

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

GRÄVPÅLAR I FRIKTIONSJORD

Anvisningar för dynamisk förbelastning

Bo Berggren

Per-Evert Bengtsson

Stockholm 1985



rapport 77

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

GRÄVPÅLAR I FRIKTIONSJORD

Anvisningar för dynamisk förbelastning

Bo Berggren

Per-Evert Bengtsson

Stockholm 1985

Pris 115 :-

rapport 77

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sid
FÖRORD	3
1. INLEDNING	4
1.1 Anvisningarnas omfattning	4
1.2 Anvisningarnas status	4
1.3 Gällande norm	4
1.4 Definitioner	4
1.5 Beteckningar	6
1.6 Metodbeskrivning	8
1.6.1 Allmänt	8
1.6.2 Planering	8
1.6.3 Utförande	10
2. PLANERING	12
2.1 Geoteknisk undersökning	12
2.2 Bedömning av möjligheter, fördelar och begränsningar för metoden	12
2.3 Preliminär dimensionering	13
2.3.1 Allmänt	13
2.3.2 Utan dynamisk förbelastning	13
2.3.3 Med dynamisk förbelastning	19
3. UTFÖRANDE	21
3.1 Schaktning	21
3.2 Slutlig dimensionering	22
- Val av pålspetsnivå	
- Krav vid packning	
- Slutlig fallhöjd	
- Antal slag per fallhöjd	
- Krav vid beordring av ny fallhöjd	
- Antal kontrollmätningar	
3.3 Packning	23
3.4 Gjutning	27
4. UTRUSTNING	27
4.1 Packningsutrustning	27
4.2 Mätutrustning	27
5. EXEMPEL	30
5.1 Beskrivning av projektet	30
5.2 Tillåten sättningsdifferens	30
5.3 Geoteknisk undersökning	30
5.4 Preliminär dimensionering	30
5.4.1 Utan dynamisk förbelastning	30
5.4.1.1 Tillåten mantellast	31
5.4.1.2 Tillåten spetslast	32
5.4.2 Med dynamisk förbelastning	34
5.4.2.1 Tillåten mantellast	34
5.4.2.2 Tillåten spetslast	34

5.5	Lastintervall	37
5.6	Grävning	37
5.7	Dynamisk förbelastning	37
5.8	Val av påspetsnivåer	41
5.9	Krav vid dynamisk förbelastning	41
5.10	Bedömning av slutlig fallhöjd	42
5.11	Antal slag per fallhöjd	42
5.12	Krav vid beordring av ny fallhöjd	43
5.13	Antal kontrollmätningar	44
6.	LITTERATUR	45

FÖRORD

Dessa anvisningar har skrivits för att tekniken med dynamisk förbelastning för grävpålar i friktionsjord ska kunna utnyttjas och tolkas mer allmänt. Tekniken är komplicerad och trots att stor möda har lagts ned på förklarande text kan det finnas partier som för den som inte trängt in i problematiken kan te sig svårbegripliga.

Dynamisk förbelastning av friktionsjord i botten av det grävda hålet för en grävpåle innebär normalt en kraftig ökning av den tillåtna lasten beräknad enligt schablonmetoden i Grävpålanvisningar. Därigenom behöver man inte gräva så djupt för upptagande av de laster som påförs pålarna. STU har inom området "Grundläggningsteknik i tätort" stött utvecklingen av en produktionsanpassad utrustning för dynamisk förbelastning. Den största delen av utvecklingen har Stabilator AB bekostat.

Anvisningarna som remissbehandlats inom Pålkommissionen har skrivits av Statens geotekniska institut på uppdrag av Stabilator AB. Under utredningsarbetet har värdefulla råd och kommentarer lämnats av följande personer

Civ ing Bo Alte, Bo Alte AB
Tekn dr Sture Eresund, SKANSKA
Prof Sven Hansbo, Chalmers Tekniska Högskola
Tekn dr Jan Hartlén, Statens geotekniska institut
Tekn dr Lars Hellman, Statens geotekniska institut
Civ ing Björn Lundahl, Stabilator AB
Civ ing Erling Magnusson, Stabilator AB
Tekn lic Ove Magnusson, SKANSKA
Civ ing Ture Olofsson, Vägverket
Tekn lic Sven-Erik Rehnman, Tekniska Högskolan

Januari 1985

Bo Berggren
Tekn dr SGI

Per-Evert Bengtsson
Civ ing SGI

1. INLEDNING

1.1 Anvisningarnas omfattning

Anvisningarna omfattar planering, utförande och kontroll av dynamisk förbelastning för grävpålar i friktionsjord.

1.2 Anvisningarnas status

I Svensk Byggnorm 1980 (SBN -80) hänvisas till "Grävpålanvisningar. Dimensionering, utförande och kontroll av grävda i jorden gjutna pålar", IVA Pålkommisionen Rapport nr 58.

I Grävpålanvisningarna omnämns metoden "Dynamisk förbelastning". Föreliggande anvisningar är ett komplement till Grävpålanvisningarna.

1.3 Gällande norm

Svensk Byggnorm 1980 (SBN -80).

1.4 Definitioner

Förutom de definitioner som anges i Tekniska Nomenklaturcentralens ordlista TNC 59 och i Grävpålanvisningar gäller här följande definitioner.

Kvalitetskontroll, fullständig packningskontroll, utförs i 5-10% av grävpålarna. För varje stöt mäts och beräknas samt redovisas kvarvarande sjunkning, maximal sjunkning, kontakttryck mellan packningsutrustning och jord, förskjutning under stöt samt skjuvmodul.

Utförandekontroll, förenklad packningskontroll. För varje stöt mäts och beräknas samt redovisas kvarvarande sjunkning och maximal sjunkning.

Lastintervall. Om pållasterna i ett objekt varierar mycket indelas pålarna i lastintervall (maximalt 4) för bättre överblick.

Arbetsnivå. Grävpålearbeten kan utföras från annan nivå än pålavskärningsnivå.

Packningsutrustning. Till den dynamiska förbelastningen erfordras en specialutrustning.

Pålspetsnivå, pålspetsens nivå.

Preliminär dimensionering, dimensionering som utförs på basis av geoteknisk undersökning, (spetstrycksondering och/eller hejarsondering, provtagning m m).

Spetstrycksondering, sondering med kontinuerlig registrering av kraften som erfordras att neddriva en 10 cm^2 spets med konstant hastighet (ca 20 mm/sek).

Slutlig dimensionering, dimensionering som görs med ledning av resultatet av packningen i det första grävpåleläget samt den geotekniska undersökningen.

Kvarvarande sjunkning. Vid packningen beräknas eller mäts för varje stöt den sjunkning som kvarstår efter stöten.

Maximal sjunkning. Vid packningen beräknas eller mäts för varje stöt den maximala sjunkningen under stöten.

Plasticeringskvot, kvoten av kvarvarande sjunkning och maximal sjunkning.

Mätutrustning. För mätning, beräkning och lagring av mät- och beräkningsdata erfordras en speciell mätutrustning vid kvalitetskontroll. Vid utförandekontroll kan mätutrustningen vara betydligt enklare.

1.5 BETECKNINGAR

C_u	graderingstal ($=d_{60}/d_{10}$)
D	påles diameter
F_m	säkerhetsfaktor på påles mantelbärförmåga
f, f_i	mantelfriktionsfaktor
F_s	säkerhetsfaktor på spetslast
G	skjuvmodul
G_0	erforderlig statisk skjuvmodul
G_{stat}	statisk skjuvmodul beräknad ur stöt
H	jordlagers tjocklek
h	fallhöjd
K_1, K_2	koefficienter
k_z	djupfaktor
L_1	påles längd i bärande jordlager
N_{sd}, N_s	dimensioneringsparameter
ΔN_s	tilläggsbelopp till dimensioneringsparameter efter dynamisk förbelastning
N_{ht}	antal halvvarv för 20 cm sjunkning vid viktsondering
N_{20}	antal slag för 20 cm sjunkning vid hejarsondering metod A
N_{30}	antal slag för 30 cm sjunkning vid SPT
P_0	erforderlig pållast
P_m	tillåten mantellast
P_s	påles spetslast
P_{dyn}^{max}	maximal dynamisk kraft under stöt
p_{mf}	kritisk mantelspänning
p_{sf}	kritisk spänning vid pålspets
p_{stat}^{max}	statiskt kontakttryck som ger samma sättning som vid maximal dynamisk kraft under stöt

q_c	spetstryck vid spetstrycksondering
s, s_1, s_2	sättning, sjunkning
s_f	sättning vid kritisk spänning vid påspets
s_{till}	tillåten sättning
s_{rest}	kvarvarande sjunkning efter stöt
s_{max}	maximal sjunkning under stöt
t_0	tid från nollkraft till maximal kraft vid stöt
v_s	skjuvvågs utbredningshastighet
α	faktor
ρ	densitet
μ	koefficient som tar hänsyn till jordens tidberoende deformationer ($= \frac{p_{dyn}}{p_{stat}}$ vid lika sättning)
v	kontraktionstal

1.6 Metodbeskrivning

1.6.1 Allmänt

- Schaktning för grävpålar utförs inom arbetsrör och, om så erfordras, under vatten till en förutbestämd nivå. Schaktbotten avjämnas varefter den bearbetas med stötar från en packningsutrustning. Med hjälp av en mätutrustning kan packningsproceduren kontrolleras, dokumenteras och analyseras så att ett mått på styvheten i jorden erhålls. När jordens styvhet uppnått ett, med hänsyn till byggnaden, uppställt krav avbryts packningen och pålen gjuts.
- Avsikten med packningen av friktionsjorden i pålbotten är att öka tillåten last på grävpålen.
- Vanligt är att jordens styvhet ökar, i löst lagrad friktionsjord upp till 5 à 10 ggr relativt beräknat värde enligt schablonmetoden i Grävpålanvisningarna.
- Bärförmågan (brottlasten) för pålspetsen ökar normalt 2 à 5 ggr relativt beräknat värde enligt schablonmetoden i Grävpålanvisningarna.

1.6.2 Planering

Med hjälp av information från geoteknisk undersökning, uppgifter om laster och sättningskrav bedöms om dynamisk förbelastning är lämplig och kan utnyttjas med hänsyn till de geotekniska förhållandena.

En preliminär dimensionering görs med följande ingångsvärden

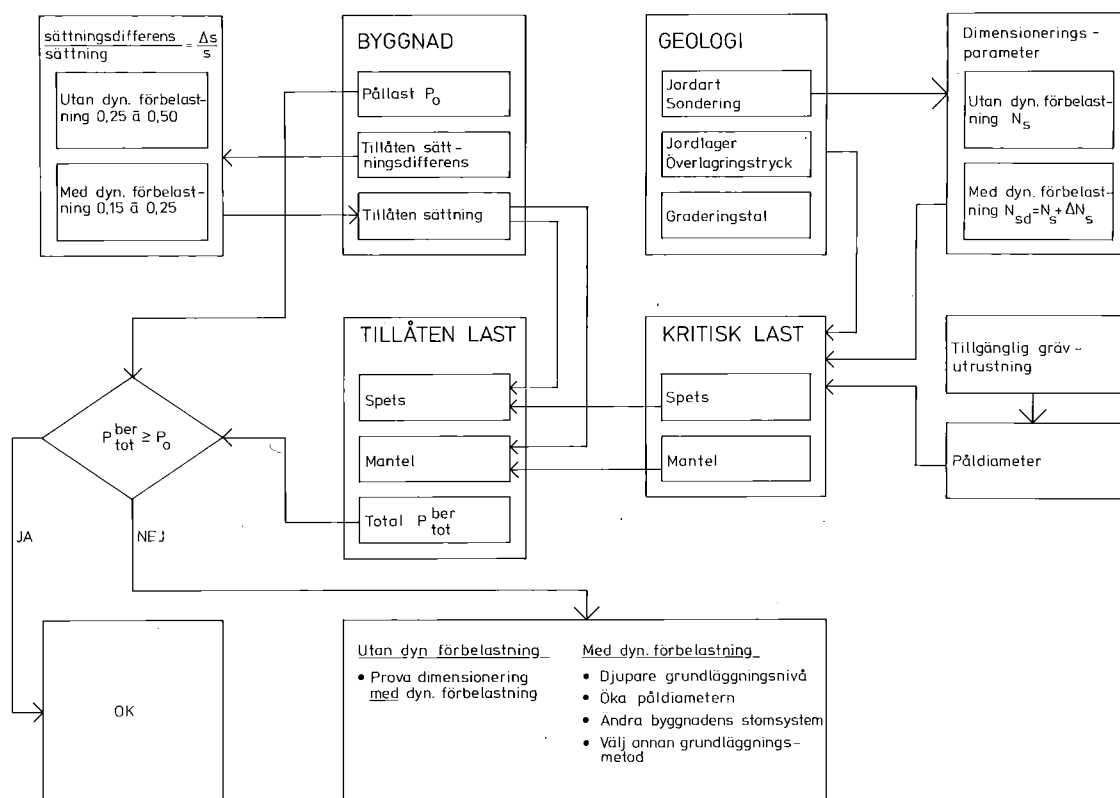
- Laster från överbyggnaden
- Antal pålar
- Tillåten sättning och sättningsdifferens
- Jordart i pålspetsnivå
- Jordens styvhet i pålspetsnivå

I FIGUR 1 finns ett principschema som visar hur den preliminära dimensioneringen tillgår.

Om pållasterna varierar mycket bör pålarna indelas i lämpligt antal lastintervall (maximalt 4) för att få en bättre överblick av grundläggningsarbetena.

Uppgifter om laster från överbyggnaden och tillåten sättning och sättningsdifferens hos byggnaden ger krav på erforderlig styvhet (skjuvmodul) hos jorden.

Preliminär arbetsritning upprättas med angivande av antalet pålar, pålmeter, pålspetsnivåer och erforderlig styvhet (skjuvmodul).



FIGUR 1. Principschema över preliminär dimensionering av grävpålar.

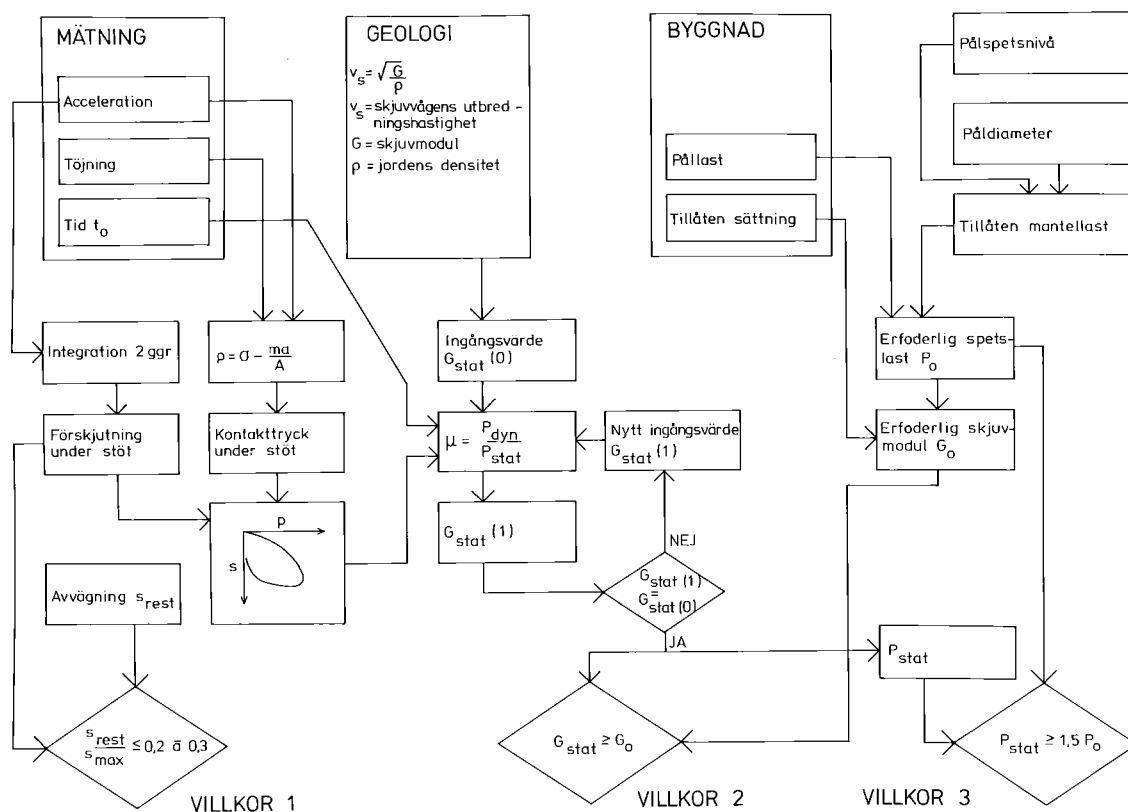
1.6.3 Utförande

Dynamisk förbelastning med fullständig mätning av packningsproceduren, kvalitetskontroll, utförs i ett antal representativa lägen, 5-10% av antalet grävpålar.

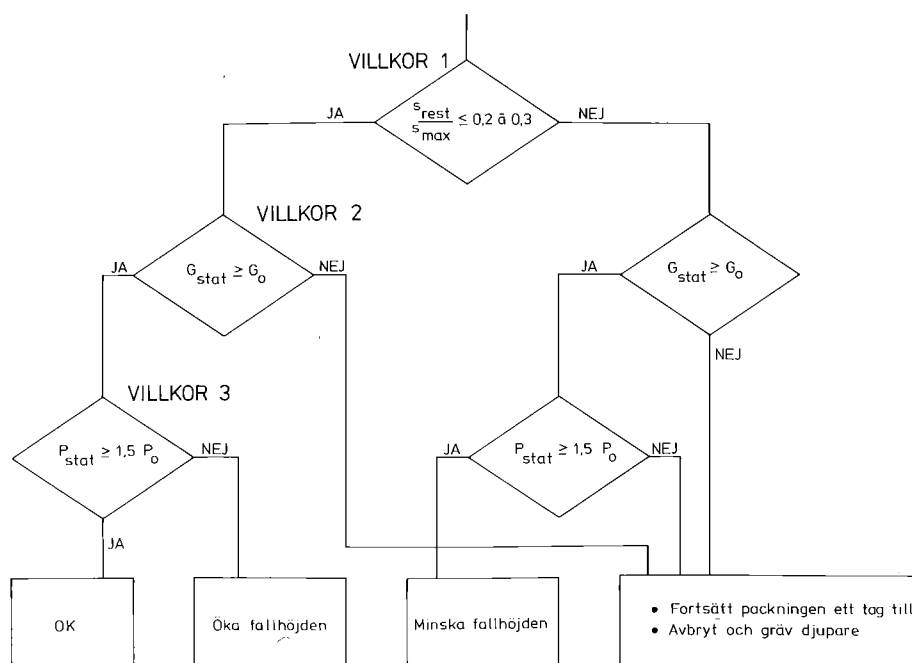
Packningsarbetet ska inledas där pållasten är störst (normalt lägsta pålspetsnivån) vilket ger möjlighet att inledningsvis undersöka jorden på några olika nivåer. Resultatet av packningen i det första grävpåleläget kan föranleda revidering av upprättad preliminär arbetsritning.

Resultatet av packningen med utförd kvalitetskontroll ger underlag för förenklad packningskontroll, utförandekontroll, i resterande pållägen.

Packningsresultatet och de krav som gäller för respektive påle beträffande last och sättning styr en packningsprocess enligt schemat i FIGUR 2 och FIGUR 3.



FIGUR 2. Principschema över packningsprocessen och dess villkor.



FIGUR 3. Villkor vid packningen (fortsättning på FIGUR 2). Det ska observeras att VILLKOR 3 är ett sätt att kontrollera brottsäkerheten, men att VILLKOR 3 endast behöver kontrolleras i resp jordlager där maximal packning utförs.

2. PLANERING

2.1 Geoteknisk undersökning

Omfattning enl Grävpålanvisningar. Sedan Grävpålanvisningar skrevs (1979) har spetstrycksondering blivit vanligare. Enligt Grävpålanvisningar rekommenderas att sonderingar utförs med två olika metoder. Utvecklingen har visat att i första hand bör spetstrycksondering väljas och i andra hand hejarsondering (HfA), men jordens fasthet kan vara så stor att spetstrycksondering med nuvarande utrustningar omöjliggörs.

Vid den geotekniska undersökningen ska jordprover tas för laboratorieundersökning (siktning, kompressionsprovning m m).

2.2 Bedömning av möjligheter, fördelar och begränsningar för metoden

Syftet med dynamisk förbelastning är att förbättra och/eller uppmäta jordens deformationsegenskaper. I en redan mycket fast jord kan deformationsegenskaperna ej praktiskt förbättras.

I sandiga och grusiga jordar är metoden lämplig medan den ej fungerar i lera. I mellanjordarten silt kan uppkomsten av höga portryck vid vattenmättnad leda till att packning omöjliggörs.

Om skredfara och risk för stor och/eller varaktig portrycksförhöjning föreligger kan metoden vara skredutlösande.

I löst lagrad friktionsjord bör metoden ej utan stor försiktighet och kontrollmätningar användas omedelbart intill sättningskänsligt grundlagda grannbyggnader inom en zon som bildas av en linje i lutning 1:1 från pålspetsen.

De markvibrationer som alstras av packningen och sprids till markytan är små eftersom de normalt alstras på ett stort djup relativt ytlig packning. Däremot kan något större markvibrationer alstras av själva grävmaskinen om den inte är spårbunden. Det har aldrig observerats att för byggnader skadliga vibrationer uppstått.

Ljudnivån vid grävpålarbeten är låg såvida inte drivningen av arbetsröret sker med fallvikt. I ljudkänsliga områden (bostadsområden, sjukhusområden) avråds från användning av neddrivning med fallvikt. I stället väljs neddrivning genom tryck och vridning.

2.3 Preliminär dimensionering

2.3.1 Allmänt

Syftet med den preliminära dimensioneringen är att bedöma maximalt tillåten belastning för olika pålspetsnivåer med och utan dynamisk förbelastning. Slutprodukten är ett anbudsunderlag med antal grävpålar och pålmeter samt nivåer för samtliga pålar.

Vid den preliminära dimensioneringen förutsätts att antalet lastnedföringspunkter och lasternas storlek är kända. Indelning görs i 1-4 lastintervall.

Kännedom erfordras om tillåten sättning och sättningsdifferens för byggnad. Erfarenheten visar att sättningsdifferensen vid grävpålar där dynamisk förbelastning ej utförts kan förutsättas vara 25-50% av maximal sättning. Den dynamiska förbelastningen syftar i första hand till att öka jordens styvhet och bärförmåga men också att utjämna ojämnheter i undergrunden. Efter dynamisk förbelastning kan sättningsdifferensen därför förutsättas vara 10-25% av maximal sättning. Om exempelvis tillåten sättningsdifferens i ett objekt är 5 mm kan tillåten sättning utan dynamisk förbelastning ansättas till 10-20 mm och efter dynamisk förbelastning 20-50 mm.

2.3.2 Utan dynamisk förbelastning

Dimensionering sker enligt den schablonmetod som finns angiven i Grävpålanvisningarna. I FIGUR 4-7 anges erforderliga dimensioneringsdiagram. Beräkningen kan genomföras enligt följande:

- a. Först beräknas den last som kan upptas via manteln i respektive jordlager på platsen för några typfall. Mantelbärförmågan kan beräknas med hjälp av FIGUR 7 som bygger på Grävpålanvisningarna. Sedan Grävpålanvisningarna utkom 1979 har en godtagbar alternativ metod presenterats i SGI Rapport nr 26. Beräkningsmetoden är följande. Tillåten mantellast är

$$P_m = p_f \pi D L_1 \frac{1}{F_m}$$

där L_1 = pålens längd i bärande jordlager

D = pålens diameter

F_m = säkerhetsfaktor

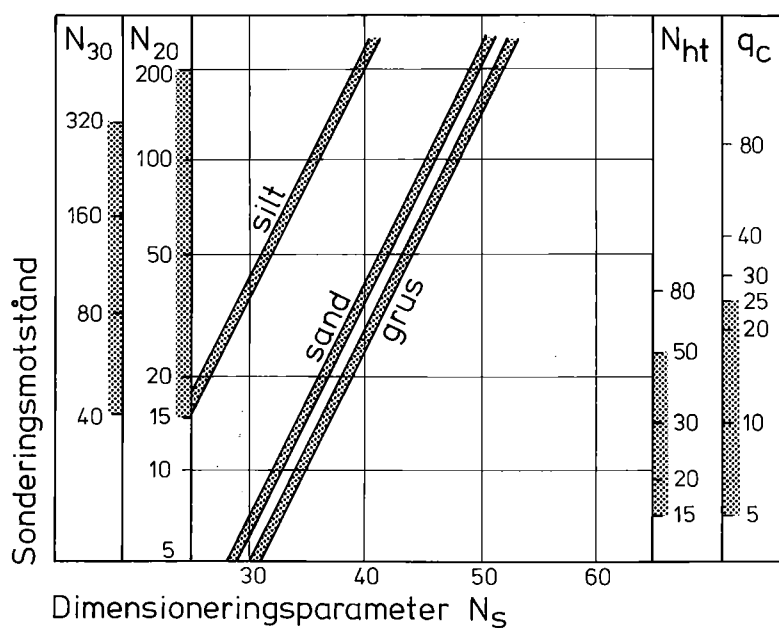
$$p_f = \frac{1}{L_1} \frac{1}{f_i} q_{ci} H_i$$

där f_i = faktor enligt FIGUR 8

q_{ci} = spetstryck i deljordlager "i"

H_i = tjocklek hos deljordlagret "i"

Det gäller att $\sum H_i$ eller $L_1 < 10 D$ samt att i sedimentär jord



FIGUR 4. Samband mellan sonderingsmotstånd och dimensioneringsparametern N_s

N_{30} = antal slag för 30 cm sjunkning vid SPT

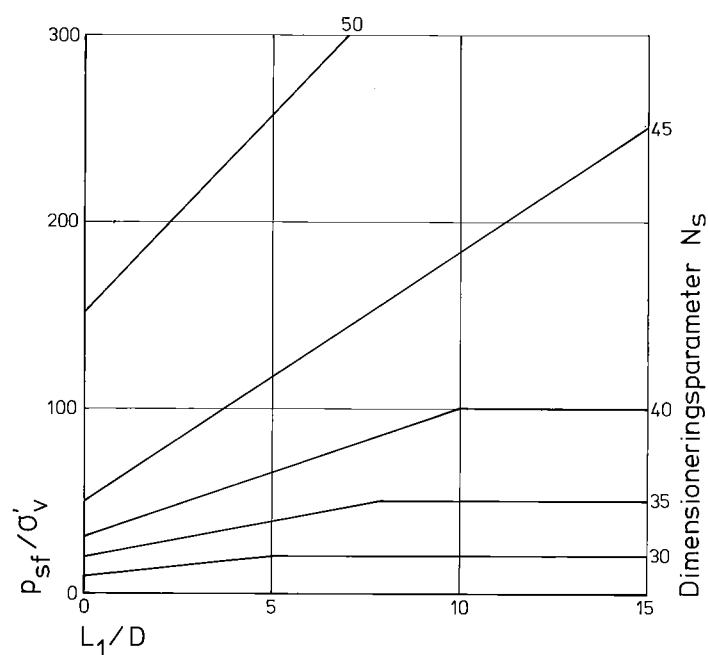
N_{20} = antal slag för 20 cm sjunkning vid hejarsondering metod A

N_{ht} = antal halvvarv för 20 cm sjunkning vid viktsondering

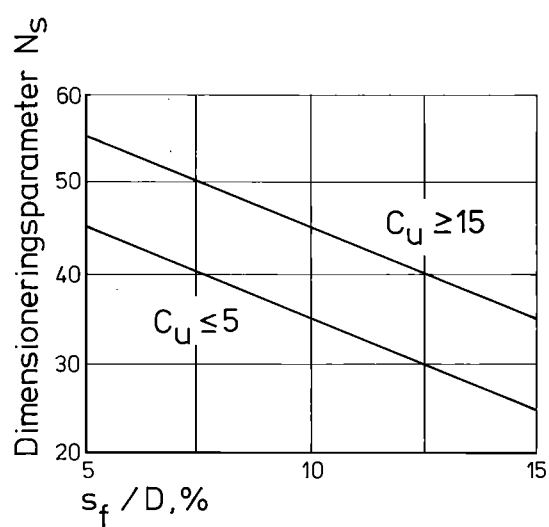
q_c = spetstryck i MPa vid trycksondering

Skraffering för resp sonderingsmetod anger lämpligt giltighetsområde.

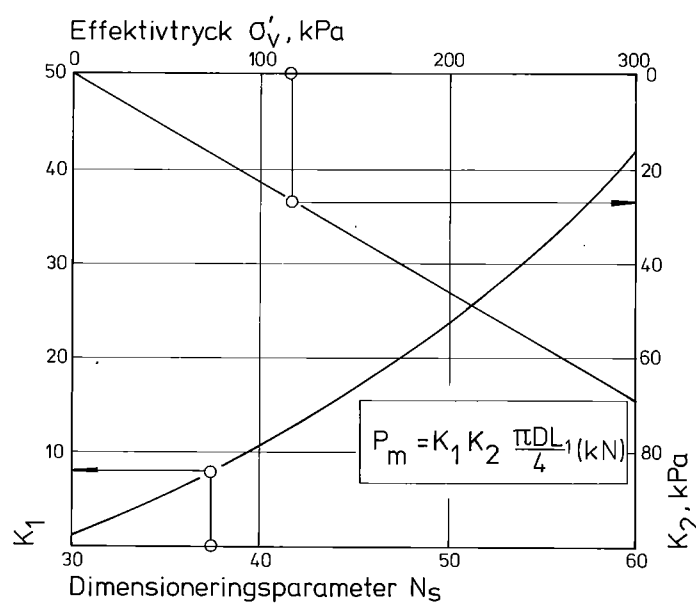
För månggraderad jord är N_s 5-10 enheter högre. Jorden får dock ej vara språnggraderad. För finjordsrik bottenmorän kan man utgå från sandkurvan med eventuellt tilllägg för månggradering.



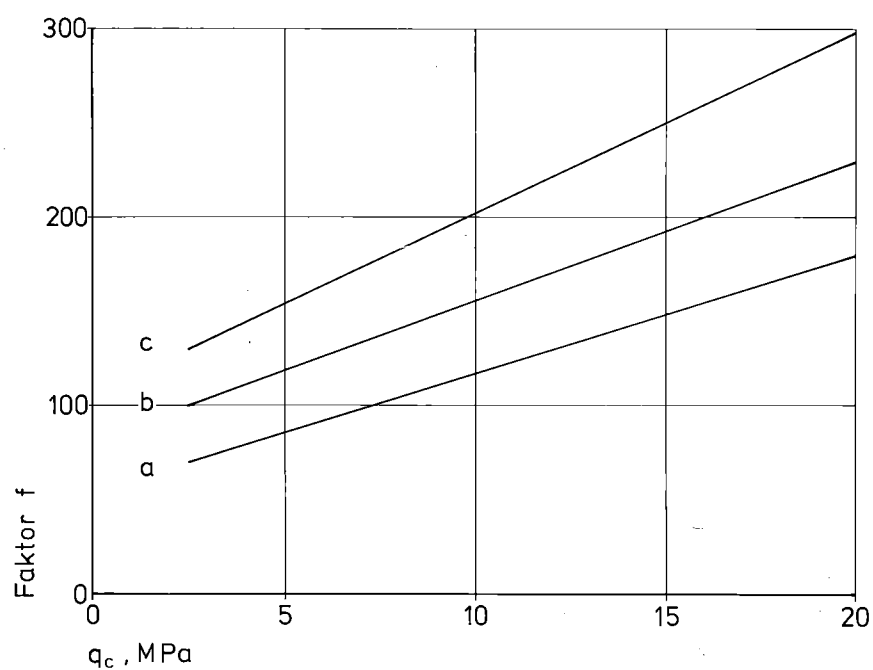
FIGUR 5. Samband mellan kritisk spänning vid spets p_{sf} , effektivt överlagringstryck vid pålspets σ'_v , inträngningsdjup i bärande jordlager L_1 och påldiameter D för olika värden på dimensioneringsparametern N_s .



FIGUR 6. Samband mellan sättning vid kritisk spänning s_f och påldiameter D vid olika värden på dimensioneringsparametern N_s och graderingstal C_u .



FIGUR 7. Diagram för beräkning av tillåtet mantelmotstånd p_m , uttryckt som last per tvärsnittsytta hos pälén. Figuren gäller för $L_1/D < 10$.



FIGUR 8. Faktorn f som funktion av spetstrycket q_c .

- a = grus
- b = sand
- c = finsand, siltig sand

$$\frac{1}{f_i} q_{ci} < \begin{array}{ll} 110 \text{ kPa} & - \text{ grus} \\ 90 \text{ kPa} & - \text{ sand} \\ 70 \text{ kPa} & - \text{ finsand, siltig sand} \end{array}$$

Om q_c ej är känd kan tolkat värde med ledning av annan sonderingsmetod enligt FIGUR 4 användas.

Säkerhetsfaktorn F_m väljs till 1,3.

Mantelbärförmågan kan antas ha uppnåtts efter 10 mm förskjutning.

Hänsyn tas i förekommande fall till negativ mantelfriktion.

- b. Därefter beräknas tillåten spetslast för tillåten sättning och sättningsdifferens t_{ex} enl schablonmetoden i Grävpålanvisningarna. Sättningsdifferensen kan enligt sid 13 ovan förutsättas vara 25-50% av maximal sättning. Beräkningen görs för samma typfall som i punkt a ovan och på några nivåer i varje jordlager. Hänsyn till varierande sonderingsmotstånd görs enligt Grävpålanvisningarna genom att ett medelvärde beräknas inom zonen 3 D under spetsen. Alternativt kan utjämning av tillåten spetslast göras enligt principen i FIGUR 9.

En godtagbar alternativ beräkningsmetod är följande. Tillåten spetslast för tillåten sättning beräknas med hjälp av uttrycket

$$P_s = k_z \cdot \frac{2}{1-\nu} s_{till} D q_c$$

där q_c = spetstryck vid spetstrycksondering under pålspets

s_{till} = tillåten sättning

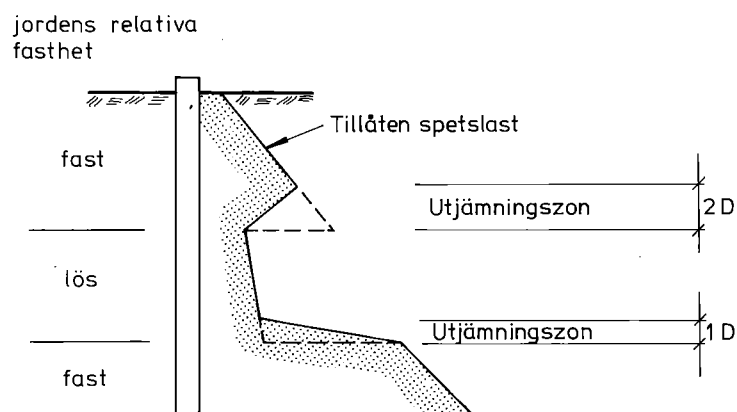
D = påldiameter

k_z = koefficient som tar hänsyn till pålens inträngningslängd i bärande jordlager, se FIGUR 10

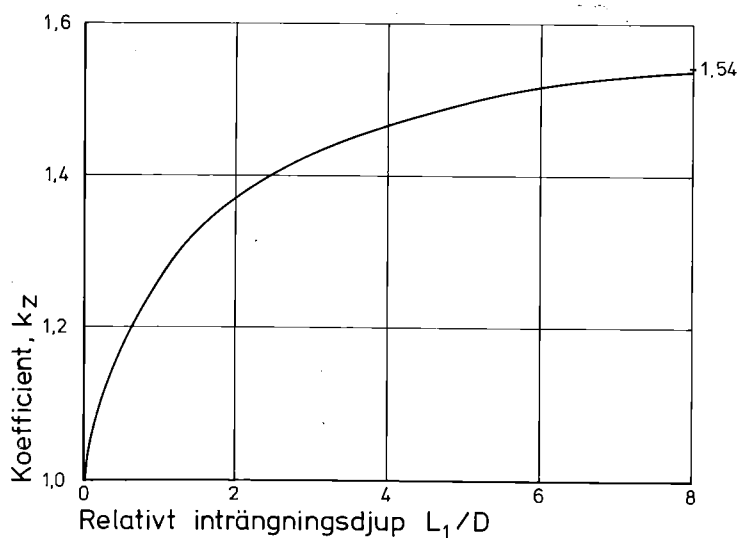
ν = jordens kontraktionstal, i friktionsjord antas normalt $\nu = 0,3$.

Uttrycket ovan bygger på att $E = 2 \text{ à } 4 q_c$, dvs $q_c \approx G$ (skjuvmodulen).

För beräkningen gäller att $s_{till} < \frac{s_f}{3}$ där s_f är sättningen vid kritisk spänning, se FIGUR 6.



FIGUR 9. Utjämnning av tillåtet spetstryck i övergångszoner mellan jordlager med olika fasthet.



FIGUR 10. Koefficienten k_z som funktion av relativt inträngningsdjup L_1/D .

2.3.3 Med dynamisk förbelastning

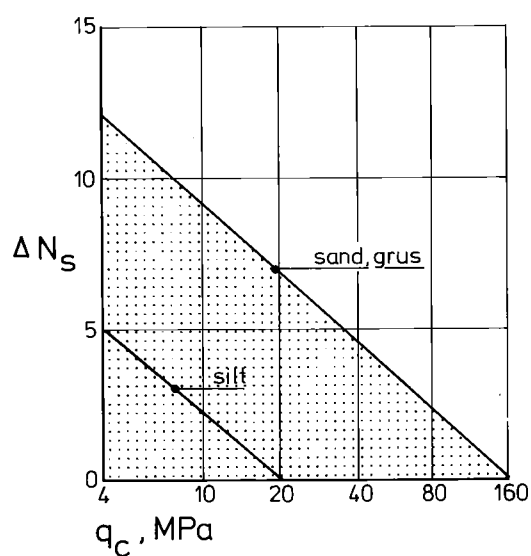
Baserat på den geotekniska undersökningen kan en bedömning göras av spetsbärförmåga och tillåten belastning med hänsyn till tillåten sättning och sättningsdifferens efter att dynamisk förbelastning utförts. Bedömningen tillgår på följande sätt:

- a. Beräkningen av mantelbärförmågan sker på samma sätt som i kapitel 2.3.2.
- b. I FIGUR 11 anges den maximala ökningen, ΔN_s , av dimensioneringsparametern N_s som kan bedömas erhållas efter dynamisk förbelastning i silt, sand eller grus, där spetsstrycket vid trycksondering uppmätts till q_c vid den geotekniska undersökningen. Interpolering får göras i figuren. Spetsbärförmågan för en grävpåle beräknas därefter enligt schablonmetoden i Grävpålanavisningar med det höjda värdet, $N_{sd} = N_s + \Delta N_s$, på dimensioneringsparametern som ingångsvärde. Om friktionsjorden är månggraderad ska N_s -värdet enligt Grävpålanavisningarna ökas med 5 à 10 enheter.

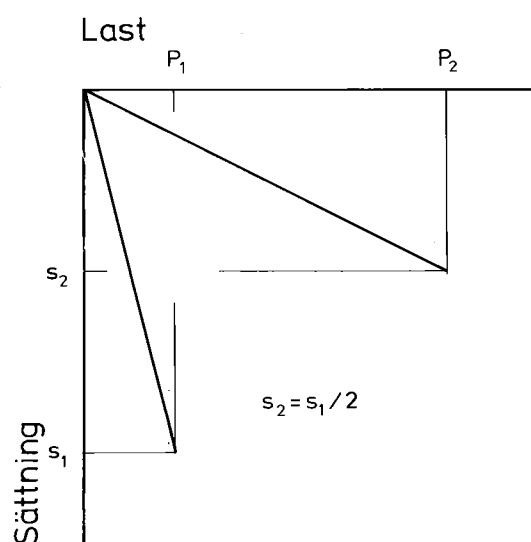
Efter dynamisk förbelastning ökar jordens styvhet. Sättningen vid uppnådd bärförmåga efter dynamisk förbelastning i sand och grus kan ansättas vara hälften av sättningen vid uppnådd bärförmåga utan dynamisk förbelastning, se FIGUR 12. Den tillåtna spetslasten begränsas också med hänsyn till tillåten sättningsdifferens, vilken kan förutsättas vara 15 à 25% av tillåten sättning.

Om schaktbotten vid grundläggning i silt "tätas" gäller figuren även för silt, i annat fall antas ingen ändring erhållas av jordens styvhet, se sid 26. "Tätning" (vid schakt under vatten) kan göras genom utstansning av makadam eller jordfuktig/torr betong i botten.

- c. Tillåten spetslast och mantellast summeras. Lämplig pålspetsnivå väljs med hänsyn till pållaster och jordlagerförhållanden.
- d. En förslagsritning upprättas där antal pålar och pålmeter anges samt för vilka pålar som kvalitetskontroll ska utföras (5-10% av pålarna) och i vilken ordning. Packningsarbetet bör normalt påbörjas i den punkt där största pållasten förekommer. Uppgifter om erforderlig packningsinsats (fallhöjd, antal slag) anges ej.



FIGUR 11. Ökning ΔN_S av dimensioneringsparametern N_S efter dynamisk förbelastning i grus, sand och silt.



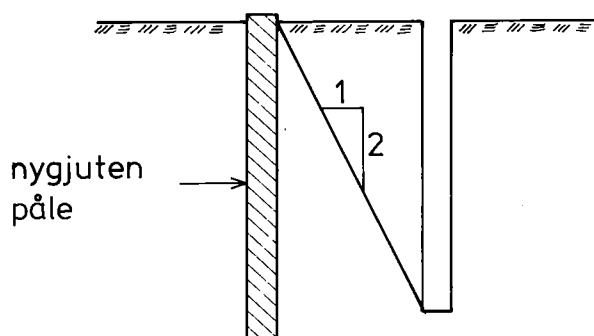
FIGUR 12. Diagram för beräkning av sättning efter dynamisk förbelastning i sand.

P_1, s_1 = kritisk last resp sättning utan dynamisk förbelastning

P_2, s_2 = kritisk last resp sättning efter dynamisk förbelastning.

Vid entreprenörens planering av arbetsordningen bör hänsyn tas till följande.

- o Packning för grävpåle bör ej utföras inom ett område som bildas av en linje i lutning 2:1 räknat från botten av nygjuten grävpåle under förutsättning att betongmassan börjat härda och tryckhållfastheten är mindre än 6 MPa, se FIGUR 13.



FIGUR 13. Krav vid packning intill nygjuten påle. Packning får ej göras om betongen börjat härda och tryckhållfastheten är mindre än 6 MPa.

3. UTFÖRANDE

3.1 Schaktning

Se Grävpålanvisningar. Om risk för bottenuppluckring föreligger utförs schaktningen under vatten. Bottenuppluckring skadlig för påles funktion kan erhållas i följande fall vid schaktning för grävpåle där vatten pumpas ur det grävda hålet

- jorden består av skikt med väsentligt olika permeabilitet ("tätskikt"/"permeabla skikt")
- jordens struktur är sådan och permeabiliteten så hög att finmaterial strömmar med vattnet in i det grävda hålets botten (s k "piping").

Efter avslutad schaktning avjämnas schaktbotten med skopan eller genom påfyllning med månggraderad grov friktionsjord, dock ej mer än att botten ligger högst $D/2$ över arbetsrörets underkant (D =arbetsrörets diameter).

I samband med grävningen tas jordprover för att bedöma jordart och för eventuella kompressionsprovningar i laboratorium.

Protokoll förs enligt Grävpålanvisningar.

3.2 Slutlig dimensionering

Vanligtvis delas grävpålarna in i 1-4 lastintervall för varje objekt. Den första grävpålen utförs där pållasten är störst. I detta läge utförs packningsarbete på olika nivåer. Den översta nivån motsvarar normalt en grävpåle inom det lägsta lastintervallet.

Resultatet från packningen i det första pålläget används för att planera utförandet (slutlig dimensionering) och verifiera eller revidera den preliminära arbetsordningen. Den slutliga dimensioneringen kan indelas i steg:

- Val av pålspetsnivå
- Krav vid packning
- Slutlig fallhöjd
- Antal slag per fallhöjd
- Krav vid beordring av ny fallhöjd
- Antal kontrollmätningar

Val av pålspetsnivå

Valet av pålspetsnivå är beroende av

- tillåten last
- sättningskrav
- krav på rimlig packningsinsats

Grävningen ger kunskap om förekommande jordarter vilket kan föranleda revidering av beräknad mantelbärförmåga. Tillåten last och beräknad mantelbärförmåga bestämmer vilken tillåten spetslast som krävs. Resultatet av packningen i det första pålläget kan medföra att spetsnivån kan höjas, dvs den dynamiska förbelastningen ger bättre resultat än vad som erhålls vid den preliminära dimensioneringen.

Krav vid packning

Sedan pålspetsnivå bestämts formuleras vilka krav på styvhet som ska ställas vid den dynamiska förbelastningen. Detta sker i form av krav på utvärderad statisk skjuvmodul och statiskt kontakttryck.

Slutlig fallhöjd

Resultatet från packningen i det första grävpåleläget ger besked om vilken slutlig fallhöjd som erfordras för att

uppfylla kravet på statisk skjuvmodul och statistiskt kontaktryck på vald pålspetsnivå. Avsikten är att resultatet från packning i det första grävpåleläget ska användas på motsvarande pålspetsnivå.

Antal slag per fallhöjd

Packningen i det första grävpåleläget ger också svar på hur många slag som behövs för att uppfylla kravet att plasticeringskvoten s_{rest}/s_{max} är mindre än 0,2 à 0,3, jämför sid 28.

Krav vid beordring av ny fallhöjd

Vid dynamisk förbelastning med utförandekontroll erfordras kriterier för när ny fallhöjd ska beordras eller förbelastningen kan avslutas. Uppgift om gränsvärden av kvarvarande sjunkning (s_{rest}) resp plasticeringskvot (s_{rest}/s_{max}) för olika laster utgör sådana uppföljningskriterier.

Resultatet från packningen i det första grävpåleläget med kvalitetskontroll ger information om dessa gränsvärden.

Antal kvalitetskontroller

För att dokumentera att valt utförande uppfyller de krav som ställts bör man för en viss andel av grävpålarna utföra kvalitetskontroll i samband med den dynamiska förbelastningen. Det är rimligt att 5-10% av grävpålarna kontrolleras med tonvikten på de högbelastade grävpålarna. Resterande pålar kontrolleras med utförandekontroll.

3.3 Packning

En av de faktorer som väsentligen beskriver verkan av packningen är den s k plasticeringskvoten s_{rest}/s_{max} , dvs kvoten av kvarvarande och maximal sjunkning under en stöt. En minskande kvot vid konstant fallhöjd innebär att jorden är deformationshårdnande och beter sig alltmer elastiskt.

Naturligtvis är även storleken på s_{rest} och s_{max} av betydelse för tolkningen av packningsarbetet.

En annan viktig faktor är uppkommande portryck, speciellt i finkornig friktionsjord där portrycksavgången är långsam. I sådan jord är det viktigt att belastningscyklerna inte kommer i för tät följd utan att möjlighet ges till portrycksavgång.

Deformationshastigheten vid packningen måste begränsas så att spänningarna i jorden under fundamentet hinner öka i takt med trycket mot basytan. En låg deformationshastighet vid packningen påverkar gynnsamt sättningsförloppet vid efterföljande statisk belastning.

Slutsatsen blir att den dynamiska förbelastningen bör utföras i stegvis ökande belastningsnivåer så att plasticeringskvoten s_{rest}/s_{max} minskar under varje steg.

Exempelvis kan följande fallhöjdsserie väljas: 0,2 m - 0,5 m - 1,0 m - 2,0 m - 4,0 m.

Kriterier för ökning av fallhöjd vid kvalitetskontroll är

- o plasticeringskvot $\frac{s_{rest}}{s_{max}} < 0,2 \text{ à } 0,3$
 där s_{rest} = kvarvarande sjunkning under en stöt
 s_{max} = maximal sjunkning under en stöt
- o beräknad skjuvmodul G_{stat} är mindre än erforderlig G_0 men går mot ett gränsvärde.

Packningen avslutas när $G_{stat} \geq G_0$

samt i jordlager där maximalt möjlig packning utförs

$$p_{dyn}^{max}/\mu \geq F_S P$$

där p_{dyn}^{max} = maximal dynamisk kraft under stöt

F_S = säkerhetsfaktor

μ = koefficient som tar hänsyn till jordens tidsberoende deformationer

P = pållast

Säkerhetsfaktorn F_S väljs normalt till $F_S = 1,5$. För att deformationskravet vid dimensioneringen samtidigt ska innehållas ska sättningen vara F_S still vid kraften $F_S P_0$ i det statiska fallet, jämför kravet $G_{stat} \geq G_0$.

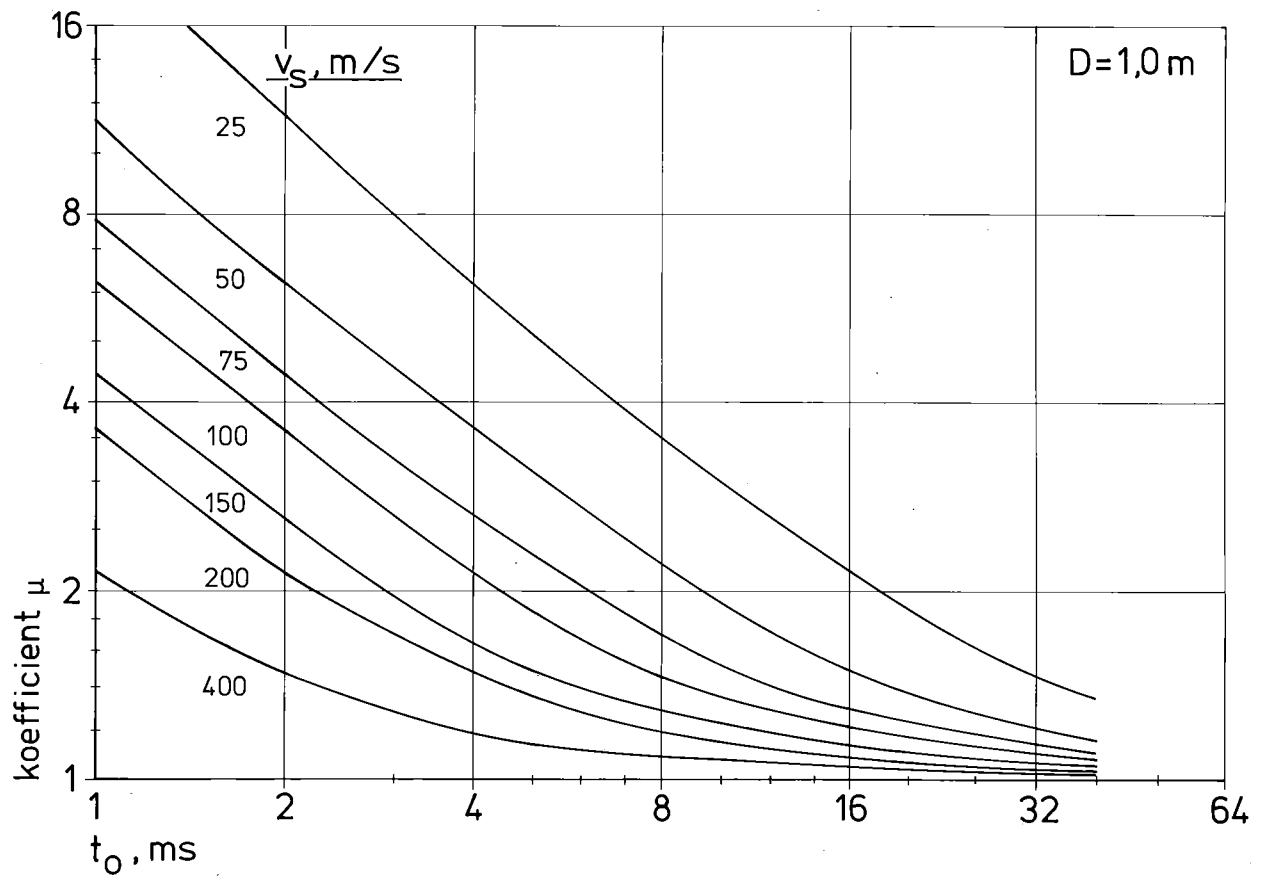
Koefficienten μ är förhållandet mellan maximal stötkraft och statisk kraft vid samma förskjutning. Koefficienten fås ur FIGUR 14. I figuren ingår tiden t_0 , som är tiden från nollkraft till maximal dynamisk kraft. Vidare ingår skjuvvågens utbredningshastighet v_s , som fås ur uttrycket

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

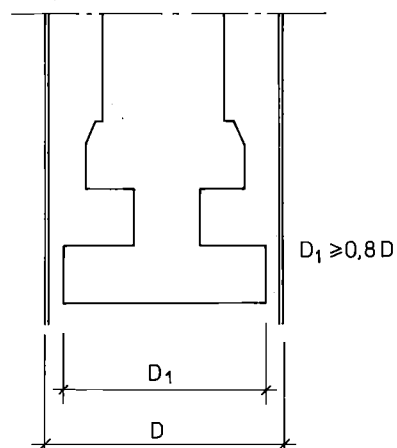
där $G = G_{stat}$
 ρ = jordens densitet

Beräkningen är iterativ.

Diagrammet i FIGUR 14 gäller för diametern $D = 1,0$ m. Om diametern istället är D väljs som ingångsvärde



FIGUR 14. Koefficienten μ som funktion av tiden från nollkraft till maxkraft vid stöt t_0 och skjuvvågens utbredningshastighet v_s . Diagrammet gäller för diameter $D = 1,0$.



FIGUR 15. Krav på fundamentdiametern D_1 hos packningsutrustningen relativt påldiametern D .

$$v_{s1} = v_s / \alpha$$

där $\alpha = D_1/D$

v_s = beräknad utbredningshastighet hos skjuvvågen

Den erforderliga skjuvmodulen G_0 beräknas med ledning av pålens last och fås ur uttrycket

$$G_0 = \frac{1}{k_z} \frac{1-\nu}{2} \frac{P_s}{s_{till} D}$$

Där k_z = koefficient som tar hänsyn till pålens längd i bärande jordlager

P_s = påles spetslast

s_{till} = tillåten sättning

D = påldiameter

ν = kontraktionstal, vanligtvis gäller i aktuella friktionsjordar $\nu = 0,3$

Koefficienten k_z fås ur FIGUR 10.

G_{stat} beräknas med hjälp av uppmätt maximal dynamisk kraft och fås ur

$$G_{stat} = \frac{1}{k_z} \frac{1-\nu}{2} \frac{p_{dyn}^{max}}{\mu_{s_{dyn}} D_1}$$

där k_z = koefficient enligt ovan

p_{dyn}^{max} = maximal dynamisk kraft under stöt

μ = koefficient enligt ovan

s_{dyn} = sjunkning vid p_{dyn}^{max} under stöt

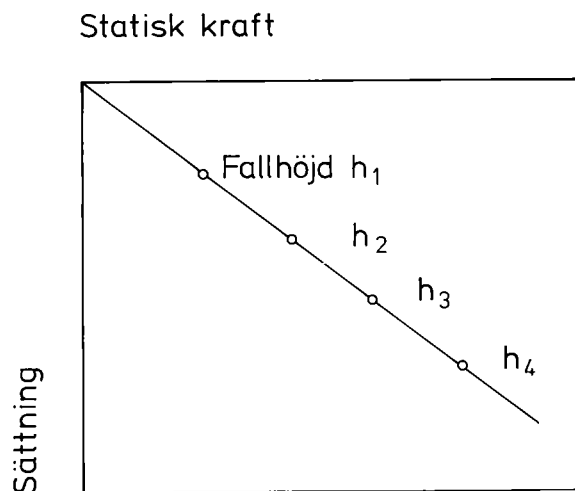
D_1 = fundamentdiameter

För ytterligare säkerhet och dokumentation ska vid kvalitetskontroll "efterslagning" ske med 1 à 2 stötar per fallhöjd i fallhöjdsordning som under själva packningen. Resultatet ska idealt bli enligt FIGUR 16.

För att packningen ska lyckas och beräkningen gälla måste fundamentdiametern hos packningsutrustningen vara större än 80% av påldiametern, se FIGUR 15. Vid mindre fundamentdiameter måste speciell utredning företas.

Vid "tätning" av schaktbotten i silt, se sid 19 ovan, gäller att makadam eller betong motsvarande volymen $V = 0,65 D^3$ (där D är påles diameter) ska tillsättas i tre ungefär lika stora portioner med packning däremellan.

Försiktighet ska iakttas vid uppdragning av packningsutrustningen så att den packade jorden ej luckras upp.



FIGUR 16. Idealt utseende hos kraft-sättningsförloppet vid "efterslagning".

3.4 Gjutning

Se Grävpålanvisningar. Gjutning ska utföras snarast möjligt efter packningen.

4. UTRUSTNING

Utrustning för dynamisk förbelastning består av en packningsutrustning och en mätutrustning.

4.1 Packningsutrustning

- Packningsutrustningen för grävpålar med en diameter < 1,20 m bör kunna ge bruttoenergin 0-250 kNm per stöt.
- Stötarna ska dämpas så att tiden t för kontakttrycket att öka från noll till maximalt värde är 10-20 ms.

4.2 Mätutrustning

Alla mätningar syftar till att mäta förhållandena vid kontakt-ytan mellan packningsutrustningen och friktionsjorden.

Mätningarna uppdelas i en del med kvalitetskontroll för 5-10% av pålarna och en del med utförandekontroll för resterande pålar.

Vid kvalitetskontroll ska följande faktorer mätas/beräknas för varje stöt

- kvarvarande sjunkning s_{rest} - mäts
- maximal sjunkning s_{max} - beräknas
- kvoten s_{rest}/s_{max} (plasticeringskvoten) - beräknas
- kontakttryck/förskjutning - beräknas
- skjuvmodul G_{stat} - beräknas

För hela slagserien för en grävpåle uppritas följande parametrar som funktion av antalet stötar:

- s_{rest}
- plasticeringskvoten $\frac{s_{rest}}{s_{max}}$
- statisk skjuvmodul G_{stat}
- p_{dyn}^{max} och korresponderande p_{stat}^{max}

Dessutom ska p_{dyn}^{max} redovisas som funktion av fallhöjd h .

För resterande pålar företas utförandekontroll. För varje enskilt slag redovisas följande parametrar:

- s_{rest}
- s_{max}
- $\frac{s_{rest}}{s_{max}}$

Dessa värden uppritas som funktion av antalet stötar.

Uppdelningen av mätningarna i kvalitetskontroll och utförandekontroll syftar till att på ett optimalt sätt kontrollera att grävpålarna kommer att fungera enligt planerna.

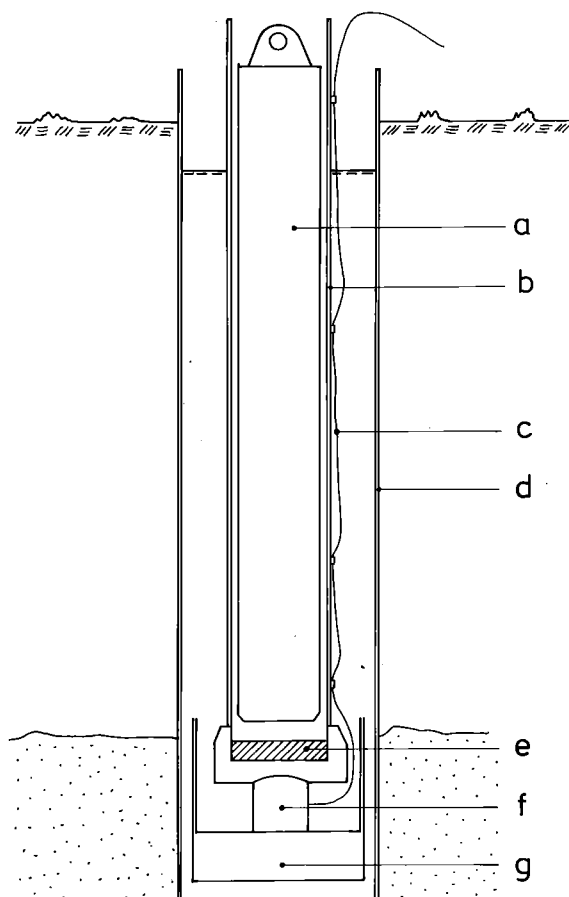
Kvalitetskontrollen kräver en komplicerad mätatorutrustning medan utförandekontrollen kan utföras med avsevärt enklare utrustning.

Exempel på packningsutrustning, se FIGUR 17.

Exempel på mätutrustning för kvalitetskontroll, se FIGUR 18.

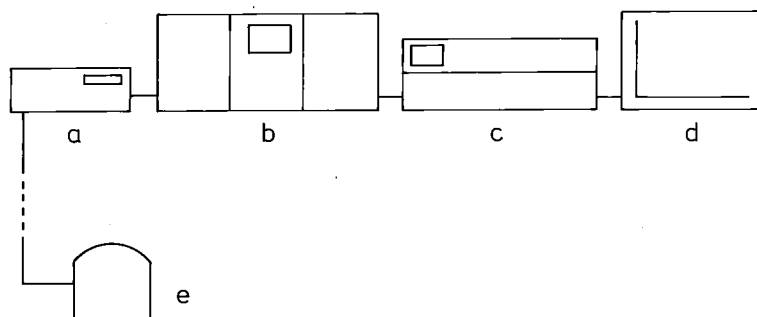
Vid utförandekontroll gäller att packningen kan avslutas när

- plasticeringskvoten $\frac{s_{rest}}{s_{max}} < 0,2$ à $0,3$
- kvarvarande sjunkning s_{rest} är mindre än ett gränsvärde, bestämt med ledning av resultat från packningen och kvalitetskontrollen i det första grävpåleläget.



FIGUR 17. Exempel på packningsutrustning

- a = Hejare 3,8 ton
- b = Styrrör
- c = Mätkabel
- d = Arbetsrör, diameter 1000/2000 mm
- e = Dämpare
- f = Mätcell
- g = Stålfot, diameter 850 mm



FIGUR 18. Exempel på mätutrustning för kvalitetskontroll

- a = Förstärkare
- b = Digitalt oscilloskåp
- c = Mätdator
- d = A4-plotter
- e = Mätcell

5. EXEMPEL

5.1 Beskrivning av projektet

En stor och tung byggnad ska uppföras. De geotekniska förhållandena talar för grundläggning med slagna betongpålar eller grävpålar. Tidigare erfarenheter från omgivningen visar att betongpålar är svårslagna med relativt stor längd i friktionsjord. Den omgivande miljön är dessutom känslig för hög ljudnivå och grävpålearbete alstrar klart mindre ljud och ljudnivåer än slagpålningsarbete. Det är därför intressant både ur ekonomisk och miljömässig synpunkt att utreda grundläggning med grävpålar eventuellt med dynamisk förbelastning.

De beräknade pållasterna i det föreslagna stomsystemet varierar i bruksstadiet från 160 kN till 3570 kN. Antalet pålar är mer än 200.

5.2 Tillåten sättningsdifferens

Tillåten sättningsdifferens förutsätts vara 5 mm.

5.3 Geoteknisk undersökning

Enligt den geotekniska undersökningen består jordlagren från markytan räknat av

- 0,5-1,0 m fyllning
- 3,0-7,0 m lera
- >7,0 m (siltig) sandig morän

Leran har torrskorpekaraktär. Den något siltiga sandiga moränen är överst fast lagrad och därunder lösare (2 m) för att på större djup än 7 m bli fastare och något grövre (sandig morän). I FIGUR 19 redovisas resultatet från sondering i en punkt.

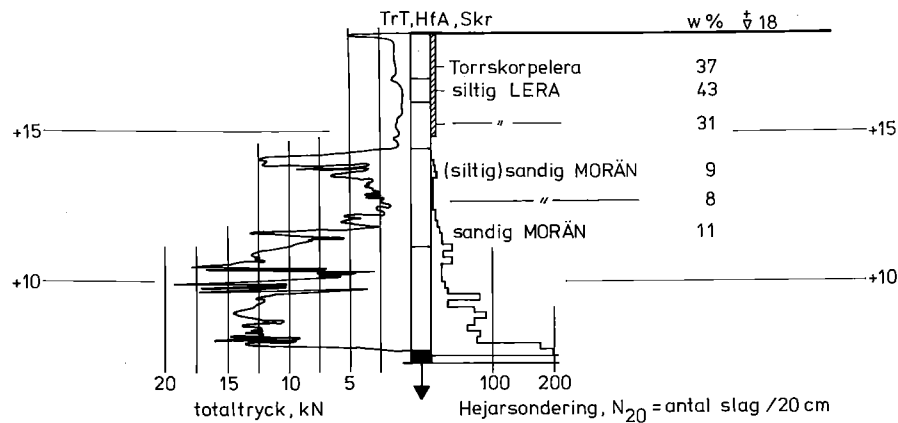
5.4 Preliminär dimensionering

5.4.1 Utan dynamisk förbelastning

För att underlätta beräkningarna generaliseras sonderingsdiagrammet i FIGUR 19 så att

N_{20}	=	0	för djup	0-6 m
N_{20}	=	20	"	6-9 m
N_{20}	=	50	"	9-10 m
N_{20}	>	100	"	större än 10 m

där N_{20} = antalet slag vid hejarsondering för 20 cm penetration



FIGUR 19. Sonderingsresultat

5.4.1.1 Tillåten mantellast

Tillåten mantellast beräknas med hjälp av FIGUR 4 och 8 och med ovan angivna sonderingsvärden. Enligt FIGUR 4 gäller följande

$$\begin{aligned} N_{20} &= 20 \text{ motsvarar } q_c = 14 \text{ MPa} \\ N_{20} &= 50 \text{ motsvarar } q_c = 36 \text{ MPa} \\ N_{20} &> 100 \text{ motsvarar } q_c > 70 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tillåten mantellast är

$$P_m = p_f \pi L_1 D \frac{1}{F_m}$$

$$\text{där } p_f = \frac{1}{L_1} \sum \frac{1}{f_i} q_{ci} H_i$$

Djup 0-6 m Ingen mantellast

$$\begin{aligned} \text{Djup 9 m} \quad f &= 190 \quad (\text{FIGUR 8, kurva b, } q_c = 15 \text{ MPa}) \\ \frac{15000}{190} &= 79 \text{ kPa} > 70 \text{ kPa} \quad (\text{finsand}) \\ p_f &= \frac{1}{3} \cdot 70 \cdot 3 = 70 \text{ kPa} \\ P_m &= 70 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 1,0 \cdot \frac{1}{1,3} = 507 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Djup 10 m} \quad f &= 340 \quad (q_c = 35 \text{ MPa, extrapolering}) \\ \frac{35000}{340} &= 103 \text{ kPa} > 90 \text{ kPa} \quad (\text{sand}) \\ p_f &= \frac{1}{4} [70 \cdot 3 + 90 \cdot 1] = 75 \text{ kPa} \\ P_m &= 75 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 1,0 \cdot \frac{1}{1,3} = 725 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Djup 12 m} \quad f &= 600 \quad (q_c = 70 \text{ MPa, extrapolering}) \\ \frac{70000}{600} &= 117 \text{ kPa} > 90 \text{ kPa} \\ p_f &= \frac{1}{6} [70 \cdot 3 + 90 \cdot 2] = 80 \text{ kPa} \\ P_m &= 80 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 1,0 \cdot \frac{1}{1,3} = 1160 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Djup 14 m} \quad p_f &= \frac{1}{8} [70 \cdot 3 + 90 \cdot 5] = 82 \text{ kPa} \\ P_m &= 82 \cdot \pi \cdot 8 \cdot 1,0 \cdot \frac{1}{1,3} = 1585 \text{ kN} \end{aligned}$$

Eftersom ingen dynamisk förbelastning utförs kan antas att maximala sättningsskillnaden är 50% av maximala total-sättningen. Tillåten sättningsskillnad är 5 mm, vilket ger tillåten sättning 10 mm. Det kan antas att mantelbärförmågan uppnås vid 10 mm förskjutning. Axialkompressionen är försumbar relativt denna förskjutning.

5.4.1.2 Tillåten spetslast

Tillåten spetslast beräknas med hjälp av FIGUR 4-7. Jorden har graderingstal större än 15 men är ingen bottenmorän. Därför läggs ej 5-10 enheter till på N_S -värdet. Enligt FIGUR 4 gäller följande N_S -värden för sand

$N_{20} = 20$	$N_S = 38$
$N_{20} = 50$	$N_S = 43$
$N_{20} > 100$	$N_S = 47$

Djup 6 m $N_S = 38$
 $L_1/D = 0$
 Grundvattenytan ligger 1,0 m under markytan
 $\sigma'_V = 1,0 \cdot 18 + 2,0 \cdot 8 + 3,0 \cdot 11 = 67 \text{ kPa}$
 $p_{sf}/\sigma'_V = 25$
 $p_{sf} = 25 \cdot 67 = 1675 \text{ kPa}$
 Graderingstalet för jorden i grundläggningsnivån är $C_u > 15$ vilket ger:
 $s_f/D = 13,5\%$ (FIGUR 6, $N_S = 38$)

För påldiametern $D = 1,0 \text{ m}$ är sättningen vid kritisk last således 135 mm, upp till vilket belopp sättning och last antas följa ett linjärt förlopp. Den tillåtna sättningen är enligt ovan 10 mm. Tillåtet spetsstryck är alltså

$$p_S = \frac{10}{135} \cdot 1675 = 124 \text{ kPa}$$

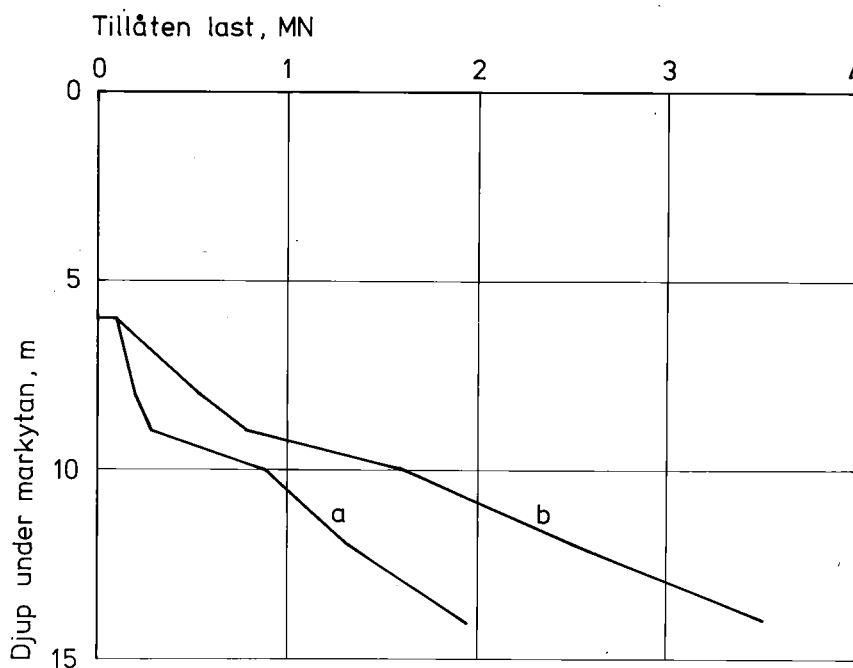
$$P_S = p_S \frac{\pi D^2}{4} = 98 \text{ kN}$$

Djup 9 m $\sigma'_V = 67 + 3 \cdot 11 = 100 \text{ kPa}$
 $N_S = 38$
 $L_1/D = 3$
 $p_{sf}/\sigma'_V = 43$
 $p_{sf} = 43 \cdot 100 = 4300 \text{ kPa}$
 $p_S = \frac{10}{135} \cdot 4300 = 318 \text{ kPa}$
 $P_S = 252 \text{ kN}$

Djup 9 ⁺ m	$\sigma'_V = 100 \text{ kPa}$ $N_S = 43$ $L_1/D = 0$ $p_{Sf}/\sigma'_V = 40$ $p_{Sf} = 40 \cdot 100 = 4000 \text{ kPa}$ $s_f = \frac{10}{110} 4000 = 367 \text{ kPa}$ $P_S = 287 \text{ kN}$
Djup 10 ⁻ m	$\sigma'_V = 111 \text{ kPa}$ $N_S = 43$ $L_1/D = 1$ $p_{Sf}/\sigma'_V = 50$ $p_{Sf} = 50 \cdot 111 = 5550 \text{ kPa}$ $p_S = \frac{10}{110} 5550 = 505 \text{ kPa}$ $P_S = 399 \text{ kN}$
Djup 10 ⁺ m	$\sigma'_V = 111 \text{ kPa}$ $N_S = 47$ $L_1/D = 0$ $p_{Sf}/\sigma'_V = 90$ $p_{Sf} = 90 \cdot 111 = 9990 \text{ kPa}$ $s_f/D = 9\%$ $p_S = \frac{10}{90} 9990 = 1110 \text{ kPa}$ $P_S = 877 \text{ kN}$
Djup 12 m	$\sigma'_V = 133 \text{ kPa}$ $N_S = 47$ $L_1/D = 2$ $p_{Sf}/\sigma'_V = 113$ $p_{Sf} = 113 \cdot 133 = 15029$ $p_S = \frac{10}{90} 15029 = 1670 \text{ kPa}$ $P_S = 1319 \text{ kN}$
Djup 14 m	$\sigma'_V = 155 \text{ kPa}$ $N_S = 47$ $L_1/D = 4$ $p_{Sf}/\sigma'_V = 142$ $p_{Sf} = 142 \cdot 155 = 22010 \text{ kPa}$ $p_S = \frac{10}{90} 22010 = 2446 \text{ kPa}$ $P_S = 1932 \text{ kN}$

Det primära resultatet ska utjämnas i övergångszoner mellan jordlager med olika fasthet. Enligt FIGUR 9 ska utjämnningen ske över sträckan 2D vid fast-över-lös lagerföljd och över sträckan 1D vid lös-över-fast lagerföljd.

Pålens tillåtna last (mantel+spets) vid grundläggning på olika djup redovisas i FIGUR 20. Eftersom den största pållasten är 3570 kN skulle erforderlig pållängd behöva vara 14 m. Efter dynamisk förbelastning kan pållängden reduceras, sannolikt till 7 à 8 m.



FIGUR 20. Tillåten pållast (utan dynamisk förbelastning)
 a Spetslast
 b Total pållast (spets+mantel)

5.4.2 Med dynamisk förbelastning

5.4.2.1 **Beräkning av tillåten mantellast**

Mantelbärförmågan är densamma som utan dynamisk förbelastning.

5.4.2.2 **Beräkning av tillåten spetslast**

Tillåten spetslast beräknas med hjälp av FIGUR 4-7 samt FIGUR 11 och 12.

Efter dynamisk förbelastning kan antas att maximal sättningssdifferens är 25% av maximal totalsättning. Eftersom tillåten sättningssdifferens är 5 mm blir tillåten sättning 20 mm.

Efter dynamisk förbelastning gäller

$$\text{vid } N_{20} = 20 \quad N_{sd} = N_s + N_s = 38 + 7 = 45 \quad (\text{FIGUR 11, sand})$$

$$N_{20} = 50 \quad N_{sd} = N_s + N_s = 43 + 4 = 47$$

$$N_{20} > 100 \quad N_{sd} = N_s + N_s = 47 + 2 = 49$$

$$\text{Djup } 6 \text{ m} \quad \sigma'_V = 67 \text{ kPa}$$

$$N_{sd} = 45$$

$$L_1/D = 0$$

$$p_{sf}/\sigma'_V = 32$$

$$p_{sf} = 32 \cdot 67 = 2144 \text{ kPa}$$

$$s_f/D = 5\% \quad (\text{FIGUR 6, FIGUR 12})$$

$$p_s = \frac{20}{50} 2144 = 858 \text{ kPa}$$

$$P_s = 678 \text{ kN}$$

$$\text{Djup } 9^- \text{ m} \quad \sigma'_V = 100 \text{ kPa}$$

$$N_{sd} = 45$$

$$L_1/D = 3$$

$$p_{sf}/\sigma'_V = 90$$

$$p_{sf} = 90 \cdot 100 = 9000$$

$$p_s = \frac{20}{50} 9000 = 3600 \text{ kPa}$$

$$P_s = 2844 \text{ kN}$$

$$\text{Djup } 9^+ \text{ m} \quad \sigma'_V = 100 \text{ kPa}$$

$$N_{sd} = 47$$

$$L_1/D = 0$$

$$p_{sf}/\sigma'_V = 80$$

$$p_{sf} = 8000 \text{ kPa}$$

$$s_f/D = 4,5\% \quad (\text{FIGUR 6, FIGUR 12})$$

$$p_s = \frac{20}{45} 8000 = 3556 \text{ kPa}$$

$$P_s = 2809 \text{ kN}$$

$$\text{Djup } 10^- \text{ m} \quad \sigma'_V = 111 \text{ kPa}$$

$$N_{sd} = 47$$

$$L_1/D = 1$$

$$p_{sf}/\sigma'_V = 95$$

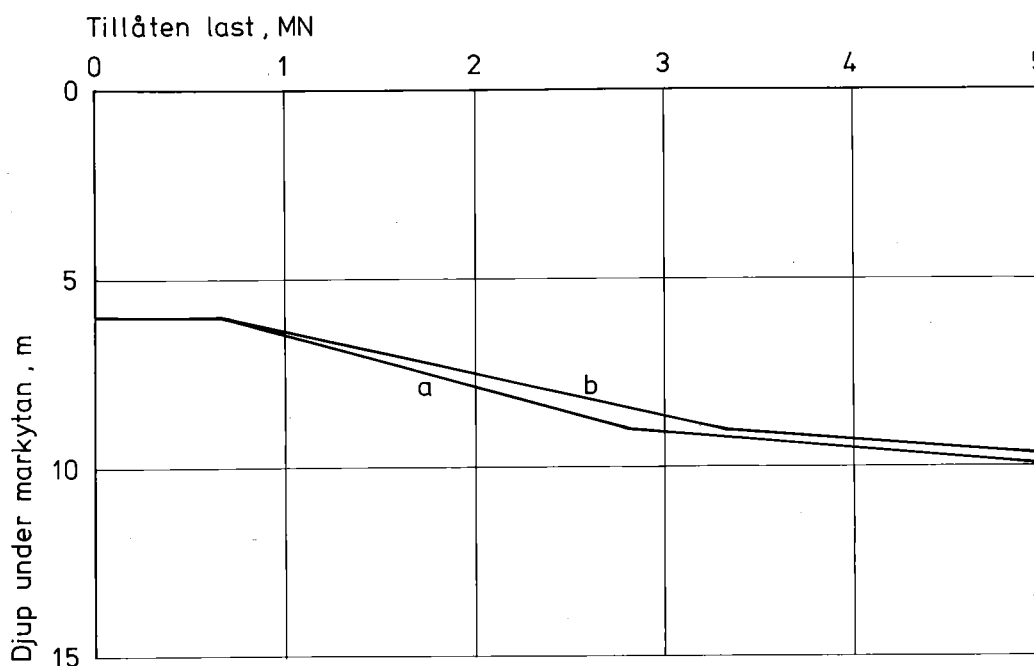
$$p_{sf} = 95 \cdot 111 = 10545 \text{ kPa}$$

$$p_s = \frac{20}{45} \cdot 10545 = 4686 \text{ kPa}$$

$$P_s = 3702 \text{ kN}$$

Djup 10 ⁺ m	$\sigma_V' = 111 \text{ kPa}$ $N_{sd} = 49$ $L_1/D = 0$ $p_{sf}/\sigma_V' = 120$ $p_{sf} = 120 \cdot 111 = 13320 \text{ kPa}$ $s_f/D = 4\%$ $p_s = \frac{20}{40} 13320 = 6660 \text{ kPa}$ $P_s = 5261 \text{ kN}$
Djup 12 m	$\sigma_V' = 133 \text{ kPa}$ $N_{sd} = 49$ $L_1/D = 2$ $p_{sf}/\sigma_V' = 158$ $p_{sf} = 158 \cdot 133 = 21014 \text{ kPa}$ $p_s = \frac{20}{40} 21014 = 10508 \text{ kPa}$ $P_s = 8301 \text{ kN}$
Djup 14 m	$\sigma_V' = 155 \text{ kPa}$ $N_{sd} = 49$ $L_1/D = 4$ $p_{sf}/\sigma_V' = 198$ $p_{sf} = 198 \cdot 155 = 30690 \text{ kPa}$ $p_s = \frac{20}{40} 30690 = 15344 \text{ kPa}$ $P_s = 12121 \text{ kN}$

Den tillåtna lasten (spets+mantel) vid grundläggning på olika djup redovisas i FIGUR 21. Av figuren framgår att efter dynamisk förbelastning kan den största pållasten, 3570 kN, upptas vid grundläggning av grävpåle med diameter $D = 1,0$ på djupet 9 m.



FIGUR 21. Tillåten pållast efter dynamisk förbelastning
 a Spetslast
 b Total pållast (spets+mantel)

5.5 Lastintervall

I aktuellt projekt väljs fyra lastintervall enligt nedan.

Intervall	Pållast, MN
I	0-1
II	1-2
III	2-3
IV	3-4

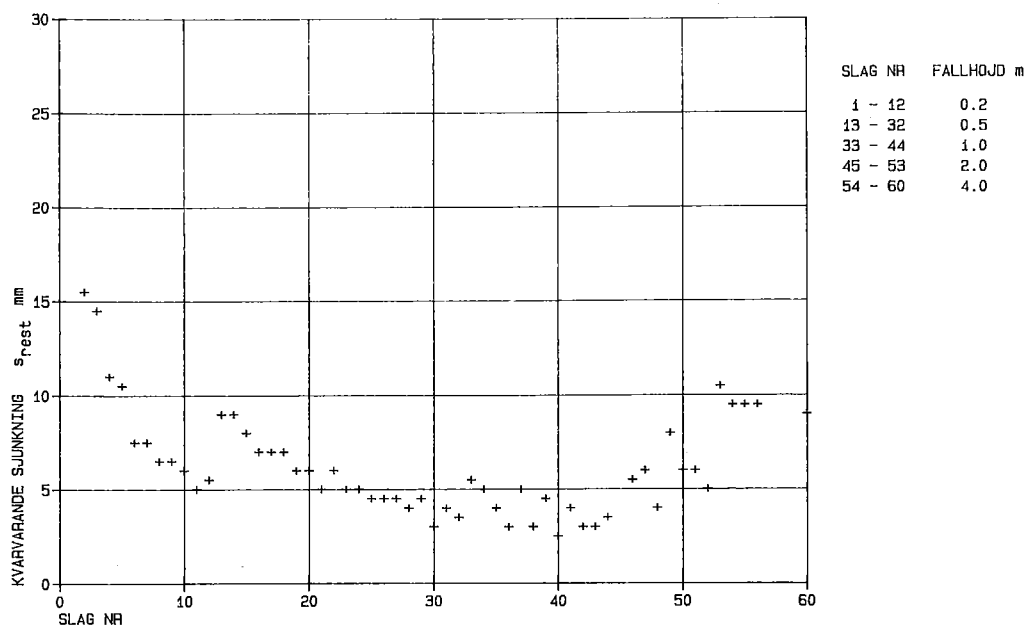
5.6 Grävning

Vid grävningen för den första pålen bekräftas förhållandena erhållna vid sonderingen med tillägget att den övre metern av moränen är finkornig med klara flytjordsegenskaper och att moränen därunder är grovkornigare. Vid grävningen påträffas block.

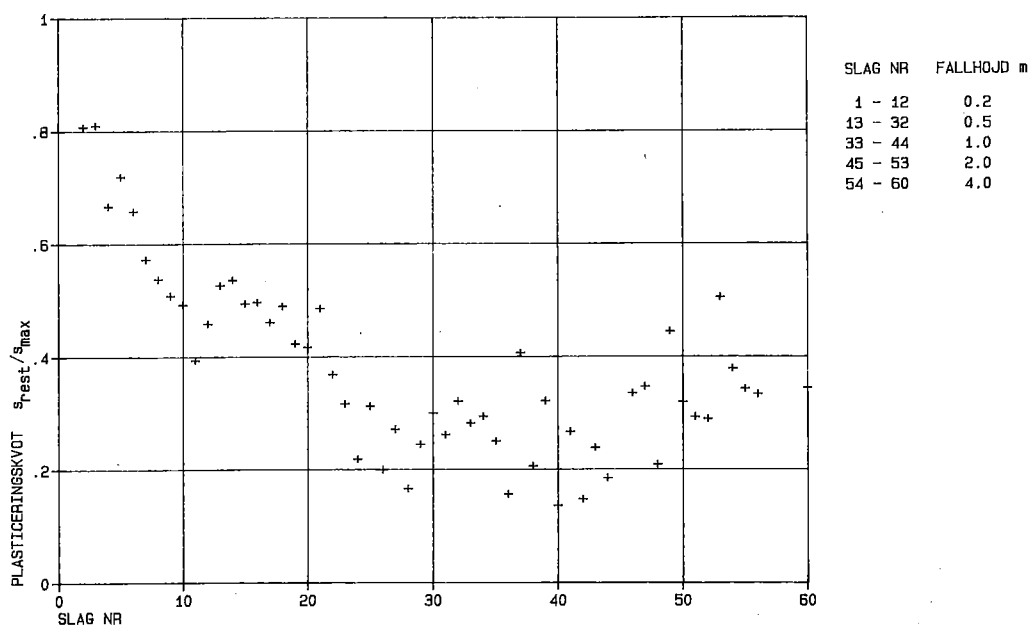
Jordprover från grävningen undersöks i laboratorium (siktning, kompressionsprov).

5.7 Dynamisk förbelastning

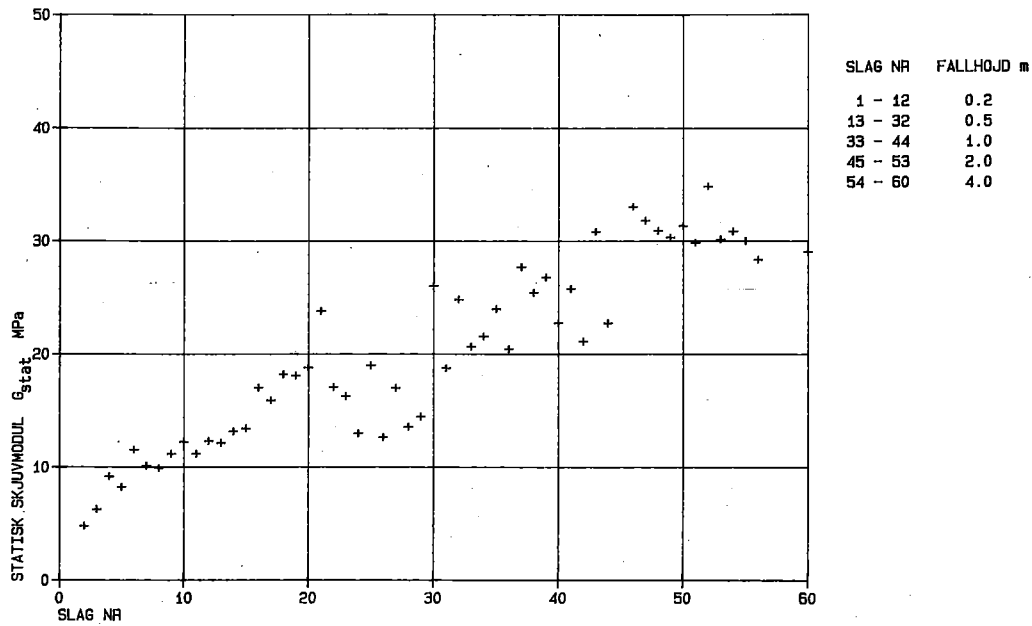
Dynamisk förbelastning med kvalitetskontroll utförs på två nivåer (4,2 resp 7,0 m under markytan). Exempel på resultat från mätningarna av packningsarbetet på djupet 7,0 m under markytan redovisas i FIGUR 22-26. I FIGUR 27 återges det beräknade tryck-förskjutningssambandet under en stöt på den lägre nivå.



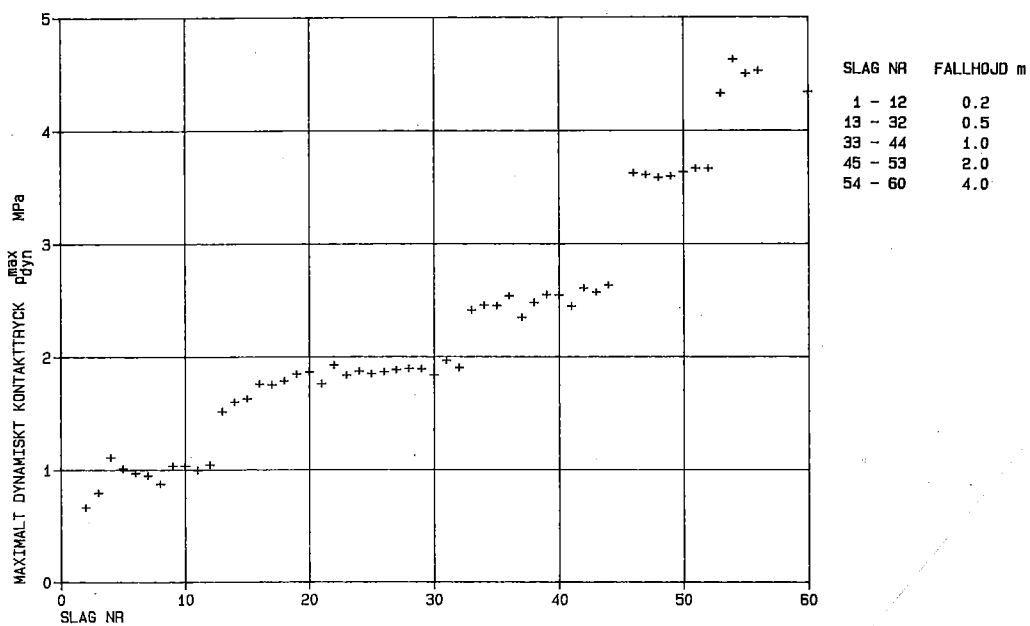
FIGUR 22. Kvarvarande sjunkning mot antal slag vid packningen på djupet 7,0 m under markytan.



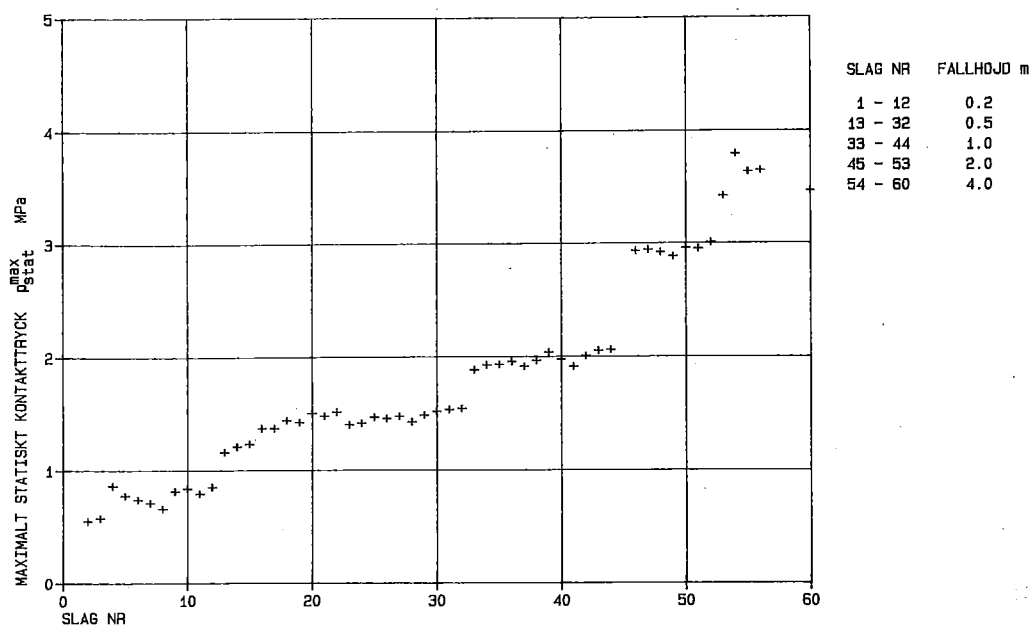
FIGUR 23. Plasticeringskvot s_{rest}/s_{max} mot antal slag vid packningen på djupet 7,0 m under markytan.



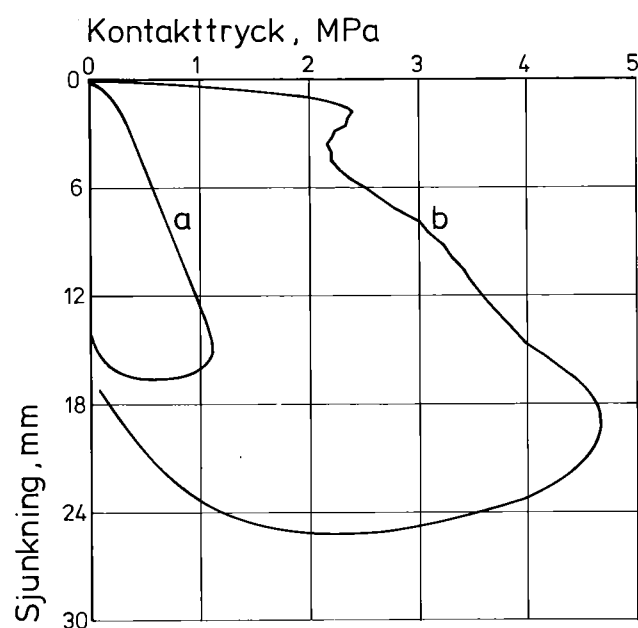
FIGUR 24. Utvärderad statisk skjuvmodul mot antal slag vid packningen på djupet 7,0 m under markytan.



FIGUR 25. Maximalt dynamiskt kontakttryck under slaget mot antal slag vid packningen på djupet 7,0 m under markytan.



FIGUR 26. Statiskt kontakttryck vid maximalt dynamiskt kontakttryck under slaget mot antal slag vid packningen på djupet 7,0 m under markytan.



FIGUR 27. Beräknat kontakttryck och förskjutning vid en stöt i början och i slutet av packningen på djupet 7,0 m under markytan.

a = slag 4
b = slag 54

5.8 Val av pålspetsnivåer

Resultaten från den preliminära dimensioneringen och packningsarbetet i det första grävpåleläget ger pålspetsnivåer enligt nedan.

Lastintervall	Pållast, MN	Pålspetsnivå
I, II	0-2	ök lager I
III	2-3	1,0-1,5 m under ök lager I
IV	3-4	ök lager II

Överkanten av lager I motsvarar överkanten i den grovkorniga moränen ($N_{20} > 20$) och överkant lager II motsvarar nivån där sonderingsmotståndet $N_{20} \geq 50$ slag/0,2 m. Överkant lager II ligger 2 à 2,5 m under överkant lager I.

5.9 Krav vid dynamisk förbelastning

Efter val av pålspetsnivå beräknas grävpålens mantelmotstånd. Av FIGUR 20 eller 21 framgår tillåten mantellast som funktion av grundläggningsdjupet. Erforderlig spetslast kan därefter beräknas. En grävpåles egenkompression av lasten kan oftast försummas. Pålens sjunkning vid pålspetsen kan därför sättas ungefär lika med sjunkningen i pålens överkant. Kravet på sättning av spetslast omformuleras till ett krav på styvhet (skjuvmodul), se sid 26 ovan.

Vid sättningskravet 20 mm fås krav på statisk skjuvmodul G enligt TABELL 1 nedan.

TABELL 1. Krav på statisk skjuvmodul (sättning 20 mm, $D=1,0$).

Spetslast (MN)	Krav på statisk skjuvmodul (MPa)	
	$L_1/D = 0$	$L_1/D = \infty$
1,0	17,5	11,4
2,0	35,0	22,8
3,0	52,5	34,2
4,0	70,0	45,6

För tillräcklig säkerhet mot brott krävs att kontakttrycket vid den dynamiska förbelastningen med en viss marginal är större än det statiska kontakttryck som grävpålen dimensioneras för. Enligt sid 24 ovan gäller att det statiska kontakttrycket vid den dynamiska förbelastningen ska vara 50% större än dimensionerande statiskt kontakttryck. Detta krav redovisas i TABELL 2.

TABELL 2. Krav på statiskt kontakttryck vid dynamisk förbelastning för grävpåle med $D = 1,0$ m.

Spetslast (MN)	Spetstryck p_0 (MPa)	Krav på statiskt spetstryck (ur P_{dyn}) (MPa)
1,0	1,25	1,65
2,0	2,55	3,30
3,0	3,80	4,95
4,0	5,10	6,60

Kravet vid packningen är därvid formulerat som ett styvhetskrav (TABELL 1) samt ett krav på statiskt spetstryck vid den dynamiska förbelastningen (TABELL 2).

5.10 Bedömning av slutlig fallhöjd

En jämförelse mellan krav enligt ovan (TABELL 1 och 2) och uppmätta resultat vid packningsarbetet i det första grävpåleläget (se FIGUR 24 och 26) ger en slutlig fallhöjd enligt TABELL 3.

TABELL 3. Uppskattad slutlig fallhöjd.

Spetslast (MN)	Krav på fallhöjd (m)	
	pga skjuvmodul	pga P_{stat}
1,0	0,2	0,6
2,0	1,0	4,0
3,0	1,0*	4,0
4,0	1,0*	4,0

*)Pga att jorden är styvare på denna nivå.

Kravet på brottsäkerhet formulerat som kravet på P_{stat} kontrolleras endast för några pålar. För övriga pålar har man endast att uppfylla kravet på skjuvmodul.

5.11 Antal slag per fallhöjd

Antal slag per fallhöjd uppskattas genom jämförelse av kraven i TABELL 1 och 3 med resultatet av packningen i det första pålläget (se FIGUR 24). Antal slag per fallhöjd redovisas i TABELL 4.

TABELL 4. Antal slag per fallhöjd.

Spetslast (MN)	Uppskattat antal slag				Totalt
	0,2 m	0,5 m	1,0 m	2,0 m	
1,0	10				10
2,0	10	10	20		40
3,0	10	20	20		50
4,0	10	20	20		50

Övergången till nästa fallhöjd påbörjas när kravet $s_{rest}/s_{max} < 0,2-0,3$ är uppfyllt.

5.12 Krav vid beordring av ny fallhöjd

Resultatet från packningsarbetet i det första grävpåleläget (se FIGUR 22 och 23) ger kontrollkrav vid en uppföljning utan kvalitetskontroll enligt TABELL 5.

TABELL 5. Kontrollkrav vid beordring av ny fallhöjd.

Fallhöjd (m)	Kvarvarande sjunkning (mm)	s_{max} (mm)	s_{rest}/s_{max}
0,2	6	15	0,4
0,5	5	15	0,3
1,0	4	15	0,25
(2,0	3	15	0,2)
(4,0	3	15	0,2)

Kravet vid avslutning av packning fås genom jämförelse mellan kraven i TABELL 1 och 3 och resultatet av packningen i det första pålläget (se FIGUR 22 och 23).

Kravet vid avslutning av packning framgår av TABELL 6.

TABELL 6. Krav vid avslutning av packning.

Spetslast (MN)	Slutlig fallhöjd (mm)	Kvarvarande sjunkning (mm)	s_{rest}/s_{max}
1,0	0,2	4	0,3
2,0	1,0	4	0,25
3,0	1,0	4	0,2
4,0	1,0	4	0,2

5.13 Antal kontrollmätningar

För att säkerställa bedömningen av resultaten från mätningarna vid packningsarbetet i det första grävpåleläget utförs kvalitetskontroll på en viss andel av pålarna. I detta fall är valt att utföra kontroller enligt TABELL 7 med huvuddelen inom de högbelastade pålarna.

TABELL 7. Antal kontrollmätningar.

Pålklass	Pållast (MN)	Totalt antal	Kontroll antal	%
I	0 - 1	88	2	2
II	1 - 2	65	3	5
III	2 - 3	44	4	9
IV	3 - 4	<u>22</u>	<u>5</u>	<u>23</u>
		219	14	6

6. LITTERATUR

Vid upprättandet av dessa anvisningar har följande litteratur använts.

Andreasson, B., 1979. Deformation characteristics of soft, high-plastic clay under dynamic loading conditions. Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för geoteknik med grundläggning, Göteborg 1979, 242 s. / Doktorsavhandling/

Berggren, B., 1981. Grävpålar på friktionsjord - sättningar och bärförmåga. Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för geoteknik med grundläggning, Göteborg 1981, 225 s / Doktorsavhandling/

Eresund, S., 1972. Sättningar hos cirkulära, stela fundament på friktionsjord. Inverkan av dynamisk förbelastning. Statens institut för byggnadsforskning, Stockholm, Rapport R41:1972 /Doktorsavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg./

Grävpålanvisningar. Dimensionering, utförande och kontroll av grävda, i jorden gjutna pålar. Ingenjörsvetenskapsakademien, Pålkommissionen, Rapport 59, Stockholm 1979, 66 s.

Gwizdala, K., 1984. Large diameter bored piles in noncohesive soils. Statens geotekniska institut, Rapport 26, Linköping 1984, 129 s.

56	Provb belastning av friktionspål - En studie av olika provningsmetoder U Bergdahl - G Hult 1979	40:-	68	Parameterstudie av olika faktorer inverkan på pålars bärförmåga som funktion av sjunkningen Carl-John Grävare - Ingemar Hermansson 1982	50:-
57	Swedish Building Code 1975 Chapter 23.6 Pile Foundations. Swedish Building Code 1975 Approval Rules No. 1975:8 Piles Translated by B Broms 1979	40:-	69	Stålpål - Användningsområden och praxis för utförande Håkan Bredenberg - Ulf Eriksson - Anders Eriksson - Göran Camitz 1983	95:-
58	Grävpålanvisningar Dimensionering, utförande och kontroll av grävda, i jorden gjutna pålar 1979	40:-	70	Buller vid pål- och spontslagning. En studie av mätmetoder, bullernivåer och bekämpningsåtgärder Ove Bennerhult - Ulf Bergdahl 1983	95:-
59	Anvisningar för provpålning med efter- följande provbelastning 1980	50:-	71	Svensk statistik över antal till- verkade och slagna pål meter åren 1962-1982 1983	40:-
60	Negativ mantelfriktion längs pålar Bengt Broms 1979	40:-	72	Förspänd tallriksfjäderdyna. Resultat av stötvågsteoretiska studier, dator- simulering, modell- och fullskaleprov- ning Bo Berglars 1983	95:-
61	Recent pile research. Activities of the Swedish Commission on Pile Research Bengt Broms 1980	40:-	73	Svensk pålningsteknik under 1980- talet Håkan Bredenberg - Crister Bådholm - Lars Hellman - Göran Holm 1984	50:-
62	Svensk statistik över antal tillverkade och slagna pål meter åren 1962-1978 1980	25:-	74	Skarv för kombinationspål trå- betong. Resultat av drag- och böj- provningar Elvin Ottosson 1984	50:-
63	Slagning av betongpål med tryck- lufthejare. Resultat av fältförsök i Västerås 1973 Gunnar Fjelkner - Åke Eriksson - Håkan Bredenberg 1981	40:-	75	Förtillverkade betongpål. Förslag till standard med dimensionerings- underlag 1984	50:-
64	Kohesionspålars bärförmåga En studie av utförda provbelast- ningar på kohesionspål av betong Ulf Bergdahl - Åke Eriksson - Ture Nilsson 1981	50:-	76	Initialspänningens variation vid påls lagning Elisabeth Stensgård - Elisabet Olsson 1984	50:-
65	Swedish Building Code 1980 Chapter 23.3 Pile Foundations Swedish Building Code 1975 Approval Rules No. 1975:8 Piles Translated by Bengt Broms, 1981 (in English)	50:-	77	Grävpål i friktionsjord Anvisningar för dynamisk förbelastning Bo Berggren Per-Evert Bengtsson	115:-
66	Svensk statistik över antal tillverkade och slagna pål meter åren 1962-1980 1982	30:-			
67	Negativ mantelfriktion längs pålar Resultat av enkät år 1979 Lars Bjerin - Jan Fallsvik 1982	40:-			

31	Friktionspålning för brostöd nr 2 vid Albysjön, tunnelbana 2 SV, Botkyrkabanan Sven-Erik Rehnman 1971	25:—	42	Pålar i lera. En geoteknisk återblick med speciell anknytning till Göteborgs-förhållanden Bror Fellenius 1974	15:—
32	Aktuellt forskningsbehov för pålområdet i Sverige i juni 1971 Ulf Bergdahl 1971	15:—	43	Jordundanträngning vid påslagning — resultat av modellförsök Rainer Massarsch 1974	20:—
33	Sättningar vid pålning olika djupgrundläggningsmetoder Intryck från pålkonferens 1972	20:—	44	Pålning för Silo 68 i Köping. En redovisning av mätresultat Ulf Bergdahl — Åke Nilsson 1974	20:—
34	On the bearing capacity of driven piles 1972	20:—	<i>Rapporter</i>		
35	Load testing of piles according to the polish regulations B K Mazurkiewicz 1972	15:—	45	Aktuellt forskningsbehov för pålområdet i Sverige 1974 Ulf Bergdahl 1974	20:—
36	Undersökning av konventionell slagdyna. Beräkningsanalyser och beräkningsresultat för olika fall Martti Laine 1972	15:—	46	»Root-piles» Small-diameter injected borepiles Anton Frank 1975	15:—
37	Approximativ bestämning av böjstyvheten i ett förspänt, delvis uppsprucket betongtvärsnitt Bo-Göran Hellers 1973	15:—	47	Jordgjutna pålar — en redovisning av vanliga metoder K Rainer Massarsch 1975	30:—
38	Statistik över antal slagna pålmetrar år 1962, 1966, 1968, 1970 och 1972 1973	10:—	48	Svensk statistik över antal tillverkade och slagna pålmetrar åren 1962—1974 1975	20:—
39	Inventering och sammanställning av utförda böjprovningar med oskarvade och skarvade betongpålar Björn Kvist — Pär Sandin 1973	20:—	49	Deformationsmätningar vid slagning av pålar nära en stenmur — resultat av stereofotogrammetriska mätningar K Rainer Massarsch — Gunnar Ivmark 1975	25:—
40	Undersökning av avklingande stötvågs utseende efter passage genom dyna med tallriksfjädrar Bo Larsson 1973	20:—	50	Pålgrundläggning i Sovjetunionen 1976	25:—
41	Om korrosion på stål, speciellt i betongpålar Bengt H Fellenius 1974	15:—	51	Soil movements caused by pile driving in clay K Rainer Massarsch 1976	50:—
<i>Övrigt</i>			52	Angelägenheten hos forskningsprojekt inom pålområdet i Sverige 1975 — enkätresultat Ulf Bergdahl — Gunnar Ivmark 1977	15:—
	Slagning och provbelastning av långa pålar. Försök i Gubbero, Göteborg. (Statens Råd för Byggnadsforskning, rapport 99)	35:—	53	Svensk statistik över antal tillverkade och slagna pålmetrar åren 1962—1976 1978	20:—
	Pålningssprotokoll. Blanketter upprättade enligt Särtryck och preliminära rapporter nr 11. Block om 50 blad Pris per block	10:—	54	Pålgrupper med sidomotstånd och in-spänning Håkan Bredenberg — Bengt Broms 1978	40:—
			55	Rälsplåars böjstyvhet — resultat av böjprovningar Elvin Ottosson 1979	40:—

- | | | | | | |
|----|---|-------------------|----|--|------------------|
| 5 | Resultat av pålprovning vid Göteborg C
Bror Fellenius 1955
(omtryckt 1967) | 20:— | 19 | Datorberäkning av stötvågsförlopp i pålar
medelst variation av modellparametrar.
Delrapport III
Lennart Vilander
1969 | 15:— |
| 6 | Om stoppslagning av stödpålar
Lars Hellman
1967 | 5:— | 20 | Nya pålnormer. Föredrag vid informations-
möte 25/4 1969
Göte Åström — Per Sahlström — Erik Sandegren
1969 | Slut |
| 7 | Undersökning med syfte att uppställa stopp-
slagningsregler för stålpålar slagna med tryck-
lufthammare. Delrapport I.
Gunnar Fjelkner
1967 | Ersatt av Medd 16 | 21 | Negative skin friction on piles in clay.
A literature survey
Bengt H Fellenius
1969 | 20:— |
| 8 | Industriell tillverkning av betongpålar
Kajsa Sundberg — Arne Forsell
1968 | 10:— | 22 | Deformationsegenskaper hos slagna betong-
pålar
Bengt H Fellenius — Torsten Eriksson

Friktionspålers bärförmåga. Resultat från
fältförsök i Kanada
Bengt H Fellenius
1969 | 20:— |
| 9 | Digitalisering av stötvågsmätningar.
Delrapport I
Lennart Vilander
1968 | 5:— | 23 | Pålers bärförmåga i elastiskt medium under
hänsynstagande till egenspanningar i pål-
materialet
Stig Bernander
1969 | 20:— |
| 10 | Stoppslagning av stålpålar med lätta slagdon
(trycklufthammare). Delrapport II
Gunnar Fjelkner
1968 | Ersatt av Medd 16 | 24 | IVA:s Pålkommission 1959—1969. Uppsatser
utgivna i samband med Pålkommissionens
tioårsjubileum
1969 | 20:— |
| 11 | Förslag till anvisningar för pålprovning och
enkel provbelastning. (Andra omarbetade
upplagan)
1970 | 20:— | 25 | Statistik över antal slagna pålmeter år 1962,
1966 och 1968
1969 | Ersatt av SPR 30 |
| 12 | Tillåtna laster på långa stödpålar av betong
i östra Nordstaden, Göteborg. Slutrapport
Gunnar Hellström
1969 | 15:— | 26 | Föredrag vid Pålkommissionens jubileums-
möte den 20 november 1969

Den norske pelekommittés arbeide
Kaare Flaate

Aktuella forskningsbehov inom pålnings-
området
Bengt Broms
1970 | 20:— |
| 13 | Kvarstående förspänningskraft i slagna
betongpålar. Undersökning av pålar från
grunden till Silo 68, Köping
Bo-Göran Hellers
1968 | 5:— | 27 | Rapport från en resa till Mexiko, USA,
Kanada och England 23.8—13.9 1969
Bengt H Fellenius
1970 | 20:— |
| 14 | Föredrag vid Halmstad Järnverks armerings-
dag 17/11 1967
Bengt Broms — Gunnar Sundberg —
Per Möller — Thorild Blomdahl
1968 | 5:— | 28 | Mätning av fallhejares anslagshastighet vid
pålslagning
Karl-Erik Sundström
1970 | 15:— |
| 15 | Statistik över antal slagna pålmeter 1962
och 1966
1968 | Ersatt av SPR 30 | 29 | Studier av en friktionspåles verkningssätt
Åke Nilsson — Torbjörn Winqvist
1971 | 25:— |
| 16 | Friktionspålers bärförmåga. En studie av
utförda provbelastningar
Sven Hultsjö — Jan Svensson
1969 | 25:— | 30 | Statistik över antal slagna pålmeter 1962,
1966, 1968 och 1970
1971 | Ersatt av SPR 38 |
| 17 | Ett program för beräkning av stötvågsför-
loppet vid friktionspålning. Delrapport II
Lennart Vilander
1969 | 15:— | | | |
| 18 | Pålkraftmätare
Bengt H Fellenius — Thomas Haagen

Negative skin friction for long piles driven
in clay
Bengt H Fellenius — Bengt Broms
1969 | 15:— | | | |



Utgivna handlingar

Meddelanden

- | | | | | | |
|----|--|------|---|--|------|
| 1 | Slagningsprov av pålskor med bergdubbar
Bror Fellenius
1963 | 10:— | 14 | Påkänningar, sprickbildning och utmattning
vid slagning av armerade modellpålar av
betong
Bo Göran Hellers — Sven Sahlin
1971 | 30:— |
| 2 | Provpålning för broar inom blivande
Olskroks- och Gullbergsmoten i samband med
byggande av Europaväg 6 genom Göteborg
Bror Fellenius — Waldemar Pejrud
1964 | Slut | 15 | Bärförmåga hos släntberg vid statisk belastning
av bergspets. Resultat av modellförsök
Sven-Erik Rehnman
1968 | 15:— |
| 3 | Jämförelse mellan moment, krökningsradie
och sprickvidd i betongpålar slagna genom
lös lera till släntberg vid Tingstadsdelen,
Göteborg
Bror Fellenius
1964 | 10:— | 16 | Stålpålars bärförmåga. Resultat av fältförsök
med lätta slagdon
Gunnar Fjellkner
1970 | 30:— |
| 4 | Pålprovning för järnvägsbro vid Vännäs
Bror Fellenius
1964 | Slut | 17 | Bergdubbens hållfasthet. Resultat från
statiska belastningsförsök
Sven-Erik Rehnman
1970 | 20:— |
| 5 | Beräkningsmetoder för sidobelastade pålar
Bengt Broms
1965 | Slut | 18 | Negative skin friction on long piles in clay.
I. Results of a full scale investigation
II. General views and design recommendations
Bengt H Fellenius
1971 | 30:— |
| 6 | Brottlast för snett belastade pålar
Bengt Broms
1965 | 10:— | 19 | Damping of stress waves in piles during
driving. Results from field tests
Gunnar W Fjellkner — Bengt B Broms
1972 | 30:— |
| 7 | Beräkning av vertikala pålars bärförmåga
Bengt Broms
1965 | 10:— | <i>Särtryck och preliminära rapporter</i> | | |
| 8 | Provpålning mot släntberg vid Skansen
Lejonet, Göteborg
Waldemar Pejrud
1965 | 25:— | 1 | Allowable bearing capacity of initially bent
piles
Bengt Broms
Referat från pålkommitténs informationsdag
25 okt 1965 | |
| 9 | Inverkan av armeringsmängd, förspänning
och fallhöjd på sprickrisken hos betongpålar
vid slagning
Sven Sahlin
1965 | 15:— | | Provbelastning av påle slagen i lera och frik-
tionsmaterial
Gunnar Hellström | |
| 10 | Bärförmågan hos armerade betongpålar
slagna till fast bergbotten
Hjalmar Granholm
1967 | 20:— | | Knäcklasten för momentstyvt skarvade pålar
i lera
Krister Cederwall
1965 | 10:— |
| 11 | Bärförmågan hos pålar slagna till släntberg
Bengt Broms
1965 | 15:— | 2 | Provbelastning av stödpålar av betong inom
östra Nordstaden, Göteborg. Delrapport
Gunnar Hellström
1965 | 5:— |
| 12 | Dynamisk draghållfasthet hos modellpålar
av oarmerad betong. Resultat av orienterande
försök
Sven Sahlin — Lars Hellman
1966 | 15:— | 3 | Bärighet hos släntberg vid statisk belastning
av bergspets. Resultat av modellförsök
Sven-Erik Rehnman
1966 | 5:— |
| 13 | Pålgruppers bärförmåga
Bengt Broms
1967 | 10:— | 4 | Om pålslagning och pålbärighet (Informa-
tionsdagen 14/11 1966)
1967 | Slut |