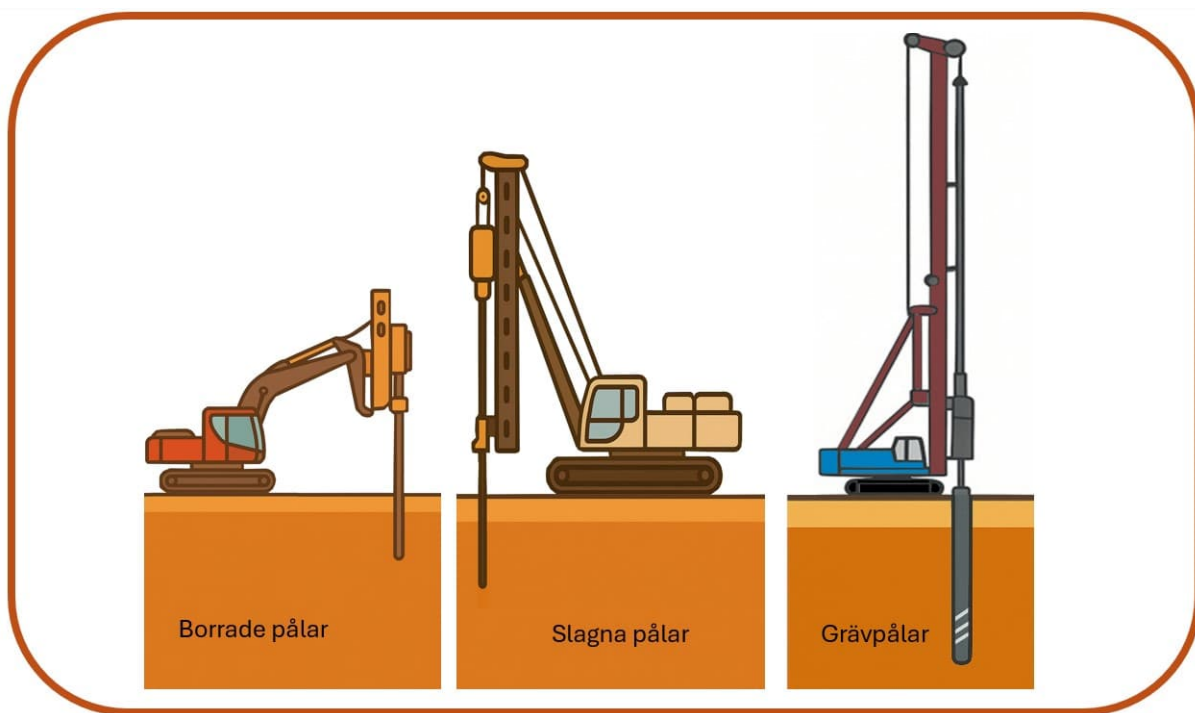


PÅLHANDBOKEN

KAPITEL 10 OMGIVNINGSPÅVERKAN



INNEHÅLLSFÖRTECKNING

10	Omgivningspåverkan	5
10.1	Bakgrund	5
10.1.1	Störningar och skaderisker	5
10.1.2	Olika installationsmetoder och dess omgivningspåverkan	6
10.1.3	Jordpåverkan och beteende	7
10.1.4	Jordparametrar och geotekniska undersökningar	13
10.2	Markvibrationer	16
10.2.1	Allmänt	16
10.2.2	Vibrationskällan	17
10.2.3	Vibrationsspridning i mark	18
10.2.4	Vibrationer i byggnader	19
10.2.5	Tillåtna vibrationsnivåer	20
10.2.6	Prognostisering	22
10.2.7	Åtgärder	26
10.3	Grundvatten- och porvattentryck	27
10.3.1	Allmänt	27
10.3.2	Porvattenövertryck	27
10.3.3	Stabilitetsproblem	29
10.3.4	Grundvattentryck och grundvattenströmning	32
10.4	Markdeformationer	34
10.4.1	Allmänt	34
10.4.2	Markdeformationer pga jordstörning och markvibrationer	35
10.4.3	Markdeformationer pga massundanträngning	37
10.4.4	Initiella, konsoliderings- och krypsättningar	41
10.4.5	Tillåtna deformationer	41
10.4.6	Åtgärder	44
10.5	Grundvattenförorening	47
10.5.1	Allmänt	47
10.5.2	Föroreningsspridning	47
10.5.3	Krav och riskbedömning	49
10.5.4	Åtgärder	50
10.6	Buller	52
10.6.1	Allmänt	52
10.6.2	Olika typer av buller	52
10.6.3	Mätning av buller	53
10.6.4	Prognostiseringen	53
10.6.5	Krav och riskbedömning	54
10.6.6	Åtgärder	55
10.7	Referenser	57

10 OMGIVNINGSPÅVERKAN

10.1 BAKGRUND

10.1.1 Störningar och skaderisker

Omgivningspåverkan avser de negativa effekter som pålningsarbetet kan medföra för närliggande byggnader och anläggningar samt för boende- och arbetsförhållanden. Pålning kan orsaka materiella skador på närliggande byggnader och anläggningar, påverka funktionen hos konstruktioner och instrument samt vara komfortstörande för boende i bostadshus och för personal i kontorsmiljöer. Omgivningspåverkan kan alltså leda till kostnader i byggprojekt och kan i vissa fall vara avgörande för valet av påltyp, pållängd och pålningsmetod. I vissa fall kan det ändå vara mer kostnadseffektivt att åtgärda eventuella skador och störningar i efterhand än att vidta åtgärder för att minimera risken för omgivningspåverkan. Omgivningspåverkan kan också utgöra en förutsättning för att detaljplan ska kunna antas och för att lov eller startbesked ska kunna ges, t.ex. avseende påverkan på grundvatten, släntstabilitet samt risk för skadliga deformationer och vibrationer i närliggande anläggningar.

I detta kapitel beskrivs olika skadliga fenomen som kan uppstå under pålningsarbeten, samt de skador eller störningar de kan orsaka. Vidare beskrivs hur olika påverkansfenomen uppstår och hur de olika fenomenen kan prognostiseras. Det ges exempel på åtgärder som kan vidtas för att minska skadliga fenomenen och de regelverk som gäller för tillåtna nivåer för respektive påverkansfenomen. I Figur 10.1.1 visas schematisk illustration av olika luft – och jordfenomen som kan uppstå under pålningsarbete, samt de störningar och skador de kan orsaka.

Luft- och jordfenomen vid pålning

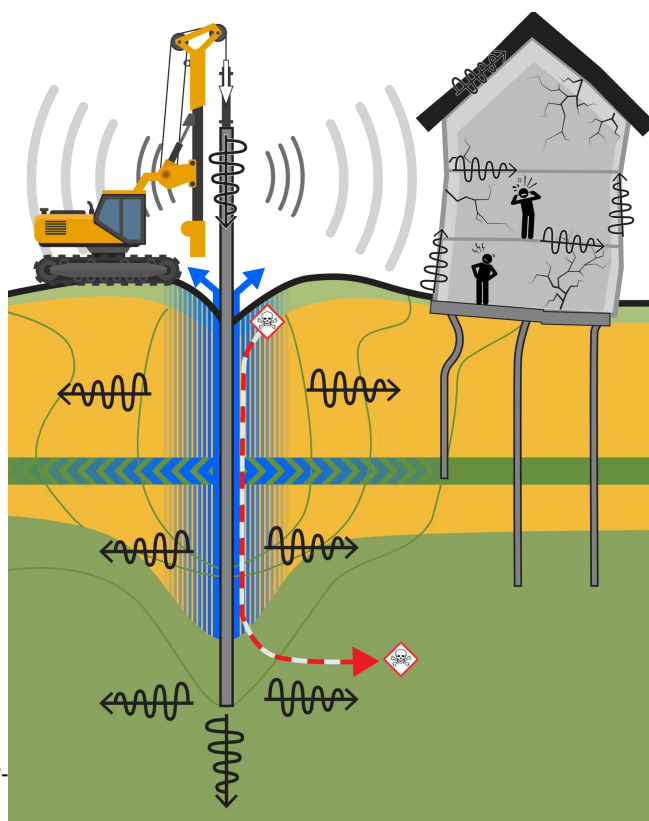
1. Buller (luft)
2. Markvibrationer (jord)
3. Jordstörning (jord)
4. Massundanträngning (jord)

Geotekniska fenomen - olika beroende på dess (2,3,4) storlek, jordart & grundvattenförhållanden.

- i. Markdeformationer (expanderar/komprimeras) pga 2, 3 el. 4.
- ii. Ändrat porvattentryck (ökande/minskande) pga 2 el. 3.
- iii. Hållfasthetsnedsättning pga höga porvattentryck (ii).
- iv. Spridning av markföroreningar pga grundvattenströmning utmed påle (ii).

Störningar & skaderisker vid pålning

- a) **Komfortstörning** pga buller (1) & markvibrationer (2).
- b) **Vibrationsskador** pga markvibrationer (2).
- c) **Strukturellt bärighetsbrott** för bef. pålgrundläggning pga horisontella markdeformationer (i)
- d) **Geotekniskt bärighetsbrott** för bef. grundläggning pga hållfasthetsnedsättning (iii)
- e) **Ojäma deformationer** pga markdeformationer (i), strukturellt (c) eller geotekniskt (d) bärighetsbrott.
- f) **Kontaminering** av vattentäkt pga spridning av markföroreningar (iv).

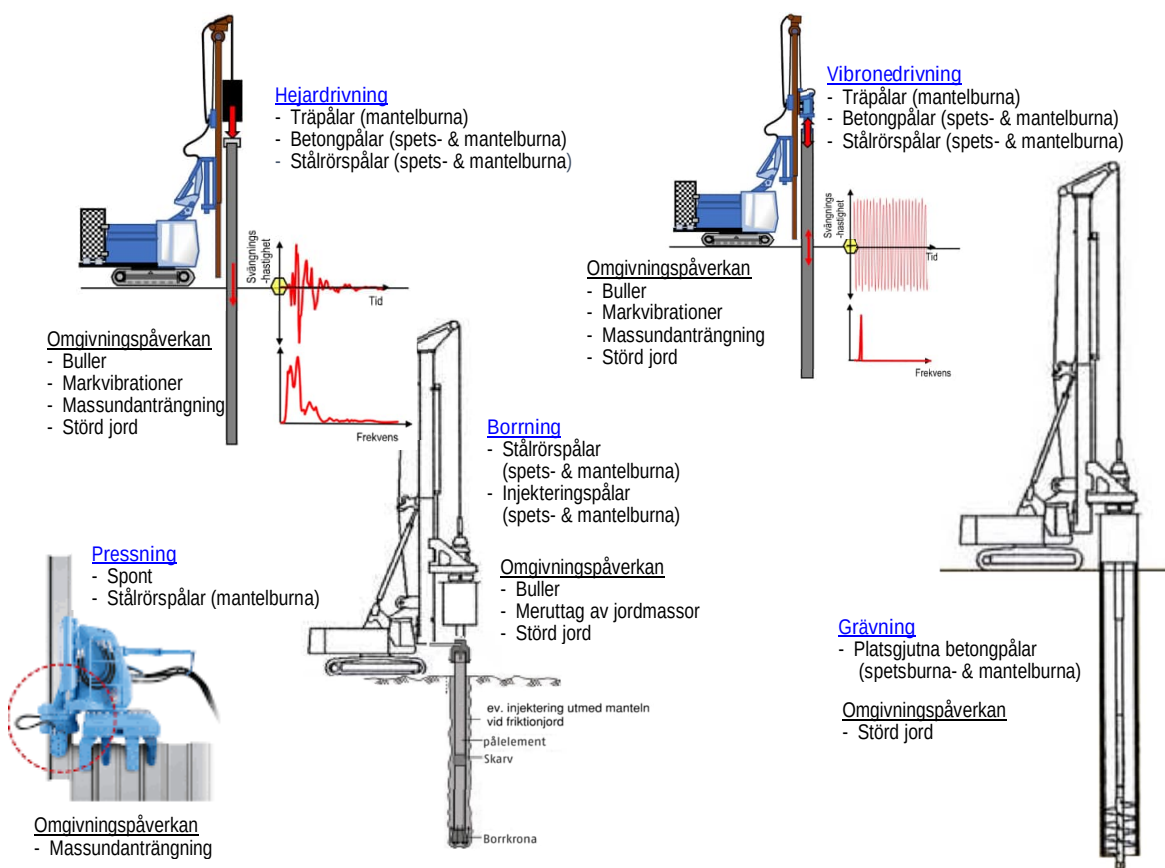


Figur 10.1.1 Illustration av olika fenomen i luft och jord som kan uppstå vid pålinstallation, samt ev. störningar och skador de kan orsaka.

10.1.2 Olika installationsmetoder och dess omgivningspåverkan

Nedrivning av pålar och spont kan utföras genom slagning, vibrering, borrar eller pressning, se Figur 10.1.2. På grund av de geotekniska förhållandena i Norden, med områden med större mäktigheter (>10m) av lös lera ovanpå morän eller berg, är slagning med hejare den vanligaste installationsmetoden för pålar. Denna metod kan användas för att driva ner pålar till betydande djup i lera (>100m) och det finns tydliga kriterier för att beräkna geoteknisk bärförmåga vid stoppslagning mot fast botten, se kapitel 7. Dock orsakar hejarneddrivning av pålar omgivningspåverkan, såsom buller, markvibrationer, störning av jord och massundanträngning.

Vibrodrivning är den vanligaste metoden i Sverige för installation av stålspons. Vibrodrivning är en snabb och kostnadseffektiv metod där stålsponsen drivs ned i jorden genom vibrering. Denna installationsmetod ger också upphov till buller, markvibrationer, störningar av jord och massundanträngning. Vibrationer kan vara ett större problem om resonansfenomen uppstår med mark och/eller med närliggande byggnader. Metoden kan även användas för neddrivning av pålar, men saknar stoppslagningskriterier för spetsburna pålar och behöver då kompletteras med stoppslagning med hejare.



Figur 10.1.2 Illustration av olika installationsmetoder av pålar och dess omgivningspåverkan.

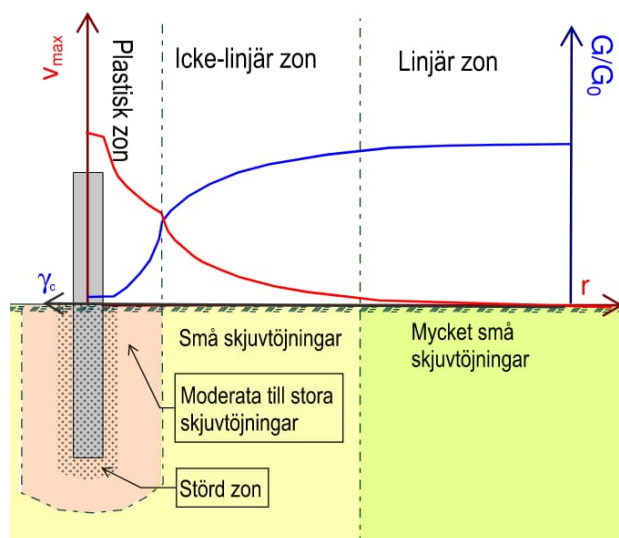
Borrar av pålar används när det, på grund av hinder i marken, kan vara svårt att installera pålarna på annat sätt. Borrar medför vanligtvis små markvibrationer (<2mm) och ingen massundanträngning. Det finns dock risk att det uppstår ett meruttag av jordmassor, vilket kan orsaka betydande störningar av jorden och problem med stora sättningar. **Grävpålar** används när det krävs hantering av stora laster i grundläggningen. Denna metod ger också relativt liten påverkan på omgivningen, men kan å andra sidan vara mycket kostsam. Vid **pressning** används statisk belastning för att pressa ner pålarna, eller spont, ned i marken. Denna metod resulterar i minimala markvibrationer, men ger

upphov till massundanträngning. Pressningsmetoden är också begränsad till områden med lös lera utan hinder i marken. Den används därför främst vid neddrivning av spont i raka spontlinjer när jordförhållandena består av lera.

10.1.3 Jordpåverkan och beteende

För att en påle ska kunna drivas ner i marken krävs, att kraften från påldrivningen överstiger jordens mantel- och spetsmotstånd för pålen. Under neddrivning av pålen, störs jorden i pålens omedelbara närhet. Även en bit utanför det störda området, kan plastiska deformationer uppstå om markrörelserna är stora. Störd jord och plastiska deformationer, leder till förhöjt porvattenttryck i lera och i löst lagrad lågpermeabel friktionsjord $<10^{-4}$ m/s, Stuedlein, et al. (2023). Området med störd jord och där markrörelserna är så stora att plastiska deformationer uppstår, benämns som den **plastiska zonen**. Området utanför den plastiska zonen, där markrörelserna är för små för att orsaka plastiska deformationer men där skjuvtöjningarna ändå är tillräckligt stora för att påverka jordmaterialens styvhet, benämns som den **icke-linjära zonen**. På ett större avstånd från pålen, där markrörelserna och uppkomna skjuvtöjningar är för små för att påverka jordegenskaperna, är jordens styvhet linjär med skjuvtöjningen. Detta är den s.k. **linjära zonen**.

De olika påverkanszoner i jorden under pål- och spontdrivning illustreras schematiskt i Figur 10.1.3.



Figur 10.1.3 Schematisk illustration över de olika påverkanszonerna i jorden i samband med pål- och spontdrivning.

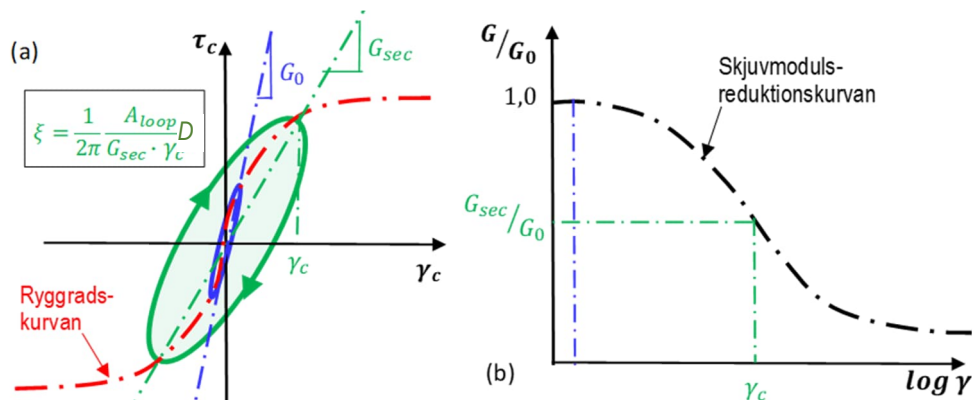
Storleken på skjuvtöjningar som uppstår på grund av markrörelser vid pålningsarbete påverkar jordens beteende och de fenomen som kan uppstå. Olika jordarter beter sig på olika sätt, och de fenomen som kan uppstå beror också på rådande spänningsförhållanden samt om jorden är vattenmättad eller inte. För att kunna bedöma vilka fenomen som kan uppstå krävs förståelse för jordens beteende beroende på storleken på inducerad töjning, jordtyp samt rådande effektivspänning och hydrologiska förhållanden. En kort introduktion till detta ges i det föreliggande avsnittet.

Töjningsberoende och jordmodeller

Jordens deformationsbeteende under cykliska belastningar beskrivs vanligtvis av skjuvmodulen, dvs. förhållandet mellan skjuvspänningen och skjuvtöjningen. För små töjningar kan skjuvmodulen beskrivas som medellutningen för spänningstöjningskurvan (se sekantmodul G_0 för blå elips i Figur 10.1.4-a). För större skjuvtöjningar övergår spänning-töjningskurvan till att vara icke-linjär, och skjuvmodulen ändras från att vara konstant till att bli beroende av storleken på skjuvtöjningarna. Skjuvspänningens variation med skjuvtöjningen ges av en hystereskurva, se grön ellips i Figur 10.1.4-a. Arealen inom hystereskurvan är ett mått på energiförlusten under en belastningscykel och kallas för dämpningskvot. **Dämpningskvoten** (D) är ett mått på materialdämpningen i jorden som spänningsvågor färdas igenom. Precis som skjuvmodulen är den beroende av skjuvtöjningen.

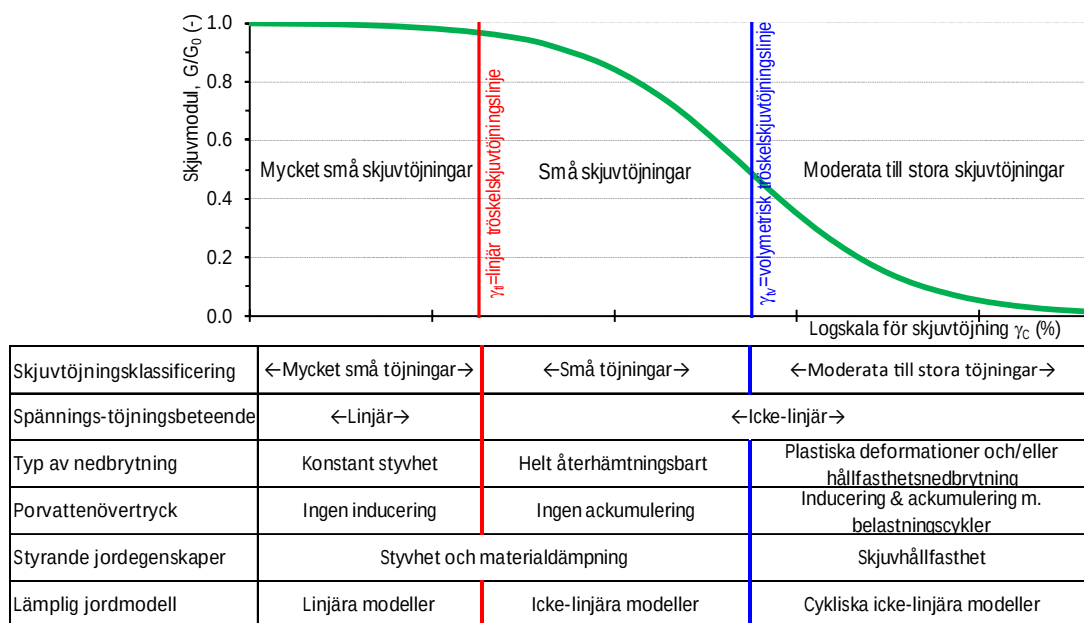
Sekantmodulen är den vanligaste metoden för att beskriva skjuvmodulens variationen med skjuvtöjningen. Kurvan som erhålls genom detta, se röd kurva i Figur 10.1.4-a, kallas för ryggradskurvan (eng. *back-bone curve*). Det största värdet på sekantmodulen finns vid origo och är värdet på skjuvmodulen vid mycket små skjuvtöjningar, benämnd **initiell skjuvmodul** (G_0). Genom att rita upp förhållandet mellan sekantvärdet för skjuvmodulen (G_{Sec}) och den initiella skjuvmodulen (G_0) mot

skjuvtöjningen, erhålls **skjuvmodulsreduktionskurvan** visad i Figur 10.1.4-b. Utöver skjuvtöjning, är skjuvmodul och dämpningskvot också starkt beroende av jordart och rådande effektivspänning.

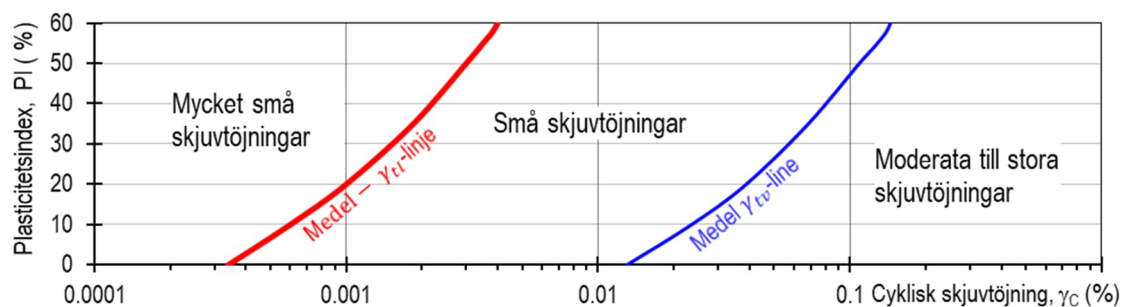


Figur 10.1.4 Definition av (a) ryggradskurvan och (d) skjuvmodulsreduktionskurvan.

Analyser av både dynamiska och statiska problem utförs idag ofta med hjälp av numeriska beräkningsprogram. För att beskriva jordens beteende när den utsätts för belastningar används matematiska formler - så kallade jordmodeller. Jordmodellerna måste vara mer eller mindre komplicerade beroende på vilken typ av problem som ska analyseras och vilket jordbeteende som behöver beskrivas. Generellt gäller att desto högre skjuvtöjningsnivån är, desto mer komplexa jordmodeller krävs för att modellera de olika jordfenomen som kan uppstå. En sammanfattning av detta och lämpliga jordmodeller för att analysera dynamiska jordproblem i numeriska beräkningar presenteras i Figur 10.1.5.



Figur 10.1.5 Variation av skjuvmodul med skjuvtöjning, klassificering baserad på jordens beteende, definition av tröskelvärden för skjuvtöjning och lämplig jordmodell för beskrivning av jordens beteende.



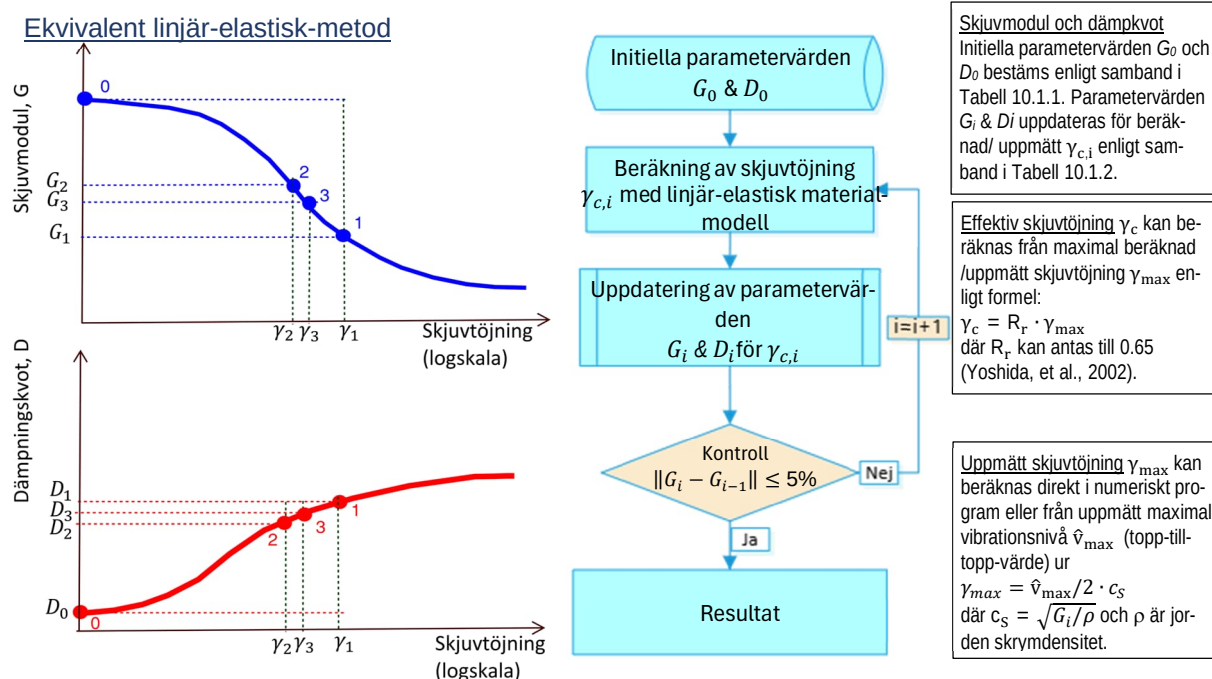
Figur 10.1.6 Samband mellan plasticitetsindex (PI) och tröskelvärden för linjär skjuvtöjning (γ_{tl}) respektive volymetrisk skjuvtöjning (γ_{tv}) utifrån resultat från laboratorieundersökningar (Vucetic, 1994).

För att avgöra om en vald jordmodell är lämplig för analys kan beräknad eller uppmätt skjuvtöjning jämföras med tröskelvärdena för linjär och volymetrisk skjuvtöjning. Definition av tröskelvärdena redovisas i Figur 10.1.5 och i Figur 10.1.6 visas medelvärden för tröskelvärden i förhållande till plasticitetsindex (PI) baserat på resultat från ett stort antal laboratieförsök (Vucetic, 1994). **Tröskelvärdet för linjär skjuvtöjning** (γ_{tl}), motsvarar ett tillstånd där skjuvmodulen fortfarande är nära opåverkad, $G/G_0 \approx 0,95-1,0$. Jordbeteendet kan då behandlas som linjärt elastiskt och endast den initiala skjuvmodulen (G_0) behövs för att beskriva jordens deformationsrespons vid belastning.

Vid större skjuvtöjningar krävs en jordmodell som kan beskriva hur styvhet och materialdämpning varierar med skjuvtöjningen, det vill säga en icke-linjär materialmodell. Vid ännu större skjuvtöjningar kan permanenta volymförändringar uppstå. Om jorden består av vattenmättad friktionsjord kan porvattentryck initieras och ackumuleras vid snabb belastning eller låg permeabilitet, vilket i sin tur kan leda till hållfasthetsändringar och jordbrott. Den skjuvtöjning vid vilken dessa fenomen uppträder benämns **tröskelvärdet för volymetrisk skjuvtöjning** (γ_{tv}). Typiskt motsvarar detta en situation där skjuvmodulen har reducerats med cirka 30–40 procent, $G/G_0 \approx 0,6-0,7$, med ett medelvärde omkring 0,65 (Vucetic, 1994). För att modellera fenomen som initiering och ackumulering av porvattentryck, hållfasthetsändringar och jordbrott krävs avancerade cykliska icke-linjära materialmodeller.

Ekvivalent linjär-elastiska metod

Analys av dynamiska problem kräver, med avseende på vibrationsspridning, beräkningar i tredimensionella modeller i tids- eller frekvensdomän. Att samtidigt använda mer eller mindre komplexa jordmodeller kan göra beräkningarna mycket tidskrävande. I sådana fall kan en så kallad ekvivalent-linjär-elastisk metod användas, där korrigering av icke-linjära jordegenskaper med skjuvtöjning hanteras separat, utanför det numeriska programmet. Numeriska beräkningar med denna metod kan minska beräkningstiden avsevärt. Däremot är metoden inte tillämplig för att beräkna ackumulering av porvattentryck vid stora skjuvtöjningar och reduktion av skjuvhållfasthet. Den ekvivalent-linjär-elastiska metoden illustreras i Figur 10.1.7 och kan även användas för att beräkna sättningar vid statiska belastningar av friktionsjord, eller vid beräkning av skjuvtöjning vid mätningar av vibrationsnivåer.



Figur 10.1.7 Schematisk beskrivning av den ekvivalent linjär-elastiska metoden för att beakta jordens skjuvtöjningsberoende baserat på linjär-elastiska beräkningar (efter Schnabel, et al., (1972)).

Jords beteende vid stora skjuvtöjningar

Vid stora skjuvtöjningar uppstår plastiska deformationer och/eller portrycksuppbyggnad, vilket i sin tur kan leda till nedsatt bärighet. Jordens respons styrs av faktorer som jordart, lagringstäthet, permeabilitet, vattenmättnadsgrad och belastningshastighet.

Friktionsjord

En friktionsjords beteende vid skjuvning styrs i hög grad av dess lagringstäthet (I_D). Vid stora deformationer strävar både löst och fast lagrad jord mot samma lagringstäthet, de s.k. **kritiska lagringstillståndet** (dvs. de uppnår samma kritiska portal (e_{cr}) och kritisk skjuvhållfasthet (τ_{cr})).

Beteende vid belastning under dränerade förhållanden (långsam belastning i jord där portrycket hinner utjämnas):

- **Löst lagrad jord:** Vid belastning strävar jorden mot att packas (kontrahera), vilket leder till volymminskning. Se löst lagrad friktionsjord i dränerat cykliskt försök i Figur 10.1.8.
- **Fast lagrad jord:** Vid belastning, kontraherar jorden initialt men dilaterar vid fortsatt skjuvning. Detta orsakas av partikellåsning (eng. interlocking), vilket tvingar kornen att "rulla" över varandra och resulterar i att jordens volym ökar. Se fast lagrad friktionsjord i dränerat cykliskt försök i Figur 10.1.8.

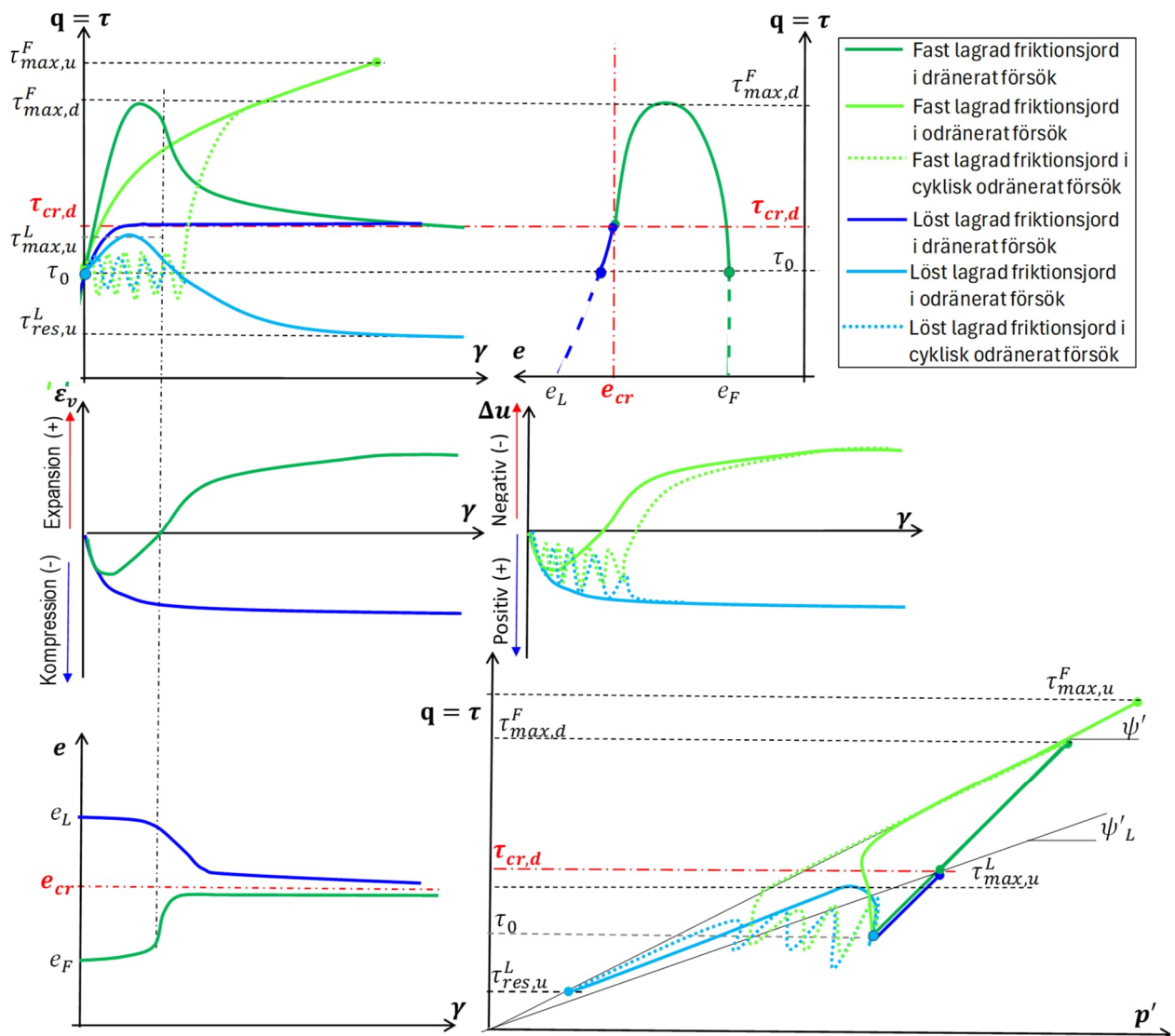
Beteende vid belastning under odränerade förhållanden (snabb belastning i vattenmättad jord). När jorden förhindras att ändra volym (pga. låg permeabilitet eller snabb belastning), initieras ett porvattenövertryck. Vid upprepade belastning utan tid för dränering, ackumuleras porvattenövertrycket. Om detta porvattenövertryck blir tillräckligt stort, reduceras jordens effektivspänning vilket försämrar dess bärförmåga. Följande fenomen kan då uppstå (Kramer & Stewart, 2024):

- **Flytjordförvätskning** (eng. Flow Liquefaction) – Kan uppstå i mycket löst lagrad ($I_D \lesssim 35\%$) kontraherande friktionsjord. Jordens tendens att kontrahera bygger upp portryck, vilket kan reducera effektivspänningen till nära noll. Jorden förlorar då sin bärförmåga, varvid jorden blir flytande och stora deformationer uppstår. För att flytjordförvätskning ska inträffa, krävs att den initiala statiska skjuvspänningen överstiger jordens odränerade residuala skjuvhållfasthet ($\tau_0 > \tau_{res,u}^L$). Se löst lagrad jord i odränerat cykliskt försök i Figur 10.1.8.
- **Cyklisk mobilitet** (eng. Cyclic Mobility) – är ett fenomen där portryck byggs upp under cyklisk, odränerad belastning utan att fullständigt bärförmågebrott inträffar. Fenomenet uppträder typiskt i medelfast till fast lagrad friktionsjord ($I_D > 35\%$) med dilatant beteende (se fast lagrad jord i cykliskt odränerat försök i Figur 10.1.8), men kan även förekomma i löst lagrad jord när den initiala statiska skjuvspänningen är lägre än den odränerade residuala skjuvhållfastheten ($\tau_0 < \tau_{res,u}^L$). Vid större töjningar kan dilatation delvis återställa effektivspänningen, vilket begränsar deformationerna. Betydande deformationer kan uppstå under belastning, men ett fullständigt bärförmågebrott inträffar normalt inte.
- **Cyklisk jordförvätskning** (eng. Cyclic Liquefaction). Förekommer i lös till medelfast lagrad jord ($15\% \lesssim I_D \lesssim 65\%$) med låg statisk skjuvspänning (τ_0). Vid cyklisk belastning kan skjuvspänningen variera mellan positiva och negativa värden, varvid ett porvattenövertryck initieras och byggs upp. Blir effektivspänningen noll, tappar jorden bärförmåga och stora deformationer uppstår. När belastningen upphör återhämtar sig jorden delvis genom dilatation.

Lera

I lera uppstår porvattentrycksuppbyggnad när den utsätts för större belastningar. Dock sker ingen om-lagring av jordpartiklar vid cyklisk belastning. När den cykliska skjuvspänningen överstiger cirka 50 % av den odränerade skjuvhållfastheten (Ansal & Erken, 1989) påbörjas istället en nedbrytning av jordskelettet, vilket leder till att ett förhöjt porvattenövertryck uppstår.

Vid pålinstallation är det främst zonen närmast pålen som störs och får därmed i nedsatt skjuvhållfasthet. Leror med inbäddade silt- eller sandskikt är särskilt känsliga för denna typ av hållfasthetsminskning, enligt cykliska laboratorieförsök på lerprover (Åhnberg & Larsson, 2012). Minskningarna i hållfastheten hos leran kan dock då ha orsakats av förhöjda porvattentryck i silt- eller sandskikt inbäddade i leran.



Figur 10.1.8 Skjuvning av fast (e_L) och löst (e_F) lagrad friktionsjord vid samma effektivspänning och jordens strävan mot kritisk lagringstillstånd (e_{cr}) vid dränerad belastning och jämförelse av hur friktionsjord beter sig under odränerad belastning (baserat på Andersen & Schjetne (2013) och Rauch (1997)).

Påverkan

Jordförvätskning i friktionsjord (dvs. flytjordsförvätskning, cyklisk jordförvätskning eller cyklisk mobilitet) är ett jordfenomen som främst associeras med stora skador vid jordbävningar, men det kan även uppstå under pålningsarbeten, om än i mindre omfattning. Vid pålning kan förhöjda porvattentryck i både lera och friktionsjord, samt jordförvätskningsfenomen (eng. *liquefaction*) i friktionsjord, ha en betydande inverkan på både effektiviteten vid påldrivning och påverkan på omgivningen.

För **påldrivning** kan cyklisk jordförvätskning inträffa, särskilt under vibrodrivning, där upprepade belastning tillfälligt minskar jordens hållfasthet, vilket underlättar neddrivning av pålen till större djup. Vid hejardrivning kan istället ett negativt porvattentryck uppstå och leda till en tillfälligt ökad hållfasthet, varvid det blir problem med neddrivning på grund av så kallade falska pålstopp. (se vidare i kapitel 3 och 8).

För **omgivningen** kan skadliga deformationer uppstå, och ett ökat porvattentryck kan minska jordens skjuvhållfasthet, vilket i sin tur försämrar bärigheten för grundläggningen av närliggande strukturer eller stabiliteten för slänter. Hur dessa jordfenomen påverkar omgivningen behandlas mer ingående i avsnitt 10.3 och 10.4, medan deras inverkan på drivbarheten diskuteras i kapitel 7.

10.1.4 Jordparametrar och geotekniska undersökningar

De jordparametrar som krävs för att analysera omgivningspåverkan ingår sällan i rutinmässiga geotekniska undersökningar. Det finns dock empiriska samband med andra parametrar som kan användas för att uppskatta dem. Några av dessa samband beskrivs i detta avsnitt.

Initiella värden

För analys av dynamiska problem krävs kännedom om jordens skjuvmodul (G) och dämpningskvot (D). Dessa parametrar kan bestämmas genom mätning av skjuvvågsfart i fält eller laboratorium, men då sådana mätningar sällan ingår i rutinundersökningar används ofta empiriska samband. Det finns starka korrelationer mellan jordens styvhet och den odränerade skjuvhållfastheten (för lera) samt effektivspänningen (för friktionsjord). Tabell 10.1.1. sammanställer formler för att bestämma den initiella skjuvmodulen G_0 vid mycket små skjuvtöjningar.

Tabell 10.1.1 Teoretisk och empiriska formler för bestämning av den **initiella skjuvmodulen** vid mycket små töjningar.

Nr	Formel	Enhet	Förklaring och referenser
(1)	$G_0 = c_{s0}^2 \cdot \rho$	[kPa]	Teoretisk formel för bestämning av skjuvmodul utifrån mätning av skjuvvågornas utbredningsfart (c_{s0}) vid mycket små skjuvtöjningar och jordens skrymdensitet (ρ).
(2)	$G_0 \approx 220 \cdot K_2 \cdot \sqrt{p'_0}$	[kPa]	Empirisk formel för bestämning skjuvmodul i friktionsjord (Seed, et al., 1986)
	$K_2 \approx C_1 \cdot (16 + 0.6 \cdot I_D)$	[-]	Skjuvmodulkoefficient (Seed, et al., 1986)
	$C_1 \approx 1.0$ vid siltig sand och sand	[-]	Konstant (Seed, et al., 1986)
	$C_1 \approx 1.15$ vid grusig sand och sandig grus		
	I_D =[se formler i Tabell 10.1.3]	[%]	Friktionsjordens lagringstäthet
	$p'_0 = (\sigma'_{v0} + 2 \cdot \sigma'_{h0})/3 \geq 18 \text{ kPa}$	[kPa]	Medeleffektivspänning vid aktuellt jorddjup, dock lägst 18 kPa
(3)	$G_0 \approx 504/w_L \cdot c_u$	[kPa]	Empirisk formel för bestämning skjuvmodul i kohesionsjord utifrån utvärderad odränerade skjuvhållfasthet (c_u) och konflytgräns (w_L) (Larsson & Mulabdic, 1991)

Skjuvtöjningsberoende jordegenskaper

Vid mycket små skjuvtöjningar är en linjär-elastisk jordmodell tillräcklig, och endast den initiella skjuvmodulen (G_0) behövs för att beskriva responsen. Vid ökande skjuvtöjningar krävs däremot modeller som beskriver hur styvhet och dämpning förändras. Skjuvmodulens reduktion är starkt kopplad till jordart (ofta beskriven via plasticitetsindex, PI) och rådande effektivspänning (p'). I Tabell 10.1.2 presenteras väletablerade modeller för skjuvtöjningsberoende styvhet och dämpning. För vissa jordarter kan dessa modeller behöva kalibreras genom avancerade laboratorieförsök, såsom cykliska triaxialförsök. Medan ostörda jordprover för sådana undersökningar kan tas i lera, är provtagning av ostörd friktionsjord mycket tekniskt svår och kostsam.

Tabell 10.1.2 Icke-linjär jordmodell för skjuvmodul (G) och dämpningskvot (D) med variation av skjuvtöjning γ_c (Zhang, et al., 2005).

Jordmodell	Förklaring och referenser	
$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + (\gamma_c/\gamma_r)^\alpha}$	[-]	Skjuvmodul mht beräknad skjuvtöjning γ_c [%]
$D = D_0 + 10.6 \cdot (G/G_0)^2 - 31.6 \cdot (G/G_0) + 21$	[%]	Dämpningskvot med beräknad skjuvtöjning γ_c [%]
<i>Empiriska konstanter och andra parametrar</i>		
$\gamma_r = (b_1 PI + b_2) \cdot (p'_0/100 \text{ kPa})^k$ [%]	$k = b_5 \exp(-b_6 PI)$	$\alpha = b_3 PI + b_4$
$b_1=0.0009$ när $PI < 10\%$, annars $b_1=0.0011$	$b_2=0.0385$ när $PI < 10\%$ annars $b_2=0.0749$	$b_3=0.0043$ när $PI < 10\%$ annars $b_3=0.0021$
$b_4=0.794$ när $PI < 10\%$, $b_1=0.834^1$ när $PI > 100\%$	$b_5=0.420$ när $PI < 10\%$ annars $b_5=0.316$	$b_6=0.0456$ när $PI < 100.0142$
$b_4=0.2451$ när $10\% \leq PI \leq 100\%$		
$D_0 = (0.82 \cdot PI + 0.82) \cdot (p'_0/100 \text{ kPa})^{-k/2}$	[%]	Dämpningskvot vid mycket små skjuvtöjningar
$p'_0 = (\sigma'_{v0} + 2 \cdot \sigma'_{h0})/3 = \sigma'_{v0}(1 + 2K_0)/3 \leq 18 \text{ kPa}$	[kPa]	Medeleffektivspänningen, dock lägst 18 kPa.
PI	[%]	Plasticitetsindex

Notering: 1: Modifierad enligt (Hall, et al., 2023)

Lagringstillstånd i friktionsjord

Vid stora skjuvtöjningar har lagringstillståndet i friktionsjord stor betydelse för hur jorden beter sig under belastning (se Figur 10.1.8), dvs om den aktuella jorden är löst eller fast lagrad med kontraherande, respektive dilaterande beteende vid belastning. I Sverige ingår bestämning av lagringstillståndet vanligtvis inte i geotekniska undersökningar, medan det i länder med jordbävningar är en central parameter för att bedöma risken för jordförvätskning (eng. *liquefaction*).

Den vanligaste parametern för att beskriva lagringstillståndet i friktionsjord är **lagringstäthet**. Lagringstäthet (även kallad relativ densitet) är ett mått på hur väl packad en jord är i förhållande till dess maximala möjliga packningstillstånd. En annan parameter som används för att beskriva hur väl en jord är packad är packningsgrad. **Packningsgrad** anger förhållandet mellan torrdensiteten och den maximala torrdensiteten.

För att bedöma risken för att jordförvätskning ska kunna uppstå, anses **tillståndsparmetern** vara en ännu bättre parameter för att beskriva lagringstillståndet. Tillståndsparmetern är ett mått på skillnaden mellan aktuellt portal och portal vid kritiskt lagringstillstånd under aktuell medeleffektivspänning. Den anger också om jorden uppvisar en dilaterande eller kontraherande beteende. Ett stort negativt eller positivt värde på tillståndsparmetern indikerar en hög risk för antingen mycket dilaterande, respektive kontraherande beteende hos jorden vid belastning.

För geotekniska undersökningar av friktionsjord i Sverige används vanligtvis **CPT-försök**, hejaronderingar och jordbergsonderingar. Upptagning av jordprover med skruvprovtagning för jordartbestämning och siktanalyser i geotekniska laboratorier förekommer också. När det gäller CPT-försök finns omfattande empiri för att bestämma tillståndet i friktionsjorden, varav några av dessa sammanfattas i Tabell 10.1.3. Dessa formler kan användas för att bedöma om jorden är sättningskänslig och har risk för att inducera porvattenövertryck i samband med pålningsarbetet. I Tabell 10.1.3 ges även definitioner av lagringstäthet, packningsgrad och tillståndsparmetrar.

Permeabilitet

I friktionsjord är permeabilitet en viktig faktor för att bedöma jordens förmåga att bygga upp (ackumulera) förhöjda porvattenövertryck. Analyser av de omfattande fallen av jordförvätskning (eng. *liquefaction*) som inträffade i Christchurch, Nya Zeeland, i samband med jordbävningarna år 2010–2011 visar att cykliskt inducerade porvattenövertryck inte ackumuleras i friktionsjord med en permeabilitet större än 0,001 m/s (Pender, et al., 2016). Jord med en permeabilitet större än 0,001 m/s motsvarar ensgrade-rad mellansand och grövre jordarter. Mellansand och grövre jordarter kan därmed bedömas som mindre känsliga för att bygga upp porvattenövertryck vid cyklisk belastning.

Permeabiliteten spelar också en avgörande roll för hur lång tid det tar för inducerat porvattenövertryck i den plastiska zonen att dränera ut och för konsolideringssättningar att uppstå på grund av yttre laster.

Geotekniska undersökningar för bestämning av permeabilitet utförs relativt rutinmässigt för lera genom ödometerförsök i laboratorium. För friktionsjord är bestämning av permeabilitet vanligast i samband med problemställningar kopplade till avvattning inför schaktarbeten. Permeabiliteten mäts då i fält med hjälp av så kallade slugtester eller pumpförsök. Vid slugtester mäts tiden det tar för vattennivån att sjunka i ett påfyllt grundvattenrör, medan man vid pumpförsök mäter tiden det tar för vattennivån att återfyllas i ett grundvattenrör efter att vattnet har pumpats ut. För friktionsjord finns också många empiriska formler för att uppskatta permeabiliteten baserat på kornfördelningen i siktkurvor från siktningsförsök på upptagna jordprover.

Tabell 10.1.3 Definitioner och empiriska samband för friktionsjords (a) lagringstäthet, (b) packningsgrad och (c) tillståndsfaktor.

(a.i) Definition av lagringstäthet:

$$I_d = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \cdot 100 [\%]$$

Där,
 e - jordens aktuella portal och definieras som kvoten mellan porvolym (V_p) och fasta fasens volym (V_k), dvs $e = V_p/V_k$. Portal kan också beräknas som kvoten mellan kompaktensitet (ρ_s) med vattenkvot (w) och vattens densitet (ρ_w), dvs $e = w \cdot \rho_s/\rho_w$.
 e_{max} - portal för aktuell jord i sitt lösaste lagring
 e_{min} - portal för aktuell jord i sitt fastaste lagring

Typiska portal för olika jordarter (Lambe & Whitman, 1976)

Jordart	e_{max}	e_{min}	w
Siltig sand (välgraderad)	0.75	0.50	20%
Sand (ensgraderad)	0.85	0.50	15%
Sand (välgraderad)	0.70	0.45	10%
Grusig sand (välgraderad)	0.65	0.45	7%
Sandig grus (välgraderad)	0.55	0.40	5%

Beräkning av densitet

$$\rho = \frac{\rho_s(1+w)}{1+e} \quad \& \quad \rho_m = \frac{\rho_s + \rho_w \cdot e}{1+e}$$

Där,
 ρ_s - kompaktensitet för jord, vanlig $\rho_s=2.65 \text{ t/m}^3$ för grovkor-niga jordar (Larsson, 2008)
 ρ_w - kompaktensitet för vatten, $\rho_w=1.00 \text{ t/m}^3$
 ρ - Lätt fuktig skrymdensitet, där w = vattenkvot (se tabell)
 ρ_m - vattenmättad skrymdensitet

(a.ii) Indelning av lagringstäthet enl (Lambe & Whitman, 1976) och typisk jordbeteende enl (Broms, 1976)

Relativ lagringstäthet, I_d	Benämning	Beteende
0 - 15%	Mycket lös lagring	Kontraherande
15% - 35%	Lös lagring	Dilatativ
35% - 65%	Medelfast lagring	
65% - 85%	Fast lagring	
85% - 100%	Mycket fast lagring	Dilaterande

(a.iii) Empiri för bestämning av relativ lagringstäthet (Jamiolkowski, et al., 2003)

$$I_D = [-1.292 + 0.268 \ln(Q_{t1})] \cdot 100 [\%],$$

där $Q_{t1} = (q_t)/(\sigma'_{v0})^{0.52}$
 q_t = uppmätt korrigerat spetsmotstånd från CPT-försök
 σ'_{v0} =effektivspänning innan sondering

(a.iv) Empiri mellan friktionsvinkel och lagringstäthet (Schmertmann, 1975) med I_D i [%]

$$\varphi' = 28 + 0.08 \cdot I_D$$
 - siltig sand (välgraderad)

$$\varphi' = 30 + 0.06 \cdot I_D$$
 - mellansand (ensgraderad)

$$\varphi' = 32 + 0.1 \cdot I_D$$
 - siltig grusig sand (välgraderad)

$$\varphi' = 33 + 0.07 \cdot I_D$$
 - sandig grus (välgraderad).

$$\varphi' = 33 + 0.1 \cdot I_D$$
 - sand (välgraderad).

$$\varphi' = 35 + 0.1 \cdot I_D$$
 - grusig sand (välgraderad).

(b.i) Definition av packningsgrad

$$R_d = \frac{1+e_{min}}{1+e} \cdot 100 = \rho_d/\rho_{d,max} \cdot 100 [\%]$$

Där,
 ρ_d - jordens torrdensitet i fält
 $\rho_{d,max}$ - jordens maximala torrdensitet g. vibrering/stampning
 $R_d=40\%$ - löst packad; $R_d=100\%$ - maximal packning

(b.ii) Empiri för bestämning av packningsgrad från lagringstäthet (Holtz & Gibbs, 1979):

$$R_d = 80 + 0.200I_D [\%]$$

(c.i) Definition av tillståndsfaktorn:

$$\psi = e - e_{cr} \cdot [-]$$

Där,
 e_{cr} - Kritiskt portal i en jord vid skjuvning för aktuellt djup (medelspänning).
 $\psi < 0$ Jord är fast lagrad och dilaterande vid skjuvning
 $\psi > 0$ Jord är löst lagrad och kontraherande skjuvning

Figur i. Definition av tillståndsfaktorn

(c.ii) Empiri för bestämning av tillståndsfaktorn (Robertson, 2010)

$$\psi = 0.56 - 0.33 \log_{10} Q_{tn,cs} [-]$$

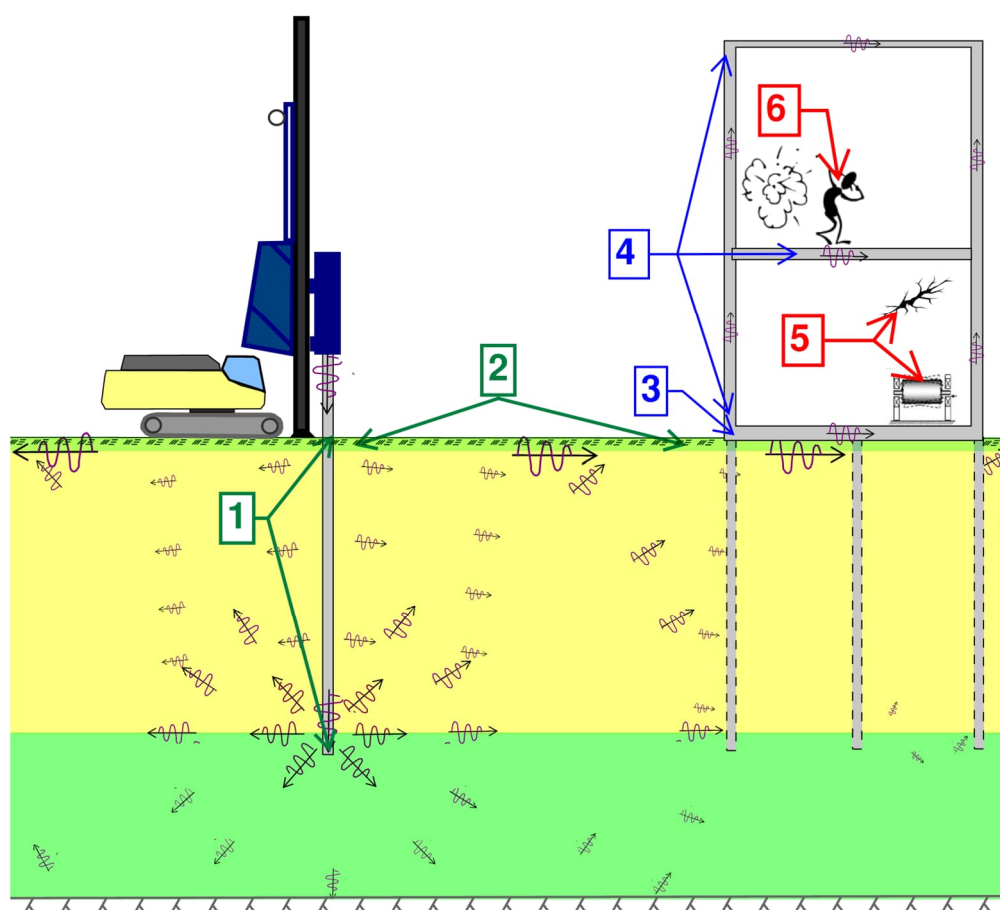
Där,
 $Q_{cn,cs} = K_c \cdot Q_{tn}$ Korrektion av normaliserat spetsmotstånd (Robertson & Wride, 1988)
 $Q_{tn} = (q_t - \sigma_{v0})/P_a \cdot (P_a/\sigma'_{v0})^n$ Normaliserat spetsmotstånd där $P_a=100\text{kPa}$ (Zhang, et al., 2002)
 $K_c = -0.403I_c^4 + 5.581I_c^3 - 21.63I_c^2 + -33.75I_c - 17.88$ när $I_c > 1.64$,
 $K_c = 1.0$ när $I_c \leq 1.64$
 $n = 0.381I_c + 0.05 (\sigma'_{v0}/P_a) - 0.15 \leq 1.0$
 $I_c = [(3.47 - \log_{10}(Q_t))^2 + (\log_{10}(F_r) + 1.22)^2]^{0.5}$
 $Q_t = (q_t - \sigma_{v0})/\sigma'_{v0}$ $F_r = f_s/(q_c - \sigma_{v0})^{100}$
 σ_{v0} =totalspänning innan sondering f_s =uppmätt mantelfriktion från CPT-försök

10.2 MARKVIBRATIONER

10.2.1 Allmänt

När en påle långsamt drivs ned i marken uppstår inga eller mycket små vibrationer. Om nedträngningshastigheten ökar, ökar också storleken (amplituden) på markvibrationerna. När en hejare träffar pålhuvudet genereras en stötvåg som sprider sig genom pålen och ned till dess spets. Samtidigt överförs spänningsvågor till jorden, både utmed pålens mantel och vid pålspetsen. Dessa spänningsvågor sprider sig genom jorden med olika vågtyper och orsakar markvibrationer i omgivningen. Om det finns byggnader i närheten kan vibrationerna sprida sig in i dessa via deras grundläggning. I byggnaderna fortplantar sig vibrationerna genom bärande väggar och bjälklag, och de kan förstärkas om resonansfenomen uppstår. Vibrationerna kan vara störande för boende och arbetande samt påverka känsliga instrument och maskiner. I vissa fall kan vibrationer orsaka skador på byggnadsmaterial, bärande konstruktioner eller känslig utrustning. Vibrationernas påverkan på omgivningen kan därför utgöra en begränsning för pålningsarbetet och vara en viktig del i projekteringen. För en schematisk illustration av vibrationsspridning från källan och in i byggnader, se Figur 10.2.1.

Detta avsnitt beskriver hur markvibrationer uppstår under pålningsarbetet, hur de sprider sig genom omgivande jord och in till byggnader, samt de krav som gäller för tillåtna vibrationsnivåer. Hur större markvibrationer kan påverka jorden, beskrivs i föregående avsnitt.



Figur 10.2.1 Transmissionsprocessen för spridning av vibrationer. 1. Inducering av spänningsvågor genom interaktionen mellan påle och jord. 2. Spridning av spänningsvågor i jord som ger upphov till markvibrationer. 3. Interaktion och överföring av vibrationer från mark till byggandens grundläggning. 4. Spridning av vibrationer in i bärande väggar och bjälklag. 5. Påverkan på material, byggkonstruktioner, instrument och maskiner. 6. Komfortstörning som påverkar boende eller arbetande människor.

10.2.2 Vibrationskällan

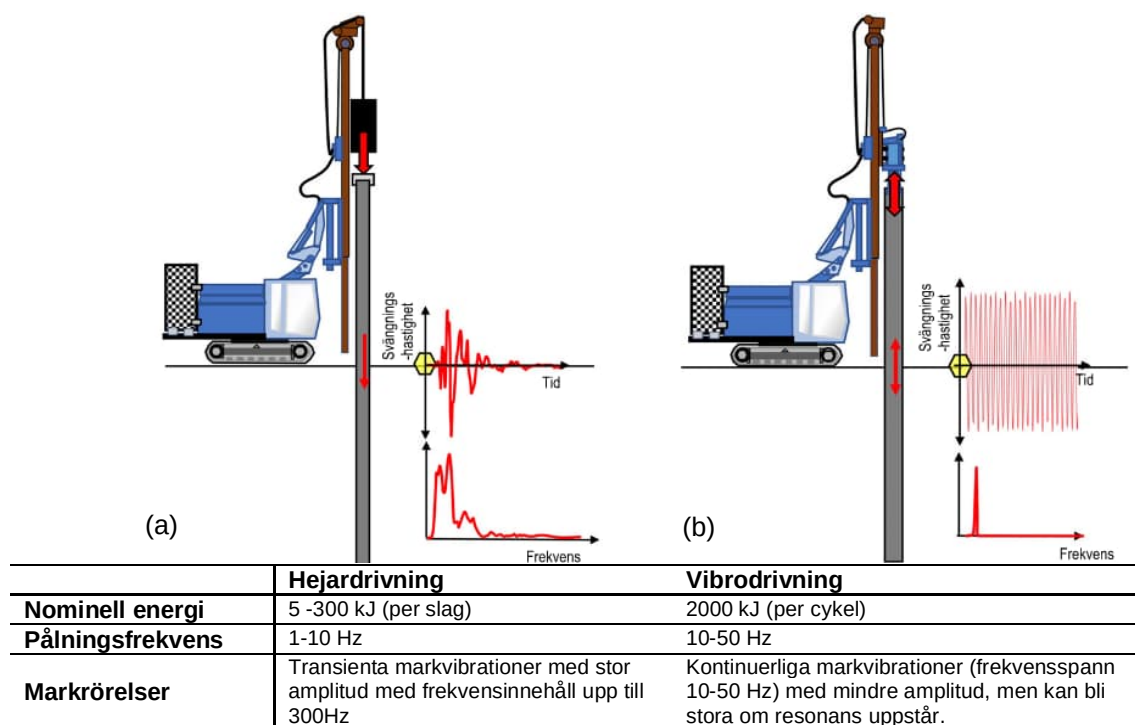
Hejardrivning

Vid påslagning med en fallhejare överförs hammarens rörelseenergi till pålhuvudet i form av en stötimpuls. Denna stötimpuls fortplantar sig längs pålen som en spänningsvåg och överför energi till den omgivande jorden, både utmed pålens mantel och framför allt vid pålspetsen. Detta inducerar vibrationer i de jordlager som pålen drivs genom. Pålningsarbete med slagning genererar vibrationer med en frekvens mellan 1 och 10 Hz och skapar, enligt (Massarsch, et al., 2022), transienta markvibrationer med ett brett spann av våglängder med frekvenser typiskt mellan 1 och 50 Hz (se illustration i Figur 10.2.2.a).

Vibrodrivning

Vid vibrodrivning används en vibrator för att driva pålen ned i marken. Vibratorn består av motroterande excentriska massor som skapar oscillerande vertikala centrifugalkrafter. Storleken på centrifugalkrafterna beror på excentricitetsmomentet och frekvensen hos de roterande massorna i vibratorn. Vibratorn är fast ansluten till pålen och får den att svänga i vertikal riktning. Denna pulserande kraft håller hela pålen i en svängningsrörelse, vilket minskar jordens mantelmotstånd runt pålen och möjliggör dess neddrivning. Den fasta anslutningen mellan vibratorn och pålen förhindrar större energiförluster (Massarsch, et al., 2022).

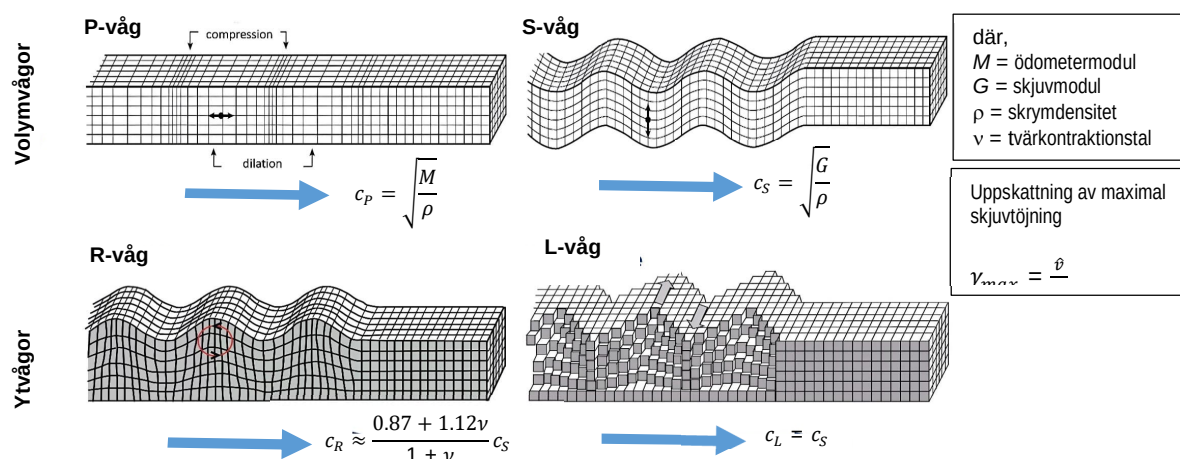
Vid vibrodrivning genererar den oscillerande pålens rörelser, spänningsvågor som sprids till omgivande jord från pålens mantel och spets. De markvibrationer som uppstår är kontinuerliga, sinusformade markrörelser med våglängder som motsvarar vibratorns drivfrekvens (se illustration i Figur 10.2.2-b.). Om vibratorns drivfrekvens närmar sig påle-jords resonansfrekvens rör sig pålen och jorden i fas, vilket förstärker markvibrationerna. För att undvika resonans måste drivfrekvensen i vibratorn justeras (Lamens, 2017). Resonansfrekvensen förändras i takt med att pålen drivs ned i allt fastare jordlager, och de största förändringarna inträffar när pålen går in i ett jordmaterial med helt andra egenskaper än det ovanförliggande. Storleken på de inducerade markvibrationerna kan också justeras genom att ändra excentricitetsmomentet i vibratorn (Hiller & Crabb, 2000).



Figur 10.2.2 Illustration av typiska markvibrationer vid en mätpunkt på markytan i tids- och frekvensdomänen inducerade av (a) hejardrivning och (b) vibrodrivning av en påle (Massarsch, et al., 2022), & (Lamens, 2017).

10.2.3 Vibrationsspridning i mark

En vibrationskälla orsakar rörelser i marken, vilket i sin tur genererar spänningar i jorden. Dessa spänningar sprids i form av spänningsvågor, vilket leder till markvibrationer i omgivningen. De spänningsvågor som når omgivningen består huvudsakligen av tre principiellt olika vågtyp: kompressionsvågor (P-vågor), skjuvvågor (S-vågor) och Rayleigh-vågor (R-vågor). Varje vågtyp har olika utbredningsfarter och svängningsrörelser, vars intensitet avtar (genom geometrisk och materiell dämpning) med ökande avstånd från källan. Markvibrationerna i en godtycklig punkt på avstånd från källan är summan av alla vågrörelser vid den punkten. Spridningen av spänningsvågorna kompliceras av refraktioner och reflektioner, som uppstår när vågor passerar material med olika styvheter eller reflekteras tillbaka mot dessa gränssytor.



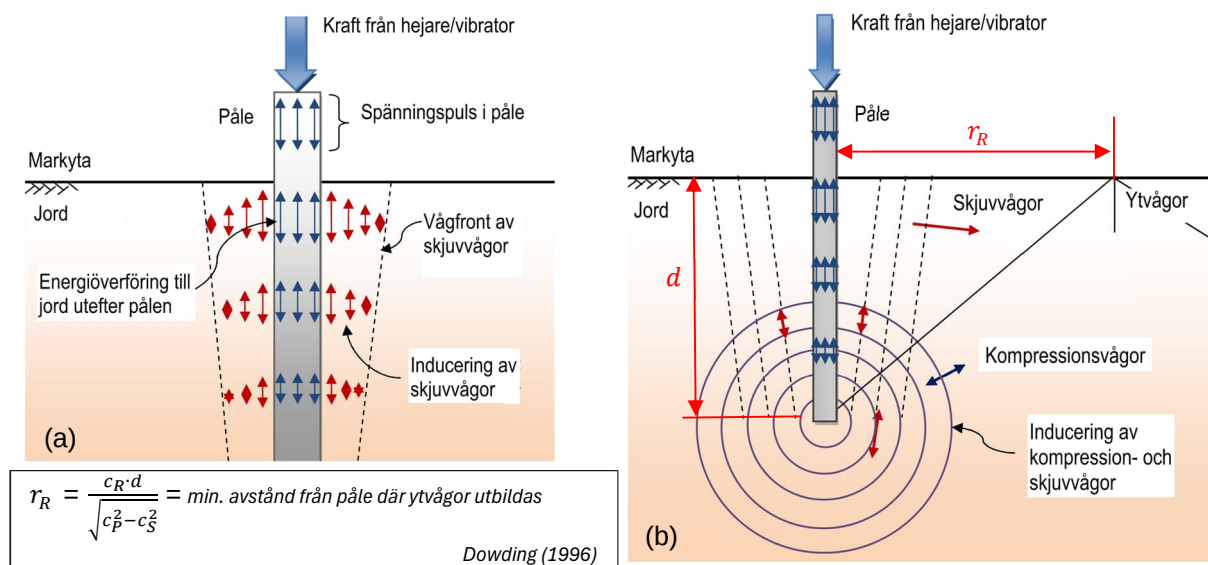
Figur 10.2.3 Illustration av svängningsrörelser och formler för beräkning utbredningsfarter av spänningsvågor i jord (baserat på Bačić, et al. (2020).

Kompressions- och skjuvvågor, även kallade volymvågor, kan färdas i alla riktningar i marken. Rayleigh-vågor klassificeras som ytvågor eftersom de endast uppstår i jordlagren närmast markytan. Love-vågor är en typ av ytvåg som kan uppstå i en skiktad jord, där det övre jordlagret har lägre styvhet än det underliggande, mer styva lagret. Love-vågor (L-vågor) är egentligen horisontellt riktade skjuvvågor (SH-vågor) som sprider sig inom det översta jordlagret.

Utbredningsfarten, med vilken volymvågor och ytvågor transporterar energi i jorden, varierar beroende på materialets styvhet. Eftersom geologiska material är styvast vid kompression färdas kompressionsvågor snabbare än andra seismiska vågor. Vid varje punkt på markytan anländer kompressionsvågor först, följt av skjuvvågor och därefter Rayleigh-vågor (de senare alldeles efter skjuvvågorna). Kompressionsvågor kan även färdas i vatten, vilket innebär att deras utbredningsfart i vattenmättade jordar beror på vattnets styvhet och har därför en utbredningsfart kring 1500 m/s. Skjuvvågor och Rayleigh-vågor färdas däremot endast i jordskelettet och har utbredningsfarter som är oberoende av vattnet i jorden. Se Figur 10.2.3 för illustration av de olika vågtypernas svängningsrörelser i jorden samt formler för beräkning av vågtypernas utbredningsfarter utifrån jordens styvhet och densitet.

Vilka vågtyp som induceras är starkt beroende av vibrationskällans riktning och kontaktyta. Utmed pålens mantel skjuvas jorden, vilket resulterar i att främst skjuvvågor induceras och sprids från pålen i en konisk vågfront. Vid pålspetsen genereras både kompressionsvågor och skjuvvågor, vilka sprids sfäriskt ut från pålspetsen. När de inducerade kompressions- och skjuvvågorna reflekteras mot markytan omvandlas en del av energin till Rayleigh-vågor, medan en annan del reflekteras tillbaka in i jorden som kompressions- och skjuvvågor. Se Figur 10.2.4 för en illustration av markvibrationer som induceras vid påldrivning. För mer information om vågtyp, beräkning av vågutbredningsfarter, reflektion och refraktion av spänningsvågor, material och geometrisk dämpning av spänningsvågor, mätning

och utvärdering av jorddynamiska egenskaper om mätning av vibrationer, se SGF:s Informationsskrift om markvibrationer (Hall & Wersäll, 2015).



Figur 10.2.4 Illustration av hur pålarnas rörelse skapar spänningsvågor i jorden (Serdaroglu, 2010). (a) Utmed pålmanteln induceras främst skjuvvågor som sprids till jorden med en konisk vågfront. (b) Vid pålspets genereras kompressionsvågor och skjuvvågor med en sfärisk vågfront. När skjuvvågor och kompressionsvågor träffar markytan, uppstår ytvågor.

10.2.4 Vibrationer i byggnader

När markvibrationer påverkar en byggnads grundläggning, sätts den i svängning, och vibrationerna sprider sig genom hela byggnadsstrukturen. Interaktionen mellan marken och grundläggningen resulterar i en viss dämpning av vibrationsnivåerna i byggnaden. Hur mycket den resulterande vibrationsnivån i grundläggningen minskar jämfört med vibrationsresponsen på den fria markytan beror på grundläggningens vikt och styvhet. Ju tyngre och styvare grundläggningen är, desto lägre blir vibrationsresponsen för grunden. Eftersom en byggnad grundlagd med pålar inte belastar marken och de ytliga jordlagren lika mycket, minskar vibrationsnivån något mindre jämfört med en byggnad grundlagd med platta på mark (Hanson & Towers, 2006).

Vid vibrationsspridning upp genom byggnaden minskar vibrationsnivån genom geometrisk dämpning och materialdämpning. I vissa byggnader kan dock vibrationsresponsen istället öka uppåt i byggnaden. Detta beror på resonansfenomen och att de bärande konstruktionerna blir vekare högre upp i byggnaden. Resonansfenomen är när egenfrekvensen hos en konstruktion överensstämmer med frekvensen hos de inkommande vibrationerna, varvid dessa förstärks. Resonansfenomen kan uppstå i de enskilda bjälklagen, men också för hela byggnaden. Egenfrekvenserna för en byggnad beror på dess vikt, styvhet och dämpningsegenskaper hos de bärande delarna i byggnaden. En tumregel är att grundfrekvensen f_0 för höga smala byggnader, ungefärligen kan beräknas som faktorn 46 dividerat med byggnadens höjd, H , dvs $f_0 = 46/H$ [Hz] (Ellis, 1980). Vanligare är dock att vibrationer förstärks genom resonans med bjälklagens egenfrekvens. Enligt (Hanson & Towers, 2006), har villor med träbjälklag vanligtvis en grundfrekvens mellan 15 -20 Hz. Grundfrekvensen för betongbjälklag i moderna byggnader varierar, enligt (Hanson & Towers, 2006) vanligtvis mellan 20 – 30 Hz.

Risk för skador och resonans i byggnader är alltså störst för långvariga vibrationer med låga frekvenser (<30 Hz). Material och konstruktioner är mindre känsliga för kortvariga vibrationer med högre frekvenser (>50 Hz) Risken för skador på byggnader pga. markvibrationer är normalt mycket små. Erfarenhetsmässigt ger vibrationsnivåer lägre än 2 mm/s mycket liten risk för skador på byggnader

(Dowding, 1996). Det är mycket ovanligt att skador från pålningsarbeten uppstår i vanliga flerbostadshus och kommersiella byggnader vid vibrationsnivåer lägre än 15 mm/s (Dowding, 1996).

De första tecknen på skador relaterade till vibrationer är sprickor i ytskikten ovanför fönster- och dörröppningar. Det är här de största spänningarna uppstår. Nästan alla ytskikt (t.ex. puts på betong, gipskivor och kakel) är hårda och spröda till sin natur, vilket gör dem särskilt känsliga för vibrationer (Dowding, 1996). Andra känsliga delar är ytskikt på innertak. Även knutpunkter mellan byggnadskomponenter, som mellan väggar och golv, är vibrationskänsliga, eftersom koncentrerade belastningar kan uppstå där. Vibrationer kan dessutom påverka byggnaders fasader, där materialen ofta består av styva och spröda material som puts och tegel.

Det är viktigt att notera att sprickor i byggnader även kan uppstå naturligt när de åldras. Temperaturrörelser i och mellan olika material, strukturell överbelastning, grundsättningar och konstruktionsfel är exempel på mekanismer som kan orsaka sprickbildning. Att skilja mellan vibrationsinducerade sprickor och sprickor som uppstått av andra orsaker är inte möjligt utan noggrann dokumentation av byggnadens skick både före och efter vibrationsinducerande byggnadsverksamheter, såsom pålning.

10.2.5 Tillåtna vibrationsnivåer

Risk för skador på byggnader

Inför grundläggningsarbeten ska en riskanalys upprättas som omfattar tillåtna vibrationsnivåer för omgivningen. För vibrationsgenererande arbeten, såsom bergsprängning, pålning, spontning, schaktning och packning, finns standarder för bestämning av riktvärden för vibrationsnivåer som kan medföra risk för skador på byggnader och anläggningar. Vid spontnings- och pålningsarbeten tillämpas SS 02 52 11. Riktvärden enligt standarden baseras på erfarenhetsmässiga samband mellan vertikal svängningshastighet och konstaterade skador. Vid bedömningen beaktas bland annat undergrund, konstruktionstyp, känsliga material och grundläggningssätt. Riktvärdet avser det momentana toppvärdet av den vertikala svängningshastigheten, uppmätt på den bärande delen av grundkonstruktionen. Eftersom bedömningen i huvudsak baseras på detta mått fångas inte skillnader i vibrationskaraktär mellan hejardrivning och vibrodrivning. Inte heller behandlas risken för resonans inne i byggnaden eller i enskilda byggnadsdelar. Sådana förhållanden bör därför bedömas särskilt i riskanalysen. Slutligt gränsvärde ska bestämmas genom en bedömning av sakkunnig med hänsyn till aktuell vibrationskälla och objektets specifika förutsättningar. I praktiken används riktvärdena ofta som gränsvärden.

I Tabell 10.2.1 visas en sammanfattning av svensk standard för beräkning av riktvärde inför bedömning av gränsvärde i byggnad med hänsyn till risk för vibrationsskada pga. pålnings- och spontningsarbeten. Notera att det i standarden inte görs någon skillnad på frekvensinnehållet i de inducerade vibrationerna. I jämförelse, tillåter tysk standard högre vibrationsnivåer med ökande frekvensinnehåll (DIN 4150-3:1999). Tysk standard skiljer också transienta och kontinuerliga vibrationer (dvs. skiljer på pålningsmetod). För kontinuerliga vibrationer skiljer tysk standard också på vibrationsriktningen.

För att säkerställa att byggnadsverksamheten inte har orsakat skador, ska byggnader och anläggningar besiktigas både före och efter de vibrationsalstrande aktiviteterna (s.k. syneförrättning). Byggnader och anläggningar som ska besiktigas ska identifieras i riskanalysen. För de byggnader som i riskanalysen bedömts vara dimensionerade för vibrationsalstrande verksamheter, utförs vanligtvis övervakningsmätningar. Krav och riktlinjer för utförande av besiktning av byggnader och anläggningar beskrivs i standard SS 460 48 60. Utförandet av mätningar beskrivs i standard SS 02 52 11.

Det är byggherrens ansvar att fastställa vilka gränsvärden som gäller, samt vilka byggnadsobjekt som ska besiktigas och övervakningsmätas. Vid skador på byggnader, till följd av markvibrationer, kan entreprenören bli skadeståndsskyldig om verksamheten har orsakat vibrationer som överskridit de gränsvärden som fastställts av beställaren. Om skador däremot uppstår på grund av markvibrationer från byggnadsverksamhet som understiger vibrationskraven, kan entreprenören inte hållas ansvarig. I

sådana fall ligger ansvaret hos byggherren och den konsult som denne anlitar. För lågt satta tillåtna vibrationsnivåer kan det medföra onödiga fördyringar för projekten, då entreprenören tvingas välja kostsamma påltyper eller pålningsmetoder för att inte riskera överskrida de uppsatta gränsvärdena.

Tabell 10.2.1 Beräkning av riktvärde för bedömning av högsta tillåtna vibrationsnivå med hänsyn till risken för vibrationsskador på en anläggning eller byggnad under pål- och spontningsarbeten enligt standarden SS 02 52 11.

Beräkning av riktvärde för vibrationer i byggnader enl. SS 02 52 11

Beräkning av riktvärde:

$$\hat{v} = v_0 \cdot F_v \cdot F_j \cdot F_g \cdot F_b \cdot F_m \text{ [mm/s]}$$

där,

$\hat{v}$ - riktvärde för momentant toppvärde av vertikal svängningshastighet

$\hat{v}_0 = 15$ mm/s - okorrigerad svängningshastighet

F_v - vibrationsfaktor väljs enl. tabell A

F_j - markförhållande faktor väljs enl. tabell B.

F_g - grundläggningsfaktor väljs enl. tabell C.

F_b - byggnadsfaktor väljs enl. tabell D.

F_m - materialfaktor väljs enl. tabell E

I en riskanalys ska följande ingå:

1. Redovisning av uppdragets omfattning och syfte.
2. Bedömningar av risker förenade med geotekniska förhållanden
3. Redovisning av närliggande byggnaders grundläggning och konstruktion.
4. Inventering av vibrationskänslig utrustning och arbetsplatser i omgivande byggnader där vibrationskänsliga arbetsmoment utförs.
5. Förteckning över befintliga ledningar.
6. Tillåten vibrationsnivå i mm/s toppvärde
7. Anvisningar om var vibrationsmätning skall göras samt hur och var övriga kontroller skall utföras.
8. Dokument som anger inom vilket område som besiktning (syneför rättning), provtryckning av rökkanaler och information till kringboende bör ske.
9. Specifikation av erforderlig dokumentation från arbetsplatsen

Val av korrektionsfaktorer:

A Typ av vibrationsinducerande verksamhet F_v

- | | |
|--------------------|-----|
| 1. Slagneddrivning | 1.0 |
| 2. Vibrodrivning | 1.0 |

B. Typ av undergrund vid konstruktion F_j

- | | |
|---|-----|
| 1. Lösa till fasta jordarter (lera, silt, sand, grus) | 0.6 |
| 2. Mycket fasta jordarter (morän) | 0.8 |
| 3. Berg | 1.0 |

C. Typ av grundläggning för konstruktion F_g

- | | |
|----------------------|-----|
| 1. Platta på mark | 0.6 |
| 2. Mantelburna pålar | 0.8 |
| 2. Spetsburna pålar | 1.0 |

D. Typ av konstruktion F_b

- | | |
|-----------------------------------|-----|
| 1. Anläggning | 1.7 |
| 2. Industri- eller kontorsbyggnad | 1.2 |
| 3. Normal bostadsbyggnad | 1.0 |
| 4. Speciellt känslig byggnad | 0.7 |
| 5. Historisk byggnad | 0.5 |

E. Typ av känsligaste material i konstruktion F_m

- | | |
|---------------------------------------|-----|
| 1. Armerad betong, stål, trä | 1.2 |
| 2. Oarmerad betong, tegel, etc. | 1.0 |
| 3. Autoklaverad lättbetong, fasadputs | 0.8 |
| 4. Kalksandsten | 0.7 |

Risk för skador på utrustning i byggnader

I vissa fall kan det finnas känslig utrustning och verksamheter som begränsar de tillåtna vibrationsnivåerna. För dessa anges acceptabla vibrationsnivåer av tillverkare av utrustning eller operatörer av verksamheten. Känslig utrustning kan till exempel vara datorer med kringutrustning samt laboratorieutrustning som elektronmikroskop, masspektrometrar och precisionsvågar, eller precisionsmätutrustning som är mycket känslig för vibrationer.

Risk för skador på markledning

Markförlagda ledningar tål vanligen större vibrationer jämfört med byggnader (Dowding, 1996), såvida ledningarna inte är i mycket dåligt skick. Enligt brittisk standard (BS 5228) tål ledningar upp till 30 mm/s för transienta vibrationer och 15 mm/s för kontinuerliga vibrationer. Gränsvärden för tillåtna vibrationsnivåer för ledningar saknas i svensk standard.

Göteborgs stad har publicerat anvisningar för markarbeten invid stadens markförlagda ledningar. Enligt dessa anvisningar (benämnd "Anvisningar för markarbeten") ska en remiss skickas in inför markarbeten inom 10 m från stadens ledningar. Handlingen specificerar även generella riktvärden för vibrationer. För trycksatta ledningar i gjutjärn eller betong bör vibrationerna inte överstiga 4 mm/s, och för övriga ledningar bör vibrationerna inte vara större än 6 mm/s. De angivna riktvärdena för tillåtna vibrationer enligt Göteborgs stad är mycket små jämfört med erfarenhetsvärden i litteraturen för vad markledning tål. Termen "generella riktvärden" tolkas som att dessa värden inte ska ses som

gränsvärden, utan som riktmärken för bedömningen av risken för skador vid ansökan om tillstånd för markarbeten intill Göteborgs stads ledningar.

Komfortstörning

För människors komfort i byggnader är kraven på vibrationer mycket striktare än för konstruktionsskador. Detta beror på att människokroppen kan uppfatta mycket små vibrationer. Den svenska vibrationsstandarden för komfort i bostäder och kontor är benämnd SS 460 48 61. Standarden ger riktvärden för bedömning av komfort i byggnader samt vägledning för hur vibrationer ska uppmätas. Riktvärdena i den svenska standarden för komfortstörning är inte avsedda att tillämpas på tillfälliga aktiviteter som bygg- och anläggningsarbeten, ej heller för bergtäkter och gruvdrift. Den aktuella standarden, SS 460 48 61, är därför inte tillämplig för markvibrationer orsakade av pålningsarbeten.

Risikanalys

Enligt standard SS 02 52 11 ska en riskanalys tas fram inför grundläggningsarbeten. I riskanalysen ska tillåtna vibrationsnivåer i närliggande byggnader och anläggningar anges, samt övriga risker för omgivningen, såsom stabilitetsproblem, skadliga markrörelser, buller och grundvattenföroreningar. Riskanalysen ska även innehålla en inventering och beskrivning av byggnader och deras konstruktion och grundläggning, vibrationskänsliga utrustningar och verksamheter, befintliga ledningar inom påverkansområdet och vilka objekt som ska övervakas.

Vidare ska det anges hur de inventerade objekten ska besiktigas (syneförrättning), om rökkanaler ska provtryckas, och hur information till berörda parter (ägare till berörda objekt, utrustningar eller verksamheter) ska genomföras. Även specifikation av erforderlig dokumentation från arbetsplatsen ska anges i handlingen. Se även listan i Tabell 10.2.1 över vad som ska ingå i riskanalysen. Byggherren ansvarar för att upprätta riskanalysen, men delar av eller hela analysen kan delegeras till entreprenören.

10.2.6 Prognostisering

Risikanalysen, beskriven i föregående avsnitt, anger tillåtna vibrationsnivåer i omgivningen och var övervakningsmätningar bör utföras för att kontrollera att dessa vibrationsnivåer inte överskrids. På entreprenören kan, genom att få direkt tillgång till övervakningsmätningar, anpassa pålningsarbetet på ett sådant sätt att tillåtna vibrationsnivåer inte överskrids och med maximal kapacitet för pålneddrivningen. För pålneddrivning genom slagning, kan det göras genom att anpassa fallhöjd eller massan för hejaren. Motsvarande verktyg vid vibrodrivning är att öka excentricitetsmomenten i vibratören eller anpassa drivfrekvensen under neddrivning för att undvika att resonansfenomen uppstår för systemet påle-jord. Risken för att överskrida tillåtna gränsvärden för omgivningen, kan alltså minskas under själva pålningsarbetet.

I planeringen av pålningsarbeten, kan det vara fördelaktigt att i förväg kunna uppskatta storleksordningen på vibrationsnivåerna. Detta för att kunna välja rätt pålningsutrustning med maximal neddrivningskapacitet m.h.t. till tillåtna vibrationsnivåer för omgivningen. Prognostisering av vibrationer i närliggande byggnader, enligt i Figur 10.2.1, kan delas upp i följande delar:

- | | | |
|--|---|--------------------------|
| 1. Påle-jord-interaktion | } | Fria-fältets markrespons |
| 2. Spridning av markvibrationer | | |
| 3. Jord-grundkonstruktionsinteraktion | } | Byggnadens respons |
| 4. Spridning av konstruktionsvibrationer | | |
| 5. Konstruktions- el. instrumentskada | } | Skaderisk (enl. norm) |
| 6. Komfortstörning | | |

Fria fältets markrespons

Markvibrationer som inte tar hänsyn till närvaron av konstruktioner och deras grundläggning kallas för fria fältets markrespons (eng. *free-field motion*) och omfattar processen med inducering av spänningsvågor pga. interaktionen mellan påle och jord, samt spridning av markvibrationer i jorden.

Omfattande studier av markvibrationer från både hejardrivning och vibrodrivning av pålar finns publicerade för olika pålmaskiner och geotekniska förhållanden. Utifrån dessa studier har också antal **halv-empiriska modeller** tagits fram för prognostisering av förväntade markvibrationer i det fria fältet, varav några av de vanligaste förekommande beräkningsmodellerna finns sammanfattade i Tabell 10.2.2. Samtliga dessa halv-empiriska formler tar dock inte hänsyn till jordegenskaperna, varken vid inducering av spänningsvågor som skapas genom i interaktion mellan påle och jord, eller i spridningen av spänningsvågor i jorden och hur markvibrationerna påverkas av varierande jordegenskaper och jordlager m.m. För att ta hänsyn till dessa delar krävs numeriska beräkningar.

Ur modelleringssynpunkt är vibrationsspridning från pålningsarbeten relativt tacksam för **numeriska beräkningar**, då den kan modelleras m.h.a axi-symmetrisk numerisk modell, dvs en cirkulär 3D-dimensionell beräkning med installation av pålen i centrum. Enklarest är att utföra beräkningarna i frekvensdomänen, vilket i sådant fall kräver linjär-elastiska materialmodeller. Detta kan vara en grov förenkling av problemet, då speciellt jorden närmast pålen kan innehålla stora töjningar som resulterar i styvhetsdegradation och ökad materialdämpning (se avsnitt 10.1.3). Icke-linjära materialmodeller behövs därför för att fånga jordens beteende närmast pålen. För att minska beräkningstid och samtidigt ta hänsyn till jordmaterialens icke linjära beteende, kan den ekvivalent-linjärelastiska metoden användas, se Figur 10.1.7. För vidare exempel om numerisk modellering av en pålinstallation med beräkning av markvibrationer, se (Masoumi, et al., 2007) och (Sofiste, et al., 2021). Se även (Hall, et al., 2023) för krav och riktlinjer för numerisk modellering av vibrationsspridning i mark, samt avsnitt 10.1.3 för beskrivning av jordmodeller och avsnitt 10.1.4 för bestämning av jordparametrar för jorddynamiska analyser.

Tabell 10.2.2 Prognostisering av markvibrationer pga. pålningsarbete med energibaserade formler.

Prognostisering av fria fältets markvibrationer med semi-empiriska formler	
(a) Prognostisering av markvibrationer med energibaserad formel	
$\hat{v}_{v,H} = \kappa_H \cdot \left[\sqrt{W_H} \cdot 1/r \right]^\beta$ ekvation a (Attewell, 1995)	$\hat{v}_{v,V} = \kappa_V \cdot \left[\sqrt{W_V} \cdot 1/r \right]^\beta$ ekvation b (Attewell, 1995)
$\hat{v}_{r,H} = \kappa_H \cdot \sqrt{W_H} \cdot 1/r^b$ ekvation c (Hiller & Crabb, 2000)	$\hat{v}_{r,V} = \kappa_V \cdot \sqrt{W_V} \cdot 1/x^c$ ekvation d (Hiller & Crabb, 2000)
$\hat{v}_{v,H}$ & $\hat{v}_{v,V}$	vertikal högsta vibrationsnivå i markytan vid hejardrivning, resp. vibrodrivning [mm/s]
$\hat{v}_{r,H}$ & $\hat{v}_{r,V}$	resultant av högsta vibrationsnivå i markytan vid hejardrivning, resp. vibrodrivning [mm/s]
W_H & W_V	energi vid pålhuvud från hejardrivning [J/slag], se b.i, resp. vibrodrivning [J/cykel], se b.ii.
r	avståndet mellan pålspets och beräkningspunkt på markytan [m]
x	horisontella avståndet mellan påle och beräkningspunkt på markytan [m]
κ_H , κ_V , k_H & k_V	empiriska faktorer för bestämning av vibrationsamplitud
β , b & c	empiriska koefficienter för hänsyn till avståndsdämpning
(b.i). Energi från hejardrivning	
$W_H = F_H \cdot m_H \cdot g \cdot h$ [J/slag]	
F_H	effektivitetsfaktor vid hejarslagning, (se e).
m_H	fallhejarens massa [kg]
g	gravitation, 10 m/s ²
h	fallhöjden för hejaren [m]
(b.ii). Energi från vibrodrivning	
$W_V = P_v / f_v$ [J/cykel]	
W_V	driveffekt vid vibrodrivning [J/s]
f_v	drivfrekvens vid vibrodrivning [Hz]
(c.i) Empiriska faktorer & partialkoefficienter vid hejardrivning	
$\kappa_H = 1,5$ & $\beta = 1,0$ – övre gräns (Attewell, 1995)	
$\kappa_H = 0,76$ & $\beta = 0,87$ – medel (Attewell & Farmer, 1973)	
$\kappa_H = \kappa_p$ (se d) & $\beta = 1,0$ – utvecklad (Heckman & Hagerty, 1978)	
$k_H = 1,0$ - 5,0 (se f) och $b = 1,3$ (Hiller & Crabb, 2000)	
(c.ii) Empiriska faktorer & partialkoefficienter vid vibrodrivning	
$\kappa_V = 1,0$ & $\beta = 0,95$ – övre gräns (Attewell, 1995)	
$\kappa_V = 0,76$ & $\beta = 0,87$ – medel (Attewell, 1995)	
$k_V = 266$ – övre gräns (Hiller & Crabb, 2000)	
$k_V = 60$ – medel (Hiller & Crabb, 2000)	
$c = 1,2$ - uppstarts- nedstängningsfas (Hiller & Crabb, 2000)	
$c = 1,4$ – under drivningsfas (Hiller & Crabb, 2000)	
(d) Bestämning av κ_p utifrån påltyp (Heckman & Hagerty, 1978)	
$\kappa_p = z / Z_p$	
$z = 436 \text{ kN} \cdot \text{mm} / \text{kJ}$ enligt (Massarsch & Fellenius, 2008)	
$Z_p = E_p \cdot A_p / c_p$ pålens impedans [Ns/m]	
$c_p = \sqrt{E_p / \rho_p}$ stötvågens utbredningsfart i påle [m/s]	
E_p	pålens elasticitetsmodul [kPa]
A_p	pålens tvärsnittsarea [m ²]
ρ_p	pålens skrymdensitet [kg/m ³]
(e). Effektivitetsfaktorer för olika hejare (Rausche, 2000)	
Hejartyp	$F_H (-)$
Frifallshejare	0,90 - 0,95
Diselhejare	
- stålspår	0,35 - 0,50
- betong- & träspår	0,30 - 0,45
Hydraulisk fallhejare	0,85 - 0,95
(f). Bestämning av k_H utifrån pål-drivningsfas & jordtyp vid pålspets (Hiller & Crabb, 2000).	
Typ av pålning och jordart vid pålspets	k_H
Stoppslagning	
- alla jordar	5
Hejardrivning genom jord med	
- extremt hög hållfasthet	
- mycket fast lagringstäthet ($k_H = I_p \% / 100 \cdot 2 + 1$)	3
- block större än pålens tvärsnittsarea	
Hejardrivning genom jord med	
- hög till mycket hög hållfasthet	
- medelfast till fast lagringstäthet	1,5
- packad fyllning	
Hejardrivning genom jord med	
- extremt lös till medelhög hållfasthet	
- mycket lös till lös lagringstäthet	
- lös lagrad fyllning	1
- organisk jord	

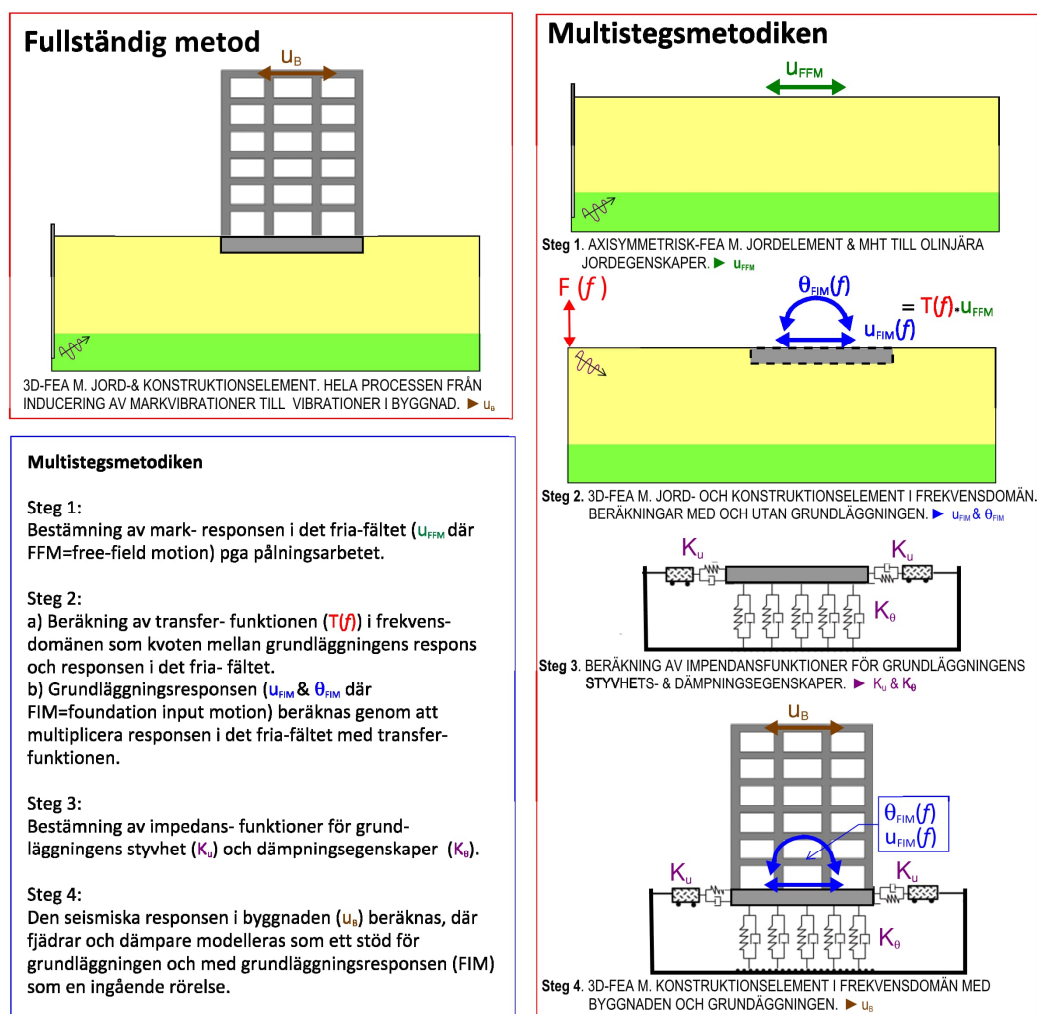
Byggnadens respons

Metodiker för hur byggnaders respons pga. markvibration ska beräknas, finns framtagna för jordbävningar. Även om det finns förenklade beräkningsmetoder är det vanligast att dessa beräkningar utförs genom numerisk modellering. Numeriska beräkningar kan genomföras antingen genom att modellera hela systemet i en så kallad fullständig analys eller genom en multistepsanalys (Stewart, et al., 2012).

En **fullständig metod** (eng. *direct method*) kräver beräkningar i en 3D-modell med inkludering av markvibrationernas induktion, spridning och interaktionen mellan mark och grundläggning, samt vibrations-spridning i konstruktionen. En sådan numerisk modell blir snabbt mycket omfattande och är därför oftast inte praktiskt möjlig att genomföra. Lösningen är då multistepsanalys, där den fria mark-responsen och byggnadens respons beräknas separat.

I beräkning av byggnadens respons i en **multistegsmetodik** (eng. *substructure approach*, eller *multi-step approach*), kan inte den beräknade markresponsen i det fria fältet direkt användas som input i byggnadens grundläggning. Detta eftersom grundläggningens respons skiljer sig från markens respons. Grundläggningens styvhet orsakar relativa rörelser och rotationskrafter, och interaktionen mellan grundläggningens och jordens respons ger också upphov till en dämpning av grundläggningens rörelse, samt kan även själv orsaka andra markrörelser. Detta måste beaktas genom att beräkna grundläggningens respons utifrån den fria markresponsen, samt genom att beräkna grundläggningens styvhet och dämpningsegenskaper. De olika stegen för att beräkna byggnadens respons från markrörelser beskrivs i Figur 10.2.5. För detaljerad beskrivning multistegsanalysen, se Bapir, et al. (2023) och Stewart, et al. (2012).

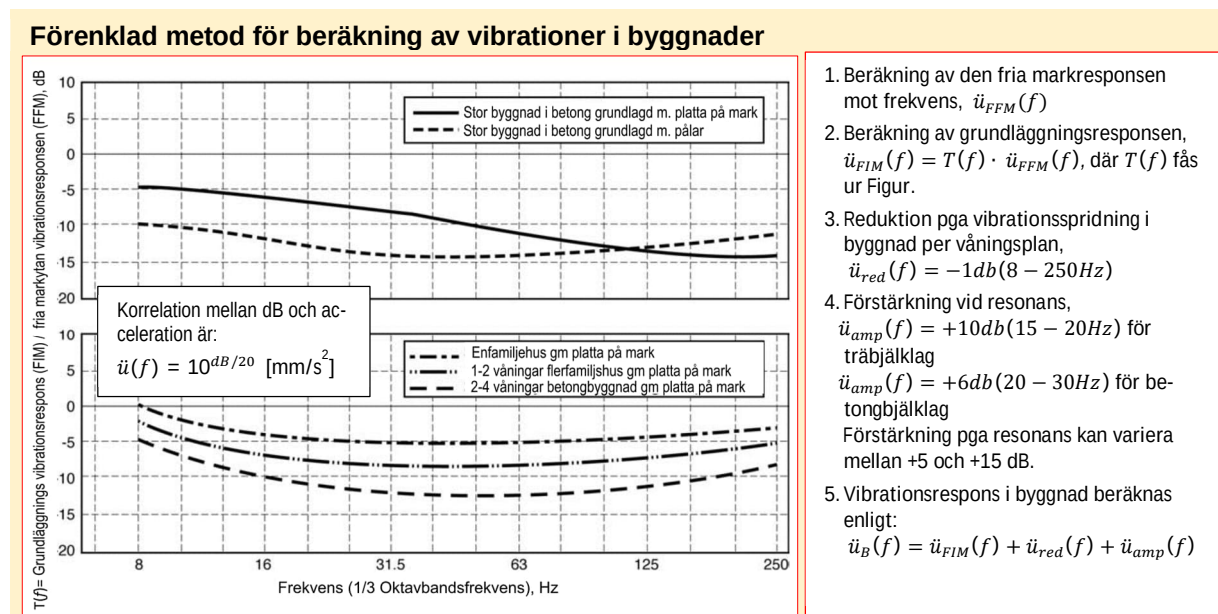
Detaljerade metoder för beräkning av vibrationer i byggnader



Figur 10.2.5 Illustration av multistegsanalys för beräkning av en byggnads vibrationsrespons pga markvibrationer från pålningsarbete (efter Bapir, et al.,(2023) och Stewart, et al., (2012)).

Prognostisering av vibrationer i byggnader med hjälp av numeriska beräkningar, som beskrivs i multistegsanalysen, är troligen också alldeles för tidskrävande att utföra för normala pålningsarbeten. En **förenklad metod** för beräkning av byggnadens respons pga. markvibrationer finns beskriven i en handbok framtagen av USA:s federala transportmyndighet (Saurenman, et al., 1982). Metoden kräver dock beräkning av den fria markresponsen med frekvensinnehåll i läget för aktuell befintlig byggnad för analys. Även om metoden har några år på nacken, refereras den fortfarande till i senare handböcker från USA:s federala transportmyndighet (Hanson & Towers, 2006). I Sverige är erfarenheterna från tillämpningen av metoden dock begränsade. Se Figur 10.2.6 för en beskrivning av den

förenklade metoden för beräkning av vibrationer i byggnader pga. markvibrationer. Notera att bedömningen av förstärkning av vibrationer pga. vid resonans har ett relativt stort spann.



Figur 10.2.6 Förenklad metod för beräkning av vibrationer i byggnad pga. markvibrationer enligt Saurenman, et al., (1982).

10.2.7 Åtgärder

Pålning genom ytliga fasta jordlager som packad fyllning kan ge upphov till betydande markvibrationer, vilka enkelt kan åtgärdas genom att förskakta ned till lösare jordlager. Förborring genom hinder och genom jord med mycket block, är också att rekommendera istället för hård drivning. Vågbarriärer i form av öppna eller fyllda slitsar nära påverkansobjekt kan också ha viss effekt för att minska skadliga vibrationer. Se (Al-Hussaini & Ahmad, 1991) för design av vågbarriärer för att minska markvibrationer.

Om det finns risk för vibrationsskador, kan det bli aktuellt att ändra pålningsmetod (t.ex. borring eller pressning). Även byte till styvare pälår (högre impedans) ger en något minskad nivå på inducerad markvibration (Heckman & Hagerty, 1978). Vanligtvis anpassas dock pålning under pålningsarbetet genom den s.k. observationsmetoden, dvs. resultaten från övervakningsmätningar används för att anpassa drivningen av pälårerna så att de uppmätta vibrationsnivåerna inte överskrider gränsvärdena.

Under installation av pälår genom slagning kan anpassningen av pålning innebara att man minskar fallhöjden eller hejarvikten. Det kan dock bli problematiskt med att uppfylla stoppslagningsskriterierna och att utföra dynamisk provbelastning (s.k. PDA-mätningar) med lägre fallhöjd eller med en hejare med lägre vikt. Under vibrodrivning bör resonansfenomen av marken och i omgivande byggnader undvikas i möjligaste mån, dvs. ändra från de drivfrekvenser som orsakar förstärkning av markrörelser och resonans i närliggande byggnader. För att minimera vibrationsnivåerna för omgivningen under vibrodrivning rekommenderas att använda både hög drivfrekvens och höga excentricitetsmoment (Deckner, 2020). Vanligen är det vid uppstart och avstängning av vibrodrivningen, när vibratören går från statisk last till drivfrekvens eller tvärtom, som problem med förstärkning av markrörelser uppstår. I moderna vibratorer är systemet med excentriska vikter ofta balanserat under både uppstart och avstängning, så att alla krafter är lika stora och motsatta. När driftfrekvensen har uppnåtts, skiftas fäsen så att vertikalt inriktad vibration genereras som vanligt (Hiller & Crabb, 2000).

10.3 GRUNDVATTEN- OCH PORVATTENTRYCK

10.3.1 Allmänt

Jordstörning och de större markvibrationer som uppstår under neddrivning av en påle kan, som nämnts i avsnitt 10.1.3, orsaka förhöjt porvattentryck i både i friktionsjord och lera. Stora porvattentrycksökningar kan inträffa vid påslagning i packningsbenägen vattenmättad lågpermeabel friktionsjord. I homogen lera uppstår förhöjt porvattentryck främst i den s.k. plastiska zonen som störs av pålen under påldrivningen. Stora portrycksökningar kan även uppstå i lera med i inbäddade skikt av finsand och silt.

En kraftig ökning av porvattentrycket kan leda till att jorden förlorar sin skjuvhållfasthet, vilket i sin tur kan leda till stabilitetsproblem för angränsande konstruktioner och slänter. Även schaktslänter och spontkonstruktioner kan påverkas negativt av den anledningen. Bedömning av storleken på förhöjt porvattentryck och nedsatt skjuvhållfasthet kan därför vara en viktig del i projektering av ett pålningsarbete.

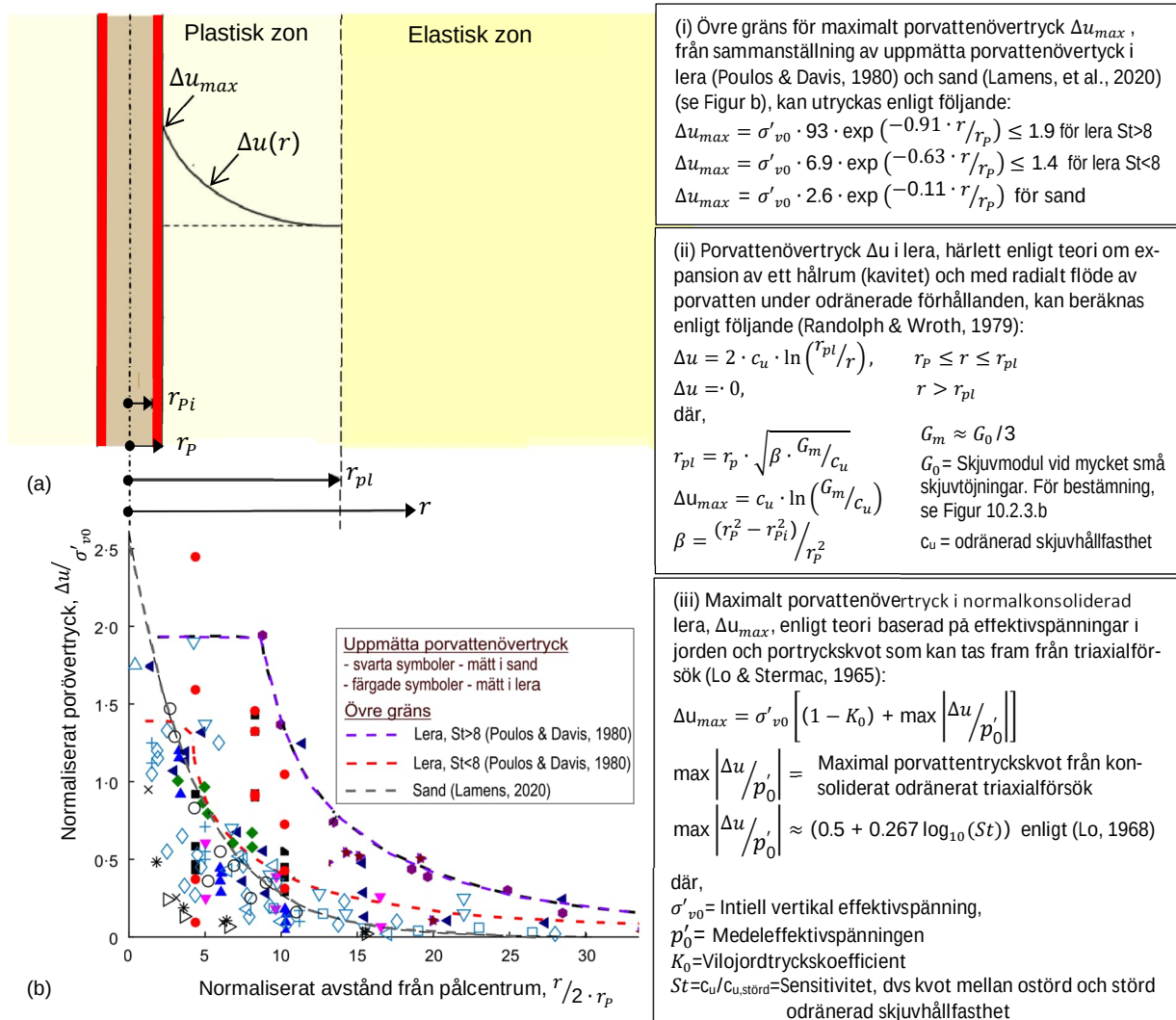
10.3.2 Porvattenövertryck

Friktionsjord

Ett förhöjt porvattentryck i löst lagrad vattenmättad friktionsjord kan uppstå när den utsätts för en belastning som är snabb relativt jordens permeabilitet. Risk för förhöjda porvattentryck är såldes störst i lågpermeabla friktionsjordar såsom silt och finsand. Mellansand och grövre jordarter med en permeabilitet större än 0,001 m/s (Pender, et al., 2016), är mindre benägna för att bygga upp förhöjda porvattentryck. Belastningen måste dock vara över det s.k. tröskelvärde för volymetrisk skjuvtöjning (se Figur 10.1.6) för att porvattenövertryck ska börja ackumuleras. Är lasten cyklisk och pågår tillräcklig länge, kan det ackumulerade porvattenövertrycket bli så stort att jordbrott och s.k. jordförvätskning (eng. *liquefaction*) uppstår.

Om det finns långa sammanhängande lager av lågpermeabla friktionsjordar, kan de förhöjda porvattentrycken sprida sig till stora avstånd, >200 m (Lamens, 2017). Det förhöjda porvattentrycken kan i sådan lager sprida sig med en hastighet av cirka 1 m/s (Norén-Cosgriff, 2019). Kraftigt förhöjda porvattentryck kan reducera jordens hållfasthet och kan i slänter vara den initierande faktorn som utlöser skred och ras (se avsnitt 10.3.3). Flytjord och kvicksand är andra hydrauliska grundbrottsfenomen som kan uppstå pga. att de förhöjda portrycken orsakar grundvattenströmning i jorden. De olika jordbrotten som orsakas av förhöjda porvattentryck, uppstår inte heller alltid momentant med att de stora markvibrationerna pågår utan kan uppstå upp till flera minuter efter själva vibrationstörningen (Norén-Cosgriff, 2019). De förhöjda porvattentrycken minskar sedan när de når ett mer permeabelt jordlager, markytan eller fritt vatten. Dessa förhöjda portryck är därför oftast kortvariga, <4 timmar (Lamens, 2017).

Att prognostisera storleken på förhöjda porvattentryck i friktionsjord är utmanande, eftersom permeabiliteten kan variera avsevärt inom de aktuella jordarterna (dvs. finsand och silt). Sammanställning och formler för beräkning av porvattenövertryck finns främst för lera. En formel av Lamens (2017) finns för att uppskatta maximalt förhöjt porvattenövertryck och hur den minskar med avståndet från pålcentrum visas i Figur 10.3.1-b. Framtaget samband baseras på ett stort antal portrycksmätningar i samband med vibrodrivning i något siltig finsand. Eftersom formeln inte är relaterad till jordens permeabilitet, lagringsförhållanden eller spänningsförhållanden och heller inte är kopplad till storleken på markvibrationer och jordens tröskelvärde för volymetrisk töjning (se avsnitt 10.1.3) är den främst tillämplig vid vibrodrivning av pålar i liknande jordarter som i försöken (dvs. siltig finsand). I mer permeabla friktionsjordar är formeln troligen alltför konservativ, medan man bör vara mer försiktig vid tillämpning av den på lågpermeabla jordar. Särskilt när lågpermeabel friktionsjord är inbäddad som ett lager i lera, bör man vara medveten om risken för att förhöjda porvattenövertryck kan spridas över stora avstånd.



Figur 10.3.1 Olika teorier för beräkning av radien för den plastiska zonen vid installation av påle, samt inducerat maximalt porvattenövertryck inom den plastiska zonen. Figur (a) redovisar definition av den plastiska zonen från pålecentrum. Figur (b) redovisar sammanställning av uppmätt förhöjt porvattentryck i lera och sand enligt Poulos & Davis (1980) och Lamens, et al. (2020). Formler (i) motsvarar övre gränser för uppmätt förhöjt porvattentryck enligt figur (a). Formler i (ii) och (iii) redovisar beräkning av maximalt inducerat porvattenövertryck enligt Randolph & Wroth (1979), resp. Lo & Stermac (1965).

Lera

När massundantvängande pålar drivs ned i kohesionsjord, skjuvas jorden och porvattenövertryck induceras dels i den störda jorden närmast den installerade pålen, dels i jord som utsätts för stora skjuvtöjningar pga. stora markrörelser. Zonen där porvattenövertryck inducerades benämns, enligt tidigare, som den plastiska zonen. Fördelning av de inducerade porvattenövertrycken invid pålen kommer då att likna det som visas i Figur 10.3.1.a.

Randolph & Wroth (1979) har härlett formler för beräkning av maximalt porvattenövertryck i den plastiska zonen utifrån antagandet om en cylindrisk expansion av ett hålrum (kavitet) och med radiallyt flöde av porvatten under odränerade förhållanden. Beräkning av maximalt porvattenövertryck och radien för den plastiska zonen kan då bestämmas utifrån lerans skjuvmodul (G) och den odränerade skjuvhållfastheten (c_u), se ekvation ii i Figur 10.3.1. En annan äldre teori för beräkning av maximalt porvattenövertryck har utvecklats av Lo & Stermac (1965) utifrån rådande effektivspänningar i jorden

och portryckskvoten som kan tas fram från triaxialförsök, se formel iii i Figur 10.3.1. I en senare publicering anger (Lo, 1968) att portryckskvoten kan uppskattas utifrån lerans sensitivitet (St).

I litteraturen finns också ett stort antal sammanställningar med portrycksmätningar av maximalt porvattenövertryck på olika avstånd från pålcentrum. Utifrån dessa har Poulos & Davis (1980) kunnat ta fram övre gränser för maximalt porvattenövertryck. Enligt denna sammanställning, induceras högre porvattenövertryck i mellansensitiv och högsensitiv lera ($St > 8$) jämfört med lågsensitiv ($St < 8$) lera, se Figur 10.3.1.b. Att lerans sensitivitet kan påverka storleken på inducerat porvattenövertryck överensstämmer med det samband som visas i Lo (1968). Se även övre gränser för maximalt porvattenövertryck med avstånd från pålcentrum som visad i i Figur 10.3.1.b.

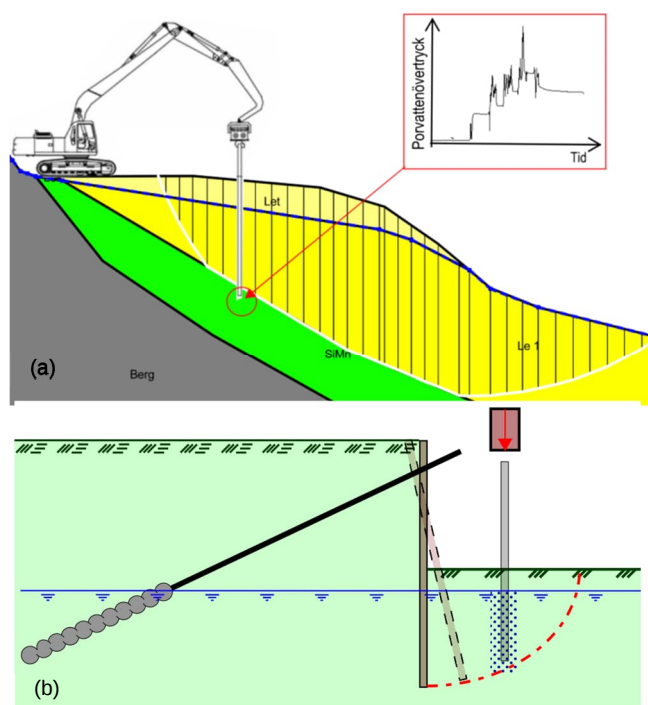
Efter installationen av pålen, kommer porvattenövertrycket gradvis minska över tiden i takt med rekonsolideringen av den störda lera runt pålen. Tiden det tar för porvattenövertrycket att utjämnas beror på lerans permeabilitet och radien på den störda jorden kring pålen. Pålmaterialet kan också ha viss betydelse för dräneringen av porvattenövertrycket. Det finns försök som har visat att extremt torra träpålar har fungerat som vertikaldräner och därmed påskyndat rekonsolideringen av den störda lera (Fellenius, 1955).

10.3.3 Stabilitetsproblem

Det är mycket ovanligt att skred och ras initieras av störd jord eller markvibrationer från pålningsarbeten. Det finns dock några rapporterade fall där stabilitetsbrott kan ha orsakats av pålningsarbeten (Norén-Cosgriff, 2019). Störst risk bedöms finnas vid vibrodrivning av pålar eller spont, eftersom detta genererar långvariga cykliska belastningar (vibrationer) i jord, med risk för att förhöjda porvattentryck ackumuleras. Transienta markvibrationer från hejardrivning av pålar bedöms ha lägre sannolikhet att orsaka sådan ackumulering.

Vanligtvis är dock den störning eller extra belastning som pålningsarbetet orsakar inte den enda faktorn bakom ett stabilitetsbrott. Ofta handlar det om en kombination av redan låg stabilitet, förekomst av kvicklera, höga befintliga grundvattentryck, erosion och ökade belastningar från tillfälliga uppfyllnader. Markvibrationer eller jordstörningar från pålningsarbetet kan dock utgöra den extra belastning som krävs för att utlösa ett skred eller ras.

Förutsättningarna för sådana stabilitetsproblem är att det finns löst lagrad friktionsjord med låg permeabilitet eller att pålningen är av sådan omfattning att större volymer lera störs. Även skikt av silt och finsand, eller löst lagrad friktionsjord med låg permeabilitet som underlagrar lerslänter, kan vara riskfyllda med avseende på släntstabilitet, se Figur 10.3.2.a. Pålning i närheten av en stödskonstruktion kan också leda till instabilitet genom att inducerat förhöjt porvattentryck minskar det mothållande jordtrycket, se Figur 10.3.2.b.



Figur 10.3.2 Förhöjt porvattentryck till följd av pålning kan orsaka stabilitetsproblem i slänter och schakter genom (a) reducerad hållfasthet utmed gli-dytan och (b) minskat mothållande passivtryck

Krav

Kraven för att bedöma om en slänt har tillfredställande stabilitet anges i svensk tillämpning av Eurokod utgiven av Boverket (BFS 2022:4 EKS 12) och Transportstyrelsen (TFS 2018:578). Råd och riktlinjer för tillämpning av Eurokod finns i IEG:s tillämpningsdokument om slänter och bankar (R6:2008-rev 1) och i Trafikverkets kravhandling avseende geokonstruktioner (TRVINFRA -00230).

Beräkningsmetoder

Beräkningsmetoder för analys av släntstabilitet grundar sig på jämförelser mellan pådrivande och mothållande krafter med full mobilisering genom lamellmetoder eller genom att analysera deformationer och spänningar med numeriska beräkningsmetoder. Lamellmetoden är den vanligaste metoden för beräkning av släntstabilitet. För mer detaljerade beskrivningar hänvisas till handböcker som "*Utredning av släntstabilitet*" (SGI, 2023).

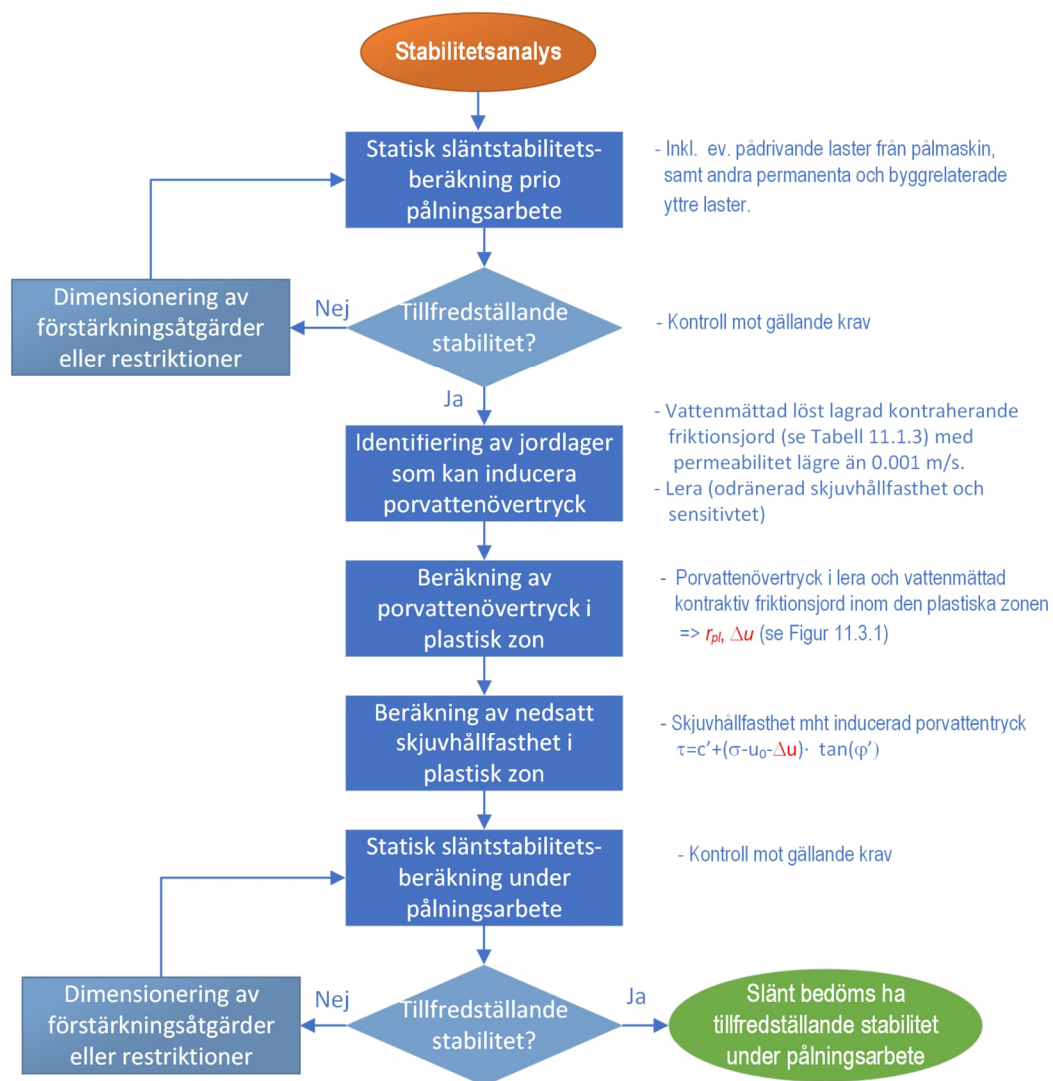
Beräkning av om slänten har tillfredsställande stabilitet bör först utföras under statiska förhållanden med trafiklaster från påmaskiner och andra arbetsmaskiner. Därefter bör stabilitetsberäkningar genomföras beaktande av de negativa effekter som pålningsarbetet kan medföra för stabiliteten. Effekterna från pålningsarbetet kan antingen utgöras av dynamiska lasttillskott på slänten eller genom utveckling av porvattenövertryck i marken, vilket i sin tur kan minska markens skjuvhållfasthet. Vid vibrodrivning av pålar är den senare effekten oftast av större betydelse (Lamens, et al., 2020), vilket innebär att uppbyggnaden av ackumulerat förhöjt porvattentryck till följd av cyklisk belastning har störst påverkan på släntstabiliteten.

I en sådan analys behöver man först (**första steget**) identifiera de jordlager som riskerar att få förhöjt porvattentryck vid cykliska belastningar identifieras, det vill säga vattenmättade, lågpermeabla, kontraherande friktionsjordar (permeabilitet $< 0,001$ m/s) eller leror. För att identifiera friktionsjord med kontraherande beteende, se Tabell 10.1.3, samt avsnitt 10.1.3 om bestämning av permeabilitet. För lera är bestämning av odränerad skjuvhållfasthet av störst betydelse för storleken på inducerat förhöjt porvattentryck i den plastiska zonen, se Figur 10.3.1.

Det **andra steget** är att beräkna den plastiska zonens utbredning kring pålen samt storleken på det inducerade förhöjda porvattentrycket. De formler som redovisas i Figur 10.3.1, kan användas för detta ändamål. Det beräknade förhöjda porvattentrycket kan antingen användas direkt i relevanta beräkningsprogram för stabilitetsberäkningar eller beaktas genom reduktion av skjuvhållfastheten. Den beräknade stabiliteten jämförs sedan med gällande krav. Om kraven inte uppfylls måste antingen förstärkningsåtgärder dimensioneras eller restriktioner i kombination med övervakning övervägas. Restriktioner med övervakning kan innebära att det fastställs högsta tillåtna grundvattentrycksnivåer eller belastningsrestriktioner under pålningsarbetet.

Beräkningsprocessen för analys av släntstabilitet med planerade pålningsarbeten i en slänt med kohesionsjord eller friktionsjord redovisas Figur 10.3.3. För mer avancerade metoder för beräkning av släntstabilitet med pålningsarbeten i friktionsjord eller lera, se L'Heureux & Johansson (2016), resp. Lamens (2017).

Vid förekomst av **permeabla skikt i lera eller siltjord under lera** finns en risk att det inducerade porvattenövertrycket från pålningsarbetet sprids över stora avstånd, vilket kan påverka släntstabiliteten även längre bort. Det är därför nödvändigt att kontrollera släntstabiliteten med hänsyn till det inducerade porvattenövertrycket längs med det permeabla skiktet eller i siltjorden under leran. Stabilitetsberäkningar med sammansatta glidytor i kombinerad analys med inlagt porvattenövertryck utmed det permeabla skiktet, utgör en viktig del av denna kontroll.



Figur 10.3.3 Schematisk beskrivning av metoder för att beräkna stabilitet för slänter med avseende på planerade pålningsarbeten.

Åtgärder

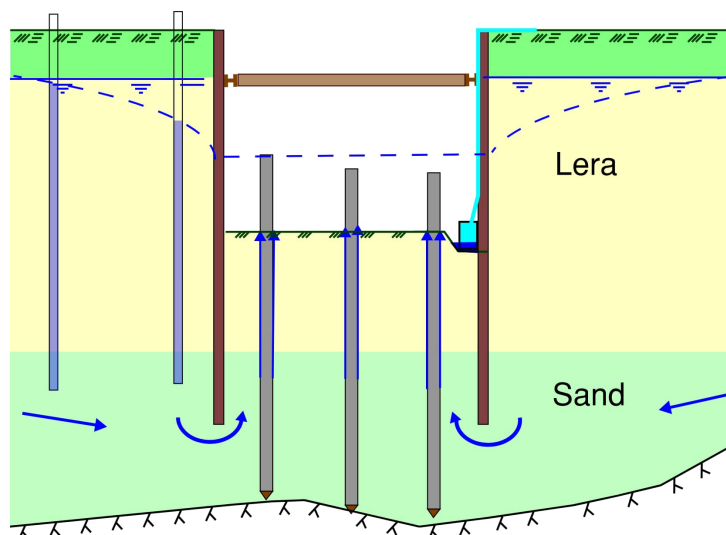
Inducerat förhöjt porvattenöstryck är främst ett stabilitetsproblem. Förutom de åtgärder som tas fram från stabilitetsutredningen, kan åtgärder även vidtas för att reducera inducerat förhöjt porvattenöstryck i jorden under pålningsarbetet. Åtgärderna består främst av att minimera störningen av jorden vid installationen av pålarna och är i stort sett desamma som de åtgärder som kan vidtas för att minska både inducerade markvibrationer och markdeformationer, se vidare i avsnitt 10.2.7, resp. avsnitt 10.4.6. En ytterligare åtgärd är att förbättra dräneringen både under och efter installationen av pålarna. I friktionsjord kan det räcka med att fästa **prefabricerade dräner** på första pålelementet för att minska inducerat porvattenövertryck (Holtz & Boman, 1974). I lera och siltjord gör prefabricerade dräner på pålarna även nytta efter pålinstallationen genom att påskynda rekonsolideringen runt pålarna (Zhu, et al., 2020). Även **vertikaldräner** mellan pålarna gör, av samma orsak, nytta i lerjord. Vid pålning ned till en undre akvifer med artesiska grundvattenöstryck, måste dock eventuella dräner utformas så att de inte medför en permanent grundvattensänkning, se avsnitt 10.3.4.

10.3.4 Grundvattentryck och grundvattenströmning

Grundvattentrycksänkning

Vid pålning ner till en akvifer (friktionsjord med grundvatten) med artesiskt grundvattentryck (grundvatten med tryckhöjd över markytan) kan oavsiktlig dränering av den undre akviferen uppstå. Detta sker när grundvatten strömmar upp längs pålar som installerats genom ett tätande lerlager, se Figur 10.3.4. Problemet kan också uppstå i samband med schaktarbeten efter nyligen installerade pålar eller vid installation av pålar från lägre nivå och med grundvattentrycket i den undre akviferen ovan schaktbotten. Risken för detta fenomen är särskilt hög, enligt (de Bruin, 2016), vid borrade pålar pga. risken för att meruttag av jordmaterial under installationen kan skapa läckvägar utmed pålarna. Vid pålning från en schaktbotten eller pålar med lågt avskärningsplan, kan åtgärder behövas för att inte orsaka permanent grundvattentrycksänkning och därmed ge upphov till sättningar i omgivningen.

Vid risk för grundvattenströmning längs pålarna, ska i första hand en pålningsmetod som medför minimal störning av leran väljas. Under pålningsarbetet bör också grundvattentrycket i den undre akviferen tillfälligt sänkas så att hydrostatiskt grundvattentryck kan hållas till aktuell marknivå vid pålarna tills den störda leran har hunnit "läka ihop". Om det inte är möjligt att sänka grundvattentrycket under arbetet, kan foderör sätts runt pålarna ner till tät lera och upp till en nivå motsvarande den högsta grundvattentrycksnivån i den undre akviferen. När leran "läkt ihop", kan foderören tas bort.



Figur 10.3.4 Ofrivillig dränering av den undre akviferen kan uppstå i samband med påslagning, då grundvattenströmning sker i den störda jorden runt pålarna. Gäller framförallt vid pålning genom tätjord ned till friktionsjord med artesiskt grundvattentryck.

Läckage av grundvatten kan också uppstå för pålar och stödkonstruktioner som tillverkas på plats (t.ex. grävpålar och slitsmurar) genom s.k. betongblödning. I detta fall uppstår en grundvattenströmning under härdning av betongen pga. att porvattenövertryck skapar ihålligheter i betongen (Larish, 2019). Orsakerna till betongblödning kan, enligt Larish (2019) uppstå vid för högt vatten-cementförhållande (vct), för mycket finmaterial eller otillräcklig gradering hos ballastmaterialer eller höga yttre jord- eller grundvattentryck (t.ex. artesiskt grundvattentryck).

Grundvattenbarriärer

Pålar och stödkonstruktioner installerade ned i en akvifer kan påverka grundvattenströmningen och kan i vissa fall vara dämmande. Risk för det senare kan förekomma om pålar eller stödkonstruktioner begränsar tvärsnittsarean i det vattenförande jordlagret. Om det bedöms att pålarna eller stödkonstruktionerna kan medföra negativ påverkan på omgivningen, bör en geohydrologisk utredning utföras

(Sparrenbom, et al., 2022). Om utredningen visar att det finns en tydlig risk för dämningseffekter, kan åtgärder behöva vidtas för att minska påverkan.

Krav

Övergripande krav för arbeten som kan medföra skada eller olägenhet för omgivningen återfinns i 2 kap. miljöbalken (hänsynsreglerna). Här framgår bland annat att både byggherre och utförare av det aktuella arbetet ska skaffa sig den kunskap som krävs och vidta de försiktighetsmått som behövs för att skydda människors hälsa och miljön mot skada eller olägenhet som skulle kunna uppkomma till följd av det specifika arbetet (se 2 kap. 2-3 §§ miljöbalken). Dessa försiktighetsmått bör vidtas så snart det finns skäl att anta att en verksamhet eller åtgärd kan medföra skada eller olägenhet för människors hälsa eller miljön (SFS 1998:808 Miljöbalk).

Ovanstående lagrum berör därmed arbeten som skulle kunna förändra grundvattenförhållanden utan att själva arbetet utgör en vattenverksamhet. Det kan exempelvis innefatta dämmande konstruktioner eller åtgärder som ökar grundvattenströmmen mellan olika akviferer och som därigenom förändrar grundvattennivåerna.

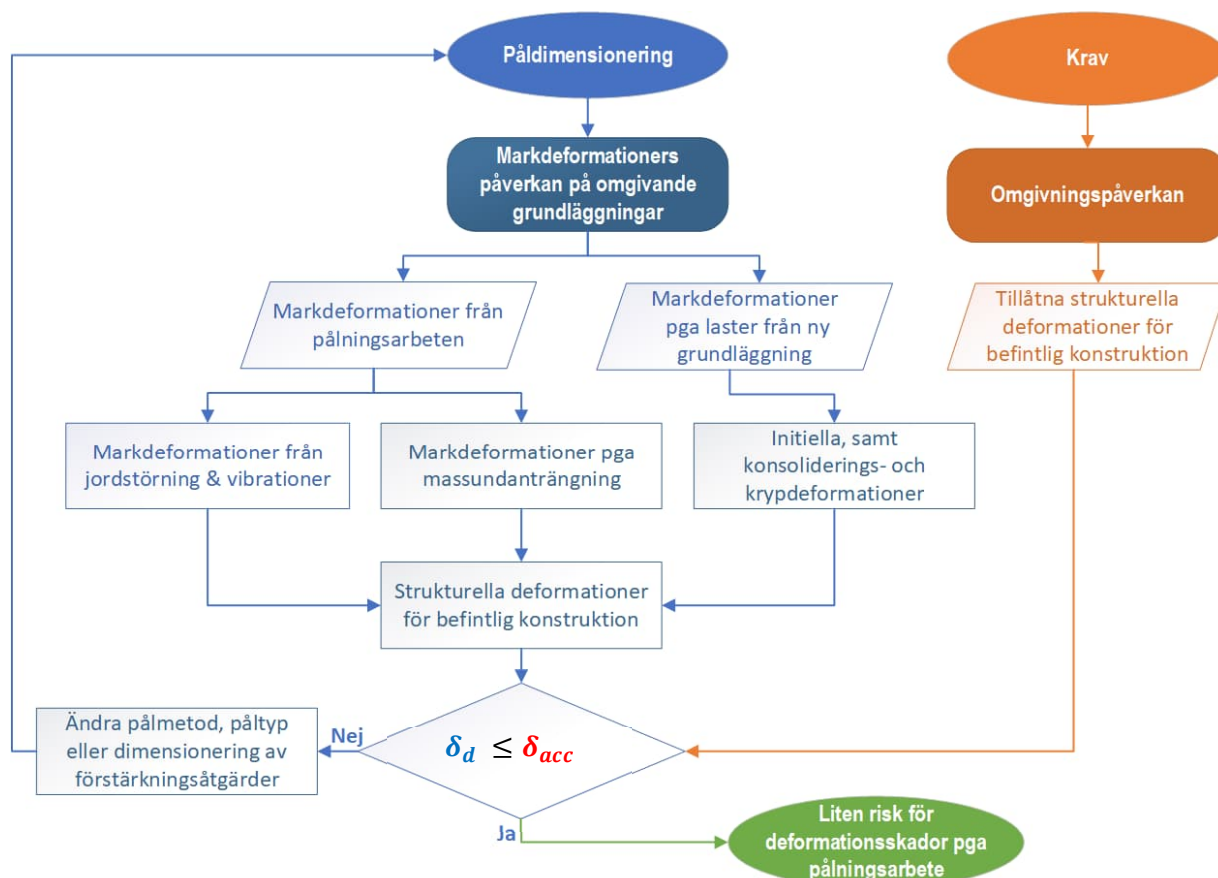
Om arbetet även innefattar tillfällig sänkning av grundvattentrycket, till exempel för att förhindra läckage av grundvatten längs pålen, krävs det att grundvatten bortleds. En sådan åtgärd klassas enligt 11 kap. 6 § i miljöbalken som vattenverksamhet, vilket vanligtvis kräver tillstånd. Tillstånd för vattenverksamhet behandlas av mark- och miljödomstolen. Det finns dock undantagsregler enligt 11 kap. 12 §, där tillstånd inte behövs om det tydligt kan påvisas att de förändrade vattenförhållandena inte orsakar skada. Vissa tillsynsmyndigheter, såsom länsstyrelser, anser att försiktighetsåtgärder enligt 2 kap. 3 § i miljöbalken bör betraktas som vattenverksamhet som kräver tillstånd, särskilt när det gäller infiltration (eventuellt enligt 11 kap. 6 § i miljöbalken). Det är dock tveksamt om skyddsinfiltration för att bibehålla ursprungliga grundvattennivåer bör ses som vattenverksamhet enligt miljöbalkens beskrivning av syftet, som rör "tillförsel av vatten för att öka grundvattenmängden". Trots dessa tolkningar kan en sådan skyddsåtgärd förmodligen klassas som icke-tillståndspliktig vattenverksamhet, särskilt om det är svårt att skilja på nivå och mängd (Lissel, 2024).

10.4 MARKDEFORMATIONER

10.4.1 Allmänt

Installation av massundanträngande pålar i lera orsakar hävning och horisontella förskjutningar av omgivningen. I friktionsjord kan sättningar eller hävningar uppstå pga. markvibrationer under installation av pålar, beroende på om jorden är fast eller löst avlagrad. Dessa deformationer kan vara skadliga för närliggande byggnader och deras grundläggning. Till detta tillkommer även de markrörelser som lasterna från den planerade grundläggningen kommer att orsaka på närliggande byggnaders grundläggning. I påldimensioneringen av den nya grundläggningen ingår även att utreda de markdeformationer och laster som pålning kan orsaka för omgivningen. Utöver detta ingår också att utreda krav för tillåtna deformationer för närliggande befintliga konstruktioner m.h.t. risk för skada. Flödes-schemat för påldimensionering med hänsyn till deformationer visas schematiskt i Figur 10.4.1.

För att utreda risk för skadliga deformationer, är det därför värdefullt att kunna prognosticera deformationer från installation av pålar. Metoder för att prognosticera deformationer diskuteras i detta kapitel och formler för beräkningar redovisas. Vidare ges riktlinjer för bedömning av skaderisk och vilka åtgärder som kan vidtas för att minska omgivningspåverkan från pålningsarbeten.



Figur 10.4.1 Flödesschema vid påldimensionering m.h.t. risk för skadliga deformationer för omgivande befintliga konstruktioner.

10.4.2 Markdeformationer pga jordstörning och markvibrationer

Deformationer vid pålning i friktionsjord är en komplex och dynamisk process. De påverkas inte enbart av pålens egenskaper och den energi som tillförs vid neddrivningen, utan även av rådande geotekniska förhållanden och jordens materialegenskaper. Av de geotekniska parametrarna är lagringstätheten särskilt avgörande. Utifrån denna kan det bedömas om jorden vid stora skjuvtöjningar uppvisar ett kontraherande beteende (sättningsbenägen) eller ett dilaterande beteende (hävningbenägen), samt i vilken omfattning och med vilken magnitud markdeformationer kan förväntas uppstå.

Även jordens partikelform, permeabilitet och effektivspänningstillstånd påverkar deformationernas utbredning och storlek. Vid låg permeabilitet kan porvattentrycket initialt öka, vilket medför att sättningar utvecklas först efter dränering (se avsnitt 10.3). Risken för detta är särskilt stor vid vibrodrivning med snabba lastcykler. Om jorden dessutom är löst lagrad kan jordförvätskning (eng. *liquefaction*) uppstå, vilket i sin tur kan ge upphov till betydande sättningar kring pålen.

Deformationszoner och bedömning av påverkan

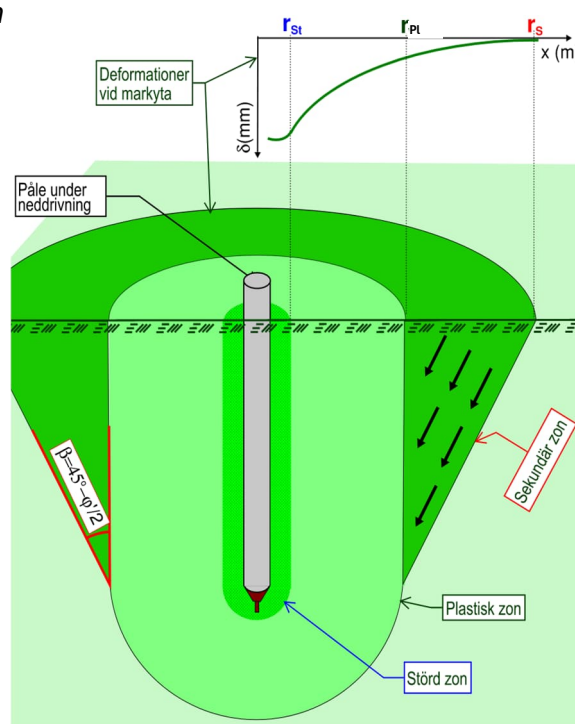
Markdeformationer till följd av pålning i friktionsjord kan delas in i tre zoner: störd zon, plastisk zon och sekundär zon, se Figur 10.4.2.

Störd zon

Den störda zonen uppkommer genom lokal jordförvätskning och jordstörning i direkt anslutning till pålen. Enligt Turkel (2023) varierar radien för den störda zonen, r_{St} , typiskt mellan cirka 3 och 7 påldiametrar räknat från pålcentrum.

Plastisk zon

Den plastiska zonen utgör det område där de inducerade markvibrationerna är så stora att plastiska deformationer uppstår. Zonens radie och deformationernas storlek beror bland annat på de geotekniska förhållandena (t.ex. I_D), påldrivningsenergin (W_k) och pålens impedans (Z_P). Radien för den plastiska zonen kan uppskattas utifrån tröskelvärde för volymetrisk töjning (γ_{tv}) i kombination med bestämning av initial skjuvmodul, G_0 markvibrationernas storlek samt reducerad skjuvmodul med hänsyn till inducerade vibrationer (se Tabell 10.1.1, Tabell 10.1.2 och Tabell 10.2.2). För typiska svenska förhållanden kan radien r_{Pl} beräknad enligt dessa samband, variera mellan cirka 3 m och 15 m från pålcentrum.



Figur 10.4.2 Deformationszoner och sättningar i kontraherande friktionsjord vid pålning.

Sekundär zon

Den sekundära zonen omfattar de deformationer som uppstår som en följd av rörelser i den störda och plastiska zonen. Utbredningen i markplan (r_S) är därför beroende av bland annat pålningsdjupet, L , och jordens inre friktionsvinkel.

Det **första steget** vid utredning av risken för deformationer på grund av pålningsarbete i friktionsjord är att identifiera om jorden är sättningsbenägen (kontraherande) eller hävningsbenägen (dilaterande), vilket kräver geotekniska undersökningar, helst CPT-sonderingar, för att bestämma lagringstäthet eller tillståndsfaktor i friktionsjord (se Tabell 10.1.3). Därefter (**andra steget**) bedöms utbredningen av den störda, plastiska och sekundära zonen kring pålen, och utifrån denna bedömning utreds risken

för påverkan på befintliga konstruktioner. Om en konstruktion bedöms ligga inom påverkanszonen, bör storleken på de inducerade markrörelserna och risken för skador utvärderas (**tredje steget**).

Empiriska prognostiseringsmodeller

Deformationer vid pålning i friktionsjord utgör en komplex och dynamisk process, beroende av geotekniska förhållanden, jordens materialegenskaper och inducerade markvibrationer. Processerna är svåra att beskriva matematiskt, varför tillgängliga modeller huvudsakligen utgörs av empiriska och semi-empiriska samband baserade på laboratorieförsök, fältmätningar och numeriska FE-beräkningar. I detta avsnitt redovisas en härledd formel samt ett urval av etablerade modeller för uppskattning av deformationer i friktionsjord vid pålning.

Härledd empiri baserad på kända empiriska formler för markvibrationer och skjuvmodul

Utbredningen av den plastiska zonen (r_{PI}) kan uppskattas utifrån empiriska samband för markvibrationer vid hejardrivning (se avsnitt 10.2.6) samt samband för initiell skjuvmodul, skjuvmodulens töjningsberoende och tröskelvärdet för volymetrisk skjuvtöjning i välgraderad sand (se avsnitt 10.1.3 och 10.1.4). Den sekundära zonens radie (r_s) kan uppskattas utifrån pålningsdjupet (L) och jordens friktionssvinkel (φ). I Tabell 10.4.1, fall E, redovisas härledda radier för plastisk och sekundär zon. Sambanden medger inte direkt beräkning av sättning eller hävning. Utifrån lagringstäthet och känd jordart, kan dock maximalt möjlig deformation uppskattas.

Empiri baserad på fältförsök och numeriska beräkningar (Turkel et al., 2023)

Turkel et al. (2023) har, baserat på fältförsök och numeriska beräkningar, utvecklat en semi-empirisk formel för deformationer i friktionsjord som funktion av den kinetiska energin vid hejardrivning (W_H). Samband för olika lagringstätheter har härletts och redovisas i Tabell 10.4.1, fall B. Turkels semi-empirisk formel kan användas för beräkning av sättning, hävning och radie på påverkanszonen i en homogen friktionsjord. Den tar dock inte heller hänsyn till friktionslagrets mäktighet eller pålens längd.

Empiri baserad på laboratorieförsök (Drabkin et al., 1996)

En mer detaljerad empirisk metod för beräkning av sättningar utgörs av den polynomiska modell som utvecklats av Drabkin et al. (1996) utifrån modellförsök i laboratorium. Drabkins modell beaktar inducerade markvibrationer från pålningsarbetet, antalet vibrationscykler, rådande jordtryck, kornstorleksfördelning, relativ densitet och fukthalt. De inducerade markvibrationerna måste dock beräknas separat, varvid någon av de semi-empiriska formlerna enligt Tabell 10.2.2 kan användas. Med denna modell kan hänsyn tas till såväl jordlagertjocklek som jordlager med varierande lagringstäthet. Metoden kan användas för att beräkna sättningar i friktionsjord vid både vibrodrivning och hejardrivning. För ytterligare detaljer om metoden, se Tabell 10.4.2, fall D.

Empiri baserad på fältobservationer (Massarsch, 2004)

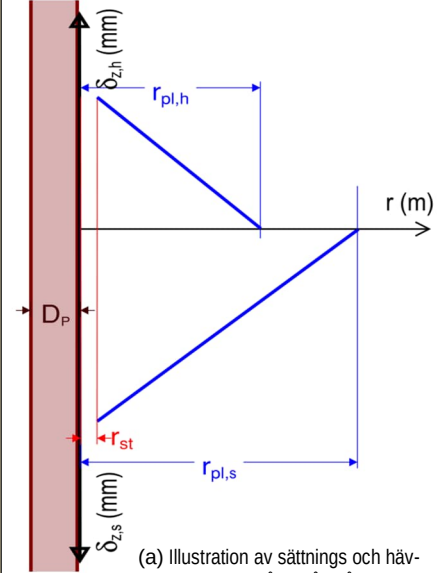
En enklare metod för att beräkna sättningar har utvecklats av Massarsch (2004) med utgångspunkt i observationer från djuppackning i friktionsjord med varierande relativ densitet. Även för denna metod har samband för olika värden på relativ densitet härletts, se Tabell 10.4.1, fall C. Massarschs empiriska metod kan användas för att beräkna sättning vid hejardrivning av pålar i homogen friktionsjord, men den beaktar varken storleken på de inducerade markvibrationerna eller drivenergin vid pålningsarbetet.

Numerisk modellering

Numerisk modellering för att beräkna deformationer och markvibrationer från påldrivning i friktionsjord kräver att själva påldrivningen modelleras noggrant. Dessutom krävs materialmodeller som kan ta

hänsyn till ackumuleringen av porvattentryck och modellera kontraherande eller dilaterande mekanismer i jorden beroende på rådande lagringstäthet och kritisk lagring. Sådana beräkningar är mycket avancerade och utförs idag främst ur forskningssynpunkt. Läs vidare i Turkel (2023) och Mahutka, et al., (2006) för vidare detaljer för numerisk modellering av hejardrivning, resp. vibrodrivning av pålar i friktionsjord.

Tabell 10.4.1 Empiriska formler för att beräkna sättning och hävning i friktionsjord med olika lagringstäthet.

Prognostisering av markdeformationer pga jordstörning & markvibrationer från påldrivning	
 (a) Illustration av sättnings och hävningskurvor avstånd från pålcentrum.	A. Förklaringar $\delta_{z,s}$ – sättning r_{st} – radie för störd zon $r_{pl,s}$ – radie för plastisk zon m sättningar $r_{pl,h}$ – radie för plastisk zon m hävningar r_s – radie för störd zon $\delta_{z,h}$ – hävning L_p – längd påle i friktionsjord D_p – påldiameter I_D – relativ lagringstäthet [%] W_H – kinetisk energi [J/slag]
	B. Empirisk formel enl. Turkel et al (2023) med härlett samband med lagringstäthet $\delta_{z,s} = a_s \cdot r / \sqrt{W_H} + b_s$ [mm] $\delta_{z,h} = a_h \cdot r / \sqrt{W_H} + b_h$ [mm] för $r_{st} \leq r \leq r_{pl,s}$ för $r_{st} \leq r \leq r_{pl,h}$ $a_s = 0.0085 \cdot I_D^2 - 0.46 \cdot I_D - 50.6$ $a_h = 0.0052 \cdot I_D^2 - 2.5 \cdot I_D + 65.5$ $b_s = -0.02 \cdot I_D^2 + 1.1 \cdot I_D + 120.6$ $b_h = -0.055 \cdot I_D^2 + 2.6 \cdot I_D - 68.7$ $r_{pl,s} = 2.62m / \sqrt{k} \cdot \sqrt{W_H}$ [m] $r_{pl,h} = 1.3m / \sqrt{k} \cdot \sqrt{W_H}$ [m] $r_{st} = 0.25m / \sqrt{k} \cdot \sqrt{W_H}$ [m]
	C. Empirisk formel enl. Massarsch (2004) med härlett samband med lagringstäthet $\delta_{z,s} = \alpha \cdot (L_p + 6 \cdot D_p) \cdot (3 \cdot D_p + L_p - r) / (3 \cdot D_p + L_p)$ för $0 \leq r \leq r_{pl,s}$ $\alpha = (4.15 - 0.04 \cdot I_D) / 100$, där I_D i [%] enligt Tabell 10.1.3 $r_{v,s} = (5 \cdot D + L_p) / 2$
	D. Empirisk formel enl. Drabkin et al (1996) $\delta_{z,s} = \sum_{i=1}^{i=10} \varepsilon_i \cdot h_i$ $\varepsilon_i = 1/150 \cdot \exp \left[\frac{2.27 + 1.19 \cdot a - 0.71 \cdot a^2 + 0.49 \cdot b - 0.68 \cdot b^2 - 0.80 \cdot c + 1.09 \cdot c^2 -}{0.46 \cdot d + 0.06 \cdot d^2 + 0.45 \cdot e - 0.38 \cdot e^2 - 0.19 \cdot f - 0.10 \cdot g} \right]$ $a = -1 + 10/3 \cdot (\hat{v} - 0.1)$ parameter för vibrationsnivå $\hat{v}(r)$ (toppvärde i mm/s) vid avstånd r, se Tabell 10.2.2. $b = -1 + 0.15 \cdot (\sigma'_v - \sigma'_h - 2)$ parameter mht rådande deviatorisk spänning $(\sigma'_v - \sigma'_h)$ i kPa $c = -1 + 0.1 \cdot (\sigma'_h - 10)$ parameter mht rådande jordtryck σ'_h [kPa] $d = 1 - 1.03 \cdot d_{50}$ parameter beroende kornstorlek, där d_{50} [mm] medianstorleken för jordpartiklarna $e = -1 + 0.04 \cdot (N - 60)$ parameter mht antal vibrationscykler N [st] $f = 0.03 \cdot \theta - 1$ parameter mht rådande fukthalt θ [%] $g = 0.15 \cdot I_d - 3.25$ parameter mht rådande relativ lagringstäthet I_d [%], se Tabell 10.1.3. $h_i = L_s / 10$ tjocklek på beräkningslager [m]
E. Härledda formler för beräkning sättning/hävning pga pålning med hejare i välgraderad sand (enligt Avsnitt 10.1.3, 10.1.4 och 10.2.6)	
$r_{Pl} = \frac{7230 \text{ kN} \cdot \sqrt{k} \cdot \sqrt{W_H}}{Z_p \cdot \sqrt{(16+0.6I_D)(1.70-0.0025I_D)}}$ radie för plastisk zon vid ytlig pålning ($L < 5$ m) $r_s = r_{Pl} + L \cdot \tan(45 - \phi'/2)$ radie för sekundär zon (Meijers, et al., 2025) $e = e_{\max} - I_D/100 \cdot (e_{\max} - e_{\min})$ Rådande portal bestämd från lagringstäthet och max och min portal, se Tabell 10.1.3 $\varepsilon_{Pl,s \max} = (e_{\min} - e)/(1 - e)$ Maximalt möjlig vertikal töjning avseende sättning, dock 0 när $e_{\min} \leq e$ $\varepsilon_{Pl,h \max} = (e_{\max} - e)/(1 - e)$ Maximalt möjlig vertikal töjning avseende hävning, dock 0 när $e_{\max} \geq e$ $\delta_v = \sum i \cdot h_i \cdot \varepsilon_{Pl,i}$ Maximal möjlig sättning (-) / hävning (+) i en jordprofil med tjocklek H och där $h_i = H/i$ är delskiktens tjocklek.	

10.4.3 Markdeformationer pga massundanträngning

Problem med stora rörelser till följd av pålinstallation är främst förknippade med pålning i vattenmättad lera. Fenomenet har studerats av många författare (t.ex. Hagerty & Peck (1971), Massarsch (1976) och Dugan & Freed (1984)) där storleken på markrörelsen i huvudsak har förklarats bero på den massundanträngande volymen (dvs. volymen installerade pålar i leran). Detta beror på lerans låga permeabilitet och praktiskt taget odränerade förhållanden, tillsammans med att porvattentrycket,

hindrar volymförändringar av leran. Däremot uppges att fördelningen av den förskjutna jordvolymen påverkas av pålordning och drivningsriktning av pålningsarbetet, samt lerans sensitivitet. Även förhållanden i omgivningen, såsom pålning från lägre marknivå, pålning invid sluttande markyta eller tunga byggnader med djup grundläggning, uppges ha inverkan på fördelningen av den undanträngda jordvolymen (Rehman, 1993). I föreliggande avsnitt ges rekommendationer för prognostisering av markdeformationer pga. installation av massundanträngande pålar i lera med en analytisk beräkningsmodell och motsvarande beräkning m.h.a numerisk modellering.

Analytisk prognostiseringsmodell

Teoretiska modeller för prognostisering av markdeformationer från pålningsarbeten i lera utvecklades i slutet av 1980-talet baserade på vätskemekanik. Bland dessa modeller har den teoretiska beräkningsmodellen av Sagaseta et al. (1997) visat sig ge mycket god överensstämmelse med uppmätta deformationer från pålningsarbeten (Sagaseta & Whittle, (2001), Xu (2006), Edstam (2011)). Sagasetas analytiska beräkningsmetod, kallad **SSPM** (eng. *Shallow Stress Path Method*), bygger på antagandet att jorden är ett inkompressibelt och friktionsfritt material. I lösningen har den massundanträngande pålen modellerats med ett antal punktkällor av expanderande sfärer mot djupet. Metoden är en vidareutveckling av arbetet som Baligh (1985) utförde, men med tillägget att hänsyn tas till inverkan av markytan. Sagaseta et al. (1997) har, utifrån dessa antaganden, härlett ekvationer för beräkning av markdeformationer i form av radiell och vertikal förskjutning. För pålar har det dock endast varit möjligt att härledda en analytisk formel för beräkning av markdeformationer i markytan (Sagaseta, et al., 1997) . För att beräkna markdeformationer mot djupet krävs en numerisk lösning av de ekvationer som Sagaseta et al. (1997) har härlett.

Den analytiska formeln för beräkning av radiella och vertikala markdeformationer i punkter på markytan pga. installation av en påle, är mycket enkel och kräver endast tvärsnittsarea (A_p) och längd (L_p) för pålen, samt det radiella avståndet till aktuell beräkningspunkt (r). Formeln för beräkning av markdeformationer i markytan från installation av massförskjutande pålar redovisas i Tabell 10.4.2. Uppställning av ekvationer för beräkning av deformationer mot djupet är betydligt mer komplex och läsaren hänvisas här till Sagaseta et al. (1997) för detaljer.

I figur b i Tabell 10.4.2 visas de radiella och vertikala jorddeformationerna kring en installerad en påle beräknad enligt SSPM. Observera att sättningar uppstår i jorden invid nedre delen av pålen och som vid pålspetsen sträcker sig radiellt ut cirka 0,5 till 0,65 gånger pålens längd (se blåfärgat mönster i figuren). Ovanför pålspetsen minskar sättningszonen gradvis in mot pålen och når en tjocklek på cirka 10 % av pålens radie vid djup ungefär i mitten av pålens längd. Ovanför sättningszonen uppstår markhävningar. Markhävningen är som störst vid markytan intill pålen och minskar sedan med avståndet från pålen. Vid ett radiellt avstånd större än 1,5 gånger pålens längd, är hävningen normalt mindre än 10 % av hävningen närmast den installerade pålen.

Flera pålar och hänsyn till lerproppar och förborring

Då beräkningsmodellen SSPM är helt linjär-elastisk, kan superposition användas för att ta hänsyn till flera pålars påverkan i respektive beräkningspunkt. Detsamma gäller för att beräkna effekterna av att minska omgivningspåverkan genom förborring med skruvborrar eller användning av lerproppar med öppna stålrörspålar. I beräkning av dess påverkan med SSPM, kan förskakt, förborring eller lerproppdragning antas ha negativa areor och med längd på djupet för respektive åtgärd.

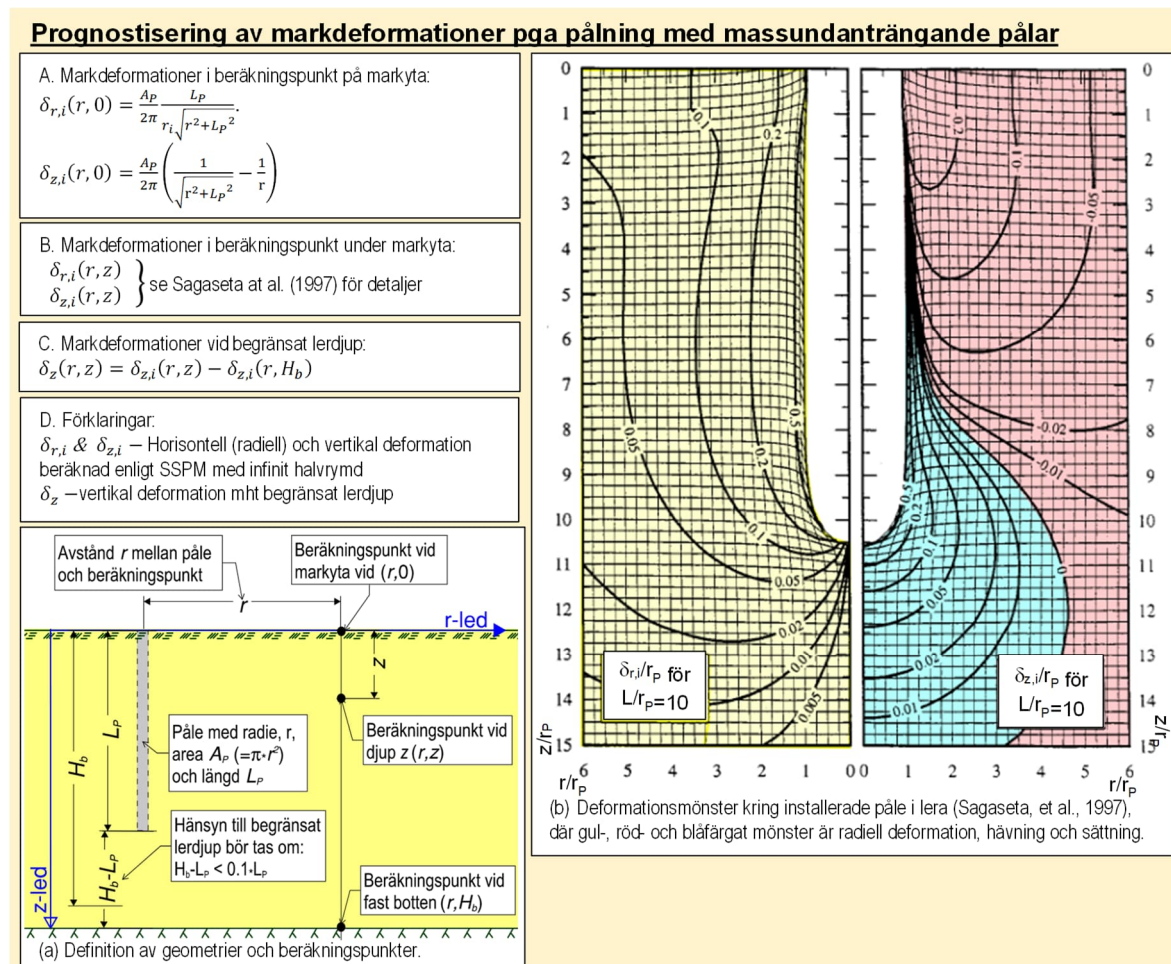
Begränsat lerdjup

Beräkningsmodellen SSPM gäller för en oändlig halvrymd, dvs. lera ned till betydande djup. Modellen är därför tillämplig för kohesionspålar i lera med stort lerdjup. Vanligen består pålgrundläggning av spetsburna pålar som drivs ner till en fast botten av berg eller friktionsjord, eller kohesionspålar med begränsat lerdjup under pålspetsen. Detta gränsvillkor påverkar de deformationer som uppstår i den

överliggande jorden. För att hantera detta, kan man beräkna den relativa vertikala deformationen mellan beräkningspunkten i leran och den fasta marken (Sagaseta & Whittle, 2001). Denna förenkling är inte möjlig för att beräkna horisontella deformationer och kräver i sådant fall numerisk modellering.

Påverkan av begränsat avstånd mellan pålspets och fast botten är påtaglig först vid ett avstånd mindre än 10% av pållängden (Sagaseta & Whittle, 2001). Vid större avstånd ger analytisk lösning av SSPM till oändligt djup en underskattning av beräknande deformationer som är mindre än 10 %.

Tabell 10.4.2 Analytiska formler för beräkning av markdeformationer pga. massundanträngande pålar i lera med beräkningsmodell SSPM enligt lösning av Sagaseta, et al. (1997)



Numerisk modellering

Den analytiska lösningen för beräkning av markdeformationer på grund av massundanträngande pålar i lera med beräkningsmodell SSPM enligt Sagaseta et al. (1997), kan inte ta hänsyn till effekten av sluttande markytor, schakter samt närliggande konstruktioner med och utan pålgrundläggning. För att analysera och beräkna deformationer m.h.t. dessa effekter, krävs numerisk modellering. Modelleringen kan utföras med samma antaganden som i SSPM, det vill säga med expanderad volym motsvarande den installerade pålen. För en påle kan modellering utföras med en axisymmetrisk numerisk modell och med en odränerad linjär-elastisk materialmodell för leran.

Att modellera installationen av ett stort antal pålar, som enskilda expanderande volymer, kan snabbt blir en mycket stor tredimensionell numerisk modell, som blir tidskrävande, sett till både persontimmar och beräkningstid. Förenklingar kan då göras, som beskrivs av Edstam & Kullingsjö (2010), genom att modellera pålgrupper som större pålar/volymer. Den större volymen "påle" expanderas då

motsvarande den sammanlagda volymen av installerade pålar i pålgruppen. Om rörelsen inom eller nära den installerade pålgruppen är av intresse, ska gruppering av flera pålar till en större kropp utföras med förståelse för att det radiella avståndet i förhållande till påldiametern påverkar rörelsemönstret och att detta förhållande förändras vid grupperingen.

Rekonsolidering

Installationen av massundanträngande pålar orsakar även ett porvattenövertryck i leran närmast pålen, se avsnitt 10.3.2. Konsolidering av det uppkomna porvattenövertrycket inleds så snart en enskild påle har installerats. Konsolideringen leder till ytterligare rörelser, men nedåt och in mot den installerade pålen. Tiden för konsolidering beror på omfattningen av pålningen och den störda jorden, pållängden, pålens material, lerans permeabilitet, dränerade skikt och lermäktigheten. Sättningen som uppstår till följd av konsolidering kan, enligt Dugan & Freed (1984), grovt uppskattas vara i samma storleksordning som hävningen som uppstår på grund av massundanträngningen. Det har även rapporterats om fall där sättningen, pga. rekonsolideringen, blivit större än den initiala hävningen av markytan som uppstod i samband med pålinstallation (D'Appolonia & Lambe, 1971). Det senare fallet gällde för spetsbärande pålar drivna genom ett mäktigare lerlager ned till fast botten. Även radiella rörelser mot pålen till följd av konsolidering har rapporterats, både för en pålgrupp (Massarsch, 1976) och för en enskild påle (Pestana, 2002).

I numeriska beräkningar har Isaksson (2025) visat att en återgång av massundanträngda markdeformationer på grund av rekonsolidering blir cirka 30 % respektive 40 % av det initiala värdet i horisontell respektive vertikal riktning.

Prognosticerade värden och påverkan på pålgrundlagda byggnader

Utifrån jämförelseanalyser av beräknade rörelser för det fria-fältet enligt SSPM och uppmätta rörelser i påverkade pålgrundlagda byggnader, enligt både fältmätningar (Hall & Li, 2024)) och numeriska analyser (Isaksson, et al., 2025), har följande noterats om hur befintliga pålgrundlagda byggnaders rörelser påverkas av massundanträngande markrörelser:

- Om pålarnas hela längd, tillhörande den påverkade byggnaden, ligger inom influensområdet för massundanträngande markrörelser, är den **uppmätta hävningen** i påverkad byggnad vanligtvis av samma storleksordning som den beräknade markhävningen enligt fria-fältet (dvs enligt SSPM). Om påverkad byggnads pålar är längre och sträcker sig under influensområdet för markhävning, blir uppmätt hävning i påverkad byggnad lägre jämfört med den beräknade rörelsen för det fria-fältet.
- **Uppmätta horisontaldeformationer** för en byggnad som är helt inom påverkansområdet, överensstämmer vanligen med de markrörelser som beräknats i det fria fältet vid byggnadens grundläggningsnivå närmast pålningsområdet. Pålgrundläggningen för den påverkade byggnaden har således begränsad betydelse för att motstå massundanträngande horisontella markdeformationer. Om byggnaden däremot har en längd som sträcker sig tvärs över och utanför påverkanzonen, ökar dess förmåga att motstå de horisontella markrörelserna.
- En tid efter att pålgrundlagda byggnader påverkats av massundanträngande markrörelser (upp till två år) finns indikationer på att uppmätta horisontella differentialdeformationer i de påverkade byggnaderna delvis återgår. Vertikalt har en viss utjämning av **uppmätta differentialdeformationer** mellan olika mätpunkter i byggnaden också noterats över tid, men detta fenomen har varit mindre markant än det som observerats för horisontella deformationer. Alltså, uppmätta differentialdeformationer minskar med tiden i horisontell riktning men kvarstår i större grad i vertikal riktning.

10.4.4 Initiella, konsoliderings- och krypsättningar

Vid grundläggning med kohesionspålar förs lasten från konstruktionen ned genom pålarna och över till omgivande jord. Vid pålgrundläggning intill andra konstruktionen kan detta orsaka sättningar hos de närliggande konstruktionerna. För byggnader utförs pålgrundläggningen ofta med källare, varför den övre delen av jordprofilen kan komma att avlastas och den nedre delen av jordprofilen belastas. Då jorden normalt är styvare i den nedre delen och sättningarna oftast är pågående i den övre delen av jordprofilen, kan avlastningen i den övre delen av jordprofilen orsaka minskade sättningar för intilliggande konstruktioner. Detta gäller speciellt vid grundläggning med spetsburna pålar och om närliggande konstruktioner inte har en liknande grundläggning. De ökande eller minskade sättningarna till följd av ny pålgrundläggning kan orsaka differentialsättningar för de intilliggande konstruktionerna. Kontroll av att nybyggnationen inte orsakar skadliga differentialdeformationer för närliggande konstruktioner, omfattar alltså även långtidssättningar (dvs. konsolideringssättningar och krypsättningar). Även initiella sättningar kan påverka närliggande konstruktioner. Sättningar kan också orsakas av grundvattentrycksänkningar som uppstår genom pålningsarbetet, se avsnitt 10.3.4.

För friktionsjord kan sättningar under pålspets beräknas genom att beräkna skjuvtöjningarna från lastökning beräknad från punktlaster enligt Mindlins ekvationer (Mindlin, 1936). Därefter beräknas den töjningsberoende styvheten med hjälp av den ekvivalent-linjära metoden, som beskrivs i avsnitt 10.1.3. Den initiala skjuvmodulen kan uppskattas enligt Tabell 10.1.1, medan den töjningsberoende styvheten kan beräknas enligt Tabell 10.1.2. Den vertikala sättningen beräknas sedan som produkten av den vertikala töjningen och lagertjockleken, dividerad med den beräknade töjningsberoende styvheten.

I kohesionsjord krävs beräkning av långtidssättningar, se teorin i SGI-Information 13 (1997). Det finns enaxliga beräkningsprogram för att beräkna sättningar med hänsyn till konsolidering- och krypsättningar. Beräkning av sättningar vid grundläggning med kohesionspålar är dock komplex, med modellering av jordens vidhäftning och påhängslaster på pålen, och kräver därför vanligen numeriska beräkningsprogram. Tvådimensionella modeller kan användas vid symmetrisk pålgrundläggning, men tredimensionella beräkningar kan behövas vid mer komplexa geometrier. Både modellering och beräkningstid kan då bli mycket tidskrävande. För vidare detaljer om sättningsberäkningar till följd av pålgrundläggning, se Kapitel 7.

10.4.5 Tillåtna deformationer

De deformationer som uppstår på grund av pålningsarbete kan orsaka skador på närliggande byggnaders eller anläggningars pålgrundläggning eller skador i själva byggnaden eller anläggningen. I detta avsnitt diskuteras grunderna för att fastställa gränsvärden för deformationer från pålningsarbeten.

Eurokod (SS-EN 1997-1:2005) ger riktlinjer för val av gränsvärden för bärverksdeformationer och fundamentalsrörelser för nybyggnationer, vilka även gäller för påverkan på närliggande byggnader och anläggningar. Kraven för tillåtna rörelser ska, enligt Boverket (BFS-2019-EKS 10), bestämmas av byggherren. Identifiering av omgivande objekt som kan skadas pga. markdeformationer från en byggverksamhet, ska ingå samma riskanalys som för bedömning av vibrationsskador (se avsnitt 10.2.5). Förfarandet för besiktningar av byggnader och anläggningar kan också utföras enligt standarden för vibrationer (se standard SS 460 48 60). Rekommendationer för övervakningsmätningar med hänsyn till deformationer ges i detta avsnitt.

Deformationsskador

I nuvarande Eurokod (SS-EN1997-1:2005) rekommenderas att totalsättningar upp till 50 mm normalt kan tillåtas för konstruktioner med separata grundsulor. Större sättningar kan accepteras om vinkeländringarna är inom godtagbara gränser och inte orsakar problem med anslutande ledningar eller

lutning. Maximalt godtagbara relativa rotationer för olika konstruktioner varierar, enligt nuvarande Eurokod, vanligtvis mellan 1/2000 och 1/300 för att undvika bruksskador (dvs. 0,05% - 0,3%). Maximal vinkeländring för många konstruktioner ligger kring 1/500, medan en vinkeländring på cirka 1/150 kan orsaka brott (dvs. 0,2% respektive 0,7%).

De tillåtna rörelserna måste beräknas med tanke på den tekniska livslängden för en konstruktion. För bostads- och kontorsbyggnader är den tekniska livslängden normalt 100 år (BFS 2022:4 EKS 12, Boverket), medan anläggningar tillhörande Trafikverket vanligen ska ha en teknisk livslängd upp till 120 år (TFS 2018:57, Transportstyrelsen).

I Västsverige är geotekniska förhållanden med stora lerdjup (>100 m) och naturligt pågående sättningar på 3–6 mm/år inte ovanliga. Att dimensionera en grundläggning för en maximal tillåten sättning på 50 mm är därför inte rimligt. Krav bör istället ställas på deformationer som kan orsaka skador, dvs. differentialsättningar, rotationer och vinkeländringar. I kommande Eurokod (se Tabell 10.4.3) ges empiriska värden för bedömning av risken för skador på grund av deformationer i bottenplatta och fundament avseende just differentialsättningar, rotationer och vinkeländringar. Det är också viktigt att notera att det inte bara är konstruktioner som kan vara känsliga för rörelser. Även känslig utrustning och verksamhet i byggnader kan påverkas, där en otillbörlig lutning riskerar att störa deras drift.

Tabell 10.4.3 Empiriska värden för bedömning av risken för skador på grund av deformationer i bottenplatta och fundament enligt Eurokod (CEN (2022) & CEN (2024)).

Figur i Definition av **deformationsparametrar** för bottenplatta och fundament (CEN, 2024)

Tabell i Benämning av deformationsparametrar

s- totaldeformation
 δ_s – differensdeformation
 θ - rotation
 α -vinkeländring
 Δ -relativ utböjning/pilhöjd
 Δ/L – utböjningskvot över längd L
 ω – lutningsändring
 β -relativ rotation

Tabell ii Exempel på byggnader i olika strukturella sensitivitetsklasser (CEN, 2022)

Typ av byggnader eller konstruktionsdel	Strukturell sensitivitetsklass
Anslutande konstruktion	SSC1
Bjälklag och bottenplatta	SSC1
Ramverksbyggnader	SSC3
Armerade bärande väggar	SSC3
Torn/hög byggnad	h < 24 m: SSC2 24 m ≤ h < 60 m: SSC3 60 m ≤ h < 100 m: SSC4 100 m ≤ h: SCC5
Hissar, rulltrappor	SCC5

där h = höjd från grundläggningsnivån

Tabell iii Föreslagna maximalt tillåtna deformationer beroende på strukturell sensitivitetsklass (CEN, 2022)

Strukturell sensitivitetsklass	Maximum differens-deformation, $\delta_{s,Cd,SLS}$	Maximum relativ rotation, $\beta_{Cd,SLS}$	Maximum lutnings-ändring, $\omega_{Cd,SLS}$
SSC1 -lägsta	100mm	0,5%	0,5%
SSC2 -låg	60mm	0,3%	0,4%
SSC3 -normal	30mm	0,15 %	0,3%
SSC4-hög	15mm	0,075%	0,2%
SSC4 -högsta	10mm	0,05 %	0,1%

Om en konstruktion redan har utsatts för deformationer kan det återstående utrymmet för ytterligare deformationer innan skada uppstår vara begränsat. Detta kan i sin tur påverka hur kommande pålningsarbeten kan genomföras. Alternativt kan det vara så att deformationer från pålningsarbetet, i kombination med pågående naturliga markrörelser, bidrar till att skador uppstår inom byggnadens tekniska livslängd. Dessa skador kan alltså uppträda senare och efter att pålningsarbetena har avslutats.

Vidare kan andra grundläggningsarbeten i närområdet orsaka markdeformationer som påverkar samma byggnad. Det är också möjligt att byggnaden redan har befintliga deformationsskador innan pålningsarbetet inleds. Därför bör besiktning av byggnader och anläggningar inom påverkansområdet genomföras både före och efter pålningsarbetet. Besiktning enligt vibrationsstandarden SS 460 48 60 kan då användas. Vidare övervakningsmätningar av deformationer utförs för att säkerställa att tillåtna deformationer inte överskrids.

Övervakning av deformationer utförs lämplig med mätprismor för mätning av rörelse i horisontalld (x- och y-led) och vertikall (z-led). Det är oftast bra att mäta under minst 3 månader innan pålningsarbetet påbörjas för att kunna fånga upp eventuella naturliga rörelser för objekt. Ledningar övervakas lämpligen med markspik i linje med ledningsstråken. Filmning av ledningar före och efter pålningsarbetet rekommenderas för att dokumentera status innan och om ev. skada uppstått i efter pålningsarbetet. Krav på utförande för övervakning av deformationer anges i standard SS-EN ISO 18674-1:2015. För riktlinjer gällande precisionskrav, dokumentation och kvalitetskontroll i deformationsmätningarna, åberopas vanligen de tekniska specifikationerna SIS-TS 21043:2016 och SIS-TS 21044:2016.

Se även kapitel 9, Kontroll och verifiering.

Strukturellt bärighetsbrott

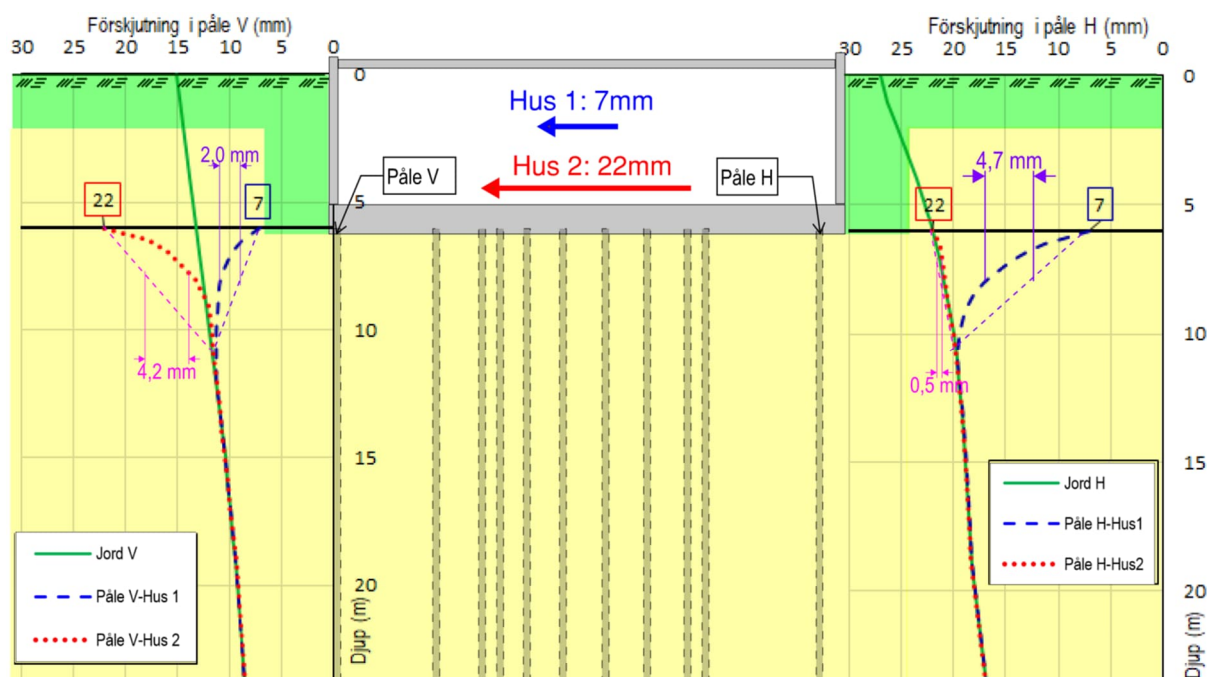
Markrörelser kan leda till utböjning av befintliga pålar i grundläggningen av närliggande byggnader eller anläggningar, vilket skapar tilläggsmoment i pålarna. Dessa utböjningar minskar pålarnas strukturella bärförmåga genom andra ordningens moment. Om pålarna redan är högt utnyttjade kan deras kapacitet överskridas. Kontroll av pålarnas strukturella bärförmåga utförs enligt Kapitel 6. Normalt finns tillräckliga säkerhetsmarginaler för att horisontella deformationer från pålningsarbete ska kunna orsaka ett faktiskt strukturellt brott för befintliga pålar även om den tillåtna teoretiska dimensionerade strukturella bärförmågan överskrids. Överskridande av den tillåtna teoretiska dimensionerade strukturella bärförmågan hos befintliga pålar, kan dock innebära begränsningar för möjligheten att nyttja de befintliga pålarna hårdare för framtida tillbyggnader eller ändringar av verksamheten i byggnaden.

Byggnader kan få en förskjutning när jorden trycker mot en källarvägg, medan pålarna följer med jordrörelsen. Eftersom pålhuvudet är fastsatt i den styva bottenplattan blir utböjningen antingen störst under källarväggen närmast pålningsarbetet, där jordrörelsen vanligtvis är större än förskjutningen av bottenplattan. Alternativt kan utböjningen vara störst under källarväggen längre från pålningsarbetet, där bottenplattans förskjutning normalt sett är större än jordrörelsen, se Figur 10.4.3. Vid lutande pålar kan en större förskjutning av bottenplatta jämfört med pålarna, orsaka både inspänningsmoment och tryckkrafter i pålarna. Kontroll av tillåten utböjning av pålarna (pilhöjd över pålarnas knäcklängd) krävs därför på båda sidorna av byggnaden.

Övervakning av pålars deformation med avseende på djup bör utföras med inklinometrar. För att mäta pålarnas rörelse mellan bottenplattan och marken rekommenderas att inklinometerrörens topp förankras i byggnadens bottenplatta. Denna åtgärd, tillsammans med uppmätt horisontell deformation hos byggnaden, ger värdefull information för att kunna bestämma inklinometerrörens faktiska rörelse. Om inte inklinometerrören förs ned i friktionsjorden under leran visar inklinometermätningarna endast relativa rörelser, eftersom markrörelser från pålningsarbeten kan uppstå ned till stora lerdjup. Vid pålning alldeles intill en befintlig pålgrundlagd konstruktion rekommenderas att inklinometerrör installeras i en påle med motsvarande styvhet som de pålar man vill övervaka. Övervakningspålen behöver i så fall installeras innan övriga pålar installeras och utförs lämpligen i samband med eventuell provpålning. Mätning med inklinometrar ska utföras enligt SS-EN ISO 18674-3:2017.

Jordrörelser kan även orsaka ökande jordtryck mot källarväggar och andra stödkonstruktioner. Detta kan leda till ökade laster och moment i konstruktionen, vilket gör det nödvändigt att kontrollera om konstruktionen klarar de ökade belastningarna. I vissa fall kan det krävas lutningsgivare för att

övervaka rörelser hos stödkonstruktionen och säkerställa att lutningen inte ger upphov till alltför stora belastningar.



Figur 10.4.3 Illustration av byggnads- och pålförskjutningar till följd av pålningsinducerade markrörelser samt mätning av pålars utböjning (pilhöjd) över knäcklängd. I fall 1 (hus 1, blå kurvor) är byggnadsförskjutningen 7 mm och störst utböjning uppstår i pålar närmast pålningsområdet. I fall 2 (hus 2, röda kurvor) är byggnadsförskjutningen 22 mm och störst utböjning uppstår i pålar längre från pålningsområdet.

Släntstabilitet

Enligt Lamens et al. (2020) är det inducering av porvattenövertryck under pålningsarbetet som är av störst betydelse för negativ påverkan på släntstabiliteten (se avsnitt 10.3.3). Om stabiliteten är otillfredsställande redan från början, kan markdeformationerna från pålningsarbete vara problematiska. Stabilitetsanalys kan utföras genom att först beräkna hur stort passivtryck som behövs för att mobilisera de horisontella deformationer som kan uppstå vid pålningsområdet. För detta ändamål kan man använda förhållandet mellan storleken på horisontell deformation med avseende på djupet relaterad till del av maximalt passivtryck, enligt rekommendationerna i Eurokod (SS-EN 1997-1). Stabilitetsberäkning kan sedan utföras genom att applicera beräknat horisontaltryck från pålningsområdet i riktning mot slänten (Aas, 1975). Beräknas stabiliteten som otillfredsställande utifrån denna analys, bör åtgärder vidtas för att minska de horisontella deformationerna mot slänten.

10.4.6 Åtgärder

Stålrörspålar och lerpluggning

Det effektivaste sättet att minska massundantängande markdeformationer från pålningsarbetet är att minska volymen massförskjutande pålar i jorden. Det är därför fördelaktigt att välja pålar med litet tvärsnitt och/eller genom att minska mängden pålar genom att välja pålar med hög geoteknisk och strukturell bärförmåga. Öppna stålrörspålar är därmed mer fördelaktiga än andra påltyper, eftersom de har en liten tvärsnittsarea och samtidigt hög strukturell bärförmåga. Stålrörspålar som kohesionspålar, blir dock vanligen längre på grund av lägre vidhäftning mot lera jämfört med betong- och träpålar. Stålrörspålar i friktionsjord blir också normalt längre än betongpålar, både som friktionspåle och som spetsburen påle med stoppslagning i friktionsjorden. Således påverkar stålrörspålar

omgivningen på ett större avstånd än de mer vanligt förekommande betongpålarna och kombipålarna. Vid stoppslagning i friktionsjord eller ned till berg krävs också en pålsko, vilket innebär att stålörspålarna inte kan vara öppna och därmed tappar lite av sin fördel gentemot betongpålar, såvida inte en öppen pålsko används förstås. Stålörspålar med solid pålsko har dock betydligt högre strukturell bärförmåga jämfört med betongpålar med samma tvärsnittsarea, vilket möjliggör minskat antal pålar och minskad omgivningspåverkan.

För öppna stålörspålar som drivs ned i kohesionsjord, kan lerpluggning uppstå inne i stålören på grund av den störda lerans vidhäftning mot stålet. Dessa pålar blir därmed också mer eller mindre massundanträngande och orsakar markdeformationer i omgivningen. I stålörspålar uppstår lerpluggning teoretiskt vid det djup där lerans vidhäftning inne i stålörret blir större än den geotekniska spetsbärförmågan vid aktuellt neddrivningsdjup, se formel a i Tabell 10.4.4, kan djupet där en stålörspåle börjar plugga beräknas. Lerpluggningen minskar med ökande inre diameter av stålörspålarna. Om den inre diametern är tillräckligt stor uppstår ingen lerpluggning, medan stålörspålar med små inre diametrar kan få en lerplugg redan efter ett par meters drivning. Erfarenheter från pålningsarbeten i Göteborg visar att en öppen stålörspåle procentmässigt pluggar ungefär lika mycket under hela neddrivningen, dvs. djupet med luft inne i stålörspålen har ungefär samma procentuella storlek av neddriven pållängd under hela pålneddrivningen. Det betyder att lerans störnings- och vidhäftningsfaktor α_m , se formel a i Tabell 10.4.4, minskar med neddrivningsdjupet. Vidare har det visat sig att lerpluggningen blir mindre vid vibrodrivning, jämfört med hejarneddrivning (Hall & Li, 2024). Det vill säga, under pålningsarbete med vibrodrivning störs leran i stålörret mer och har därmed en lägre störnings- och vidhäftningsfaktor jämfört med hejardrivning i samma lera och med samma typ av stålörspåle. Hur stor lerpluggning det blir för en specifik lera och aktuell drivningsmetod, bestäms lämpligen med provpålning innan själva produktionspålningen påbörjas.

Lerproppdragning

Den vanligaste metoden för att minska markdeformationer från pålningsarbeten är att dra upp lerproppar i läget för planerade pålar. Detta kan utföras antingen genom att förborra med skruvborrar (även kallade augerskruvar) eller genom att dra upp lerproppar med stålörspålar. Den vanligaste metoden är förborring med augerskruv med en diameter på 300 mm, där kärnan har en diameter på 140 mm. Dessa kan för lös till mycket lös lera, erfarenhetsmässigt, tas ned till ett djup av maximalt cirka 12 m. För att kunna ta upp lera från större djup krävs lerproppdragning med en öppen stålörspåle med en lucka för att hålla kvar leran inne i rötet.

Om en lerpropp dras upp med en diameter som är större än påldiametern, finns risk att pålen kan få en för stor lutningsavvikelse under neddrivningen. Lerproppdragning bör i sådant fall inte dras närmare än 4 påldiameter från pålläget (Pålkommisionens rapport 100, 2004). Lerproppar behöver inte heller dras upp direkt vid eller intill pålläget, utan kan även utföras närmare objektet som ska skyddas. Det är viktigt att säkerställa att lerproppdragningen inte orsakar sättningar eller påverkar bärförmågan för närliggande objekt. Här bör säkerhetsavstånd vara samma som influensområdet för det närliggande objekts bärförmåga. För att undvika att skapa en brottanvisning för den massförskjutna jorden bör lerproppdragningen inte utföras i en linje intill varandra. Det finns dock arbetsmiljörisker med att inte dra lerproppar i pållägena, eftersom det kan leda till lokala instabila gropar där personal riskerar att trampa igenom.

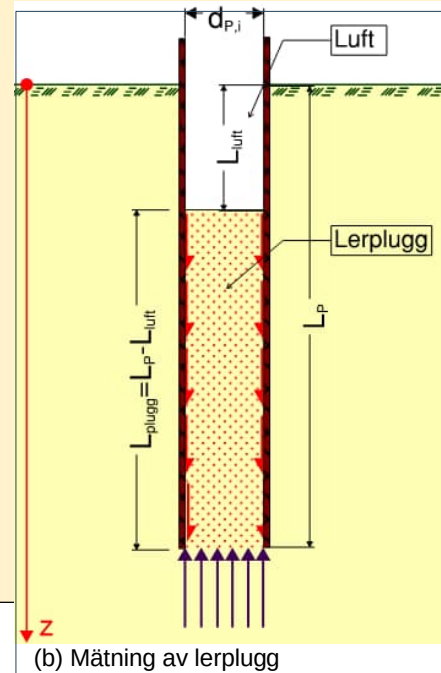
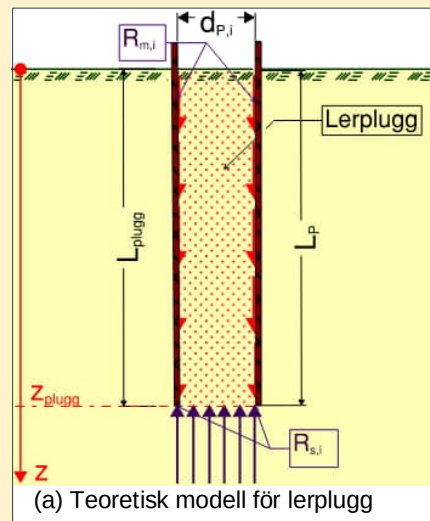
Andra åtgärder

Andra åtgärder för att minska markdeformationer, är att utföra pålningsarbetet från schaktbotten eller i närheten av schakt med en lägre nivå än omgivande mark. Då massundanträngningen tar den lättaste vägen, uppstår de något större markdeformationerna inom schakten. Det kan också bli aktuellt med färre, men grövre stålörspålar för att ytterligare minska omgivningspåverkan från pålningsarbetet. Vanligen bedrivs även pålningsarbetet med riktning bort från känsliga konstruktioner/anläggningar. Detta för att försöka driva massorna från dessa konstruktioner/anläggningar. Effekten av

denna åtgärd är dock tveksam. Byte till mindre massundanträngande påltyper och pålningsmetoder har nämnts som åtgärd tidigare (från slagning av betongpålar till vibrodrivning av öppna stålrörspålar). Det finns även ännu mindre massundanträngande pålningsmetoder och påltyper som t.ex. grävpålar och borrhning med stålrörspålar. Borrhning av stålrörspålar kan dock istället ge upphov andra geotekniska problem, såsom stora störningar av jorden genom merupptag av jordmassor eller grundvattenpåvekan. Grävpålar är vanligen mycket kostsamma och kräver betydligt större diametrar (>30cm) än de slankare prefabricerade påltyper som normalt används i Sverige.

Tabell 10.4.4 Teori för lerpluggning i stålrörspålar.

Lerpluggning i stålrörspålar



A. Teori (Jendeby, 2019)

$R_{m,i} \geq R_{s,i}$ Villkor för att lerplugg kan uppstå i stålrörspåle

$$R_{m,i} = \int_0^{z_{plugg}} \pi \cdot d_{p,i} \cdot \alpha_m \cdot c_{u,okorr}(z) dz = L_{plugg} \cdot \pi \cdot d_{p,i} \cdot \alpha_m \cdot c_{u,okorr,medel}$$

$$R_{s,i} = N_{cs} \cdot \frac{\pi \cdot d_{p,i}^2}{4} \cdot c_{u,okorr}(z_{plugg})$$

B. Förklaring

$R_{m,i}$ = Mantelbärförmåga för den störda leran inne i stålrörspålen [kN]

$R_{s,i}$ = Pålspetsbärförmåga för den ostörda leran vid pålspets [kN]

α_m = störnings- och vidhäftningsfaktorn [-] för lera mot stål inne i stålrörspålen

$c_{u,okorr}(z)$ = lerans okorr. odränerad skjuvhållfasthet [kPa] vid djup z

$c_{u,okorr}(z_{plugg})$ = lerans okorr. odränerad skjuvhållfasthet [kPa] vid pålspets

$c_{u,okorr,medel}$ = lerans okorr. odränerad medelskjuvhållfasthet [kPa] ned till djup för lerplugg, z_{plugg} .

$N_{cs}=9$ - bärfaktorn för leran [-] vid stålröröppningen

$d_{p,i}$ = stålrörspålens inre diameter [m]

L_p = pålens installerade längd i leran [m]

L_{plugg} = lerplugg i stålrörspåle [m]

L_{luft} = (uppmätt) luft i stålrörspåle [m]

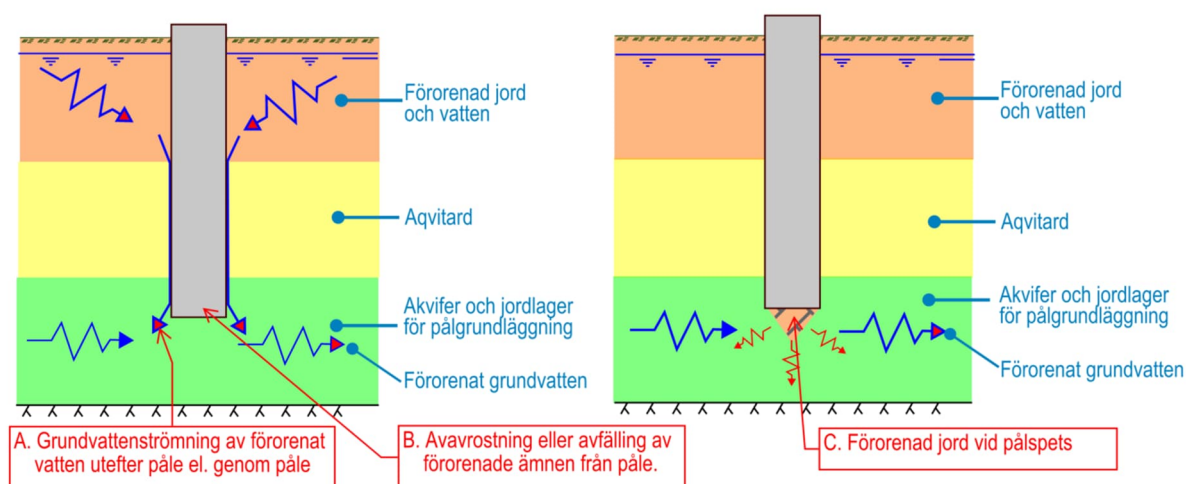
10.5 GRUNDVATTENFÖRORENING

10.5.1 Allmänt

Vid pålning i områden med förorenad mark kan det uppstå problem med både arbetsmiljörisker under pålningsarbetet och påverkan på pålarnas beständighet. Dessutom finns det risk för spridning av föroreningar till omgivande områden och i sådana fall främst kontaminering av grundvattnet. Detta avsnitt behandlar risken för förorening av grundvattnet till följd av pålningsarbeten. Arbetsmiljöriskerna behandlas i kapitel 8, medan pålarnas beständighet behandlas i kapitel 3. En stor del av texten i detta avsnitt utgörs av en sammanfattning av SBUF-rapporten "Installation av pålar och spont i förorenad mark" (Samuelsson & Norin, 2019).

10.5.2 Föroreningsspridning

Spridning av föroreningar till omgivningen på grund av pålningsarbeten uppstår nästan uteslutande genom att grundvattnet blir förorenat. Problemställningen uppstår oftast när det finns förorenad mark ovanför ett tätt jordlager (akvitard). Det täta jordlagret har hindrat föroreningarna från att sprida sig ned till grundvattenmagasinet med friktionsjord (akviferen) under det täta jordlagret. Eftersom den förorenade marken och akvitarden vanligtvis inte har tillräcklig bärförmåga för vare sig platt- eller pålgrundläggning, krävs pålning ned till akviferen med jordmaterial som är både styvare och har högre bärförmåga. Spridning av föroreningar ned till den undre akviferen kan uppstå genom någon av de tre mekanismer som visas i Figur 10.5.1, och beror på pålningsmetod, påltyp och föroreningarnas egenskaper.



Figur 10.5.1 Möjliga spridningsscenarioer av föroreningar till grundvattnet i samband med installation av pålar.

Spridningsegenskaper

Föroreningarnas egenskaper har betydelse för hur föroreningar kan spridas till omgivning. Generellt klassificeras en förorening utifrån om de är vattenlösliga, förekommer som vätska i fri fas, binder sig till jordmaterial eller utgörs av lättflyktiga ämnen.

Med **vattenlösliga föroreningar** avses ämnen med hög vattenlöslighet, vilket innebär att de lätt sprids med grundvattnet och kan förorena områden långt från utsläppskällan. Även om dessa ämnen ofta späds ut under transporten i vattnet, kan de ackumuleras i näringskedjan när de tas upp av växter, djur och människor. Exempel på vattenlösliga föroreningar är PFAS (per- och polyfluoralkylämnena), MTBE (metyl-tertiär-butyleter), salter, vissa pesticider och starkt vattenlösliga kemikalier som svavelsyra.

Föroreningar med lägre vattenlöslighet förekommer huvudsakligen som vätska i fri form benämns antingen som LNAPL (eng. *light non-aqueous phase liquid*) eller DNAPL (eng. *dense non-aqueous phase liquid*), beroende på om de är lättare respektive tyngre än vatten. **LNAPL** har lägre densitet än vatten och flyter således ovanpå grundvattenytan. Till denna kategori hör petroleumprodukter som bensin och diesel. **DNAPL** har högre densitet än vatten och sjunker ner genom jorden tills de når ett tätt skikt i form av jordlager med låg permeabilitet (akvitard) eller ett sprickfattigt berg. Till DNAPL räknas ämnen såsom kreosot, koltjära, PCB-oljor och klorerade lösningsmedel. I vissa fall har även kvicksilver och vissa typer av råolja klassificerats som DNAPL.

Kontaminationer som kan binda till jordpartiklar klassificeras som **partikelbundna föroreningar**, vilket minskar deras mobilitet och spridning i mark och vatten. Metaller och tunga organiska föreningar, som dioxiner, är exempel på sådana föroreningar. **Flyktiga föroreningar** sprids däremot främst från mark till luft, där de kan innebära en hälsorisk genom inandning och påverka arbetsmiljön negativt. Vissa flyktiga föroreningar, som även har en viss vattenlöslighet, kan dock spridas mellan luft, mark och grundvatten och därigenom utgöra en miljö- och hälsorisk i flera sammanhang.

Spridning utmed och i påle (A)

Vid pålning genom en akvitard ned till en undre akvifer, med massundanträngande eller borrarade pålar, störs jorden och läckvägar kan uppstå längs pålen (se spridningsscenario A i Figur 10.5.1). Borrning med tryckluft och vattentryck har särskilt stor risk att störa jorden och skapa läckvägar i akvitarden, där borrning med tryckluft stör jorden mer. Med tiden "läker" den täta jorden ihop, men om det finns artesiskt grundvattentryck i den undre akviferen kan grundvattenströmningen längs pålen bli stor (se Figur 10.3.4), och akvitarden läker då inte ihop utan åtgärd. Risker för spridning av föroreningar längs pålen gäller främst vattenlösliga föroreningar och DNAPL. Vid en vattenströmning ned i jorden, kan även fasta partiklar med föroreningar dras med ned till den undre akviferen. Enligt japansk forskning (Katsumi, et al., 2009) bedöms risken för spridning av föroreningar vid pålning genom en akvitard vara liten, förutsatt att akvitarden utgörs av ett minst 5 m mäktigt lerlager med hydraulisk konduktivitet lägre än 10^{-7} m/s. Dock var inte artesiskt grundvattentryck i den undre akviferen beaktad i denna forskning.

Spridning av föroreningar kan även uppstå inne i pålen för grävpålar och slitsmurar som har haft problem med betongblödning (se avsnitt 10.3.4).

Spridning av pålmaterial (B)

När grävpålar, slitsmurar och injekteringspålar (inkl. stag) tillverkas på plats, kan material som betong, cementpasta och bruk spridas i akviferer. Det gäller särskilt om det finns ett starkt grundvattenflöde. Detta kan uppstå genom läckage eller oavsiktlig spridning under tillverkningsprocessen. T.ex. kan en felaktig dosering av tillsatser för att minska betongens härdning, leda till ökad spridning av material i grundvattnet. En annan risk är att själva borrarutrustningen riskerar orsaka utsläpp av borrarvätskan som kan förorena grundvattnet.

Vid korrosion av stålörspålar kan korrosionsprodukterna, som ofta innehåller tungmetaller och andra skadliga ämnen, lösas upp och spridas i grundvattnet (Ohsaki, 1982). Korrosionen uppstår främst i den övre akviferen där tillgången till syre i grundvattnet är större.

Spridning med påle (C)

Vid hejar- och vibrodrivning av pålar kan förorenat material teoretiskt förflyttas från ett jordlager till ett annat via pålspetsen (se spridningsscenario C i Figur 10.5.1). Spridning av förorenat jord genom vidhäftning på pålens sidor anses vara mindre (Samuelsson & Norin, 2019). Under nedrivning bildas en brottyta i form av en kon av jord under pålspetsen. Jord med föroreningar kan på detta sätt spridas

ned till en underliggande akvifer. Det gäller främst partikelbundna föroreningar, men även DNAPL har genom laboratorieförsök visat sig sprida sig på detta sätt (Hayman, et al., 1993). Störst risk för spridning av föroreningar är öppna stålrörspålar, där förorenat jordmaterial förs ned till den underliggande akviferen med lerpluggen som uppstår inne i röret. Risken för spridning av föroreningar på detta sätt kan minskas m.h.a av en spetsig pålsko (Satyamurthy, et al., 2008). För borrade pålar bedöms risken för spridning av föroreningar på detta sätt vara mindre, då pålspetsen roterar och stör jorden vid installationen (Satyamurthy, et al., 2008).

10.5.3 Krav och riskbedömning

Miljöbalken

I miljöbalken (SFS 1998:808) regleras verksamheters miljöpåverkan i andra kapitlet om allmänna hänsynsregler, samt med specifika bestämmelser för skyddsvärda områden, miljöfarlig verksamhet, miljöskador och krav på egenkontroll under aktuella verksamheter.

Om **allmänna hänsynsregler** anges det att en verksamhetsutövare måste vidta nödvändiga åtgärder för att förhindra skada eller olägenhet för människors hälsa och miljön. Det åligger dem att visa att verksamheten kan bedrivas på ett miljömässigt godtagbart sätt och att bästa möjliga teknik används för att minimera påverkan. Det krävs också en rimlighetsavvägning mellan miljöhänsyn, skyddsåtgärder och kostnader.

Skyddsvärda områden, såsom vattenskyddsområden och naturreservat, omfattas av särskilda regler för att skydda vattenförsörjning och biologisk mångfald. Lokala vattenskyddsföreskrifter och Naturvårdsverkets råd reglerar dessa områden.

Den som bedriver eller har bedrivit verksamhet som orsakat en miljöskada är **ansvarig** för att åtgärda skadan. Åtgärder för att avhjälpa skador måste anmälas till tillsynsmyndigheten, och vid betydande risk för skada kan tillstånd krävas. Enligt miljöbalken är det i första hand den som har orsakat föroreningen som är ansvarig för efterbehandling. Detta kan innebära att ansvaret kan delas mellan flera parter, såsom verksamhetsutövare och fastighetsägare. Om ingen ansvarig finns kan fastighetsägaren eller den som utför åtgärder i det förorenade området bli ansvarig (Naturvårdsverket, 2024). I fallet med pålningsarbetet i ett förorenat område kan det vara så att byggherren, utförandeentreprenören eller totalentreprenören kan hållas ansvariga beroende på omständigheterna kring föroreningen och vem eller vad som har orsakat den (Samuelsson & Norin, 2019).

Egenkontroll är också ett krav enligt miljöbalken. Verksamhetsutövare måste löpande planera och övervaka sin verksamhet för att förebygga negativa effekter på människors hälsa och miljön. De måste även rapportera till tillsynsmyndigheten och föreslå förbättringsåtgärder vid behov.

Riktvärden

Naturvårdsverket har publicerat en skrift för bedömning av förorenad mark med hjälp av riktvärden för halter av olika föroreningar, se Rapport 5976 med revideringar (Naturvårdsverket, 2009, rev 2024). Beräkning av riktvärden tar hänsyn till olika skyddsobjekt såsom människor som vistas i området, markmiljön, grundvatten och ytvatten. Riktvärdena beaktar också den förväntade markanvändningen i området, vilket styr vilka aktiviteter som förekommer och vilka grupper som kan exponeras för föroreningarna. Två typer av generell markanvändning definieras: känslig markanvändning (som bostadsområden) och mindre känslig markanvändning (som kontors- och industriområden). För känslig markanvändning förutsätts att människor kan vistas permanent i området under en livstid och att både mark- och vattenmiljön skyddas. För mindre känslig markanvändning antas att människor vistas i området tillfälligt, vanligtvis under sin yrkesverksamma tid.

Naturvårdsverkets riktvärden för förorenad mark är avsedda att ge skydd mot hälso- och miljöeffekter i de flesta förorenade områden i Sverige. I fall där riktvärden inte är tillämpliga, kan platsspecifika

riktvärden tas fram för att beakta lokala förhållanden och avvikelser från modellens antaganden. Dessa skräddarsydda riktvärden är anpassade till de specifika förhållandena i det aktuella området och underlättar bedömningen av föroreningsnivåer och dess risker. Riktvärden för förorenad mark är inga gränsvärden, dvs. de är inte juridiskt bindande. Se aktuell skrift för vidare detaljer.

Provtagning och analys

Provtagning och analys av vattenkvalitet och för föroreningar i jord, ska utföras i enlighet med gällande praxis och standarder för att säkerställa tillförlitliga och jämförbara resultat. För provtagning och hantering av prover ges riktlinjer i SGF fälthandbok för undersökningar i förorenade områden (SGF-rapport 2:2013). Analys av föroreningar i grundvatten och jord ska utföras av laboratorium som är ackrediterat för aktuella analysmetoder.

Riskbedömning

När föroreningar identifierats i ett område krävs tillstånd för arbetet i området. För att få utföra arbeten i förorenad mark och grundvatten krävs att en anmälan enligt 28 § i förordningen (SFS 1998:899) om miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd upprättas om man avser vidta avhjälpande åtgärder som kan medföra ökad risk för spridning och exponering av föroreningarna, och risken inte bedöms som ringa.

Det första steget är att kontakta tillsynsmyndigheten för att gemensamt fastställa omfattningen av redovisningen och tidsplanen för arbetet. Därefter utförs en utredning för att bedöma risken för spridning av föroreningar. Riktlinjerna för denna utredning redovisas i Naturvårdsverkets rapport 5977 (Naturvårdsverket, 2009).

I en riskbedömning ingår följande moment (Tiberg, et al., 2019):

- föroreningssituation (halter i både mark och grundvatten, samt spridningsegenskaper)
- geologiska förhållande (jorddjup, jordlager och skikt, jordtyper, etc)
- geohydrologiska förhållanden (grundvattenyta, grundvattentryck, permeabilitet, strömningsgradient, etc.)
- pålning (påltyp, antal, grundläggningsdjup, installationsmetod, etc.)
- identifiering av möjliga transportvägar av föroreningar
- identifiering av skyddsobjekt.

Utredningen av riskbedömningen ska dokumenteras i en rapport. I rapporten ska de överväganden som leder fram till valet av en specifik pålnings- eller grundläggningsmetod ingå, samt de eventuella åtgärder som ska vidtas för att minimera en risk och vilken övervakning som ska användas för att kontrollera att det inte uppstår en spridning av föroreningar.

10.5.4 Åtgärder

Det finns olika åtgärder som kan vidtas beroende på typen av föroreningar, deras spridningsegenskaper samt de geologiska och geohydrologiska förhållandena.

När det gäller risken för **spridning av föroreningar via grundvattenströmning** är åtgärderna samma som beskrivs i avsnitt 10.3.4 om ofrivillig dränering av den undre akviferen. För kohesionspål är den främsta åtgärden att använda korta pålar som inte når ner till den undre akviferen. Vid grundläggning med spetsburna pålar som går ned i den undre akviferen, ska i första hand en pålmetod som medför minimal störning av leran väljas. Under pålningsarbetet bör grundvattentrycket i den

undre akviferen tillfälligt sänkas så att det hydrostatiska grundvattentrycket kan hållas till aktuell marknivå vid pålarna. Detta bör ske tills den störda leran har hunnit "läka ihop" och återfå sin stabilitet. Om det inte är möjligt att sänka grundvattentrycket under pålningsarbetet kan foderrör användas. Dessa foderrör placeras runt pålarna från det täta lerlagret upp till en nivå som motsvarar den högsta grundvattentrycksnivån i den undre akviferen. Efter att leran "läkt ihop" kan foderrören avlägsnas.

För att minimera risken att **förorenat material förs ner med pålspetsen** kan en spetsig pålsko användas. Konstruktionen bidrar till att förhindra att förorenat jordmaterial fastnar på pålen och följer med till djupare jordlager. I vissa fall kan det vara nödvändigt att genomföra en mer omfattande sanering av förorenad jord och grundvatten inom pålningsområdet innan pålningsarbetet påbörjas.

För att minimera **spridning av pålmaterial** är det viktigt att välja förtillverkade påltyper, snarare än pålar som tillverkats på plats, eftersom dessa kan innebära en ökad risk för spridning av material. För förtillverkade pålar bör särskild vikt läggas vid att skydda stålmaterial och armering mot avrostning. T.ex. kan stålpålar galvaniseras eller beläggas med rostskyddande material för att förhindra korrosion.

10.6 BULLER

10.6.1 Allmänt

Buller från pålningsarbete kan vara problematiskt för människor som bor eller arbetar nära byggarbetsplatser. Hur störande bullret upplevs beror ofta på dess intensitet och frekvens. Buller definieras som störande eller skadligt ljud som kan spridas genom luft eller vatten. Det inkluderar även ljud som uppstår från vibrationer i byggnadskonstruktioner, så kallat stomljud. Detta avsnitt ger en kort översikt av problematiken, en sammanfattning av regleringen av bullerstörningar och exempel på åtgärder för att minska ljudnivåer från pålningsarbeten.

10.6.2 Olika typer av buller

Luftburet buller

Buller från pålning är framför allt ett problem vid hejardrivning och särskilt vid pålning med stålörspålar. Denna typ av pålning orsakar ofta höga ljudnivåer som kan påverka både den omgivande miljön och de människor som bor eller arbetar i närheten. I jämförelse ger hejardrivning med betongpålar och framför allt träpålar något lägre ljudnivåer och därför något mer skonsam för omgivningen.

När hejaren träffar pålhuvudet sprids bullret från källan genom luften som ljudvågor. Ljudvågorna har en utbredningsfart på cirka 343 m/s i luft vid 20°C. Vid högre temperaturer och luftfuktighet blir ljudets utbredningsfart högre och bullret sprids då till större avstånd. Även vindförhållanden och temperaturgradienter kan påverka ljudets spridning och leda till att ljudet når längre avstånd. Bullspridningen påverkas även av reflektioner mot husväggar och andra hinder i omgivningen, vilket kan förstärka eller dämpa ljudet beroende på dessa förhållanden. När ljudet reflekteras mot hårda ytor kan det orsaka en förhöjd upplevelse av ljudet i vissa riktningar. Mjukare ytor, å andra sidan, kan dämpa ljudet genom att absorbera en del av energin, vilket minskar ljudnivån.

Ljudnivån påverkas också av markens komposition och topografi. Ljud sprids olika beroende på om marken är mjuk eller fast; fasta markförhållanden tenderar att leda till mindre dämpning av ljudet. Topografiska element som kullar, dalar eller andra hinder kan påverka ljudets fortplantning genom att reflektera, bryta eller böja ljudvågorna, vilket kan resultera i ökad eller minskad ljudnivå beroende på dessa faktorer.

Buller dämpas också med avstånd, dels genom geometrisk dämpning, där ljudvågorna sprids över en större volym, och dels genom materialdämpning, där ljudets energi gradvis absorberas i det medium som ljudvågorna rör sig genom. Högfrekventa ljudvågor påverkas i större grad av materialdämpning och dämpas därför snabbare än lågfrekventa ljudvågor. Därför kan lågfrekventa ljud ofta höras på längre avstånd.

Stomljud

Stomljud uppstår när markvibrationer från pålning fortplantas in och i byggnader. Dessa vibrationer kan orsaka ljud som ofta uppfattas som dova eller mullrande. Påverkan av stomljudet beror på typ av pålning, markens egenskaper, byggnadens grundläggning och konstruktioner. Stomljud orsakas främst av högfrekventa vibrationer, vilket gör att byggnader som är grundlagda i fast mark eller berg är mer benägna att få problem med stomljud.

Inom byggnaden kan vibrationerna få bjälklag och väggar att hamna i resonans, vilket skapar ett mullrande, lågfrekvent stomljud. Gränsen för när stomljud och luftburet buller uppfattas av det mänskliga örat är generellt densamma, men stomljud upplevs normalt som mer störande. Detta beror på att stomljud är lågfrekventa och svårare att dämpa med hörselskydd och öronproppar.

Det är alltså främst vid kontinuerliga vibrationer i fast mark och berg som problem med stomljud kan uppstå. Således är det främst vid borring av pålar ned i fasta jordlager och berg som förutsättningarna för problem med stomljud är störst.

Undervattensbuller

Undervattensbuller som orsakas av pålningsarbeten i marina miljöer har blivit ett alltmer uppmärksammat problem under senare år. Detta gäller särskilt vid pålningsarbeten för offshoreplattformar, vindkraftsparker till havs och andra marina konstruktioner. Pålning under vattenytan kan generera kraftiga ljudvågor med låga frekvenser, vilket innebär att de kan färdas över stora avstånd från byggarbetsplatsen. Problemet är främst att undervattenbullret kan påverka det marina djurlivet, framför allt de arter som är beroende av ljud för kommunikation, navigation och födosök. Detta gäller särskilt marina däggdjur som valar, delfiner och sälar, som kan skadas. Dessa arter använder ekolokalisering och hörsel för att navigera och kommunicera. För dem kan höga ljudnivåer orsaka hörselskador, desorientering och till och med strandningar av valar. Även fiskar påverkas, men det gäller främst att årstidsbundna vandringar och fortplantning kan påverkas om pålningsarbetet utförs på en sådan plats och tid på året.

10.6.3 Mätning av buller

Mätning av buller är en central del i bedömningen av ljudmiljön i olika sammanhang, och även vid byggprojekt. Bullermätningar genomförs med hjälp av ljudnivåmätare som registrerar ljudnivå (L) över tid och redovisas i decibel (dB), en logaritmisk enhet som beskriver ljudets relativa styrka. För att anpassa mätningarna till människans hörseluppfattning används ofta ett så kallat A-filter. Detta filter är utformat för hur det mänskliga örat uppfattar ljud i olika frekvenser och dämpar ljud i de lägre och högre frekvensområdena där människans hörsel är mindre känslig. Det är den A-filtrerade ljudnivån (L_A , med enhet dBA) som vanligen används vid utredningar av bullerstörningar för människor.

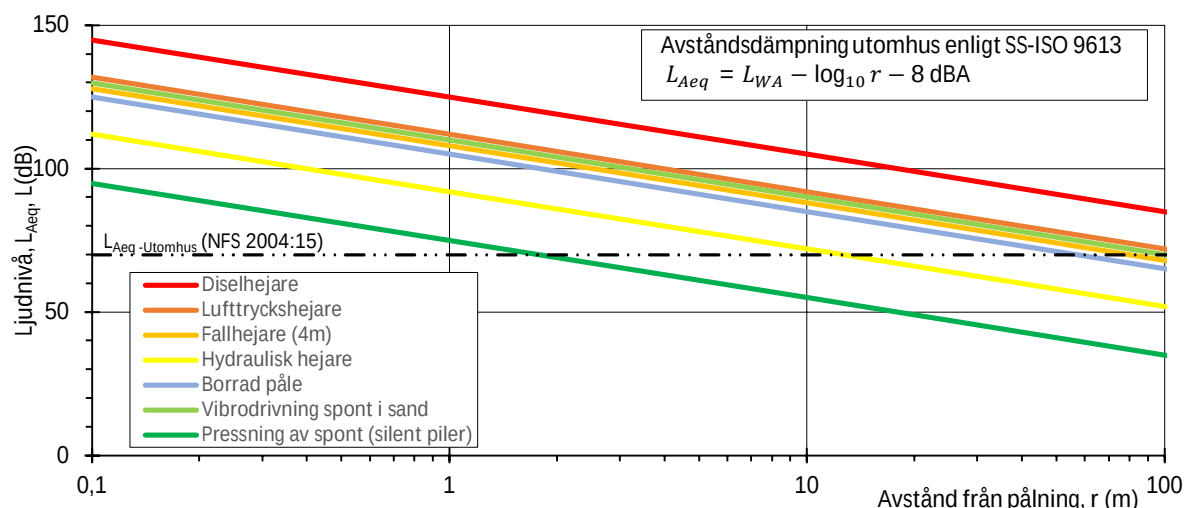
För att analysera och bedöma ljudnivåer i relation till gällande regelverk och standarder beräknas buller till parametrar som **ekvivalent ljudnivå** (L_{Aeq}). Den ekvivalenta ljudnivån representerar den genomsnittliga ljudenergin under en given tidsperiod och används ofta för att beskriva kontinuerligt eller varierande buller. Detta värde är särskilt viktigt vid långsiktiga bedömningar av ljudexponeringens påverkan på hälsa och miljö. En annan vanlig parameter är **tidsvägt maximal ljudnivå** (L_{AFmax}), som anger den högsta registrerade ljudnivån under en mätperiod. Mätperioden är enligt standard vanligen 125 ms lång. Tidsvägt maximal ljudnivå används främst för att utvärdera kortvariga ljud, vilka kan vara särskilt störande eller skadliga.

Riktlinjer för mätning av buller, specifikt för mätinstrument, användning av A-filter samt bestämning av ekvivalent ljudnivå (L_{Aeq}) och tidsvägt maximal ljudnivå (L_{AFmax}) ges i den svenska standarden SS-EN ISO 9612:2009. De internationella standarderna ISO 1996-1:2016 och ISO 1996-2:2017 används också som vägledning för mätningar, och för definiering av olika parametrar för att beskriva ljudmiljö.

10.6.4 Prognostiseringen

För att göra noggranna prognoser av bullerexponering och underlätta planeringen av åtgärder för att minimera störningar vid pålningsarbeten används olika prognostiseringsmodeller. En av de mest använda modellerna i Sverige för beräkning av buller är den som beskrivs i standard SS-ISO 9613. Denna modell kan användas för att beräkna ljudnivåer i olika miljöer och tar hänsyn till flera faktorer som påverkar ljudets spridning. Bland dessa faktorer finns ljudkällans egenskaper, avståndet till mottagaren, markförhållanden och hinder i ljudets väg. Se Figur 10.6.1 för exempel på avståndsdämpning av buller enligt norm SS-ISO 9613 och med typiska ljudnivåer från olika pålnings- och spontmetoder.

Modellen beaktar även atmosfäriska förhållanden som temperatur, luftfuktighet och vindförhållanden, vilka alla har en betydande inverkan på ljudets spridning och dämpning i atmosfären. Genom prognostisering av buller kan potentiella problemområden identifieras och även åtgärder för att reducera bullernivåerna kontrolleras. Dessa åtgärder kan inkludera placering av ljuddämpande skärmar, justering av pålningsmetoder, eller val av lämpliga påltyper för att minimera vibrationer och ljud. För att ytterligare finjustera prognoserna och säkerställa att bulleråtgärder är optimalt dimensionerade, kan modellens resultat kombineras med fältmätningar för att specificera olika lokala förhållanden.



Figur 10.6.1 Typiska ljudnivåer och avståndsdämpning av buller för olika pålnings- och spontningsmetoder enligt standarderna SS-ISO 9613 och BS 5228.

För prognostisering av stomljud, behöver vibrationerna från pålningsarbetet först beräknas i olika konstruktionsdelar i byggnaden (se avsnitt 10.2.6). Stomljudet från en konstruktionsdel beräknas sedan utifrån vibrationshastigheten i en specifik punkt (mm/s) med hjälp av en empirisk formel. Denna formel tar hänsyn till både rummets akustik och byggnadens strukturella egenskaper, såsom materialets styvhet och dämpning. För ytterligare detaljer om metoder för beräkning av stomljud, se (ANC, 2020) och (Colaço, et al., 2017). Gällande prognostisering av undervattensbuller från pålningsarbeten, se artikel av (Fricke & Rolfes, 2015).

10.6.5 Krav och riskbedömning

Gällande buller i omgivning pga. pålningsarbetet, ger Naturvårdsverkets allmänna råd (NFS 2004:15) vägledning om hur miljöbalken ska tillämpas. Inför pålningsarbeten bör, enligt Naturvårdsverket, verksamhetsutövaren för en byggplats genom bullerberäkningar eller bullermätningar ta fram störningspåverkan för omgivningen. Beräkning eller mätning ska sedan jämföras med Naturvårdsverkets riktvärde för bullerstörning. Risk för överskridande av angivna riktvärden för buller, bör anses som ett skäl att anta att en verksamhet kan medföra skada eller olägenhet. Enligt Miljöbalken kapitel 2, allmänna hänsynsregler, ska alla som bedriver en verksamhet ta ansvar för att förebygga, hindra eller motverka att verksamheten medför olägenheter för människors hälsa eller miljön. Det betyder att entreprenör ska följa Miljöbalkens regler och om det inte sker, ska tillståndsmyndigheten ingripa.

Naturvårdsverkets riktvärden ska dock ses som en utgångspunkt och vägledning, men bedömning av sakkunnig ska göras i varje enskilt fall. Aktuella riktvärden, enligt Naturvårdsverket, redovisas i Tabell 10.6.1 för att ge en uppfattning när större bullersstörande arbeten kan utföras. För stomljud gäller samma regler som för övrigt buller orsakat av pålningsarbeten.

Om riktvärdena för buller utomhus inte kan innehållas med tekniskt möjliga och/eller ekonomiska rimliga bullerdämpande åtgärder, bör målsättningen vara att åtminstone riktvärdena för buller inomhus

kan innehållas. Bindande bestämmelser för byggverksamheter kan också finnas i lokala föreskrifter i kommunen med längre gående krav på bullernivåer eller tid då arbetet får bedrivas.

För buller som påverkar arbetande inom arbetsplatsen gäller Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd (AFS 2023:10). Se vidare i Kapitel 8 för ytterligare information om arbetsmiljö under pålningsarbeten.

Tabell 10.6.1 Naturvårdsverkets riktvärden för bedömning av bullerstörande verksamheter från byggarbetsplatser (NFS 2004:15)

Område	Del	Helgfri måndag-fredag		Helgdagar		Samtliga dagar	
		Dag kl 07-19	Kväll kl 19-22	Dag kl 07-19	Kväll kl 19-22	Natt kl 22-07	Dygn kl 00-24
		$L_{Aeq}^{1,2,3}$	$L_{Aeq}^{1,2}$	$L_{Aeq}^{1,2,3}$	$L_{Aeq}^{1,2}$	$L_{Aeq}^{1,2}$	L_{AFmax}
Bostad & Fritidshus	Utomhus ^a	60 dBA	50 dBA	50 dBA	45 dBA	45 dBA	70 dBA
	Inomhus ^b	45 dBA	35 dBA	35 dBA	30 dBA	30 dBA	45 dBA
Vårdlokal	Utomhus ^a	60 dBA	50 dBA	50 dBA	45 dBA	45 dBA	-
	Inomhus	45 dBA	35 dBA	35 dBA	30 dBA	30 dBA	45 dBA
Undervisningslokal	Utomhus ^a	60 dBA	-	-	-	-	-
	Inomhus	40 dBA	-	-	-	-	-
Arbetslokal ^c	Utomhus ^a	70 dBA	-	-	-	-	-
	Inomhus	45 dBA	-	-	-	-	-

Noteringar:

1. Beräknas för den tid under vilken verksamheten pågår.

2. Vid begränsad varaktighet, högst två månader, tillåts 5 dBA högre värden.

3. Vid enstaka kortvariga händelser, högst 5 minuter per timme, tillåts 10 dBA högre värden

a. Avser invid fasad. b. Avser bostadsrum c. Avser lokaler för verksamheter med krav på stadigvarande koncentration.

Angående bullerstörning av djur (både luft- och undervattenbuller) finns det inga specifika regler om hur hög ljudnivån får vara. För tamdjur och boskapsdjur gäller djurskyddslagen, enligt vilken det är förbjudet att utsätta djur för lidande, vilket även kan omfatta stress orsakad av för hög ljudnivå. För vilda djur gäller Miljöbalken, som syftar till att bevara biologisk mångfald. Om buller från ett pålningsarbete riskerar att skada vilda djur eller deras livsmiljöer, kan det krävas att det utförs en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) och att åtgärder kan behövas för att minimera störningar. Vanligen gäller det fridlysta djurarter, som kan vara föremål för bullerrestriktioner för att säkerställa att deras habitat inte störs under känsliga perioder.

10.6.6 Åtgärder

För att minska bullerstörningar kan olika åtgärder vidtas, både vid källan, spridningsytan och vid mottagaren. Nedan följer en översikt över möjliga åtgärder för att minska buller från pålningsarbeten.

Källan

Vid hejardrivning av pålar kan bullret minskas genom att reducera fallhöjden eller hejarvikten. Att byta pålningsmetod, exempelvis till vibrodrivning, är också en bullerminskande åtgärd. Vid spetsburna pålar krävs dock fortfarande hejardrivning vid stoppslagning och vid dynamisk provbelastning för att utvärdera pålarnas geotekniska bärformåga. Ett alternativ är borring av pålar, vilket genererar betydligt mindre buller. Vid installation av spont kan pressning, med exempelvis en s.k. "silent piler", användas istället för vibrodrivning. Val av påltyp spelar också en viktig roll för att begränsa bullernivåerna. Hejardrivning av stålrörspålar kan orsaka mycket höga ljudnivåer, medan betongpålar och träpålar genererar betydligt lägre ljudnivåer. Bullret kan även reduceras genom att använda ljuddämpande madrasser, eller andra avskärmningar kring hejaren, under neddrivningen av pålarna.

Bullerdämpande skärmar

Ljuddämpande skärmar eller barriärer kan placeras kring byggarbetsplatsen eller nära byggnader som utsätts för buller. Dessa strukturer dämpar eller reflekterar ljudvågor och kan minska ljudnivån för bullerutsatta byggnader. För att vara effektiva, måste skärmarna vara tillräckligt höga och tillverkade av ljudabsorberande material. Ofta används också containrar runt pålningsområdet (se Figur 10.6.2), främst för att skydda tredje part om en pålkran skulle välta, men även för att minska ljudnivån (bullret) för omgivningen.

För att minska undervattensbuller, är bubbelgardiner en vanligt förekommande åtgärd. Åtgärden innebär att man släpper ut en ström av luftbubblor runt pålningsområdet.

Fasadisolering

Lokala åtgärder på byggnader kan minska inträngande buller, särskilt vid fönster och ventilationsdon, som ofta har lägre bullerdämpande egenskaper än byggnadernas fasader. Fasadisolering kan i sådana fall monteras utanpå de befintliga fönstren. Ett alternativ är att ersätta de befintliga fönstren med så kallade akustiska fönster, som är särskilt utformade för att förbättra ljudisoleringen. Motsvarande åtgärder kan vidtas för ventilationsdon, dvs. byta till modeller med högre ljuddämpande kapacitet.

Informationsspridning och andra åtgärder

En viktig del av bullerhanteringen är att informera omgivningen om de förväntade bullernivåerna och arbetsschemat. Genom tydlig kommunikation om arbetets omfattning och varaktighet kan boende bättre förbereda sig och därigenom minska missnöje.

Kompletterande åtgärder kan innefatta att erbjuda bullerdämpande hörlurar till närboende eller i extrema fall tillfälliga lösningar som hotellövernattningar eller alternativa arbetsplatser. I de mest bullerutsatta områdena kan sådana åtgärder vara avgörande för att minska störningarna under projektets gång.



Figur 10.6.2 Bild från ett pålningsarbete med varningsskylt om höga ljudnivåer kan förekomma. Bakgrunden syns även containrar som används för att både minska bullernivån för omgivningen och för att skydda tredje man för om en pålkran skulle välta.

10.7 REFERENSER

- Aas, G. 1975. *Skred som følge av peleramming i blöt leire*. Köpenhamn. Nordic Geotechnical Meeting 1975.
- Al-Hussaini, T. M. & Ahmad, S. 1991. Design of wave barriers for reduction of horizontal ground vibration. *Journal of geotechnical engineering*. Volum 117(4). pp. 616-636.
- ANC. 2020. *Measurement and Assessment of Groundborne Noise and Vibration*. 3 red. Association of Noise Consultants.
- Andersen, K. H. & Schjetne, K. 2013. Database of friction angles of sand and consolidation characteristics of sand, silt, and clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 139(7). pp. 1140-1155.
- Ansal, A. M. & Erken, 1989. Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses. *Journal of Geotechnical Engineering*. 115(7). pp. 968-983.
- Arbetsmiljöverket. 2025-01-01. *AFS 2023:10 Föreskrifter och allmänna råd (AFS 2023:10) om risker i arbetsmiljön*.
- Attewell, P. B. 1995. *Tunnelling contracts and site investigation*. CRC Press.
- Attewell, P. B. & Farmer, I. W. 1973. Modern piling: Part two-attenuation of ground vibrations from pile driving. *Ground engineering*.
- Bačić, M. Librić, L. K. D. J. & Kovačević, M. S. 2020. The usefulness of seismic surveys for geotechnical engineering in karst: some practical examples. *Geosciences*. . Volum 10(10). 406.
- Bapir, B. Abrahamczyk, L. Wichtmann, T. & Prada-Sarmiento, L. F. 2023. Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*. Volum 9. p. 1120351.
- Boverket. 2022. *BFS 2022:4 EKS 12 - Boverkets föreskrifter om ändring i Boverkets föreskrifter och allmänna råd (2011:10) om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder)*.
- Broms, 1976. *Jordmekanik*. KTH.
- BSI. 2014. *BSI BS. 5228-2:2009+A1:2014 - Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites - Part 2: Vibrations*.
- CEN. 2022. *EN 1990 Eurocode - Basis of structural and geotechnical design*.
- CEN. 2024. *1997-1 Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 1: General rules*.
- Colaço, A. A. C. P. Amado-Mendes, P. & Godinho, L. 2017. Prediction of vibrations and reradiated noise due to railway traffic: a comprehensive hybrid model based on a finite element method and method of fundamental solutions approach. *Journal of Vibration and Acoustics*. . Volum 139(6). p. 061009.
- D'Appolonia, D. J. & Lambe, T. W. 1971. Performance of four foundations on end bearing piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. Volum 97(1). pp. 77-93.
- de Bruin, W. 2016. *Engineering and execution of tight sheet walls*. Reykjavik. Nordic Geotechnical Meeting 2016.
- Deckner, F.-. 2020. *Minimering av markvibrationer vid vibrodrivning av spont - praktiska råd*. ID 13564/A2018-25. SBUF.
- Deivasigamani, A. de Lacy, A. & Toward, M. 2017. An overview of structure-radiated noise and vibration assessment for elevated rail infrastructure. *Proceedings of ACOUSTICS*. 19 (22)(Sound Science and Society).
- Dejphumee, S. & Sasanakul, I. 2025. Evaluation of volumetric threshold shear strain of gravel-sand mixtures in centrifuge model tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Volum 190. p. 109109.
- DIN. 1990. *DIN 4150-3:1999 - Structural Vibration – Part 3: Effects of vibration on structures*.

- Dowding, C. H. 1996. *Construction Vibrations*. Prentice Hall Inc.
- Drabkin, S. Lacy, H. & Kim, D. S. 1996. Estimating settlement of sand caused by construction vibration. *Journal of geotechnical engineering*. Volum 122(11). pp. 920-928.
- Dugan, J. J. P. & Freed, D. L. 1984. Ground Heave Due to Pile Driving. I: *1st Conference of the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. University of Missouri--Rolla. pp. 117-122.
- Ellis, B. 1980. An assessment of the accuracy of predicting the fundamental natural frequencies of buildings and the implications concerning the dynamic analysis of structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Volum 69. p. 763–776.
- Fellenius, B. 1955. *Rapport 5 -Resultat från provpålning i Göteborg* C. Pålkommisionen.
- Fricke, M. B. & Rolfes, R. 2015. Towards a complete physically based forecast model for underwater noise related to impact pile driving. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Volum 137(3). pp. 1564-1575.
- Göteborg stad, K. & V. 2020. *Anvisningar för markarbeten. Version 2*. Avd. Kretslopp & Vatten. Göteborgs stad.
- Hagerty, D. J. & Peck, R. B. 1971. Heave and lateral movements due to pile driving. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. . Volum 97(11). pp. 1513-1532.
- Hall, L. & Li, Y. 2024. Pålgrundläggning av Kaj 16 - dimensionering med hänsyn till omgivningspåverkan och långtidssättningar. I: *Påldagen 2025*. Pålkommisionen.
- Hall, L. Shih, J. Y. Zangeneh, A. & Pacoste, C. 2023. A methodology for control and design of required ground reinforcement measures regarding train-induced ground vibrations. *Transportation Geotechnics*. 42(September).
- Hall, L. & Wersäll, C. 2015. *Markvibrationer*. Stockholm: SGF.
- Hanson, C. & Towers, D. 2006. *Transit Noise and Vibration Impact Assessment*. FTA-VA-90-1003-06. U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration.
- Hayman, J. W. Adams, R. B. & Adams, R. G. 1993. Foundation piling as a potential conduit for DNAPL migration. I: *A & WMA Annual Meeting*. Air & Waste Management Association. pp. 93-MP.
- Heckman, W. S. & Hagerty, D. J. 1978. Vibrations associated with pile driving. *Journal of the Construction Division*. 104(4). pp. 385-394.
- Hiller, D. M. & Crabb, G. I. 2000. *Groundborne vibration caused by mechanised construction works*. TRL.
- Holtz, R. D. & Boman, P. 1974. A new technique for reduction of excess pore pressures during pile driving. *Canadian Geotechnical Journal*. Volum 11(3). pp. 423-430.
- Holtz, W. & Gibbs, H. J. 1979. SPT and Relative Density in Coarse Sand. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. ASCE. Volum 105 (GT3). pp. 439-441.
- Hsu, C. C. & Vucetic, M. 2004. Volumetric threshold shear strain for cyclic settlement. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. Volum 130(1). pp. 58-70.
- Idriss, I. & Boulanger, R. W. 2006. Semi-empirical procedure for evaluation liquefaction potential. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*. Volum 26. pp. 429-434.
- IEG. 2018. *R6:2008-rev 1- Tillämpningsdokument EN 1997-1 Kapitel 11 och 12. Slänter och bankar*. SGF.
- Isaksson, J. Karlsson, M. & Dijkstra, J. 2025. Quantifying the response of piled structures from displacements induced by pile installation in soft clay. *Canadian Geotechnical Journal*. Volum 62. pp. 1-16.
- ISO. 2016. *ISO 1996-1:2016 Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Part 1: Basic quantities and assessment procedures*.

- ISO. 2017. *ISO 1996-2:2017 Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Part 2: Determination of sound pressure levels*.
- Jamiolkowski, M. Lo Presti, D. C. F. & Manassero, M. 2003. Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT. pp. 201-238.
- Jendeby, K. 2019. *Shear resistance during and after installation of driven piles in soft clay*. Reykjavik. XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Katsumi, T. Inui, T. & Kamon, M. 2009. In-situ containment for waste landfill and contaminated sites. I: *Advances in Environmental Geotechnics: Proceedings of the International Symposium on Geoenvironmental Engineering*. Hangzhou, China: . pp. 248-258.
- Kramer, S. L. & Stewart, J. P. 2024. *Geotechnical earthquake engineering*. 2 red. CRC Press.
- Lambe, T. W. & Whitman, R. V. 1976. *Soil mechanics*. 10 (1991) red. John Wiley & Sons.
- Lamens, P. 2017. *Pile installation in submerged sandy slopes. Assessing liquefaction-induced instability*. . Delft: Delft University of Technology.
- Lamens, P. Askarinejad, A. Sluijsmans, R. W. & Feddema, A. 2020. Ground response during offshore pile driving in a sandy slope. *Géotechnique*. 7. Volum 70 (4). pp. 281-291.
- Larish, M. D. 2019. Fundamental Mechanisms of Concrete Bleeding in Bored Piles. I: *Proceedings of the Concrete 2019 Conference*. Sydney, Australia: . pp. 8-11.
- Larsson, R. 2008. *Jords egenskaper. Information 1*. SGI.
- Larsson, R. & Mulabdic, M. 1991. *Shear moduli in Scandinavian clays. Measurement of initial shear modulus with seismic cones. Empirical correlations for the initial shear modulus in clay*. Linköping: SGI.
- Lissel, P. 2024. *Expert geohydrologi. Personlig kommunikation*. WSP AB.
- Lo, K. Y. & Stermac, A. G. 1965. *Induced pore pressures during pile-driving operations*. s.l. Proc. 6th ISMFE.
- Lo, Y. K. 1968. Discussion of "Effects of Pile Driving on Soil Properties". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. Volum 94(2). pp. 606-608.
- Mahutka, K. P. König, F. & Grabe, J. 2006. Numerical modelling of pile jacking, driving and vibratory driving. I: *Proceedings of international conference on numerical simulation of construction processes in geotechnical engineering for urban en.* pp. 235-46.
- Masoumi, H. R. Degrande, G. & Lombaert, G. 2007. Prediction of free field vibrations due to pile driving using a dynamic soil–structure interaction formulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 27(2). pp. 126-143.
- Massarsch, K. R. 1976. *Soil Movements Caused by Pile Driving in Clay*. Jord- Bergmekanik. KTH.
- Massarsch, K. R. 2004. Vibrations caused by pile driving. *DFI Magazine: Deep Foundations*.
- Massarsch, R. K. Wersäll, C. & Fellenius, B. H. 2022. Vibratory driving of piles and sheet piles–state of practice. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*. 175(1). pp. 31-48.
- Meijers, P. Thijssen, R. & Luger, H. J. 2025. *Soil settlement due to installation of open-ended piles through non-cohesive deposits*. Nantes, France. 5th international symposium on frontiers in offshore geotechnics.
- Naturvårdsverket. 2009. rev 2024. *Rapport 5976: Riktvärden för förorenad mark - modellbeskrivning och vägledning*.
- Naturvårdsverket. 2009. *Rapport 5977: Riskbedömning av förorenade område . En vägledning från förenklad till fördjupad riskbedömning*.
- Naturvårdsverket. 2024. *Informationsskrift: Ansvarig för avhjälpande av miljöskador - En vägledning om miljöbalkens regler och rättslig praxis*.
- Norén-Cosgriff, K. 2019. *Vibration induced damage due to construction work - State of the Art Report*. Oslo: NGI.

- Ohsaki, Y. 1982. Corrosion of steel piles driven in soil deposits. *Soils and foundations*. Volum 22(3). pp. 57-76.
- Pender, M. J. Orense, R. P. Wotherspoon, L. M. & Storie, L. B. 2016. Effect of permeability on the cyclic generation and dissipation of pore pressures in saturated gravel layers. *Geotechnique*. Volum 66(4). pp. 313-322.
- Pestana, J. M. H. C. E. & B. J. D. 2002. Soil deformation and excess pore pressure field around a closed-ended pile. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. Volum 128(1). pp. 1-12.
- Poulos, H. G. & Davis, E. H. 1980. *Pile foundation analysis and design*. 397 red. New York: Wiley.
- Pålkommissionen. 2004. *PK 100 - Kohesionspålar*. Eriksson, P. Jendeby, L. Olsson, T & Svensson, T. Pålkommissionen.
- Randolph, M. F. & Wroth, C. P. 1979. An analytical solution for the consolidation around a driven pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. Volum 3(3). pp. 217-229.
- Rauch, A. 1997. *An empirical method for predicting surface displacements to liquefaction-induced lateral spreading in earthquakes*. Ph.D Thesis. Blacksburg, Virginia, US.: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Rausche, F. 2000. *Pile driving equipment: Capabilities and properties*. s.l. Proc. 6th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles.
- Rausche, F. Goble, G. & Likins, G. E. J. 1985. Dynamic determination of pile capacity. *Journal of Geotechnical Engineering*. Volum 111 (3). pp. 367-383.
- Rehman, S.-E. 1993. Omgivningspåverkan. I: C. Olsson & G. Holm, red. *Handbok i pålgrundläggning*. Linköping: Svensk Byggtjänst/SGI. pp. 259-271.
- Robertson, P. K. 2010. *Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from CPT*. Huntington Beach, CA, USA. 2nd International symposium on cone penetration testing.
- Robertson, P. & Wride, C. 1988. Evaluation cyclic liquefaction potential using cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*. Volum 35. pp. 442-459.
- Sagaseta, C. & Whittle, A. J. 2001. Prediction of ground movements due to pile driving in clay. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. Volum 127(1). pp. 55-66.
- Sagaseta, C. Whittle, A. J. & Santagata, M. 1997. Deformation analysis of shallow penetration in clay. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. Volum 21(10). pp. 687-719.
- Samuelsson, E. & Norin, M. 2019. *SBUF-rapport 13414: Installation av pålar och spont i förorenad mark - spridningsrisk och ansvarsfördelning*. SBUF.
- Satyamurthy, R. Nataraj, M. S. McManis, K. L. & Boutwell, G. P. 2008. Investigations of pile foundations in Brownfields. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. Volum 134(10). pp. 1469-1475.
- Saurenman, H. Nelson, J. & Wilson, G. 1982. *Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control*. Report UMTA-MA-06-0099-82-2. US DOT/Transportation Systems Center.
- Schmertmann, J. 1975. Measurement of In Situ Shear Strength. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*. Vol. II. Raleigh, North Carolina. p. 57-138.
- Schnabel, P. Seed, H. & Lysmer, J. 1972. Modification of seismograph records for effects of local soil conditions. *Bulletin Seismological Society of America*. 62(6). pp. 1649-1664.
- Seed, H. B. Wong, R. T. Idriss, I. M. & Tokimatsu, K. 1986. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*. 112(11). pp. 1016-1032.
- Serdaroglu, M. S. 2010. *Nonlinear analysis of pile driving and ground vibrations in saturated cohesive soils using the finite element method* (. University of Iowa.
- SGF. 2013. *Rapport 2:2013 Fälthandbok - undersökningar i förorenade områden*.

- SGI. 1994. *Information 13 - Sättningsprognoser för bankar på lös finkorning jord - Beräkning av sättningarnas storlek och tidsförlopp*. Författare: Larsson. . Bengtsson. P-E. Eriksson. L.: SGI.
- SGI. 2023. *SGI Vägledning 8 - Utredning av släntstabilitet: Utgåva 1*.
- SIS. 1999. *SS 02 52 11 Vibration och stöt – Riktvärden och mätmetod för vibrationer i byggnader orsakade av pålning, spjontning schaktning och packning*.
- SIS. 2005. *SS-EN 1997-1 - Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner - Del 1: Allmänna regler*.
- SIS. 2006. *SS-ISO 9613-2:2006 Akustik - Dämpning av ljud under utbredning utomhus - Del 2: Beräkningsmetod (ISO 9613-2:1996. IDT)*.
- SIS. 2009. *SS-EN ISO 9612:2009 Akustik - Bestämning av bullerexponering i arbetsmiljön - Teknisk metod*. SIS.
- SIS. 2015. *SS-EN ISO-18674-1:2015 Geoteknisk undersökning och provning - Geoteknisk övervakning genom instrument i fält - Del 1: Allmänna regler*.
- SIS. 2016. *SIS-TS 1144:2016 Byggmätning – Specifikationer vid framställning och kontroll av digitala markmodeller*.
- SIS. 2016. *SIS-TS 21143:2016 Byggmätning – Geodetisk mätning, beräkning och redovisning*.
- SIS. 2017. *SS-EN ISO- 8674-3:2017 Geoteknisk undersökning och provning - Geoteknisk övervakning genom instrument i fält - Del 3: Inklinometrar*.
- SIS. 2022. *SS 460 48 60 - Vibration och stöt - Metod för syneförrättning av byggnader och anläggningar i samband med vibrationsalstrande verksamhet*.
- SIS. 2022. *SS 460 48 61 - Vibration och stöt - Mätning och vägledning för bedömning av komfort i byggnader*.
- SIS. 2024. *SS-EN ISO 5667-3:2024 Vattenundersökningar – Provtagning – Del 3: Konservering och hantering av vattenprover (ISO 5667-3:2024. IDT)*.
- Sofiste. T. V. et al. 2021. Numerical modelling for prediction of ground-borne vibrations induced by pile driving. *Engineering Structures*. . Volum 242.
- Sparrenbom. C. et al. 2022. *Grundvattenboken*. Studentlitteratur AB.
- Stewart. J. et al. 2012. *Soil-structure interaction for building structures*. NIST.
- Stuedlein. A. W. et al. 2023. *PEER workshop on liquefaction susceptibility*. Report. (2023/02): Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Sveriges Riksdag. 1998-06-11. *SFS 1998:808: Miljöbalk*.
- Sveriges Riksdag. 1998-06-25. *SFS 1998:899: Förordning om miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd*.
- Tiberg. C. Edebalk. O. & Dehlbom. B. 2019. *Pålning i förorenade områden - Kunskapssammanställning*. SGI.
- Trafikverket. 2022. *TRVINFRA -00230. Geokonstruktioner. dimensionering och utformning. Krav och rådtext*. Trafikverket.
- Transportstyrelsens. 2018. *TFS 2018:57 - Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd*. Transportstyrelsens.
- Turkel. B. 2023. *Investigation of Ground Deformations and Vibrations Due to Impact Pile Driving: Measurements and Prediction Model*. University of Central Florida.
- Turkel. B. et al. 2023. Semiempirical Model of Vibration-Induced Ground Deformations due to Impact Pile Driving. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Volum 149(11). p. 040231.
- Vucetic. M. 1994. Cyclic threshold shear strains in soils. *Journal of Geotechnical Engineering*. 120(12). pp. 2208-2228.
- Yoshida. N. Kobayashi. S. Suetomi & Miura. K. 2002. Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*. 22(3). pp. 205-222.

- Zhang, G. Robertson, P. K. & Brachman, R. W. 2002. Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*. Volum 39(5). pp. 1168-1180.
- Zhang, J. Andrus, R. & Juang, C. 2005. Normalized shear modulus and material damping ratio relationships. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*. 131(4). pp. 453-464.
- Zhu, D. Indraratna, B. Poulos, H. & Rujikiatkamjorn, C. 2020. Field study of pile–prefabricated vertical drain (PVD) interaction in soft clay. *Canadian Geotechnical Journal*. Volum 57(3). pp. 377-390.
- Åhnberg, H. & Larsson, R. 2012. *Strength degradation of clay due to cyclic loadings and enforced deformation*. Linköping: SGI.