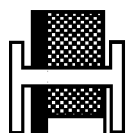


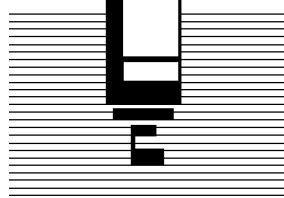
# PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research



## Vibratorers användnings- möjligheter vid drivning av pålar och spont

K. RAINER MASSARSCH



Linköping 2000

---

rapport 99



# PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

rapport 99

## Vibratorers användningsmöjligheter vid drivning av pålar och spont

K. RAINER MASSARSCH

Linköping 2000

|                       |                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rapport</b>        | Pålkommisionen<br>581 93 Linköping                                                                                                                                                                                                |
| Beställning           | Statens geotekniska institut<br>Biblioteket<br>Tel: 013-20 18 04<br>Fax: 013-20 19 14<br>e-post: <a href="mailto:info@swedgeo.se">info@swedgeo.se</a><br>internet: <a href="http://www.byggforum.com/pk">www.byggforum.com/pk</a> |
| ISSN                  | 0347-1047                                                                                                                                                                                                                         |
| ISRN                  | IVA/PAL/R--00/99--SE                                                                                                                                                                                                              |
| Redigering och layout | Statens geotekniska institut                                                                                                                                                                                                      |
| Upplaga               | 600 ex                                                                                                                                                                                                                            |
| Tryck                 | Roland Offset AB, Linköping, september 2000                                                                                                                                                                                       |

# Förord

Den i Sverige vanligaste djupgrundläggningsmetoden är slagna betongpålar. För denna påltyp har med åren utvecklats ett komplett installationssystem. Slagning med frifallshejare eller hydraulhejare är en mycket effektiv metod i Sveriges geologiska formationer. Trots detta är det av betydelse att bevaka utvecklingen inom pålområdet även i andra länder, för att se om där vanliga metoder även kan användas i Sverige. Pålkommisionen tillsatte därför arbetsgruppen ”Vibropålar”, med Connie Olsson, SGI som projektledare och Rainer Massarsch som utredningsman.

Målsättningen med projektet var att sammanställa erfarenheter från pål- och spontningsprojekt i andra länder, där vibrationsdrivning är vanligare än i Sverige. Dessutom skulle eventuella användningsmöjligheter i Sverige studeras. Arbetet påbörjades under början av nittiotalet och en preliminär rapport togs då fram. Vid denna tidpunkt påbörjades i Sverige och utomlands flera omfattande forskningsprojekt och fältstudier beträffande användningen av vibratorer vid spont- och påldrivning, samt för andra typer av grundläggningsarbeten.

Institutionen för Anläggning och Miljö, KTH påbörjade 1994 ett av SBUF och Byggforskningsrådet finansierat forskningsprojekt beträffande vibrationsdrivning av pålar. Samtidigt startades ett europeiskt forskningsprojekt (SIPDIS), som omfattande teoretiska och praktiska studier i fält för att undersöka jordars dynamiska motstånd och vibrationsutbredning i samband med vibrationsdrivning av sponter. Detta forskningsprojekt finansieras av företagen British Steel, Profil ARBED och Krupp Hoesch International, samt genom ett anslag från europeiska kol- och stålunionen, ECSC. Författaren har som projektledare, samt genom medverkan i jordpackningsprojekt, samlat praktisk och teoretisk erfarenhet som kan tillämpas på vibrationsdrivning av pålar. Ett flertal examensarbeten har utförts vid KTH i samband med MRC-packning för stora infrastrukturprojekt i Hong Kong, Singapore och Thailand.

Syftet med denna rapport är att förklara grundläggande begrepp och principer som är viktiga för en effektiv användning av vibratorer vid pålinstallation. Huvudvikt har lagts på beskrivning av vibreringstekniken samt dess praktiska tillämpning. Erfarenheter från främst Mellaneuropa har sammanställts för att underlätta val av lämplig vibrator för spont- eller påldrivning. I rapporten diskuteras också faktorer som kan användas vid andra typer av grundläggningsarbeten.

Ett flertal företag har möjliggjort fältundersökningar i samband med jordpacknings- och spontningsprojekt, samt bidragit till examensarbeten: B+B Ground Treatment, Hong Kong, Krupp TBT (Müller Bautechnik)/Krupp MTS, Franki Grundbau, Tyskland samt Soilex AB och Stabilator AB. Den elektroniska processstyrningsenheten har utvecklats i nära samarbete med företaget Loster GmbH. Ett särskilt tack riktas till Peter Loster och Erik Westberg för det stimulerande samarbetet.

Många personer har medverkat vid olika undersökningarna och diskuterat resultaten från fältförsöken, bl. a. Anders Lindgren, MCIT, Dr. Anders Bodare och Kenneth Viking, Jord och bergmekanik, KTH samt Katarina Eriksson, Skanska. Synpunkter har lämnats av Connie Olsson, SGI och Erik Westberg, Soilex AB samt av Rolf Rosén, Golder Grundteknik.

Värdefulla synpunkter har också lämnats av Pålkommisionens remissgrupp, bestående av Lars Erixon, Hercules, Carl-John Grävare, Pile Dynamics Europe, Dr. Leif Jendeby, NCC Teknik och Jan Rommel, Skanska Teknik samt av Rolf Rosén, Golder. Jan Lindgren, SGI, har varit ansvarig för redigeringen av rapporten och visat stort tålamod och kompetens.

Till sist ett stort tack till alla entusiastiska examensarbetare som i ”fjärran land” och under ibland svåra arbetsförhållanden – inte minst värmen – har genomfört värdefulla undersökningar.

Stockholm i januari 2000

K. Rainer Massarsch



# Innehållsförteckning

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Förord</b>                                                                  |    |
| <b>Summary</b> .....                                                           | 6  |
| <b>Sammanfattning</b> .....                                                    | 7  |
| <b>1. Inledning</b> .....                                                      | 9  |
| <b>2. Vibratorers funktionssätt</b> .....                                      | 11 |
| Vibreringsutrustning .....                                                     | 11 |
| Grundläggande begrepp .....                                                    | 13 |
| Vibratorernas utveckling .....                                                 | 13 |
| Första vibratorgenerationen .....                                              | 13 |
| Andra vibratorgenerationen .....                                               | 14 |
| Tredje vibratorgenerationen .....                                              | 15 |
| Fjärde vibratorgenerationen .....                                              | 18 |
| <b>3. Elektronisk processtyrning</b> .....                                     | 19 |
| <b>4. Vågrörelse i påle och spont</b> .....                                    | 22 |
| <b>5. Jordmotstånd vid vibrering</b> .....                                     | 25 |
| Allmänt .....                                                                  | 25 |
| Mantel- och spetsmotstånd .....                                                | 25 |
| Mantelmotstånd i friktionsjord .....                                           | 26 |
| Mantelmotstånd i kohesionsjord .....                                           | 26 |
| Spetsmotstånd i friktionsjord .....                                            | 26 |
| Spetsmotstånd i kohesionsjord .....                                            | 27 |
| Empiriska samband för val av vibrator kapacitet .....                          | 27 |
| Teoretiska samband .....                                                       | 27 |
| Resonanseffekter i jord .....                                                  | 29 |
| <b>6. Praktiska synpunkter vid vibrering av spont och pålar</b> .....          | 30 |
| Modern vibrationsutrustning .....                                              | 30 |
| Praktiska aspekter .....                                                       | 30 |
| Åtgärder som underlättar vibrodrivning .....                                   | 30 |
| Vertikal förspänning eller statisk belastning av vibratör .....                | 31 |
| Vattenspolning .....                                                           | 31 |
| Avlastningsborrning .....                                                      | 31 |
| Försprängning (Microfracturing) ....                                           | 32 |
| <b>7. Exempel på praktisk användning av vibratorer vid grundläggning</b> ..... | 33 |
| Vibrerade slitsväggar .....                                                    | 33 |
| MRC – Resonanspackning .....                                                   | 34 |
| Packningsdon .....                                                             | 34 |
| Elektronisk processtyrning vid jordpackningen .....                            | 35 |
| Vibrerade pålelement .....                                                     | 35 |
| Vibrerad betongnål .....                                                       | 35 |
| Vibrerad SOILEX-påle .....                                                     | 36 |
| Rasterpålspets för vibrerad påle .....                                         | 37 |
| <b>8. Slutsatser</b> .....                                                     | 38 |
| <b>9. Litteratur</b> .....                                                     | 39 |

# Summary

**The main objective** of the report is to provide background information, which can be of benefit when planning foundation projects where vibrators are used. The limited practical experience regarding the use of vibrators for pile installation projects in Sweden is presented and discussed. One major limitation of vibratory driving has been the lack of guidelines for vibratory driving at refusal. Therefore, in many cases, vibratory-driven piles have been re-driven using impact hammers. This procedure is expensive and time-consuming.

**An overview** of the development of vibrators and of modern vibratory driving equipment is presented. Recently, vibrators with variable frequency and vibration amplitude (static moment) have been introduced. These powerful machines offer new possibilities to adapt the driving process to the varying geotechnical, geodynamic and environmental conditions, which is of particular importance for foundation projects in built-up areas. With the aid of electronic process control equipment, which uses information gathered from sensors on the vibrator equipment and in the ground, it is possible to monitor and optimise the driving process. Compared to conventional impact hammers, it is possible to adapt the installation process by changing the vibration frequency and displacement amplitude.

**A hypothesis** is presented explaining the mechanism, which facilitates vibratory driving in granular soils. During vibratory driving, vertical as well as horizontal vibrations are generated at the interface between the pile and the surrounding soil. Horizontal vibrations are most pronounced in soils with a high friction angle. At each downward cycle, the horizontal vibration component reduces the horizontal stress acting along the pile shaft. This effect decreases the shaft resistance. In cohesive soils, this effect is small as the undrained shear strength is independent of the normal pressure.

**An important factor** in the case of vibratory driving is the operating frequency. When resonance occurs between the vibrating pile and the surrounding soil, ground vibrations are amplified significantly. At the same time, the penetration rate of the pile decreases as the relative displacement between the vibrating pile and the surrounding soil is reduced to a minimum. Resonance amplification can be used to increase the soil compaction effect.

**Special emphasis** has been placed on the discussion of parameters, which are of significance for the shaft and tip resistance of piles during vibratory-driving. Empirical and theoretical methods are presented which permit the estimation of required vibrator capacity.

**Different methods** are available in combination with vibratory driving which reduce the soil resistance and decrease vibration propagation to the surroundings. For example, pre-loading of the vibrator by line pull or static weights, pre-boring, water jetting or pre-blasting can be used. Further, practical aspects of importance for the planning and implementation of project using vibrators, are discussed.

**Examples** are given of the application of vibratory equipment for different types of foundation projects, such as vibrated slurry walls or resonance compaction according to the MRC method. These methods take advantage of the new possibilities which modern electronic process control offers for project monitoring and optimisation of a project.

**Finally**, new pile installation concepts are presented, which were particularly developed for vibratory driving, such as vibrated conical concrete elements, the vibrated SOILEX pile and an enlarged pile base.



# Sammanfattning

**Rapporten har som målsättning** att ge bakgrundsinformation som kan vara av nytta vid planering av grundläggningsprojekt där vibratorer används. Den begränsade erfarenheten från pålningsprojekt där vibratorer har använts i Sverige presenteras och diskuteras. En svårighet vid användning av vibratorer för pålningsarbeten har varit att det saknas anvisningar för stoppvibrering. Därför är det vanligt att efterslå vibrerade pålar med fallhejare, som är både kostnadskrävande och tidsödande.

**Vibratorers utveckling** beskrivs ur ett historiskt perspektiv, samt de komponenter som ingår i modern vibrationsutrustning. Under senare tid har vibratorer med variabel frekvens och svängningsamplitud (statiskt moment) börjat användas. Dessa erbjuder nya möjligheter att anpassa vibrationsdrivningsförloppet till de geotekniska, geodynamiska och miljömässiga förutsättningarna, särskilt vid arbeten i bebyggda områden. Med hjälp av elektronisk processtyrning, där information samlas in från sensorer på vibrationsutrustningen samt i marken eller på byggnader, kan vibreringsprocessen övervakas och optimeras. Vid påslagning med fallhejare kan endast fallhöjden varieras. Hos moderna vibratorer kan frekvens och svängningsamplitud anpassas under hela installationsprocessen, så att optimal drivning erhålls.

**En hypotes** presenteras som förklarar varför vibrationsdrivning är mycket effektiv i friktionsjord. När pålen vibreras ner i jorden uppstår ett vågfält omkring pålen, med vertikala samt horisontella svängningskomponenter. Variationen av den horisontella svängningsamplituden medför att mantelfriktionen mellan pålen och jorden minskar. Vid varje nedåtgående pålrörelse avlastas horisontaltrycket mot pålskaftet varigenom mantelfriktionen minskar. I kohesionsjord är denna effekt försumbar, eftersom den odränerade skjuvhållfastheten är oberoende av normalspänningen.

**Vibrationsfrekvensen** är av stor betydelse vid vibrationsdrivning. När resonans uppstår mellan den vibrerande pålen och de omgivande jordlagren förstärks markvibrationerna. Den relativa rörelse mellan pålen eller sponten och jorden reduceras och nedträngningshastigheten avtar. Resonansförstärkningen av markvibrationer kan utnyttjas för att öka jordpackningseffekten.

**Särskild uppmärksamhet** har ägnats åt diskussion av olika vibrationsparametrar som inverkar på en påles mantel- och spetsmotstånd i olika jordarter. Empiriska och teoretiskt underbygga samband presenteras med vars hjälp den erforderliga vibratorkapaciteten kan uppskattas.

**Olika metoder** kan användas i kombination med vibrationsdrivning för att minska jordmotståndet samt för att reducera svängningsutbredningen till omgivningen. Som exempel kan nämnas förspänning, avlastningsbormning med jordskruv, vattenspolning eller förspänning. Dessutom diskuteras praktiska aspekter som bör beaktas vid planering av grundläggningsprojekt där vibratorer används.

**Exempel** på andra användningsmöjligheter vid grundläggningsarbeten diskuteras, t. ex. installation av vibrerade slitsväggar eller djuppackning enligt MRC-metoden. Därav framgår betydelsen av elektronisk processtyrning och projektövervakning för att nå optimala resultat.

Till sist presenteras några nya **tillämpningsmöjligheter** för vibrerade pålar. Som exempel kan nämnas vibrerade koniska betongelement för jordförstärkning, vibrerade SOILEX-pålar samt en förstorad pålspets som har utvecklats för vibrationsdrivning.



# 1. Inledning

Vibratorer används i Sverige i ökande utsträckning, men huvudsakligen för installation av spont, och då främst i friktionsjord. Under de senaste 10 åren har maskintekniken utvecklats snabbt, särskilt i Europa. Idag erbjuder flera olika tillverkare nya, kraftfulla vibratorer och kringutrustning för effektiv och skonsam installation av spont och pålar eller för lösning av andra grundläggningsproblem. Som exempel kan nämnas installation av stål-rörs- och betongpålar eller djuppackning av friktionsjord samt installation av vibrerade slitsväggar. Detta möjliggörs genom hydrauliska vibratorer med variabel frekvens och amplitud, där vibrationsprocessen kan styras och övervakas elektroniskt. När vibratorer används på rätt sätt åstadkoms en skonsam och effektiv installation, som kan anpassas till de specifika geotekniska förutsättningarna. Trots de speciella geologiska förhållandena i Sverige, som skiljer sig från de i Mellaneuropa, borde i tätbebyggda områden modern vibreringsteknik vara konkurrenskraftig, särskilt vid spont- och pålningsarbeten i friktionsjord.

Svenska erfarenheter från vibrodrivning av pålar eller spont är begränsade. Eftersom pål- och spontslagning i Sverige tidigare utfördes till övervägande del med fallhejare saknas väldokumenterad information från projekt eller fullskaleförsök. Den mest omfattande sammanställningen av projekt, där vibrohejare användes för spont- och påldrivning, har genomförts av Eresund (1977). Under denna tidsperiod fanns huvudsakligen vibratorer med konstant frekvens, som arbetade inom frekvensintervallet 15 – 25 Hz.

Vibrohejare samt kringutrustning (kraftagregat, gejder och basmaskin etc.) är dyrare än fallhejare. Därför måste drivningseffektiviteten vara högre för att metoden skall vara ekonomisk. Neddrivningshastigheten ligger i friktionsjord generellt omkring 10 m per minut och är ofta mer än dubbelt så hög som vid slagning med fallhejare. Vid uppdragning av spont eller pålrör är vibrohejaren klart överlägsen andra metoder. Dessutom är vibrohejaren tystare och miljövänlig. Normalt vibreras spont och pålar fast kopplade till hejaren, men då uppstår dragvågor som kan framkalla drag-sprickor i betongpålar. I Sverige har pålar i

vissa fall installerats utan fast koppling till pålen. Hejare har varit försedd med en huv som träs över pålskallen. Om vibratorn vilar fritt på pålskallen kan slagningen bli oregelbunden när pålspetsen når ett fast jordlager eller berg. Hejaren släpper då kontakt med pålskallen och studsar upp flera decimeter. Detta kan leda till skador på pålen samt ökade påfrestningar i vibratorn. För att minska denna effekt används ibland ett mjukt mellanlägg. Det är uppenbart att vibratorn kan skadas när den tillåts studsa på pålskallen.

En begränsning av vibrationsdrivning är att det saknas regler för bedömning av pålars bärförmåga, eftersom konventionella stoppslag-ningsregler inte kan tillämpas. Eresund (1977) har funnit att en nedträngningshastighet i sand av mellan 15 – 50 mm/min vid slutvibrering ofta ger samma bärförmåga som hos slag-na pålar. Eriksson et al. (1979) redovisade erfarenheter från påldrivning för en torrdocka i Gdynia, Polen. Sjutton meter långa betongpå-lar (kantlängd 340 mm) installerades med 5 tons fallhejare samt vibrator av typ Tomen VM2-5000A (centrifugalkraft 670 kN). Påla-rna slogs genom lös, postglacial svämsand ner till ett fast glacialt ler- och sandlager. I första steget slogs pålarna ner i friktionsjord som mantelbärande pålar. Man fann att brottlasten av den vibrationsdrivna pålen var endast 60 % av pålen slagen med fallhejare. Det konstaterades att vibrodrivningen inte packade frik-tionsjorden på samma sätt som hejarslagning-en. Sedan drevs pålarna ytterligare 5 m, där spetsmotståndet var dominerande. Spetsmot-ståndet var i båda fall av samma storleksord-nung. Däremot var mantelmotståndet endast ca 60 % för vibrerad påle jämfört med slagen påle.

Schaktning i silt under grundvattenytan är ett speciellt problem, särskilt i Norrlands kust-område. Westin (1978) har därför undersökt vibrodrivning av tunna stålprofiler i siltiga, vattenmättade jordlager, som kan placeras i ett uppgrävt dike. Vibrationsdrivning av tunna stålprofiler är betydligt skonsammare än slag-nung med fallhejare. En pilotstudie genomför-des som omfattade modellförsök i laboratoriu-m samt fältförsök i mindre skala. Undersök-ningen visade att vibrodrivning kan vara

mycket effektiv, men att installationsförfarandet måste utföras med vibratorer där centrifugalkraft och frekvens kan anpassas till de varierande jordförhållanden. En tillräcklig reduktion av siltens skjuvhållfasthet sker först när vibratorn når en frekvens av 35 – 50 Hz.

Under senare tid har intresset för vibrationsdrivning av spont och pålar ökat. Viking (1997) genomförde en omfattande litteraturstudie av parametrar som är av betydelse för jordmotståndet. Viking (1998) genomförde också laboratorieförsök med modellpålar i sand för att undersöka olika faktors inverkan på drivningsmotståndet. Persson (1999) genomförde fältförsök med en resonansfri hejare för att undersöka drivbarheten hos en spont.

## 2. Vibratorers funktionssätt

### VIBRERINGSUTRUSTNING

Trots den snabba utvecklingen av vibrerings-tekniken under senare tid och den ökande användningen av nya, kraftfulla vibratorer i många länder är fortfarande förståelsen för de faktorer som styr vibrationsdrivningen av pålar bristfällig. För att bättre kunna förstå vibreringsprocessen är det nödvändigt att beakta alla samverkande faktorer, d.v.s. vibratorns dynamiska egenskaper, överföringen av vibrationsenergin till och genom pålen, samverkan mellan den vibrerande pålen och den omgivande jorden samt vågutbredningen i jordlagren, samt byggnader på eller i jord, *figur 1*.

Vibratorer utvecklades först i Ryssland på 1930-talet och används där sedan mitten av 1950-talet rutinemässigt vid grundläggningsarbeten. De första vibratorerna var elektriska och tunga. Nuförtiden förekommer i Europa nästan uteslutande hydrauliskt drivna vibratorer, som består av följande huvudkomponenter, *figur 2*,

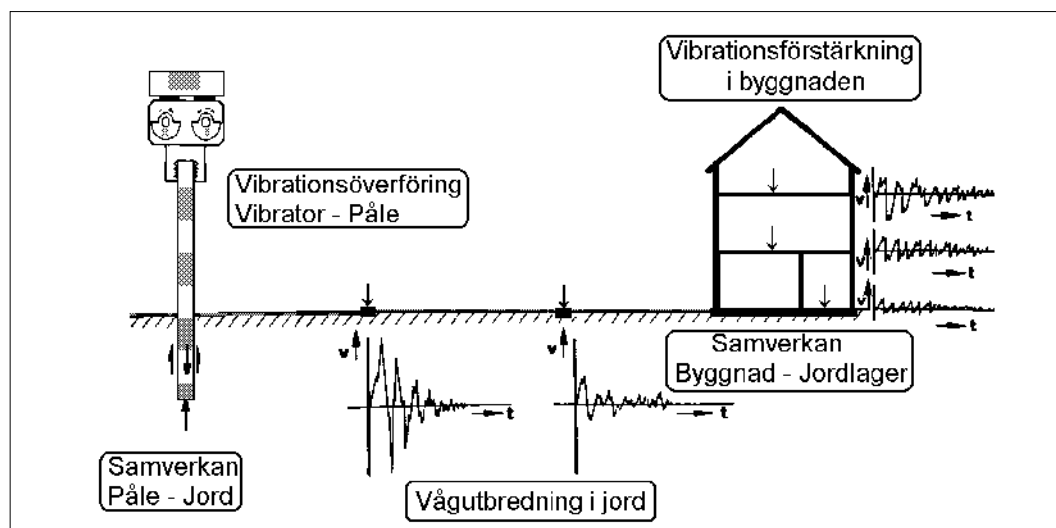
- excentermassorna,
- gripklo,
- fjädrar (elastomerer),
- den statiska massan.

De hydrauliska motorernas låga vikt och storlek innebär dessutom en ur dynamisk synvinkel gynnsam viktfordelning jämfört med elektriska vibratorer.

Fjädrarna utgör förbindelsen mellan den vibrerande delen (excentermassorna, motorerna och lagren samt vibratorhuset) och den statiska delen (upphängningen och de statiska massorna). De statiska massorna ovanpå fjädersystemet har till uppgift att öka penetrationsförmågan, men skall också säkerställa en lugn drift genom dynamisk avstämning av vibreringsenheten. Drivningsutrustningen består av följande huvudkomponenter:

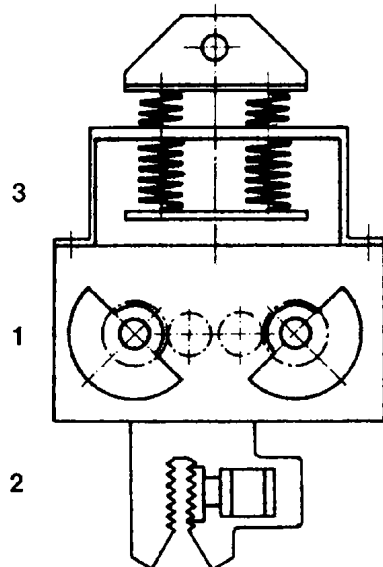
- kraftaggregatet
- hydrauliska ledningar
- vibratorn
- kontrollpanelen
- pålen
- pålkranen

*Figur 3a* visar en principskiss av vibrationsdrivningsutrustningen och *figur 3b* en typisk bild av den maskinella utrustningen för påldrivning med hjälp av vibrator. För att uppnå ett ur teknisk och ekonomisk synvinkel optimalt drivningsresultat bör de dynamiska egenskaperna hos vibratorn, pålen och det aktuella jordlagret anpassas till varandra. Vibratorer är komplicerade arbetsredskap som måste skötas och kontrolleras med jämna tidsintervall. Kraftaggregatet, de hydrauliska ledningarna, vibratorns motorer samt excentermassornas lager bör inspekteras kontinuerligt för att upptäcka slitage och undvika driftstörningar.



*Figur 1.*  
Svängningsenergens utbredning från vibratorn genom pålen till den omgivande jorden.

*Figure 1.*  
Propagation of vibration energy from the vibrator along the pile and into the surrounding soil.



Figur 2.  
Principbild av  
en vibrator.

Figure 2.  
Vibrator with main  
components

a) Komponenter av en vibrator.

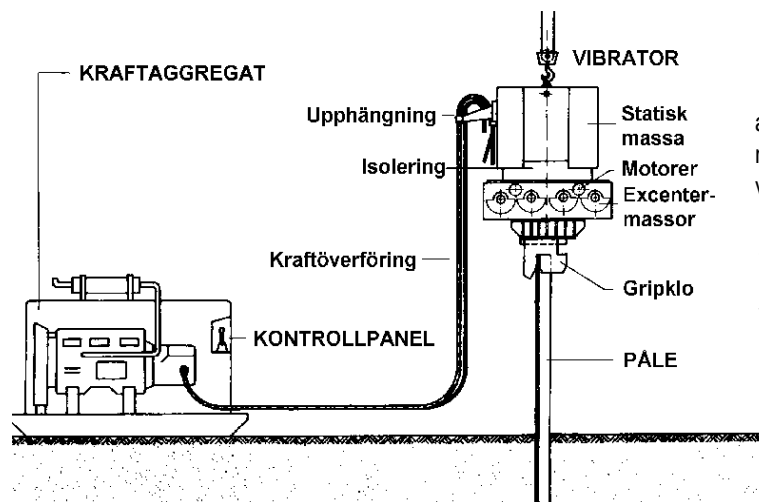
1. Excentermassor
2. Gripklo
3. Fjädrar

a) Vibrator components.



b) Hydraulisk vibrator typ Müller MS 50.

b) Hydraulic vibrator, type MS 50.



a. Principskiss av de  
maskinella komponenterna  
vid vibrationsdrivning.

a. Principle sketch of  
machine components for  
vibratory driving.

b. Vibrationsdrivning  
av stålbalk med  
hydraulisk vibrator.

b. Vibratory driving  
of steel beam using  
hydraulic vibrator.



Figur 3.  
Utrustning för  
vibrationsdrivning  
av påle.

Figure 3.  
Equipment for  
vibratory driving  
of steel pile.

## GRUNDLÄGGANDE BEGREPP

Vibratorns svängningsrörelse åstadkoms av i par anordnade excentermassor som roterar med samma hastighet men i motsatt riktning. Vibratorn försätts då i vertikal svängningsrörelse eftersom centrifugalkraftens horisontella komponent upphävs. Vridmomentet  $M$ , som har stor betydelse vid vibrodrivning, påverkas av de roterande massorna  $G_m$  och avståndet till rotationsaxeln  $r$

$$M = \sum G_m \cdot r \quad (1)$$

Vridmomentet, också kallat det ”statiska momentet”, är oberoende av massornas rotationshastighet. Centrifugalkraften  $F_v$  är en funktion av vridmomentet  $M$  och vinkelfrekvensen  $\omega$  ( $2 \cdot \pi \cdot f$ , där  $f$  är rotationsfrekvensen)

$$F_v = M \cdot \omega^2 \quad (2)$$

En annan viktig parameter vid vibrodrivning i jord är förskjutningsamplituden  $s$ . I kombination med centrifugalkraften är förskjutningsamplituden ett mått på vibratorns drivningskapacitet. Om pålen hänger fritt under vibratorn utan kontakt med jorden, beror svängningsamplituden av vridmomentet  $M$  och den ”dynamiska massan”  $G_D$

$$s = M / G_D \quad (3)$$

där  $G_D = G_{\text{VIBRATOR}} + G_{\text{GRIPKLO}} + G_{\text{PÅLE}}$

I kohesionsjord är det fördelaktigt att arbeta med stor förskjutningsamplitud. Därför skall den dynamiska massan vara så liten som möjligt. När pålen vibreras i jord minskar förskjutningsamplituden på grund av vibreringsmotståndet. Vibreringsmotståndet åstadkoms av växelspelet mellan pålens mantel- och spetsmotstånd. Under förutsättning att pålens spets inte har vibrerats fast i ett hårt jordlager, kan svängningsamplituden uppskattas enligt ekvation (4).  $s_p$ , där  $R_{\text{Mant}}$  är det dynamiska mantelmotståndet är

$$s_p = \frac{1}{G_D} \left( M - \frac{R_{\text{Mant}}}{\omega^2} \right) \quad (4)$$

Vid omfattande fältförsök har författaren observerat ett empiriskt samband mellan det dynamiska vibreringsmotståndet och sonderingsmotståndet från CPT-försök. Westerberg et al (1996) har beskrivit en metod för beräkning av pålars vibreringsmotstånd utifrån sonderingsresultat.

## VIBRATORERNAS UTVECKLING

### Första vibratorgenerationen

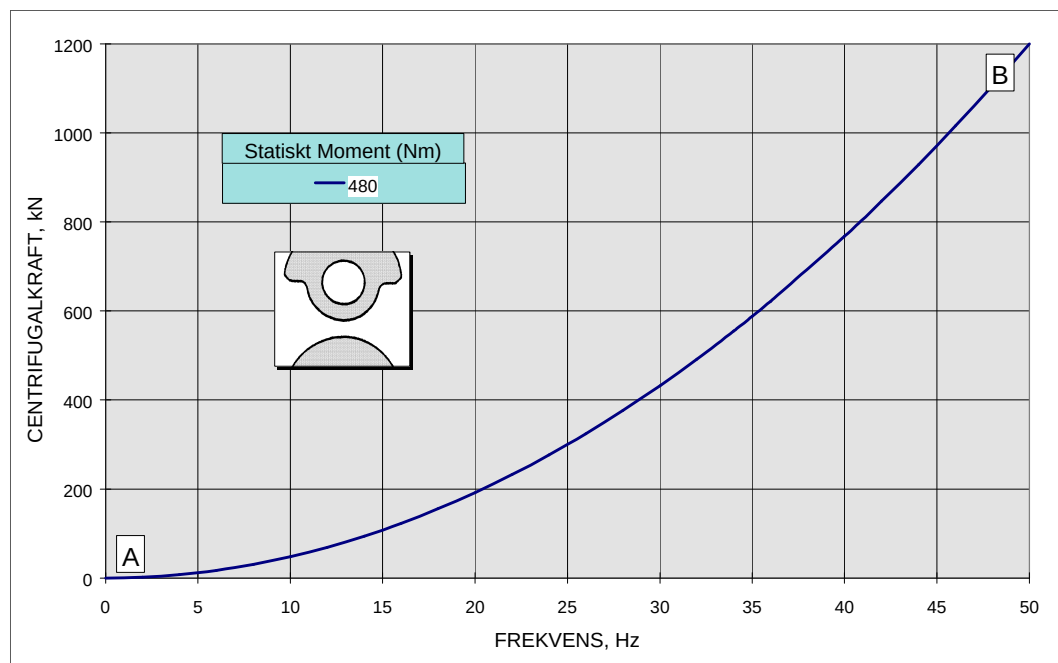
Vibratorerna har genomgått en betydande utveckling sedan de först introducerades för mer än sextio år sedan. Den äldsta typen (första generationen), som fortfarande används, har fasta excentermassor och konstant statiskt moment. Centrifugalkraften varierar genom ändring av massornas rotationshastighet, jfr *figur 4*. Vibratorn kan endast köras längs arbetskurvan A–B. Detta innebär att centrifugalkraften, som varierar med kvadraten av vibrationsfrekvensen, endast kan styras genom ändring av vibrationsfrekvensen. Eftersom en vibrators livslängd begränsas av slitaget på excentermassornas lager (högt varvtal minskar livslängden) är det naturligt att man ur driftsynpunkt vill arbeta med låg vibrationsfrekvens, som inte alltid är gynnsam ur drivnings- eller miljösynpunkt. Denna typ av vibrator används idag främst för lätta spontningsarbeten och kan monteras på lätt grävmaskin.

*Tabell 1* visar en sammanställning ur den internationella litteraturen av vibratorer med konstant statiskt moment, som fortfarande används i stor utsträckning. Maskinparametrarna är dock inte typiska för moderna vibratorer som används i Europa idag, utan anges här främst som referens.

En intressant utveckling är den så kallade resonanshejaren (”Bodine resonance pile driver”) som har använts i USA och England. Vibratorn arbetar med mycket hög frekvens så att en ”stående våg” alstras i pålen (pålen försätts i resonans). Svängningsamplituden är liten, av storleksordning 5 – 10 mm. Denna vibratortyp är dock mycket känslig och risken för skador och reparationer är stor, varför driftkostnaderna har varit för.

Figur 4.  
Första generationen – vibrator med konstant excentermassa (konstant statiskt moment) kan endast köras längs arbetskurvan A–B.

Figure 4.  
First vibrator generation – constant unbalance (constant static moment), which only can operate along working curve A–B.



Tabell 1.  
Exempel på egenskaper av vibratorer med konstant statiskt moment (efter Tomlinson, 1986).

Table 1.  
Characteristics of vibrators with constant static moment (from Tomlinson, 1986).

| TYP              | Min. Effekt (kW) | Frekvens (Hz) | Vibratormassa (kg) |
|------------------|------------------|---------------|--------------------|
| Bodine           | 740              | 0 - 135       | 10 000             |
| BSP VF 55        | 179              | 10 - 120      | 3 800              |
| Koehring-MKT V14 | 104              | 24 - 31       | 5 000              |
| Menck 44-15/30   | 250              | 25 - 50       | 9 600              |
| ICE 416          | 193 - 262        | 0 - 27        | 5 950              |
| Müller MS 120    | 400              | 17 - 36       | 9 600              |
| Schenck DR 60    | 250              | 17 - 39       | 7 200              |
| Tomen VM 2000A   | 40               | 18 - 30       | 2 530              |
| Vibro-Max        | 220              | 10 - 16       | 6 100              |

### Andra vibratorgenerationen

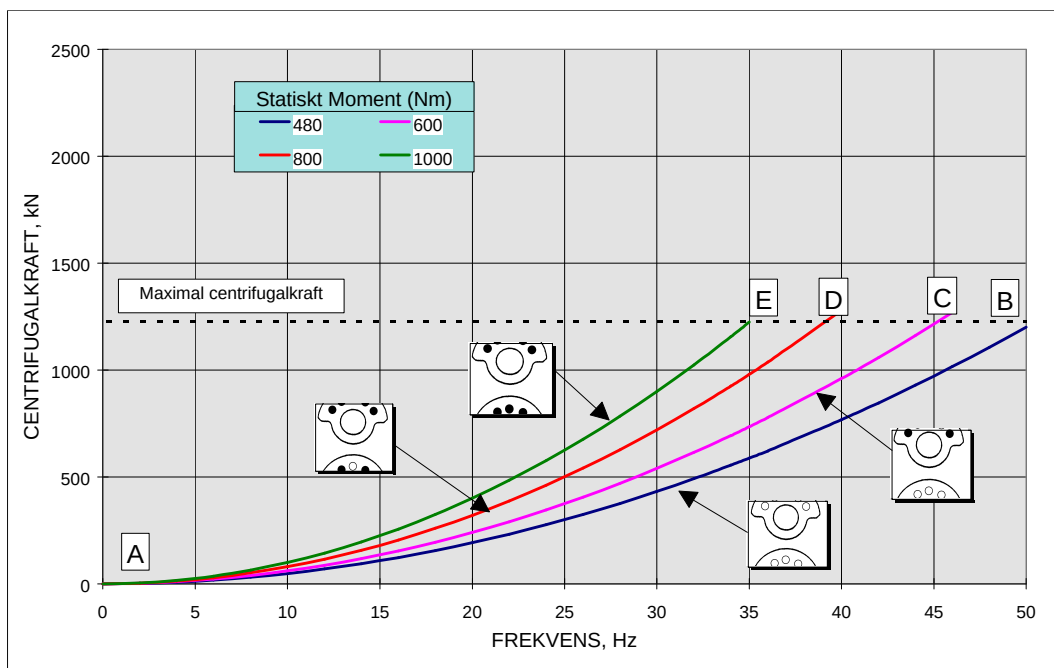
Nästa steget i utvecklingen (andra generationen) var att förse vibratorer med variabla excentermassor, så att det statiska momentet kunde ändras stegvist. Det statiska momentet kan dock endast ändras när vibratoren är avstängd, genom inskjutning eller borttagning av tilläggsmassor. Detta arbete är också tidskrävande. Genom minskningen av excentermassorna kan vibratorns frekvensområde ökas, *figur 5*. Denna vibratortyp kallas också "högfrekvensvibrator" (HF) och förses ibland med speciell lagersmörjning och oljekylning för att minska slitage. Varje statiskt moment motsvarar en driftkurva, A–B, A–C, A–D eller A–E. För att kunna anpassa driftfrekvensen ändras flödet genom kraftaggregatets varvtal.

Vibratorer med variabelt statiskt moment har fördelen att de bättre kan anpassas till olika geodynamiska förutsättningar. När en högre vibrationsfrekvens erfordras kan några av

excentermassorna tas bort (vibratoren måste dock stängas av). När excentermassorna reduceras kan vibratoren köras med högre frekvens (upp till 40 Hz) utan att axlarna överbelastas. Vid behov av ökad vibrationsamplitud kan lägre frekvens användas och excentermassorna ökas. De flesta konventionella spont- och pålningsprojekt utförs för närvarande med HF-vibratorer. Dessutom används specialanpassade vibratorer för jordpackningsprojekt och installation av vibrerade slitsväggar. Den maskinella utrustningen är robust och driftsäker.

För mera krävande vibreringsprojekt har kraftaggregat med högre kapacitet utvecklats. Det är viktigt att kraftaggregatet kan mata vibratoren med tillräckligt högt flöde så att varvtalet kan bibehållas även vid hög belastning (hård drivning). Därför installeras ofta en särskild pumpkrets som möjliggjorde steglös variation av vibratorfrekvensen genom ändring av pumpflödet.





Figur 5.  
Andra generation –  
vibratorer med varia-  
bel excentermassa.

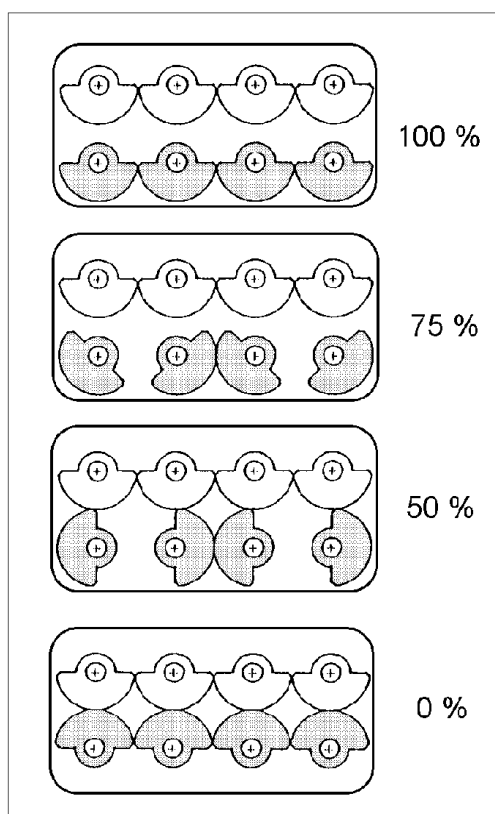
Figure 5.  
Second vibrator  
generation –  
vibrator with variable  
unbalance.

En begränsning av första och andra generationens vibratorer är att dessa under uppstartningsfasen (från 0 till drivningsfrekvensen) passerar genom hela frekvensområdet. Då framkallas oundvikligen resonanseffekter (vibrationsförstärkning), först i pålkranen, sedan i jordlagren eller närbelägna byggnader. Resonanseffekter är påfrestande för utrustningen, men kan också medföra sättningar i friktionsjord, skador eller störande vibrationer i närbelägna byggnader eller på installationer. Samma problem uppstår när vibratorn måste stängas av, men då i omvänd ordning.

### Tredje vibratorgenerationen

Den tredje generationens vibratorer har variabelt statistiskt moment och kallas ofta "nollamplitudsvibrator" (VAR). Excentermassorna är placerade i par på två nivåer. Figur 6 visar principen för denna vibratortyp, där det statiska momentet och därmed svängningsamplituden kan varieras kontinuerligt och godtyckligt under hela vibreringsprocessen.

Excentermassorna har anordnats på två ovanför varandra belägna axlar. Positionen av massorna på den nedre axeln kan med hjälp av en växellåda ställas in i förhållande till massorna på den övre axeln, varigenom det statiska momentet och därmed förskjutningsamplituden ändras. Under uppstartningsfasen roterar massorna med 180° fasförskjutning och svängningsamplituden är noll. När massornas fasskillnad ändras ökar svängningsamplituden (det statiska momentet), som når maximalvärdet när massorna roterar i fas. Innan vibratorn stängs av reduceras igen det statiska momentet så att svängningsamplituden blir försumbar.



Figur 6.  
Principen för amplitud-  
variabla vibratorer  
("nollamplitudsvibra-  
tor") vid olika faslägen  
av excentermassorna.

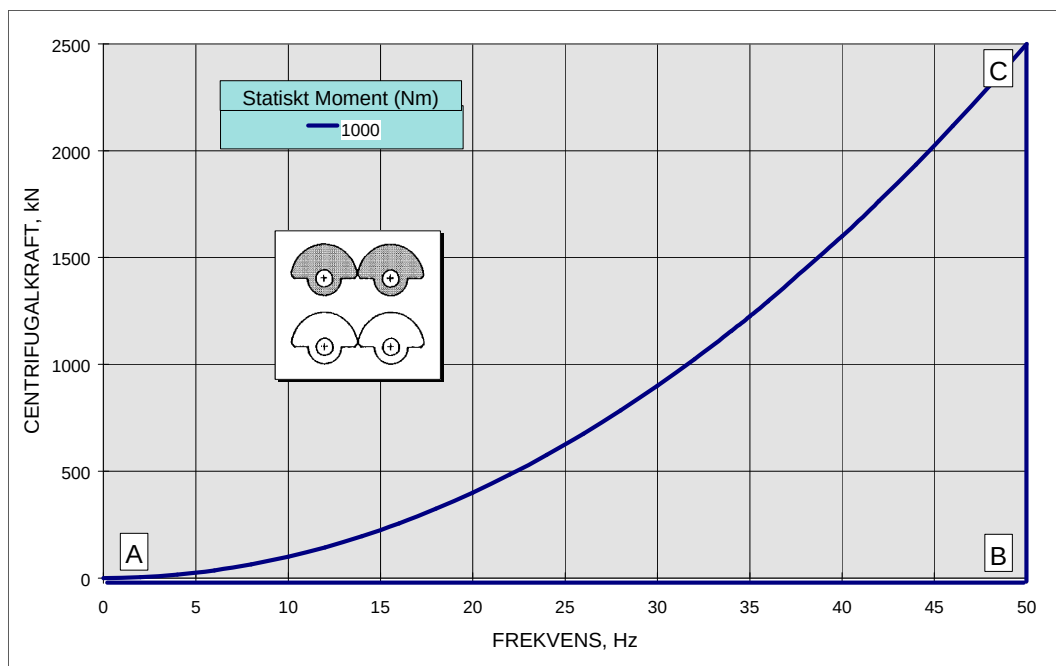
Figure 6.  
Principle sketch of am-  
plitude-variable vibra-  
tor ("zero-amplitude  
vibrator") in different  
operating phases.

Figur 7 visar arbetskurvan för en vibrator med variabel vibrationsamplitud, tredje generationens vibratorer. Vibratorn kan arbeta inom hela driftområdet A–B–C.

Figur 8 visar en högfrekvent, frekvensvariabel vibrator och en vibrator med variabelt statistiskt moment ("nollamplitudsvibrator"). Vibratorer med variabel frekvens och variabelt statistiskt moment har flera viktiga fördelar. Under uppstartningen och avstängningen av vibratorn undviks resonanseffekter. Då kan

Figur 7.  
Tredje generationen –  
”nollamplitudsvibrator”  
med arbetsområdet A-B-C inom vilket  
varje kombination av  
frekvens och centrifugalkraft  
kan uppnås.

Figure 7.  
Third vibrator generation –  
”zero amplitude vibrator”  
with working  
range along line A-B-C,  
along which frequency  
and centrifugal force  
can be adjusted.



Figur 8.  
Moderna vibratorer  
med variabel frekvens  
respektive variabel  
amplitud (statiskt mo-  
ment), jfr tabell 2.

Figure 8.  
Modern vibrators with  
variable frequency and  
variable amplitude  
(static moment), re-  
spectively, cf. Table 2.



a) Frekvensvariabel vibrator av typ Müller,  
MS 100 HF – andra generationen.

a) Müller, MS 100 HF – second vibrator  
generation.

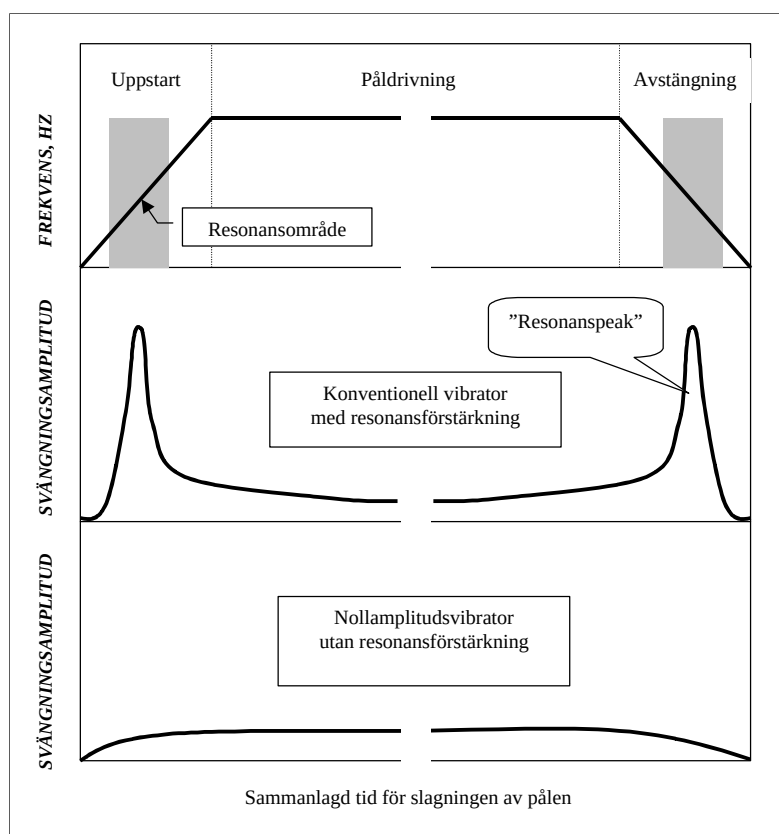


b) Nollamplitudsvibrator av typ Müller, MS-32 HF  
VAR – tredje generationen.

b) MS-32 HF VAR – third vibrator generation.

spontnings- och pålningsarbeten utföras även i vibrationskänsliga, tätbebyggda områden, där resonansförstärkning annars kan framkalla sättningar i jordlager eller besvärande vibrationer i byggnader eller byggnadsdelar (väggar, golv, installationer m m). Dessutom minskas påfrestningar på pålningsutrustningen (gejder, hydrauliska ledningar och kopplingar). En nackdel av denna vibratortyp är att vibratorns lager utsätts för stora belastningar, även när vibrationsamplituden är liten (vid 0-amplitud). Kontinuerlig service och underhåll är av stor betydelse för att säkerställa avbrottsfri drift.

Figur 9 visar svängningsamplituden (på markytan) vid vibrationsdrivning av en påle. Tre karakteristiska faser kan urskiljas: uppstart, påldrivning och avstängning. Den övre figuren visar variationen av vibratorfrekvensen under drivningsprocessen. Vid drivning med en konventionell vibrator med konstant statiskt moment framkallas resonansförstärkningseffekter när drivningsfrekvensen närmar sig egenfrekvensen av pålen/jordlagret. Många gånger uppträder denna resonansförstärkning inom frekvensintervallet 10 – 20 Hz. Därför är det angeläget att sponter eller pålar installeras med en frekvens som är högre än ca 25 Hz. Genom användning av en vibrator med



Figur 9.  
Principskiss av svängningsamplitudens variation vid konventionell och amplitudvariabel vibre-ring.

Figure 9.  
Principle sketch showing variation of vibration amplitude at conventional and amplitude-variable vibrating.

variabelt statiskt moment kan vibratorn startas upp till drivningsfrekvensen med mycket låg vibrationsamplitud, utan att resonanseffekter uppstår. Pål- eller spontdrivning kan sedan ske med den frekvens som ger bästa installations-

effekt och låga markvibrationer.

I tabell 2 redovisas några dynamiska parametrar för moderna, högfrekventa vibratorer av typ Müller, ICE och PTC. Nollamplitudsvibratorer används allt oftare vid arbeten i be-

| Vibratormodell | Maximal Centrifugalkraft (kN) | Frekvens (Hz) | Maximalt Vridmoment (kgm) | Förskjutningsamplitud (S = 2 s) (mm) | Dragkraft (kN) |
|----------------|-------------------------------|---------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------|
| MS 25 HF       | 750                           | 0 - 30        | 25                        | 17                                   | 280            |
| MS 50 HF       | 1500                          | 0 - 40        | 50                        | 22                                   | 500            |
| MS 100 HF      | 2500                          | 0 - 35        | 100                       | 26                                   | 600            |
| MS 200 H       | 4000                          | 0 - 25        | 190                       | 34                                   | 800            |
| MS 16 HF VAR   | 990                           | 0 - 39        | 0 - 16                    | 18                                   | 300            |
| MS 24 HF VAR   | 1480                          | 0 - 39        | 0 - 24                    | 15                                   | 400            |
| MS 32 HF VAR   | 1980                          | 0 - 39        | 0 - 32                    | 16                                   | 400 - 600      |
| MS 48 HF VAR   | 2960                          | 0 - 39        | 0 - 48                    | 19                                   | 600            |
| ICE 625        | 410                           | 0 - 41        | 6                         | 13                                   | 120            |
| ICE 420        | 1010                          | 0 - 33        | 23                        | 12                                   | 400            |
| ICE 823        | 2670                          | 0 - 38        | 46                        | 12                                   | 600            |
| ICE RF 14      | 0 - 810                       | 0 - 38        | 0 - 14                    | 10                                   | 240            |
| ICE 28 RF      | 0 - 1600                      | 0 - 38        | 0 - 28                    | 11                                   | 500            |
| ICE 46 RF      | 0 - 2670                      | 0 - 38        | 0 - 46                    | 12                                   | 600            |
| PTC 2320       | 1160                          | 0 - 38        | 20                        | 15                                   | 400            |
| PTC 2323       | 1350                          | 0 - 30        | 23                        | 14                                   | 400            |
| PTC 2330       | 1600                          | 0 - 30        | 27                        | 13                                   | 400            |
| PTC 2316 VM    | 928                           | 0 - 38        | 0 - 16                    | 0 - 15                               | 400            |
| PTC 2330 VM    | 1600                          | 0 - 38        | 0 - 27                    | 0 - 12                               | 400            |
| PTC 40 VM      | 1750                          | 0 - 33        | 0 - 40                    | 0 - 15                               | 400            |
| PTC 50 VM      | 1800                          | 0 - 30        | 0 - 50                    | 0 - 15                               | 400            |

HF: Högfrekvensvibratorer

VAR: Vibratorer med variabelt statiskt moment

Tabell 2.  
Exempel på dynamiska parametrar för frekvensvariabla vibratorer av typ Müller (MS), ICE och PTC (andra och tredje generationen).

Table 2.  
Example of dynamic parameters of frequency-variable vibrators of type Müller (MS), ICE and PTC (second generation).

byggda områden där omgivningspåverkan måste begränsas till ett minimum.

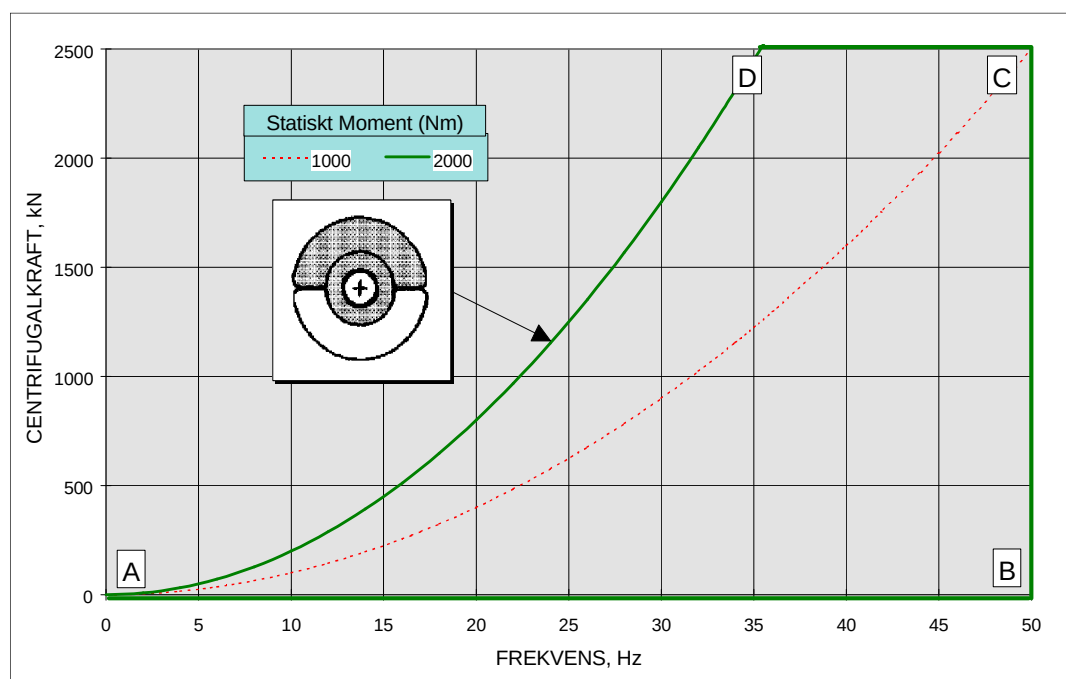
### Fjärde vibratorgenerationen

Den senaste utvecklingen på vibratorområdet (fjärde generationen) innebär att vibratorns statiska moment kan ändras kontinuerligt under drift genom förändring av excentermassornas position på samma axel. Hos dessa såväl frekvens- som amplitudvariabla vibratorer kan det statiska momentet ändras godtyckligt under hela vibreringsförloppet. Fördelen med denna vibratortyp är att arbetsområdet för vibrationsdrivningen utökas ytterligare, *figur 10*. När driftfrekvensen reduceras kan det statiska momentet ökas så att centrifugalkraften bibehålls även vid reducerat varvtal. Centrifugalkraften kan optimeras med avseende på driftfrekvensen och alla driftstadier inom driftområdet A–B–C–D kan uppnås, jämfört med nollamplitudsvibratorn som endast kan arbeta inom driftområdet A–B–C, jfr *figur 10*.

En praktisk fördel är att denna vibratortyp kan köras med minskad belastning på excentermassornas lager, jämfört med nollamplitudsvibratorn. Därigenom öppnas nya användningsmöjligheter vid t. ex. jordpackning, där packningen bäst kan utföras med stort statiskt moment och låg driftfrekvens. Anskaffningskostnaden hos dessa nya, amplitudvariabla vibratorer är relativt hög, medan driftsäkerheten och tillförlitligheten ibland ännu kan vara låg. Det är förmodligen enbart en tidsfråga tills amplitudvariabla vibratorer kommer till generell användning. Därmed erbjuds optimal kontroll över vibratorns drift vid olika grundläggningsproblem.

*Figur 10.*  
Fjärde generationen – vibrator med excentermassor på samma axel (amplitudvariabla vibratorer) med utökat drifts område A–B–C–D, jämfört med nollamplitudsvibrator med drifts område A–B–C.

*Figure 10.*  
Fourth vibrator generation – vibrator with unbalances on same shaft (amplitude-variable vibrator) with expanded operating range along A–B–C–D, compared with zero-amplitude vibrator with working range A–B–C.



### 3. Elektronisk processtyrning

Hos vibratorer av den första generationen var det inte möjligt att förändra inställningen av det statiska momentet (förskjutningsamplituden), vibrationsfrekvensen och därmed centrifugalkraften. Ofta var entreprenören tvungen att göra en kompromiss mellan maskintekniska krav (låg driftfrekvens för att öka livslängden), produktionskapacitet och omgivningspåverkan. Därför var det vanligt att slå sponter eller pålar med en vibrationsfrekvens omkring 20 Hz. Det är viktigt att beakta denna aspekt vid tolkning av erfarenheter från äldre pålningsprojekt.

Moderna vibratorer av den andra och tredje generationen kan styras och övervakas med hjälp av elektronisk utrustning. Till skillnad från pålslagning med fallhejare, där enbart slagenergin (främst fallhöjden) ändras, kan vid vibrationsdrivningen flera olika parametrar varieras samtidigt. Vibrationsfrekvensen och det statiska momentet kan anpassas under arbetets gång med avseende på de geodynamiska förutsättningarna (för att reducera spets- och mantelmotståndet), samt väljas så att den maskinella belastningen (t ex. vid resonans) begränsas till ett minimum. Därigenom har vibratorers användningsmöjligheter vid grundläggning ökat markant. Utvecklingen har skett i nära samarbete mellan maskintillverkare, forskare och användare/entreprenörer.

En annan viktig aspekt är de sjunkande kostnaderna för elektronisk utrustning (sensorer och datorer), samt robustheten och den ökande tillförlitligheten även under ogynnsamma yttre förhållanden. Datorer, sensorer och datalagringsutrustning kan installeras problemfritt i en konventionell pålkran eller grävmaskin. Stora datamängder kan lagras eller överföras i realtid från arbetsplatsen till kontoret. Därmed erbjuds möjligheten att på avstånd följa ett projekt. De viktigaste parametrarna vid användningen av vibratorer för grundläggningsprojekt (spont- och pålslagning, jordpackning eller installation av vibrerade slitsväggar) är:

- vibratorns frekvens
- svängningsamplitud
- oljetryck
- djup

- svängningshastighet på eller i marken (eller i en byggnad)
- tid
- mätpunktsbeteckning.

Dessutom kan annan projektinformation som datum, projektbeteckning, maskin- och vibratortyp, maskinförarens namn m m registreras. Beroende på projektets art och behov kan ett flertal andra parametrar mätas, som ljudnivån, injekteringstrycket och flödet vid vattenspolning eller injektering (vibrerade slitsväggar), temperaturen i vibratorn eller maskinens position. Mätvärden samlas i en konventionell dator. Med hjälp av den elektroniska registreringsutrustningen kan det genomförda arbetet dokumenteras och senare analyseras med avseende på:

- produktivitet (erfarenhet som kan användas som underlag vid framtida projektanbud)
- maskinbelastning/överbelastning och kapacitetsutnyttjande
- produktion (t. ex. problem eller avbrott)
- omgivningspåverkan (vid eventuella skadeståndskrav).

Utöver den passiva registreringen kan mätparametrarna användas för att optimera vibrationsprocessen. De registrerade mätvärden matas då in i ett elektroniskt processtyrningssystem, där de bearbetas och sedan visas för maskinföraren i realtid. Maskinföraren har så möjlighet att anpassa installationsprocessen med ledning av den insamlade informationen.

Den mest avancerade tillämpningen är att direkt styra vibratorns funktion med ledning av de uppmätta värden. Datorn programmeras med information enligt vilken vibrationsdrivningen, jordpackningen eller vibrationsinjekteringen skall utföras. Uppmätta värden jämförs med förutbestämda parametrar. Sedan styrs vibratorn på elektronisk väg så att arbetet utförs optimalt. En vanligt förekommande tillämpningen vid spont- och påldrivning är att variera vibrationsfrekvensen så att resonansförstärkning i jordlager eller byggnader undviks. Ett liknande förfarande används vid resonanspackning enligt MRC-metoden, som

beskrivs i ett senare avsnitt. I *figur 11* visas principen av den elektroniska processtyrningen vid påldrivningen.

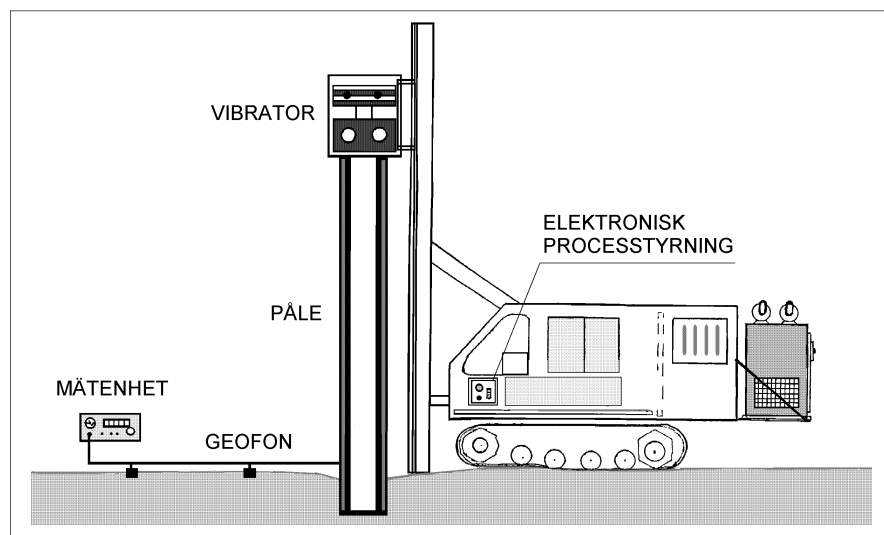
*Figur 12* visar den elektroniska processtyrningen som används vid vibrationsdrivning av pålar och sponter eller för MRC-packning. Till höger visas olika mätparametrar i realtid, som tiden, påldjupet, oljetrycket, markens svängningshastighet, den dominerande vibrationsfrekvensen m m. Till vänster finns instruktionspanelen, där maskinföraren informeras med lysdioder. Pilar visar maskinföraren när vibrationsfrekvensen skall höjas eller sänkas, när och hur snabbt pålen eller packningsdonet skall sänkas ner eller dras upp.

Den i datorn lagrade informationen kan bearbetas med hjälp av speciell mjukvara som underlättar analysen av det stora antalet mätvärden. *Figur 13* visar detaljregistreringen av vibrationsparametrar vid installation av en stålrörspåle (diameter 30 cm) i sand. Pålen har vibrerats med en variabel vibrator, typ MS 24 HF VAR, jfr *Tabell 2*. Mot den horisontella tidsaxeln har avsatts till vänster oljetrycket (bar), samt till höger vibrationsfrekvensen, pålens djup samt markens vertikala svängningshastighet.

Pålen befinner sig vid mättillfället på ca 6 m djup. Vibrationsfrekvensen varierar mellan 12 och 38 Hz för att undersöka dess inverkan på markvibrationerna samt oljetrycket. Vid hög vibrationsfrekvens (35 Hz) stiger oljetrycket (160 bar) – belastning på vibratorn och drivmedelsförbrukningen ökar. Däremot framkallas endast små markvibrationer (< 0,5 mm/s). När vibrationsfrekvensen sänks till dess att resonans uppstår ökar markvibrationerna markant (till 8 – 12 mm/s), dvs. med en faktor av ca 20. Samtidigt sjunker oljetrycket (och därmed belastningen på vibratorn).

Effekten av resonansförstärkningen från mätningar (mätvärden från ovan redovisat försök) åskådliggörs i *figur 14*. Där visas den vertikala svängningshastigheten som funktion av vibreringsfrekvensen. Pålen vibrerades först med en frekvens mellan 30 och 35 Hz. Då var markvibrationerna på ett avstånd av 4 m små. Med avseende på omgivningspåverkan är det således fördelaktigt att pålar eller spont installerar med en frekvens som ligger betydligt över resonansfrekvensen. Den elektroniska processtyrningen öppnar således nya möjligheter vid vibrering av pålar i vibrationskänsliga områden. Med hjälp av en frekvens- och amplitudvariabel vibrator är det möjligt att anpassa installationsförfarandet till projektets specifika förutsättningar. Geofoner, som mäter svängningshastigheten, kan exempelvis installeras på vibrationskänsliga byggnader och processtyrningen programmeras så att en förutbestämd svängningsamplitud (eller ljudnivå) inte överskrider. Vibratorn söker genom processtyrningen den lägsta vibrationsfrekvensen utan att överskrida i förväg fastställda gränsvärden.

När vibrationsfrekvensen sänks till omkring 15 Hz framkallas på grund av resonansen mellan den vibrerande pålen och de omgivande jordlagren kraftiga markvibrationer. Exemplet illustrerar att vibrering nära resonansfrekvensen förstärker markvibrationerna kraftigt. Risken för sättningar och skador i närbelägna byggnader eller installationer ökar. Vid resonanspackning utnyttjas denna effekt för att åstadkomma kraftiga markvibrationer och därmed en snabbare och effektivare packning. Resonanspackning är skonsam för vibratorn, eftersom oljetrycket är lägre, vilket har en positiv inverkan på drivmedelsförbrukningen, en viktig kostnadsfaktor vid jordpackningsprojekt.



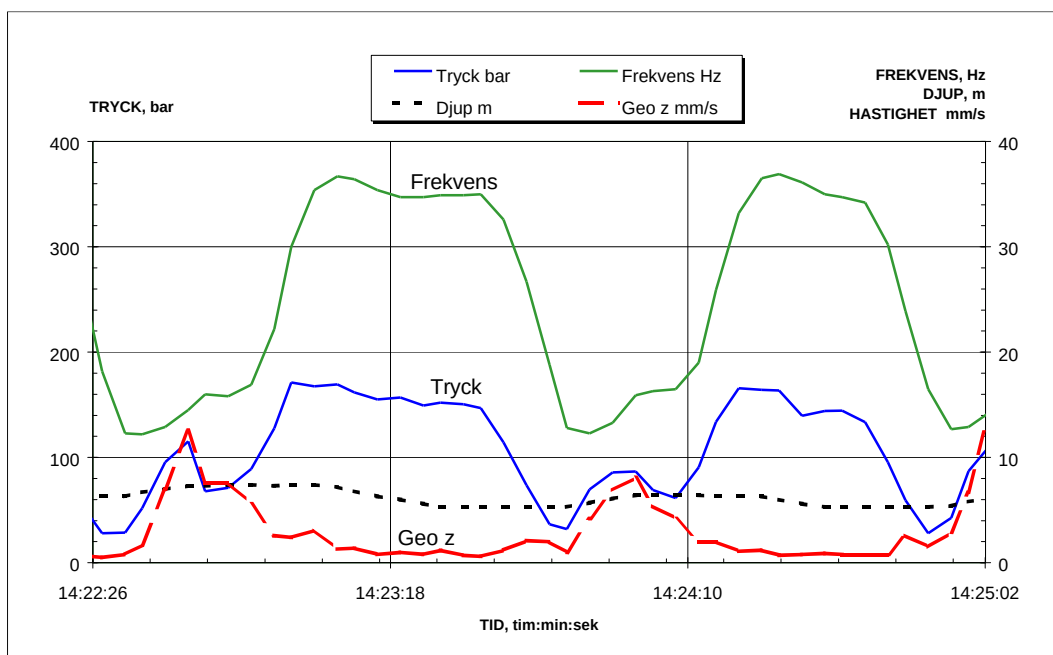
*Figur 11.*  
Elektroniskt processtyrningssystem för vibrering av pålar.

*Figure 11.*  
Electronic process control for vibrator-driving of piles.



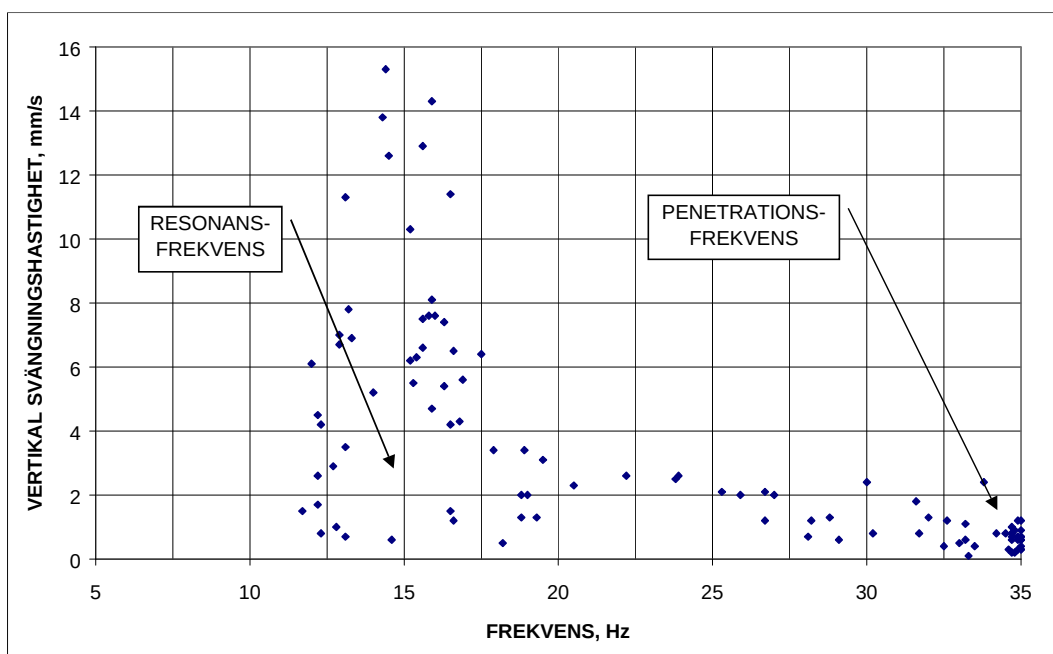
Figur 12.  
Elektronisk proces-  
styrning vid jord-  
packning enligt  
MRC-metoden.

Figure 12.  
Electronic process  
control for vibratory-  
compaction according  
to MRC method.



Figur 13.  
Detaljmätning av  
vibrationsparametrar  
vid vibrering av rör-  
påle i sand.

Figure 13.  
Detailed presentation  
of vibration paramet-  
ers during vibratory  
driving of steel tube  
in sand.



Figur 14.  
Inverkan av vibra-  
tionsfrekvens på jord-  
lagrets vertikala  
svängningshastighet.  
Givarens avstånd från  
pålen: 4 m.

Figure 14.  
Influence of vibra-  
tion frequency on  
vertical vibration  
velocity of soil layer,  
sensor distance from  
pile: 4 m.

## 4. Vågrörelse i påle och spont

I detta avsnitt diskuteras hur vibrationsenergin överförs från vibratoren genom pålen och till omgivande jordlager. Av särskilt intresse är de faktorer som påverkar pålens eller spontens nedträngning i jord.

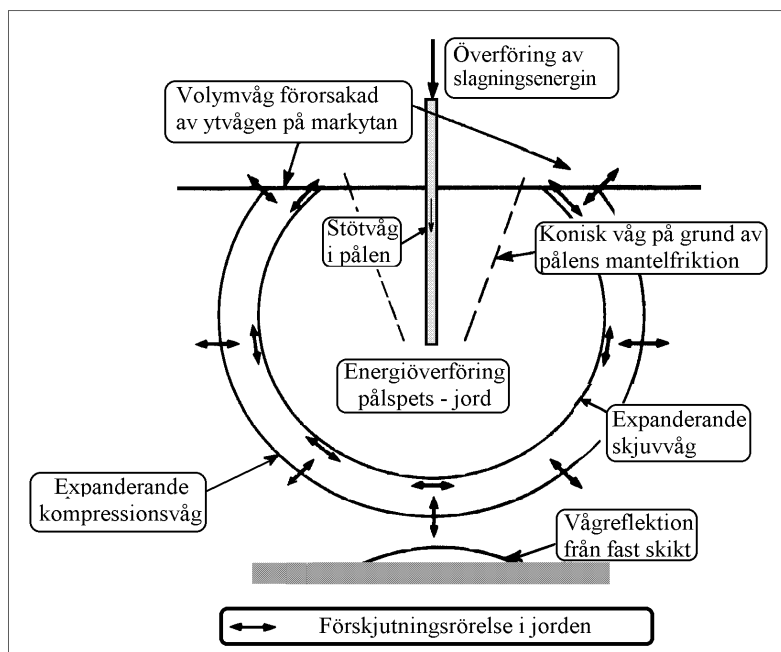
Vid vibrering penetrerar pålen jorden på ett principiellt annat sätt än vid slagning med fallhejare. Eftersom hejaren inte är fast kopplad till pålen och slagenenergin överförs till pålskaftet via dynan och mellanlägget, kan en del av energin gå förlorad. Vid varje slag måste pålen förflyttas ur sitt viloläge, varvid pålens tröghetskrafter och jordens dynamiska motstånd måste övervinnas.

Vibratoren däremot är normalt fast förbunden med pålskaftet, vilket innebär att nämnda energiförluster inte uppstår. Vibratoren försätter pålskaftet i en vertikalt oscillerande svängningsrörelse. En del av rörelseenergin förbrukas längs pålskaftet genom mantelfriktion och omvandlas till värme. Den kvarvarande energin kan användas för att övervinna jordens motstånd vid pålspetsen. Rörelseenergin breder ut sig dels från pålens mantel, dels från pålspetsen till den omgivande jord, *figur 15*. Hur stor del av energin som överförs från manteln respektive spetsen beror huvudsakligen på jordlagrens dynamiska egenskaper. Vid

penetration genom ett djupt sandlager uppstår ett koniskt vågfält som utbreder sig från pålens mantel, eftersom spetsmotståndet normalt är lågt. Vid penetration genom fasta skikt eller vid stoppslagning överförs huvuddelen av energin från spetsen i form av volymvågor (tryck- och skjuvvågor). Växelspelet mellan mantelfriktion och spetsmotstånd är komplicerat och förhållandena ändrar sig ner pålen tränger ner genom olika jordlager. Vid samma tidpunkt kan vibrationer alstras längs manteln och från pålspetsen och kan innehålla ett brett frekvensspektrum. I litteraturen redovisas ofta vibrationsmätningar där enbart det horisontella avståndet på markytan från pålen till mätpunkten anges. Däremot saknas den viktiga information om pålens djup och avståndet från pålspetsen eller den "neutrala punkten" (centrum för vibrationsutstrålningen) längs pålmanteln. För att realistiskt kunna beräkna vibrationsdämpningen från en vibrerande påle är det således nödvändigt att analysera spets- och mantelmotståndet under hela drivningsförloppet. Det bör också noteras att vid vibrering av en påle uppstår i jorden såväl vertikala som horisontella svängningsrörelser, trots att pålen i huvudsak oscillerar i vertikal riktning.

*Figur 15.*  
Vibrationsenergens  
utbredning från en  
påle till den omgi-  
vande jorden (efter  
Martin, 1980).

*Figure 15.*  
Propagation of vi-  
bration energy from  
pile to surrounding  
soil layers (from  
Martin, 1980).





En viktig faktor som påverkar överföringen av vibrationsenergin är pålens dynamiska egenskaper (pålens massa samt den komplexa styvheten, också kallat "impedans"). Impedansen  $Z$  är beroende av pålens densitet  $r$ , vågutbredningshastigheten i pålen  $c_B$  och pålens tvärsnittsarea  $A$ . Impedansen kan också uttryckas som funktion av elasticitetsmodulen  $E$ ,

$$Z = r \cdot c_B \cdot A = \frac{E \cdot A}{c_B} \quad (5)$$

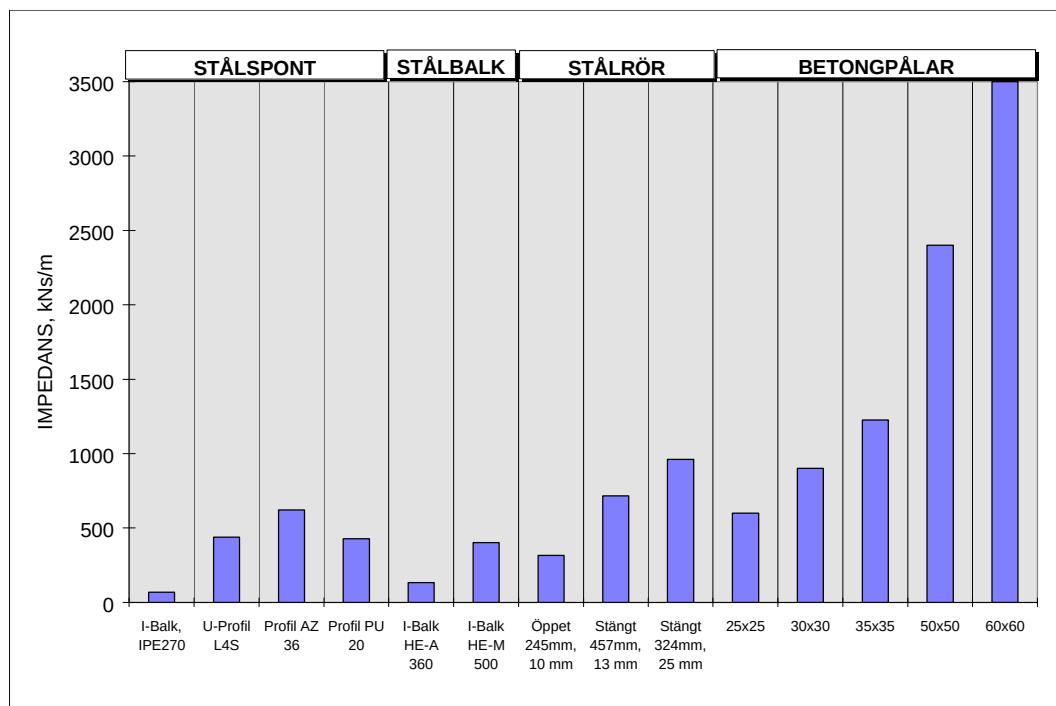
I figur 16 redovisas typiska impedansvärden för olika spont- och påltyper. Därav framgår att sponters och pålars impedans kan variera inom ett brett område. Den dynamiska kraften  $P$  som överförs till pålskallen och sedan fortplantar sig genom pålen erhålls som produkt av impedansen  $Z$  och svängningshastigheten  $v$  i pålen (som inte skall förväxlas med vågutbredningshastigheten  $c_B$ ).

$$P = Z \cdot v = \frac{E \cdot A}{c_B} v \quad (6)$$

Två faktorer påverkar i hög grad pålens nedträngning i jorden. Å ena sidan måste kraften  $P$  i pålen vara tillräckligt stor så att jordens motstånd (längs manteln och vid spetsen) kan övervinnas. Å andra sidan begränsar pålens impedans den maximala kraften som kan ledas ner genom pålskaftet till spetsen.

Till skillnad från slagning med fallhejare, där en vågrörelse alstras vid pålskallen, som sedan fortplantar sig genom pålen, framkallas vid vibrering en stående våg i pålen. Våglängden är vid hejarslagningen ("stöt") kortare än pålens längd, och kraften överförs som en stötvåg. Vid vibrering är frekvensen, och därmed våglängden betydligt längre. Som exempel kan antas en betongpåle med vågutbredningshastighet  $c_B = 3500$  m/s. Vid en vibrationsfrekvens av 25 Hz är våglängden  $l = 140$  m, dvs. avsevärt större än längden av vanligt förekommande pålar.

Det är möjligt att beräkna för olika påltyper (stålpålar respektive betongpålar), vid vilken vibrationsfrekvens belastningsförloppet är dynamiskt eller "pseudo-statisk" (stel kropps-vibration). Man kan förutsätta att en påle beter sig som en stel kropp när spänningsvågens amplitud vid pålspetsen är minst 90 % av den vid pålskallen. Figur 17 visar detta samband för stål- respektive betongpålar vid olika pållängder och vibreringsfrekvenser. I diagrammet har också markerats det området som vanligen förekommer vid drivning av pålar och spont. En stålpåle som är kortare än ca 10 m svänger således som en stel kropp. Denna slutsats har betydelse när drivningsmotståndet av en vibrerande påle bestäms med ledning av fält- eller laboratoriemätningar.

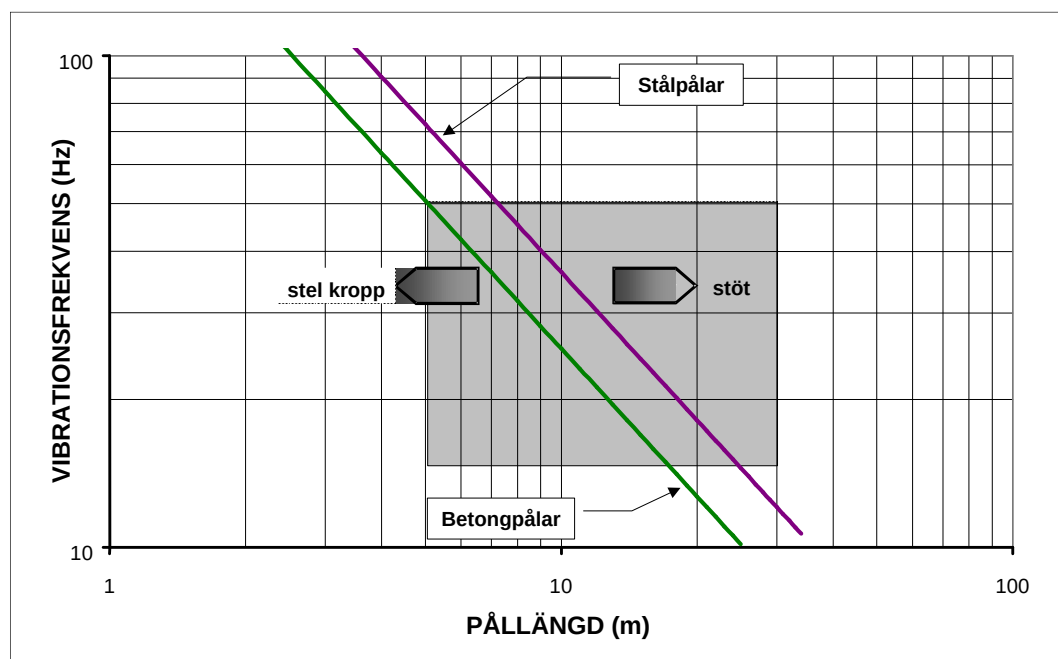


Figur 16.  
Typiska impedansvärden för olika spont- och påltyper.

Figure 16.  
Typical impedance-values of sheet piles and piles.

Figur 17.  
Med hjälp av diagrammet kan uppskattas om pålen vid en given frekvens beter sig som stel kropp.

Figure 17.  
Based on the diagram it is possible to estimate, whether the pile behaves as a rigid object at a given frequency.



## 5. Jordmotstånd vid vibrering

### ALLMÄNT

Vibrationsdrivning av pålar eller spont skiljer sig på ett grundläggande sätt från slagning med fallhejare. Vibrator och påle är fast kopplade till varandra och pålen befinner sig i en oscillerande rörelse. Centrifugalkraften verkar såväl uppåt som neråt. Genom pålens och jordens svängningsrörelse minskar mantelmotståndet temporärt (vid varje svängningscykel) och pålen tränger ner i jorden på grund av vibratorns och pålens vikt. Drivningsproblem uppstår när spetsmotståndet är större än de neråt verkande krafterna. Till skillnad från slagning med fallhejare förlorar pålspetsen vid varje vibrationscykel kontakten med det underliggande jordlagret. Denna avlastningseffekt (då ett undertryck uppstår) har en gynnsam inverkan på pålens nedträngning.

När en påle vibreras ner i jord överförs vibrationsenergin dels längs manteln, dels vid pålspetsen. Det finns flera hypoteser som försöker förklara varför vibrering främst i friktionsjord ger ett lägre drivningsmotstånd än slagning med fallhejare, Viking (1997). En viktig aspekt är att pålen under nedträngningen hålls i ständig rörelse, varigenom jordens skjuvhållfasthet längs manteln reduceras till residualvärdet. Den cykliska belastningen bidrar till en nedbrytning av jordens hållfasthet. En annan faktor är att jorden genom svängningsrörelsen försetts i ett ”flyttillstånd”, en förklaring som har berättigande i lös, vattenmättad friktionsjord. Denna teori, som är mycket utbredd, kan dock inte förklara varför vibrering är mycket effektiv även i medelfast och fast, torr friktionsjord.

Fältmätningar i samband med pålvibrering och jordpackning har visat att den vertikala svängningsrörelsen av pålen framkallar såväl vertikala som horisontella svängningscykler i den omgivande jorden, Krogh och Lindgren (1997). Den horisontella svängningskomponenten uppstår genom friktionen mellan pålmanteln och jorden, och kan vara av storleksordning 30 – 50 % av den vertikala svängningskomponenten. Genom vibreringen uppstår ett ”stående vågfält”, där det horisontella jordtrycket minskar vid varje nedåtrörelse (respektive uppåtrörelse) av pålen. Den horisontella svängningsfrekvensen är dubbelt så

hög som pålens. Denna effekt har även inverkan på en vibrerad påles bärförmåga, eftersom det sker en permanent spänningsomlagring. Denna effekt har också stor betydelse vid jordpackning. Ett flertal undersökningar har visat att det horisontella jordtrycket efter vibrationspackning kan öka med 200 – 500 %, Massarsch (1999).

I kohesionsjord, där mantelfriktionen mellan pålen och den omgivande jorden är låg, har jordens horisontella svängningsrörelse liten betydelse, eftersom den odränerade skjuvhållfastheten är oberoende av normalspänningen.

Vid val av lämplig vibratorer är det nödvändigt att i förväg kunna uppskatta jordens motstånd vid vibrering. Den erforderliga vibratorkapaciteten kan antingen uppskattas med ledning av empiriska samband eller med teoretiska analyser.

Vid vibrationsdrivning av spont kan, utöver mantel- och spetsmotståndet, även låsfriktionen bidra till drivningsmotståndet. Denna aspekt, som kan ha stor praktisk betydelse, behandlas dock inte i denna rapport.

### MANTEL- OCH SPETSMOTSTÅND

I det följande avsnittet diskuteras inverkan av olika faktorer på mantel- och spetsmotståndet. Det dynamiska motståndet som uppstår längs manteln och vid spetsen av den vibrerande pålen påverkas i huvudsak av fyra faktorer:

- vibrationsfrekvens (centrifugalkraften)
- pålens svängningshastighet
- förskjutningsamplituden mellan påle och jord
- antalet vibrationscykler.

Generellt kan sägas att vibratorer är bäst lämpade för installation av pålar med relativt litet spetsmotstånd (öppna rör, stålprofiler eller sponter). Vibrationsdrivning är mindre effektiv i mycket fast kohesionsjord.

Löst lagrad friktionsjord tenderar att packas tills den har uppnått en ”kritisk lagringstätt”. I löst lagrad, vattenmättad friktionsjord ökar porvattentrycket genom vibrering, som reducerar effektivspänningen och därmed skjuvhållfastheten. När porvattenövertrycket

när totaltrycket uppstår ”jordförvätskning” (liquefaction) och hållfastheten försvinner temporärt. Om vibreringen fortsätter utjämnas porvattenöverttrycket igen och effektivspänningen ökar. Friktionsjord övergår efter jordförvätskning i ett fastare lagringstillstånd.

Fast lagrad friktionsjord har en tendens till volymökning, den ”dilaterar”, vilket i vattenmättad jord medför en minskning av porvattentrycket. Detta leder till en temporär ökning av skjuvhållfastheten och därmed drivningsmotståndet. När porvattentrycket vid fortsatt vibration ökar luckras jorden upp till en lägre (”kritisk”) lagringstäthet.

### **Mantelmotstånd i friktionsjord**

I friktionsjord uppstår genom pålens vertikala svängningsrörelse ett oscillerande vågfält med en stor horisontell svängningskomponent. Den horisontella svängningsamplituden ökar som en funktion av jordens friktionsvinkel och minskar temporärt det horisontella jordtrycket. Hypotesen kan förklara varför vibration är effektiv även i fast friktionsjord.

Vibreringsfrekvensen har ingen nämnvärd inverkan på mantelmotståndet i friktionsjord.

Det krävs relativt små relativa förskjutningar för att övervinna mantelmotståndet i friktionsjord. När förskjutningsamplituden mellan pålen och jorden ökas (genom ökning av det statiska momentet), minskar mantelfriktion något. Denna effekt är dock i de flesta fall försumbar.

Det stora antalet lastcykler som uppstår vid vibration bryter ner jordstrukturen. Sandpartiklarna nöts och friktionsvinkeln minskar.

I friktionsjord uppnås den bästa nedträngningen genom en ökning av svängningshastigheten i pålen (hög centrifugalkraft). Andra faktorer har underordnad betydelse.

### **Mantelmotstånd i kohesionsjord**

Med undantag av sensitiva leror (där skjuvhållfastheten reduceras på grund av mekanisk nedbrytning), minskar mantelmotståndet endast långsamt under vibrationsprocessen. I lösa leror sjunker skjuvhållfastheten på grund av förhöjt porvattentryck, medan skjuvhållfastheten i fasta (överkonsoliderade) leror kan öka på grund av ett temporärt porvattenundertryck (dilatans). Horisontalsvängningarna är relativt små i kohesionsjord på grund av den låga friktionsvinkeln. Dessutom påverkas den odränerade skjuvhållfastheten inte av ändringen av normalspänningen. Svängningshastigheten har endast begränsad inverkan på mantelmotståndet.

Vibrationsfrekvensen och därmed belastningshastigheten påverkar kohesionsjordens skjuvhållfasthet. Mantelmotståndet ökar med vibrationsfrekvensen. Därför borde vibrationsfrekvensen i kohesionsjord hållas lågt, utan att förorsaka resonanseffekter.

Förskjutningsamplituden är den faktor som har störst inverkan på mantelmotståndet i leror. I medelfast och fast lera erfordras en relativt stor förskjutningsamplitud för att kunna övervinna mantelmotståndet. Vidhäftningen mellan påle och kohesionsjord kan minskas när förskjutningsamplituden överskrider ett kritiskt värde, som för medelfasta och fasta leror ligger omkring 10 – 30 mm.

Lerans skjuvhållfasthet avtar i allmänhet med ökat antal lastcykler och har tendensen att reducera mantelmotståndet.

I kohesionsjord utförs vibrationsdrivning lämpligen med stor förskjutningsamplitud. Detta uppnås enklast vid en låg vibrationsfrekvens. I dessa fall bör risken för resonanseffekter beaktas.

### **Spetsmotstånd i friktionsjord**

Spetsmotståndet beror på jordens skjuvhållfasthet, som mobiliseras genom undanträngningen av jordmaterialet. Genom den oscillerande rörelsen förlorar pålspetsen vid varje lastcykel kontakten med jordlagret. Undertrycket har en nedbrytande inverkan på skjuvhållfasthet, men kan i fast friktionsjord också leda till oönskade dilatanseffekter.

Den mest effektiva nedträngningen uppnås i friktionsjord genom hög centrifugalkraft, som åstadkoms genom ökad vibrationsfrekvens.

I lös och medelfast lagrad, vattenmättad friktionsjord uppstår temporärt ett flyttillstånd (jordförvätskning) nära pålspetsen. Porvattentrycket utjämnas dock snabbt i grovkornig friktionsjord. Förskjutningsamplituden måste i allmänhet begränsas vid höga frekvenser. Erfarenheten tyder på att förskjutningsamplituden endast har underordnad betydelse.

Lastcykler orsakar en nötning av jordpartiklarna (minskad friktionsvinkel) samt en nedbrytning av jordstrukturen vid spetsen. I löst lagrad jord kan ibland packning uppstå. I fast friktionsjord, däremot, kan ett ökat antal lastcykler resultera i dilatans som gradvis luckrar upp jorden.

I friktionsjord övervinns spetsmotståndet bäst genom hög vibrationsfrekvens och stor centrifugalkraft.

## Spetsmotstånd i kohesionsjord

Spetsmotståndet i kohesionsjord är hastighetsberoende och tilltar med ökad frekvens. Centrifugalkraften måste vara tillräckligt stor för att bryta ned lerans skjuvhållfasthet.

I lera kan det stora antalet lastcykler leda till en reduktion av skjuvhållfastheten.

För att kunna övervinna spetsmotståndet i fast lera krävs en stor förskjutningsamplitud, som uppnås bäst genom vibrering med låg frekvens.

I *tabell 3* sammanfattas inverkan av olika vibrationsparametrar på en påles nedträngningsmotstånd i kohesionsjord respektive friktionsjord.

## EMPIRISKA SAMBAND FÖR VAL AV VIBRATORCAPACITET

Forskning beträffande nedträngningsmotståndet har huvudsakligen ägnats åt slagning av pålar med fallhejare. För vibrerade pålar finns endast förenklade, empiriska samband. Dessa har tagits fram med erfarenhet från projekt i Mellaneuropa, där de geologiska förutsättningar ofta är annorlunda än i Sverige. Därför måste dessa samband användas med försiktighet. Kühn (1974) har föreslagit att den erforderliga centrifugalkraften,  $F$  för installation av sponter kan uppskattas enligt följande samband

$$F = \alpha \cdot L \quad (7)$$

där  $\alpha$  är en empirisk faktor som beror av jordarten, sonderingsmotståndet ( $N$ -värdet) från hejarsondering (SPT) samt spontens längd  $L$ , jfr *tabell 4*. Sambandet bygger på erfarenheter från projekt i tysk geologi samt utrustning som fanns tillgänglig under början av 1970-talet.

Utvecklingen av vibratorer har gått mycket snabbt och idag är effektiviteten avsevärt högre. För att erhålla en bättre överensstämmelse med erfarenheter från projekt med starkare, moderna vibratorer bör, enligt författarens erfarenhet, faktorn  $\alpha$  i *tabell 4* multipliceras med 0,4. Vid valet av moderna, hydrauliska vibrator för installation av sponter eller stålprofiler har företaget Krupp TBT, som tillverkar Müller-vibratorer, tagit fram ett empiriskt diagram, *figur 18*. Där visas den erforderliga centrifugalkraften som funktion av spontvikten, slagningsdjupet och jordmotståndet.

I diagrammet tas hänsyn till jordens fasthet, spontens vikt samt slagningsdjupet. I *figur 18* har som exempel antagits en 17 m lång spont med en massa av 2,5 ton. Vid hård drivning erhålls med ledning av diagrammet en erforderlig centrifugalkraft av 1500 kN, jfr *tabell 2*. Vid användning av värden från *tabell 4*, med ett SPT-sonderingsmotstånd  $N = 40$  i friktionsjord, är faktorn  $f$  för moderna vibratorer av en storleksordning som ger en erforderlig centrifugalkraft av 1700 kN. I det aktuella fallet är överensstämmelsen mellan båda metoderna god.

## TEORETISKA SAMBAND

Ett problem vid användning av empiriska samband är att dessa bygger på erfarenheter från tidigare projekt och endast gäller för liknande geotekniska förhållanden. Hänsyn kan inte tas till de projektspecifika förutsättningarna, som jordens geodynamiska egenskaper, vibratorns kapacitet, pål- eller sponttyp, personalens kompetens etc.

### a) Friktionsjord

|                       | Mantelmotstånd |       |      | Spetsmotstånd |       |      |
|-----------------------|----------------|-------|------|---------------|-------|------|
|                       | lågt           | medel | högt | lågt          | medel | högt |
| Fasthet               | ++             | +++   | +++  | +             | ++    | +++  |
| Vibrationsfrekvens    | +++            | +++   | +++  | ++            | ++    | ++   |
| Svängningshastighet   | +              | +     | ++   | +             | +     | +    |
| Förskjutningsamplitud | --             | +     | ++   | --            | +     | ++   |

### b) Kohesionsjord

|                       | Mantelmotstånd |       |      | Spetsmotstånd |       |      |
|-----------------------|----------------|-------|------|---------------|-------|------|
|                       | lågt           | medel | högt | lågt          | medel | högt |
| Fasthet               | -              | --    | ---  | -             | --    | ---  |
| Vibrationsfrekvens    | -              | -     | --   | -             | --    | ---  |
| Svängningshastighet   | +++            | +++   | +++  | ++            | ++    | ++   |
| Förskjutningsamplitud | +              | +     | ++   | +             | ++    | +++  |

Tabell 3.

Inverkan av vibrationsparametrar på pålens nedträngning i jord.  
(- negativ inverkan,  
+ positiv inverkan)

Table 3.

Influence of different vibration parameters during penetration of pile into soil.  
(-negative influence,  
+ positive influence)

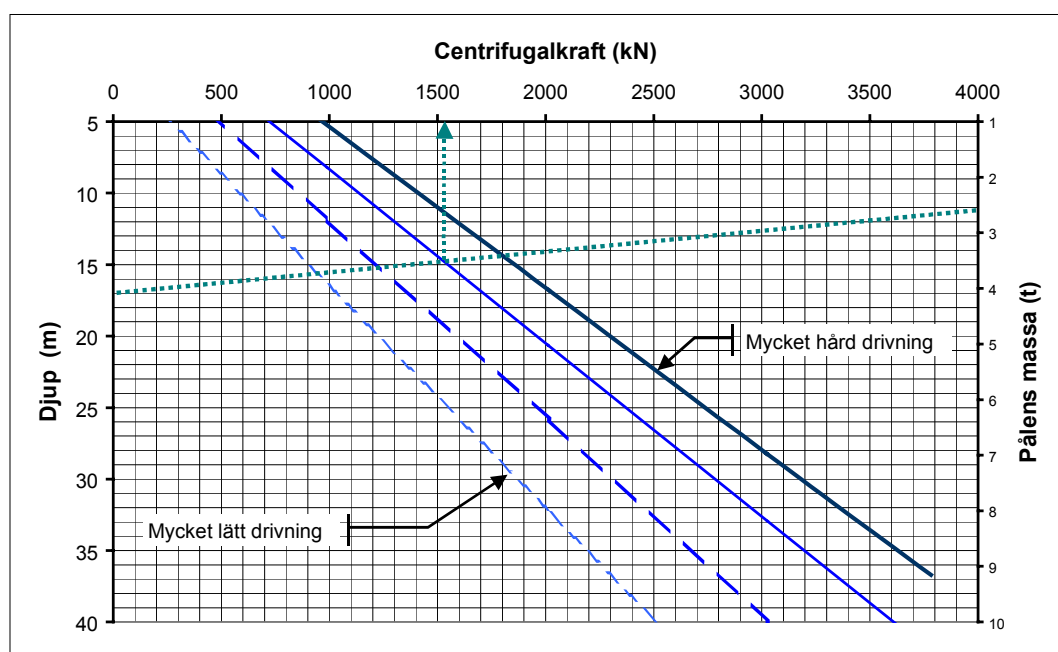
Tabell 4.  
Uppskattning av  
vibratorsn  
erfor-  
derliga centrfu-  
galkraft enligt  
SPT-sondering.

Table 4.  
Estimation of required  
centrifugal force of  
vibrator based on  
SPT sounding.

| Jordart              | Sonderingsmotstånd<br>STP (N-värde) | Faktor $\alpha$<br>(kN/m)<br>(äldre vibratorer) | Faktor $\alpha$<br>(kN/m)<br>(moderna vibratorer) |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Friktionsjord</b> |                                     |                                                 |                                                   |
| mycket lös           | 0 - 4                               | 100                                             | 40                                                |
| lös                  | 4 - 10                              | 150                                             | 60                                                |
| medelfast            | 10 - 30                             | 200                                             | 80                                                |
| fast                 | 30 - 50                             | 250                                             | 100                                               |
| mycket fast          | > 50                                | 400                                             | 160                                               |
| <b>Kohesionsjord</b> |                                     |                                                 |                                                   |
| mycket lös           | 0 - 2                               | 100                                             | 40                                                |
| lös                  | 2 - 4                               | 150                                             | 60                                                |
| medelfast            | 4 - 8                               | 200                                             | 80                                                |
| fast                 | 8 - 15                              | 250                                             | 100                                               |
| mycket fast          | 15 - 30                             | 400                                             | 160                                               |
| extremt fast         | > 30                                | 500                                             | 200                                               |

Figur 18.  
Uppskattning av er-  
forderlig centrfugal-  
kraft vid drivning av  
spont eller stålplålar  
(efter produktkatalog  
för Müller vibratorer).

Figure 18.  
Estimation of required  
centrifugal force  
during driving of  
sheet pile or steel pile,  
according to Müller  
product catalogue.



För att erhålla mera tillförlitliga beräkningsmetoder av vibreringsmotståndet, som är oberoende av subjektiva värderingar, har beräkningsmetoder utvecklats, där resultat från sonderingsförsök används, Westerberg et al. (1996). Modellen bygger på antagandet att vibratoren och den vibrerande pålen svänger som en stel kropp.

Då kan mantel- och spetsmotståndet uppskattas med ledning av resultat från CPT-sondering. Ingångsvärden i beräkningen korrigeras med avseende på jordart, frekvens, förskjutningsamplitud och antalet lastcykler, jfr tabell 3. Vid beräkningen tas hänsyn till inverkan av vibratorsn och pålens svängande och statiska massa samt eventuell förspänning.

Sedan bestäms den erforderliga centrfugal-kraften med ledning av korrigerade värden av spets- och mantelfriktionsmätningar från CPT-försök. Det dynamiska jordmotståndet erhålls enligt följande samband

$$R_{Dyn} = R_{DynMantel} + R_{DynSpets} \quad (8)$$

där

$$R_{DynMantel} = f_s \cdot k_{Mantel} \quad (9)$$

$$R_{DynSpets} = q_c \cdot k_{Spets} \quad (10)$$

där  $f_s$  and  $q_c$  är mantel- respektive spetsmotståndet från CPT-försök. Det dynamiska mot-

ståndet uppskattas med ledning av empiriska faktorer  $k_{Mantel}$  och  $k_{Spets}$

$$k_{Mantel} = k_{MantelFrekv} \cdot k_{MantelFörskj} \cdot k_{MantelCykl} \quad (11)$$

$$k_{Spets} = k_{SpetsFrekv} \cdot k_{SpetsFörskj} \cdot k_{SpetsCykl} \quad (12)$$

Faktorn  $k_{MantelFrekv}$  anger till exempel förhållandet mellan det statiska mantelmotståndet från CPT-försök och det dynamiska motståndet som funktion av vibrationsfrekvensen. Dessa samband har bestämts med ledning av fältförsök enligt erfarenheter som redovisas i *tabell 3*. Beräkningen utförs lämpligen med hjälp av dataprogram. Den beräknade centrifugalkraften har kalibrerats mot ett flertal omfattande fältförsök, Westerberg et al (1996). I samband med det Europeiska forskningsprojektet SIPDIS utvecklas ett beräkningsprogram för bestämning av drivningsmotståndet vid spont- och påslagning, som baseras på ovan redovisade hypoteser.

## RESONANSEFFEKTER I JORD

Som visats i ett tidigare avsnitt kan vid vibring av pålar och spont resonans uppstå mellan vibrator/spontsystemet och de omgivande jordlagren. Denna effekt kan undvikas, men också förstärkas genom vibring. Vid användning av moderna, variabla vibratorer kan vibratorfrekvensen och svängningsamplituden varieras under hela drivningsförloppet för att minska markvibrationer.

Vid resonans vibrerar vibratorn, pålen och de omgivande jordlagren ”i fas” och det uppstår en effektiv vibrationsöverföring från vibratorn genom pålen till de omgivande jordlagren. Resonanseffekten medför att den relativa svängningsrörelsen mellan pålen och jorden, som erfordras för att pålen skall kunna tränga ned, minskar trots att jordlagren svänger mycket kraftigt. Ur drivningssynpunkt är det därför viktigt att undvika resonansfrekvensen. Det är svårt att teoretiskt beräkna resonansfrekvensen vid pål- eller spontdrivning, eftersom den påverkas av jordens dynamiska egenskaper, pålens längd och impedans samt vibratorns svängande massa. Däremot kan resonansfrekvensen bestämmas i fält med hjälp av elektronisk processtyrning, jfr *figur 13* och *14*.

Till skillnad från resonanseffekter i jordlager kan resonans även framkallas i pålen. Denna princip utnyttjas av den patenterade Bodine-vibratorn, jfr *tabell 1*. ”Resonance Pile Driver” utvecklades i USA, och arbetar vid mycket högre frekvenser (upp till och över 100 Hz) än konventionella vibratorer. Genom resonanseffekten förstärks svängningsrörelsen i pålen, som ger ökad penetration. Metoden har använts framgångsrikt i fastajordarter, bl a i permafrost. Påfrestningarna på påle och utrustning samt energiförbrukningen är dock mycket höga. Därför har denna vibratortyp endast fått begränsad användning.

## 6. Praktiska synpunkter vid vibrering av spont och pålar

Användningsmöjligheterna för vibratorer har under de senaste åren utökats avsevärt. Detta beror främst på den maskintekniska utvecklingen. Ett exempel är högfrekvensvibratorer eller av vibratorer med variabelt statiskt moment. Idag kan vibratorer användas över långa tidsperioder, som krävs vid t ex stora pålningsprojekt, vid jordpackning eller installation av tätskärmar. Vibratorer kan utnyttjas för både drivning och dragning av sponter eller pålar.

### MODERN VIBRATIONS-UTRUSTNING

Idag utförs de flesta grundläggningsprojekt i Mellaneuropa med vibratorer av tredje och fjärde generationen. Huvudanledningen är allt strängare miljökrav (lägre gränsvärden för tillåtna markvibrationer samt buller), kvalitetssmedvetandet (produktionskontroll) samt komplicerade projekt med stora pållängder. Vid vibrering kan generellt sägas att hög vibratorkapacitet alltid är av fördel. Moderna vibratorer har följande fördelar jämfört med äldre utrustning:

- Resonansfri uppstartning och avstängning genom variation av vibratoramplituden. Därigenom undviks vibrationsstörning i omgivning och lägre belastning på pålkranen.
- Bättre anpassning av installationsförfarandet till olika geologiska förutsättningar, genom variation av vibrationsfrekvens och svängningsamplitud. Detta möjliggör att vibrationsenergin kan utnyttjas optimalt för övervinnet av jordmotståndet. Samtidigt minskas energiförbrukningen, som har en positiv inverkan på projektkostnaden.
- Genom elektronisk styrning kan drivningsprocessen programmeras, övervakas och dokumenteras. Drivningsprocessen kan optimeras genom elektronisk styrning, där svängningsfrekvens och amplitud varieras så att effektiv nerträngning (eller uppdragning) åstadkoms. Informationen om produktion och störningar kan visas maskinisten i realtid i förarkabinen och/eller överföras telemetrisk till kontoret.
- Vibratorer kan också användas under vatten, t. ex, vid installation eller uppdragning av pålar eller spont.

### PRAKTISKA ASPEKTER

Vibrationsdrivning kan vara effektiv vid installation av pålar och spont, förutsatt att arbetet utförs av kompetent personal och med lämplig utrustning. Följande frågor bör övervägas vid projekt där vibrator skall användas för pål- eller spontdrivning:

- Val av vibratorns kapacitet (centrifugalkraft och förskjutningsamplitud)
- Kraftaggregatets kapacitet (tryck och flöde) som måste anpassas till vibratorns behov
- Pålens (spontens, rörets eller balkens) geometri (tvärsnittsarea) och materialegenskaper (impedans)
- Behov av elektronisk kontrollenhet
- Typ och kapacitet av pålkran (med eller utan gejder)
- Kraftförsörjningen (separate kraftaggregat eller hydraulisk matning från pålkranen)
- Personalens (maskinförarens) erfarenhet
- Jordlagrens geotekniska egenskaper samt grundvattenförhållanden, jordens motstånd och geodynamiska förutsättningar
- Bärförmåga och stoppslagnings/vibreringskriterier
- Omgivningspåverkan (vibrationer, buller m m)
- Dokumentation och kvalitetsövervakning
- Service och kontinuerlig kontroll/övervakning av utrustningen
- Provvibrering för fastställandet av optimal installationsmetod.

### ÅTGÄRDER SOM UNDERLÄTTAR VIBRODRIVNING

Vid svåra installationsarbeten kan olika åtgärder vidtas för att öka produktiviteten samt för att minska omgivningspåverkan (vibrationsutbredningen). Dessutom reduceras belastningen av den maskinella utrustningen. Följande åtgärder kan förbättra vibrationsdrivning av pålar:

- Vertikal förspänning eller statisk belastning
- Avlastningsbormning
- Vattenspolning
- Försprängning



## Vertikal förspänning eller statisk belastning av vibratorn

Det är möjligt att öka effektiviteten genom vertikal förspänning. I så fall måste vibratorn föras i en gejder. Maskinföraren kan genom förspänningen anpassa den erforderliga vertikala belastningen under installationsprocessen efter jordmotståndet.

En statisk massa, som placeras ovanpå vibratorn har som huvudsyfte att ge en bättre dynamisk avstämning. Dessutom ökar den statiska belastningen i viss mån nedträngningshastigheten.

## Vattenspolning

Den moderna vattenspolningstekniken utvecklades i södra Tyskland och kallas där för "Rüttelspülen" (vibrojetting). Metoden användes där i första hand för att kunna erbjuda konkurrenskraftiga alternativ till grävda slitsväggar och borrarade pålvägg. Vibrerade spontväggar är ofta billigare, men man har haft svårigheter att penetrera de fasta bottenlagren. Hejarslagningsmotståndet är i dessa jordlager av storleksordningen 100 slag/10 cm. Ett annat problem var att besvärande markvibrationer framkallades. För att kunna använda vibreringstekniken i dessa fasta jordlager utvecklades vattenspolningstekniken. Syftet är att genom vattentillförsel luckra upp och erodera jorden vid pålspetsen samt att reducera mantelmotståndet. Effektiviteten påverkas av jordens materialegenskaper, särskilt permeabilitet och fasthet. Vattenspolning minskar drivningsmotståndet på flera sätt. Dels reduceras kapillarspänningar i delvis vattenmättad jord, dels minskas jordens skjuvhållfasthet genom det ökade vattentrycket längs manteln och vid spetsen. Det förekommer två typer av vattenspolning:

- Lågtrycksspolning, som används främst i friktionsjord
- Högtrycksspolning, som används främst i kohesionsjord

Lågtrycksspolning är att föredra och används huvudsakligen i mycket fast friktionsjord. I kombination med vattenspolning kan pålar vibreras ner även i dessa jordar. Bästa effekten uppnås om vibratorer med variabel frekvens används. Spolningen utförs med ett vattentryck av ca 2 MPa och ett flöde av mellan 120 – 240 l/min. Spolningstuben skall nå ner till nedre änden av spanten eller pålen. Vattenspolning skall påbörjas samtidigt som spanten vibreras ner, för att undvika att öppningarna blockeras av jord. Spolning kan i vissa fall ha en negativ inverkan på jordens fasthet och reducera pålens eller spantens bärförmåga.

En viktig aspekt är att använda så lite vatten som möjligt samt att tillföra det med tillräckligt tryck, utan att framkalla omlagring av en stor jordvolym. För spolningen användes 2 eller 4 rör med diameter 10 – 20 mm, som punktsvetsades direkt mot spanten eller pålen. För vattenspolningen används normalt minst två centrifugalpumpar, en pump för varje spolrör. Spoltrycket anpassas till de geotekniska förutsättningarna och spontdjupet.

Det är önskvärt att den sista fasen av pålinstallationen utförs utan vattenspolning för att undvika negativa effekter på bärförmågan. En viktig aspekt vid vattenspolning är att de geotekniska förutsättningar undersöks i förväg, samt att installationsförfarandet (vibrerings- och spolningsparametrarna, som vattenflöde och tryck) dokumenteras kontinuerligt.

Kontrollerad vattenspolning används i ökande grad för att installera spantar eller pålar i mycket fast jord, som överkonsoliderad sand eller morän.

## Avlastningsborrning

Avlastningsborrning kan underlätta alla typer av spont- och pålinstallation (slagning, vibrering eller nedpressning). Den har till uppgift att reducera mantelmotståndet i jorden genom omlagring av spänningstillståndet. Metoden kan även användas i relativt hård och blockig jord.

Normalt borrar hål med en diameter av ca 30 cm, i centrum av installationspunkten, men håldiametern kan reduceras vid mycket hård drivning. I mycket fasta jordlager och särskilt i fast moränjord med hög kohesion (moränlera) är förborrning mycket effektiv. Detta sker ofta genom skruvborrning (CFA-borrning). Det är dock viktigt att förborrningen sker exakt i vertikal riktning. Även en relativt liten borrhålsdiameter (150 mm) ger ofta god effekt. Vid förborrning i friktionsjord kan uppluckringseffekten kompenseras genom den efterföljande vibreringen. Därför är det fördelaktigt att i dessa fall använda en vibrator med variabel frekvens. Det är viktigt att förborrningen avslutas ca 1 m ovanför grundläggningsnivå för att undvika minskad bärförmåga. Förborrning kan vara tidskrävande och dyr.

### **Försprängning (Microfracturing)**

Vid denna typ av uppluckringssprängning, som i första hand tillämpas i berg eller mycket fast, blockig jord, används sprängämne med låg energi. Arbetet måste utföras av erfaren personal för att uppnå bästa resultat. Målsättningen är att överföra kompakt berg i ett uppsprucket tillstånd, utan att hålrum uppstår. Volymen som påverkas av sprängningen, skall vara så liten som möjligt, men tillräcklig för att spanten eller pålen skall kunna penetrera. Erfarenhetsmässigt har den uppluckrade zonen en diameter av mellan 50 och 70 cm och skall nå till samma djup som spanten. Spanten skall installeras så snart som möjligt efter sprängningen, för att uppnå bästa effekt.

## 7. Exempel på praktisk användning av vibratorer vid grundläggning

### VIBRERADE SLITSVÄGGAR

Tätskärmar kan installeras till stora djup med hjälp av vibreringsteknik. Metoden, som ursprungligen kommer från Nordamerika ("VibWall"), men vidareutvecklades i Tyskland, kallas där "Schmalwand", *figur 19*. Slitsväggar kan installeras mycket snabbare genom vibrering än genom schaktning eller borrhning. Slitsens bredd är av storleksordningen 5–10 cm. Det maximala djupet för denna typ av tätskärm är för närvarande 50 m. Syftet är att med hjälp av en specialtillverkad stålprofil (pryl) med förstorad spets skapa en ca 1 m lång slits, som under neddrivningen och uppdragningen injekteras med en cement/bentonitsuspension. Skärmen måste tränga ner genom de permeabla jordlagren in i ett tätskikt med låg permeabilitet. Injekteringsmassan består av en blandning av vatten, bentonit (ofta Ca-bentonit), flygaska, cement, stenmjöl samt andra tillsatser. Då uppnås en densitet av omkring  $1,2 - 1,55 \text{ t/m}^3$  med en permeabilitet som understiger  $6 - 7 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ .

Vibrerade slitsväggar måste i allmänhet penetrera djupa lager av friktionsjord av varierande fasthet och sedan skäras in i ett botten-skikt av kohesionsjord med låg permeabilitet. Detta ställer mycket höga krav på utrustning och personal och kräver erfarenhet och omsorgsfull planering. Därför installeras vibrerade slitsväggar ofta med kraftfulla vibratorer med variabel frekvens, för att bättre kunna anpassa installationsprocessen till de varierande förutsättningarna. I de permeabla jordlagren utförs installationen ofta med hög frekvens och liten svängningsamplitud. Under slutskedet måste vibreringsprocessen ändras så att även mycket fasta kohesionsjordlager kan penetreras. Då utförs vibreringen ofta med lägre frekvens och hög svängningsamplitud.

För att säkerställa att en kontinuerlig skärm erhålls till fastställt djup ställs höga krav på utförandekontroll och detaljerad projektdokumentation. Installationsprocessen styrs och dokumenteras därför med hjälp av elektronisk processtyrning, där injekteringsflödet och



a) Vibrator med variable frekvens, stålprofil med injekteringsutrustning.

a) Vibrator with variable frequency, steel beam with grouting equipment.



b) Stålprofil med ving som skär en slits för nästa väggsegment.

b) Steel beam with flange, aimed at cutting slot into adjacent wall element.

*Figur 19.  
Utrustning för installation av vibrerade slitsväggar.*

*Figure 19.  
Equipment for installation of vibrated slurry wall.*

trycket samt vibrationsfrekvensen och penetrationsdjupet registreras. Genom kontinuerlig dokumentation av injekteringstryck och bentonitflöde samt vibratorbelastningen (tryck och frekvens) kan säkerställas att skärmen installeras till avsett djup.

### MRC – RESONANSPACKNING

Huvudsyftet med resonanspackningsmetoden (MRC-metoden) är att utnyttja resonanseffekten för att åstadkomma snabb, effektiv och kontrollerad djuppackning av friktionsjord, *figur 20*. Vibrationsenergin överförs från vibratoren till den omgivande jorden genom ett för ändamålet utvecklat, i vertikalled flexibelt packningsdon med låg impedans, Massarsch (1997). Vibreringen utförs med en vibrator med variabel frekvens och elektronisk processstyrning.

Packningsförloppet består av tre faser: nedträngning, packning och uppdragning. Den snabbaste nedträngningen uppnås om packningsdonet vibreras ner med hög frekvens, varvid mantelfriktionen och spetsmotståndet reduceras. När packningsdonet har nått önskat packningsdjup ändras vibratorens frekvens så att resonans uppstår i de skikt som skall packas. Packningstiden beror på jordförhållanden och erforderlig packningsgrad. När önskad packningseffekt har uppnåtts dras packningsdonet upp i steg. MRC-systemets viktigaste komponenter är den frekvensvariabla vibratoren, det flexibla packningsdonet och den elektroniska processstyrningsenheten. För att uppnå optimal djuppackning måste vibratorfrekvensen anpassas kontinuerligt till packningsprocessens olika faser, jfr *figur 11*.

Konventionella vibratorer är inte konstruerade för att klara av de stora påfrestningar som de utsätts för vid stora packningsprojekt. I motsats till traditionella användningsområden, som pål- och spontdrivning, används utrustningen vid packningsarbeten ofta flera månader. Därför måste vibratorerna förses med speciell oljekylning och smörjning av lagren. En viktig faktor vid MRC-packning är variationen av frekvensen. Konventionella vibratorers vibrationsfrekvens styrs genom att dieselmotorns varvtal ändras, vilket innebär att vibratoren vid låg frekvens förlorar energi. Vid resonanspackning används därför speciella kraftaggregat med ett särskilt pumpsystem, varigenom vibratorns varvtal kan ändras steglöst utan energiförlust. Djuppackning utförs med de största vibratorer som förekommer på marknaden, t. ex. MS 200, jfr *tabell 2*.

### Packningsdon

För att optimera överföringen av vibratorns svängningsenergi till jorden som skall packas, används ett packningsdon av specialstål, vars dynamiska egenskaper kan anpassas till jordförhållandena, genom horisontella och vertikala förstyvningar eller hål, *figur 21*. Öppningarna har flera andra fördelar. Packningsdonet blir lättare och systemets svängande massa minskar. Det innebär att förskjutningsamplituden ökar, vilket är gynnsamt ur packningssynpunkt. Dessutom förbättras kontakten mellan packningsdonets väggar och jorden, genom att öppningarna ökar mantelfriktionen.

*Figur 20.  
MRC-packning i Map  
Ta Phut, Thailand med  
frekvensvariabel vibra-  
tor (MS 100 HF) och  
packningsdon med låg  
impedans.*

*Figure 20.  
MRC-compaction in  
Map Ta Phut, Thailand  
with frequency-  
variable vibrator  
(MS 100 HF) and  
compaction probe with  
low impedance.*



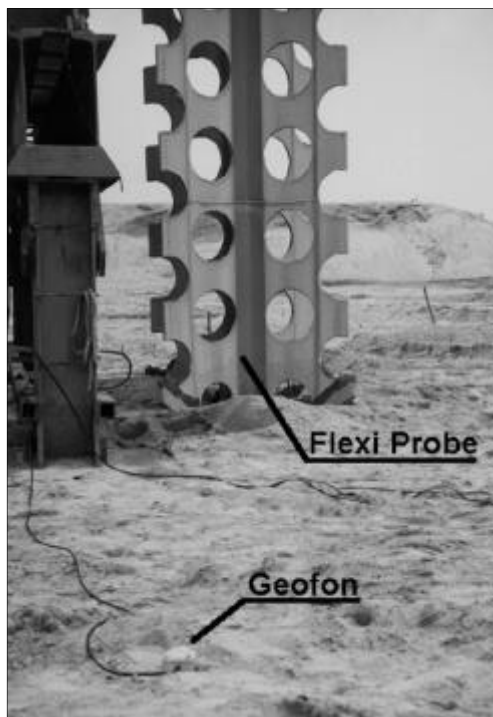
## Elektronisk processtyrning vid jordpackningen

Den elektroniska processtyrningen utgör en viktig del av MRC-systemet, jfr *figur 12*. Mätvärden från givare, som är monterade på vibratorutrustningen och på markytan, registreras och bearbetas av den elektroniska mät- och databehandlingsenheten. Givarna mäter vibrators frekvens, oljetrycket i kraftaggregatet, packningsdonets djup och nedträngningshastighet samt markvibrationernas svängningshastighet (RMS-värden). Varje packningspunkt dokumenteras i detalj. Förutom allmän projektinformation, som packningspunktens läge, packningsavstånd och vibratortyp, anges även tidpunkten för packningens början och slut, liksom tidpunkten för eventuella avbrott. Processtyrningen kan även användas för att utföra specialmätningar. Vid MRC-packning är det viktigt att kunna bestämma markvibrationernas resonansfrekvens. Detta sker med hjälp av en på markytan placerad geofon, *figur 21*.

I början av projektet genomförs en provpackning där den optimala vibreringsfrekvensen bestäms, se *figur 14*. För MRC-packning har speciell mjukvara utvecklats för bestämning av resonansfrekvensen i fält. Sedan programmeras den elektroniska styrenheten med de aktuella packningsparametrarna, enligt vilka produktionspackningen skall genomföras. Maskinföraren erhåller instruktioner hur packningsförfarandet bör utföras, men har alltid kontroll över driften av vibratoren och pålkra-

## VIBRERADE PÅLELEMENT

I följande avsnitt beskrivs några praktiska tillämpningar av vibreringstekniken vid installation av pålar eller pålliknande element. Erfarenheter från svenska projekt med vibrerade betongpålar har varit varierande. När betongpålar är fast förbundna med vibratoren kan dragspänningar framkalla horisontella sprickor i pålarna. Ibland har vibratoren slagit fritt mot pålskallen. Denna drivningsmetod är inte lämplig, eftersom den kan ge upphov till skador i vibratoren, samtidigt som fördelarna med vibrationsdrivningen (den oscillerande pålrörelsen, som minskar mantelmotståndet) förlo-  
ras. Ett annat problem är att fastställa stoppslagningskriterier för vibrerade pålar. I följande avsnitt diskuteras olika möjligheter att använda vibreringsteknik vid installation av pålelement, där dessa problem kan undvikas.



Figur 21.  
Resonansmätning med  
hjälp av geofon.

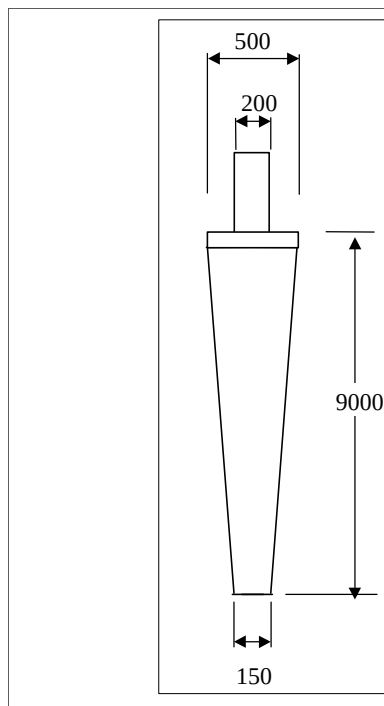
Figure 21.  
Resonance  
measurement  
using geophone.

## Vibrerad betongnål

Som en alternativ till konventionell pålgrundläggning är det möjligt att använda vibrerade, koniska vibrerade betongnålar som jordförstärkning. Denna jordförstärkningsmetod, som kan jämföras med vibrerade eller slagna stenspelare, har sin främsta användning i friktionsjord med skikt av kompressibel kohesionsjord. Nålarna har till uppgift att överföra byggnadslasten från markytan till jordlager med högre bärförmåga. Under installationen används en hög vibreringsfrekvens för att öka nedträngningen. Genom sin koniska form med hög mantelfriktion och litet spetsmotstånd lämpar sig koniska pålelement särskilt för vibrodrivning. Nålarna installeras i grupp från periferin mot centrum, därigenom uppnås maximal packningseffekt. När det i förväg bestämda djupet har nåtts reduceras vibreringsfrekvensen för att framkalla resonanseffekter. Därigenom packas friktionsjorden omkring nålarna, varigenom bärförmågan ökas, jfr avsnittet om MRC-packning. Eftersom nålarna används som jordförstärkning krävs inga stoppslagningskriterier. Huvuddelen av lasten bärs längs den koniska manteln och endast en liten del överförs till spetsen.

Metoden utprovades i samband med ett komplicerat grundläggningsprojekt i Tyskland, Massarsch et al (1997). Där användes 9 m långa koniska betongnålar som installerades i en blandad fyllning av sand och slagg med skikt av silt och lera, *figur 22*. Nålarna vibrerades ner på mindre än 30 sekunder till 8 m djup. Under resonanspackningsfasen användes geofoner på närbelägna byggnader för

Figur 22.  
Konisk betongnål  
samt installation  
med frekvensvaria-  
bel vibrator,  
MS 100.



kontroll av att tillåtna vibrationsvärden inte överskrids.

Efter installationen provbelastades ett flertal pålar, som avbröts vid den erforderliga belastningen av 350 kN. Då uppgick sättningen på pålskallen till den elastiska hoptryckningen. En förklaring till den låga deformationen av vibrerade nålar i friktionsjord är att huvuddelen av lasten överförs via den koniska manteln, där lasten mobiliseras redan vid relativt små deformationer.

I samband med projektet utvecklades också en dimensioneringsmetod för jordförstärkning med vibrerade nålar i skiktade jordlager, Masarsch et al (1997). Principen liknar den i Sverige förekommande grundläggningsmetoden med ”kryppålar”.

### Vibrerad SOILEX-påle

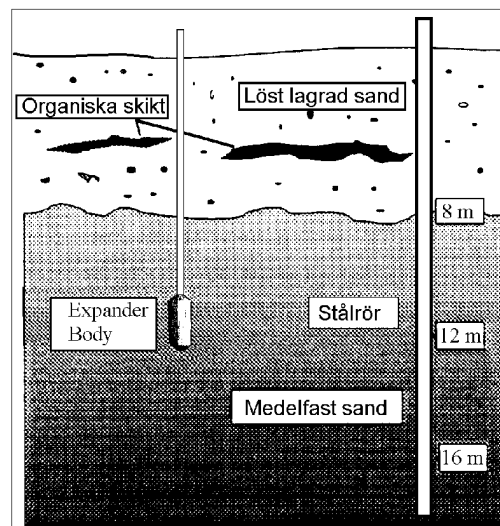
Den vibrerade SOILEX-pålen består av en pålspets som kan injekteras efter installation i jorden (Expander body). Ett veckat tunnväggigt plåtpaket sätts fast på pålskaftet och vibreras ner i jorden. När grundläggningsdjupet har nåtts injekteras pålspetsen med betong eller bruk. SOILEX-pålen är särskilt lämpad för installation med vibrator, eftersom pålspetsen inte behöver installeras i hårda jordlager. Därigenom kan stoppslagningsproblem undvikas och pållängderna reduceras. SOILEX-pålen kan användas för tryck- och dragbelastning.

I Allermöhe nära Hamburg genomfördes omfattande vibreringsförsök med olika påltyper, bl. a. öppna stålrör, stålrör med bottenplatta samt SOILEX-pålar, figur 23. De geo-

tekniska förutsättningarna är typiska för områden i Nordtyskland. Nära markytan förekom lös till medelfast sand med organiska skikt. I vissa fall påträffades också fasta sandskikt samt sten eller block. Under ett djup av ca 8 m påträffades fastare jordlager, bestående av medelfast till fast sand till stort djup. I figur 23 visas en typisk jordprofil. Vid undersökningen i Allermöhe användes Expander Body med diameter 500 och 800 mm (efter injektering) samt stålrör med diameter varierande mellan 168 mm (för EB) och 350 mm (utan Expander Body).

Installation av SOILEX-pålar utförs på följande sätt. Först vibreras en pryl till ca 1 m ovanför pålens grundläggningsnivå. Med hjälp av prylen kan även hårda jordlager penetreras snabbt. Dessutom erhålls information om jordens fasthet före installationen av SOILEX-

Figur 23.  
Jämförelse av installa-  
tionsdjup mellan kon-  
ventionell spetsburen påle  
och SOILEX-påle, Aller-  
möhe, Tyskland.



pålen. Vibreringstekniken visades sig vara mycket effektiv. Vid projektet undersöktes också nedträngningsförmågan av öppna och slutna stålrör vid vibreringen. Det visade sig att jorden vid vibrering trängde in i röret upp till ca 2/3-delar av rörets längd. Detta tyder på att mantelmotståndet vid vibrering reduceras såväl utanför som innanför röret. Vid påslagning med fallhejare utbildade sig däremot en propp vid påspetsen som ökade slagningsmotståndet avsevärt. Nedträngningshastigheten av det öppna röret var ca 5 gånger så högt som för ett slutet rör av samma diameter. Vid svår vibrationsdrivning har det visat sig vara fördelaktigt att först använda en pryl med mindre diameter, innan pålen installeras.

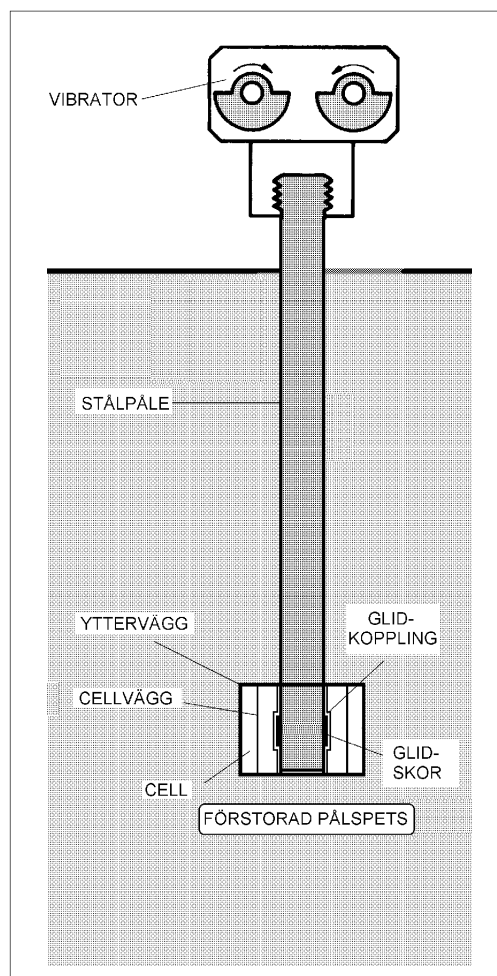
### Rasterpåspets för vibrerad påle

Vid KTH utvecklades för ca 20 år sedan en grundläggningsmetod (foundation grids) där valvverkan av med sand fyllda rastelement användes, (Broms & Massarsch, 1976). Rasterprincipen används vid grundläggning av off-shoreanläggningar, för att öka den horisontella bärförmågan. Rastelementen består av tunnväggiga stålplåtelement som kan pressas ner. När cellerna fylls med jord uppstår valvverkan och det flexibla rastelementet uppför sig som en styv platta. Vid belastning mobiliserar redan vid små deformationer mantelmotståndet. När belastningen ökar uppstår så småningom ett konventionellt bärlighetsbrott.

En viktig förutsättning för rasterprincipen är att cellernas höjd är tillräcklig stor i förhållande till diametern, så att valvverkan kan utbildas. Omfattande modellförsök har visat en mycket god bärförmåga av de jordfyllda rastelementen, som uppför sig som styva plattor med samma diameter.



Cellernas valvverkan kan med fördel utnyttjas i kombination med vibrerade pålar, *figur 24*. Cellväggarnas mantelmotstånd kan i friktionsjord övervinnas effektivt genom vibrering. Spetsmotståndet, som ofta förorsakar problem vid vibrering, är relativt lågt, vilket innebär hög nedträngningsförmåga. Jorden kring påspetsen kan efter installation packas ytterligare genom resonansvibrering. Problem kan uppstå i blockig jord. Efter installationen, när cellerna är fyllda med jord, uppstår valvverkan och påspetsen erhåller samma lastdeformationsegenskaper som en massiv påspets. Packningsgraden omkring påspetsen kan ökas genom att pålen utsätts för flera "frekvenssvep", för att åstadkomma resonanspackning runt foten och manteln. I *figur 25* visas en typ av påspets med cylindriska celler. Påspetsen kan antingen kopplas fast till röret eller anordnas rörligt via en glidkoppling. Glidkopplingen är till fördel i fasta jordlager, eftersom påskaftet vid vibrering utsätter påspetsen för stötblastning, varigenom nedträngningsförmågan ökar. Om så erfordras kan celler anordnas på flera nivåer längs påskaftet, t.ex. för att öka sidomotståndet.



*Figur 24 (till vänster). Påspets för vibrerade pålar med celler och glidkoppling.*

*Figure 24 (left). Pile base for vibrated piles with grid and sliding shoe*

*Figur 25 (till höger). Principskiss av stålrörspåle med förstorad rasterpåspets.*

*Figure 25 (right). Principle sketch of steel pile with expanded pile tip, using grid.*

## 8. Slutsatser

Under de senaste 15 åren har vibreringstekniken utvecklats mycket snabbt, främst i Tyskland, Holland och Frankrike. Vibratormodeller har tagits fram som erbjuder helt nya möjligheter för installation av pålar och sponter, även i tidigare mycket besvärliga jordförhållanden. Genom (stegvis eller kontinuerlig) variation av vibreringsfrekvens och det statiska momentet ökas vibreringseffektiviteten, samtidigt som omgivningspåverkan begränsas.

En ny hypotes har presenterats, som förklarar varför vibrationsdrivning är mycket effektiv i friktionsjord. Den oscillerande pålen framkallar horisontella markvibrationer intill pålens mantel. Vid varje nedåtgående rörelse avlastas samtidigt horisontaltrycket mot pålmanteln och därigenom minskar mantelmotståndet temporärt. Frekvensen av den horisontella svängningsrörelsen är dubbelt så hög som pålens (och vibratorns) svängningsfrekvens. Denna hypotes har verifierats i samband med flera jordpackningsprojekt. Om det kan visas att denna hypotes har allmängiltighet kan en beräkningsmodell utvecklas som bättre beskriver nedträngningsförloppet. Denna kunskap är också av betydelse för bedömning av en vibrerad påles bärförmåga.

Idag finns teoretiska kunskaper och erfarenheter, baserat på vilka det är möjligt att empiriskt uppskatta erforderlig vibratorkapacitet. Dessa samband bygger på erfarenheter från Mellaneuropa och måste verifieras i svenska jordförhållanden. En analytisk modell har tagits fram, där det dynamiska mantel- och spetsmotståndet kan beräknas baserat på CPT-sondering. För närvarande pågår flera internationella forskningsprojekt som studerar de mekanismer som styr vibrationsdrivning i olika jordarter.

Genom användning av resonanseffekten kan pålars bärförmåga ökas i friktionsjord och packningsprocessen göras mera effektiv. Vid MRC-packning används en vibrator med variabel frekvens samt ett packningsdon med låg impedans, som innebär en optimal överföring av vibrationsenergin till jorden.

I Mellaneuropa har flera olika metoder utvecklats för att minska jordmotståndet vid vibrering. Dessa förfaranden och främst vattenspolning borde vara tillämpbara i svenska jordar. En utomlands vanlig metod är vibrerade slitsväggar. Det borde finnas en marknad för denna metod även i Sverige.

Ett stort framtida användningsområde för vibratorer inom grundläggningsområdet är jordpackning och jordförbättring genom vertikal armering. Det finns omfattande teoretisk och praktisk kunskap som kan användas för planering, projektering och genomförande. Av intresse bör vara koniska betongnålar.

En ny typ av pålspets har utvecklats som lämpar sig för vibrationsdrivning. Spetsen består av celler, som under vibreringen har litet spetsmotstånd men vid den statiska belastningen överför lasten genom det statiska mantelmotståndet.

Avslutningsvis kan konstateras att vibreringstekniken har börjat tillämpas i Sverige i ökad utsträckning, främst för installation av sponter. Samma utrustning skulle kunna utnyttjas även för vibrationsdrivning av pålar, eller andra tillämpningar inom grundläggningsområdet. För att snabbt nå detta mål krävs fortsatt forskning, som bedrivs i ett nära samarbete mellan entreprenörer, maskintillverkare, konsulter och forskare.



# Litteratur

- Broms, B. B. & Massarsch, K. R., (1976).** Grid Mats A New Foundation Method, IX Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo 1977, Proceedings, Session II, S. 433-437.
- Eresund, S. (1977).** Pål- och spontslagning med vibrationsutrustning. Skånska Cementgjuteriet, Intern rapport, 45 s.
- Eriksson, L., Hellmann, L., Larsson, B., & Lindskog, L. (1979).** Utvärdering av pålars bärförmåga ur statisk provbelastning. Några erfarenheter från slagna och vibrerade pålar. Nordisk Geoteknikermöte, NGM-79 s. 375 - 384
- Hartung, M. (1994).** Einfluß der Herstellung auf die Pfahltragfähigkeit im Sand. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhemina zu Braunschweig, 170 s.
- Krogh, P. & Lindgren, A. (1997).** Dynamic field measurements during deep compaction at Changi airport, Singapore. Examensarbete 97/9, JOB, KTH, 88 s.
- Kühn, G. (1980).** Abhängigkeit der Ramm- und Ziehverfahren von der Bodenbeschaffenheit. (Beroendet av slagnings- och uppdragningsförfaranden av jordförhållanden). Baumaschine und Bautechnik, Tyskland, Vol. 27. No. 8., pp. 558 - 567.
- Martin, D. J. (1980).** Ground Vibrations from Impact Pile Driving during Road Construction. TRRL Supplementary Report 544, 16 s.
- Massarsch, K. R. (1984).** Vibrationer i jord och berg. Handboken Bygg, Avsnitt G 20, Stockholm, S. 517 - 524.
- Massarsch, K. R. & Heppel, G. (1991).** Resonance Compaction for Granular Soils, Southeast Asia Building Journal, December 1991, S. 36 - 40.
- Massarsch, K. R. (1992).** Static and Dynamic Soil Displacements Caused by Pile Driving. Keynote Lecture, Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, the Hague, the Netherlands, September 21-24, 1992, pp.15 - 24.
- Massarsch, K. R. (1993).** Man-made Vibrations and Solutions, State-of-the-Art Lecture, Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, June 1 - 6, 1993, Vol. II, pp. 1393 - 1405.
- Massarsch, K. R., Westerberg, E. & Broms, B. B. (1997).** "Footings supported on settlement-reducing vibrated soil nails". Paper submitted for publication, XIV, International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg 97, 7 s.
- Massarsch, K. R. (1997).** Djuppackning enligt MRC-metoden, erfarenheter från flygplatsprojektet i Singapore. Grundläggningsdagen 97, SGF, s.17 - 31.
- Massarsch, K. R. (1999).** "Deep compaction of granular soils". State-of-the art report, Lecture Series: Geotechnics in the 20<sup>th</sup> Century, University of Zhejiang, China, 39 s.
- Persson, K. (1999).** Drivbarhetsstudier av spont i friktionsjord med resonansfri vibrohejare. Examensarbete 99/9 JOB, KTH, 19 s.
- Tomlinson, M. J. (1986).** Foundation Design and Construction, 5th Edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, 842 s.
- Viking, K. (1997).** Vibratory driven piles and sheet piles – a literature survey. JOB, Report 3053, KTH,
- Viking, K. (1998).** Driveability studies of vibro-driven model piles in non-cohesive soils – laboratory simulations, Licentiate Thesis 2029, JOB, KTH, Stockholm.
- Westerberg, E., Massarsch, K. R. & Eriksson, K. (1996).** Soil resistance during vibratory pile driving. Proceedings, International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'95, Volume 3, s. 241 - 250.
- Westin, T. (1978).** Försök med dynamisk neddrivning av klen spont i silt. Luleå Tekniska Högskola, Tekniks Rapport 1978:57T, 28 s.
- Westin, T. (1978).** Vibroslagning av klen spont i silt. Luleå Tekniska Högskola, Examensarbete 1978; 155E, 27 s.

I september 1959 bildades Pålkommittén för påslagning och pålbärighet.

Till grund för kommissionens verksamhet ligger samhällets och branschens behov av forskning och information inom pålningsområdet. Medlemmar är entreprenörer, tillverkare, konsulter, forskare, kommuner samt representanter från olika myndigheter. Organisationen Pålkommisionen, som sammanfogar dessa grupper, är unik i Europa.

Ytterligare upplysningar om Pålkommisionens verksamhet och medlemskap lämnas av kommissionens sekreterare Carl-John Grävare.

#### **Pålkommisionen**

c/o Statens geotekniska institut

581 93 Linköping, Tel: 013-20 18 00, Fax: 013-20 19 14

E-post: [carl-john@palanalys.se](mailto:carl-john@palanalys.se) Internet: [www.palkommisionen.org](http://www.palkommisionen.org)