

Vibrationer vid slagning av pålar och spont

Svenska Geotekniska Föreningens Markvibrationskommitté har tagit fram en skrift som beskriver olika aspekter av hur markvibrationer påverkar geoteknikerns verksamhet. Vibrationsproblem vid påslagning behandlas i avsnitt 3, *Massarsch & Wersäll* (2012). Skriften kan laddas ner kostnadsfritt från SGF:s hemsida: <http://www.sgf.net>. Föreliggande artikel bygger på författarnas forskning under de senaste 20 åren inom jorddynamikområdet. Ett försök görs att förenklar de teoretiska grunderna så att dessa kan användas som praktisk handledning vid bedömning av markvibrationer som kan förorsakas vid slagning av pålar och spont.

På grund av de geotekniska förutsättningarna i de nordiska länderna med mäktiga lager av lös lera och sand på fast morän eller berg är slagning av pålar den vanligaste djupgrundläggningsmetoden. För djupa schakter används stålspont som stödkonstruktion och den installeras ofta med fallhejare. Eftersom myndigheter i Sverige och internationellt ställer allt hårdare miljökrav med avseende på vibrationer och buller, vilket begränsar användningen av påslagning, är det nödvändigt att projektören redan under ett tidigt skede av projektet kan uppskatta om – och i vilken omfattning – vibrationsproblem och skador på byggnader kan förväntas. Under de senaste decennierna har stötvågsräkningar för bedömning av pålars

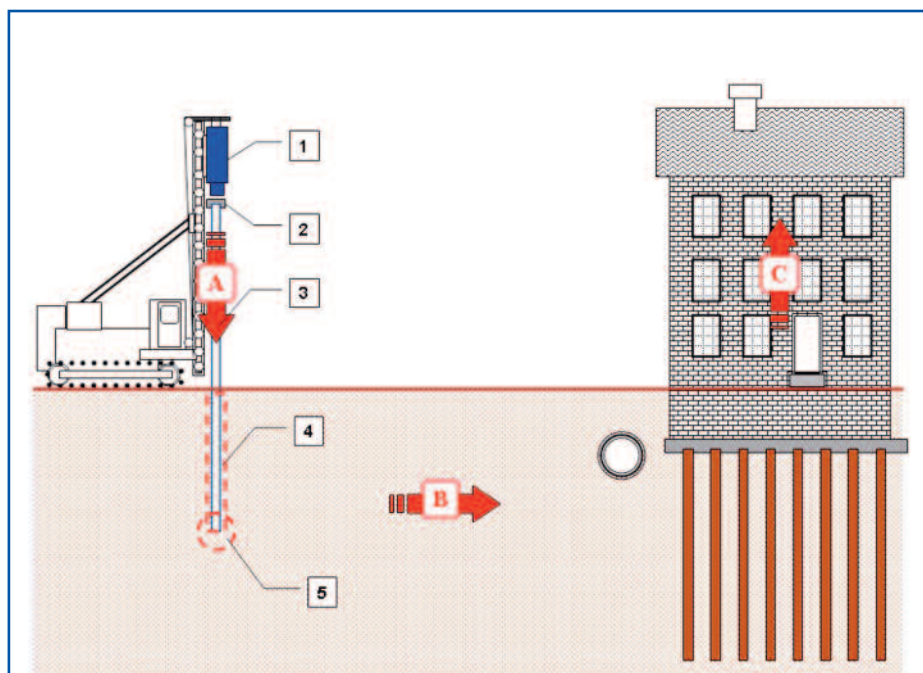


bärförmåga blivit allt vanligare. Däremot saknas fortfarande grundläggande kunskaper om hur vibrationer uppstår vid påslagningen, hur dessa utbreder sig i marken och kan påverka omgivningen. Under senare tid har förståelsen för jorddynamiska frågeställningar inom geotekniken resulterat i nya modeller som även omfattar vibrationsproblem vid slagning och vibrering av pålar. I föreliggande artikel beskrivs hur vibrationer uppstår vid påslagning och hur dessa utbreder sig i

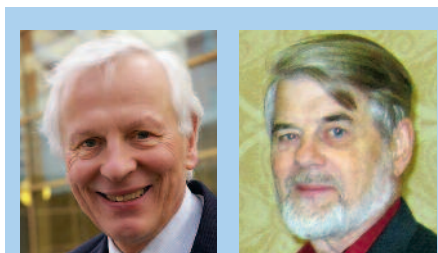
omgivande jordlager. Dessutom redovisas en förenklad metod för uppskattning av markvibrationer och sättningar som kan förorsakas av påslagning.

Vibrationer från påslagning

När en påle trycks ner långsamt i jorden så uppstår inga eller endast mycket svaga vibrationer. När pålens nedträngningshastighet ökar så ökar också markvibrationernas intensitet. Med andra ord, markvibrationerna är beroende av de dynamiska krafterna som uppstår i gränsytan mellan pålen och den omgivande jorden. Vibrationer uppstår på grund av den stötvåg som framkallas i pålen när hejaren slår mot pålen. Stötvågen utbreder sig genom pålen och överförs längs manteln och vid pålspetsen till de jordlager som pålen penetrerar. Vibrationerna överförs sedan från pålens mantel och/eller spets i form av olika vågtyper till omgivningen. Vibrationer avtar ofta med ökande avstånd från vibrationskällan men kan förstärkas i jordlager eller byggnader på grund av resonanseffekter. Vibrationsutbredningen är ett komplicerat förlopp som illustreras i *figur 1*. Fallhejaren (1) överför den kinetiska energin via påldynan (2) till pålen (3). Stötvågen i pålen framkallar ett dynamiskt jordmotstånd längs pålens mantel (4) och vid pålspetsen (5). Fördelningen av det dynamiska mantelmotståndet, R_M ,



Figur 1: Principfigur av vågutbredningen vid slagning av påle eller spont (A), vågutbredning i omgivande jordlager (B) och respons av byggnad (C).



Artikelförfattare är **K. Rainer Massarsch**, tekn dr, Geo Risk & Vibration Scandinavia AB, rainer.massarsch@georisk.se, och **Bengt H. Fellenius**, Sidney, BC, Kanada, bengt@fellenius.net.

och spetsmotståndet, R_T , beror på de geotekniska och jorddynamiska förutsättningarna under pålens nerträngning. Vibrationer kan således framkallas samtidigt längs pålens mantel och vid pålens spets.

Vibrationerna orsakas av det dynamiska jordmotståndet längs manteln och utbreder sig i form av cylindriska vågor till omgivningen. Vid spetsen uppstår i första hand kompressionsvågor (P-vågor) samt skjuvvågor (S-vågor) som båda utbreder sig som sfäriska vågor i alla riktningar. När P- och S-vågorna når markytan reflekteras och refrakteras de. Genom refractionen uppstår ytvågor (R-vågor) som kan utbreder sig med relativt låg geometrisk dämpning längs markytan.

Fallhejarens anslagshastighet v_0 kan beräknas enligt följande samband:

$$v_0 = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

där g är jordaccelerationen och h är fallhöjden. Det är viktigt att observera att hejarens anslagshastighet är oberoende av hejarens massa. Den maximala partikelhastigheten som framkallas av stötvågen i pålen, v^P kan beräknas om hejarens Z^H och pålens Z^P impedans är känd:

$$v^P = \frac{v_0}{1 + \frac{Z^P}{Z^H}} \quad (2)$$

Pålens impedans Z^P är en viktig parameter inom påldynamiken och kan beräknas enligt följande samband:

$$Z^P = A^P c^P \rho^P = \frac{E^P A^P}{c^P} \quad (3)$$

där A^P är pålens tvärsnittsarea, c^P är vågutbredningsfarten (också kallad vågutbredningshastighet) i pålen, ρ^P är pålmaterialets densitet och E^P är pålmaterialets elasticitetsmodul. På motsvarande sätt kan hejarens impedans Z^H beräknas.

Partikelhastigheten i pålen, v^P är enligt ekvation (2) beroende av kvoten mellan pålens och hejarens impedans. Om pålens impedans är högre än hejarens så sjunker partikelhastigheten av stötvågen i pålen. Om pålens och hejarens impedans antas vara lika så förenklas ekvation (2) till:

$$v^P = 0,5 v_0 \quad (4)$$

det vill säga partikelhastigheten i pålen är hälften av hejarens anslagshastighet. Den dynamiska kraften F_i av stötvågen, som avgör intensiteten av det dynamiska jordmotståndet och därmed markvibrationernas intensitet, kan beräknas med ledning av följande samband:

$$F_i = Z^P v^P \quad (5)$$

där Z^P är pålens impedans och v^P är partikelhastigheten av stötvågen. Den dynamiska kraften som fortplantar sig genom stötvågen längs pålen ger upphov till markvibrationerna.

Hur uppstår vibrationer

Vanligtvis uppstår starka vibrationer vid slagning av pålspetsen mot ett fast jordla-

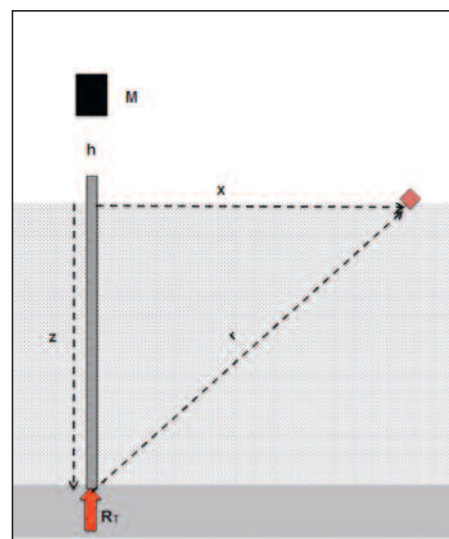
ger. Vibrationer kan också utstrålas längs pålmanteln när pålen slås genom medel- och fast lagrad friktionsjord med hög mantelfriktion. Det dynamiska jordmotståndet som framkallar markvibrationer mobiliseras vid pålspetsen R_T och kan beräknas enligt följande samband, *Masarsch & Fellenius* (2008):

$$R_T = 2 v^P Z_P \quad (6)$$

där v^P är partikelhastigheten vid pålspetsen, Z_P är jordlagrets impedans för P-vågor. Det dynamiska spetsmotståndet är beroende av P-vågimpedansen under pålspetsen och partikelhastigheten i pålen. Impedansen i jordlagret Z_P kan beräknas enligt följande samband

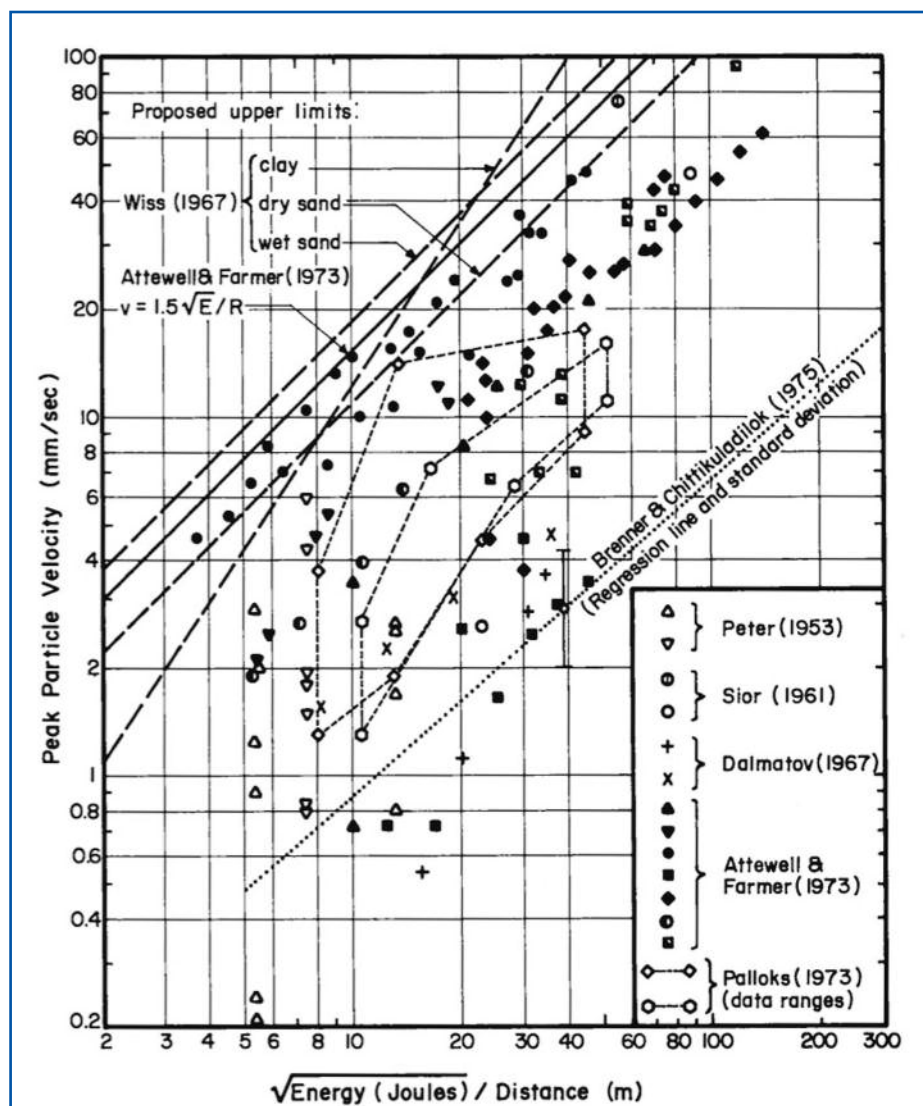
$$Z_P = A^P c_P \rho_j \quad (7)$$

där A^P är pålens tvärsnittsarea, c_P är P-vågshastigheten i jordlagret under pålen och ρ_j är jordlagrets totaldensitet. P-vågshastigheten i löst lagrad jord lika med P-vågshastigheten i vatten (1450 m/s) men kan vara högre i fasta jordlager, till exempel morän. Jordmaterialets totaldensitet varierar för de flesta jordlagren inom ett begränsat intervall (1 700 till 2 200 kg/m³). Lägg märke till att jordlagrets P-vågsim-

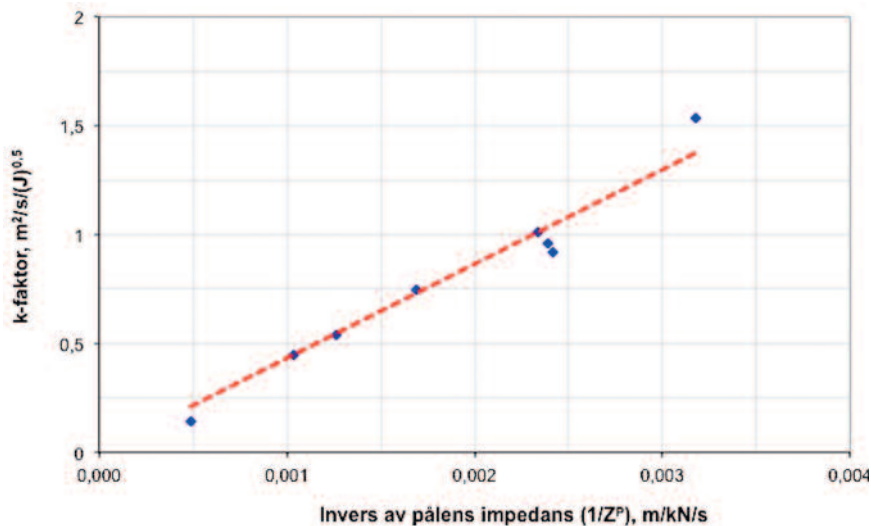


Figur 2: Samband mellan vibrationskällans läge (fast jordlager som genererar det dynamiska jordmotståndet) och observationspunkten på markytan.

pedans, Z_P , inte är samma som pålens impedans Z^P . Genom insättning av ekvation (6) i ekvation (7) erhålls ett samband som visar vilka parametrar som har störst betydelse för det dynamiska spetsmotståndet



Figur 3: Resultat från vibrationsmätningar vid pålslagning med indikation av spridningen av k-faktorn, efter Brenner & Viranuvut (1977).



Figur 4: Sambandet mellan pålens impedans Z^P och den empiriska faktorn k enligt ekvation (9).

och därmed vibrationsutbredningen från pålspetsen:

$$R_T = 2 \nu^P A^P c_P \rho_j \quad (8)$$

Av ekvation (8) framgår att parametrarna som har betydelse för det dynamiska jordmotståndet och därmed risken för markvibrationer är partikelhastigheten i pålen, ν^P , pålens tvärsnittsarea och P-vågfarten, c_P . En detaljerad beskrivning av mekanismerna som påverkar vibrationsutbredningen vid påslagning har redovisats av Massarsch & Fellenius (2008).

Empirisk metod för uppskattning av markvibrationer

För att kunna bedöma risken för markvibrationer från påslagning med hejare har empiriska metoder tagits fram. Ett vanligt förekommande samband som ofta an-

vänds i praktiken är:

$$v = k \frac{\sqrt{W}}{r} = k \frac{\sqrt{(M g h)}}{r} \quad (9)$$

där v (mm/s) är markvibrationens vertikala komponent, k ($m^2 / s / \sqrt{J}$) är en empirisk faktor, W (Nm) är slagenergin som överförs från hejaren till pålen, M (ton) är fallhejarens massa, g (m/s^2) är jordaccelerationen, h (m) är fallhöjden och r (m) är avståndet från vibrationskällan till observationspunkten på markytan. Figur 2 på föregående sida illustrerar sambandet mellan vibrationskällans läge och observationspunkten på markytan. Avståndet, r , från vibrationskällan till observationspunkten ska inte förväxlas med det horisontella avståndet på markytan.

En viktig uppgift är att identifiera djupet av den huvudsakliga vibrationskällan när pålen tränger ner genom jordlagren.

Detta kan ske lämpligen utgående från sondering eller resultat från provpålning. Om ingen annan information finns tillgänglig rekommenderas att i ekvation (9) välja r som avståndet mellan pålspetsen och observationspunkten på markytan.

En annan viktig faktor som måste väljas i ekvation (9) är k . Brenner & Viranuvut (1977) redovisar resultat från vibrationsmätningar vid påslagning i olika jordarter. Av figur 3 på föregående sida framgår att spridningen av mätvärdena är stor. Ofta används i litteraturen ett medelvärde, $k = 0,75$.

Utgående från fältmätningar har Heckman & Hagerty (1978) visat att k -faktorn är beroende av pålens impedans. Massarsch & Fellenius (2008) har analyserat dessa mätdata och funnit att k -faktorn är en linjär funktion av inversen av pålens impedans, Z^P , jämför figur 4 och nedanstående ekvation:

$$k = \frac{433}{Z^P} \quad (10)$$

Genom insättning av ekvation (3) och (10) i ekvation (9) erhålls ett samband som kan användas för uppskattning av den vertikala svängningshastigheten vid påslagning:

$$v = \frac{433}{Z^P} \frac{\sqrt{(M g h)}}{r} = \frac{433 c^P}{E^P A^P} \frac{\sqrt{(M g h)}}{r} \quad (11)$$

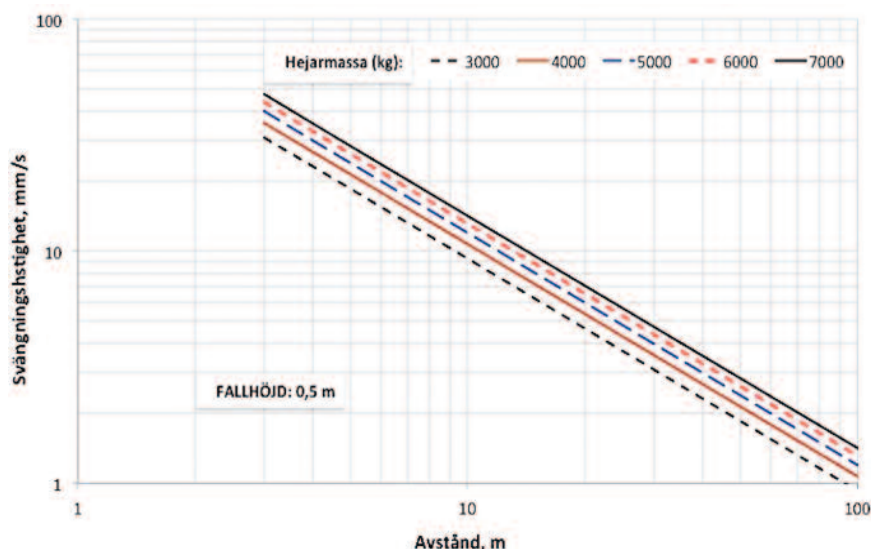
Det bör beaktas att beräkningen av den vertikala svängningshastigheten enligt ekvation (11) ger ett approximativt värde som bör verifieras genom fältmätningar eller provpålning.

Exempel

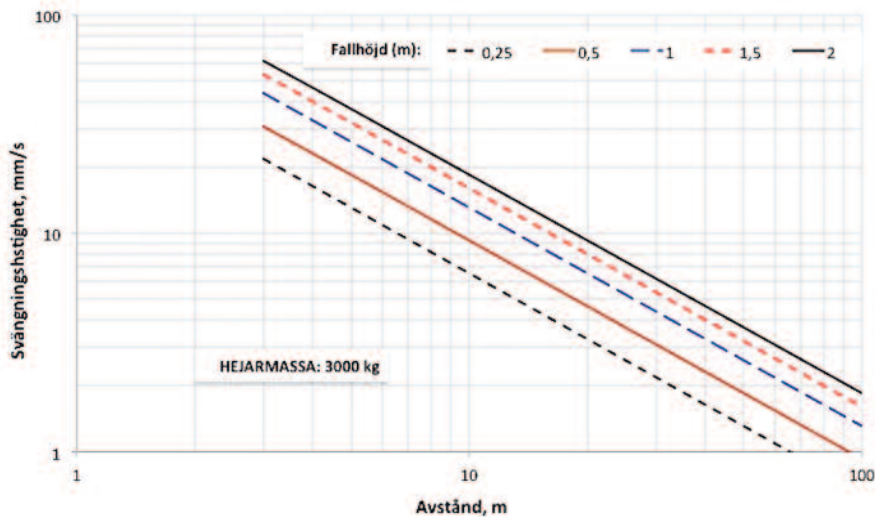
I detta avsnitt ges några exempel på hur ovan redovisade teoretiska samband kan användas i praktiken. Det antas att en betongpåle med area $A^P = 0,0552 \text{ m}^2$, vågfart $c^P = 3900 \text{ m/s}$, elasticitetsmodul $E^P = 40000 \text{ MPa}$ ska slås genom en medelfast jord. Med stöd av ekvation (3) erhålls pålens impedans $Z^P = 566 \text{ kN/m}$. I figur 5 visas hur markvibrationerna varierar med avstånd från vibrationskällan när pålen slås med konstant fallhöjd $h = 0,5 \text{ m}$ och varierande hejarmassa (3 till 7 ton).

I figur 6 på sidan 16 visas för samma påle markvibrationernas avståndsberoende när pålen slås med en hejare med en massa av 3 ton med varierande fallhöjd. Av diagrammet framgår tydligt fallhöjdens betydelse för markvibrationers intensitet.

I nästa exempel antas att en betongpåle slås genom ett skikt av lös lera till fast morän på 10 m djup. Pålens kantlängd är 0,30 m och fallhejarens massa är 4000 kg. För en betongpåle av typ SP1 med area $A^P = 0,09 \text{ m}^2$, vågfart $c^P = 3900 \text{ m/s}$ och elasticitetsmodul $E^P = 40000 \text{ MPa}$ erhålls pål impedansen $Z^P = 923 \text{ kN/m}$. Hejarens fallhöjd antas variera mellan 0,2 och 2 m. Vibrationernas avståndsbero-



Figur 5: Markvibrationers avståndsberoende enligt ekvation (11) vid slagning av betongpåle med konstant fallhöjd och varierande hejarmassa. Observera att avståndet r räknas från vibrationskällan till observationspunkten på markytan, jämför figur 2.



Figur 6: Markvibrationers avståndsberoende enligt ekvation (11) vid slagning av betongpåle med hejar med 3 ton konstant massa och varierande fallhöjd. Observera att avståndet r räknas från vibrationskällan till observationspunkten på markytan, jämför figur 2.

ende uppskattas med hjälp av ekvation (11) och redovisas i figur 7.

Åtgärder för att minska markvibrationer

Vid projektering av pålningsprojekt där markvibrationer kan vara ett problem, till exempel vid anläggningsarbeten i bebyggda områden, är det viktigt att kunna

bedöma vilka faktorer som har störst betydelse för att kunna minska risken för omgivningspåverkan. Följande synpunkter bör beaktas under projekterings- och utförandeskede vid arbeten i vibrationskänsliga områden:

1. Bestäm de geotekniska förutsättningarna utgående från sonderingar för att bestämma jordlagerföljder och lager

med högt slagningsmotstånd. Genom förborrning kan risken för markvibrationer reduceras, särskilt vid fasta jordlager nära markytan.

2. Pålens impedans är en viktig faktor; vid slagning av pålar med låg impedans ökar risken för markvibrationer. Välj därför en påle med hög impedans.

3. Hejarens anslagshastighet och därmed fallhöjd har direkt inverkan på markvibrationers intensitet. Vid vibrationsproblem är det lämpligt att öka hejarmassan och att minska fallhöjden.

Sättningar på grund av påslagning

Vid slagning av pålar i lös och medelfast friktionsjord finns risk för packning i första hand inom en zon nära den slagna pålen. Sättningarna blir störst när den ursprungliga packningsgraden är låg. I vattenmättad, löst lagrad friktionsjord uppstår temporärt höga porvattentryck som minskar effektivspänningen och kan leda till jordförvätskning ("liquefaction"). Om skikt av silt eller sand är inbäddade mellan lerlager så kan porvattentrycket leda till fullständig förlust av skjuvhållfastheten. Denna effekt kan påverka stabiliteten av slänter i vilka pålar ska slås.

Följande empiriska förfarande kan användas för att uppskatta sättningen kring en påle som slås i ett homogent sandlager, jämför figur 8. Det antas att packningen av sanden sker huvudsakligen i en zon

motsvarande tre påldiametrar. Volymminskningen på grund av vibrationerna som utbreder sig längs pålens spets och mantel sker inom en kon med lutning 2V:1H med konens spets på ett djup motsvarande sex påldiametrar under pålen, Massarsch (2004). I nedanstående metod har pålvolumens jordundanträngningseffekt försumrats.

Sättningskonen kommer att sträcka sig ett avstånd av $3B + L / 2$ från pålens centrum. Den maximala sättningen och den genomsnittliga sättningen, kan uppskattas enligt följande samband:

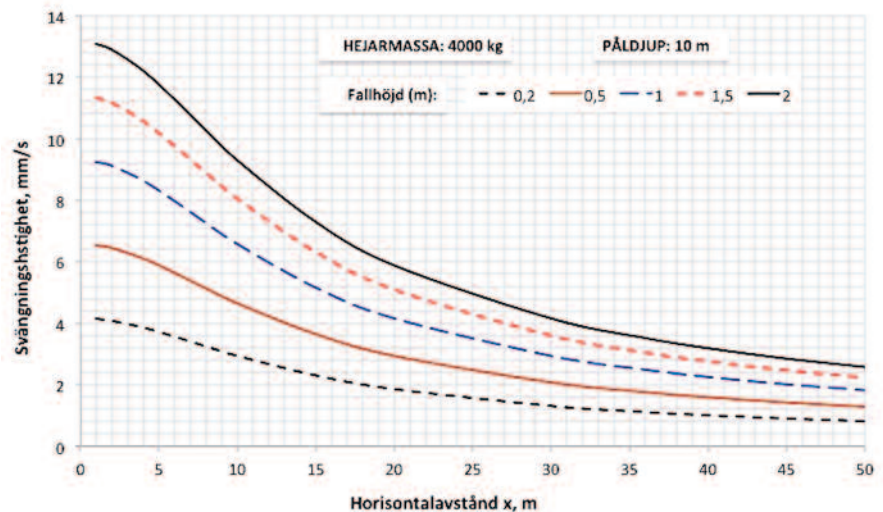
$$s_{max} = \alpha(L + 6B); \quad s_{med} = \alpha \frac{(L + 6B)}{3} \quad (12)$$

där α är packningsfaktorn enligt tabell 1. Slagningsenergin beror på pålinstallationsmetoden, slagningsmotsståndet och påltyp. Den föreslagna beräkningsmetoden kan användas för att uppskatta sättningen intill en pålgrupp. Det bör beaktas att sättningar också kan uppstå utanför den antagna sättningskonen men dessa är ofta små och försumbara. Om jordlagret innehåller inkompressibla jordlager (till exempel mycket fast lagrad sand eller lera) så kommer dessa att minska totalsättningen. Detta kan beaktas genom att reducera pålen till längd motsvarande mäktigheten av de jordlager där sättningarna kan förväntas uppstå.

Som exempel antag att en betongpåle med kantlängd $B = 0,30$ m med en effektiv pållängd (längd i de kompressibla jordlagren) $L = 10$ m slås genom medelfast sand. Pålen installeras medels fallhejare och pålsjunkningen är normal (det vill säga ingen hård slagning genom fasta skikt). Packningsfaktorn väljs därför enligt tabell 1 $\alpha = 0,01$. Radien av packningskonen erhålls enligt figur 8 till 5,9 m. Den maximala sättningen, s_{max} , och medelsättningen, s_{med} , blir 118 respektive 39 mm.

Vibrationspåverkan i friktionsjord

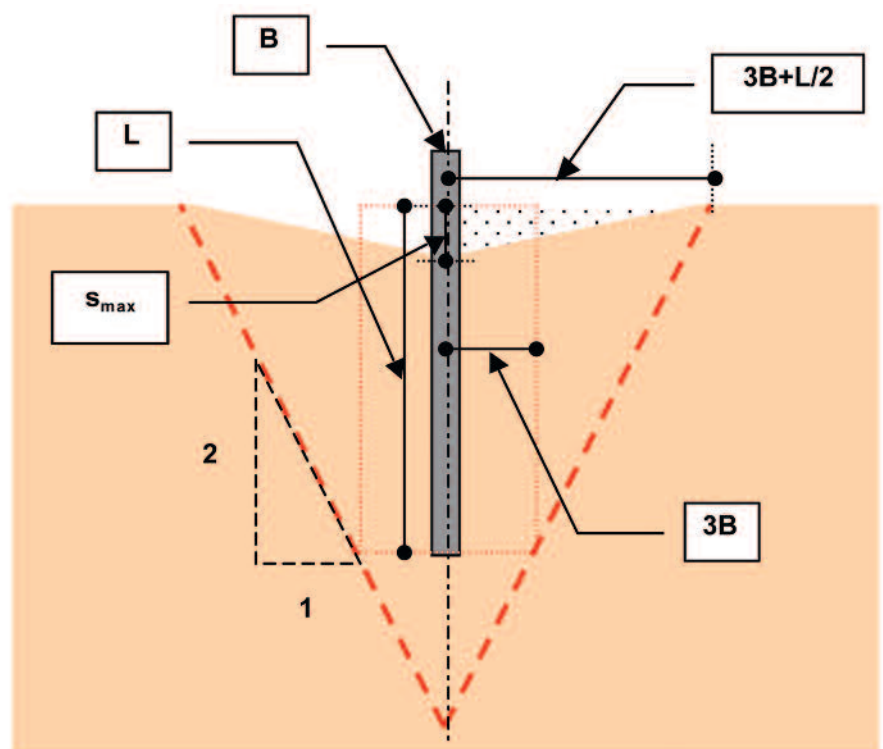
Löst och medelfast lagrad friktionsjord påverkas av vibrationer från till exempel sprängning, jordpackning eller pålslagning genom att att porvattentrycket ökar. Om påverkan sker så snabbt att porvattenöverttrycket inte hinner utjämnas mellan slagen utan ackumuleras, kan effektivtrycket minskas. Om porvattentrycksökningen då blir så stor att det totala effektivtrycket sjunker till noll förlorar jorden all skjuvhållfasthet. Detta tillstånd innebär att den vattenmättade friktionsjorden omvandlas till en tung vätska. Om vibrationspåverkan är av cyklisk natur och porvattentrycket hinner utjämnas, till exempel vid jordpackning så sker en volymminskning som resulterar i sättningar. Olika teoretiska och empiriska modeller har tagits fram för att uppskatta sättningar på grund av vibrationspåverkan, Massarsch (2000). Det kan vara svårt att beräkna sättningarnas storlek utan att först



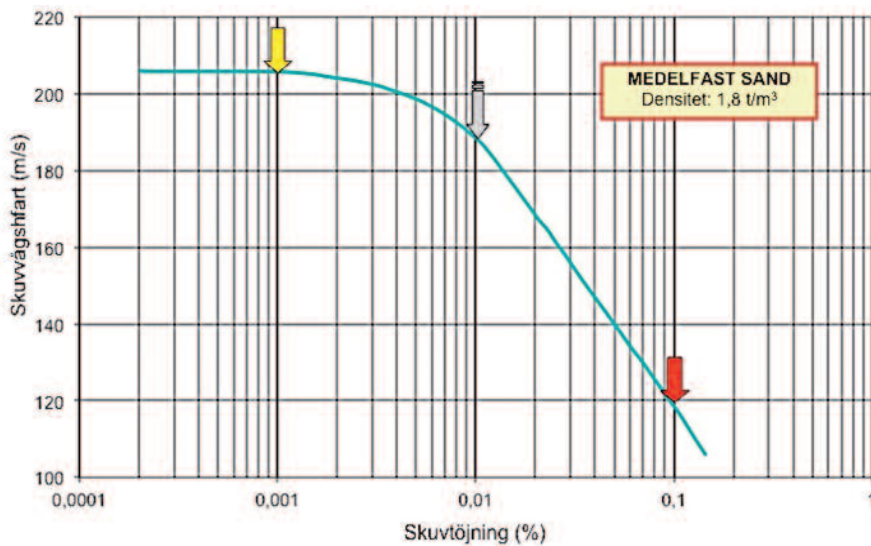
Figur 7: Vertikal svängningshastighet som funktion av horisontalavståndet när en betongpåle slås mot ett fast jordlager på 10 m djup, jämför figur 2.

Tabell 1. Packningsfaktor α för olika packningsgrad och slagningsintensitet.

Slagningsenergi:	Låg	Medel	Hög
Packningsgrad	Packningsfaktor, α		
Mycket lös	0,02	0,03	0,04
Lös	0,01	0,02	0,03
Medel	0,005	0,01	0,02
Fast	0,00	0,005	0,01
Mycket fast	0,00	0,00	



Figur 8: Förenklat förfarande för att uppskatta sättningar kring en påle som slagits i ett homogent sandlager, Massarsch (2004).



Figur 9: Exempel på skjuvvågsfartens beroende av skjuvtöjningsnivå för medelfast lagrad sand.

göra en detaljerad analys av vibrationsutbredningen från vibrationskällan, i vårt fall, påslagning. I många fall är det dock tillräckligt att uppskatta vid vilken svängningshastighet som sättningar kan förväntas ske i olika jordlagren. Sättningar i friktionsjord uppstår i första hand på grund av skjuvtöjning. Skjuvtöjningen γ kan beräknas om svängningshastigheten, v , och skjuvvågsfarten, c_s , är känd:

$$\gamma = \frac{v}{c_s} \quad (13)$$

I figur 9 visas resultat från resonant column ("resonanspelar") försök på ett ostört prov av medelfast lagrad sand. Skjuvvågsfarten är beroende av töjningsnivå på samma sätt som skjuvmodulen. Vid skjuvtöjning som är mindre än 10^{-3} procent (elastiskt tillstånd) är skjuvvågsfarten konstant. När skjuvtöjning överstiger cirka 10^{-2} procent minskar skjuvvågs-

farten och vid en skjuvtöjning större än 10^{-1} procent finns stor risk för en omlagring av jordpartiklarna. Minskningen av skjuvvågsfarten är beroende av finkornsandelen och störst i löst lagrad sand och grus, Massarsch (2005).

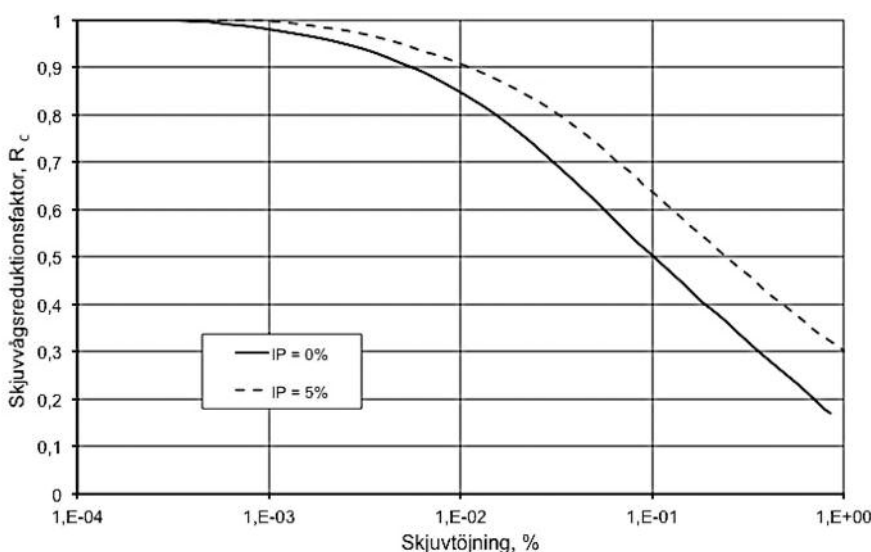
Det är möjligt att beräkna den svängningshastighet som ger en skjuvtöjning av 0,001 procent, vid vilken det är mycket osannolikt att sättningar uppstår. Om skjuvtöjningsnivån 0,001 procent inte ska överskridas och det antas att en mycket löst lagrad sand har skjuvvågsfarten 100 m/s så erhålls med ledning av ekvation (13) en svängningshastighet av 1 mm/s. Skjuvvågsfartens töjningsberoende är avhängig av plasticitetsindex, IP , som illustreras i figur 10.

Det är nödvändigt att för det aktuella fallet bestämma eller uppskatta skjuvvågsfartens töjningsberoende. I figur 9 visas ett exempel på medelfast sand. Vid en

skjuvvågsfart av 205 m/s är svängningshastigheten 2,1 mm/s. Vid en skjuvtöjning av 0,01 procent börjar risken för omlagring av jordpartiklar och därmed sättningar. Skjuvvågsfarten enligt figur 9 har sjunkit från 210 till 190 m/s. Om reduktionsfaktorn för sand enligt figur 10 antas gälla $R_C = 0,84$ så erhålls en reducerad skjuvvågsfart av 172 m/s. Den kritiska partikelhastigheten v ligger då mellan 17 och 19 mm/s då det finns viss risk för sättningar. Vid en skjuvtöjningsnivå av 0,1 procent har skjuvvågsfarten enligt figur 9 sjunkit till 120 m/s. Om reduktionsfaktorn väljs enligt figur 10 för 0,1 procent erhålls $R_C = 0,5$ som ger en skjuvvågsfart av 100 m/s. När svängningshastigheten är av storleksordningen 100 till 120 mm/s finns stor risk för betydande sättningar. ■

Referenser

- Brenner, R.P. & Viranuvut, S., (1977). *Measurement and prediction of vibrations generated by drop hammer piling in Bangkok subsoils*. Proceedings of the 5th Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Bangkok, July 1977, s. 105–119.
- Heckman, W.S. & Hagerty, D.J., (1977). *Vibrations associated with pile driving*. American Society of Civil Engineering, Journal of the Construction Division, 104(CO4) s. 385–394.
- Massarsch, K.R. (2000). *Settlements and damage caused by construction-induced vibrations*. Proceedings, Intern. Workshop Wave 2000, Bochum, Germany 13–15 December 2000, s. 299–315.
- Massarsch, K. R. (2004). *Vibrations Caused by Pile Driving*. Deep Foundations Institute, Magazine. Part 1: Summer Edition, pp. 41–44, Part 2: Fall Edition, s. 39–42.
- Massarsch, K.R. (2005). *Deformation Properties of Stabilized Soil Columns*, Proceedings, Intern. Conf. On Deep Mixing, Stockholm, 23–25 May, 2005. Vol. 1, s. 129–144.
- Massarsch, K.R. & Fellenius, B. H. (2008). *Ground vibrations induced by pile driving*. 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August 11–16, 2008. Keynote lecture. 38 s.
- Massarsch, K.R. & Wersäll, C. (2012). *Markvibrationer*. SGF:s Informations-skrift 1:2012. Avsnitt 3.3: Pålning, Svenska Geotekniska Föreningen (SGF). 57 s.



Figur 10: Skjuvvågsfartens töjningsberoende för ren friktionsjord och friktionsjord med plasticitetsindex, IP är lika med 0,5.