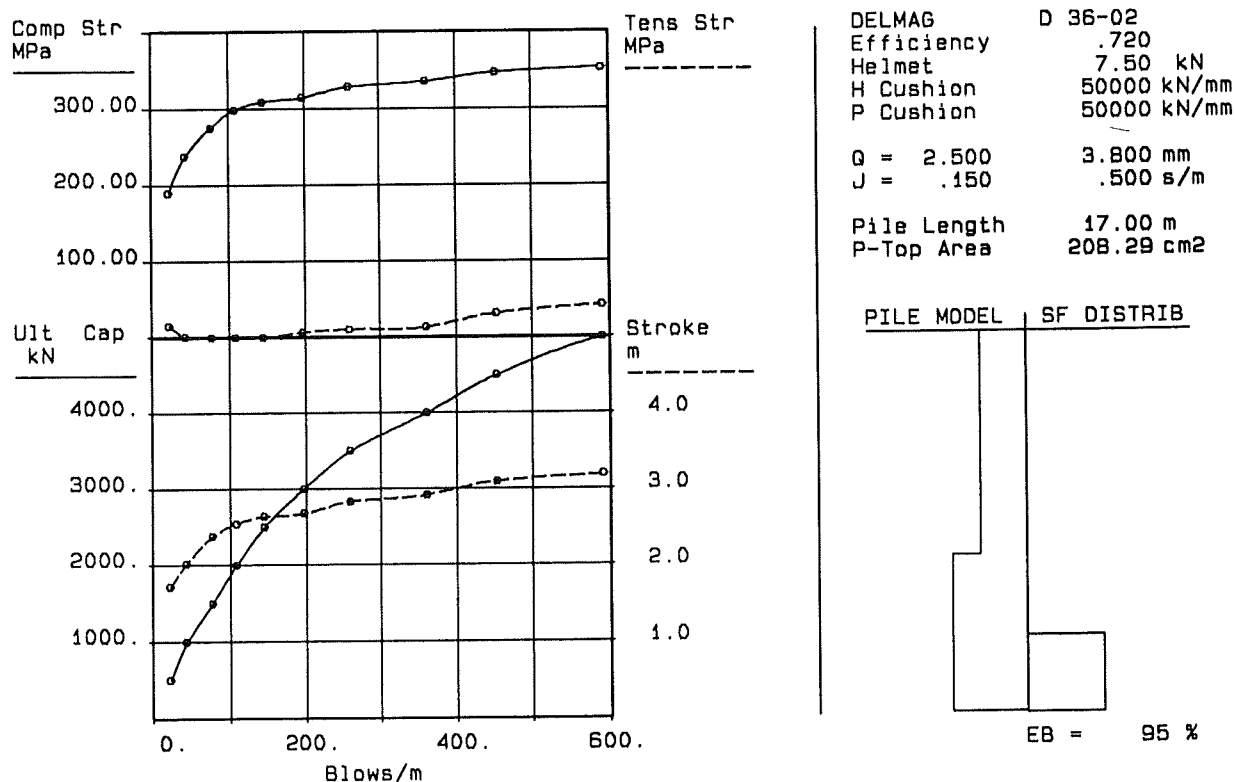
4.3.6 Datorsimulering av påslagningen

I FIG. 18 visas en normal WEAP-redovisning av beräkning av bärförmåga (Ult.Cap.) mot antalet slag per meter. I diagram redovisas dessutom max. och min. spänningar i pålen för respektive bärförmåga. Observera att hejarens fallhöjd ökar när bärförmågan ökar. Fallhöjden är 1,58 m vid 500 kN's bärförmåga och den ökar till 3,2 m när bärförmågan är 5 000 kN. Datorsimulering enligt FIG. 18 är gjord med rekommenderade värden hos jord enligt WEAP-manual.

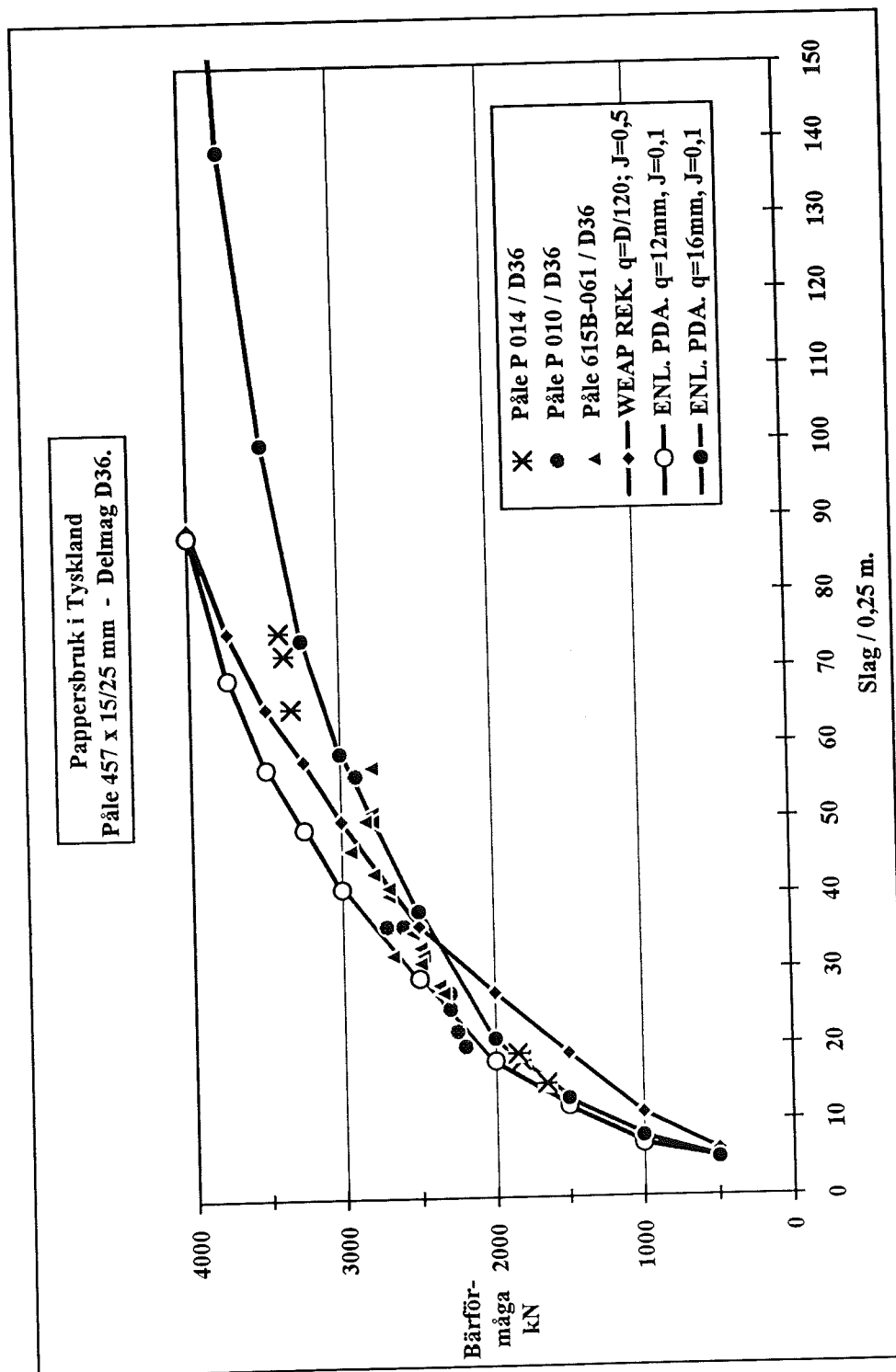
I FIG. 19 visas en redovisning av bärförmågan mot antal slag per 25 cm sjunkning för 3 stötvågsmätta pålar för objektet. Mätresultaten kan jämföras med datorsimulering enligt rekommenderade data på jord respektive för jordegenskaper vilka erhöles utifrån stötvågsmätningar. Stötvågsmätningar och datoranalys visar att jorden har lägre dämpning respektive större fjädring än vad som rekommenderas enligt WEAP-manual. Minskad dämpning i kombination med ökad fjädring motverkar varandra. Alltså blir slutresultatet mellan de två datorsimuleringarna förhållandevis lika. Det är enbart vid mycket hög respektive låg bärförmåga som resultaten avviker från varandra.

G R L W E A P RESULTS

IVA EX 3, Stal 457*15/25, D 36-02



Figur 18. Datorsimulering av påslagning påle D 457x15/25 mm - Delmag D 36. Beräkning av bärförmåga mot slag/meter samt max. och min. spänningar i pålen.



Figur 19. Bärför-måga som funktion av antal slag per 25 cm sjunkning. Mätresultat jämfört med datorsimulering. Påle 457 x 15/25 mm. Delmag D36 dieselhammare.

4.4 Stålpåle - simuleringsexempel 4

4.4.1 Beskrivning av pålningsobjektet

En järnvägsbro över Y-ån skall grundläggas invid en befintlig bro. Den befintliga bron skall vara i drift under hela byggnadstiden. Pålning av ny järnvägsbro skall göras med stålpålar, vilka skall stoppslås som spetsburna pålar. Bron skall grundläggas på fyra pålstöd. Gällande pålstöden närmast Y-ån stoppslås pålarna med tryckluftshammare alternativt sker spontning och uppfyllning och pålningen görs med fallhejare. För resterande pålstöd stoppslås pålarna med fallhejare.

4.4.2 Geoteknik

Stålpålarna slås genom stenig/blockig fyllnadsjord med en mäktighet av 4-5 meter. Fyllnadsjorden underlagras av 6 meter lös till halvfast lera, räkna med skjuvhållfasthet $C_{uk} = 15$ kPa. Under leran följer fast friktionsjord av mäktighet 8 meter och därunder morän och berg. Moränen uppvisar ökande fasthet mot djupet och är delvis stenig/blockig. Förväntat pålstopp för stålpålarna är 5 meter in i moränen.

Antagna värden angående jorddata för datorsimulering se TABELL 11.

TABELL 11. Antagna värden på jorddata för simulering.

Jord	Djup	Spets			Mantel		
		R	J_s	q	R	J_s	q
Fyllning	0 m	300	0,3	1,5	20	0,3	2,5
	5 m	300	0,3	1,5	20	0,3	2,5
Lera	5 m	10	0,3	1,5	10	0,3	2,5
	11 m	10	0,3	1,5	10	0,3	2,5
Frikt.jord	11 m	200	0,3	1,5	20	0,3	2,5
	15 m	350	0,3	1,5	20	0,3	2,5
	15 m	350	0,3	1,5	30	0,3	2,5
	19 m	500	0,3	1,5	30	0,3	2,5
Morän	19 m	500	0,1	1,5	60	0,3	2,5
	24 m	1600	0,1	1,5	60	0,3	2,5

R = bärförmåga för spets (kN) respektive mantel (kN/m).

J_s = Smith dämpning q = fjädring, (quake) i mm.

Vid neddrivning/stoppslagning med fallhejare förväntas spetsfjädringen vara $q=1,5$ mm (D/120). Vid slagning med tryckluftshejare förväntas spetsfjädringen vara 0,9 mm (D/200). Jorddämpning $J_s = 0,1$ i pålspetsen motsvarar vid stoppslagning ($R \sim 1\,500$ kN) en Casedämpning av $J_{CASE} = J_s \times R / Z_p = 0,6$. Storlek på mantelfriktionen har satts till 0,5 vid fallhejarslagning och 0,2 vid tryckluftshejarslagning, det vill säga mantelmotståndet förväntas vara 50 % av sluthållfasthetsvärdet vid slagning med fallhejare och 20 % vid slagning med tryckluftshejare.

4.4.3 Vald stålpåle

Till objektet har valts en stålpåle 184,5 x 11,5 mm, i materialkvalitet St 52-3 (ca. SIS 2134). Pålen har en massa av 49 kg/m. Skarvning av pålarna görs med stumsvetsning. Vid dimensionering mot knäckning i jord skall beaktas 2 mm utvändig avrostning.

Med hänsyn till de geotekniska förhållandena och slagningen bedöms pålarna få en krökningsradie av $R = 200 - 400$ m. efter stoppslagning. Samtliga pålar skall rakhetskontrolleras.

Data på påle:

Material:	St 52-3 (SIS 2134)
f_{yk} :	355 MPa
A_{nom} :	6 250 mm ²
$A_{2\,mm}$:	5 104 mm ² (2 mm avrostning)

$$\text{Stuklast: } F_s = f_{yk} \cdot A_{nom} = 2\,218 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{Tröghetsmoment: } I_{nom} &= 2\,349 \cdot 10^4 \text{ mm}^4, \text{ nominellt} \\ I_{2\,mm} &= 1\,871 \cdot 10^4 \text{ mm}^4, 2 \text{ mm avrostning} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Böjmotstånd: } W_{nom} &= 255 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \\ W_{2\,mm} &= 207 \cdot 10^3 \text{ mm}^3, 2 \text{ mm avrostning} \end{aligned}$$

4.4.4 Lastkapacitet med hänsyn till böjknäckning

Med **lastkapacitet** menas pålens förmåga att uppbära last med avseende på:

- pålmaterialets och pålskarvarnas hållfasthet efter slagning
- pålens förmåga att bära last ur knäckningssynpunkt dvs. omgivande jordssidostöd och pålens krokighet.

Dimensionerande lastkapacitet fås genom division med partialkoefficient(er) och eventuell multiplikation med reduktionskoefficient(er).

Dimensionerande lastkapacitet kan beräknas enligt några olika metoder:

- förenklad metod enligt handboken "Pålgrundläggning" (sid. 181 - 182 resp 194-195)
- metod föreslagen i "Banverksprojekt T92-2164/33"
- metod enligt IVA-rapport 84.

Beräkning av dimensionerande lastkapacitet görs för detta exempel enligt den i handboken "Pålgrundläggning" beskrivna metoden.

Beräkning av dimensionerande lastkapacitet görs enligt nedan. Det minsta värdet blir dimensionerande.

$$R_{dm} = 0,44 f_{yk} \frac{A}{\gamma_n} \mu$$

$$R_{dk} = 4,0 \frac{\sqrt{E \cdot I \cdot C_{uk}}}{\gamma_n} \mu$$

där: R_{dm} = dim.lastkapacitet mht material.

R_{dk} = dim.lastkapacitet mht knäckning.

A = pålens tvärsnittsarea.

f_{yk} = karakteristiskt värde på stålets sträckgräns.

E = karakteristisk elasticitetsmodul för stål.

C_{uk} = karakteristiskt värde på jordens skjuvhållfasthet.

I = pålens tröghetsmoment.

γ_n = partialkoefficient för säkerhetsklass.

μ = partialkoefficient som beaktar inverkan av slagningen ($0,7 < \mu < 0,9$).

Utförs beräkning av dimensionerande lastkapacitet i säkerhetsklass 2 och med beaktande av 2 mm avrostning och materialdata enligt 4.4.3 fås:

$$R_{dm} = 725 \cdot \mu \text{ kN}$$

$$R_{dk} = 883 \cdot \mu \text{ kN}$$

Antages partialkoefficient, μ , vara 0,75 fås dimensionerande lastkapacitet $R_d = 544 \text{ kN}$.

4.4.5 Lastkapacitet med hänsyn till stoppslagning - dynamisk lastkapacitet

Dynamisk knäckning under pålinstallationen kan uppstå på olika sätt:

1. Pålen slås med så tungt slagdon att lasten varar så länge att pålen hinner knäcka ut, om dess knäckningsstabilitet är otillräcklig. Jordens sidomotstånd är således inte tillräckligt.
2. Pålen är så krokig och lasteffekten så hög under slagningen att pålmaterialet flyter under slagets verkan. I detta fall kan slagkraftens varaktighet vara mycket kort men pålen krokmar succesivt vid slagningen till följd av att pålmaterialet flyter i hårdast ansträngda snitt.

I båda fallen blir resultatet att pålarna slås bort om slagningen pågår tillräckligt länge. Är stoppslagningen kortvarig hinner dessa ej slås bort men pålarna blir succesivt krokigare varvid lastkapaciteten reduceras.

Pålens dynamiska lastkapacitet beräknas enligt ekvationer i IVA Pålkommisionen rapport 84 [2]. Värdet på bäddmodul resp. brottlast hos jord har ökat till dynamiska värden enligt:

$$\text{Bäddmodul: } k_d = 50 C_{uk} (\text{stat}) \text{ blir } = 175 C_{uk} (\text{dyn})$$

$$\text{Brotlast: } q_B = 6 D C_{uk} (\text{stat}) \text{ blir } = 9 D C_{uk} (\text{dyn})$$

Gällande relationsvärden mellan statistisk/dynamisk påverkan av jord, se IVA Pålkommisionen rapport 81 kap. 3.2.3 [13].

Den dimensionerande lastkapaciteten för slagning har beräknats med materialegenskaper för olyckslast enligt nedan:

$$\gamma_n = 1,0$$

$$f_{yd} = f_{yk}$$

$$E_d = 0,9 E_k (\text{reduktion med hänsyn till egenspanningar})$$

Egenspanningsgrupp a

$$\text{Formfaktor} = 1,25$$

Värden gällande bäddmodul och brottlast för jord har reducerats med partialkoefficient $\gamma_m = 1,4$.

FIG. 20 visar en beräkning av dimensionerande lastkapacitet vid slagning för stålpåle 184,5 · 11,5 mm. Vid stoppslagning kan pålen belastas med maximalt ca 1 900 kN om jordens karakteristiska skjuvhållfasthet är 15 kPa och pålens krökningsradie är 200 m. Pålens stuklast, $f_{yk} \cdot A_{nom}$, är 2 218 kN.

Den maximala kraft som uppkommer i pålen vid stoppslagning blir för huvudsakligen spetsburna pålar av samma storleksordning som den geotekniska bärförmågan. Beroende på om stoppslagningen utförs med tung eller lätt hejare kommer större eller mindre del av pålen att bli belastad med denna kraft. Stoppslås pålen med en lätt hejare blir belastningen störst i botten och toppen. Stoppslås pålen med en tung hejare blir det samma belastning i hela pålen.

Om man anser att pålen skall stoppslås till en karakteristisk bärförmåga R_k (nedre 5 %-fraktilen) och att denna är normalfördelad med en variationskoefficient av 10 % så erhålls:

$$\square \text{ medelvärde av bärförmågan } R_{sm} = R_k / (1 - (0,1 \cdot k_5))$$

$$\square \text{ den övre 5 \%-fraktilen, } R_{s\bar{o}}, \text{ erhålls då bärförmågan} \\ R_{s\bar{o}} = R_k (1 + (0,1 \cdot k_5)) / (1 - (0,1 \cdot k_5))$$

Den statistiska koefficienten k_5 beror av antalet provade pålar, alternativt av slagningsbetingelserna. Dess definition varierar för olika typgodkännanden.

Pålens dimensionerande lasteffekt vid slagning sätts lika med den kraft som motsvarar den övre 5 %-fraktilens bärförmågevärde, $R_{s\bar{o}}$, enligt ovan.

4.4.6 Geoteknisk bärförmåga

Den dimensionerande geotekniska bärförmågan är beroende av den metod som används för att verifiera pålens geotekniska bärförmåga. I detta exempel beräknas dimensionerande geoteknisk bärförmåga enligt:

$$R_d \cdot \frac{R_k}{\gamma_{Rd} \cdot \gamma_{mp} \cdot \gamma_n} = \frac{R_{sm}(1-v/100)}{\gamma_{tot} \cdot \gamma_n} \quad [1]$$

$$R_k = R_{sm} (1-v/100) \quad [2]$$

R_d = dimensionerande geoteknisk bärförmåga.

R_k = karakteristisk geoteknisk bärförmåga.

$\gamma_{Rd} \cdot \gamma_{mp}$ = partialkoefficienter som beaktar osäkerhet i dimensioneringsmetoden dvs. stoppslagningsmetod, typ av slagdon, samt omfattning på stötvågsmätning etc.

γ_n = partialkoefficient som beaktar säkerhetsklassen.

- R_{sm} = medelvärde av resultat från stötvågsmätning av likartade pålar alt. förväntad geoteknisk bärförmåga beräknad enligt datorsimulering.
- v = variationskoefficient grundad på sannolikhetsbaserad totalbedömning av många inverkan förhållanden. Variationskoefficienten, v , sätts till:
- 10% för pålar som slås genom lättslagna jordar till berg alternativt friktionspålar.
 - 15% för pålar som slås genom lättslagna jordar till stopp i fast ej stenig/blockig jord.
 - 20% för pålar som slås genom stenig och blockig jord alternativt pålar mot släntberg direkt överlagrad av lös jord.

Enligt ekvationer (1) resp. (2) kan kvoten R_k/R_d respektive R_{sm}/R_d skrivas enligt:

$$\frac{R_k}{R_d} = \gamma_{Rd} \gamma_{mp} \gamma_n$$

$$\frac{R_{sm}}{R_d} = \frac{\gamma_{Rd} \cdot \gamma_{mp} \cdot \gamma_n}{(1 - v / 100)}$$

Storheten R_{sm} är medelvärdet av resultat från stötvågsmätning av likartade pålar alt. förväntad geoteknisk bärförmåga beräknad enligt datorsimulering av stoppslagningen. Kvoten R_{sm}/R_d är ett mått på den så kallade totalsäkerhetsfaktorn vilken kan jämföras med dagens praxis. Med antagande av en variationskoefficient av $v = 15 \%$ (definition se ovan) så fås:

Tabell 12. Beräkning av "totalsäkerhetsfaktorer" R_k/R_d samt R_{sm}/R_d i säkerhetsklass 2. (Värden på partialkoeff. hämtade ur Banverksprojekt T92-2164/33)

Verifieringstyp	Metod 1		Metod 2		Metod 3	
	R_k/R_d	R_{sm}/R_d	R_k/R_d	R_{sm}/R_d	R_k/R_d	R_{sm}/R_d
Stoppsslagningsregel	2,4 ¹⁾	2,82	-	-	-	-
Stötvågsmätning 10%	-	-	2,0	2,35	-	-
Stötvågsmätning 25 %	-	-	-	-	1,6	1,88

- 1) partialkoefficient vilken gäller för väl kontrollerade hejare. Hejaren skall vara väldokumenterad med stötvågsmätning så att datorsimulering kan utföras med godtagbar noggrannhet. Är hejaren ej väldokumenterad skall partialkoefficient 2,6 användas på försiktigt valda värden hos hejaren.

4.4.7 Val av slagningsutrustning

Pålarna drivs ned och stoppslås med fallhejare 20 kN respektive tryckluftshejare MKT6 alt. PH 250 K. Vid slagning med fallhejare varierar fallhöjden mht jordhållfasthet. Fallhöjden är $H=40$ cm för djup 0-13 m; $H=100$ cm för djup 13-20,5 samt $H=150$ cm för djup 20,5 till slutdjup. Tryckluftshejarna slår hela tiden med max. fallhöjd. TABELL 13 anger data på hejarna.

Tabell 13. Data på hejare för datorsimulering.

Beteckning	Enhet	Linhejare	MKT 6	PH 250
Hejarvikt	kN	20	1,81	2,95
Dynvikt	kN	2,5	0,3	0,3
Effektivitet	%	65	80*	80*
Nominell fallhöjd	m	variabel	1,90	0,63
<u>Hejare/Dyna</u>				
Styvhet	kN/mm	5 000	10 000	10 000
Avrundning(RO)	mm	0,7	0,7	0,7
Stötkoefficient (COR)	mm	1,0	1,0	1,0
<u>Dyna/Påle</u>				
Styvhet	kN/mm	∞	∞	∞
Avrundning	mm	3,0	1,0	1,0
Stötkoefficient	mm	0,8	0,8	0,8

*) effektiviteten antas vara 80 % på hälften av slagen.

4.4.8 Datorsimulering av påslagningen

Pålarna skall dimensioneras enligt:

Pålarnas dimensionerande lastkapacitet skall beräknas enligt handboken "Pålgrundläggning" [19] förenklad metod. Enligt kap. 6.23 beräknas den dimensionerande lastkapaciteten till 544 kN.

Pålarna skall stoppslås enligt regler utifrån datorsimulering. Hejare och fallhöjder skall väljas så att stoppslagningskrav enligt TABELL 12 uppfylls. Pålarna skall således stoppslås till bärförmåga $R_{sm} = 2,82 \times 544 = 1535$ kN.

Datorsimulering av slagningsförloppet utförs för beräkning av:

- a) antalet slag mot djup samt slagningstid
- b) påkänningar i pålen
- c) stoppslagningsregel.

Datorberäkningen redovisas i FIG. 21, 22. respektive 23.

FIG. 21 redovisar neddrivning/stoppslagning av stålpåle $\varnothing 184,5 \times 11,5$ mm med fallhejare 20 kN.

FIG. 21.a redovisar en datorberäkning av stoppslagningen. Stoppslås pålen med fallhöjd 1,50 m mobiliserar bärförmågan $R_s = 1\,600$ kN vid en sjunkning av 5 mm/ 10 slag. Vid nollsjunkning mobiliserar en bärförmåga av ca 1 900 kN.

FIG. 21.b redovisar en beräkning av antal slag / meter, drag och tryckspänningar i pålen samt tillförd energi mot pålens spetsdjup och bärförmåga. Bärförmågan 1 600 kN uppnås på ca. 22,75 m djup. Observera att fallhöjden varierar med hänsyn till jorden.

Slagningstiden till detta djup 22,75 m är ca. 85 - 90 minuter om hejaren slår 60 slag per minut. Då fallhöjderna är förhållandevis höga reduceras hejarens slagtal till ca. 30 - 40 slag/minut. Total slagningstid uppskattas till drygt 2 timmar.

I FIG. 21.b redovisas även tryck och dragspänningar mot pålspetsdjup. Max. tryckspänning ca. 250 MPa erhålls vid stoppslagning av pålen.

FIG. 22.a redovisar stoppslagning av pålen med tryckluftshejare MKT 6. Enligt datorberäkningar förväntas hejaren vid små sjunkningsvärden (10 -15 mm/minut) kunna mobilisera en bärförmåga av ca 1 600 kN. Observera att datorprogrammet WEAP avbryter beräkningarna när slagtalet är 9 999 slag för 1 meters sjunkning. Då en tryckluftshammare ofta slår 200 - 250 slag per minut motsvaras detta av sjunkningar 20 - 25 mm/minut.

I FIG. 22.b redovisas bärförmåga mot djup samt slagtal, drag och tryckspänningar mot djup. Enligt datorberäkning krävs en slagningstid av 2,0 - 2,5 timmar för att slå pålen till 23,5 m djup (bärförmåga 1600 kN). Antal slag för att nå detta djup är ca. 28 000. Max. tryckspänning i pålen fås vid stoppslagningen. Max. dragspänning fås när pålspetsen går igenom lerlagret. Med hänsyn till eventuella skarvars hållfasthet kan det vara klokt att reducera luftflödet till hammaren när pålen går genom jord med låg hållfasthet.

I FIG. 23 redovisas neddrivning/stoppslagning av stålpålen med tryckluftshejare PH250 K. Enligt datorsimuleringen förväntas denna hejare maximalt kunna stoppslå pålen till en bärförmåga av 950 kN, vilket innebär att pålen max kan slås till 20,3 m djup. Tryckluftshejare förmår inte uppfylla ställda krav på bärförmåga.

4.4.9 Slutsatser av datorsimuleringen

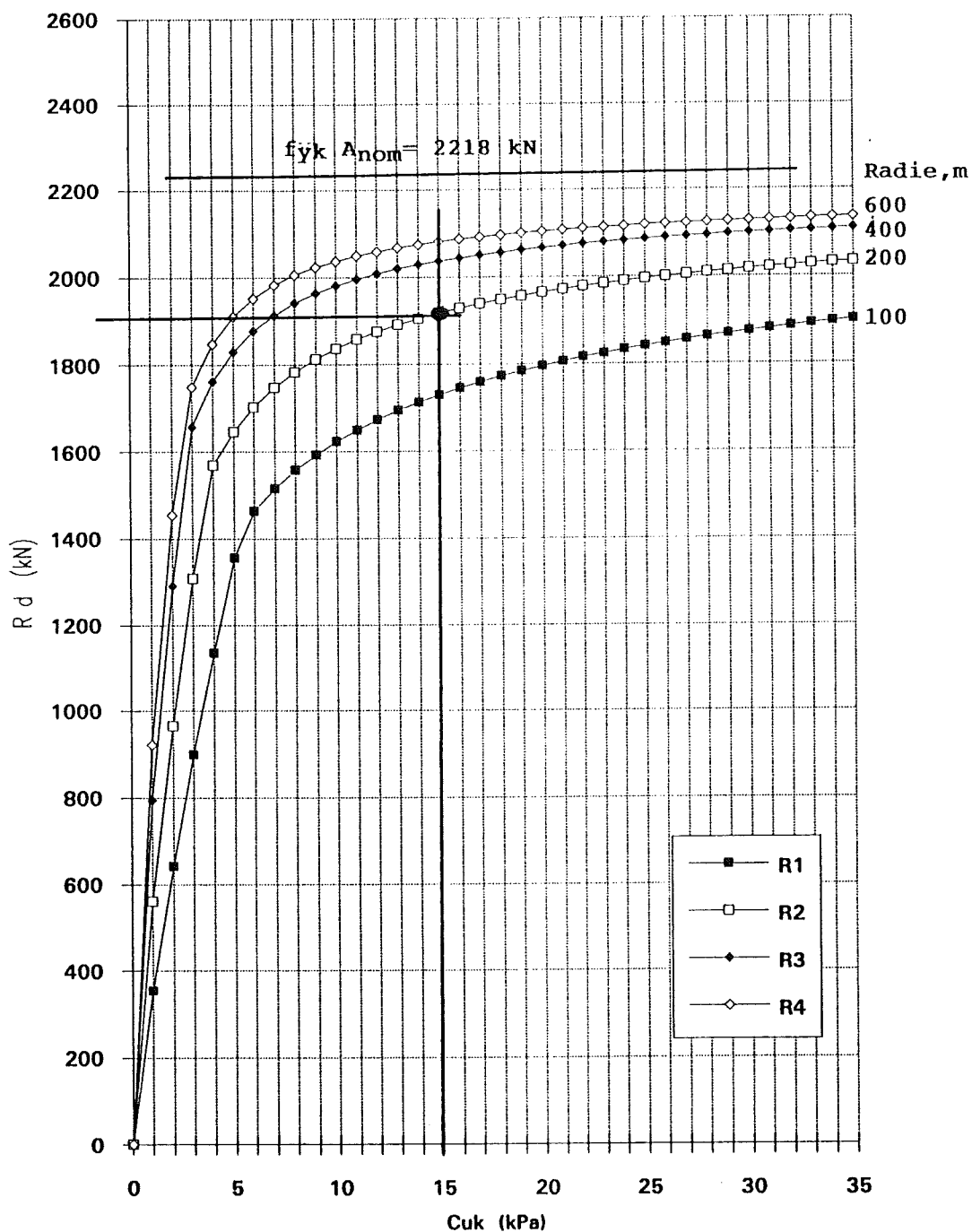
Tryckluftshejare PH250 K förmår max. stoppslå pålen till en bärförmåga av 950 kN och uppfyllet därmed ej ställda stoppslagningskrav.

Tryckluftshejare MKT6 samt fallhejare 20kN har båda möjlighet att stoppslå pålarna till specificerade krav på bärförmåga dvs. 1 535 kN. Stoppslagningsregler för dessa två hejartyper blir:

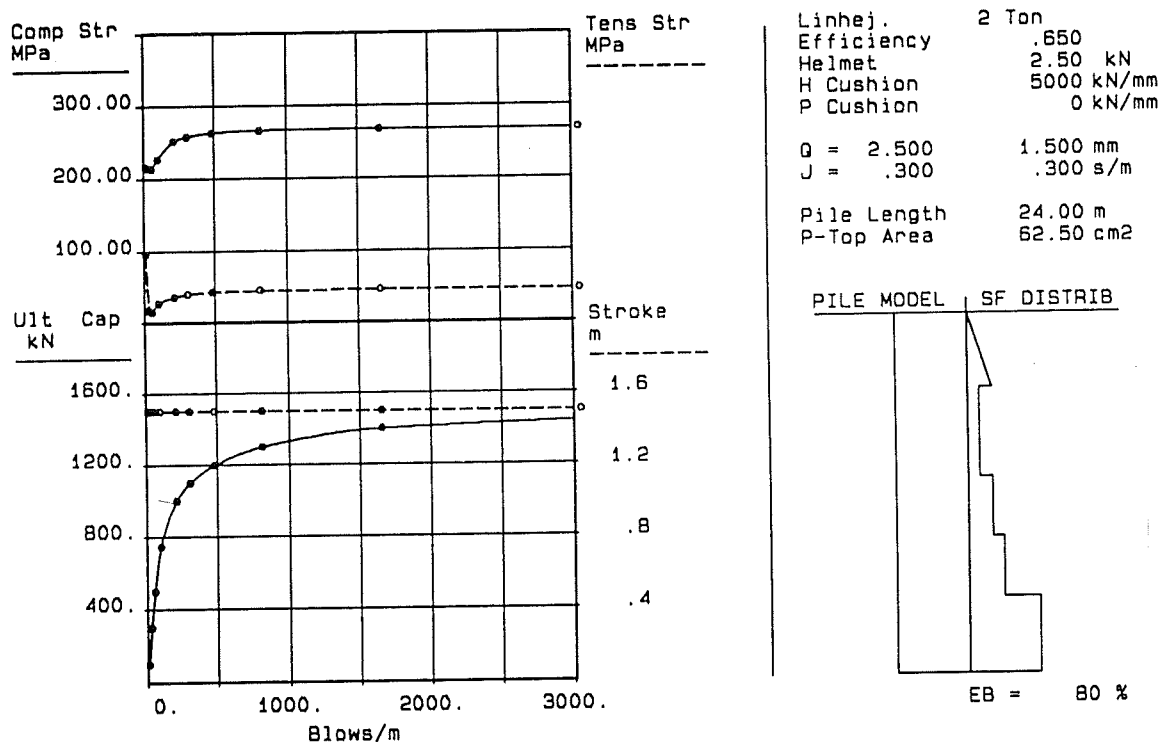
Fallhejare 20 kN; Fallhöjd 1,50 m; stoppsjunkning $S = 10 \text{ mm/10slag}$

Tryckluftshejare MKT 6: Max. energi; stoppsjunkning $S = 10 \text{ mm/ minut.}$

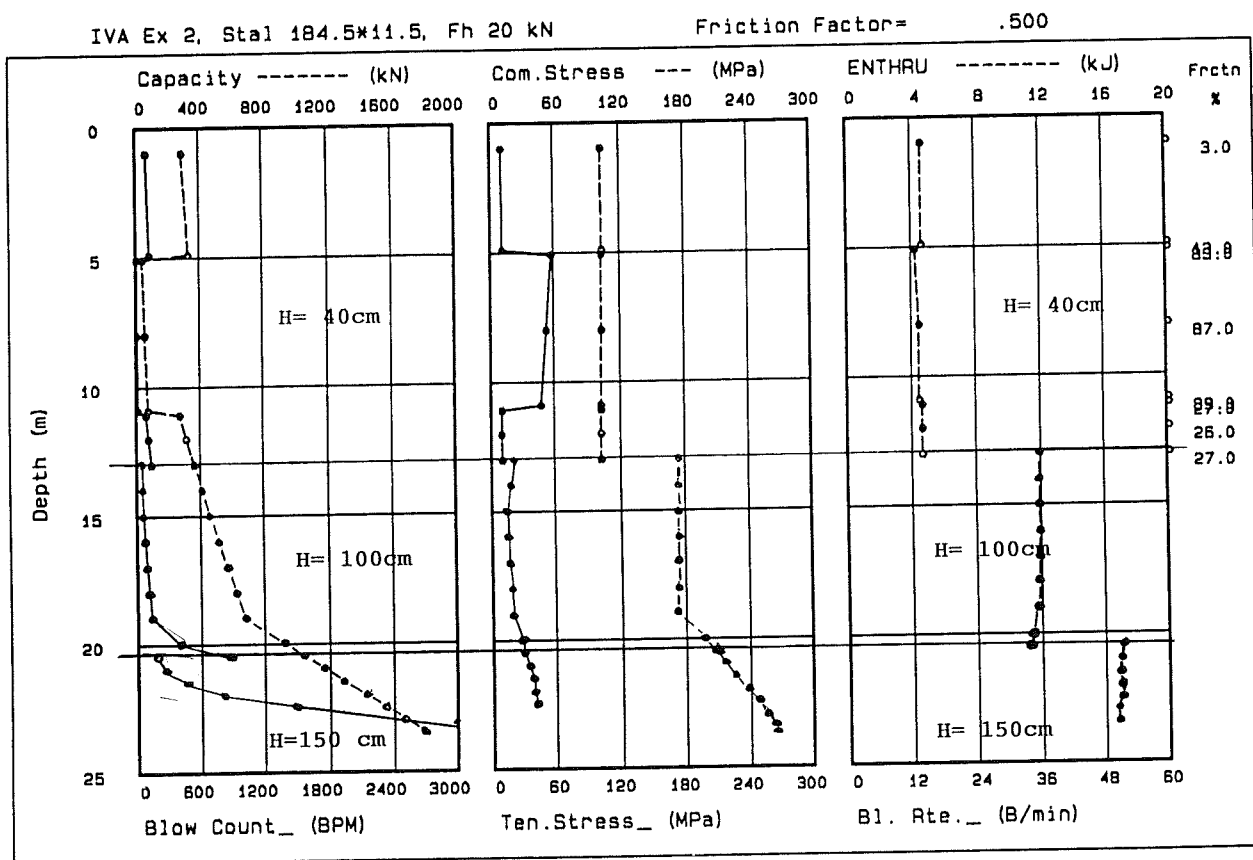
Dim. Lastkapacitet vid slagning



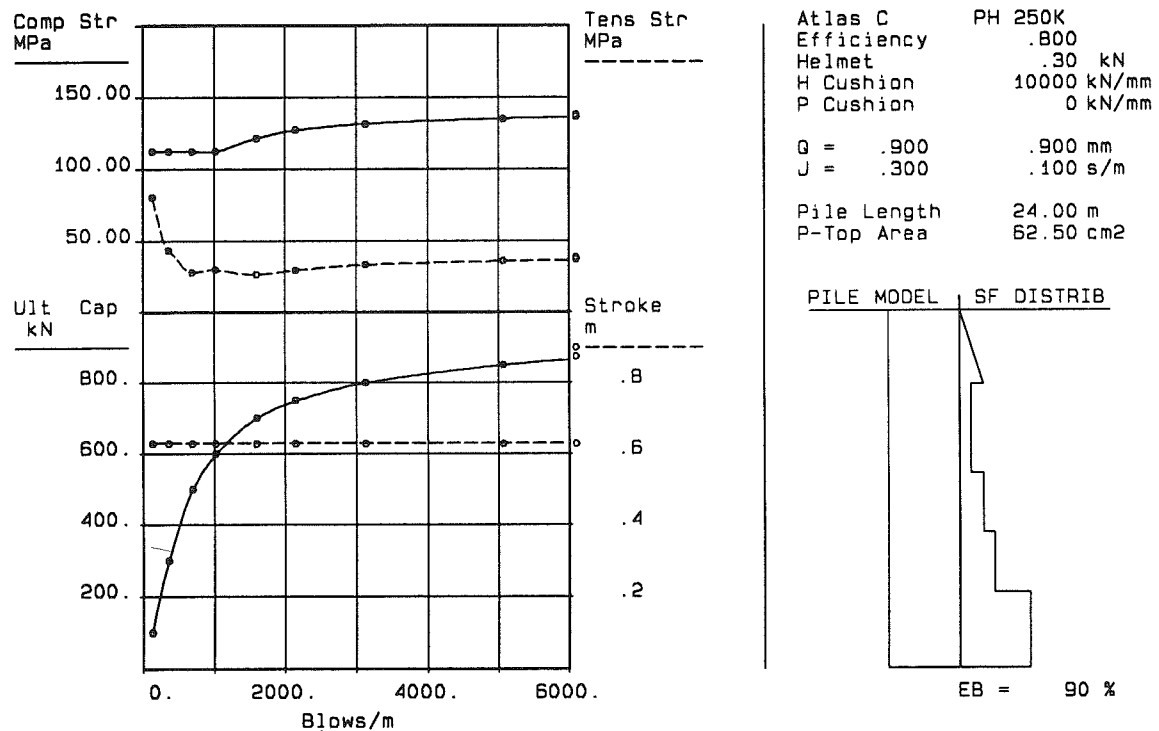
Figur 20. Beräkning av lastkapacitet för slagning - dynamisk lastkapacitet.



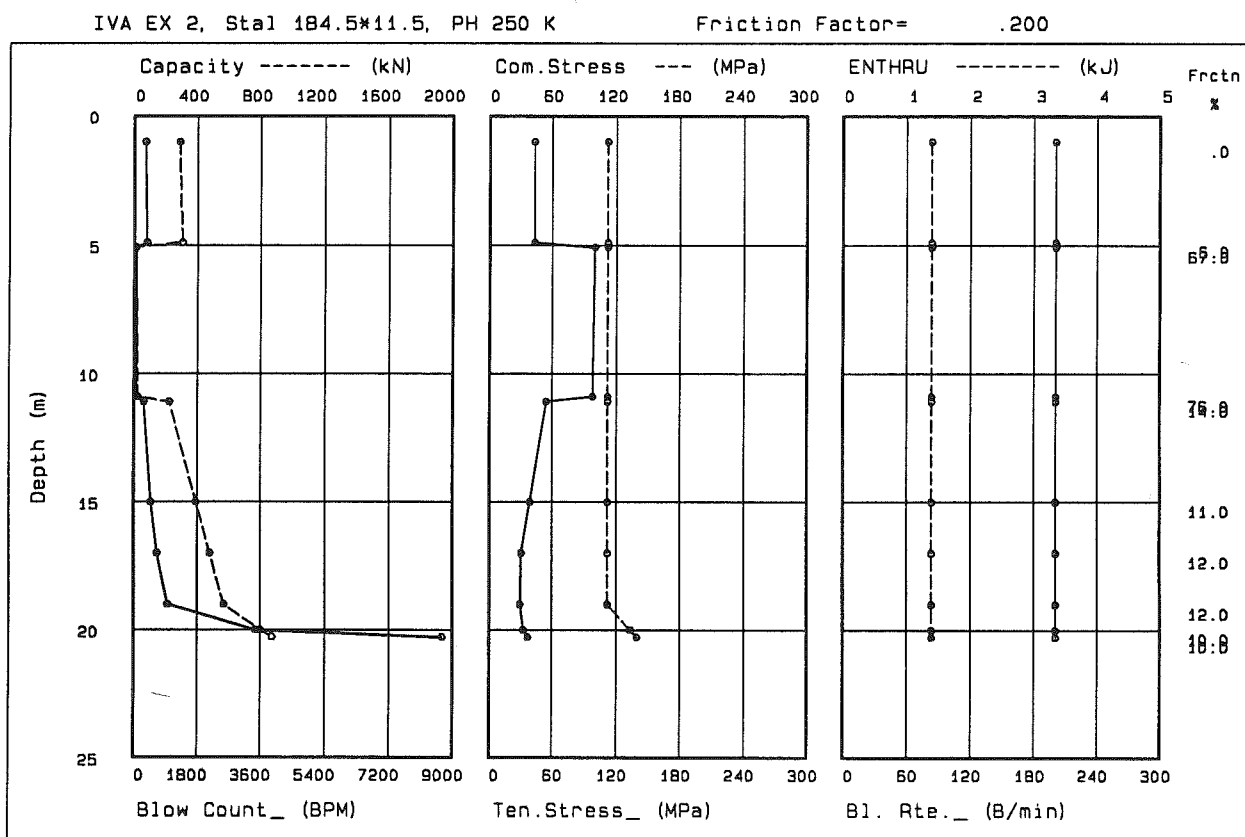
Figur 21.a. Stoppslagning av stålpile med fallhejare 20 kN. Fallhöjd H=1,50 m.



Figur 21.b. Datorberäkning av drivning/stoppsslagning. Beräkning av slag/meter; drag-/tryckspänningar samt slagenergi mot djup.



Figur 23.a. Stoppslagning av stålpile med PH 250 K. Fallhöjd H=0,63 m.



Figur 23.b. Datorberäkning av drivning/stoppslagning. Beräkning av slag/meter; drag-/tryckspänningar samt slagenergi mot djup.

5. Kan kvaliteten på simuleringsresultaten förbättras?

5.1 Allmänt

Resultaten kan aldrig bli bättre än kvaliteten hos ingångsdata. Största osäkerheten hos ingångsdata finns hos jordens egenskaper och hos slagningsutrustningens funktion (användningssätt och underhåll).

Jordens egenskaper utvärderade från konventionella geotekniska undersökningar kan bestämmas noggrannare om en systematiserad erfarenhetsåterföring görs. Kalibrering kan ske med hjälp av resultat från dokumenterade pålningsprojekt där stötvågs_mätning utförts under drivningen. Kalibrering kan göras enligt kapitel 5.2.

En branschgemensam databank med kalibrerade jordegenskaper utvärderade ur geotekniska undersökningar är ett effektivt sätt att höja kvaliteten på simuleringar.

Nya geotekniska undersökningsmetoder kan prövas/utvecklas som är bättre lämpade att bestämma jordens egenskaper vid pålning. Här har lovande resultat uppnåtts genom stötvågs_mätning vid hejarsondering, se [9], [10] och [25].

Alla slagningsutrustningars effektivitet är beroende av maskinistens handlag samt på underhållsnivå hos slagningsutrustningen. En av de vanligaste orsakerna till avvikelser från förväntad drivbarhet hos pålar brukar ligga hos slagningsutrustningen.

Vid verifieringsmetoder som bygger på sjunkningskrav premieras slagningsutrustningar som har liten osäkerhet hos tillförd energi till pålen. En naturlig följd av detta borde vara att anslagshastighet hos linhejare mättes i ökad utsträckning och att frifallshejare kontrollerades med jämna mellanrum med avseende på ”effektiv fallhöjd”. Genom att utföra sådana kontroller kan också mera verklighetsnära uppgifter om slagningsutrustningars egenskaper samlas in.

5.2 Kalibrering av ingångsdata med hjälp av simulering av utförda pålningsprojekt

Nedan presenteras en ”kalibreringsmodell”. Syftet med denna är att finna samband mellan resultaten från geotekniska undersökningar och jordens statiska och dynamiska egenskaper. Dessa skall sedan ligga som grund vid valet av ingångsdata till simuleringen. Kalibreringen avser främst drivningsmotståndet, dvs statiska bärförmågan och tillväxtfaktorn, samt därefter jordens dämpning och fjädring.

För kalibrering av ingångsdata görs simulering av pålningsprojekt med dokumenterad slagräkning och där stötvågsmätning utförts vid drivningen.

- 1) Antag värden på ingångsdata baserat på aktuell påltyp och slagningsutrustning samt den geotekniska undersökningen. Dokumentera hur val av indata gjorts, särskilt tankegången vid överföring av geoundersökningarnas resultat till påle-jordmodell samt drivningsmotståndets storlek i förhållande till den geostatiskt beräknade bärförmågan.
- 2) Utför simuleringen.
- 3) Resultatet från simuleringen i form av pålens sjunkning per slag tillsammans med antaget drivningsmotstånd jämförs med resultaten från slagräkningen och stötvågsmätningen vid drivning.
- 4) Ingångsdata korrigeras, dokumenteras och ny simulering utförs. Detta upprepas tills överensstämmelse erhålls för såväl bärförmåga som sjunkning.
- 5) Ingångsdata och tillhörande värden från geoundersökningen lagras i databas, tillsammans med resultatet från simuleringen i form av sjunkningen per slag. Databasen kan sedan användas vid andra simuleringar som underlag för val av indata.

Inledningsvis väljes rekommenderade värden på jordens dämpning och fjädring vid kalibreringen. Detta för att "minska" antalet obekanta. Vi söker i första hand riktvärden på drivningsmotståndet i olika jordar. Därefter riktvärden för jordens dämpning och fjädring vid olika relativa fastheter.

Härmed erhålls en erfarenhetsuppbyggnad vad gäller val av ingångsdata utifrån resultat från geoundersökningar.

6. Rekommenderade ingångsdata

6.1 Allmänt

I detta kapitel redovisas rekommenderade värden på egenskaper vid slagning för jord, påle och slagningsutrustning. Jordens mantel- och spetsmotstånd vid slagning bestäms utifrån resultat från geotekniska undersökningar.

6.2 Jordens egenskaper

6.2.1 Inledning

Vid bestämning av jordens mantel- och spetsmotstånd vid slagning utgår man ifrån geostatiska beräkningar av pålens slutliga bärförmåga. Dessa beräkningar baseras på resultat från geotekniska undersökningar. Pålens slutliga bärförmåga divideras därefter med en tillväxtfaktor för bestämning av jordens mantel- och spetsmotstånd vid slagning, se kapitel 6.23 och 6.25.

Bärförmågan beräknas med den allmänna formeln:

$$P_{\text{påle}}^{\text{brott}} = P_{\text{mantel}}^{\text{brott}} + P_{\text{spets}}^{\text{brott}} = f_m \cdot A_{\text{mantel}} + f_s \cdot A_{\text{spets}}$$

$$f_m = \text{medelvärde av mantelbärförmågan per ytenhet längs pålen}$$

$$A_{\text{mantel}} = \text{pålens mantelarea}$$

$$f_s = \text{spetsbärförmåga per ytenhet}$$

$$A_{\text{spets}} = \text{pålens spetsarea}$$

Några olika metoder för bestämning av mantelfriktion och spetsmotstånd anges i kapitel 6.22 och 6.24. Ytterligare beräkningsmetoder beskrivs i en mängd handböcker, tex handboken Pågrundläggning [19]. I Pålkommissionens rapport 86 [20] finns jämförelser mellan bärförmåga hos friktionspål bestämde dels genom beräkning, dels genom provbelastning. Resultaten varierar ofta mycket mellan olika beräkningsmetoder. Medelvärde av flera olika beräkningsmetoder bör användas. De olika beräkningsmetodernas spridning kring medelvärdet är en viktig upplysning om beräkningarnas osäkerhet.

Vissa beräkningsmetoder bygger på jordens inre friktionsvinkel ϕ . Denna kan utvärderas ur sonderingsresultat med hjälp av TABELL 14.

Observera att tabellvärdena för friktionsvinkeln ϕ är baserade på erfarenheter från huvudsakligen plattgrundlagda konstruktioner. Erfarenhetsvärdena skall därför tillämpas med försiktighet vid beräkning av pålars bärförmåga.

Tabell 14. Karakteristiska jorddata för naturligt lagrad friktionsjord. Tabellvärdena gäller för sand.

Relativ fasthet	CPT, q_{ck} MPa	Friktionsvinkel ϕ ¹⁾	Vim ²⁾ hv/0,2 m	HfA (netto) ³⁾ sl/0,2 m
mycket låg	0-2,5	29-32	0- 10	0-4
låg	2,5-5	32-35	10-30	2-8
medelhög	5-10	35-37	20-50	6-14
hög	10-20	37-40	40-90	10-30
mycket hög	>20	40-42	>80	>25

- 1) Angivna värden gäller för sand. För siltig jord görs avdrag med 3^o och för grus tillägg med 2^o.
- 2) Före bestämning av relativ fasthet skall viktsonderingsmotstånd erhållet i siltig jord reduceras genom division med 1,3.
- 3) Med HfA (netto) avses spetsmotståndet, dvs det totala neddrivningsmotståndet reduceras med mantelfriktionen på sondstängen.

6.2.2 Mantelmotstånd

A) FRIKTIONSJORD

Mantelmotståndet beräknas normalt från jordens geotekniska egenskaper, t ex inre friktionsvinkel eller relativ fasthet, eller direkt från resultatet från geotekniska undersökningar.

$$f_m = K_m \cdot \tan \delta \cdot \bar{\sigma}'_{om} = \beta \cdot \bar{\sigma}'_{om}$$

f_m = medelvärde av mantelbärförmåga per ytenhet längs pålen

K_m = horisontell jordtryckskoefficient

$\tan \delta$ = mantelfriktionskoefficient

$\bar{\sigma}'_{om}$ = medelvärde av effektiva vertikala överlagringstrycket längs pålens mantelyta

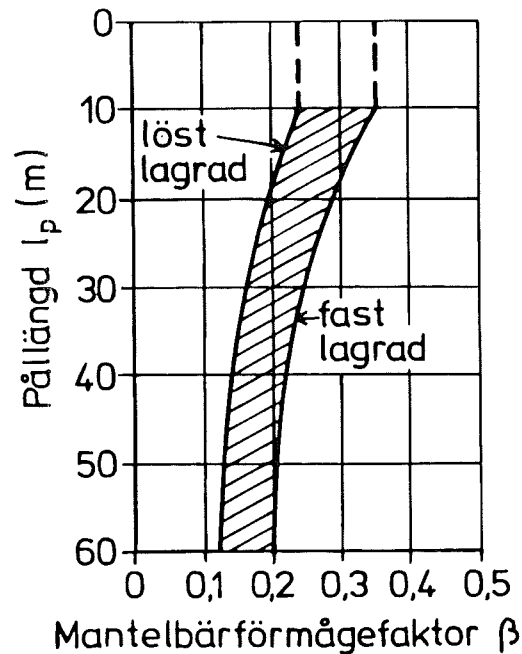
β = mantelbärförmågefaktor

Några exempel på beräkningsmetoder redovisas nedan:

(Redovisade metoder för bestämning av mantelfriktionen gäller för konventionella betongpålars dimensioner. Mantelfriktionen för stålspålar i friktionsjord är ca 70-80 % av värdet för betongpålar.)

1) Norsk peleveiledning 1991

Värden på β i FIG. 24 är medelvärden för aktuell pållängd och skall användas i kombination med medelvärdet av σ'_{om} .



Figur 24. Mantelbärförmågefaktorn β som funktion av pållängd och jordens lagringstäthet (Norsk Peleveiledning, 1991 [17]).

2) Bestämning baserad på CPT-sondering (Norsk Peleveiledning, 1991 [17])

$$f_m = k_m \cdot \bar{q}_c$$

k_m erhålls ur TABELL 15.

$\bar{q}_c$ = medelvärde av q_c längs manteln

Tabell 15. text

Spetsmotstånd q_c MPa	Mantelfriktionsfaktor k_m	Spetsmotståndsfaktor k_s
1 till 10	0,010 till 0,007	0,5 till 0,7
10 till 20	0,007 till 0,005	0,7 till 1,0

Friktionen längs pålen, $k_m \cdot \bar{q}_c$, sätts i sand inte lägre än 10 kPa och inte högre än 120 kPa.

B) KOHESIONSJORD

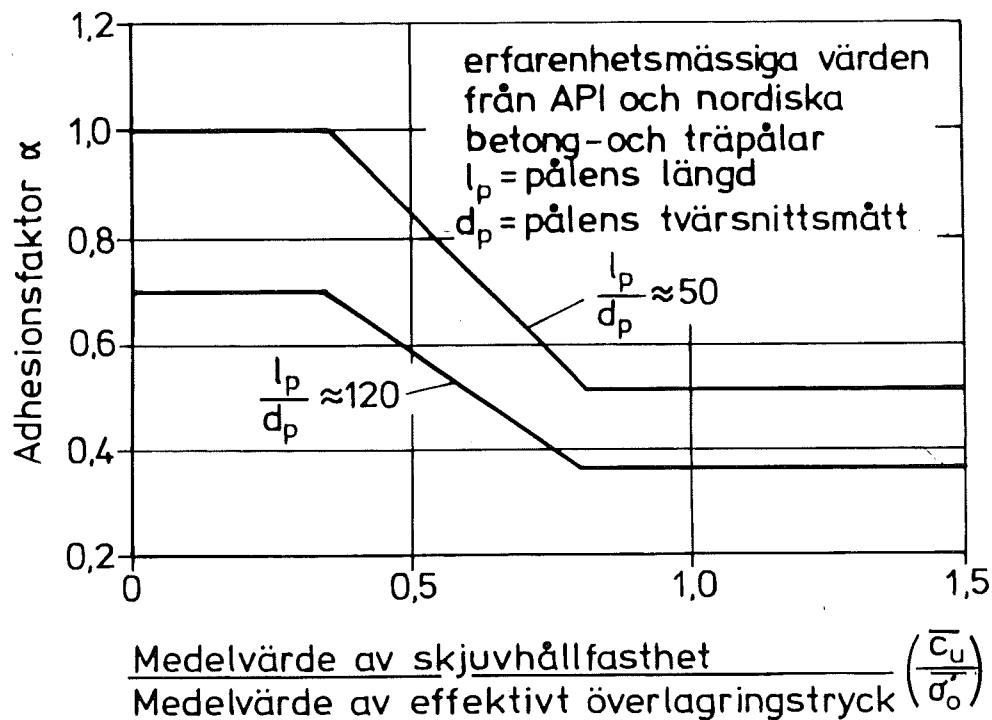
Mantelmotståndet bestäms normalt genom beräkning grundad på totalspänning eller effektivspänning i jorden.

**1) Beräkning baserad på jordens odränerade skjuvhållfasthet
(Norsk Peleveiledning, 1991 [17])**

$$f_m = \alpha \cdot \bar{c}_u$$

$\bar{c}_u$ = medelvärdet av jordens odränerade skjuvhållfasthet längs pålen utan reduktion m h t konflytgräns

α = empirisk adhesionsfaktor som beror av lerans skjuvhållfasthet och överkonsolideringsgrad samt pålens längd



Figur 25. Adhesionsfaktor α för slagna pålar i lera (Norsk Peleveiledning, 1991 [17]).

2) Beräkning baserad på effektiva vertikalspänningen (Flaate och Selnes, 1977 [12])

$$f_m = \beta \cdot \bar{\sigma}'_{om}$$

$$\beta = \text{mantelbärförmågefaktor} = 0,4 \cdot \mu_L \cdot \sqrt{\text{OCR}}$$

$$\mu_L = (L_p + 20) / (2L_p + 20)$$

$$L_p = \text{pållängd i jord}$$

$$\bar{\sigma}'_{om} = \text{medelvärde av vertikala effektivspänningen längs pålen}$$

OCR = överkonsolideringskvot, förhållandet mellan tidigare största och nuvarande effektiva överlagringstryck (OCR = 1,0 för normalkonsoliderad lera)

6.2.3 Pålens mantelmotstånd vid slagning

Pålens mantelmotstånd vid slagning är normalt lägre än den slutliga bärförmågan. Mantelmotståndet vid slagning erhålls genom att dividera den slutliga bärförmågan enligt kapitel 6.22 med tillväxtfaktorn N_s . Tillväxtfaktorn anger förhållandet mellan den slutliga bärförmågan och den vid drivning. Nedan anges ungefärliga värden på tillväxtfaktorn för olika jordar och lagringstäthet.

$$\text{Sand, grus: fast - lös lagring, } N_s = 1,1 - 2,0$$

$$\text{Silt : fast - lös lagring, } N_s = 1,4 - 3,3$$

$$\text{Lera : över - normalkonsoliderad, } N_s = 2,0 - 10$$

6.2.4 Spetsmotstånd**A) FRIKTIONSJORD**

Ett allmänt uttryck för spetsbärförmågan, f_s , är:

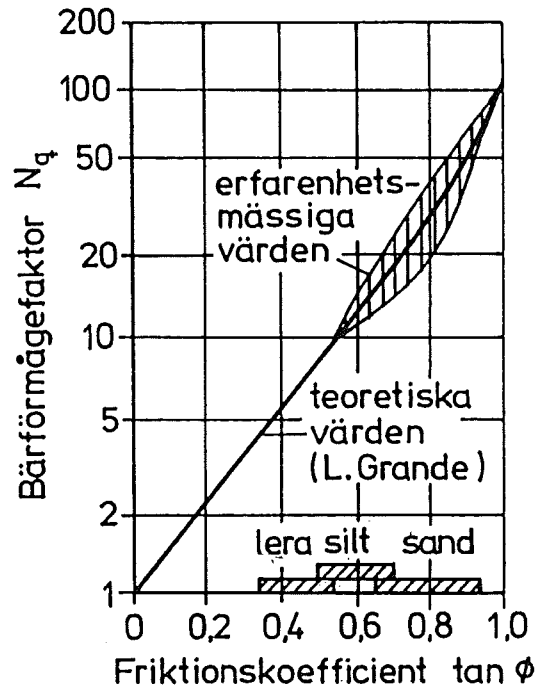
$$f_s = N_q \cdot \sigma'_{os}$$

$$N_q = \text{bärighetsfaktor}$$

$$\sigma'_{os} = \text{effektivt vertikalt överlagringstryck vid pålspets}$$

1) Statisk bärighetsformel (Norsk Peleveledning, 1991 [17])

N_q erhålls ur FIG. 26. För olika jordar och lagringstäthet fås värden på $\tan \phi$ enligt TABELL 16. Spetsbärförmågan f_s begränsas till 10 MPa.



Figur 26. Bärighetsfaktorn N_q (Norsk Peleveledning, 1991 [17]).

Tabell 16. Variationsområde för $\tan \phi$ (Norsk Peleveledning, 1991 [17]).

	Silt-Finsand	Sand-Grus
Löst lagrad	0,4-0,6	0,6-0,8
Fast Lagrad	0,6-0,7	0,7-0,9

2) CPT-sondering (Norsk peleveledning, 1991 [17])

$$f_s = k_s \cdot \bar{q}_c$$

$\bar{q}_c$ = medelvärde av q_c inom intervallet 3-5 påldiametrar över och under påspets

k_s erhålls ur TABELL 15

Spetsbärförmågan, $k_s \cdot \bar{q}_c$, sätts i sand till maximalt 10 MPa.

B) KOHESIONSJORD

1) *Norsk Peleveledning, 1991 [17]*

$$f_s = N_q \cdot \bar{c}_u$$

N_q = bärighetsfaktor = 9

$\bar{c}_u$ = medelvärde av jordens odränerade skjuvhållfasthet längs pålen utan reduktion m h t konflytgräns

6.2.5 Pålens spetsmotstånd vid slagning

Den relativa skillnaden mellan det slutliga spetsmotståndet och det vid slagning är betydligt mindre än motsvarande skillnad för mantelfriktionen. Beräknade värden på spetsmotståndet enligt ovanstående metoder skall därför reduceras i mindre grad än vad som angavs för mantelfriktionen i kapitel 6.23.

6.2.6 Jordens fjädring och dämpning

Rekommenderade värden på jordparametrar har angetts av Goble, Rausche & Likins [15]. Observera att de rekommenderade värdena är generella och baseras på genomsnittliga jordförhållanden. Inledningsvis kan de dock användas tills större erfarenhet har byggts upp vad gäller val av jordparametrar baserade på lokala jordförhållanden.

Tabell 17. Rekommenderade värden på jordens dämpning och fjädring (Goble, Rausche & Likins [15]).

Dämpning (Smith):		
	Mantel	Spets
Friktionsjord	0,15	0,5 (s/m)
Kohesionsjord	0,65	0,5 (s/m)
Fjädring (quake):		
	Mantel	Spets
Alla jordtyper	2,5	d/120* (mm)

* d=spetsdiameter.

Fjädringen bör ej väljas mindre än 1,25 mm.

Dessa värden kan vara låga för fjädringen i spetsen men detta kompenseras av ett ofta för högt värde på spetsdämpningen. En utvärdering av stötvågsmätning på pålar i aktuell jord kan ge bättre information om jordparametrarna.

6.3 Pålens egenskaper

De parametrar som skall väljas för pålelement är area, elasticitetsmodul och tunghet. Vid simulering bör följande värde användas, TABELL 18:

Tabell 18. Rekommenderade värden på E-modul och tunghet för olika pålmaterial.

Material	Elasticitetsmodul MPa	Tunghet kN/m ³
Betong	40 000	24,5
Stål	210 000	78,5
Trä	14 400	9
Segjärn	190 000	70,5

Om pålar har skarvar som ej är jämnstarka med pålen bör också skarvarnas egenskaper studeras, tex om skarven kan ta upp dragkrafter. Detta bör tas med i datorsimuleringen.

6.4 Slagningsutrustningens egenskaper

I flera simuleringsprogram finns ett flertal hejartypers prestanda redan inmatade. Om dessa data ej finns skall uppgifter om hejarens mått och vikt inmatas. Ytterligare parametrar som behövs är fallhöjd och effektivitet. Definition på effektivitet är:

$$\text{Effektiviteten} = \frac{\text{nettofallhöjden}}{\text{bruttofallhöjden}}$$

För en lindriven fallhejare kan effektiviteten variera mycket och är bl.a. förare- och maskinberoende. För en bra fungerande linhejare kan effektiviteten sättas till 0,5 och för en frifallshejare (Banut, Uddcomb, Junttan) till 0,8.

För lätta tryckluftshejare och hydraulhejare kan värden i TABELL 19 användas. I tabellen anges nominella värden för hejarna. Hejarnas effektivitet varierar dock kraftigt, dels beroende på hejarnas kondition, dels beroende på om hejarna träffar centriskt eller snett på pålarna.

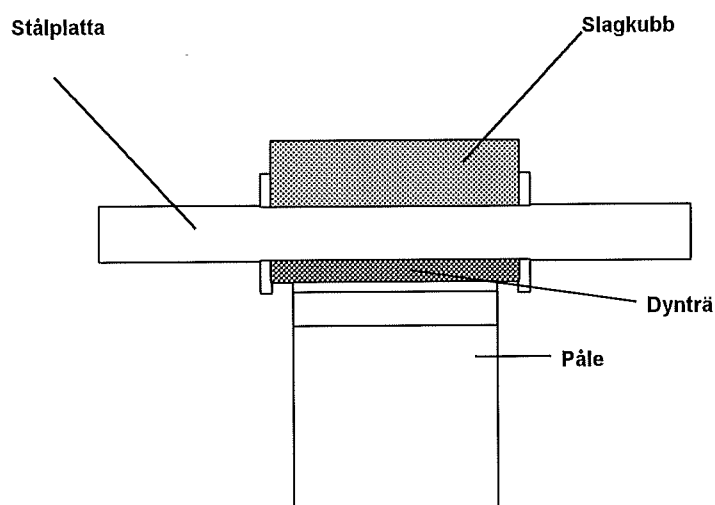
Om hejarna styrs väl mot pålarna, detta kräver normalt gejderstyrning, kan man räkna med en effektivitet av ca 70-80 % i förhållande till nominella värden.

För frihängande lätta hejare bör man ej räkna med en högre effektivitet än 30-50 %, beroende på att hejarna slår snett på pålarna.

Tabell 19. Data på några vanliga lufttryckshejare och hydraulhejare. Nominella värden på slagenergi och anslagshastighet [4].

	TOTAL HAMMER MASS KG	PISTON MASS KG	PISTON LENGTH MM	PISTON DIAMETER MM	PISTON ACOUSTIC IMPEDANCE KNS/M	PISTON STROKE MM	DRIVING FREQUENCY (NOMINAL) BLOW/MIN	ENERGY PER BLOW Nm	PISTON STRIKING VELOCITY M/S
HAMMER TYPE									
TEP 40	59	2.5	120	58	110	165	1140	120	9.8
TEP 100	180	12.6	320	80	210	140	660	180	5.2
PH 5	400	55	600	122	480	190	300	270	3.1
PH 180 K	820	116	720	162	850	210	330	850	3.6
PH 250 K	1700	295	990	220	1570	315	240	1850	3.5
MKT 3	305	31	905	75	180	146	400	480	5.5
MKT 5	680	91	864	131	550	178	300	1380	5.5
MKT 6	1315	181	864	184	1100	222	275	3460	6.1
MONTABERT 125	270	11.4	390	71	160		1000	800	11.8
MONTABERT 250	550	15	407	80	210		540	1400	13.7
KRUPP 200	400	24	530	86	240		650	800	8.2
KRUPP 600	650	56	727	112	410		480	1900	8.2

Dessa värden kan variera avsevärt på grund av hejarens kondition.



Figur 27. Principskiss dyna.

För dynan skall vikten insättas. Det är viktigt att från entreprenören få uppgift om mått och material för slagkubb, dynträ och dynans vikt.

Materialiet i slagkubben är ofta Azobé (ett tungt träslag) som har elasticitetsmodulen ca 5 000 MPa. Dynträet är ofta plywood med elasticitetsmodulen ca 200 MPa. Måttet på dynträet är samma som betongpålens medan måttet på slagkubben måste fås av pålentreprenören.

Vid lätta slagdon finns enbart en slagplatta utan kubb. Där kan plattans yta, tjocklek och tunghet insättas. Tyngden framräknas från måtten (vanligen 5 till 20 kg). Mätningar har visat att styvheten vanligen är 1 000-8 000 kN/mm. Detta värde kan insättas om måtten på slagplattan ej är tillgängliga.

7. Referenser

1. **BBK 79 (1989)**. Bestämmelser för betongkonstruktioner, 2 utg. Statens Betongkommitté. Svensk Byggtjänst, Stockholm.
2. **Bengtsson, P-E., Bengtsson, Å. & Fredriksson, A. (1991)**. Beräkning av dimensionerande bärförmåga för slagna pålar med hänsyn till pålmaterial och omgivande jord. IVA Pålkommissionen, Rapport 84. Linköping.
3. **Berglars, B., Hellman, L. & Iwanowski, T. (1989)**. Careful and controlled underpinning methods in restoration of damaged houses in the Old Town of Stockholm. International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings, Florens, 5-7 april, 1989 (opublicerat paper).
4. **Berglars, B., Hellman, L. & Rehnman, S-E (1984)**. Stålpålars bärförmåga och stoppslagningskrav. Bygg & Teknik, vol. 76, nr 7, pp 34-39.
5. **Bredenberg, H. & Hintze, S. (1990)**. beräkning av pålars last-rörelsesamband med utgångspunkt från sonderingsdata. IVA Pålkommissionen, Rapport 83. Stockholm.
6. **Byggvägledning 6:3. Geokonstruktioner (1990)**. En handbok i anslutning till Nybyggnadsregler NR 1. Svensk Byggtjänst. Sammanställd av Jan Wennerstrand. Stockholm.
7. **De Juhasz, K.J. (1942)**. Graphical analysis of impact of elastic bars. Journal of Appl. Mech. vol. 9, pp A122 - A128.
8. **De Saint-Venant, B. (1867)**. Mémoire sur le choc longitudinal de deux barres élastiques. Journal den Mathematiques, 2^e serie XII, pp 237-376.
9. **Eriksson, H. (1992)**. Behaviour of driven piles evaluated from stress wave measurements performed during dynamic probing. Doktorsavhandling, KTH, Jord- och Bergmekanik. Trita - JOB Report 92/3. Stockholm.
10. **Eriksson, H., Hellman, L., Nilsson, T. & Weiner, L. (1993)**. Påldimensionering med hjälp av stötvågsmätning vid hejarsondering - exemplet ny järnvägsbro över Öre älv. Bygg & Teknik, vol. 85, nr 8, p 12-17.
11. **Fischer, H.C. (1960)**. On longitudinal Impact I - VI. Applied Scientific Research 1959 - 1960, sect. A8-A9, 207 p.
12. **Flaate, K. & Selnes, P. (1977)**. Side friction of piles in clay. 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, July 1977. Proceedings, vol. 1, p 517-522.

13. **Fredriksson, A., Hultsjö, S. & Stille, H. (1989).** Systempålar. Stödpålar av höghållfasta, korrosionsskyddade stålrör, slagna med lätta höghastighetshejare. Anvisningar för beräkning av dimensionerande bärförmåga. IVA Pålkommisionen, Rapport 81. Stockholm.
14. **Glanville, W.H., Grime, G., Fox, E.N. & Davies, W.W (1938).** An investigation of the stresses in reinforced concrete piles during driving. Dept. of Scientific and Industrial Research, Building Research Tech. Paper No 20. London.
15. **Goble, G.G. & Rausche, F. (1976).** Wave equation analysis of pile driving, WEAP program. Vol. 1- 4, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Implementation Package IP 76-14.1-4. Washington, DC.
16. **Hellman, L. (1967).** Om stoppslagning av stödpålar. Byggnadskonst, vol. 59, nr 8, pp 431 - 437.
17. **Norsk Peleveiledning, 2 utg. (1991).** Den Norske Pelekomite i samarbeid med Norges Byggstandardiseringsråd, Oslo.
18. **Nybyggnadsregler (1989).** Föreskrifter och allmänna råd. Boverket BFS 1988:18, NR 1. Allmänna Förlaget. Stockholm.
19. **Pålgrundläggning (1993).** Statens geotekniska institut och Svensk Byggtjänst. Sammanställd av Olsson, C. & Holm, G. Solna.
20. **Rankka, K. (1991).** Friktionspålars bärförmåga och last/förskjutningssamband. IVA Pålkommisionen, Rapport 86. Linköping.
21. **Smith, E.A.L. (1960).** Pile driving analysis by the wave equation. ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, vol. 86, nr SM4, pp 35 -61.
22. **Svensk Byggnorm (1975).** SBN Godkännanderegler 1975:8. Pålar - regler för dimensionering samt för pålningens utförande. Statens Planverk. Liber Förlag. Stockholm.
23. **Typgodkännandebevis nr 3198/89.** Regler för betongpålar. Europile Pålteknik AB. Boverket.
24. **Vilander, L. (1969).** Ett program för beräkning av stötvågsförloppet vid friktionspålning. Delrapport II. IVA Pålkommisionen, Särtryck och Preliminära Rapporter, 17. Stockholm.
25. **Wikström, R., Aaltonen, L., Tirkkonen, O. & Berglars, B. (1992).** SIPT - grundundersökningsmetod korrelerar med slagpålning. 11:e Nordiska geoteknikermötet, Aalborg maj 1992. Dansk Geoteknisk Forening, DGF Bulletin 9, vol. 2, pp 295-300. Lyngby.