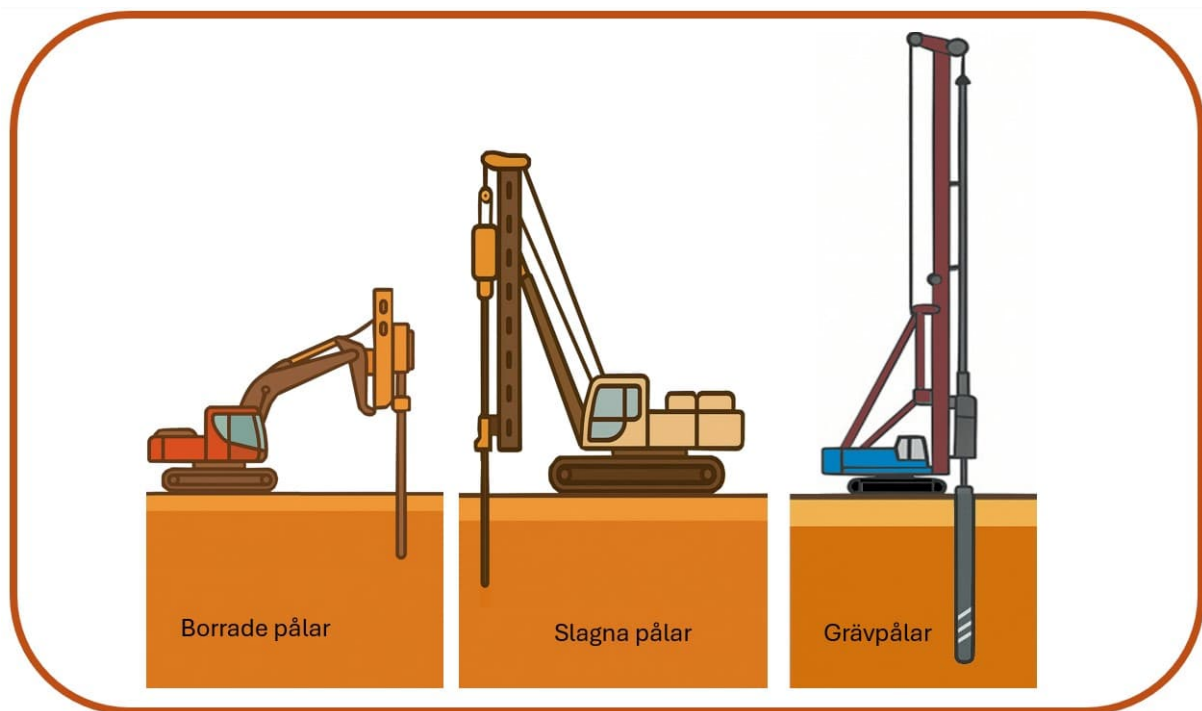


PÅLHANDBOKEN

KAPITEL 3, PROJEKTERING



INNEHÅLLSFÖRTECKNING

3	Projektering	5
3.1	Projekteringsprocessen	5
3.1.1	Säkerhetsklass, konsekvensklass och geoteknisk kategori	9
3.1.2	Bärförmåga	11
3.1.3	Lasteffekter	11
3.1.4	Sättningar/ rörelser	12
3.1.5	Beständighet	13
3.1.6	Robusthet	32
3.1.7	Toleranser	32
3.1.8	Omgivningspåverkan	34
3.1.9	Pålars bärförmåga, relativa kostnader och klimatpåverkan	37
3.1.10	Utförandestandarder	39
3.2	Övergripande frågeställningar	40
3.2.1	Lutande pålar	40
3.2.2	Dragna pålar	40
3.2.3	Korta pålar	41
3.2.4	Utmattningsbelastade pålar	42
3.2.5	Installationens inverkan på pålmaterial	42
3.2.6	Ingjutningslängd/förankring	43
3.2.7	Pålgrupper/minsta pålavstånd	43
3.3	Påltyper	45
3.3.1	Prefabricerade betongpålar	45
3.3.2	Träpålar	51
3.3.3	Kombinationspålar trä + betong	53
3.3.4	Slagna stålrörspålar	54
3.3.5	Borrade stålrörspålar	60
3.3.6	Kombinationspålar av stål och betong	65
3.3.7	Stålkärnepålar	66
3.3.8	Borrade injekterade pålar	72
3.3.9	Grävpålar	74
3.3.10	Övriga påltyper (vakant)	77
3.4	Vibrerade pålar	78
3.4.1	Allmänt	78
3.4.2	Metodbeskrivning	78
3.5	Pålars verkningssätt	87
3.5.1	Spetsburna pålar	87
3.5.2	Mantelburna pålar	89
3.6	Förankringar i pålar	92
3.7	Provpålning och simulering med WEAP	94
3.8	Grundförstärkning (vakant)	98
3.9	Befintliga pålar (vakant)	98
3.10	Bankpålar	98
3.11	Energipålar	100

3.12	Verifiering och kontroll	102
3.13	Falska påstopp	103
3.13.1	Bakgrund	103
3.13.2	Åtgärder	104
3.14	Referenser	105

3 PROJEKTERING

3.1 PROJEKTERINGSPROCESSEN

Vid projektering av ett byggnadsverk grundlagd med pålar klarläggs de geotekniska och konstruktiva villkoren så att konstruktionen med betryggande säkerhet kan överföra uppträdande laster under brottgräns-, olycksfalls- respektive bruksgränstillstånd till underliggande jord eller berg utan att brott eller skadliga deformationer uppstår.

Ett sätt att visa processen är att presentera de olika aktörernas arbetsuppgifter enligt följande:

Geotekniker (konsult):

- geoteknisk fältundersökning
- beskrivning (jordlagerföljd, djup till berg, grundvatten, sättningar, jordens egenskaper)
- rekommendation av lämpliga påltyper och verkningssätt
- risker såsom skred, omgivningspåverkan
- kohesionspålar (sättningar, geoteknisk bärförmåga)
- kontrollprogram.

Konstruktör (konsult):

- utformning pålgrupp
- lastnedräkning.

Geokonstruktör (konsult/entreprenör):

- utformning påle (detaljer)
- konstruktiv bärförmåga
- geoteknisk bärförmåga (bedömning, beräkningar)
- pålbarhet
- provbelastning (omfattning, statisk/ dynamisk)
- anvisningar för utförande.

Pålentreprenör (platsledning):

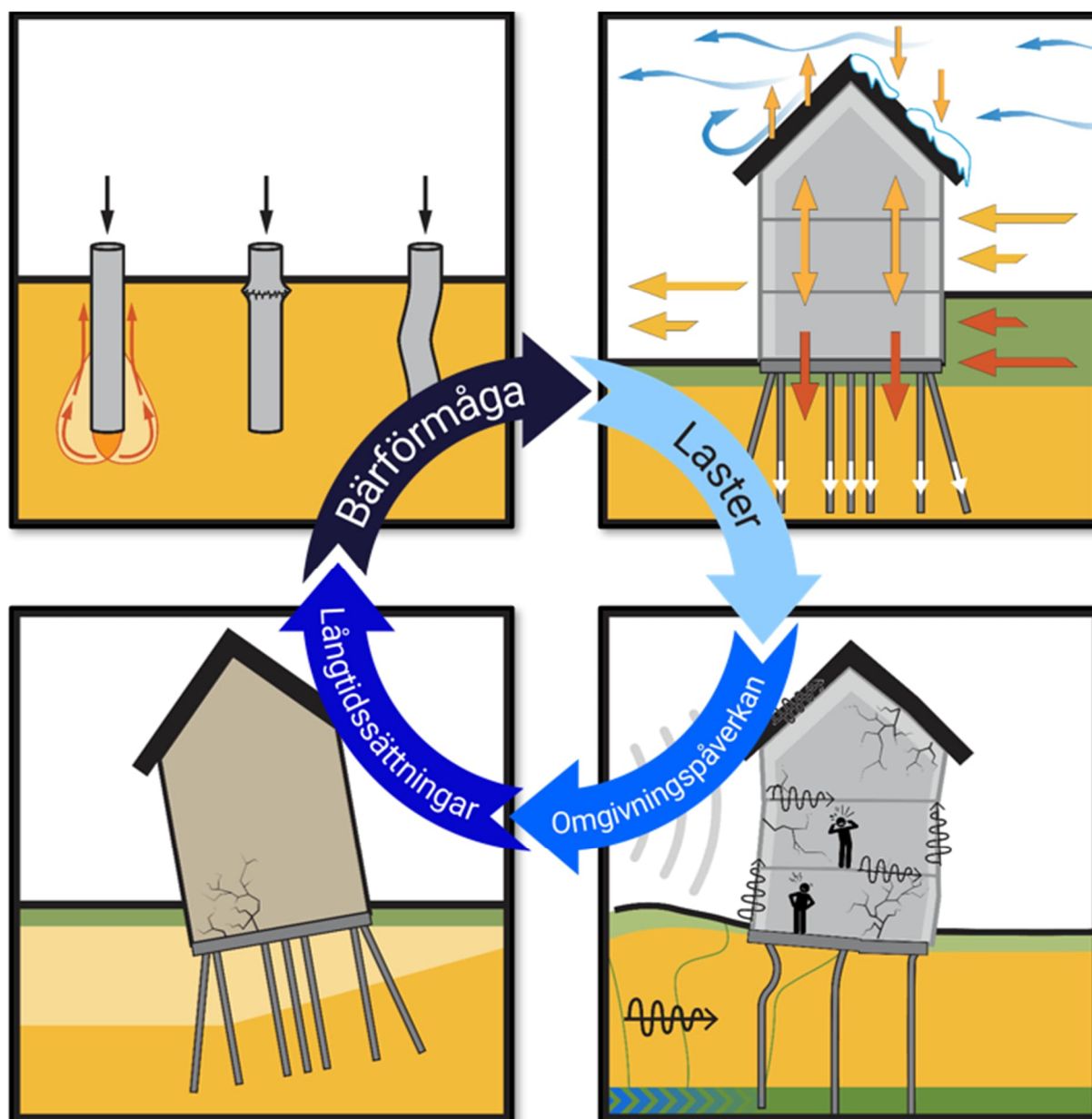
- arbetsberedning
- provisorier (arbetsplattform)
- drivbarhet (antal slag, hejare)
- stoppslagning (schablon)
- övervakning, uppföljning (enligt kontrollplan)
- pålprotokoll, slagningsprotokoll.

Pålmätningsspecialist:

- provning (statisk/ dynamisk)
- geoteknisk bärförmåga (verifiering, stoppslagning, provpållning)
- produktionskontroll.

I vissa fall kan en och samma aktör utföra flera delar av processen, men beroende på entreprenadform och ansvarsområden kan många aktörer vara inblandade. Detta ställer stora krav på samordning för att erhålla en optimerad grundläggning. Målet för projekteringen är att nå en optimal teknisk, säker och ekonomisk lösning av grundläggningen för aktuell byggnadskonstruktion.

Ett försök att grafiskt åskådliggöra pålprojekteringen kan förenklat göras enligt Figur 3.1.



Figur 3.1 Pålprojektering i förenklad form.

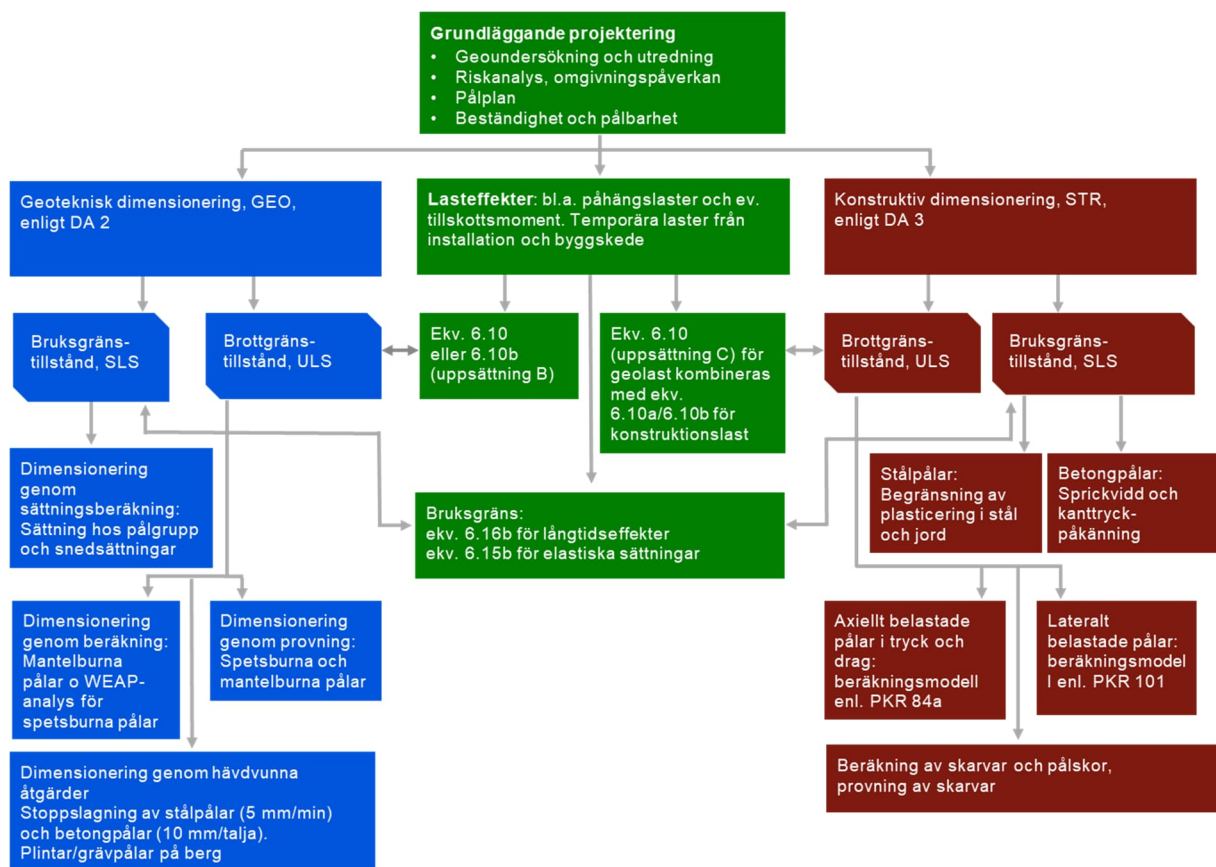
Det är viktigt att inse att projekteringsprocessen är mer eller mindre iterativ. Eftersom alla delar är beroende av varandra, kan projekteringen sällan utföras "rätlinjigt". Beroende på projektets, och de geotekniska förhållandenas komplexitet, kan de olika delmomenten behöva upprepas olika många gånger. I följande avsnitt behandlas de olika delmomenten, åskådliggjorda i Figur 3.1:

- Bärförmåga (se avsnitt 3.1.2).
- Lasteffekter (se avsnitt 3.1.3).
- Omgivningspåverkan (se avsnitt 3.1.8).
- Långtidssättningar (se avsnitt 3.1.4).

Processen innehåller också fler delar att ta hänsyn till, vilka beskrivs i detta kapitel. Det finns andra aspekter förutom de rent tekniska att ta hänsyn till, såsom t.ex. kostnader, tidsåtgång, klimatpåverkan, påverkan på tredje part inklusive trafik, se vidare 3.1.8 och 3.1.9. I många fall inleds projekteringen

med delmomentet "Lasteffekter", men i princip kan den inledas med godtycklig del och alla steg kan utföras samtidigt eller i följd.

En viktig del i projekteringen är att beakta arbetsmiljörisker både under utförandetiden och för framtida verksamhet i den färdiga anläggningen/byggnaden. Arbetsmiljöarbetet är lagstadgat och regleras i arbetsmiljölagen (1977:1160) (Sveriges riksdag, 2025) och ett flertal av Arbetsmiljöverkets författningssamlingar (AFS 2023:1 till 2023:15, se Arbetsmiljöverkets hemsida) upprättade av Arbetsmiljöverket. För hanteringen av arbetsmiljöfrågorna ska en byggarbetsmiljösamordnare för planering och projektering, kallas Bas-P och en byggarbetsmiljösamordnare för utförandet, kallad Bas-U utses, se AFS 2023:3 (Arbetsmiljöverket, 2023). Dessa är centrala för hanteringen av arbetsmiljörisker i projektering och utförandet, se kapitel 8. Bas-P ansvarar för att samordna arbetsmiljöarbetet i tidiga skeden, identifiera och förebygga risker samt att säkerställa att projektörer beaktar arbetsmiljörisker i projekteringen. Bas-P ansvarar bland annat för att upprätta en arbetsmiljöplan inför byggstart. För att få kontinuitet i arbetsmiljöarbetet sker även en överlämning från Bas-P till Bas-U inför byggstart. Vid totalentreprenader kan även överlämning av Bas-P från beställarens projektör till Bas-P för entreprenörens projektör krävas.



Figur 3.2 Dimensioneringsprocess för pålar.

Figur 3.2 åskådliggör påldimensioneringens ingående delar i enlighet med de gällande eurokoderna. För att korrekt och optimerat kunna utföra en påldimensionering krävs kunskaper om:

- De geotekniska förhållandena på platsen.
- Samtliga relevanta lasteffekter som pålarna ska klara att överföra från konstruktionen till tillräckligt bärkraftiga jordlager eller berg.
- Potentiella skadeobjekt och dessas begränsande effekter.

- Kunskaper om hur pålarnas beständighet ska hanteras.

Undersökningar och utredningar av ovanstående, som ska utgöra underlag för projekteringen, ska redovisas i relevanta handlingar såsom:

- MarkUndersökningsRapport (MUR) inklusive geotekniska ritningar och samtliga bilagor.
- Geoteknisk PM, projekteringsunderlag.
- Riskanalyser rörande relevant omgivningspåverkan.
- Beräknings-PM för pålar och pålgrupper.
- Mätprogram, t.ex. provpålning.

Pålar definieras till största delen genom sitt verkningssätt, d.v.s. på vilket sätt lasteffekter överförs från den överliggande konstruktionen till geologiska formationer med tillräcklig bärförmåga. Pålgrundläggning skiljer sig från grundförstärkning och markförstärkning enligt:

- Pålgrundläggning – grundläggning av byggnadsverk vars laster inte kan bäras av underliggande jord-/ berglager utan alltför stora rörelser eller brott.
- Grundförstärkning – befintligt byggnadsverk vars konstruktion har, eller riskerar få, sättnings-skador, som behöver avlastas/ förstärkas med ny pålgrundläggning.
- Markförstärkning – ett byggnadsverk som behöver grundläggas på förstärkt mark, t.ex. bankpålning, KC-pelare eller dylikt.

Till en mindre del har överföringsförmågan att göra med hur pålen installeras och hur den är utformad, ännu mindre av vilket material en påle består av. Sveriges geologi definieras till stor del av den nedslagna landskapet varit utsatt för, med de olika jordarter som bildats i processen. Här finns, i vissa fall, mycket mäktiga lager lera med mycket låg hållfasthet, moräner, isälvmaterial och mycket fast berggrund. Se översiktlig beskrivning i kapitel 1.

Pålar kommer i många fall inte kunna sägas vara rent spetsburna eller rent mantelburna, utan det blir en blandning av spets- och mantelbärförmåga. Spetsburna och mantelburna pålars verkningssätt beskrivs i avsnitt 3.5.1 och 3.5.2

Pålar kan delas in efter vilken utförandestandard de hänförs till. Dessa omfattar

- SS-EN 12699:2015 Massundanträngande pålar (SIS, 2015a).
- SS-EN 14199:2015 Mikropålar (SIS, 2015b).
- SS-EN 1536:2010 Grävpålar (SIS, 2010a).
- SS-EN 1537:2013 Förankringar (SIS, 2013a).

Till relativt stor del följer dessa utförandestandarder en gräns huruvida de är massundanträngande till sin natur, eller om de utförs under avlägsnande av det jordmaterial pålarna ersätter. Denna indelning är dock inte helt definierad i alla avseenden.

Under projekteringsskedet görs en inventering över vilka påltyper som kan vara relevanta utifrån rådande förutsättningar, se avsnitt 3.3. De olika påltyperna jämförs med aktuella geotekniska förhållanden på plats och omgivande byggnadsverks grundläggningar och verksamheter kartläggs, se Tabell 3.1.

Tabell 3.1 Geotekniska förhållanden, omgivande byggnaders grundläggningar och faktorer som kan påverka val av påltyp.

Ogynnsamma förutsättningar	Gynnsamma förutsättningar
Skonsam installationsmetod är nödvändig p.g.a. sättningskänsliga byggnader samt vibrationskänslig utrustning i omgivningen.	Omgivningspåverkan medför inga bekymmer.
Begränsad takhöjd eller framkomlighet.	Inga restriktioner för stora maskiner.
Jorden består av fyllning eller naturligt lagrad friktionsjord, som innehåller block och andra hinder. Stort avstånd till berg.	De geotekniska förhållandena medför inga restriktioner vad gäller val av påltyp. Avståndet till berg är litet.

Generellt gäller att om det inte finns några restriktioner i form av omgivningspåverkan eller hinder i undergrunden, som block eller stora djup av friktionsjord, är det med få undantag ekonomiskt fördelaktigt med slagna betongpålar som stoppslås antingen i ett fast friktionsjordsmaterial eller mot berg.

Geotekniska undersökningar kan ge en indikation på risken för bortslagning i form av blockighet, släntberg m.m., se kapitel 2. Därutöver finns normalt erfarenheter från tidigare utförda pålningsarbeten som kan bilda underlag för bedömning av förväntad bortslagning. Det är viktigt att komma ihåg att om konstruktionen i övrigt klarar att hantera alternativa pålplaceringar på ett bra sätt, så kan en lösning med betongpålar fortfarande vara både ekonomiskt och tidsmässigt mest fördelaktig, trots en viss bortslagning. Bortslagning kan ske också för slagna stålplålar, men dessa är generellt mindre utsatta än betongpålar. Relativa kostnader för olika påltyper redovisas i Figur 3.6.

Projekteringen förväntas producera adekvata bygghandlingar för pålningen. Till dem hör:

- Eventuella rapporter över t.ex. provpålning.
- Ritningar och modeller, pålelement och pålplaner.
- Tekniska beskrivningar.
- Kontrollplaner för omgivningspåverkan.
- Eventuella tilläggskontrollplaner och svetsplaner.

När pålningen så småningom har utförts ska den redovisas med relationshandlingar:

- Fullständiga pålprotokoll, inmättningsprotokoll.
- Kontrollberäkning av pålar/ pålgrupper.
- Eventuellt reviderade beräkningar och ritningar.

I kapitel 4, Upphandling, redovisas olika handlingar som underlag för upphandling och i kapitel 9, Kontroll och verifiering, redovisas information om kontrollplaner, kontrollprogram och kontrollmätningar.

3.1.1 Säkerhetsklass, konsekvensklass och geoteknisk kategori

Vid dimensionering gäller allmänt att bärande konstruktioner och de byggnadsdelar där de ingår ska hänföras till någon av de säkerhetsklasser som föreskrivs i eurokoderna och definieras av Boverkets respektive Transportstyrelsens föreskrifter (nationella bilagor) (Boverket, 2011 och 2022 och Transportstyrelsen, 2018). För geokonstruktioner ska en uppdelning också göras i s.k. geotekniska kategorier (GK).

Varje byggnadsdel ska hänföras till säkerhetsklass 1, 2, 3 eller 4. För fullständig beskrivning se SS-EN 1990:2002 (SIS, 2002), inklusive nationella bilagor (Boverket, 2011 och 2022 och Transportstyrelsen,

2018) och IEG Rapport 2:2008, Rev 3, TD-Grunder (IEG, 2013). För pålar specifikt, se även IEG R8:2008, Rev 3, TD-Pålgrundläggning, avsnitt 4.1.2 (IEG, 2016).

Avgörande för valet av säkerhetsklass är risken för personskada vid brott i konstruktionen. I säkerhetsklass SK4 tas även hänsyn till ekonomiska konsekvenser, SK4 tillämpas enbart i nationella bilagan från Transportstyrelsen, TSFS 2018:57 (Transportstyrelsen, 2018). Vid dimensioneringen enligt partialkoefficientmetoden beaktas säkerhetsklassen för en byggnadsdel genom partialkoefficienten γ_d . Denna koefficient appliceras på lasterna enligt SS-EN 1990:2002 (SIS, 2002) och väljs enligt nationella bilagor från Boverket respektive Transportstyrelsen (Boverket, 2011 och 2022 och Transportstyrelsen, 2018), se även sammanställning i IEG:s Rapport 8:2008, Rev 3, TD-Pålgrundläggning (IEG, 2016), avsnitt 4.1.3. Ett annat sätt att klassificera risker där även ekonomiska konsekvenser beaktas är att använda konsekvensklasser beskrivna i SS-EN 1990:2002, bilaga B, tabell B.1 (SIS, 2002).

Varje geokonstruktion ska placeras i en lämplig geoteknisk kategori (GK) enligt SS-EN 1997-1:2005, avsnitt 2.1 (SIS, 2005d). Val av kategori styrs av rådande geotekniska förhållanden, den aktuella konstruktionen och dess omgivningsförhållanden. Den geotekniska kategorin ger möjlighet till hantering av respektive geokonstruktion efter svårighetsgrad. I IEG Rapport 2:2008, Rev 3, TD Grunder (IEG, 2013) finns en närmare beskriven vägledning för val av geoteknisk kategori.

Val av geoteknisk kategori bör göras tidigt i ett byggprojekt. Konstruktionens geotekniska kategori ska beaktas vid bedömning och val av:

- geotekniska utredningar/ undersökningar
- dimensioneringsmetoder
- utförandekontroll (metoder och omfattning)
- verifieringskrav.

Skäl kan finnas att välja olika geotekniska kategorier för olika geokonstruktioner inom ett och samma objekt. En tydlig avgränsning måste då göras inom objektet av giltigheten för de olika kategorierna.

Den geotekniska kategoriseringen kan under utförandeskedet behöva ändras. Om förhållandena kräver en högre geoteknisk kategori kan detta medföra praktiska olägenheter och förseningar. Vid osäkerhet om kategoritillhörighet bör från början hellre en hög geoteknisk kategori väljas än en låg.

Pålade konstruktioner kan utföras i samtliga tre geotekniska kategorier. Normala konstruktioner, som dimensioneras och utförs enligt allmänt accepterade metoder, hänförs till geoteknisk kategori GK2. Där omgivningsförhållandena medför exceptionella risker, samt i fall där allmän praktisk erfarenhet saknas av pålarnas dimensionering eller utförande, hänförs geokonstruktionerna i allmänhet till geoteknisk kategori GK3. Undantagsvis kan i vissa enkla fall pålar utföras i geoteknisk kategori GK1.

Geotekniska utredningar ska utföras för alla bärande geokonstruktioner. Undersökningarna ska omfatta sådana egenskaper hos jord och vatten som är avgörande för pålars bärförmåga och beständighet. Generellt gäller att den geotekniska utredningens detaljeringsgrad ska anpassas till geokonstruktionernas geotekniska kategori. I GK 1 erfordras normalt endast begränsade undersökningar och i vissa fall endast inventering och sammanställning av tillgängliga uppgifter om de geotekniska förhållandena samt platsbesök av geotekniskt sakkunnig.

I GK 3 erfordras bl.a. kompletterande kontroller och oberoende granskning med hänsyn till de speciella svårigheter som medfört att geokonstruktionen hänförts till den högsta geotekniska kategorin.

3.1.2 Bärförmåga

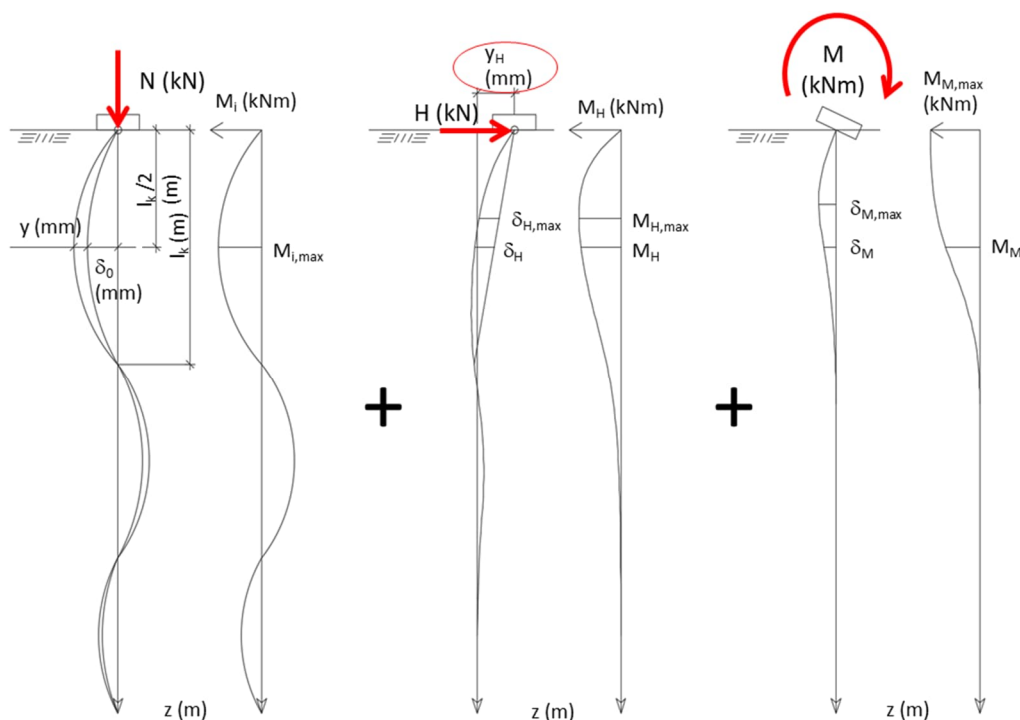
Alla pålar ska kontrolleras både strukturellt/ konstruktivt (STR) och geotekniskt (GEO). Mer ledning för detta återfinns i kapitlen 5, 6 (STR), och 7 (GEO). För överslag och jämförelser av pålars bärförmåga kan avsnitt 3.1.9 användas.

3.1.3 Lasteffekter

För projektering av grundläggning krävs kännedom om alla laster och lasteffekter som pålgrundläggningen ska dimensioneras för. En genomgång av dessa lasteffekter återfinns i kapitel 5. Här finns också en utförlig genomgång av vilka olika lasteffekter som enligt eurokoderna är relevanta i olika dimensioneringsfall och olika gränstillstånd inklusive olyckslastfall och utmattningslastfall.

Lasteffekter på pålar som ska tas fram i projekteringen är (se Figur 3.3):

- axiella laster i påltopp (tryck- och dragkrafter)
- transversella laster i påltopp
- transversella deformationer och/ eller böjande moment i påltopp
- eventuella axiella påhängslaster på pålarna orsakade av sättningar i omgivande jord
- eventuella transversella lasteffekter p.g.a. lutande pålar orsakade av sättningar i omgivande jord, vilka resulterar i permanenta förskjutningar av pålen.



Figur 3.3 Lasteffekter i påltopp med resulterande förskjutningar.

För pålar utsatta för påhängslaster krävs, förutom påhängslasteffekterna, axiella lasteffekter för att korrekt kunna dimensionera pålen enligt Tabell 3.2. Påhängslasteffekter behöver endast kombineras med långtidsverkande lasteffekter. Definitionerna för de olika lasteffekterna framgår av SS-EN 1990:2002 (SIS, 2002), nationella val (Boverket, 2011 och 2022 och Transportstyrelsen, 2018) och är även sammanställda i IEG:s Rapport 8:2008, Rev 3, TD-Pålgrundläggning (IEG, 2016), avsnitt 4.1.3.

Tabell 3.2 Relevanta lasteffekter i påltopp, för pålar utsatta för påhängslaster.

STR	STR	STR	STR	GEO	GEO
ULS max	ULS "perm" (6.10a enligt EKS 11)	SLS 6.14b	SLS 6.16b	ULS max	SLS 6.16b
Den största av alla lastkombinationer i ULS	Utan några variabla laster, för kombination med påhängslaster	Största SLS-lasten, tillåter eg plastiska def. Mer relevant för pålberäkningar är 6.15b	SLS-QP, "Kvasi-permanent", för komb. med påhängslaster	För kohesionspålar krävs lasteffekter med olika lastvaraktigheter	Enbart sättningar

Notera att beräkningar i STR utförs i enlighet med dimensioneringsmetod 3 enligt SS-EN 1997-1:2005 (SIS, 2005d), med säkerheter på material och lasteffekter (DA3) och i GEO i enlighet med dimensioneringssätt 2, med säkerheter på bärförmåga och lasteffekter (DA2). Den sistnämnda utförs alltid i säkerhetsklass 2, medan det i DA3 kan variera. Därmed kan lasteffekterna skilja sig åt. Påhängslaster verkar i pålens axiella riktning och ska enbart kombineras med långtidsverkande lasteffekter och det dimensionerande snittet ligger för dessa lasteffekter vanligtvis i det neutrala planet.

Förutom ovanstående lasteffekter, så kan också utmattningslasteffekter krävas i vissa situationer, främst gäller det broar, vindkraftverk och höga byggnader/ skorstenar. Dessa laster bör anges som olika lastspann med övre och undre nivåer med tillhörande antal lastväxlingar. Då kan pålen dimensioneras med hänsyn till delskadehypotes. För att optimera dimensioneringen bör flera sådana lastkollektiv anges.

Fördjupad analys av lasteffekter redovisas i kapitel 5, 6 och 7.

3.1.4 Sättningar/ rörelser

Normalt sätter sig inte konstruktioner grundlagda med spetsburna pålar. Inte heller konstruktioner grundlagda på mantelburna friktionspålar rör sig i någon större utsträckning. Men konstruktioner grundlagda på mantelburna kohesionspålar måste alltid kontrolleras för sättningar. Vid bedömning av sättning/ vertikal rörelse i påltopp för enskild påle ska även pålens elastiska deformation beaktas. Om pålarna i övrigt är dimensionerade under korrekta premisser så är normalt konstruktionens sättningar mindre än den eventuella omgivande bakgrundssättningen. En korrekt samverkanskonstruktion ska dock i princip erhålla samma sättning som omgivande mark. Sådana rörelser kan emellertid orsaka problem av andra orsaker, t.ex. kan konstruktionen med tiden hamna på en för låg nivå i förhållande till omgivande vattenytor.

Förutom totalsättningarna behöver differensrörelserna kontrolleras. Dessa kan bero på att olika belastningar påverkar olika delar av konstruktionen, t.ex. olika höga/ tunga byggnadsdelar, eller olika djupa lerlager under konstruktionen. Det kan också vara problematiskt, för att inte säga omöjligt, att få samma rörelsemönster för tillkommande byggnadsdelar, om nya konstruktioner avses byggas samman med befintliga delar. Många av dessa potentiella problem kan undvikas i ett projekteringsskede. Det är viktigt att projektera robusta konstruktioner, som klarar mindre differensrörelser utan att problem uppstår.

Ledning för beräkningar av pålade konstruktioners sättningar/ rörelser återfinns i kapitel 7.

3.1.5 Beständighet

3.1.5.1 Betongpålar

3.1.5.1.1 Allmänt

Betongpålars utformning med hänsyn till beständighet ska följa SS-EN 1992-1-1:2005, kapitel 4 (SIS, 2005b), SS-EN 13670:2009 (SIS, 2009b), SS-EN 13369:2024 (SIS, 2024a) och SS-EN 206:2013+A2:2021 (SIS, 2013b).

Beständighet för pålen ska beaktas med hänsyn till utmattning under installation och driftskede, korrosion, kemiska eller bakteriella angrepp m.m. Pålar av betong kan angripas i vissa miljöer, exempelvis i myrmarker och utfyllningar innehållande aggressiva kemiska ämnen samt i sulfidjordar. Angrepp kan också erhållas vid exponering för havsvatten eller aggressivt vatten/grundvatten. Erfarenheter från utlandet har visat att vatten med pH-värde lägre än 6 och höga koncentrationer av kalcium- och sulfatföreningar kan leda till nedbrytning av betongen i pålar.

Om angreppsrisk finns bör detta beaktas, t.ex. genom val av lämplig cementtyp och/eller högre cementmängd. I mycket armeringsaggressiv miljö ökas det täckande betongskiktet. Ett lågt vattencementtal, v_{ct} , ger en tätare och mer beständig betong. Det förekommer lite olika beteckningar på vattencementtal. Förutom v_{ct} , förekommer $v_{ct,ekv}$ och v_{bt} . Skillnaderna mellan de olika beteckningarna redovisas i avsnitt 3.1.5.1.7. I Pålhandboken används fortsättningsvis beteckningen $v_{ct,ekv}$.

Betongpålar i sulfidjord kan utsättas för både yttre sulfatangrepp och surt angrepp varför dessa behöver utformas för att motstå dessa angrepp.

I Sverige återfinns aggressiv sulfidjord framförallt längs Norrlandskusten, men förekommer också i Mälardalen. Problemet ligger i att sulfiden och i det aktuella fallet järnsulfiden i luft kan oxidera till sulfat som i sin tur kan ge upphov till skada på betongen. När sulfiden oxideras bildas också svavelsyra och/eller svavelsyrlighet.

Om problem uppstår för pålar i sulfidjord så är det högst sannolikt att detta inträffar i området ovanför lägsta grundvattennivån. I detta område kan man ha en pågående oxidation av sulfidjorden som kan skada betongpålarna om inte betongen har tillräckligt god kvalitet för att motstå dessa angrepp under dess livslängd. Dock ska man vara medveten om att framtida bebyggelse kring den aktuella konstruktionen kan komma att ske under konstruktionens livslängd. Detta kan innebära en grundvattensänkning som kan medföra att icke oxiderad sulfidjord kan hamna ovanför grundvattennivån och därmed orsaka angrepp på pålarna p.g.a. att sulfidjorden oxiderar.

Av denna anledning bör betongen proportioneras efter den risk som föreligger i områden med sulfidjordar. När det gäller sura angrepp så ska betongen ha ett lågt vattencementtal ($v_{ct,ekv}$) och när det gäller yttre sulfatangrepp så ska ett sulfatresistent cement användas, d.v.s. ett cement med låg C3A-halt

Vid misstanke om sulfidjordsförekomst bör en undersökning av jord och grundvatten göras för att bedöma vilken exponeringsklass för kemiska angrepp (XA1-XA3) som råder i området där pålarna ska slås ner.

I litteraturen återfinns en mängd olika undersökningar av betong i sulfidjordar eller i sura miljöer. Resultaten från dessa undersökningar pekar på att en beständig betong erhålls genom att välja ett sulfatresistent cement, ett tillräckligt lågt vattencementtal ($v_{ct,ekv}$) och en tillräckligt hög cementhalt. Om pålar tillverkas med ett sulfatresistent cement, ett $v_{ct,ekv} \leq 0,40$ med en cementhalt tillräcklig för att ge en tät struktur så bör detta ge tillräcklig beständighet för att klara de flesta miljöer som kan uppstå i sulfidjordar. Ett $v_{ct,ekv}$ på 0,40 innebär normalt en cementhalt på cirka 400-430 kg/m³, vilket bör vara tillräckligt i detta avseende.

Man ska dock vara medveten om att om grundvattnet inte är stillastående utan "strömmande" så kan det vara nödvändigt att minska $v_{ct_{ekv}}$ ytterligare eller förse pålarna med någon typ av ytskydd. I dessa fall ska en särskild utredning göras för att bedöma betongkvalitet och täckande betongskikt. Det senare rekommenderas också för betong i starkt kemiskt aggressiv miljö, d.v.s. $pH < 4,5$. Detta pH motsvaras av betong i en miljö motsvarande exponeringsklass XA3 eller miljöer med ännu lägre pH, se Tabell 3.3 och Tabell 3.4.

Beständigheten hos pålens armering beror på den täckande betongens beständighet. Beständigheten hos betongen beror på minsta mängd cement, ett största vattencementtal, minsta hållfasthet, ett minsta täckande betongskikt och begränsning av sprickvidd. Hur utsatt betongen bedöms vara styrs av pålens livslängdsklass/bärverksklass samt aktuell miljöpåverkan, vilket visas genom vald exponeringsklass. Pålens livslängdsklass och exponeringsklass styr sedan:

- minsta täckande betongskikt
- begränsning av sprickbredd
- minsta hållfasthetsklass
- största vattencementtal (max $v_{ct_{ekv}}$).

Vidare behöver beständigheten hos beslag beaktas. För pålar i vatten är det olämpligt att skarvar är placerade i fritt vatten.

3.1.5.1.2 Exponeringsklasser

Pålar helt omgivna av naturlig jord hör oftast till exponeringsklass XC2/XF1. Exponeringsklass styrs av SS-EN 1992-1-1:2005, avsnitt 4.2 (SIS,2005b) och väljs enligt Tabell 3.3 och Tabell 3.4. Pålar i hamnmiljö och pålar i sulfidjord hamnar i exponeringsklasser som kan kräva sulfatresistent cement och lågt $v_{ct_{ekv}}$ (hög täthet i betongen), frysprovad betong (eventuellt krav på minsta lufthalt), lägre $v_{ct_{ekv}}$ eller större täckande betongskikt.

För pålar som utsätts för frost behövs en frostbeständig betong. Exponeringsklass vid angrepp av fryshet/tining delas upp i exponeringsklass XF1-XF4, se Tabell 3.3. Det är framför allt två faktorer som är viktiga för att öka betongens frostbeständighet.

- En tät betong (lågt $v_{ct_{ekv}}$) som minskar den vattenmängd som konstruktionen kan innehålla.
- Små expansionskärl (små luftporer) i betongen som ger utrymme för den volymökning som sker när vatten fryser till is.

Tabell 3.3 Exponeringsklasser för betongkonstruktioner, baserat på SS-EN 1992-1-1:2005 (SIS,2005b).

Klass	Beskrivning av miljö	Exempel, informativa, där exponeringsklassen kan förekomma
1 Ingen risk för korrosion eller angrepp		
XO	För betong utan armering eller ingjuten metall: Alla omgivningsförhållanden utom där frysning/upptining, nötning eller kemiska angrepp förekommer. För betong med armering eller ingjuten metall: Mycket torr.	Betong inuti byggnader med mycket låg luftfuktighet.
2 Korrosion föranledd av karbonatisering		
XC1	Torr eller ständigt våt.	Betong inuti byggnader med låg luftfuktighet. Betong ständigt stående under vatten.
XC2	Våt, sällan torr	Betongytors utsatt för långvarig kontakt med vatten. Många grundkonstruktioner.
XC3	Måttlig fuktighet	Betong inuti byggnader med måttlig eller hög luftfuktighet. Utvändig betong skyddad mot nederbörd.
XC4	Cykliskt våt och torr	Betongytors i kontakt med vatten, inte tillhörande exponeringsklass XC2.
3 Korrosion orsakad av andra klorider än de från havsvatten		
XD1	Måttlig fuktighet	Betongytors utsatta för luftburna klorider.
XD2	Våt, sällan torr	Simbassänger. Betong utsatt för industrivatten innehållande klorider.
XD3	Cykliskt våt och torr	Brodelar utsatta för stänk innehållande klorider. Beläggningar. Bjälklag i parkeringsanläggningar.
4 Korrosion orsakad av klorider från havsvatten		
XS1	Utsatt för luftburet salt men inte i direkt kontakt med havsvatten.	Bärverk nära eller vid kusten.
XS2	Ständigt under havsytan.	Delar av bärverk belägna i havet.
XS3	Tidvatten-, skvalp- och stänkezoner.	Delar av bärverk belägna i havet.
5 Angrepp av frysning/ tining		
XF1	Inte vattenmättad, med avisningsmedel.	Vertikala betongytors utsatta för regn och frysning.
XF2	Inte vattenmättad, utan avisningsmedel.	Vertikala betongytors hos vägbyggnadsbärverk utsatta för frysning och luftburna avisningsmedel.
XF3	Nära vattenmättad, utan avisningsmedel.	Horisontella betongytors utsatta för regn och frysning.
XF4	Nära vattenmättad, med avisningsmedel eller havsvatten.	Väg- och brofarbanors utsatta för avisningsmedel. Betongytors utsatta för direkt stänk innehållande avisningsmedel och frysning. Skvalpzonen på bärverk i havet utsatta för frysning.

För pÅlar som utsätts av kemiska angrepp delas de upp i exponeringsklass XA1-XA3 enligt tabell från SS-EN 1992-1-1:2005, avsnitt 4.2 (SIS, 2005b). Där hänvisas det till SS-EN 206-1 (har ersatts av SS-

EN 206:2013+A2:2021), tabell 2 (SIS, 2013b). I tabell 2 i SS-EN 206:2013+A2:2021 (SIS, 2013b) redovisas gränsvärden för respektive exponeringsklass med avseende på kemiskt angrepp från naturlig jord och grundvatten, se Tabell 3.4 och Tabell 3.5.

Tabell 3.4 Exponeringsklasser för kemiska angrepp, baserat på SS-EN 206:2013+A2:2021 (SIS, 2013b).

Beteckning av klass	Beskrivning av miljö	Exempel, informativa, där exponeringsklassen kan förekomma
6 Kemiskt angrepp		
XA1	Obetydligt kemiskt aggressiv miljö enligt SS-EN 206, tabell 2.	Naturliga jordar och grundvatten.
XA2	Måttligt kemiskt aggressiv miljö enligt SS-EN 206, tabell 2.	Naturliga jordar och grundvatten.
XA3	Mycket kemiskt aggressiv miljö enligt SS-EN 206, tabell 2.	Naturliga jordar och grundvatten.

Tabell 3.4 utgår från exponeringsklasser enligt SS-EN 1992-1-1:2005 (SIS, 2005b) där avsnitt 4.2 beskriver exponeringsklasser utifrån den miljöpåverkan, d.v.s. de kemiska och fysiska förhållanden som pålen påverkas av utöver de mekaniska lasterna. I SS-EN 1992-1-1:2005 (SIS, 2005b) påpekas också att särskilda former av aggressiv eller indirekt påverkan såsom kemiska angrepp från syror eller sulfater för betongpålar i sulfidjord, klorider i betongen, nötning och temperaturändring bör beaktas. I Tabell 3.5 listas de mest ogynnsamma värdena för en enstaka kemisk komponent som bestämmer exponeringsklassen.

Tabell 3.5 Gränsvärden för kemiskt angrepp, baserat på SS-EN 206:2013+A2:2021 (SIS, 2013b).

Nedanstående klassindelning av kemiskt aggressiva miljöer gäller för naturlig jord och grundvatten med temperaturen mellan 5° C och 25° C och vid så låg hastighet hos vattnet att förhållandena kan betraktas som stillastående.				
Det mest ogynnsamma värdet för en enstaka kemisk komponent bestämmer klassen.				
När två eller flera aggressiva kemiska komponenter leder till samma klass, ska miljön hänföras till närmast högre klass, såvida inte en särskild utredning för detta speciella fall påvisar att detta inte är nödvändigt.				
Kemisk komponent	Referensmetod för provning	XA1	XA2	XA3
Grundvatten				
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	EN 196-2	≥200 och ≤600	>600 och ≤3000	>3000 och ≤6000
pH	ISO 4316	≤6,5 och ≥5,5	<5,5 och ≥4,5	<4,5 och ≥4,0
CO ₂ (mg/l aggressiv)	EN 13577	≥15 och ≤40	>40 och ≤100	>100 upp till mättnad
NH ₄ ⁺ (mg/l)	ISO 7150-1	≥15 och ≤30	>30 och ≤60	>60 och ≤100
Mg ²⁺ (mg/l)	EN ISO 7980	≥300 och ≤1000	>1000 och ≤3000	>3000 upp till mättnad
Jord				
SO ₄ ²⁻ (mg/kg) ^{1)total}	EN 196-2 ²⁾	≥2000 och ≤3000	>3000 och ≤12000	>12000 och ≤24000
Surhet Bauman Gully (ml/kg)	prEN 16502	>200	Påträffas inte i praktiken	
1) Leriga jordar med permeabilitet under 10 ⁻⁵ kan hänföras till lägre klass. 2) Provningsmetoden föreskriver att extraktion av SO ₄ ²⁻ ska ske med saltsyra. Alternativt kan extraktion ske med vatten om erfarenhet av detta föreligger på platsen för betongens användning. 3) Gränsen 3000 mg/kg sänks till 2000 mg/kg där det finns risk för att sulfatjoner ackumuleras i betongen på grund av växlande uttorkning och nedfuktning eller kapillarsugning.				

3.1.5.1.3 Livslängdsklass

Den avsedda livslängden för konstruktionen är viktig vid val av parametrar som påverkar beständigheten. Livslängd delas upp i livslängdsklasser. Livslängdsklass styrs av SS-EN 1990:2002 (SIS, 2002)

och gällande nationella bilagor från Boverket (EKS) (Boverket, 2011 och 2022) respektive Transportstyrelsen (TSFS) (Transportstyrelsen, 2018) om inget annat står.

- Livslängdsklass L20 avser konstruktioner med en förväntad livslängd av minst 20 år.
- Livslängdsklass L50 avser konstruktioner med en förväntad livslängd av minst 50 år.
- Livslängdsklass L100 avser konstruktioner med en förväntad livslängd av minst 100 år.

Livslängdsklass L 20, L 50 och L 100 i SS-EN 1992-1-1:2005 (SIS, 2005b) och SS-EN 1992-2:2005 (SIS, 2005c) motsvarar avsedda tekniska livslängder 40, 80 respektive 120 år enligt TRVINFRA-00227 (Trafikverket, 2025a).

Pålar anses oftast vara "inte åtkomliga för inspektion och underhåll" och därför väljs ofta livslängdsklass L100, d.v.s. minst 100 år som livslängd.

3.1.5.1.4 Täckande betongskikt

Täckande betongskikt är avståndet mellan betongytan och den armering som är närmast ytan. Prefabricerade pålar utförs normalt med 25 mm tjockt täckande betongskikt. För grävpålar krävs vanligtvis avsevärt större täckande betongskikt. Vid armeringsaggressiv miljö utförs pålar med ett större täckande betongskikt. I SS-EN 1992-1-1:2005, avsnitt 4.4.1.1 (2005b) definieras nominell tjocklek på täckande betongskikt som ska anges på ritningar.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

Ekvation 3-1

där c_{min} (se SS-EN 1992-1-1:2005, avsnitt 4.4.1.2 (SIS, 2005b)) är det minsta täckande betongskikt och Δc_{dev} (se SS-EN 1992-1-1:2005, avsnitt 4.4.1.3 (SIS, 2005b) samt SS-EN 12794:2005, avsnitt 4.3.1.1 (SIS, 2005a)) är ett tillägg för att kompensera för avvikelser och utförandetoleranser. På ritningar skrivs c_{nom} vanligtvis som täckande betongskikt TB. Värdet på Δc_{dev} är vanligtvis +10/-10 mm. I vissa fall kan toleransen minskas och då kan värdet på Δc_{dev} minskas. Om tillverkningen av pålelementen är underkastat ett tillverkningssystem som innefattar kontrollmätning av täckande betongskikt får värdet på Δc_{dev} minskas enligt SS-EN 1992-1-1:2005, avsnitt 4.4.1.3 (SIS, 2005b). Värdet på Δc_{dev} kan då skrivas +10/-5 mm.

Prefabricerade betongpålar gjuts vanligtvis med betong i hållfasthetsklasser mellan C40/50 och C60/75 med den alltigenom förhärskande hållfasthetsklassen C50/60. Normalt utförs de med täckande betongskikt på 25 mm och i exponeringsklass XC2/ XF1. Vid armeringsaggressiv miljö utförs prefabricerade betongpålar med 45-50 mm täckande betongskikt.

Vanligtvis hänförs pålar till livslängdsklass L100 och täckande betongskikt (TB) väljs enligt Tabell 3.6 och Tabell 3.7.

Tabell 3.6 Exponeringsklass med korresponderade täckande betongskikt och $v_{ct_{ekv}}$, baserat på SS-EN 1992-1-1:2005 (SIS, 2005b).

Exponeringsklass	TB [mm] ⁽¹⁾	$v_{ct_{ekv}}$
XC2	25	≤ 0,50
XS1	40	≤ 0,45
XS3 ⁽²⁾	50 ⁽²⁾	≤ 0,35

(1) Inklusive utförandetolerans +10/-10 mm

(2) Svårt att uppnå för prefabricerade betongpålar. Pålar i skvalpzon bör därför skyddas med pågjutning inom skyddsör.

Tabell 3.7 Minsta täckande betongskikt med hänsyn till beständighet för armering (BFS 2022:4, EKS 12, tabell D-1 (Boverket, 2022)).

Exponeringsklass	Bindemedels-sammansättning	Max vct _{ekv}	L 100	L 50	L 20
X0	Alla ^{2) 3)}	-	-	-	-
XC1	Alla ^{2) 3)}	0,90 0,60	15 10	10 10	10 10
XC2	Minst 80% PC-klinker ²⁾	0,60	25	20	15
		0,55	20	15	10
		0,50	15	10	10
	Mindre än 80% PC-klinker ^{2) 3)}	0,55	25	20	15
		0,50	20	15	10
		0,45	15	10	10
XC3, XC4	Minst 80% PC-klinker ²⁾	0,55	25	20	15
		0,50	20	15	10
	Mindre än 80% PC-klinker ^{2) 3)}	0,50	25	20	15
		0,45	20	15	10
XS1, XD1	Alla ^{2) 3)}	0,45	30	25	15
		0,40	25	20	15
XD2	Alla ^{2) 3)}	0,45	40	30	25
		0,40	35	30	20
		0,35	30	25	20
XD3	Alla ^{2) 3)}	0,40	45	35	25
		0,35	40	30	25
XS2 ¹⁾	Alla ^{2) 3)}	0,45	50	40	30
		0,40	45	35	25
		0,35	40	30	25
XS3 ¹⁾	Alla ^{2) 3)}	0,40	45	35	25
		0,35	40	30	25
1) Angivna täckande betongskikt gäller för en kloridkoncentration i havet av högst 0,4% (ostkusten), vilket motsvarar en salthalt på ungefär 0,7%. För högre kloridkoncentrationer kan särskilda värden på minsta täckande betongskikt anges i varje enskilt fall. 2) Angivna värden på minsta täckande betongskikt gäller när portlandcementklinker (PC), flygaska, mald granulerad masugnsslagg, silikastoft eller kalksten ingår i bindemedlet. Om andra cementsättningsmaterial ingår kan högsta tillämplbara vct_{ekv} vara lägre och värden på täckande betongskikt behöva justeras. 3) Om mer än 20% kalksten ingår i bindemedlet kan högsta tillämplbara vct_{ekv} vara lägre och värden på täckande betongskikt behöva justeras. För byggnadsverk i exponeringsklass XA1 – XA3 kan särskilda värden på minsta täckande betongskikt anges i varje enskilt fall.					

3.1.5.1.5 Begränsning av sprickbredd

Sprickbildning uppstår normalt i betongkonstruktioner som är utsatta för böjning, vridning, drag eller skjuvning. Sprickvidden bör dock begränsas med hänsyn till beständigheten. En övre gräns, w_{max} , för beräknad sprickvidd w_k , kan bestämmas enligt SS-EN 1992-1-1:2005, avsnitt 7.3.1 (SIS, 2005b). Den övre rekommenderade sprickgränsen, w_{max} , beror på vilken exponeringsklass pålen hänförs till, se Tabell 3.8. Exponeringsklasser beskrivs i SS-EN 1992-1-1:2005, avsnitt 4.2 (SIS, 2005b).

Tabell 3.8 Tillåten beräknad sprickbredd $w_{\max}$ (mm) för olika exponeringsklasser och livslängdsklasser, baserat på SS-EN 1992-1-1:2005 (SIS, 2005b och nationella bilagor EKS (Boverket, 2022) och TSFS (Transportstyrelsen, 2018).

Exponeringsklass	Livslängdsklass		
	L 100	L 50	L 20
XC2	0,40	0,45	*
XC3, XC4	0,30	0,40	*
XS1, XS2, XD1, XD2	0,20	0,30	0,40
XS3	0,15	0,20	0,30

* Inget krav

3.1.5.1.6 Hållfasthetsklass

Betongens sammansättning påverkar beständigheten hos betongen och armeringen. Det kan behövas en högre hållfasthetsklass med hänsyn till beständigheten än vad det behövs med hänsyn till statisk dimensionering. I SS-EN 1992-1-1:2005, Bilaga E (SIS, 2005b) ges förslag på hållfasthetsklasser för de olika exponeringsklasserna. Om en högre hållfasthetsklass krävs med hänsyn till beständighet är det f_{ctm} för den högre hållfasthetsklassen som ska användas vid bestämning av minimiarmering och sprickvidd.

3.1.5.1.7 Vattencementtal

Det täckande betongskiktets täthet och kvalitet uppnås genom övre begränsning av vattencementtalet och undre begränsning av bindemedelsmängden (se SS-EN 206:2013+A2:2021 (SIS, 2013b)) och får relateras till en minsta hållfasthetsklass för betongen. Tabell 8a i SS 137003:2021, Betong - Användning av SS-EN 206:2013+A2:2021 i Sverige (SIS, 2025) redovisar krav på största vattencementtal ($v_{ct_{ekv}}$).

I SS-EN 206 finns enbart beteckningen vct för vattencementtal. Vid användning av andra bindemedel än cement får de räknas med vid beräkningen av vct. Vattencementtalet inklusive andra bindemedel har tidigare även benämnts vattenbindemedelstalet med beteckningen vbt. I standarden I SS 137003:2021+T2:2025 (SIS, 2025) som styr tillämpningen av SS-EN 206 i Sverige införs beteckningen $v_{ct_{ekv}}$. Där beskrivs hur olika bindemedel ska medräknas, se SS 137003:2021+T2:2025, avsnitt 5.2.5. I Pålhandboken används beteckningen $v_{ct_{ekv}}$ i enlighet med SS 137003:2021+T2:2025.

Vid frysning/tining av betong och vid risk för kemiska angrepp, d.v.s. exponeringsklasser XF och XA, bör betongens sammansättning ses över, se SS-EN 206:2013+A2:2021, kapitel 6 (SIS, 2013b) och SS 137003:2021+T2:2025, Betong – Användning av SS-EN 206:2013+A2:2021 i Sverige, avsnitt 5.3 (SIS, 2025). Tabell 9 i SS 137003:2021+T2:2025, redovisar krav på frostresistent ballast, lägsta bindemedelshalt och när betongens frostresistens behöver provas.

För svensktillverkade prefabricerade betongpålar är kraven i Tabell 3.9 avseende $v_{ct_{ekv}}$ i normalfallet att betrakta som standard. Det kan möjligen finnas något betongrecept med $v_{ct_{ekv}}$ på 0,45.

I SS 137003:2021+T2:2025 (SIS, 2025) har kraven med avseende på exponeringsklasser delats upp med avseende på cementtyp och i viss mån tillsatsmedel, se SS 137003:21+T2:2025, avsnitt 5.3, tabell 7, 8, 9 och 10. I princip är krav avseende frostbeständighet och högsta $v_{ct_{ekv}}$ oförändrade i förhållande till kraven i SS 137003:2015 (SIS, 2015c), redovisade i Tabell 3.9. För projektörer ger Tabell 3.9 en bra överblick över kraven. För påltillverkare hänvisas till de fullständiga kraven i SS 137003:21+T2:2025.

Tabell 3.9 Utdrag ur SS 137003:2015, tabell 8a (SIS, 2015c). Tabellen ger en bra överblick över kraven. För fullständiga krav som behövs för tillverkning av pålelementen, se SS 137003:2021+T2:2025, avsnitt 5.3, tabell 7, 8, 9 och 10 (SIS, 2025).

Kravelement	Exponeringsklass																	
	Ingen risk för korrosion eller angrepp	Korrosion föranledd av karbonatisering				Korrosion föranledd av klorider						Angrepp av frysning/upptining				Kemiskt angrepp		
						Från havsvatten			Andra än från havsvatten									
		X0	XC 1 ^{a)}	XC 2	XC 3	XC 4	XS 1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF 1	XF 2	XF 3	XF 4	XA 1	XA 2
Högsta $v_{ct,skv}$	–	0,90	0,60	0,55	0,55	0,45	0,45	0,40	0,45	0,45	0,40	0,60	0,45	0,55 ^{b)}	0,45	0,50	0,45	0,40
Lägst bindemedels-halt ^{c)} C_{ekv} i kg/m ³	–	–	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Frostresistent ballast	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	ja	ja	ja	ja	–	–	–
Provning av betongs frostresistens	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	ja	–	–	–
Lägst lufthalt eller provning av frostresistens	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	ja	ja	–	–	–	–

a) Konstruktionen ska utföras i minst hållfasthetsklass C12/15 respektive LC12/13.

b) Högsta $v_{ct,skv}$ 0,45 vid användning av CEM II/B-S, CEM II/B-V och CEM II/B-M vid ständigt hög fuktbelastning, t ex i delar av vattenkraftanläggningar.

c) Angivet lägsta C_{ekv} utgör en gräns för att erhålla en homogen betong. Erforderlig C_{ekv} styrs av krav beträffande $v_{ct,skv}$.

ANM. För konstruktioner under mark där sulfathalten överskrider 200 mg/l i vatten eller 1200 mg/kg i mark bör $v_{ct,skv}$ väljas till högst 0,50.

3.1.5.1.8 Pålbeslag

En analys av vilka spalter som kan uppstå på och i de olika pålbeslagen, visar att dessa kan variera från 5-10 mm för träpålar till 1-2 mm för betong- och stålpålar samt för bergskor. I betongpålskarvens inre delar är spalterna endast 0,3-1,4 mm och utrymmet är dessutom tillslutet av en låsbricka och den grövre delen av låspinnen. Analysen har baserats på toleranser från tillverkningsritningar och ett tilllägg, som bedömts uppstå till följd av slagning.

Avgörande för korrosionens storlek på olika delar av beslagen är spalternas storlek och eventuell omsättning av jord och syresatt vatten i dessa. Teoretiska beräkningar visar att korrosionen i ovan nämnda spalter och hålrum totalt blir mycket liten, endast 0,002-0,014 µm under antagande att ingen omsättning av materialet i spalterna sker. Om i stället extrapolering av erfarenhetsvärden från korrosionen i fritt vatten och jord görs, erhålls korrosionshastigheter mellan 0,5-8,0 µm/år i skarvglappen för pålarna och 0,05-1,05 µm/år för de inre hålrummen i betongpålskarvarna. De högre av dessa värden har ansatts som karakteristiska värden på korrosionshastigheten. Dimensionerande värden på korrosionshastigheten har erhållits genom multiplicering med partialkoefficienten 1,5.

Med ledning av bedömda korrosionshastigheter och Pålkommissionens dimensioneringsanvisningar i Teknisk PM 1:2008 (Pålkommissionen, 2008) har korrosionen för olika delar av pålbeslagen ansatts med dimensionerande värden i mm/100 år, som kan användas vid dimensionering av beslagen. Följande värden föreslås:

- för rörskarv till träpåle-träpåle och träpåle-betongpålar utvändigt: 1,0 mm/100 år
- för betongpålskarvens inre slutna delar: 0,2 mm/100 år (alla ytor)
- för betongpålskarvens övre och undre bottenplattor: 1,0 mm/100 år
- för bergskor i spalt mellan hylsa och bergdubb: 1,0 mm/100 år (alla ytor)
- för hylsskarv till stålpåle i invändig spalt: 1,0 mm/100 år (alla ytor).

För ståltytor med direkt anliggning mot jord gäller dimensioneringsanvisning enligt Pålkommisionens Rapport 98 (Pålkommisionen, 2000). Ett alternativ till att dimensionera skarvbeslagen med en rostmån kan vara att skydda dem eller delar därav genom infettning förutsatt att fettet skyddas från avnötning under påslagningen. Samma värden som ovan gäller också enligt Trafikverkets krav TRVINFRA-00227, Bro och broliknande konstruktioner, Byggnade (Trafikverket, 2025a) för 120 års teknisk livslängd (TRVINFRA-00227, 5.4.3.4 Påldetaljer).

3.1.5.2 Stålpålar

3.1.5.2.1 Allmänt

Beständighet hos stålpålar påverkas av korrosion, avnötning och liknande företeelser. Korrosionshastigheten är beroende av den omgivande jordens och grundvattnets (eller det fria vattnets) egenskaper. Korrosion i jord beror främst av närvaron av grundvatten, tillförsel av syre, vattnets kemiska sammansättning, jordens redoxpotential, pH-värde och resistivitet samt mikrobiell aktivitet. Korrosionshastigheten varierar på olika nivåer längs pålen beroende på pålens omgivningsförhållanden. För slutna stålrospålar är korrosionshastigheten långsammare på insidan än på utsidan då tillförsel av nytt syresatt vatten förhindras.

Åtgärder mot korrosion

Stålpålar som utsätts för korrosion kan förses med korrosionsskydd eller dimensioneras med hänsyn till avrostning. Olika typer av korrosionsskydd är:

- kringgjutning, ofta i kombination med ett foderrör eller som en ishylsa
- igjutning i pålen
- ytbeläggningar
- ökad tjocklek för att kompensera för korrosion (rostmån)
- katodiskt skydd.

Man kan också kombinera de olika korrosionsskydden, t.ex. genom att skydda särskilt utsatta delar av pålen med betong och samtidigt ha en ökad godstjocklek.

3.1.5.2.2 Kringgjutning

Genom att skydda stålet med utanpåliggande betong minskar risken för korrosion. Ett relativt vanligt sätt att skydda stålpålar vid skvalpzoner är genom ett yttre rör/foderrör utanpå pålen där man fyller utrymmet mellan foderrör och påle med betong. Nederkant på rören bör placeras cirka 1 m under medellågvattennivån. Tjockleken på betongen, d.v.s. fritt utrymme mellan yttre rör och stålpåle bör vara minst 50-60 mm. Ett yttre rör/foderrör med skyddande betong mellan foderrör och stålpåle kan även användas för att skydda pålar i jord.

3.1.5.2.3 Ytbeläggningar

Ytbeläggningar i form av skyddsmålning och varmförzinkning kan vara svåra att säkerställa/verifiera efter installation av påle. Risken för skador på ytskiktet är överhängande.

3.1.5.2.4 Ökning av godstjocklek

Ofta är en ökning av godstjockleken på utsatta delar den mest ekonomiska lösningen för att ta hänsyn till korrosion och på så sätt dimensionera med hänsyn till avrostning. Genom att öka godstjockleken

och räkna med en avrostning/rostmån kan beständigheten tillgodoses. Avrostningen/rostmånen beror på omgivningens påverkan och livslängden på konstruktionen.

3.1.5.2.5 Rostmån i jord

I Tabell 3.10 redovisas dimensionerande rostmån för 100 år i jord från Pålkommisionen Teknisk PM 4:2015, Korrosion av stålkonstruktioner med lång förväntad livslängd – nuläggessammanställning (Pålkommisionen, 2015).

Tabell 3.10 Dimensionerande rostmån för 100 år i jord (Pålkommisionen, 2015).

Förhållande	Över GW*	Under GW
Ostörd jord (sand, grusiga morän)	1,2	1,0
Ostörd jord (lera, silt, leriga/siltiga moräner)	2,0	1,0
Packad icke aggressiv fyllning (okontrollerad naturlig jord)	2,2	1,0
Icke packad icke aggressiv fyllning (okontrollerad naturlig jord)	2,9	1,0
Förorenad naturlig jord och jord i industriområde	3,0	1,0
Aggressiv naturlig jord (kårr, gyttja, torv etc.)	3,0 (3,25**)	1,0
Packad aggressiv fyllning (askor, slagg etc.)	2,9	1,0
Icke packad aggressiv fyllning (askor, slagg etc.)	5,75	1,0
Jord innehållande kol eller koks	K	1,0
Jord som genomsätts av havsvatten och marina leror	K	1,0
Läckström	U	U
Påle/ spont som går genom markytan	K	1,0

* Inkluderar också ner till 1 m under grundvattenytan.

** Från SS-EN 1993-5:2007 (SIS, 2007)

U = förundersökning krävs.

K = Korrosionsskydd krävs på konstruktionens övre del.

I avsnitt 4.4 i SS-EN 1993-5:2007 (SIS, 2007), tabell 4-1, redovisas också rekommenderad rostmån. Denna har arbetats in i Tabell 3.11. Tabellen kan ändras med nationella val, men så har ännu inte skett i Sverige.

Tabell 3.11 Rekommenderade avfrätningsvärden [mm] för pålar och spont i jordmaterial, med eller utan grundvatten (Tabell 4-1, SS-EN 1993-5 (SIS, 2007)).

Erforderlig livslängd, år	5	25	50	75	100
Ostörda naturliga jordar (sand, silt, lera, skiffer)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Förorenade naturliga jordar och industriområden	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Aggressiva naturliga jordar (kårr, sumpmark, torv)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Opackade icke aggressiva fyllningar (lera, skiffer, sand, silt)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Opackade aggressiva fyllningar (aska, slagg)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

Vidare anges att korrosionshastigheten är lägre i packade fyllningar jämfört med opackade fyllningar. För packade fyllningar bör värdena i tabellen halveras.

I de fall SS-EN 1993-5:2007 (SIS, 2007) ger ett högre värde för över grundvattenytan redovisas dessa inom en parentes i Tabell 3.10. Tabellen skiljer sig dock från SS-EN 1993-5:2007 då man i SS-EN 1993-5:2007 ej skiljer på över och under grundvattennivån (GW).

I Trafikverkets krav TRVINFRA-00227, Bro och broliknande konstruktioner, Byggnad (Trafikverket, 2025a) återfinns i 5.4.3.2.2.1 värden för pålars rostmån över tiden 120 år, se Tabell 3.12.

Tabell 3.12 Utvändig rostmån [mm] för stålplåtar enligt TRVINFRA-00227 (Trafikverket, 2025a).

	Över gvy	Under lägsta gvy
Ostörd sand, grus eller sandig eller grusig morän	1,5	2
Ostörd lera, silt eller lerig eller siltig morän	2,5	2
Packad icke aggressiv fyllning	3	2
Icke packad icke aggressiv fyllning	3,5	2
Förorenad naturlig jord	3,5	2
Aggressiv naturlig jord tex kärr, gytta eller torv	3,5	2
Aggressiv fyllning tex aska eller slagg	7	2

Tabellen gäller endast om jorden inte innehåller kol eller koks. Ett ytterligare krav är att påle i jord ska förses med korrosionsskydd ovan nivån 0,5 m under bottenplattans underkant om en stadigvarande vattenyta kan förekomma kring en nivå mellan underkant bottenplatta och 0,3 m lägre.

3.1.5.2.6 Rostmån i luft

I luft anses korrosion vara 0,01 mm/ år i normal atmosfär och 0,02 mm/ år för platser där marin miljö kan påverka korrosionen enligt SS-EN 1993-5:2007 (SIS, 2007).

3.1.5.2.7 Rostmån i vatten

I Sverige är tidvattenvariationerna små vilket medför att både tidvattenzonen och lågvattenzonen kan bortses ifrån.

Högst korrosionshastighet uppstår i skvalpzonen. Förutom en förhöjd jämn korrosion angrips stålet av gropkorrosion. Därför kan slutsatsen dras att dimensionering med rostmån knappast är möjligt för en stålplåta med 100 års livslängd utan stora skador i skvalpzonen. Skvalpzonen bör därför skyddas. Om åtgärder vidtas för att skydda skvalpzonen, kan stålplåtens livslängd baseras på en rostmån dimensionerad för undervattenzonen.

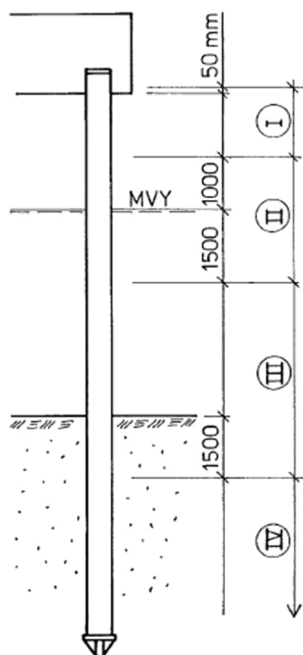
För 100 års livslängd måste således förebyggande åtgärder vidtas i skvalpzonen. För övriga delar föreslås dimensionering med rostmån ske enligt Figur 3.4 och Tabell 3.13.

Tabell 3.13 Dimensionering med rostmån i olika områden.

Område	Sötvatten mm/100 år	Bräckt och saltvatten mm/100 år	Skiktat vatten mm/100 år
I			
II	*	*	*
III	4,5	7,5	4,5-7,5
IV	**	**	**

*) Om åtgärder vidtas för att skydda skvalpzonen kan plåtens livslängd baseras på en rostmån dimensionerad för undervattenzonen III.

**) Enligt tabell för rostmån i jord, se Tabell 3.10-3.12.



Figur 3.4 Olika områden med dimensionerande rostmån.

I de fall pålen exponeras för strömmande vatten eller propellerrörelser krävs extra rostmån. Ökningen av korrosionshastigheten kan utvärderas på basis av flödeshastighetens årsmedelvärde, se Swerea Kimab rapport 11659:4 (Taxen och Strandberg, 2015).

Vid pålar i bräckt eller salt vatten ska även risk för mikrobiell korrosion kontrolleras.

I SS-EN 1993-5:2007, tabell 4-2 (SIS, 2007), som inte är försedd med några nationella val, återfinns rekommenderade avfrättningsvärden i [mm] för pålar i sötvatten eller havsvatten, se Tabell 3.14.

Tabell 3.14 Rekommenderade avfrättningsvärden [mm] för pålar och spont i sötvatten eller i havsvatten (Tabell 4-2, SS-EN 1993-5:2007) (SIS, 2007).

Erforderlig livslängd, år	5	25	50	75	100
Vanligt sötvatten (älv, fartygskanal) i zon med stort angrepp (vattenlinjen)	0,15	0,55	0,90	1,15	1,40
Kraftigt förorenat sötvatten (avloppsvatten, industriutlopp) i zon med stort angrepp (vattenlinjen)	0,30	1,30	2,30	3,3	4,30
Havsvatten i tempererat klimat i zon med stort angrepp (lågvattnen-zon och skvalpzon)	0,55	1,90	3,75	5,60	7,50
Havsvatten i tempererat klimat i zon ständigt under vatten eller i tid-vattenzon	0,25	0,90	1,75	2,60	3,50

Dessa värden skiljer sig i många fall kraftigt ifrån svenska erfarenheter. En anledning till detta kan vara skillnaden i pH, som på kontinenten ofta är högt, bl.a. beroende på förekomst av kalkberg. I Skandinavien och Finland är pH ofta mycket lägre.

I Trafikverkets kravdokument TRVINFRA-00227, Bro och broliknande konstruktioner, Byggande (Trafikverket, 2025a) 5.4.3.2.2.2 är rostmånen i sötvatten satt till 5,5 mm över 120 år. Står pålen i fritt salt eller bräckt vatten anges ingen rostmån/korrosionshastighet utan den ska istället förses med korrosionsskydd.

3.1.5.2.8 Rostmån invändigt i rörpåle

Genom att fylla pålen med betong kan avrostning inne i pålen förhindras. Korrosion inuti betongfyllda pålar får försummas, om inget annat anges, enligt avsnitt 4.2 i SS-EN 1993-5:2007 (SIS, 2007). I icke betongfyllda rör är tillförseln av nytt syre inne i pålen mycket begränsad. Den invändiga rostmånen kan därför sättas till 0,5 mm på 100 år i en icke betongfylld stålrörspåle (Pålkommisionen, 2015). Trafikverkets krav enligt TRVINFRA-00227, Bro och broliknande konstruktioner, Byggnade (Trafikverket, 2025a) är istället 1,2 mm på 120 år enligt TRVINFRA-00227, 5.4.3.2.1, vilket sannolikt baseras på rekommendationen att invändig rostmån kan sättas till 1,0 mm på 100 år enligt Teknisk PM 1:2008 (Pålkommisionen, 2008).

3.1.5.2.9 Katodiskt skydd

Vid katodiskt skydd matas en svag likström, en så kallad skyddsström, ut genom jorden eller vatten till stålytan. Ytan blir så elektrisk negativ att korrosionen upphör. Strömmen kan alstras på två olika sätt. Därför benämns de två olika katodiska skydden som skydd med offeranoder och skydd med påtryckt ström. Katodiskt skydd av pålar i jord är ovanligt medan skydd av pålar i vatten är vanligare. Normalt skyddas hela konstruktionen men i medier med högre resistivitet som jord, sötvatten och bräckt vatten kan även ett lokalt skydd installeras.

Katodiska skydd med påtryckt ström måste kontrollmätas. Mättekniken beskrivs i SS-EN 13509 (SIS, 2003). Katodiskt skydd i hamnar kan påverkas och skadas av bl.a. bogpropellerströmmar.

3.1.5.3 Borrade injekterade pålar

3.1.5.3.1 Allmänt

Vid borrade injekterade pålar kan beständighetskravet tillgodoses med hjälp av:

- det skikt av bruk som omger stålpålen
- eventuellt omgivande foderrör vid passage genom t.ex. sprängsten eller lösa jordlager
- invändig utfyllnad med bruk
- beläggning av plast och/eller zink på stålpålen
- korrosionsbeständigt material i stålpålen.

Markmiljöns korrosivitet är starkt beroende av jordart och läge i förhållande till grundvattenytan, vilket kan leda till varierande korrosionsskydd längs pålen. Beständighetsdimensionering måste ske för varje enskilt pålningsobjekt, med omfattning och kompetenskrav beroende av rådande förhållandens komplexitet.

3.1.5.3.2 Bruk och eventuellt foderrör

I en injekterad påle blir normalt hålrummet inuti borrstål och eventuellt foderrör fullständigt utfyllt med bruk, vilket ger ett fullgott skydd mot invändig korrosion, se även avsnitt 3.1.5.2.8 om igjutning i stålpålar.

Även det hålrum som bildas omkring borrstål på grund av att borrkronan har större diameter utfylls normalt med bruk som bidrar till korrosionsskyddet. På grund av injekteringstrycket kan dessutom i vissa jordarter brukroppens diameter komma att öka avsevärt, upp till 2,5 ggr borrkronans diameter, vilket ger ökat täckskikt.

Erforderligt täcksikt (minsta täckande betongssikt) bestäms för aktuell miljöklass och aktuellt $v_{ct,ekv}$, förutsatt att stålaterialet kan klassificeras som föga korrosionskänsligt (icke förspänt). I annat fall tillkommer 10 mm.

Teoretiskt kan på detta sätt i de flesta fall tillräckligt täcksikt påvisas. Det finns dock en risk för lokalt mindre täcksikt, t.ex. genom bristfällig centrering i hålet eller inblandning av jordpartiklar i bruket och resultatet är praktiskt taget omöjligt att kontrollera. Liksom vid bestämning av bärförmåga och styvhet hos pålen bör därför försiktighetsprincipen tillämpas vid bedömningen av vilket täcksikt som kan betraktas som säkerställt i det enskilda fallet. Framschaktade provkroppar för det aktuella fallet eller andra fall med snarlika förhållanden kan därvid ge god vägledning.

Vid användning av foderrör, t.ex. för att möjliggöra injektering i mycket genomsläppliga jordlager eller för att öka pålens styvhet och konstruktiva bärförmåga i lösa jordlager, ger röret i kombination med bruket normalt fullgott korrosionsskydd åt pålen såväl vid användning av plaströr som stålrör. Röret medför också en tillförlitlig centrering av stålpålen.

3.1.5.3.3 Varmförzinkning

Med de avfrätningshastigheter som anges i Pålkommisionens rapport 98, tabell 7.94 (Pålkommisionen, 2000), framgår att enbart varmförzinkning av stålmaterial eller pålrör inte kan ge fullgott korrosionsskydd. Kombinationen med ett något knappt täcksikt av bruk kan dock bli tillfredsställande. Vid för kort livslängd hos korrosionsskyddet kan även kombination ske med en reducerad rostmån.

Risken för repsskador vid installation är relativt liten vid injekterade pålar. Varmförzinkningens låga känslighet för sådana skador är därför av mindre betydelse i detta fall.

3.1.5.3.4 Organiska beläggningar

En tjock, extruderad plastmantel på pålröret ger tillsammans med täcksiktet av injekteringsbruk i de allra flesta fall ett fullgott korrosionsskydd. Tunnare plastbeläggningar eller målningsbehandlingar av olika slag bör bedömas från fall till fall i kombination med täcksikt och eventuell rostmån med hänsyn till markmiljöns korrosivitet.

Vidare förekommer s.k. Combi Coat, epoxibeläggning på varmförzinkad yta, där plastskiktet reducerar zinkens avfrätningshastighet och på det sättet förlänger skyddets livslängd avsevärt.

Beläggningens reptålighet och förmåga att förhindra underkorrosion vid skada är på grund av det skonsammare installationsförfarandet av mindre betydelse vid injekterade pålar jämfört med vanliga slagna stålpålar.

3.1.5.3.5 Rostmån

Att lägga till utvändig rostmån på borrhålet ger ingen ökad livslängd för en borrhålad injekterad påle. Om stålet börjar rosta kommer rostprodukterna relativt snabbt expandera och spjälka bort bruket varvid mantelbärförmågan försvinner. Samtidigt minskar eller försvinner injekteringskroppens positiva inverkan på knäckningsberäkningen för den konstruktiva bärförmågan.

3.1.5.3.6 Korrosionsbeständigt material

För särskilt aggressiva miljöer samt vid krav på avsevärt längre livslängd än normalt eller s.k. dubbelt korrosionsskydd finns vissa borrhåstål i rosttrögt material, närmare bestämt ferritiskt-austenitiskt stål med 22 % krom.

3.1.5.4 Trä

I SS-EN 1995-1-1:2004 (SIS, 2004) behandlas inte träpålar.

Nedanstående avsnitt baseras på rapporten "Beständighet av trägrundläggningar" (Boutelje, 2000), Rapporten togs fram som underlagsmaterial till Pålkommisionens projekt Gemensamma dimensioneringsprinciper, som genomfördes under slutet på 1990-talet och början på 2000-talet.

3.1.5.4.1 Allmänt om träets biologiska beständighet

Vid de flesta användningar är trä utomordentligt motståndskraftig mot kemikalier. Även fysikalisk nedbrytning, t.ex. genom frost, är av ringa betydelse för trä. Däremot har kemiska och fysikaliska miljöfaktorer som syre, fukt, näring, temperatur etc. stor betydelse för potentiella biologiska skadegörare på trä. Problemen som kan uppstå vid användning av trä i kontakt med jord och vatten är uppenbara, speciellt när träet inte kan hållas vattenmättat och när det krävs mycket lång livslängd, t.ex. för en grundläggning under en fastighet. Problemen kan avsevärt minskas med träskyddsbehandling, men en livslängd på hundra år kan dock inte garanteras.

Bland biologiska skadegörare hos trä finns organismer från både växt- och djurvärlden. Hos trägrundläggningar är rötsvamp- och bakterieangrepp de viktigaste biologiska skadeorsakerna. I salt havsvatten vid den svenska västkusten kan även bormusslor och borrar angripa träkonstruktioner, medan i tropiskt, subtropiskt och medelhavsklimat kan även termiter vara betydelsefulla.

Miljön där virket används och den skyddande behandling det eventuellt har fått bestämmer i stort sett om ett angrepp över huvud taget kommer att ske och vilka skadeorganismer som i så fall blir dominerande.

3.1.5.4.2 Skadeorganismer hos trä

Nedan ges en beskrivning av de viktigaste skadeorganismerna och deras verkan hos trä. Eftersom termiter inte har relevans för svenska förhållanden har de utelämnats från nedanstående översikt.

3.1.5.4.3 Mögelsvampar

Mögelsvampar missfärgar virkesytor som är utsatta för hög relativ luftfuktighet, t.ex. bjälklag över krypgrunder. Det medför ingen hållfasthetsnedsättning varför det är av ringa intresse för pålar och rustbäddar och behandlas därför inte mer detaljerat.

3.1.5.4.4 Blånadssvampar

Angrepp av blånadssvampar missfärgar splintveden och ökar vedens vattenupptagningsförmåga. Svampen kräver fritt vatten i veden, men växer inte om veden är vattenmättad p.g.a. syrebrist. Angreppen medför ingen hållfasthetsnedsättning, men ökar vedens permeabilitet. Det är av ringa intresse för pålar och rustbäddar och behandlas därför inte mer detaljerat.

3.1.5.4.5 Vitrötesvampar

Vitrötesvampar bryter ner vedens tre huvudkomponenter: cellulosa, lignin och hemicellulosa (d.v.s. i cellväggen ingående polysackarider andra än cellulosa och lignin). Angreppet kräver fritt vatten i veden, men växer knappast eller inte alls om veden är vattenmättad p.g.a. syrebrist. Kan t.ex. förekomma hos pålar i porösa jordarter när pålavskärningar tidvis har varit över nivån för den övre grundvattenytan. Virket som angripits av vitröta bleknar och får minskad hållfasthet. Växer vid temperaturer mellan 0 och 40 °C, optimum vid 25-32 °C, pH optimum cirka 5.

3.1.5.4.6 Brunrötesvampar

Brunrötesvampar bryter ned vedens cellulosa och hemicellulosa och lämnar ligninet mer eller mindre modifierat som en mörkbrun amorf rests substans. Angreppet kräver fritt vatten i veden, men svampen växer knappast eller inte alls om veden är vattenmättad p.g.a. syrebrist. Kan t.ex. förekomma hos pålar i porösa jordarter när pålavskärningsplanet tidvis har varit ovan nivån för den övre grundvattenytan. Veden blir mörk och får minskad hållfasthet. Vid torkning av brunrötat virke bildas ofta såväl längsgående som tvärgående sprickor så att det sönderdelas i kubiska stycken ("cubic rot"). Växer vid temperaturer mellan 0 och 40 °C, optimum vid 25-32 °C, pH optimum cirka 5.

3.1.5.4.7 Mögelrötesvampar ("soft rot-svampar")

Vissa rötsvampars hyfer (svamptråd) växer inuti de rörformiga vedfibrernas cellväggar. Där bildar de ett karakteristiskt kanalsystem med typiska insnörningar.

Cellulosa och hemicellulosa bryts ned i första hand, ligninet endast i begränsad omfattning. Mögelrötesvampar tål lägre syrekoncentrationer i miljön än vit- och brunrötesvampar och växer därför även i vattenmättad ved. Förekommer ofta hos träkonstruktioner i vatten (även i havsvatten) eller i markkontakt vid höga fuktkvoter och kan förorsaka betydande hållfasthetsförluster. Angreppen startar från virkesytorna och utbreder sig inåt. Beteckningen "mögelröta" härrör från att yttre delar hos angripet virke är mjuka i vått tillstånd. I torrt tillstånd liknar angreppet brunröta. Krav på temperatur och pH är samma som hos vit- och brunrötesvampar (vissa mögelrötesvampar uppges dock vara aktiva upp till 60 °C).

3.1.5.4.8 Bakterier

Tre olika typer av vednedbrytande bakterier har urskiljts (eroderande, tunnlande och kavitetsbildande bakterier, (Blanchette et al., 1990). Den i trägrundläggningar vanligaste typen av angrepp förorsakas av eroderande bakterier som förmår utvecklas även under nära anaeroba (syrefria) förhållanden i vattenmättad ved.

Syrebehovet för de här bakterierna är ännu mindre än hos mögelrötesvampar. Liksom för mögelrötesvampar utgör ligninet i fiberväggen ett visst hinder för angrepp. Hos en furugrundläggning kan splintveden (ved i det levande trädets yttre veddel) vara svårt nedbruten medan kärnvedsdelen (ved i det levande trädets centrala del) är mer eller mindre opåverkad. Angreppen sker långsamt. På grund av att man hittills ej har lyckats att isolera och identifiera enskilda vednedbrytande bakteriearter och med dem enskilt eller i blandkulturer på laboratorier åstadkomma de nedbrytningsmönster man observerat i fält, är litet känt om dessa skadeorganismers fysiologiska krav på miljö. Till exempel är det osäkert om eroderande bakterier kan bryta ned ved i en absolut anaerob miljö.

3.1.5.4.9 Borrmusslor och borrar (saltvattenorganismer)

Av de tre arter av borrmusslor som förekommer vid den svenska västkusten är skeppsmasken (*Teredo navalis*) den vanligaste. Skeppsmasken är aktiv vid en salthalt mellan 0,9-3,5 % och en temperatur mellan 5-17 °C. Den uppträder frekvent från norra delen av västkusten ned till Mölle. Angrepp kan ske ned till cirka 20 m djup i havet (Norman, 1976). Skadorna kan vara svåra att upptäcka eftersom larvernas ingångshål är små. De växer dock inåt och under en skenbart oskadad yta kan träet vara fullständigt förstört av borrhångar med upp till 8-12 mm diameter. Borrhångarna är kalkb eklädda. Borrar kräver en något högre salthalt än skeppsmask. Angrepp av borrar är inte dolt såsom hos skeppsmask eftersom angripna skikt undan för undan lossnar. Gångarna är cirka 1,5-2 mm i diameter. Under havsbotten är veden skyddad mot angrepp av borrmusslor och borrar.

3.1.5.4.10 Användning av trä i grundläggningar

Numera är användningen av trä som stöd- eller friktionspålar i nyproduktion sällsynt, men bankpålar av trä vid vissa vägbyggen och kohesionspålar av trä används fortfarande. Även i marina konstruktioner, pålbryggor, kajkonstruktioner, formställningar till broar etc., kommer träpålar till användning. Dessutom är många byggnader i äldre stadsdelar grundlagda på trägrundläggningar.

Orsaken till den drastiskt minskade användningen av trägrundläggningar är bl.a. rötproblem. Dessa problem uppstår när de övre delarna av trägrundläggningen kommer att tidvis eller permanent ligga över den övre grundvattenytan p.g.a. olika orsaker såsom landhöjning, dränering genom tunnlar, minskad tillrinning av regnvatten i samband med asfaltering av gator o.dyl. Genom den partiella uttorkningen av marken kring påltoppar och rustbäddar skapas aeroba förhållanden, d.v.s. tillgång till syre, som i sin tur medför rötproblem. Höjd temperatur och förorening av marken och grundvattnet kan öka problemen ytterligare. Olika skyddsåtgärder beskrivs i avsnitt 3.1.5.4.13, "Skyddsåtgärder mot biologisk nedbrytning av trägrundläggningar".

Jämfört med andra material för konstruktioner i mark och vatten har konstruktionselement av trä fördelen att de lätt kan anpassas med hänseende till last och avsedda mått och dessutom att de är kemiskt beständiga.

De träslag som i Sverige används för konstruktioner i mark och vatten är nästan uteslutande furu och gran och i enstaka fall ek. I saltvatten, där en betydande risk för angrepp av bormussla föreligger, används ibland vissa tropiska träslag med större beständighet mot denna organism (greenheart, azobé etc.).

3.1.5.4.11 Klassificering av träslagens beständighet mot röta

I CEN-standard EN 350:2 (CEN, 1994b)¹ klassificeras beständigheten mot röta hos viktigare kommersiella träslag vid användning i markkontakt. Klassificeringen avser träslagens kärnved och omfattar ett system med fem klasser, se Tabell 3.15.

Tabell 3.15 Beständighetsklasser för kommersiella träslag (CEN, 1994b)¹.

Beständighetsklass	Beskrivning
1	Mycket beständig
2	Beständig
3	Måttligt beständig
4	Med ringa beständighet
5	Obeständig

Enligt ovan nämnda system klassificeras rötbeständigheten hos furu i beständighetsklass 3-4, hos gran som 4 och hos ek som 2. Splintvedens beständighet klassificeras allmänt i klass 5, d.v.s. splintved betraktas som obeständig. Systemet är baserat på den relativa livslängden av teststavar jämförda med referensstavar. Systemet beskrivs mera i detalj i standard EN 350-1 (CEN, 1994a)¹.

Endast ett fåtal kommersiella träslag är någorlunda beständiga mot bormusslor och borrar i havsvatten. Som beständiga träslag omnämns i EN 350-2 (CEN, 1994b)¹ greenheart och azobé. Inget träslag är dock permanent beständigt mot angrepp. Ett mera fullständigt skydd mot marina organismer kan erhållas genom en fullimpregnering med kreosot och med inklädnad.

¹ Angivna standarder är upphävda (kommer att uppdateras i framtida versioner av Pålhandboken). Aktuella svenska standarder finns dock redovisade i referenslistan för respektive CEN-standard.

3.1.5.4.12 Betydelsen av miljön kring trägrundläggningar

Risken för biologisk nedbrytning är beroende av miljön där träet används. I CEN-standard EN 335-1 (CEN, 1992)¹ beskrivs ett system med fem riskklasser, som representerar användningsområden med olika fuktbelastning. Riskklass 1-3 representerar användning i en miljö utan markkontakt medan riskklass 4 motsvarar bl.a. situationen för trägrundläggningar under fastigheter, för pålbryggor, bankpålar, d.v.s. användning i markkontakt eller i sötvatten. Med riskklass 5 avses användning av trä i salt vatten. Generellt gäller att behovet av rötskyddsbehandling ökar från riskklass 1 till 5. Dessutom är träskyddsbehovet för en lång livslängd beroende av det använda träslagets naturliga beständighet. För olika träslags behov av träskyddsbehandling vid användning i miljöer tillhörande olika riskklasser ges allmänna riktlinjer i Tabell 3.16.

Tabell 3.16 Riktlinjer beträffande träskyddsbehandling för träslag med olika naturlig beständighet vid användning i olika riskklasser (utdrag ur motsvarande tabell i CEN-standard EN 460 (CEN, 1994c)¹). Splintveden hos samtliga träslag anses vara obeständig (beständighetsklass 5).

Riskklass	Beständighetsklass (kärnved)				
	1	2	3	4	5
1	o	o	o	o	o
2	o	o	o	(o)	(o)
3	o	o	o	(o) - (x)	(o) - (x)
4	o	(o)	(x)	x	x
5	o	(x)	(x)	x	x

o Träskyddsbehandling ej erforderlig.

(o) Träskyddsbehandling endast erforderlig för vissa användningar.

(o) - (x) Träskyddsbehandling kan vara icke erforderlig, men kan för vissa träslag, beroende på deras permeabilitet och för användningen ifråga, vara nödvändig.

(x) Träskyddsbehandling vanligtvis att rekommendera, men för vissa användningar icke nödvändig.

x Träskyddsbehandling erforderlig.

Man kan tolka Tabell 3.16 så att den naturliga beständigheten hos furu och gran inte räcker för användning i en grundläggning. Erfarenhet har dock visat att furu- och grgrundläggningar i många stadsdelar har fungerat väl i flera hundra år om förhållandena har varit de rätta. En trägrundläggning som är omgiven av tät lera och där påltopparna konstant ligger under grundvattnet kan tjänstgöra under flera århundraden. Denna miljö förhindrar syretillförsel och minskar risken för rötangrepp, även av mögelröta, avsevärt. Bakteriellt angrepp kan dock förekomma, men är vanligtvis begränsat till pålarnas splintvedsdelen och brukar ske långsamt. I en sådan syrefattig miljö är beständigheten mot mögelröta, i den mån mögelröta ändå föreligger, avsevärt större hos kärnveden än hos splintveden. Hos gamla trägrundläggningspålar i tät syrefattig lera observeras ofta att pålarnas mest perifera del är angripen av mögelrötesvampar och bakterier, medan den djupare belägna splintvedsdelen endast är angripen av bakterier och kärnveden är angreppsfri. Dessa observationer förklaras av att dessa bakterier tål en syrefattigare miljö än mögelrötesvamparna. Att rustbäddar trots att de ligger på en högre nivå med avseende till grundvattenytan, ofta är bättre bibehållna än påltopparna, beror på deras större kärnvedsandel (sågat virke med grova dimensioner sågas ur stockarnas centrala del).

Temperaturen i marken och grundvattnet kring en grundläggning brukar vara mellan 5 och 10°C. Vid detta temperaturområde kan rötangrepp fortfarande ske, t.ex. i grovporiga, humusrika jordar, även om den optimala temperaturen för rötsvampar ligger mellan 15-30°C.

Boutelje et al. (1974) och Wälchli (1970) har visat betydelsen av näringsämnen i jorden för rötangrepp, t.ex. förekomst av organiskt kväve och fosfor. Det har också konstaterats att pålar i närheten av läckande avloppsledningar var mest angripna (Chillis, 1961).

I marin miljö kan, såsom tidigare omnämnts, angrepp av borraräkor och bormusslor förekomma utöver angrepp av vissa bakterier och svampar, de senare oftast mögelrötesvampar (Björdal, 2000).

3.1.5.4.13 Skyddsåtgärder mot biologisk nedbrytning av trägrundläggningar

En grundvattenytas nivå varierar under året. Man bör eftersträva att pålavskärningsplanet ligger under den lägst förekommande vattenytan. För träpålar i fritt vatten, t.ex. i sjöar och älvar, uppges att det räcker att de är nedslagna till en nivå under det lägsta vattenståndet under den varma årstiden, perioden med temperatur över 5°C (Lagerberg och Forsell, 1930).

När pålavskärningsplanet hamnar över grundvattenytan p.g.a. landhöjning eller dränering, kan kontrollerad infiltration av vatten tillgripas (Bergman et al., 1979). Temperatur, syrehalt och näringsinnehåll hos infiltrationsvattnet bör vara lågt. Bergman et al., (1979) beskriver praktikfall där infiltrationen utfördes med kommunalt vatten och ger även jämförande data beträffande kostnaden för olika grundförstärkningsmetoder. Infiltration ansågs vara den billigaste åtgärden. Även om uppgifterna är från 1980-talet kan jämförelsen mellan metoderna fortfarande ha aktualitet. Övan nämnda praktikfall omfattade ett sextontal olika byggnader i olika områden. För att hålla grundvattenytan på önskad nivå över träpålarna åtgick varierande vattenmängder, mellan 1 till 16 m³/dygn. Med tätning kring avloppsledningar och tätskärmar, till exempel med hjälp av bentonit runt hela grundläggningen, kan vattenomsättningen minskas. Bech-Andersen (1992) beskriver ett praktikfall från Köpenhamn där vatten från hamnbotten via en reningsbassäng pumpas till en trägrundläggning under ett varuhus. En av fördelarna med detta vatten jämfört med t.ex. regnvatten är att det innehåller bara 1-2 mg syre per liter vid 5°C i stället för 11 mg per liter. Bottenskiktet i hamnen är täckt med anaerobt slam. Dåvarande investeringskostnaden för infiltrationssystemet var 100 000 danska kronor att jämföra med 10 miljoner danska kronor, som var kostnaden för nya megapålar av betong, som användes vid grundförstärkning av Kungliga Teatern i Köpenhamn.

Hos vissa trägrundläggningar kan pålarna kapas så att ett nytt pålavskärningsplan kommer att ligga på betryggande nivå under grundvattenytan. Därefter sker injektion med betong kring det nya lägre beläggna pålavskärningsplanet. I andra fall installeras helt nya pålar av betong eller stål vid sidan av de gamla träpålarna.

Sedan 1980-talet testas även olika metoder att tillföra borföreningar (borsyra, borater) till jorden kring grundläggningspålar. Två metoder beskrivs av Jerbo (1999).

Jerbortekniken används för grundläggningar i tätare lermark och omfattar infiltration med en vattenlösning av borföreningar så att en lämplig nivå på vattenytan erhålls. Lämpligen kombineras metoden med invallning av det injicerade området för att reducera vattenomsättningen och därmed borförluster. Eurobortekniken används i lösa jordarter och med större risk för högre syrehalt i vatten och jord. Med Eurobortekniken injiceras borföreningarna tillsammans med ett fixerande förtjockningsmedel i form av bentonit så nära pålarna som möjligt och denna "borgröt" fyller ut de befintliga hålrummen kring pålar och rustbäddar. Metoden har använts bl.a. i Köpenhamn och Venedig (Eureka Projekt Eu 1069 (1997)). Jerbo (2000) ger några preliminära data beträffande borföreningars steriliserande effekt i nära anaerob miljö, medan Lloyd (1998) nyligen har presenterat en översiktsartikel om biologiska tillämpningar av borföreningar. Lloyd beskriver effekten av borföreningar på mikroorganismer mera som tillväxthämmande (biostatisk) än dödande (biocid).

För temporära träkonstruktioner i jord, sötvatten eller havsvatten används med fördel tryckimpregnerat virke, i jord eller sötvatten av kvalitetsklass NTR/A, i havsvatten kvalitetsklass NTR/M, se Nordiska Träskyddsrådet (1998). Kreosotimpregnerat furuvirke i klass M är under begränsad tid även skyddat mot bormusslor och borraräkor. Ett ännu mera långvarigt skydd av pålvirke mot bormusslor och borraräkor kan erhållas med inklädnad (asfaltfilt, betongrör, bly etc.) men blir i praktiken ofta för kostsamt. Med "temporära konstruktioner" avses här konstruktioner där förväntningar beträffande virkets livslängd inte överstiger 30-40 år.

3.1.5.4.14 Kontroll av trägrundläggningars kondition och eventuellt behov av renovering

Mätningar av eventuella sättningar och sprickor utgör en självklar basis för varje kontroll av en grundläggning liksom bestämning av grundvattenytans nivåvariationer med hjälp av observationsrör. Analyser av jorden och grundvattnet med hänsyn till syre- och näringshalt ger kompletterande information beträffande förutsättningar för röta. Kunskap om pålavskärningsplanets nivå i förhållande till den varierande nivån hos den övre grundvattenytan är av största betydelse. Om man avser att höja vattenytan medelst infiltration bör man också kontrollera att detta inte medför problem för angränsande fastigheter och vattenomsättningen bör hållas så lågt som möjligt.

En analys av grundläggningsvirket ger den mest direkta informationen om grundläggningens status. Uttagningen av träprover kräver dock provgroppsgrävning, vilket är kostsamt. Vid en analys av virket bestäms oftast tryckhållfasthet, densitet och fuktkvot. Dessutom undersöks proverna mikroskopiskt. Tryckhållfasthet och densitet ger en kvantitativ bild av nedbrytningen medan man med den mikroskopiska undersökningen kan bestämma vilken slags nedbrytning som förekommer och dess omfattning i pålar och rustbäddar. Förekomst av vanliga rötsvampar är allvarligare än förekomst av mögelröta, eftersom det innebär att virket åtminstone tidvis inte har varit vattenmättat och att nedbrytningen kan gå snabbt.

Att inskränka sig till enbart en okulärbesiktning av virket är inte tillräckligt för att avgöra om virket är friskt.

3.1.6 Robusthet

En geokonstruktion bör utformas för att ha tillräcklig robusthet under sin tekniska livslängd med hänsyn till oväntade ogynnsamma händelser. Eventuella åtgärder för att förbättra geokonstruktionens robusthet ska utföras enligt specificering av behöriga myndigheter eller i enlighet med eventuell överenskommenhet för ett specifikt projekt mellan de berörda parterna.

Dimensionering av en geokonstruktion med hänsyn till robusthet kan utföras med en, eller en kombination, av följande strategier (SS-EN 1990:2023 (SIS, 2023c)):

- a. Ge en geokonstruktion tillräcklig duktilitet eller styvhet för att kunna hantera lokala skadliga scenarier.
- b. Förstärka vissa delar av geokonstruktionen för att de ska kunna motstå de förväntade belastningarna även under extrema förhållanden.
- c. Dela in geokonstruktionen i olika delar. Om en del av geokonstruktionen kollapsar, ska andra delar kunna bära förlusten av kollapsade delen.

Dimensionering för robusthet ska, om inte annat anges, betraktas som olyckslastfall. Förbättrad robusthet kan också fås i val av konsekvensklasser (CC) vid dimensionering av geokonstruktionen i brottgränstillstånd.

3.1.7 Toleranser

I Tabell 3.17 redovisas en sammanställning av maximala pållutningar och toleranser i plan, lutning och riktning, i enlighet med aktuella utförandestandarder för respektive påltyp, se avsnitt 3.3 och 3.1.10, som kan innehållas under gynnsamma förhållanden. Med gynnsamma förhållanden avses att:

- pålningen utförs från arbetsbädd i nivå med pålavskärningsnivån
- jorden är fri från block och andra hinder som kan styra undan pålarna.

Vid pålning som utförs på vatten från ponton eller arbetsbrygga eller från en högre marknivå än pålavskärningsplanet minskar precisionen, varför toleranserna är större än i Tabell 3.17 redovisade värden.

Tabell 3.17 Utförandetoleranser som ska beaktas i projekteringen för olika påltyper (från utförandestandarder SS-EN 12699:2015 (SIS, 2015a), SS-EN 14199:2015 (SIS, 2015b) och SS-EN 1536:2010 (SIS, 2010a)).

Påltyp	Plan Toleranser i mm	Lutning Toleranser i % (cm lutningsavvikelse per längdmeter)	Riktning	Max lutning
Slagna betongpålar	+/- 100	+/- 4	+/- 2°	4:1
Slagna stålrörspålar Ø≤300 mm	+/- 100	+/- 4	+/- 2°	4:1
Slagna stålrörspålar Ø>300 mm	+/- 100	+/- 4	+/- 2°	4:1 (kan begränsas av pålens vikt)
Borrade slanka stålrörspålar Ø≤300 mm	+/- 100 (+/-50 vid höga toleranskrav)	Vertikala +/- 2 Lutande >4:1, +/-4 ≤4:1, +/-6	+/- 2°	4:1 vanligen Maximalt betydligt flackare lutning
Borrade grova stålrörspålar Ø>300 mm	Ø≤1,0 m +/- 100 Ø>1,0 m +/- 0,1x Ø	Vertikala +/- 2 Lutande +/-4	+/- 2°	7:1 (beroende av vikt och dimension)
Träpålar	+/- 100	+/- 4	+/- 2°	4:1
Kombinationspålar trä+betong	+/- 100	+/- 4	+/- 2°	4:1
Kombinationspålar stål+betong	+/- 100	+/- 4	+/- 2°	4:1
Stålkärnepålar	+/- 100 (+/-50 vid höga toleranskrav)	Vertikala +/- 2 Lutande >4:1, +/-4 ≤4:1, +/-6	+/- 2°	4:1 vanligen Maximalt betydligt flackare lutning
Borrade injekterade pålar	+/- 100 (+/-50 vid höga toleranskrav)	Vertikala +/- 2 Lutande >4:1, +/-4 ≤4:1, +/-6	+/- 2°	4:1 vanligen Maximalt betydligt flackare lutning
Grävpålar	Ø≤1,0 m +/- 100 Ø>1,0 m +/- 0,1x Ø	Vertikala +/- 2 Lutande +/-4	+/- 2°	4:1

3.1.8 Omgivningspåverkan

Med omgivningspåverkan avses den negativa inverkan som pålningsarbetet kan ha på byggnader, anläggningar och förhållanden i närheten av arbetsplatsen. Pålning kan orsaka skador på närliggande byggnader, anläggningar och markförlagda ledningar, samt störa människors komfort och orsaka driftstörningar för utrustning i de närliggande byggnaderna. Omgivningspåverkan kan därför ibland vara avgörande för valet av påltyp, pållängder och pålningsmetod.

Nedan ges en översiktlig genomgång av de olika skaderiskerna och annan negativ påverkan på omgivningen som kan uppstå på grund av pålgrundläggning och därtill relaterade arbeten. För mer detaljer angående skaderisker, tillämpliga regelverk och prognostiseringsverktyg för olika jord-, vatten- och luftfenomen som kan uppstå på grund av pålningsarbeten eller pålgrundläggning, se kapitel 10. Omfattningen av kontrollprogram som underlag för pålningsarbeten redovisas i kapitel 9.

3.1.8.1 Risk för bärighetsbrott

Om installationen av pålar i sig är sådan att jorden störs eller markvibrationer uppstår, som är så stora och långvariga att förhöjt porvattentryck och minskad hållfasthet uppstår i marken, kan geotekniska bärighetsbrott uppstå hos närliggande byggnaders grundläggning. Förutsättningar för detta finns för plattgrundläggning eller liknande grundläggning på kohesionsjord med låg hållfasthet eller lågpermeabel friktionsjord. Det kan också uppstå för en spetsburen pålgrundläggning i en lågpermeabel friktionsjord. Påldrivningsmetoden måste också vara sådan att den orsakar stora störningar i jorden eller ger upphov till kraftiga markvibrationer. Därför är risken för detta brott mycket ovanlig. Risk för detta kan dock finnas vid pålningsarbeten intill äldre byggnader med bristfällig grundläggning.

I sällsynta fall kan pålningsarbeten också orsaka stabilitetsbrott såsom skred eller ras. Det finns några få rapporterade fall i litteraturen där stabilitetsbrott kan ha uppstått till följd av markvibrationer från pålningsarbeten. Vid långvarig cyklisk belastning av jorden p.g.a. pålningsarbeten kan förhöjda porvattentryck uppstå i lågpermeabel friktionsjord, t.ex. siltskikt och siltjord. Vanligtvis är markvibrationer inte den enda faktorn som leder till stabilitetsbrott, utan det är oftast en kombination av redan låg stabilitet, närvaro av kvicklera med siltskikt eller siltjord med höga befintliga grundvattentryck, erosion vid släntfot och tillfälliga uppfyllningar. Markvibrationer kan dock utgöra den extra belastning som krävs för att utlösa ett skred eller ras. Vid förekomst av siltskikt kan de förhöjda porvattentrycken sprida sig till stora avstånd (>200 m) och skapa svaghetszoner med nedsatt hållfasthet i lerslänter. Risken för detta fenomen är större vid vibrodrivning av pålar eller spont p.g.a. deras långvariga cykliska belastning av jorden. Vid vibrodrivning kan även resonans uppstå i jordlagren, vilket förstärker markvibrationerna och ökar risken för att förhöjda porvattentryck utbildas i jorden.

Risk för strukturellt bärighetsbrott föreligger vid pålningsarbeten i närheten av befintliga pålgrundlagda byggnader eller anläggningar. I detta fall uppstår markdeformationer till följd av pålningsarbeten med massundanträngande pålar i kohesionsjord. Dessa markdeformationer kan orsaka utböjningar i pålgrundläggningen för de intilliggande objekten. Utböjningen ger upphov till tilläggsmoment i pålarna, och tillsammans med andra moment av andra ordningen på grund av dessa utböjningar minskar den strukturella bärförmågan. Risken för strukturellt bärighetsbrott är vanligtvis liten, men den minskade strukturella bärförmågan hos befintliga pålar kan påverka möjligheten till framtida påbyggnader eller ändrad verksamhet i byggnaden. För ytterligare information om kontroll och dimensionering av pålarnas strukturella bärförmåga hänvisas till kapitel 6.

Regelverk för att kontrollera risken för både geotekniskt och strukturellt bärighetsbrott anges i Boverkets författningssamling om nationella val som görs vid tillämpning av eurokoderna avseende brottgränstillstånd (Boverket, 2011 och 2022). Det innebär att det krävs kontroll med dimensionerande värden och säkerhet för både laster och materialegenskaper. Om projektet avser eller ger påverkan på

anläggning som omfattas av Transportstyrelsens författningssamling TSFS 2018:57 (Transportstyrelsen, 2018) är det denna föreskrift ska tillämpas. Det är dock i dagsläget ingen skillnad på de två regelverken avseende dimensionering av geotekniskt bärighetsbrott.

3.1.8.2 Risk för deformationsskador

Pålningsarbeten kan orsaka sättningar, hävning och sidodeformationer som i sin tur kan leda till ojämna deformationer för närliggande byggnader grundlagda med platta på mark. I löst lagrad permeabel friktionsjord kan sättningar uppstå i zonen närmast pålen, som blir störd av själva påldrivningen, samt några meter ut från pålen där markvibrationerna är tillräckligt stora för att orsaka omlagring i jorden. Om löst lagrad lågpermeabel friktionsjord förekommer, induceras först ett porvattenöverttryck och sättningarna inträffar sedan när porvattentrycket dräneras ut. I båda fallen måste storleken på deformationen vara tillräckligt stor för att överskrida det s.k. tröskelvärde för volymetrisk skjuvttöjning för den aktuella jorden. Dessa fenomen kan uppstå vid pålinstallation intill en befintlig byggnad med grundläggning i form av platta på mark eller pålgrundläggning i jord med lös till mycket lös lagring.

Under pålinstallation i kohesionsjord kan massundanträngning i jorden ge upphov till markhävning och sidodeformationer för omgivningen. Dessa markrörelser är störst närmast pålningsområdet och minskar sedan med avståndet upp till cirka 1,5 gånger pållängden. Förutom att detta kan leda till differentiella deformationer för byggnader och anläggningar kan det även orsaka glipor och förskjutningar mellan konstruktionsdelar. Särskilt tätfogar mellan konstruktioner och lager för broar kan vara känsliga för sådana deformationer. Markdeformationer kan också orsaka krökningar hos pålar, vilket minskar deras strukturella bärförmåga, se kapitel 5 och 6.

I kohesionsjord med pågående sättningar till stort djup (>20 m) kan en pålgrundläggning med kohesionspålar för en ny byggnad invid andra byggnader eller anläggningar som är grundlagda med platta på mark eller kohesionspålar, påverka hur långtidssättningarna för de närliggande objekten utvecklas. Oftast innebär kohesionspålar att marksättningar minskar i den nya byggnadens närområde, då lera "hänger" sig på pålgrundläggningen i dess övre del. Är det en överkonsoliderad lera, kan effekten bli motsatt och att större marksättningar istället uppstår i närområdet av den nya kohesionspålgrundlagda byggnaden. Både dessa fenomen kan med tiden leda till att differentialsättningar uppstår för de närliggande objekten och detta kan behöva kontrolleras.

Gällande regelverk för skador på grund av deformationer är Boverkets författningssamling med nationella val (Boverket, 2011 och 2022) som nyttjas vid tillämpning av eurokoderna. Om det rör påverkan på anläggningar som tillhör Trafikverket eller om pålningsarbetet utförs inom ramen för ett Trafikverksprojekt, gäller istället Transportstyrelsens författningssamling (Transportstyrelsen, 2018). I båda dessa regelverk anges att det är byggherren som ska fastställa tillåtna deformationer och vilka närliggande byggnadsobjekt som ska besiktas och övervakas genom mätningar. För att göra en skaderiskbedömning finns det erfarenhetsvärden i litteraturen som anger vilken differentialdeformation som krävs för olika nivåer av skaderisk och känslighet för skador på bärande konstruktionsdelar.

3.1.8.3 Vibrationsskador

Vibrationer kan också orsaka skador på byggnader, men då oftast ytliga skador på fasader och dylikt. För vibrationer finns en svensk norm som används för bedömning av risk för skador p.g.a. pålningsarbeten (SS 02 52 11 (SIS, 1999)). Normen baseras på erfarenheter av sambandet mellan vertikal svängningshastighet och konstaterade skador på byggnader. Enligt normen tas ett beräknat riktvärde på en momentan vibrationsnivå fram utifrån typ av undergrund, konstruktion, känsligaste material samt grundläggningssätt. Riktvärdet används normalt som gränsvärde, men en bedömning ska göras för varje enskilt objekt. Vibrationsnivån avser momentant toppvärde. Förfarandet av syneförrättningar och utförandet av övervakningsmätningar beskrivs i SS 460 48 60 (SIS, 2022). Det är dock byggherren som ska fastställa tillåtna vibrationsnivåer och vilka närliggande byggnadsobjekt som ska besiktigas och övervakas genom mätningar.

3.1.8.4 Komfortstörning

Buller och vibrationer från pålningsarbeten kan vara störande för bostads- och kontorsmiljöer i byggnader som finns i arbetsplatsens närområde (<100 m). Hög bullernivå invid arbetsplatsen kan även vara skadliga för passerande människor och vissa fall även för djur. Regelverket avseende bullerstörningar hänvisar till miljöbalken (Sveriges riksdag, 1998) och Naturvårdsverkets tolkning av den (Naturvårdsverket, 2024). Inom dessa föreskrivs att bullermätningar bör utföras vid bullerstörande verksamheter. Det finns även riktvärden som bör tillämpas, vilket innebär att det inte finns fastställda gränsvärden. Det är byggherren som har ansvaret för att bullret från arbetsplatsen hanteras och det är byggherren som avgör vilka gränsvärden som ska tillämpas.

Regelverket för vibrationstörningar har ingen specificerad kravnivå för komfortstörande vibrationer under byggverksamhet. Krav på komfortstörande vibrationer gäller endast för permanenta verksamheter. Det är upp till byggherren att fastställa och reglera hanteringen av komfortstörande vibrationer under byggskedet samt att genomföra övervakningsmätningar för att säkerställa att eventuella gränser inte överskrids.

3.1.8.5 Grundvattenpåverkan

Pålningsarbeten kan orsaka oavsiktlig påverkan på grundvattenförhållanden, till exempel genom dränering av den undre akviferen när artesiskt grundvatten strömmar upp längs pålar som slagits genom täta lerlager. Installation av stödkonstruktioner kan också skapa hydrauliska barriärer. Ibland kan även avvattning behövas för att möjliggöra pålningsarbeten från en lägre nivå. Vissa av dessa arbeten kan orsaka sättningar och deformationsskador som diskuterats tidigare. Hydrauliska barriärer kan i sällsynta fall orsaka översvämningar och som då kan ge upphov till vattenskador för omgivningen.

Ett annat problem kan uppstå genom spridning av föroreningar vid pålningsarbeten i förorenade områden. Om en pålning exempelvis skapar en läckväg ned till en undre akvifer och det förekommer föroreningar i fri fas (t.ex. DNAPL) som är tyngre än vatten, finns risk för kontaminering av akviferen. Vid förekomst av partikelbundna och vattenlösliga föroreningar bedöms risken för spridning av föroreningar som liten enligt SBUF 13413 (SBUF, 2019). Om pålningsarbeten ska utföras i ett vattenskyddsområde rekommenderas dock att risken för förorenings spridning utreds.

Miljöbalken (Sveriges riksdag, 1998) är det gällande regelverket för att hantera miljöpåverkan på mark och vatten. Om grundvattenpåverkan riskerar att orsaka skada på allmänna eller enskilda intressen krävs tillstånd för vattenverksamheten. Undantag görs om det tydligt framgår att åtgärden inte kommer att orsaka skada. Det är exploatören som låter utföra pålningsarbeten som är ansvarig för att söka tillstånd, utföra erforderliga undersökningar och efterbehandling vid eventuell skada. Tillståndet söks hos mark- och miljödomstolen. För mer information om detta, se kapitel 11 i miljöbalken, SFS 1998:808, 1998 (Sveriges riksdag, 1998). Användning av hydrauliska täta barriärer, som kan medföra dämningseffekter på grundvatten, klassas inte som vattenverksamhet. Denna verksamhet kan ändå omfattas av hänsynsregler i kapitel 2 i miljöbalken, SFS 1998:808 (Sveriges riksdag, 1998).

Om pålningsarbeten i förorenade områden bidrar till spridning av föroreningar kan, enligt miljöbalken, den exploatör som låter utföra pålningsarbeten anses som en av de ansvariga verksamhetsutövarna och därmed göras ansvarig för undersökning och efterbehandling.

I de båda fallen av risk för grundvattenpåverkan, behöver de geohydrologiska förhållanden bestämmas, d.v.s. grundvattentryck, permeabilitet, strömningsriktning m.m. För att erhålla information om risken för påverkan på mark- och vattenmiljön krävs först en klassificering enligt Naturvårdsverkets riktlinjer för att bedöma graden av förorening. Vidare bör förorenings fas (fri, partikelbunden, gas, vätska eller fast form) bestämmas, liksom nedbrytningshastigheten. Det är också viktigt att utvärdera förorenings spridningspotential baserat på lösligheten i vatten och densiteten jämfört med vatten.

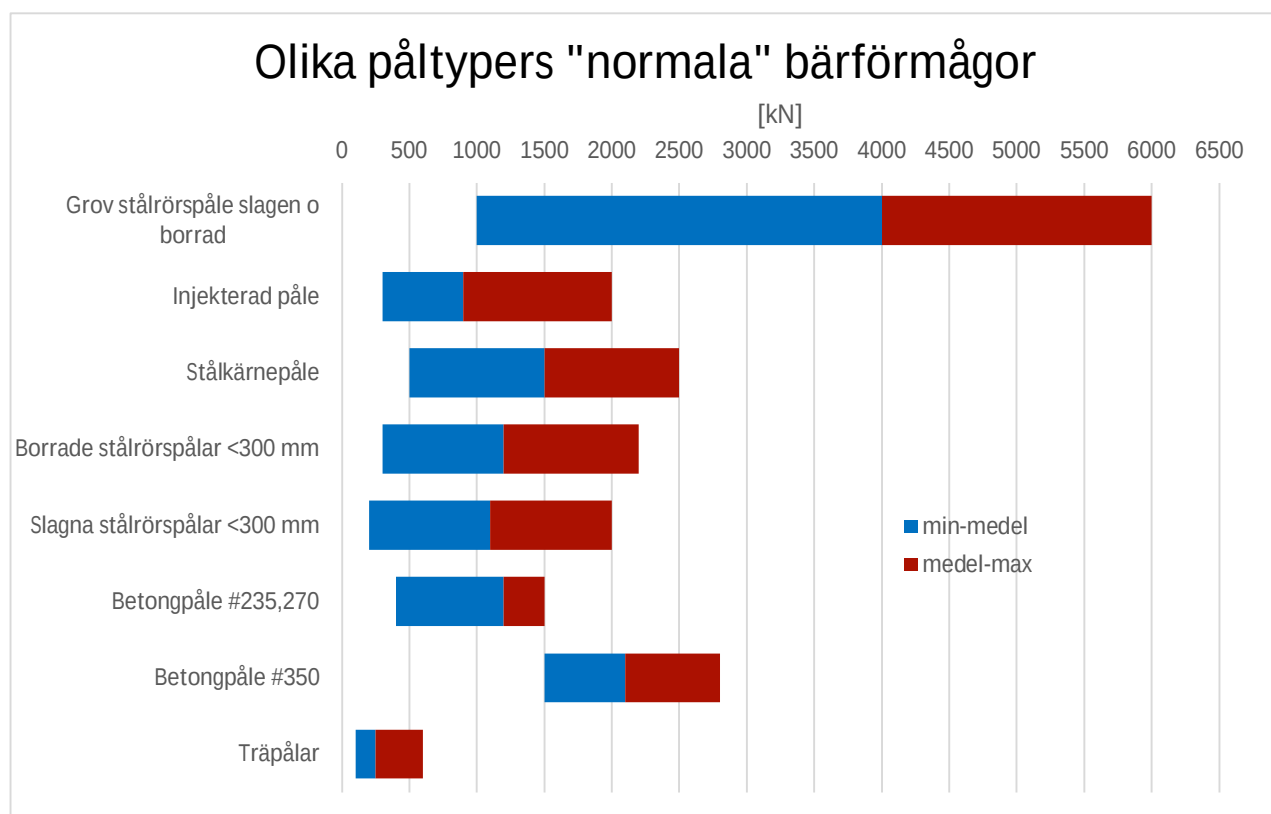
Dessutom måste flödesriktningen för grundvattnet analyseras för att bedöma risken för påverkan på eventuella närliggande vattenskyddsområden.

3.1.8.6 Pålning i förorenade områden

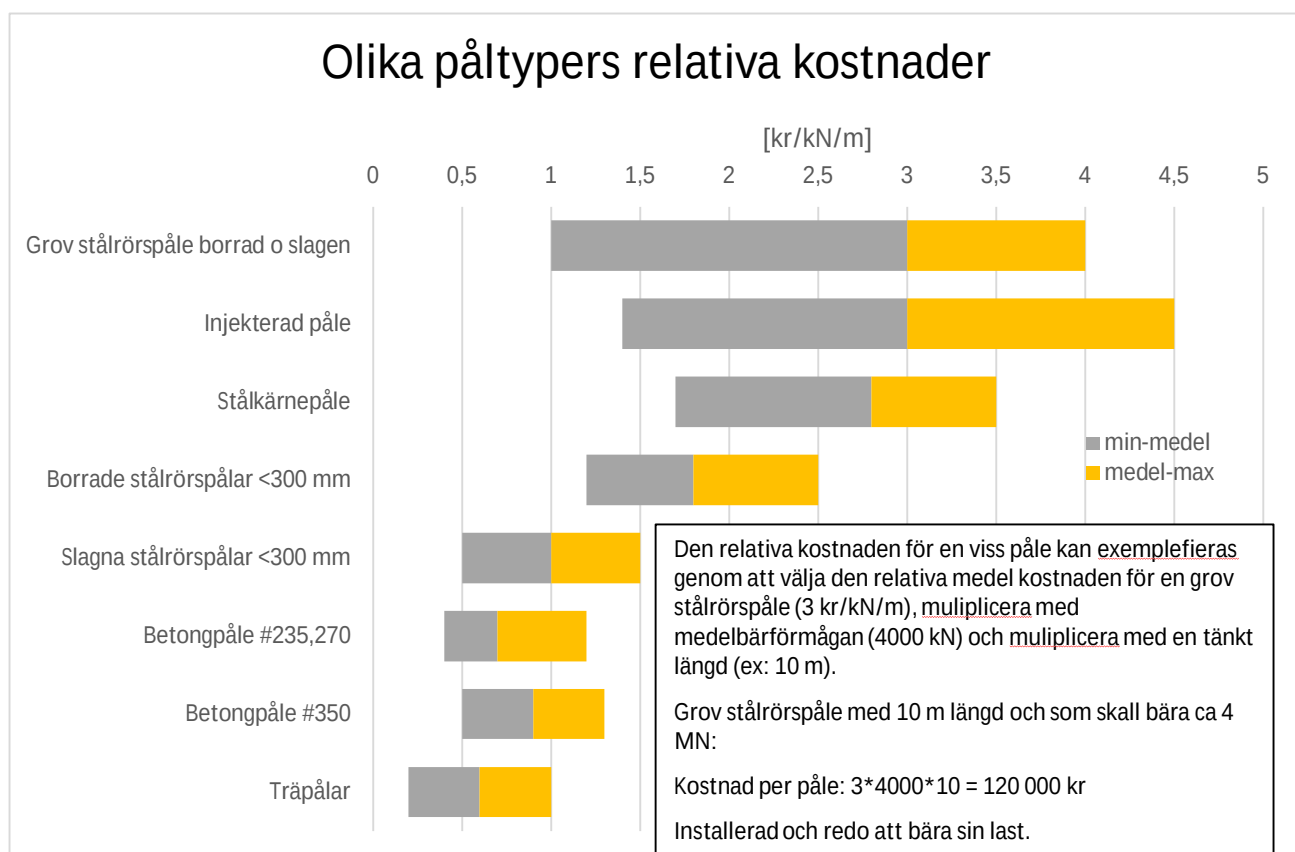
Det är en betydande miljörisk med pålning genom förorenade massor, varför detta ska klargöras i samband med den geotekniska utredningen inom aktuellt område (se kapitel 2). Risken för spridning till följd av pålningsarbetet ska beaktas i projekteringsskedet men är komplex och kan vara svår att värdera, se Installation av pålar och spont i förorenad mark – Spridningsrisk och ansvarsfördelning SBUF ID:13413 (SBUF, 2019)). Exempel på situationer som behöver beaktas är ifall pålningen riskerar att föra med sig förorenad jord/förorenat vatten till undergrunden alternativt riskera att blanda akviferer. Val av påltyp behöver anpassas utifrån dessa risker och en samordning mellan eventuell marksanering och pålgrundläggningen behöver utföras noggrant för att undvika stillestånd.

3.1.9 Pålars bärförmåga, relativa kostnader och klimatpåverkan

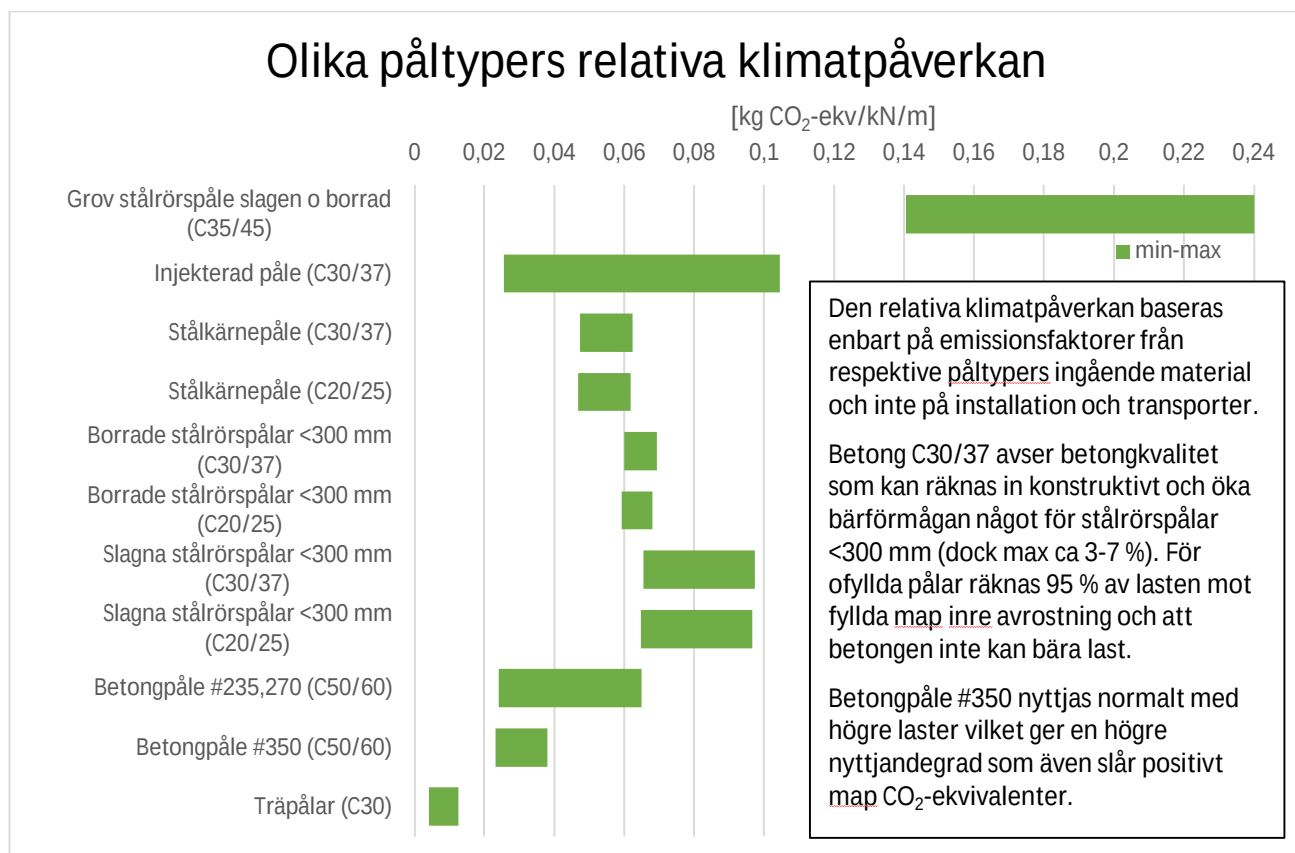
För att ge en grov vägledning vid val av påltyp och till viss del val av påldimensioner, kan följande diagram användas. Figur 3.5 avseende olika påltypers normala bärförmågor, Figur 3.6 avseende olika påltypers relativa kostnader och Figur 3.7 avseende olika påltypers relativa klimatpåverkan. Att välja påle endast utifrån dessa kriterier d.v.s bärförmåga, kostnad och miljöbelastning utifrån CO₂-ekvivalenter är inte alltid möjligt. Processen kan vara mycket komplex, men detta kan utgöra en bra start.



Figur 3.5 Olika påltypers normala bärförmågor.



Figur 3.6 Olika påltypers relativa kostnader.



Figur 3.7 Olika påltypers relativa klimatpåverkan.

3.1.10 Utförandestandarder

De utförandestandarder som omfattar påltyperna beskrivna i Pålhandboken är:

- SS-EN 12699:2015: Utförande av geokonstruktioner - Massundanträngande pålar (SIS, 2015a).

Standarden omfattar samtliga massundanträngande pålar med samtliga diametrar, d.v.s. alla pålar som slås ner i marken med hjälp av stötar, vibrationer, pressning, skruvning eller en kombination av dessa metoder.

- SS-EN 14199:2015: Utförande av geokonstruktioner – Mikropålar (SIS, 2015b).

Standarden avser borrade pålar med diameter <300 mm och omfattar därmed borrade injekterade pålar samt borrade stålrörpålar och stålkärnepålar med rördiameter <300 mm.

- SS-EN 1536:2010: Utförande av geokonstruktioner – Grävpålar (SIS, 2010a).

Standarden avser borrade stålrörspålar med diameter >300 mm och grävpålar som utförs genom schaktning. Standarden innehåller även utförande av sekantpålevägg och berlinerspont med grävpålar som bärande element.

Utöver dessa standarder så ska tillämpliga delar i SS-EN 1537:2013: Utförande av geokonstruktioner – Förankringar (SIS, 2013a) tillämpas för pålar som dragförankras med invändiga stag.

I utförandestandardernas avsnitt 7 finns beskrivet frågeställningar som ska hanteras i projekteringen. I SS-EN 1536:2010 (SIS, 2010a) finns det frågor som rör täckande betongskikt, centrumavstånd mellan armeringsstänger och dimensioner på armeringsjärn som behöver beaktas för att säkerställa att betonggjutningen går att utföra och att erforderligt täckande betongskikt erhålls.

3.2 ÖVERGRIPANDE FRÅGESTÄLLNINGAR

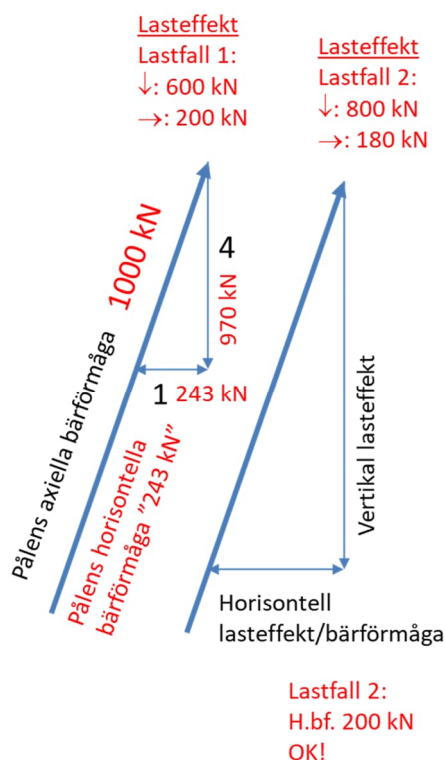
Förväntade pållängder anges ofta som medelpållängder. Ett alternativt och ofta bättre sätt är att ange förväntade pålstoppsnivåer genom nivålinjer på en planritning.

3.2.1 Lutande pålar

Lutande pålar används för att hantera horisontella lasteffekter med en påle med endast axiell bärförmåga. I normalfallet lutar inte slagna pålar i Sverige mer än 4:1. Pålens horisontella bärförmåga avgörs av rent geometriska villkor, men det ska betänkas att pålens horisontella lastkomposant aldrig är större än vad dess vertikala lasteffekt medger, se Figur 3.8. Om pålar kombineras i ett fundament eller i en pålbock kan en högre horisontell bärförmåga erhållas om de motriktade pålarna har erforderlig bärförmåga i drag.

Pålarnas horisontella bärförmåga är begränsad. Man bör vid stora horisontella lasteffekter/förskjutningar därför utreda möjligheten att utnyttja exempelvis passiva jordtryck mot källarväggar, ändskärmar, grundbalkar, bottenplattor o.s.v.

Lägg märke till att bärförmåga från, åtminstone korta, lutande pålar och från passiva jordtryck inte enkelt kan adderas – de kräver helt olika förskjutningar för att mobilisera bärförmågan.



Figur 3.8 Lutande pålars horisontella bärförmåga.

3.2.2 Dragna pålar

Olika påltyper hanterar draglasteffekter olika bra. Observera att samtliga i pålen ingående delar måste kontrolleras. Ofta är skarvarna dimensionerande.

Konstruktivt har vanliga slagna betongpålar relativt begränsade möjligheter att omhänderta draglasteffekter. Observera att betongpålen måste förankras i konstruktionen. Detta utförs normalt genom att

frilägga armeringen i påltoppen, varvid det är viktigt att tillräcklig extra pållängd finns tillgänglig. Vid friläggningen är det av stor vikt att proceduren inte skadar vare sig armeringen eller den kvarvarande betongpålen. Det rekommenderas att detta sker med bilning och inte exempelvis spräckning av pålen. Vid mindre draglaster, eller där tillräcklig frilagd längd av armering inte finns tillgänglig, kan lasterna överföras genom inbörning och injektering av förankring i påltoppen.

Slagna stålplålar med hylsskarv har ännu mer begränsad dragbärförmåga, medan borrade stålplålar är bättre lämpade att hantera draglasteffekter eftersom de skarvas med gängade skarvar. Svetsade skarvar ska utföras så att de kan överföra i princip lika mycket draglast som trycklast. För att överföra draglasten mellan konstruktionen och pålen finns ett flertal olika tekniker och utföranden. Exempel kan ses för stålärnepålar i avsnitt 3.3.7.

Slutligen handlar det oftast om hur stor geoteknisk bärförmåga i drag som kan överföras via pålens mantel. För slagna (och vibrerade) pålar kan den geotekniska bärförmågan uppskattas och i många fall verifieras med enbart beräkning, se vidare kapitel 7. För borrade pålar låter sig detta inte enkelt göras, varför någon form av provning krävs. I kohesionsjordar tenderar dynamisk provning att över-skatta bärförmågan och då krävs statisk provning.

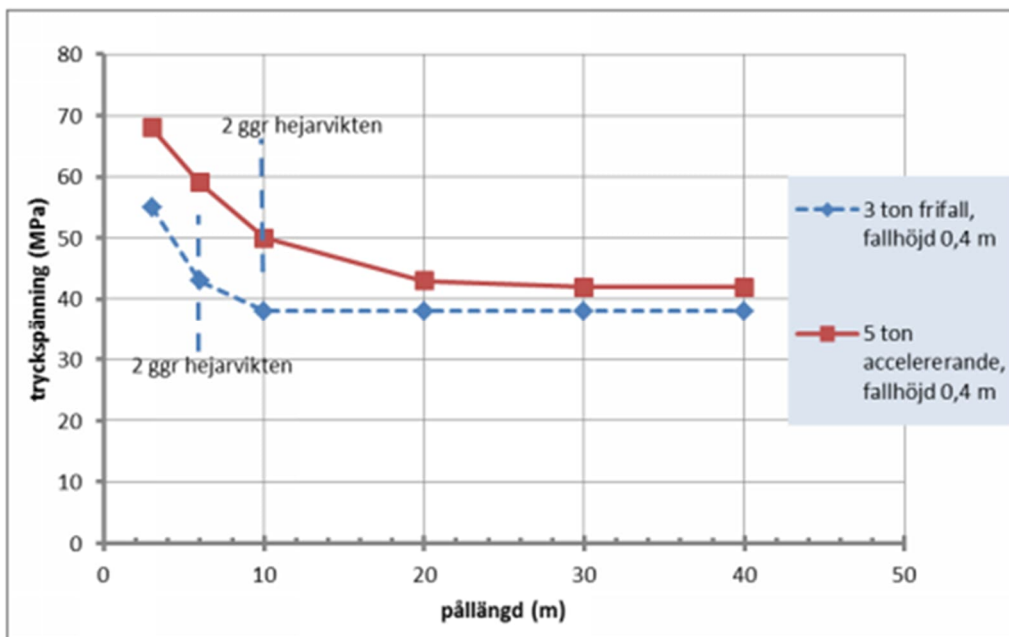
Ska större draglaster hanteras bör man därför överväga att installera separata dragstag, antingen inuti borrade stålplålar eller som separata diton. Det rekommenderas att inte utföra dragstagen förspända mot slutlig konstruktion. Installeras de inuti borrade stålplålar kan de dock förspännas mot pålröret under förutsättning att pålen dimensioneras/kontrolleras för uppträdande förspänningskrafter i utförandeskedet och driftskedet. Separata dragstag är besvärliga att förspänna.

Överväg också att använda extra "gravitationsbetong" för att hantera draglaster. Det kan i många fall vara billigare än att ta stora draglaster i pålar. Det kan göras antingen med en utökad mängd betong, alternativt i vissa fall med tung ballast (ofta magnetit).

3.2.3 Korta pålar

Slagna pålar går i normalfallet att utföra så korta som cirka 3 m. För pålar kortare än 10 m behöver stoppslagning och drivning anpassas, se Figur 3.9. Det blir extra viktigt med efterslagning och kontrollslagning. Det går att installera pålar som är kortare än 3 m, men då bör tilläggskontrollen utökas och även omfatta precisionsavvägning av samtliga korta pålar och byggtrafik bör ej tillåtas i närheten.

Vidare bör inte korta slagna pålar användas under stora delar av byggnader, utan förbehållas övergångszoner mot berg, hörn av byggnader och mindre delar av byggnader. Annars kan byggnadsverkets totala stabilitet påverkas. Där pålar understiger 2,5 m längd och är installerade i lös jord bör istället stålplålar, inbörade i berg, eller betongplintar utförda till berg användas. Dessa pålar bör då borrar in så långt i berg att de kan betraktas som fast inspända, normalt $> 4xD$, där D avser en påles diameter. Fördelar med detta är att grundläggningssättet inte behöver varieras under byggnadsverket och att tiden för utförandet kan minskas, speciellt om alternativet är att installera s.k. "plintar", d.v.s. gjutna betongkonstruktioner ner till berget. I många fall är också utförandet av en övergångskonstruktion mellan en pålad konstruktion och platta på mark komplicerad.



Figur 3.9 Förhållande mellan tryckspänning i en betongpåle (270x270 mm) och pålens längd för olika hejarvikter.

3.2.4 Utmattningsbelastade pålar

Konstruktioner som utsätts för lastväxlingar av icke försumbar storlek och omfattning ska dimensioneras/ kontrolleras för utmattningsbelastning. Det gäller exempelvis för maskinfundament, broar (utsatta för mer eller mindre tunga transporter), byggnader avsedda för underhåll och/ eller tillfällig förvaring av tunga fordon/ maskiner (exempelvis bussdepåer, lokstallar m.m.) samt höga konstruktioner (utsatta för vind).

För dessa byggnadsverk är det viktigt att även pålarna klarar att bära de cykliska lasterna under dess avsedda livslängd. Dimensionering med hänsyn till utmattningsbelastning utförs enligt SS-EN 1990:2002 (SIS, 2002), SS-EN 1991 (SIS, 2002-2006) och eurokod för respektive materialavsnitt för aktuell påltyp.

För betongpålar dimensioneras pålar (betong och armering) till broar (och även många andra anläggningar som dimensioneras enligt Trafikverkets kravdokument) med hänsyn till utmattningsbelastning enligt SS-EN 1992-2:2005 (SIS, 2005c). Betongpålar till övriga byggnader dimensioneras med hänsyn till utmattningsbelastning enligt SS-EN 1992-1-1:2005 (SIS, 2005b).

Stålpålar till broar (och andra anläggningar som dimensioneras enligt Trafikverkets kravdokument) dimensioneras/ kontrolleras enligt SS-EN 1993-2:2006 (SIS, 2006) och SS-EN 1993-1-9 (SIS, 2005f). Stålpålar till övriga byggnader dimensioneras med hänsyn till utmattningsbelastning enligt SS-EN 1993-1-1 (SIS, 2005e) och 1993-1-9 (SIS, 2005f).

Pålar som installeras genom slagning blir utsatta för stora påkänningar under installationsskedet, se kapitel 5. Betongpålar slagna genom fritt vatten eller starkt genomsläppliga jordar kan utsättas för hydraulisk utmattningsbelastning (även benämnd vattensprängning). Mer om hydraulisk utmattningsbelastning för betongpålar redovisas i avsnitt 3.3.1 och kapitel 6.

3.2.5 Installationens inverkan på pålmaterial

Installationen har en negativ påverkan på pålars konstruktiva bärförmåga (gäller framför allt för slagna pålar), se kapitel 5. Detta beaktas genom reduktion av pålmaterialets egenskaper med en faktor μ . I kapitel 6 redovisas storleken på reduktionsfaktorn för stål, trä och betong.

3.2.6 Ingjutningslängd/förankring

En påle kan ha en ledad anslutning till strukturen eller vara fast inspänd. Vid fast inspänning har pålens armering frilagts mellan påle och struktur.

Pålarna ska ges tillräcklig förankring i ovanförliggande konstruktion. I ett normalfall anses 50 mm för en betongpåle vara tillräcklig ingjutningslängd för att säkra pålen i sidled och för att skydda påltoppen m.h.t. täckande betongskikt. I vissa fall föreskrivs dock 100 mm. Måttet bör ta hänsyn till aktuell exponeringsklass. I de flesta fall föreskrivs samma mått för stålpålar. Notera att ovanstående ingjutningslängder eller värden enligt Tabell 3.18 inte är tillräckliga för att erhålla fast inspänning i ovanförliggande konstruktion.

Ingjutningslängd för pålar i strukturen enligt TRVINFRA-00227 (Trafikverket, 2025a) redovisas i Tabell 3.18.

Tabell 3.18 Pålars ingjutningslängd (baserad på tabell 6.1-2 i TRVINFRA-00227 (Trafikverket, 2025a).

Påltyp	Ingjutningslängd
Förtillverkad betongpåle	$\geq 200 \text{ mm}$ ¹⁾
Slank stålpåle / Stålkärnepåle	$\geq 50 \text{ mm}$
Stålrörspåle med diameter $> 0,30 \text{ m}$	$\geq 100 \text{ mm}$

- 1) Kan minskas till 100 mm med frilagd armering med erforderlig förankringslängd eller då bottenplattan gjuts mot tätplatta. För påldäck kan ingjutningslängden minskas till 0,10 m. För bankpålning kan ingjutningslängden minskas till 0,05 m.

I de fall pålar ska förankras för draglaster gäller andra premisser, se avsnitt 3.2.2.

3.2.7 Pålgrupper/minsta pålavstånd

En pålgrupp består av en samling av pålar som tillsammans bär lasten från en byggnad eller annan konstruktion ner i marken. Enligt Krav TRVINFRA-00227 (Trafikverket, 2025a) består en pålgrupp av de pålar som bär ett (1) brostöd. För en sluten plattrambro och en stödmur utgörs pålgruppen istället av de pålar som bär en (1) bottenplatta.

En pålgrupp bör vara utformad så att lasterna är jämnt fördelade över pålarna och för att förhindra sättningar eller skador på ovanförliggande konstruktion. Belastas pålarna även av horisontalkrafter begränsar detta bärförmågan i vertikalled. Horisontalkrafter kan tas upp med:

- lutande pålar
- pålarnas sidomotstånd i jorden, varvid pålarnas bärförmåga för vertikala laster begränsas
- jordtryck mot bottenplatta/pålfundament.

Olika sätt att beräkna pålars lastfördelning i en pålgrupp redovisas översiktligt i kapitel 5.

Vid utnyttjande av sidomotstånd bör pålgruppens sidoutböjning kontrolleras så att den ej överstiger den sidodeformation som den understödda konstruktionen tål. En annan begränsning bör utgöras av den gräns som finns för pålarnas elastiska förskjutning. Om plastiska/kvarstående förskjutningar av påltoppen tillåts bör detta klargöras/vidimeras.

Pålar ska placeras och riktas så att andra pålar eller annan grundläggning inte skadas eller får störd funktion. Pålar bör inte placeras tätare än cirka $4xD$, där D avser en påles diameter. I pålavskärningsplan bör påle placeras med centrumavstånd $\geq 0,8$ m. Detta beror mest på påverkan av knäckbärförmågan i (STR), men även den geotekniska bärförmågan kan påverkas negativt av för tätt placerade pålar.

Samtidigt måste hänsyn tas till att kunna ersätta bortslagna pålar och givetvis får inte pålar projekteras med kollisionsrisk mot djupet (gäller både lutande och vertikala pålar). Ledning kan hämtas i TRVIN-FRA-00227 (Trafikverket, 2025a), se Tabell 3.19.

Där pålar står längre från varandra än $8xD$ i samma riktning som horisontalkraft verkar, räknas pålarna som enskilda pålar. Är avståndet mellan pålarna $3xD$ reduceras hållfasthet och bäddmodul till 25% av oreducerat värde. För mellanliggande värden interpoleras rätlinjigt.

Där pålar står längre från varandra än $3xD$ i riktning som är vinkelrät mot angripande horisontalkraft antas att pålarna funderar som enskilda pålar. Vid mindre avstånd än $2xD$ räknas som om pålarna bildar en hel vägg. För mellanliggande värden interpoleras rätlinjigt.

Tabell 3.19 Rekommenderade minsta centrumavstånd för parallella pålar (baserad på tabell 6.1-1 i TRVIN-FRA-00227 (Trafikverket, 2025a)).

Centrumavstånd i pålavskärningsplan i förhållande till påles diameter (D) för cirkulär påle eller sidomått (B) för kvadratisk påle				
Förutsatt pållängd (m)	Spetsburen påle eller friktionspåle		Kohesionspåle	
	Cirkulär	Kvadratisk	Cirkulär	Kvadratisk
15-25	4 D	4,5 B	5 D	5,6 B
>25	5 D	5,6 B	6 D	6,8 B

Man skiljer mellan pålgrupper bestående av mantelburna pålar (kohesions- eller friktionspålar) och pålgrupper bestående av spetsburna pålar. Mantelburna pålgruppers brottlast kan vara betydligt större eller mindre än summan av de enskilda pålarnas brottlast. I en mantelburen pålgrupp kan mantelbrott uppstå antingen hos en enskild påle eller genom ett globalt brott för hela pålgruppen.

För pålgruppen ska vid projekteringen beaktas

- att pålens konstruktiva bärförmåga (STR) är tillräcklig.
- att pålens geotekniska bärförmåga (GEO) är tillräcklig.
- sättningar.

Pålgruppens konstruktiva bärförmåga studeras så att varje enskild påle kan överföra lasteffekter utan att pålen (inklusive skarvar och spets) går till brott eller deformeras på ett skadligt sätt, se kapitel 6. Vid pålgrupper med täta pålavstånd kan även gruppeffekten, dvs. att flera pålar utnyttjar sidomotståndet från "samma" jordvolym, behöva beaktas, se kapitel 6.

Pålgruppens geotekniska bärförmåga studeras dels för enskild påle, dels för hela pålgruppen. När avståndet mellan enskilda pålar i en grupp är litet kan ett globalt brott i hela pålgruppen (blockbrott) vara dimensionerande. Brottet kommer att utbildas längs pålgruppens periferi. Pålarna och den jord som är innesluten mellan pålarna kommer då att uppträda som en stel kropp. För beskrivning av geoteknisk bärförmåga och sättningar för pålgrupper, se kapitel 7.

3.3 PÅLTYPEN

Arbetsutförande och kontrollinsatser avseende nedan redovisade påltyper beskrivs i kapitel 8 och 9. I kapitel 8 beskrivs också ingående råd om hur hänsyn kan tas i projekteringsskedet. Dimensionering av konstruktiv bärförmåga beskrivs i kapitel 6 och geoteknisk dimensionering beskrivs i kapitel 7.

3.3.1 Prefabricerade betongpålar

Utförandet av pålning med prefabricerade betongpålar beskrivs i den europeiska utförandestandarden SS-EN 12699:2015, Utförande av geokonstruktioner - Massundanträngande pålar (SIS, 2015a).

Prefabricerade betongpålar är den absolut vanligaste påltypen i Sverige. Pålarna utformas enligt den europeiska tillverkningsstandarden SS-EN 12794:2005+A1:2007/AC:2008 (SIS, 2005a). Standarden är en harmoniserad standard vilket innebär att påltillverkningen ska vara certifierad och pålhandlingarna ska innehålla en prestandadeklaration i enlighet med standarden. Pålarna förses vanligtvis med både skarvar och bergskor. Vanliga pålelementlängder är 3-15 m. De vanligaste dimensionerna är kvadratiska pålar med kantmått 235, 270 och 350 mm och de används för lasteffekter i brottgränstillstånd ("Ultimate Limit State, ULS") på cirka 500-2700 kN. Pålarna installeras med pålkran med tung fallhejare, se Figur 3.10.

Betongpålar skarvas med skarvbeslag som gjuts in i pålelementen. Skarvar ska uppfylla kraven för aktuell skarvclass i SS-EN 12794:2005 (SIS, 2005a). Den numera enda förekommande skarvtypen är ABB-skarv, se Figur 3.11.

I Figur 3.12 visas en vanlig bergsko, med lutande plåtsvep, som kan utföras med standarddubb eller förlängd bergdubb. Bergdubben består av specialhärdat stål. Den förlängda bergdubben används för att lättare få fast bergdubben vid släntberg.

Alternativt så används rördubb för att få fäste i släntberg, se Figur 3.13. I kapitel 2 redovisas förutsättningarna för när rördubb kan bli aktuell. I figuren är bergskon utförd med hel bottenplåt och rakt plåtsvep.

Förfarandet vid användning av rördubb är:

- Pålen slås till berg med försiktig slagning ner mot berget.
- Borring genom foderrör i pålen och rördubben och in i berget.
- Montering av styrdubb.
- Fortsatt slagning, inmejsling i berg och stoppslagning.



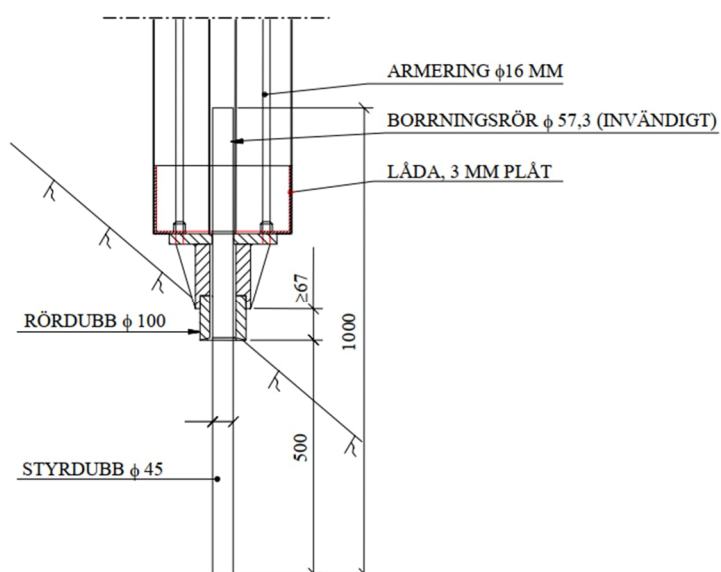
Figur 3.10 Pålning med prefabricerade betongpålar för kaj.



Figur 3.11 Skarvbeslag av ABB-typ för skarvning av betongpåle.



Figur 3.12 Bergsko till betongpåle, bergdubben tillverkas normalt i två olika längder där den längre med fördel kan användas vid släntberg.



Figur 3.13 Bergsko med rördubb används vid kraftigt släntberg. När bergskon når berget avbryts slagningen och ett berghål borras genom pålen och bergskon. En styrdubb släpps ner i hålet och innejsling i berget kan slutföras (Figur: Vägverket, 2004).

Fördelarna med betongpålar är:

- kostnadseffektiva
- mycket användbara i svensk geologi.

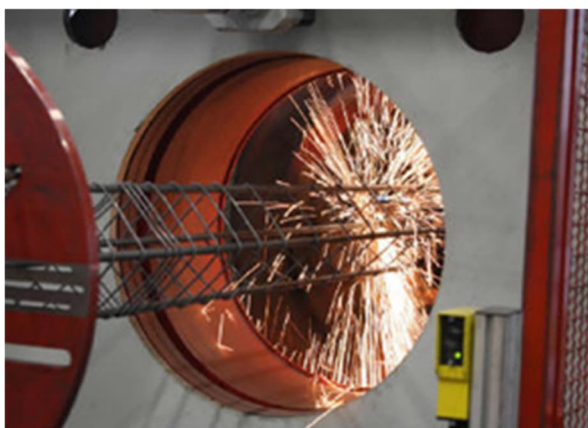
Nackdelarna är:

- Block och fyllnadsmassor kan ge problem med bortslagning av pålar.
- Pålarna är massundanträngande vilket kan medföra problem vid pålning intill befintliga konstruktioner.
- Pålning med del av pålen i fritt vatten eller mycket genomsläpplig jord i kombination med hård drivning kan ge problem med hydraulisk utmattning (vattensprängning) i pålen.
- Installationen kräver stora och tunga maskiner vilka kräver relativt stora säkerhetsavstånd, stor bärlighet hos arbetsbädden och ger upphov till buller och vibrationer.

3.3.1.1 Utmattning

Vid dimensioneringen av betongpålelementet och dess armeringsinnehåll ska hänsyn tas till antalet slag som krävs vid installationen. Detta, tillsammans med de geotekniska förhållandena och mängden integritetskontroll, ligger till grund för valet av reduktionsfaktor μ för betong och armering, se vidare kapitel 6.

Betongpålar kan även behöva kontrolleras med avseende på utmattning i driftskedet, se kapitel 6, det gäller både betong och armering. Armeringens utmattningshållfasthet kan påverkas relativt mycket av om den är svetsad och riktad (från rulle) eller inte. Aktuella konstruktioner är främst broar, vindkraftverk och skorstenar. En viss påverkan från svetsning finns eftersom flertalet armeringskorgar för prefabricerade betongpålar i Sverige tillverkas i svetsrobotar, se Figur 3.14 och Figur 3.15.



Figur 3.14 Svetsning av armeringskorg i svetsrobot.



Figur 3.15 Svetsad armeringskorg intill svetsrobot.

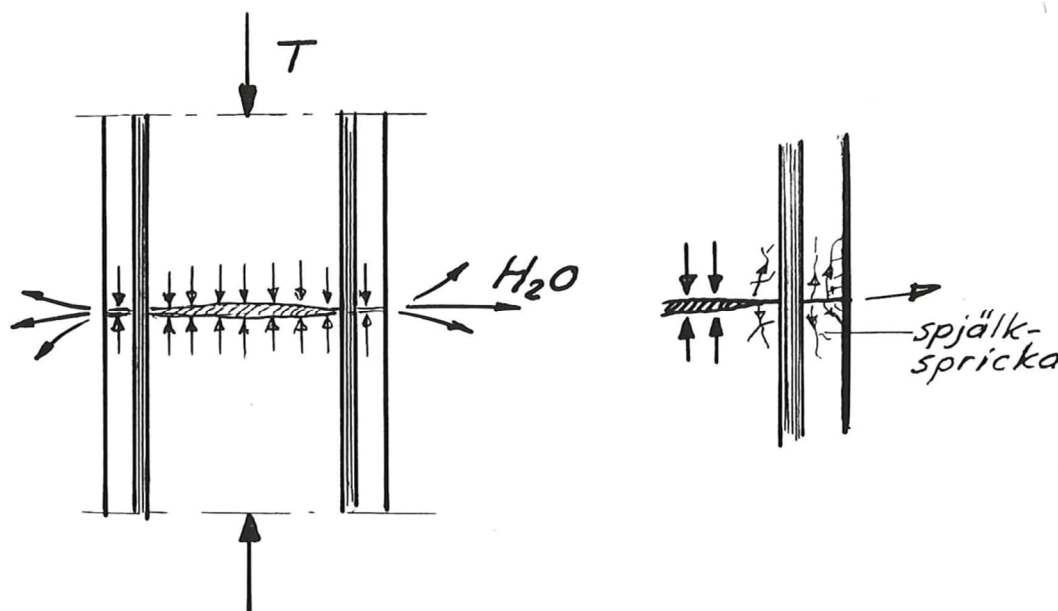
Hänsyn ska då tas till både installationens inverkan och till pålens hela bruksskede. För att uppskatta installationens inverkan kan slagningssimulering med WEAP utföras, se avsnitt 3.7 och kapitel 7. Analyser kan sedan utföras enligt exempelvis delskadehypotes, för att erhålla kvarvarande utmattningskapacitet för driftskedet.

3.3.1.2 Hydraulisk utmattning i betongpålar

Prefabricerade betongpålar kan erhålla skador på grund av hydraulisk utmattning eller 'vattensprängning' i samband med installationen, se Figur 3.16 och Figur 3.17. För ytterligare beskrivning av fenomenet, se kapitel 6.

Skadornas förekomst och omfattning har samband med följande faktorer:

- Närvaro av fritt vatten eller grundvatten i jord med hög permeabilitet.
- Omväxlande stora tryck- och dragspänningar i pålen under slagning, vilket medför utmattning av betongmaterialet. Utmattningsmekanismerna i betong förstärks genom insugning och utpressning av vatten under stort tryck i förekommande spricksystem.
- Förekomst av genomgående sprickor, anslutande tvärsprickor och mikrosprickor.
- Sprickviddens variation med hänsyn till i betongen initialt förekommande egenspanningar av temperatur, krympning och volymändringar av hydratation. Sprickor med mot ytskikten avtagande vidd är speciellt ofördelaktiga. Ogynnsam variation hos sprickvidden ökar med tilltagande dimensioner hos pålens tvärsnitt.
- Betongens tryck- och draghållfasthet jämte andra mekaniska egenskaper hos betongen i pålelementet.
- Pålens konstruktiva utformning, speciellt med hänsyn till armeringens storlek och fördelning över påltvärsnittet (bygdelning).
- Geotekniska förhållanden.
- Slagningsbetingelser.



Figur 3.16 Hydraulisk utmattning - vattensprängning.

Stora tryck- och dragspänningar uppkommer företrädesvis vid hård slagning av långa pålar i relativt fasta leriga eller siltiga friktionsjordarter, varvid situationen kännetecknas av att mantelmotståndet är stort samtidigt som spetsmotståndet är litet eller måttligt. Typiskt för dessa tillstånd är att pålskallens

fjädring är stor i förhållande till dess kvarstående sjunkning. Tendenser till uppträdande av stora dragkrafter kan diagnosticeras och övervakas med hjälp av stötvågsmätningsteknik.

Till de mest verksamma åtgärderna för att förebygga vattensprängningsskador hör, utöver användande av höghållfast betong, lämpligt anordnande av armeringen i pålens tvärsnitt. Såväl teoretiska överväganden som iakttagelser under fältförsök visar klart att ökad och bättre fördelad armering i påltvärsnittet minskar risken för uppkomst av skador på grund av hydraulisk utmattning eller vattensprängning. Lämplig fördelning av längsarmeringen inverkar gynnsamt på dragsprickornas vidd, sprickviddens variation och på kraftöverföringen i dessa sprickor.

Andra lämpliga åtgärder för att undvika den aktuella typen av skador är all sådan modifiering av slagningsbetingelserna, som leder till lägre spänningar under slagningen och till effektivare neddrivning av pålarna, t.ex. större hejarvikt och mindre fallhöjd.

Inträffade skadefall indikerar också att risken för de aktuella skadorna under slagning i vatten ökar med tilltagande påldimensioner.



Figur 3.17 Typiska skador på betongpålar slagna genom fritt vatten orsakade av hydraulisk utmattning.

Åtgärder som kan minska risken för hydraulisk utmattning:

- Utför provpålning med kontinuerlig stötvågsmätning för kontroll av slagdon, tryck- och dragpåkänningar i pålen, samt eventuella skador.

- Reducera stötvågens intensitet och förläng dess varaktighet t.ex. genom reduktion av fallhöjden och ökning av hejarvikten, lämpliga dynmellanlägg etc. Minska antalet slag vid neddrivning av påle genom effektiva slagdon, ökning av hejarvikt etc.
- Använd betong med hög slaghållfasthet, d.v.s. lågt vattencementtal, högvärdig ballast med god vidhäftning gentemot cementpasta m.m.
- Tillse att hårdningsbetingelserna för betongen är gynnsamma.
- Öka längsarmeringen med ledning av uppmätta dragkrafter enligt stötvågsmätningar.
- Öka det täckande betongskiktet.
- Fördela armeringen i möjligaste mån jämnt över sektionen. En del av längsarmeringen bör förläggas centralt i tvärsnittet.
- Minska eventuellt bygglavståndet.

3.3.2 Träpålar

Utförandet av pålning med träpålar beskrivs i den europeiska utförandestandarden SS-EN 12699:2015, Utförande av geokonstruktioner - Massundanträngande pålar (SIS, 2015a).

Trä har en mycket lång tradition som pålmaterial för grundläggning av olika typer av byggnadsverk. Idag används dock träpålar i mindre omfattning, ofta vid temporära konstruktioner t.ex. ställningspålning, pålning för arbetsytor och pålbryggor, se Figur 3.18. Träpålar används även i permanenta konstruktioner och då oftast som kohesionspålar, med s.k. kombipålar, där den övre delen utgörs av en betongpåleled.

Det kan vara på sin plats att påpeka att s.k. "Lätt bankpålning med träpålar" av obehandlat timmer, vilket ibland även kallas för "Norrländspålning" endast är en sättningsreducerande markförstärkning och inte en träpålning. "Lätt bankpålning med träpålar" beskrivs i TRVINFRA-00230, Geokonstruktion, Dimensionering och utformning (Trafikverket, 2025b).



Figur 3.18 Exempel på temporär pålbrygga.

Träpålar kan i princip fås i de längder som träd kan erhållas. Ofta är största längden för oskarvade träpålar cirka 20-25 m, men i normalfallet ligger de på 5-20 m [Lillevrå Såg AB, www.lillevra.se]. Oftast anges toppdiametern i tum och är som lägst 5" eller 125 mm. De största toppdiametrarna erhålls för kortare pålar och är oftast 10" eller 250 mm. I normalfallet kan antas en diametertillväxt på 8 mm/m. Denna beror på trädets ståndort och tillväxthistoria, och varierar i normalfallet mellan cirka 7-13 mm per längdmeter. Beräkningsmässigt kan därför diametertillväxten sättas till 8 mm per längdmeter. På begäran kan större tillväxt än 8 mm erhållas.

Risken för skador och knäckning under nedslagningen gör att träpålar inte lämpar sig i fast lagrad sand, grus, morän och jord innehållande block eller sten (Olsson och Holm, 1993).

I samband med klimatförändringarna har på senare år träpålar fått större uppmärksamhet som ett miljövänligare grundläggningsalternativ eftersom trä är ett förnybart material. Andra fördelar är jämförelsevis låg kostnad, pålarna är lätta att hantera och installera, konformen ökar mantelbärförmågan och de kan användas framförallt som mantelburen, men även som spetsburen påle i temporära konstruktioner. Träpålar kapas enkelt på plats med motorsåg. Några nackdelar är svårighet att få skarvar som kan ta stora moment, låg bärförmåga och risken för uppflytning.

Träpålar behöver stå i en anaerob (syrefri) miljö för att undvika röta, se 3.1.5.4. Bärförmågan för träpålar som är belägna ovan grundvattennivån kan redan efter 5–10 år vara väsentligt nedsatt. Det finns undersökningar som visar att trä kan få skador redan efter ett år om grundvatten sänks och pålen exponeras för syre. Speciellt om pålen befinner sig i fritt vatten och havsvatten.

I tätbebyggda samhällen sker rötangrepp relativt fort eftersom grundvattnet inte sällan är förorenat med avloppsvatten och även uppvärmt. Även upprepade grundvattensänkningar med relativt kort varaktighet kan förorsaka omfattande rötangrepp. Under grundvattenytan kan pålarna påverkas av bakterieangrepp som kan försvaga pålarna. Risken för rötangrepp minskar med minskande temperatur. När jordtemperaturen är lägre än 5°C är risken liten.

Vid fyllning eller då grundvattennivån är belägen under pålavskärningsplanet ska träpålarnas övre del förlängas med en betongpåle för att eliminera risken för rötangrepp och bildar därvid en s.k. kombinationspåle, se avsnitt 3.3.3.

Träpålar i bräckt vatten angrips sällan av skeppsmask. I Östersjön är risken för angrepp av skeppsmask liten. På Västkusten krävs marin impregnering för att klara beständigheten hos exponerat trä. Det är brukligt att skydda träpålar över grundvattenytan mot angrepp genom olika former av impregnering.

Skarvning av träpåle mot träpåle rekommenderas inte i ett normalfall. Det finns skarvar på marknaden av dubbel hylstyp för ändamålet, men det är problem att praktiskt få till en bra kvalitet på skarvningen. I Peleveledningen 2019 (NGF, 2019) står; "Da det erfaringsmessig er vanskelig å få til en tilfredsstillende skjøt på byggeplass, bør skjøting trepel mot trepel unngås". Också beräkningsmässigt ställer det till problem p.g.a. att det blir två "odefinierade" trätytor som ska interagera. Det är lättare om den ena ytan är väldefinierad, d.v.s. betongpåledelen, enligt Figur 3.19, vilka visar kombipåleskarvar.

Enligt tidigare svensk praxis dimensioneras pålar enligt Pålkommisionens rapport 96:1 (Pålkommisionen, 1998). För timmer rekommenderas där att de ska tilldelas materialegenskaper som motsvarar dåvarande konstruktionsklass K12 och som idag approximerats till C14. I det tillkommande supplementet 2 (Pålkommisionen, 2011), vilket uppdaterar rapporten i enlighet med Eurokod står:

Inverkan av lasters varaktighet och fuktigheten hos omgivande miljö på elasticitetsmodul och hållfasthet hos träpålar ska beaktas, se vidare gällande SS-EN 1995-1-1:2004, avsnitten 2.3.1.2, 2.3.1.3, 2.3.2 samt kapitel 3 med tabellerna 3.1 och 3.2 (SIS, 2004). Det finns dock ingen klimatklass som passar in på träpålar i jord och eller vatten. Träpålar av solitt timmer bör ändå förutsättas vara i klimatklass 3, fuktig miljö (RH >85%). Hållfasthetsklasser ska vara enligt gällande SS-EN 338:2016 (SIS, 2016a)

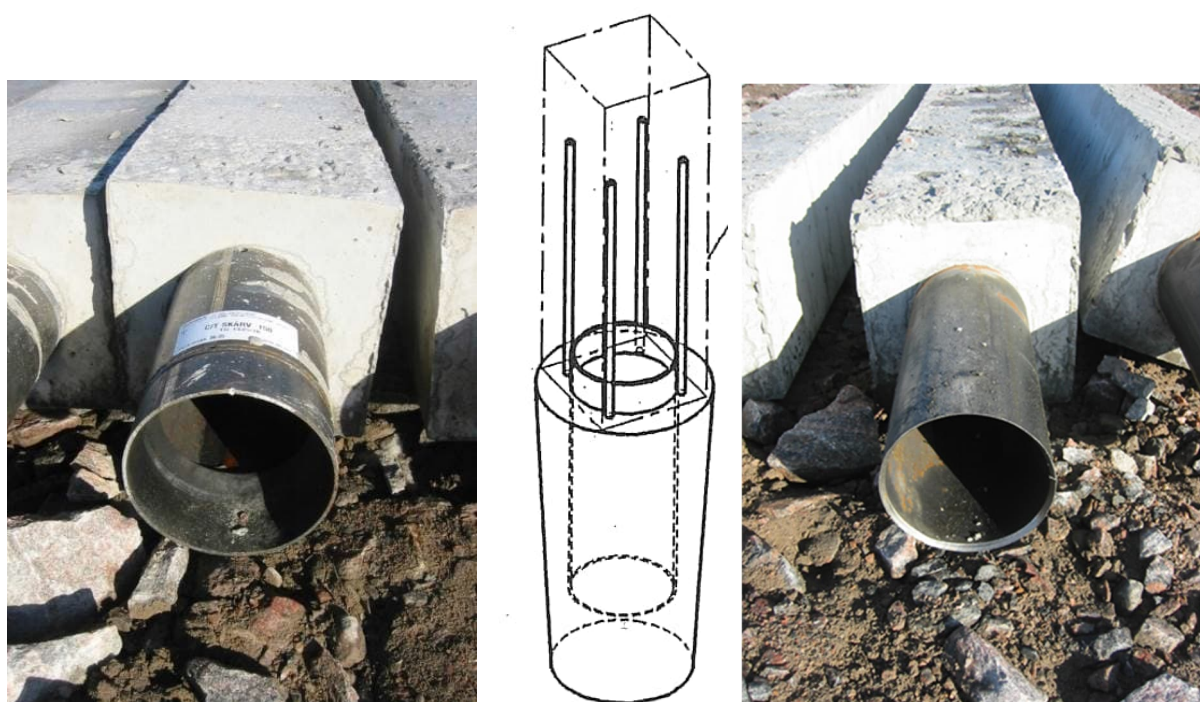
och SS-EN 14081-1:2016 (SIS, 2016b). Med stöd av tidigare praxis och råd i BKR 5:414 (Boverket, 2010) kan hållfasthetsklass C30 för rundvirke användas för dimensionering av träpålar.

3.3.3 Kombinationspålar trä + betong

Utförandet av pålning med kombinationspålar av trä och betong hänförs till den europeiska utförande-standarden SS-EN 12699:2015: Utförande av geokonstruktioner - Massundanträngande pålar (SIS, 2015a).

Kombinationspåle med överpåle av betong och underpåle av trä är en förhållandevis vanlig påltyp vid grundläggning av hus med kohesionspålar i mäktiga lager av lera. Pålarna skarvas med en special-skarv som utformas som en stålhylsa mot träsidan av pålen. Hylsan i Figur 3.19 trycks in i träpålen. Vissa hylsskarvar är försedda med en hullingliknande plåtkona i skarven. Det finns även skarvar med en hylsa som förankras i träpålen med grova ekspik som slås genom förborrade hål i stålhylsan. Betongpålen ska minst vara så lång att träpålen i sin helhet hamnar i kohesionsjord under eventuell fyllning och på ett betryggande djup under grundvattenytan. Pålarna används för lasteffekter i påltopp på cirka 150 – 1200 kN.

Träpålarna ska självklart, som för alla pålar, kontrolleras i alla relevanta snitt i gränstillstånd STR, se kapitel 6. Beroende på utformningen är det troligt att träpålen eller dess skarvsnitt mot betongpåloversdelen dimensionerar hela pålens bärförmåga. I fall med negativ mantelfriktion, s.k. påhängslast, är detta nästan säkert och träpålen behöver då ofta kortas och göras grövre för att inte reducera kombinationspålningens bärförmåga för mycket.



Figur 3.19 Betongpåle med ingjuten skarvhylsa för skarvning till träpåle. Typ Neofac till vänster och BINAB till höger.

Fördelarna med påltypen är:

- kostnadseffektiv
- användbar även för permanenta konstruktioner
- lägre CO₂-belastning än rena betongpålar.

Nackdelar med påltypen är:

- risk för bortslagning vid hinder i jorden
- massundanträngande
- installationen kräver stora och tunga maskiner vilka kräver relativt stora säkerhetsavstånd, stor bärighet för arbetsbädden och som ger upphov buller och vibrationer.

3.3.4 Slagna stålörspålar

Utförande av pålning med slagna stålörspålar beskrivs i den europeiska utförandestandarden SS-EN 12699:2015: Utförande av geokonstruktioner - Massundanträngande pålar (SIS, 2015a).

Det finns stålörspålar som är CE-märkta enligt olika leverantörsspecifika ETA (European Technical Approval). Påleverantörer har ingen skyldighet att CE-märka pålarna. Stålrören ska dock vara CE-märkta och tillverkningen av pålarna ska vara tredjepartsgranskad och CE-märkt enligt SS-EN 1090-1:2009 (SIS, 2009a).

Flera leverantörer tillhandahåller bestämmelser för hur deras produkter ska hanteras i alla avseenden, inklusive tabellerade värden över vilka strukturella och geotekniska bärförmågor som kan uppnås. Leverantörernas bestämmelser ska alltid följas för att erhålla en korrekt produkt.

Stålörspålar kan indelas utifrån ett flertal kriterier. Det är vanligt att kalla vissa dimensioner för "slanka" och vissa för "grova", men beroende på kriterie så kan gränsen mellan "slank" och "grov" vara olika. Detta har att göra med att det dels har funnits två olika Pålkommmissionsrapporter som behandlat slagna stålörspålar, Rapport 98 – Dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålörspålar (Pålkommmissionen, 2000) och Rapport 90 Grova stålörspålar – Anvisningar för dimensionering, utförande och kontroll (Pålkommmissionen, 1993), dels att pålarna fram till 2015 hänfördes till olika utförandestandarder.

Pålarna är lämpliga för pållaster mellan cirka 100 – >10000 kN. Pålar med mindre dimensioner fylls vanligtvis med cementbruk som korrosionsskydd. För pålar med större dimension blir det gradvis intressantare att också använda en fyllning av betong som ett lastbärande komplement. För dimensioner >500 mm är det på samma sätt gradvis mer och mer intressant att också installera en inre armeringskorg för ökad konstruktiv bärförmåga.

Pålar med diameter upp till 140x10 installeras vanligtvis med en hydraulhammare hängande i en lastbilsran. Pålar upp till 170 x 12,5 mm installeras vanligtvis med hydraulhejare, gejdermonterade på lätta maskiner, se Figur 3.20.



Figur 3.20 Installation av stålrörspåle <170 mm.

För grövre dimensioner krävs i princip betydligt tyngre pålkranar. Vid stoppslagning och framförallt vid verifiering av geoteknisk bärförmåga krävs både tunga hejare och hejare med tillräcklig fallhöjd. Det är relativt vanligt att använda en hejare vid drivningen och en specialanpassad hejare med betydligt högre fallhöjd för verifiering med stötvågsmätning. För närvarande finns det relativt få sådana utrustningar tillgängliga i Sverige. Exempel på installation av slagen stålrörspåle med grövre dimension visas i Figur 3.21.



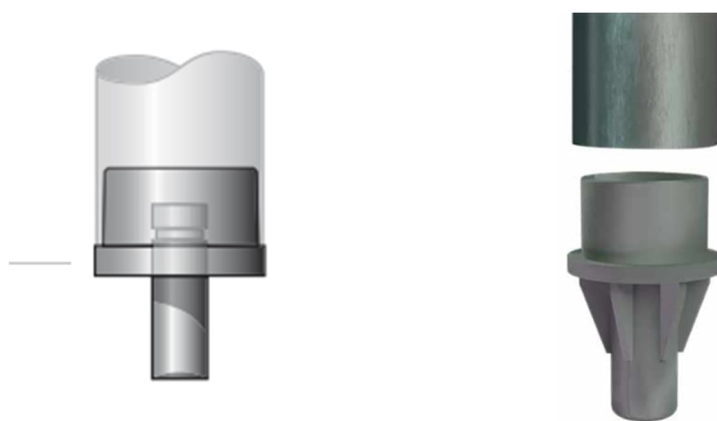
Figur 3.21 Installation av slagen stålrörspåle från ponton.

Det finns olika typer av skarvar till pålarna, såsom hylsor som håller ihop pålarna med friktion och gängade skarvar. De gängade skarvarna är främst avsedda för borrarade stålpålar, men kan fungera också för slagna. Hylsskarvar finns för närvarande för påldiametrar upp till 406 mm. För större dimensioner krävs svetsade skarvar se Figur 3.22. I undantagsfall kan svetsade skarvar utföras också för mindre dimensioner, men proceduren är kostsam och kräver relativt stora kontrollinsatser.



Figur 3.22 Skarvning av grov stålrörspåle med svetsning.

För pålar med dimensioner upp till 273 mm finns lösa, så kallade mekaniska, bergskor tillgängliga, dvs bergskor som fäst på underpålen genom att slås fast med en procedur liknande skarvning med hylsskarv. Dessa bergskor är principiellt utformade enligt vänstra delen av Figur 3.23. För dimensioner upp till 406 mm ser de annorlunda ut, se högra delen av figuren.



Figur 3.23 Olika mekaniska bergskor för stålrörspålar.

För grövre pålar är bergskorna fästade till pålen med svets och exempel på utformningen framgår av Figur 3.24 och Figur 3.25. Vid val av bergsko är det viktigt ska förhållandena vid pålstopp beaktas. För spetsburna pålar där bergskon förväntas nå berg och kunna mejslas in i berget behöver härdad bergdubb användas, se dubben i Figur 3.25. Med utformning av bergsko med bergdubb enligt Figur 3.24 (bergdubb av konstruktionsstål med påsvetsad "egg") går det inte att mejsla in dubben i kristallint berg. Där pålen ska klara att överföra lasteffekten helt till berget ska lastexcentriciteten beaktas vid dimensioneringen av bergskon och dubben, se vidare kapitel 6.



Figur 3.24 Stålrörspåle med bergsko och dubb av konstruktionsstål.



Figur 3.25 Stålrörspåle med öppen bergsko, s.k. "Hullspiss", försedd med härdad bergdubb.

Fördelar med slagna stålrörspålar är:

- mindre risk för bortslagning än för betongpålar, fungerar även bra i fyllning och jord med blockförekomst
- billigare än motsvarande borrarade stålpålar
- grövre dimensioner är bra vid förhöjd grundläggning där pålar står delvis fritt i luft eller vatten
- mindre massundantängning per uppburet kN jämfört med betongpålar.

Nackdelar är:

- känslig för variationer i stålpris
- korrosion
- massundantängande
- buller och vibrationer
- svetsade skarvar är tidskrävande, både svetsarbete och oförstörande provning

- relativt få utrustningar finns i landet för att installera och påvisa geoteknisk bärförmåga för pålar med diameter ≥ 323 mm.

Om pålarna är mindre än cirka 170 mm i diameter minskar kraven på arbetsplattform jämfört med betongpålar och bidrar till en snabbare och enklare etablering.

För att hålla tidplaner brukar det krävas användning av rördimension och materialkvalitet som normalt hålls i lager. Vanligen är det fråga om spiralsvetsade rör.

I allmänhet gäller som huvudvillkor för dimensioneringen att pålen ska ta upp viss axialbelastning. Om stålet ska ta upp lasten innebär det en viss minsta stålarea. Man kan därför välja ett rör med tjockare gods och mindre diameter eller ett med tunnare gods och större diameter. Det är lättare att kapa och skarva ett rör med måttlig godstjocklek. Det finns vissa minimivärden på godstjockleken som inte bör underskridas med hänsyn till risk för korrosion, lokal buckling och möjligheten att transportera och driva röret.

Det är lämpligt att inför dimensioneringsarbetet undersöka vilka dimensioner och godstjocklekar som finns tillgängliga, särskilt vid mindre arbeten och snabb igångsättning. Med anledning av att tvärsnittet lättare hamnar i tvärsnittsklass 4 (och 3) med ökande diameter och stålqualität, så ökar kraven på godstjocklek med diametern och stålklassen, se kapitel 6. Detta är viktigt att kontrollera i ett projekteringskedje. Man bör inte utan särskild undersökning förutsätta större godstjocklek än 20 mm.

Stålrörspålar kan drivas med sluten eller öppen ände. Vid öppen pålände monteras en förstärkningsring vid spetsen. Normalt utförs detta enbart för mantelburna pålar i lera eller friktionsjord. Genom att slå pålarna med öppen spets uppnås fördelarna:

- lättare drivning
- mindre jordundantäckning
- mindre porvattentrycksökning i jorden kring pålen
- minskad omrörning av jorden kring pålen
- ingen kostnad för pålsko.

En öppen pålspets medför att jord kan tränga in i pålen. Om jorden består av lera och pålen har tillräckligt stor diameter kommer jordöverytan inne i pålen att ha samma nivå efter neddrivningen som dessförinnan. Pålen fungerar som en stor kolvborr. Normalt gäller detta för pålar med en diameter större än 600 mm. Under andra betingelser kan en propp bildas. En påle med propp blir jordundantäckande, vilket kan vara en betydande nackdel. Ju mindre diameter pålen har, desto lättare utbildas en propp. För ledning kan med fördel "Shear resistance during and after installation of driven piles in soft clay" studeras (Jendeby, 2019). Se även kapitel 10.

För en sluten påle kan spetsen utgöras av ett lock i form av en påsvetsad stålplatta, s.k. plansko. Denna typ av pålsko kan användas för friktionspålar utan kontakt med berg eller block där man önskar hindra vatten och jord att tränga in i pålen under slagning.

Vid drivning av rörpålar med sluten spets mot berg, eller i jord som innehåller hinder i form av sten eller block, förses stålrörspålar med en bergsko. Denna består oftast av en bottenplatta med en härdad dubb och avstyvningar, exempelvis enligt Figur 3.25.

Slagna stålrörspålar med större diameter kan med viss komplettering i många fall drivas med utrustning som används för att slå förtillverkade betongpålar. För att slå pålar med större diameter än 323 mm krävs i normalfallet en utrustning som är särskilt anpassad för drivning av grova rörpålar.

För att avgöra om slagna stålrörspålar med stor diameter utgör en lämplig lösning erfordras tillräckligt ingående uppgifter om de projekteringsförutsättningar som behandlas nedan.

Vid grundläggning med stålrörspålar av större diametrar är det lämpligt att använda så långa rörsektioner som möjligt. Pålningsmaskinen måste ha tillräcklig lyftkapacitet för de längder och dimensioner som förutsätts. Det är vidare ett krav att slagningsutrustningen anpassas till påltypen.

Det förutsätts att pålarna drivs genom slagning med hejare, vanligen mot påltoppen. Det förekommer att rörpålar drivs genom slagning mot botten av pålen, d.v.s. invändig slagning, men detta förfarande är ovanligt. Grova stålrörspålar slås ofta med ståldyna mellan påle och hejare.

Drivningsutrustningen ska vara produktionsanpassad med avseende på service- och miljökrav och uppfylla kraven att:

- ge tillräcklig drivningskapacitet
- ge tillräcklig kraft för adekvat stoppslagning av pålen.

Den maximala stötkraft som kan uppnås beror främst av hejarens anslagshastighet. Stötens varaktighet är en funktion av hejarmassan. Önskar man öka pålens neddrivning för ett slag med viss fallhöjd, uppnås detta således genom ökning av hejarvikten. Det är därför ur många synpunkter produktions-tekniskt fördelaktigt att använda sig av relativt tunga hejare på 10 ton eller mer eftersom antalet slag med en given fallhöjd för att nå visst påldjup blir mindre jämfört med vad som skulle blivit fallet med en lättare hejare. Färre antal slag och minskad fallhöjd innebär mindre utmattning och mindre slitage hos pålen.

Drivningskapaciteten för olika hejartyper och drivningsförutsättningar kan beräknas teoretiskt med metoder baserade på stötvågsteori, s.k. simulering. Som exempel kan nämnas datorprogrammet WEAP, som är ett kraftfullt verktyg vid val av slagningsutrustning och beräkning av drivningskapacitet. Den största osäkerheten hos detta och liknande prognosverktyg utgörs främst av svårigheten att finna lämpliga geoparametrar (mantelmotstånd, spetsmotstånd, jorddämpningsfaktor o.s.v.). För vidare information, se avsnitt 3.7 och kapitel 7.

I Sverige och länder med liknande geologi brukar ofta ett krav på hejarvikt, fallhöjd och acceptabel sjunkning/10 slag anges som ett erfarenhetsmått på att pålen uppnått erforderlig bärförmåga – s.k. stoppslagningskriterium.

Verifiering av den geotekniska bärförmågan sker vanligen med stötvågsmätning, men kan i enstaka fall utföras med någon typ av statisk provbelastning. Som en tumregel kan en hejarvikt om cirka 2% av erforderlig dimensionerande geoteknisk bärförmåga användas.

Stoppslagningen måste utföras så att kvarstående deformationer i stålet inte blir för stora. Vid en nominell tryckspänning större än stålets stukgräns uppkommer permanent hoptryckning av rörsektionen, vilket leder till kallbearbetning och risk för sprödbrott.

Deformationens storlek beror på den tidsrymd under vilken spänningsöverskridandet verkar. Därför föreskrivs att stoppslagning inte får utföras så att större stålspanning än stålets karakteristiska hållfasthet uppkommer. På så sätt elimineras teoretiskt risken för att röret deformeras vid stoppslagningen.

Vid pålgrundläggningar där stålrörspålar med stor diameter är aktuella, förekommer ofta relativt stora horisontalkrafter. Detta motiverar att pålarna slås lutande. Ju flackare lutning som väljs, desto färre pålar krävs beräkningsmässigt.

Ur produktionssynpunkt bör inte flackare lutning än 5:1 till 6:1 väljas. På så sätt undviks många problem vid arbetsutförandet. Den ökning av pålantal som en brantare lutning medför, uppvägs i allmän-

het av ett enklare utförande för pålar som ej avviker alltför mycket från vertikal riktning. Val av pållutning utgör ett exempel på en projekteringsfråga, som bör bli föremål för samråd mellan projektör och entreprenör.

3.3.5 Borrade stålrörspålar



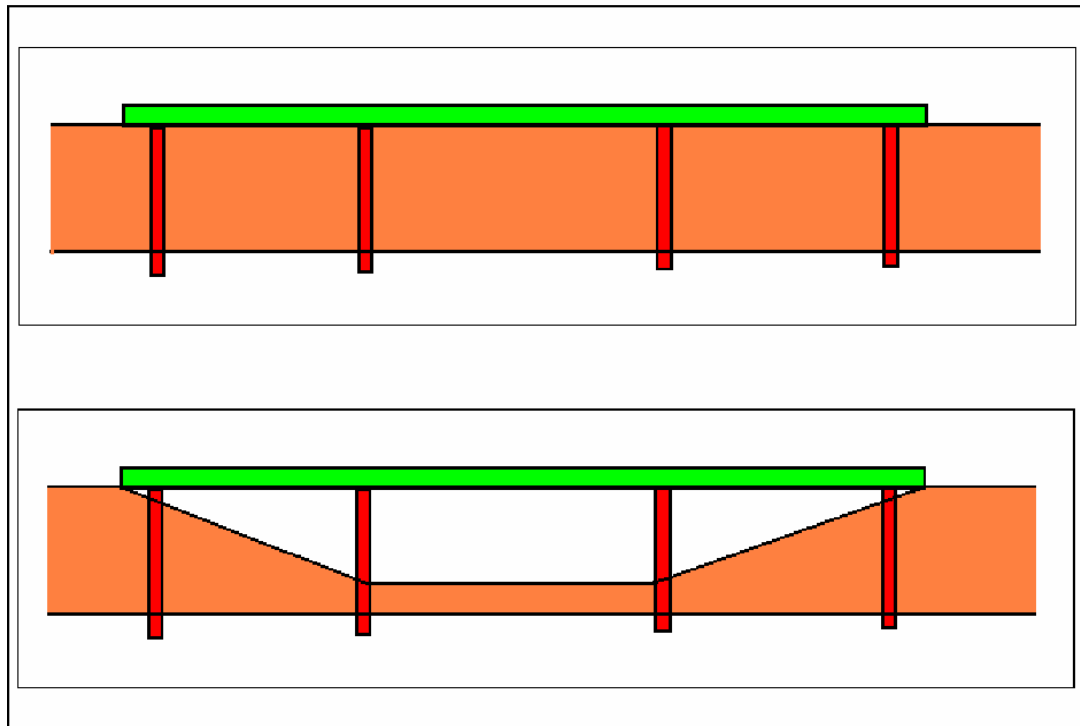
Figur 3.26 Installation av borrade stålrörspåle.

Påltypen innebär att stålröret förses med en engångsborrkrona (ring-set) i botten och neddrivningen sker med luft- eller vattenspolning genom en sänkborrhämmare, se Figur 3.26 och Figur 3.28. Beroende på dimension och pållängd varierar erforderlig maskinstorlek. I normalfallet kan pålsegment om 3–12 m användas och skarvas genom antingen gängade skarvar eller svetsning. I projekteringsfasen ingår att undersöka tillgången på förutsatta dimensioner och material. Borring av pålar kan minska problematik med massundanträngning. Samtidigt finns andra omgivningspåverkande problem att ta hänsyn till som grundvattensänkning, störning av omgivande jord, mammutpumpeffekter, överuttag av jordmassor och inte minst att det uppborrade materialet i flytande form måste kunna omhändertas på adekvat sätt, utan att orsaka nedsmutsning av omgivning eller grumling av vattendrag osv. Hänsyn måste också tas till att tiden för pålinstallationen utökas kraftigt för borrade pålar jämfört med slagna.

Listan över faktorer som är gynnsamma för användning av borrade stålrörspålar ger anvisningar om vilka användningsområden som lämpar sig för denna påltyp. Pålarna har fördelar i följande pålningsobjekt:

- grundförstärkningar i omgivningskänslig miljö
- grundläggningsarbeten intill existerade konstruktioner, där massundanträngande pålar kan orsaka problem
- pålgrundläggning där pålarna direkt kan övergå i pelare, se Figur 3.27
- hinder i marken i form av block, sten eller andra konstruktioner.

Det bör noteras att hinder som utgörs av armerade betongkonstruktioner inte kan genomborras med metoden. Hinder som utgörs av trä i olika former kan hanteras, men medför ofta byte av utrustning och lägre framdrivningshastighet. Borrade stålörspålar är allmänt sett lämpliga där hinder i mark medför problem för slagning av pålar.



Figur 3.27 Borrade stålörspålar övergår i pelare upp till brobana. Brobanan och pålarna utförs från markytan, varefter schakt sker för utrymmet under bron.

Borrade stålörspålar i diameterintervallet 115 – 406 mm kan idag sägas utgöra standarddimensioner. Dessa kan alla skarvas med gängade skarvar. Ju grövre påldiameter, desto större maskiner krävs och desto färre finns på marknaden. För diametrar över 406 mm krävs dessutom svetsade skarvar, vilka i ett normalfall kräver längre installationstid och flera kontroller.

I projekteringsfasen är det viktigt att göra en genomgång av hur borrhingsarbetet kan utföras på bästa sätt med avseende på de olika faserna. Arbetet och de olika insatserna behöver i projekteringsfasen inte planeras i detalj, men det ska i stora drag klargöras vilka resurser och vilka metoder som i första hand ska tillämpas.

Val av borrhutrustning för borrade stålörspålar görs i första hand med utgångspunkt från följande faktorer:

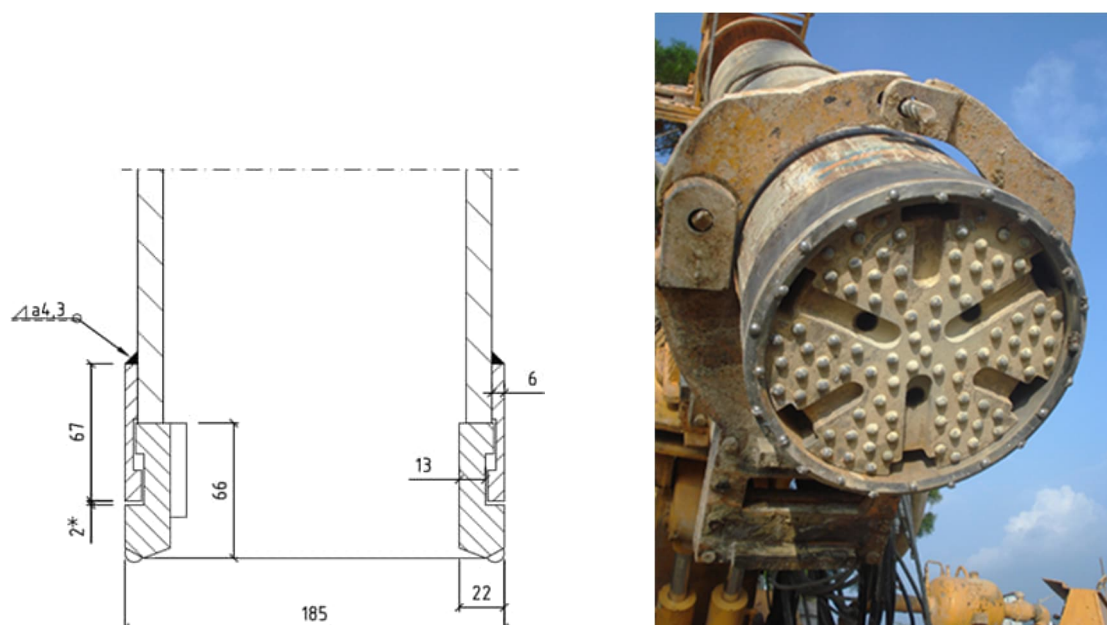
- föreskrivna miljökrav, främst grundvattenpåverkan, buller, vibrationer och utsläpp
- djup till berg
- tillgängligt utrymme på arbetsplatsens, främst begränsningar i höjdlängd (källare)
- tillgång på vatten och el
- produktionsbegränsningar, t.ex. restriktioner av arbetstider
- toleranskrav
- produktionskapacitet
- geotekniska förutsättningar, främst hinder och uppspolningsrisk.

Listan kan göras längre om alla styrande villkor ska tas med, men ett minimikrav bör vara att i projekteringsfasen ägna uppmärksamhet åt ovan nämnda förhållanden. I allmänhet blir valet en kompromiss, där en del förhållanden blir styrande, t.ex. krav på begränsning av miljöpåverkan.

Vid projekteringen av borrarde stålrörspålar är det viktigt att bestämma vilka stålsorter samt vilka rördimensioner och godstjocklekar som ska förutsättas. För ett visst objekt, där borrarde stålrörspålar ska användas, är det alltid möjligt att med vissa förutsättningar beräkna den teoretiskt optimala kombinationen av rördiameter, godstjocklek och stålsort.

Beträffande val av stålsort rekommenderas att välja stål från de ledande leverantörerna, vilka tillhandahåller CE-märkta pålar enligt ETA (European Technical Approval).

I Figur 3.28 och Figur 3.29 visas exempel på utformning av ringborrkrona och borrarde stålrörspålar med ring-set respektive utan ring-set (med vingsystem).



Figur 3.28 Ringborrkrona och borrarde stålrörspålar med ring-set, utformad för borrarde stålrörspålar.



Figur 3.29 Borkronor utan ring-set, utformade för borrarde stålrörspålar.

Sammanställningen av betongen som gjuts i det nedborrade stålröret styrs av utförandestandarderna SS-EN 14199:2015 (diameter <300 mm) (SIS, 2015b) och SS-EN 1536:2010 (diameter >300 mm) (SIS, 2010a).

Fördelar med borrade stålörspålar är:

- "ingen" massundanträngning
- ingen bortslagning
- går att utföra med mindre installationstoleranser (toleranserna styrs av respektive utförande-standard)
- kan relativt lätt utföras med invändiga dragstag
- bra vid förhöjd grundläggning där pålar står delvis fritt i luft eller vatten, främst pålar med diameter >200 mm.

Nackdelar är:

- dyr borrkrona
- korrosion
- omgivningspåverkan vid borrning, störning av jordparametrar, grundvattenpåverkan, urspolning i finkorniga jordar, spillhantering, luft i jordformationer m.m.
- för stoppslagning och verifiering av geoteknisk bärförmåga krävs för diametrar >406 mm många gånger fallhejare, som inte finns tillgängliga på svensk marknad
- svetsade skarvar är tidskrävande, både svetsarbete och oförstörande provning (>406 mm).

Skulle de lösa jordlagrens egenskaper vara sådana att den strukturella/konstruktiva bärförmågan (STR) blir för låg, kan foderrör med fördel användas genom dessa. Foderrör och snabbhärdande cementbruk är också lämpligt att använda för att begränsa utbredningen av cementbruk i t.ex. sprängstensfyllning när det gäller borrade och injekterade påltyper.

Pålarna kan fyllas med betong för att öka den konstruktiva bärförmågan. Då utnyttjas ofta en inre armeringskorg för de större påldimensionerna (>406 mm), ibland enbart över de övre delarna av pålen. Om betongen ska användas i bärförmågesyfte i STR, krävs åtgärder för utförande och kontroll, se vidare Pålkommisionens Rapport 108 (Pålkommisionen, 2024). Samtidigt erhålls då ett invändigt korrosionsskydd.

Fyllning av betong i röret vid övre änden, s.k. "störtning" får aldrig tillämpas utan särskild utredning och provning, eftersom separation av betongens beståndsdelar (cement, sand och sten) kan väntas uppkomma utom för mycket korta pålar utan vattenfyllning.

På projekteringsstadiet ska säkerställas att den kvalitet på gjutningen som krävs kan uppnås under aktuella förhållanden. I allmänhet ska betongen vara förtillverkad. Det är en fördel, framför allt vid långa pålar, att använda självkompakterande betong.

Hänsyn ska i projekteringsfasen också tas till de kontrollinsatser som krävs, se vidare kapitel 9. De ska innefatta kontroll av eventuella svetsar och angivande av erforderliga åtdragningsmoment för att de koniska hylsskarvarna ska fungera som avsett.

3.3.5.1 Borrade slanka stålörspålar

Utförandet av borrade slanka stålörspålar beskrivs i den europeiska utförandestandarden SS-EN 14199:2015: Utförande av geokonstruktioner – Mikropålar (SIS, 2015b).

Borrade slanka stålrörspålar definieras som pålar med en diameter ≤ 300 mm installerad genom borrhining, se Figur 3.30. Dimensionerna varierar mellan 115 x 6,3 mm – 273 x 12,5 mm. Pålarna skarvas med gängade skarvhylsor. Krav enligt leverantör på åtdragningsmoment för gängskarvarna ska anges i bygghandling. Erforderligt åtdragningsmomentet ökar vanligtvis med ökande påldimension och är vanligtvis minst 1 kNm. Det absoluta flertalet pålar på marknaden är CE-märkta enligt ETA. Leverantörer av pålarna har dock ingen skyldighet att CE-märka pålarna. Stålrören ska vara CE-märkta och tillverkningen av pålarna ska utföras enligt SS-EN 1090-1:2009 (SIS, 2009a). Tillverkningsprocessen ska vara tredjepartsgranskad.

Pålarna är lämpliga för pållaster från cirka 350 – 2500 kN.



Figur 3.30 Installation av borrarad, slank stålrörspåle.

Vid planering av pålningsarbeten, där det finns risk för bortslagning av slagna pålar, eller där pålar riskerar att bli alldeles för korta, bör det även finnas en alternativ pålningsmetod med t.ex. borrarad stålrörspåle, vilken bör kommuniceras med beställaren. Detta görs med fördel med en text i Teknisk Beskrivning eller Mängdförteckning i ett förfrågningsunderlag (FU), se kapitel 4.

3.3.5.2 Borrade grova stålrörspålar

Utförandet av borrade grova stålrörspålar med diameter > 300 mm hänförs till den europeiska utförandestandarden SS-EN 1536:2010: Utförande av geokonstruktioner – Grävpålar (SIS, 2010a). Standarden är egentligen inte utformad för dessa pålar, men skillnaderna mellan en grävpåle förankrad i berg och en borrarad stålrörspåle är emellertid relativt små och nackdelarna med detta är förhållandevis små.

Beträffande dimensioner så utförs borrade grova stålrörspålar i samma dimensioner som slagna grova stålrörspålar, d.v.s. 323 – 1220 mm med godstjocklek på 8 – 24 mm, se Figur 3.31. Pålarna kan utföras med svetsade skarvar eller gängade skarvhylsor. I dagsläget finns det gängade skarvar för dimensioner upp till 406 mm diameter. Vid grövre dimensioner svetsas skarvarna. Krav på åtdragningsmoment (enlig leverantörens anvisningar) för gängskarvarna ska anges i bygghandling.

Pålarna används vanligtvis för lasteffekter på 2000 – $>> 10000$ kN.



Figur 3.31 Installation av borrarad, grov stålörspåle.

3.3.6 Kombinationspålar av stål och betong

Utförandet av pålning med slagna kombinationspålar av stål och betong omfattas av den europeiska utförandestandarden SS-EN 12699:2015: Utförande av geokonstruktioner - Massundanträngande pålar (SIS, 2015a).

Kombinationspåle med överpåle av stål och underpåle av betong är en påltyp som kan komma till användning när övre delen av pålen utsätts för belastningar som kräver både hög böjstyvhet och hög momentkapacitet. Pålarna skarvas med en specialskarv, ena skarvhalvan svetsas till stålörspålen medan den andra halvan gjuts in i den prefabricerade underpålen. Skarvarna är i princip enbart skarvar till betongpålar som anpassas till att kunna monteras på ett stålör, se Figur 3.32. Pålarna installeras genom slagning.

Fördelar med påltypen är:

- högre konstruktiv bärförmåga än motsvarande betongpåle
- kostnadseffektiv i förhållande till stålörspåle, speciellt om betongpåledelen är relativt lång.

Nackdelar med påltypen är:

- skarvar behöver specialanpassas
- läget för skarven behöver oftast kunna styras vilket gör att påltypen är mest användbar som kohesionspåle.



Figur 3.32 Exempel på stålpile med en monterad betongpål skarv.

3.3.7 Stålkärnepålar

Stålkärnepålar omfattas av den europeiska utförandestandarden SS-EN 14199:2015: Utförande av geokonstruktioner – Mikropålar (SIS, 2015b). Standarden hanterar pålar med diameter ≤ 300 mm.

En stålkärnepåle består av ett foderrör och en massiv stålkärna som centreras i foderröret. Foderröret borrar genom jorden in i friskt berg. Vanligtvis skarvas foderrören genom svetsning, men det förekommer även gängade skarvar. Borrningen fortsätter ytterligare en bit under foderröret med en klenare borrkrona som anpassats till storleken till stålkärnan. Efter renspolning av hålet sänks stålkärnan ned. Stålkärnan korrosionsskyddas av kvarlämnade foderrör samt cementbruket i utrymmet mellan stålkärnan och foderröret. Stålkärnorna skarvas genom svetsning eller gängad konisk skarv av API-typ. Det är viktigt att erforderligt åtdragningsmoment tillämpas och kontrolleras. Likaså rekommenderas att skarven låssvetsas. Centrerung av stålkärnan sker medelst styrningar som monteras på stålkärnan.

De principer som gäller för stålkärnepålar kan tillämpas även för tjockväggiga rör i foderrör där ett tjockväggigt rör "ersätter" den massiva stålkärnan.

Stålkärnans diameter varierar vanligtvis mellan 70 – 200 mm, men även större dimensioner förekommer.

Stålkärnepålar är i princip att betrakta som spetsburna pålar då de överför hela lasten via stålkärnan till underliggande berg. Överföringen av lasten från stålkärna till berg kan utföras antingen genom att spetsen överför lasten från stålkärnan direkt på berget eller genom att pålen borrar längre in i berget och för över lasten till berget via vidhäftning mellan stålkärnans mantel och bruk samt mellan bruk och berg. Vid det senare utförandet förses stålkärnan med påsvetsade rillor för att öka vidhäftningen. Stålkärnepålar som överför lasten till berget via manteln kan överföra stora dragkrafter. En annan fördel med stålkärnepålar är att pålarnas styvhet kan anpassas. Både böjstyvhet och axialstyvhet kan styras genom val av dimension på kärna och foderrör. Detta kan vara bra till exempel vid grundläggning av dynamiskt belastade maskinfundament.

Stålkärnepålar utförs vanligtvis för lasteffekter mellan 500 – 2500 kN i tryck och drag.

I Figur 3.33 visas installerade stålkärnepålar avsedda för tryck och dragkrafter. I Figur 3.34 visas exempel på mothåll och lastuppställning för statisk provbelastning av stålkärnepålar.

Fördelar med stålkärnepålar är:

- generellt liten omgivningspåverkan
- liten (eller ingen) massundanträngning
- ingen bortslagning
- höga lasteffekter
- kan ta stora draglaster
- relativt lätt att anpassa både axialstyvhet och böjstyvhet.

Nackdelar med stålkärnepålar är:

- dyr påle
- känslig för variation av stålpriset
- omgivningspåverkan vid borrar, störning av jordparametrar, grundvattenpåverkan, urspolning i finkorniga jordar, spillhantering, luft i jordformationer m.m.
- hantering på arbetsplats vid långa längder (slanka och tunga)
- hög koldioxidbelastning, lågt utnyttjande av stålet.

Användningen av stålkärnepålar har minskat avsevärt under senare tid. Det beror på att borrade stålrörspålar oftast kan användas i stället för stålkärnepålar och att borrade stålrörspålar vanligtvis är ekonomiskt mer fördelaktigt att använda, se avsnitt 3.1.9. Det är framförallt när det är extremt stora dragkrafter eller finns behov av att styra axialstyvhet och böjstyvhet (t.ex. vid dynamiskt belastade fundament) som stålkärnepålar är mer fördelaktigt att använda. Normala till stora draglaster kan relativt enkelt hanteras med installation av invändiga dragstag i borrade rörpålar, se avsnitt 3.6 och Figur 3.53 vilket ytterligare har minskat användningen av stålkärnepålar, sedan åtminstone 2015.

Borrmaskiner som används utomhus för foderrörborring för stålkärnepålar är i allmänhet av samma typ som används även för annan grovhålsborring i berg.

Vid arbeten i trånga utrymmen, exempelvis vid grundförstärkningsarbeten i källare, används maskiner som är speciellt konstruerade för att fungera i trånga utrymmen med begränsad ventilation. I Figur 3.35 visas en sådan maskin, "Källarmusen", som kan passera genom endast 90 cm breda dörröppningar.

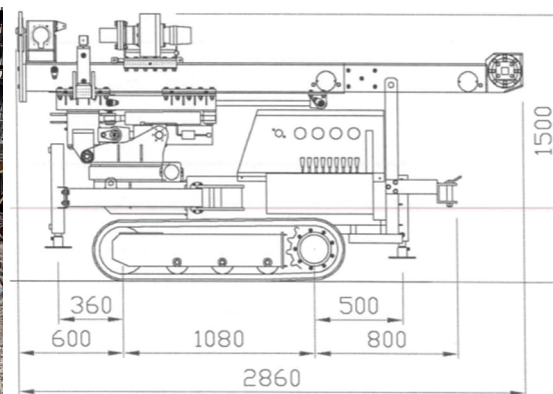
Större maskiner för utomhusbruk kan hantera upp till cirka 12 m långa rörsegment. I källarmiljö kan man behöva minska längden på rörsegmenten till cirka 1 m.



Figur 3.33 Stålkärnepålar avsedda för både tryck och dragkrafter är försedda med topplatta och förankringsjärn. I figuren syns också några stålkärnepålar med enbart topplatta, avsedda för enbart tryckkrafter.



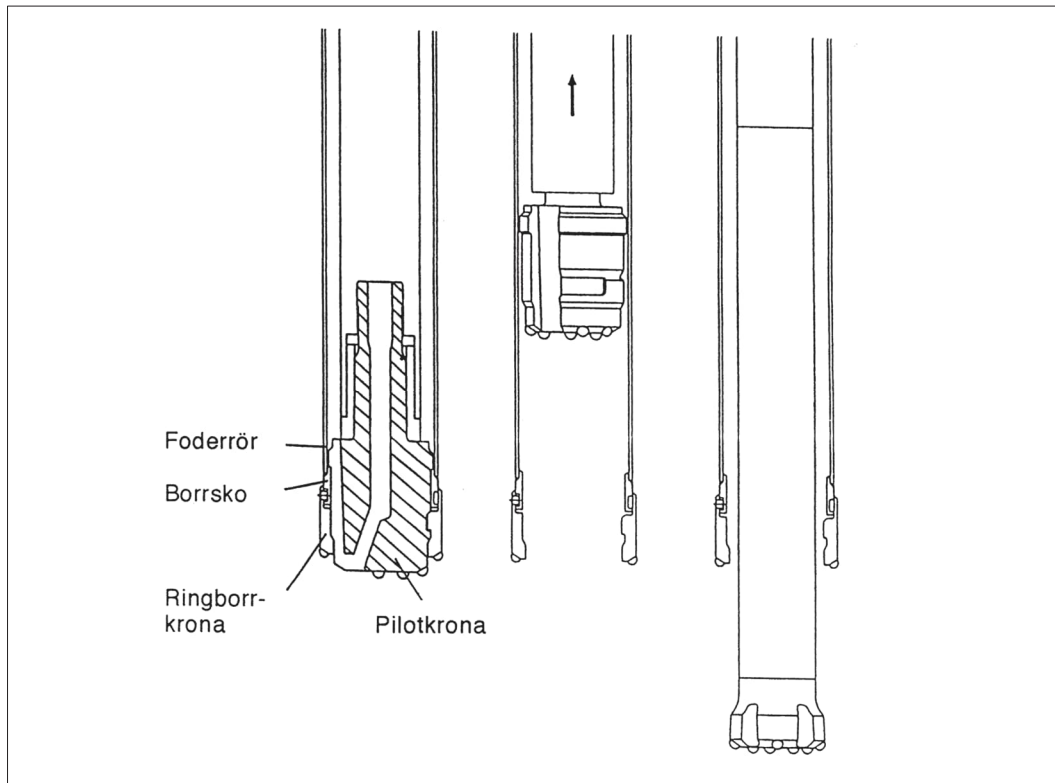
Figur 3.34 Exempel på statisk provbelastning av stålkärnepåle.



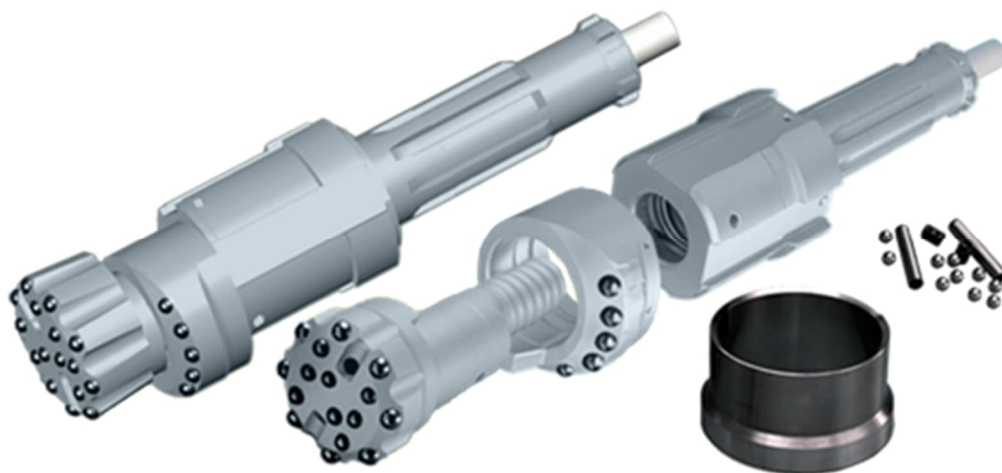
Figur 3.35 Källarmus (Geomek med separat kraftpaket) som kan borra foderrör för stålkärnepålar eller stålpålar i trånga utrymmen.

Det är givetvis fördelaktigt att använda så långa foderrörsegment som möjligt. Vid monteringen av kärnor utomhus är det vanligen möjligt att foga ihop över 20 m långa kärnor före nedsänkningen. Vid sättning av så långa kärnor krävs en mobilkran. Normalt levereras som längst 12 m långa kärnor. Skarvning utförs med svetsning eller gängade skarvar av API-typ. Svetsning av grova stålkärnor är ett mycket tidskrävande arbetsmoment. Kontroll av svetsarbetet sker enligt de krav som redovisas i SS-EN 1090-2:2018 (SIS, 2018c), tillsammans med eventuella krav särskilt angivna för objektet.

Borrningen av foderröret kan ske genom slående och roterande borrning. Borraggregatet kan vara av typen topphammare eller sänkborrhämmare. Borrkronan kan ha centrisk eller excentrisk utformning, se Figur 3.36 och Figur 3.37.



Figur 3.36 Centrisk borrkrona.



Figur 3.37 Excentrisk borrkrona (ODEX).

En omständighet som kräver särskild uppmärksamhet är borring av foderrör med sänkborrhämmare i finkornig jord av typ silt eller finsand under grundvattenytan. Teoretiskt ska endast den jord- eller bergvolym som motsvarar foderrörets volym avlägsnas ur jordmassan och transporteras upp till markytan. Vid bergboring lyfts lossborrat borrhax från borrhålsbotten framför borrhönan genom hål i denna upp genom foderröret. Detta åstadkoms genom att stora mängder luft sprutas ut genom hönan, varefter luften återvänder in i foderröret och upp genom detta tillsammans med borrhaxet.

Utförs borring med sådan utrustning under grundvattenytan, kan en kraftig vattenströmning in i foderröret uppkomma. Strömningen kan dra med sig jordpartiklar i sådan omfattning att avsevärt större volym än foderrörsvolymen sugas in i röret och avbördas vid utblåsöppningen vid markytan. Resultatet blir en tendens till "tomrumsbildning" i marken, vilket ibland visat sig medföra sättningar på markytan och i markgrundlagda konstruktioner.

Vid foderrörsboring under grundvattenytan i silt och finkornig sand finns anledning att vid projekteringen välja topphämmare, om marksättningar över viss storlek är kritiska. Det finns dock särskilda utformningar av sänkborrhämmare som modifierats så att ovan beskrivna mammutpumpeffekt motverkas. Användning av skum som borrhätska är en annan metod som kan minska uppspolningstendensen.

För att centrera kärnan i foderröret förses kärnan med distanser placerade med cirka 2 till 3 m avstånd i pålens längdriktning. Vid lutande pålar krävs tätare placering av distanser. Distanshållarna brukar av korrosionshänsyn vara av plast eller annat icke metalliskt material.

Vid påltoppen svetsas en platta för överföring av pålkraften till den anslutande konstruktionen, vanligen en armerad betongkonstruktion. Är pålen enbart utsatt för tryckkrafter placeras plattan på pålens översida och svetsas fast genom ett hål i plattan, se Figur 3.38. Är det fråga om en påle som ska ta dragkrafter, krävs kraftöverförande plåtar som svetsas till både platta och kärna, se Figur 3.39.

Vid dragen påle bör plåtarna placeras över plattan om arbetet ska utföras på platsen. Risken är annars att arbetsutförandet och kontrollen blir lidande beroende på "omöjlig" arbetsställning, se Figur 3.40.

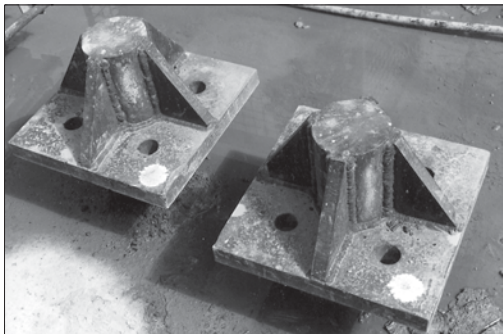
Om stålkärnepålen utförs med i berg ingjuten kärna brukar en påläggssvets i form av 3 mm höga rillor med 50 till 100 mm avstånd utföras. Syftet är att förbättra vidhäftningen mellan kärna och omgivande injekteringsbetong och bergborrhål. Även här utförs förvärmning före påläggssvetsningen.

Som framgår ovan är det ett flertal arbetsmoment som ska utföras på stålkärnan innan den placeras på plats i foderröret. Svetsarbete i grova stålkonstruktioner utförs med fördel inomhus i verkstadsmiljö.

Vid stålkärnor fastgjutna i berg kan nivån som borringen ska ske till oftast bestämmas i förväg. Detta innebär att kärnorna med skarvar, distanser, toppplatta och påläggssvets kan iordningställas på verkstad. Förtillverkade kärnor innebär stora tidsbesparingar i form av minimal tid mellan borring och montage samt hög utförandekvalitet.



Figur 3.38 Platta vid stål kärna, enbart tryckkraft.



Figur 3.39 Platta vid stål kärna med dragkraft.



Figur 3.40 Ogenomtänkt placering av svetsfogar medför försvårat arbetsutförande.

Vid projekteringen bör man ta hänsyn till att kärnorna måste lagras så att de inte har för låg temperatur vid nedsänkningen i foderröret. Annars kan isbildning på kärnans mantelyta uppkomma då den sänks ned i foderröret om detta är fyllt med injekteringsbruk eller grundvatten.

Projekteringsinsatsen måste också innefatta erforderliga lyftanordningar samt beakta att dimensionerande lasteffekt kan uppkomma under lyftningsfasen, beroende på hur lyftningen sker. Detta gäller exempelvis svetsade fogar i kärnan.

3.3.8 Borrade injekterade pålar

Utförandet av borrade injekterade pålar omfattas av den europeiska utförandestandarden SS-EN 14199:2015: Utförande av geokonstruktioner – Mikropålar (SIS, 2015b).

Borrade och injekterade pålar installeras genom samtidig borrhning och injektering av cementbruk. En engångsborrkrona, anpassad efter jord- eller bergart, skruvas fast på det helgängade, ihåliga stålet. Injekteringsbruket går genom stålet och ut i borrhnan genom ett eller flera utlopp, riktade radiellt eller vertikalt beroende på borrhkrona. Skarvning sker med gängade skarvhylsor. Genom att kontinuerligt trycka ut cementbruk skapas ett täcksikt längs hela stålets längd, se Figur 3.41. Borrhkronans storlek och jordens egenskaper påverkar storleken på betongkroppen som bildas runt borrhstålet.

Under installationen kontrolleras och protokollförs injekteringstryck och åtgång av cementbruk. Efter installationen och härdning av cementbruket verifieras pålarnas geotekniska bärförmåga med statisk provbelastning. Påltypen kan användas för både tryck- och dragkrafter. I en övre lös del av jordprofilen kan påltypen förstärkas med ett yttre foderrör för att öka den konstruktiva bärförmågan med avseende på knäckning. Påltypen är vanligtvis mantelburen men kan även borraras in i berg och fungera som en spetsburen påle.

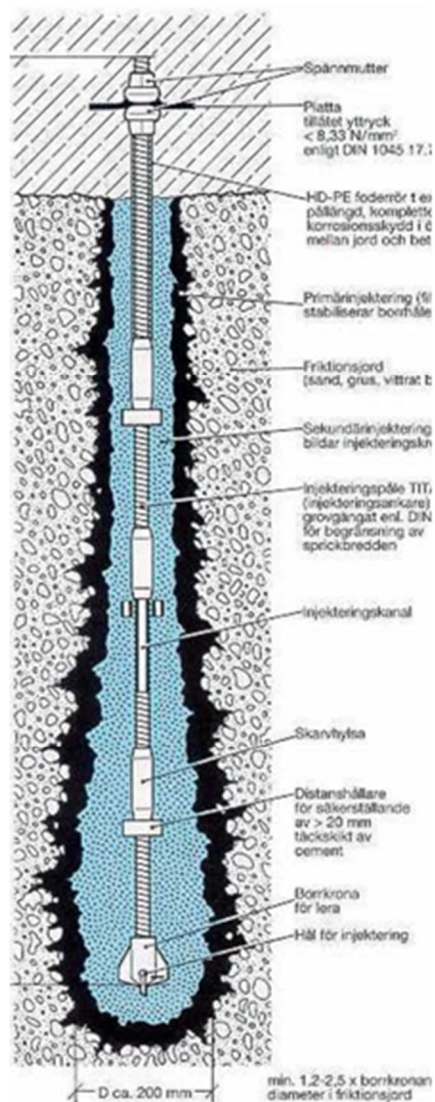
Borrade injekterade pålar utförs vanligen för lasteffekter på 100 – 2000 kN i tryck och drag.

Fördelar med borrade injekterade pålar är:

- utmärkta som mantelburna pålar i friktionsjord
- ingen massundanträngning
- ingen bortslagning
- liten omgivningspåverkan
- klarar både tryck- och dragkrafter.

Nackdelar med påltypen är:

- dyr påle
- i vissa jordar är injekteringsmetoden osäker
- mycket spill av injekteringsbruk
- känslig med avseende på knäckning i övre lösa jordlager
- kräver aktiv design och kontroll
- kräver statisk provbelastning för verifiering av geoteknisk bärförmåga
- känslig för bortspolning av injekteringsbruket i vattenförande/öppna jordlager.



Figur 3.41 Installation av borrad injekterad påle utförs under kontinuerlig injektering av cementbruk. Injekteringstryck och tillförsel av cementbruk styrs för att erhålla en betongkropp runt stålpålen.

Gemensamt för den här påltypen är att installation sker genom borrhning under samtidig injektering eller genom samtidig injektering under nedslagning eller nerpressning, se Figur 3.41. Genom verknings-sättet vid installationen ges möjligheten att ändra omgivande jords egenskaper, d.v.s. friktionsjorden kan kompakteras och vidhäftningen mellan pålskaft och omgivande jord förbättras.

I projekteringskedet är det viktigt att göra en lämplighetsanalys, vilket gäller för alla påltyper, i syfte att få den mest optimala lösningen. Det är också viktigt att känna till de produktionstekniska förutsätt-ningarna för injekterade pålar samt vilka förundersökningar som är nödvändiga.

Injekterade pålar är inte alltid det billigaste alternativet, sett ur materialkostnadssynpunkt. Installations-tiden är nästan alltid lätt att beräkna, vilket är en stor fördel för både anbudsgivare och beställare. Me-toden är också snabb om man jämför med andra liknande påltyper i aktuellt tillämpningsområde, vilket gör att installationstiden är kortare än för många andra metoder.

Borrutrustningen som krävs för installation av injekterade pålar är en borrhugg för topphammarborrning, se Figur 3.42. Till skillnad från en sänkborrhutrustning förlorar topphammarborrningen mer och mer energi ju djupare borrhningen drivs. För varje kombination av topphammare, bormaskin, påltyp och geologi finns ett maximalt djup, till vilket pålen kan drivas. Behöver pålen borraras in i berg är det extra viktigt att tillräcklig energi kan levereras ner till spetsen.

För borrade och injekterade pÅlar med samtidig injektering förutsätts för samtliga pÅltyper att en speciell övergångs- eller spoladapter används för att leda cementbruket utanför borrhammaren.

Borriggen ska ha en tillräcklig vikt för att säkerställa pÅlens installationsriktning.



Figur 3.42 Installation av borrarad, injekterad pÅle.

3.3.9 Gräv pÅlar

Utförandet av gräv pÅlar beskrivs i den europeiska utförandestandarden SS-EN 1536:2010: Utförande av geokonstruktioner – Gräv pÅlar (SIS, 2010a).

Grävda eller borrarade pÅlar med relativt stor diameter är den vanligaste pÅltypen i många länder. Det är en icke massundanträngande pÅle av betong som gjuts direkt i mark. PÅlen kan antingen vara armerad eller oarmerad och ha ett permanent, temporärt foderrör eller inte. Vanliga pÅldiametrar är mellan 0,6 och 2,0 m, men exempel finns pÅ ännu större diametrar. För närvarande finns ingen fast maskinpark för dessa pÅlar i Sverige.

Fördelar med gräv pÅlar är:

- fungerar bra även i fyllning och jord med blockförekomst
- tar stora lasteffekter
- inte massundanträngande.

Nackdelar är:

- stora betongmängder (kan kräva en betongstation på plats)
- buller och vibrationer
- känslig för block och lutande bergyta
- behov av foderrör/stödvätska (bentonit- eller polymerslurry) i lös jord
- stor och dyr etablering
- behov av betongstation/blandarstation för stödvätska.

Vid utförande av grävpålar ska alltid risken för hydraulisk bottenuppträckning noggrant utredas och om så krävs ska åtgärder såsom vattenövertryck eller stödvätska inom foderrör föreskrivas. Vid projekteringen ska också avgöras om foderrör erfordras för betongarbetena.

Vanligtvis ska följande förhållanden utredas och anges innan arbetena påbörjas:

- schaktningsförfarande
- pålarnas ordningsföljd vid installation och centrumavstånd
- behov av försprängning
- störning av omgivningen.

Schaktningsförfarandet bestäms bl.a. av kravet på bottenuppluckring och om foderrör erfordras. Om risken för bottenuppträckning är stor kan schaktning under t.ex. bentonitsuspension erfordras.

Ordningsföljden vid pålarnas installation planeras så att närbelägna pålars bärförmåga inte skadas och så att den i jord gjutna betongen får tillräcklig hållfasthet.

Försprängning kan behövas vid blockförekomst och eller kraftigt släntberg.

Om störningar från eventuell försprängning eller från arbetsröret vid kraftigt neddrivningsarbete utgör risk för omgivningen ska detta beaktas.

Pålarna tillverkas genom att ett hål grävs eller borrar i jorden ned till bärkraftiga jordlager eller berg om pålen ska vara spetsburen eller till erforderligt djup för att erhålla tillräcklig mantelbärförmåga. För schaktningen används antingen en frihängande eller gejderstyrd hydraulgripskopa eller någon typ av jordskruv (auger). I fasta och blockiga jordar kan man behöva använda tunga fallmejslar eller t.o.m. behöva spränga för att kunna schakta sig ned. Det är ofta nödvändigt att stabilisera schaktväggarna i hålet. Detta sker enklast med vatten eller med en stödvätska. Det krävs ofta stora och tunga maskiner för installation av grävpålar med stor diameter, se Figur 3.43. Pålarna kan installeras som en stödkonstruktion, där de griper in i varandra, och kallas då sekantpålar, varvid de bildar en sekantpålevägg. Detta faller dock utanför Pålhandboken.



Figur 3.43 Borrutrustning för installation av grävpålar för Karlatornet, Göteborg.

I Sverige är det vanligast att stabilisera schaktväggarna med skarvbara, tjockväggiga foderrör, som trycks, slås eller vrids ned i jorden. Då avsett djup har nåtts rensas botten från kvarliggande lösa massor. Vid behov sänks en armeringskorg ned varefter pålen gjuts i torrhet eller under vatten/stödvätska. I samband med gjutningen återvinns vanligtvis foderröret genom successiv uppdragning. CFA-pålar (Continuous Flight Auger), utförs utan foderrör och den uppborrade jorden ersätts kontinuerligt med betong, när borren dras upp ur marken. Därefter installeras en armeringskorg i den färska betongen, se Figur 3.44.

Grävda och borrade pålar kan överföra stora laster. De kan dessutom utföras med låg buller- och vibrationsnivå. Viktiga användningsområden är i tätbebyggda områden och för höga byggnader med stora koncentrerade laster. Genom sin böjstyvhet och förmåga att ta upp stora sidolaster passar påltypen också bra vid anläggningsarbeten, såsom broar och kajer.

Att grävpålar sällan används i Sverige beror delvis på att de kan vara svårbedömda ur kostnads- och kapacitetssynpunkt. Speciellt gäller detta under grundvattenytan i blockiga eller hårda moränjordarter samt vid arbeten i flytbenägna siltjordarter och mot släntberg. Lösa jordar kräver också foderrör, inte sällan permanenta sådana, vilket i normalfallet medför mycket höga extra kostnader.

Grävpålar utförs vanligen för lasteffekter mellan 2000 – >>10000 kN.



Figur 3.44 Installation av CFA-påle, Halmstad.

3.3.10 Övriga påltyper (vakant)

Avsnittet kompletteras i kommande utgåvor av Pålhandboken.

3.4 VIBRERADE PÅLAR

3.4.1 Allmänt

Vibrering är en specialmetod och det finns ingen styrande standard för de flesta sorters pålar. Den bedöms huvudsakligen vara aktuell för följande byggsituationer:

- Som projekterad metod i bygghandling för att minska omgivningspåverkan.
- Som extra åtgärd för att ta sig igenom vissa kompakta jordlager där det inte är möjligt att driva pålen med slagning eller borrar.

Som projekterad metod i bygghandling: Det rekommenderas att det redan i planerings- (kapitel 2) och projekteringsskedet bedöms om vibrering krävs, dels för att minska omgivningspåverkan (vibrationer, buller eller massundandrängning), dels för att ta sig igenom mer kompakta jordlager. Bedöms detta vara en lämplig åtgärd bör mer detaljerade studier tas fram, exempelvis provpållning (se avsnitt 3.7 och kapitel 7 och 9).

Som extra åtgärd: Vibrering kan användas för drivning genom vissa jordlager, och en spontvibrator kan anpassas för att gripa pålen. Eventuella åtgärder ska dokumenteras tydligt, se kapitel 9, kontroll och verifiering.

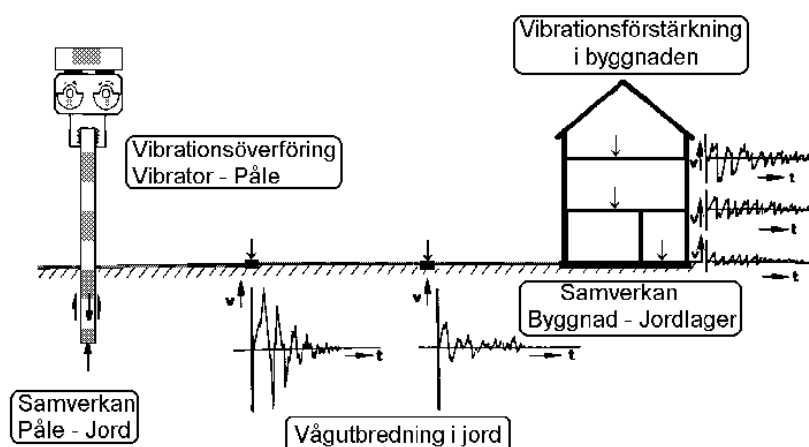
När vibratorer används på rätt sätt åstadkoms en skonsam och effektiv installation av pålar. Metoden kan anpassas till aktuella geotekniska förutsättningar. Omgivningspåverkan vid vibrodrivning beskrivs i kapitel 10.

Mer detaljerad beskrivning av vibrerade pålar redovisas i Massarsch (1993), Westerberg, Massarsch och Eriksson (1996), Krogh och Lindgren (1997) och Viking (1998).

3.4.2 Metodbeskrivning

3.4.2.1 Vibreringsutrustning

För att kunna förstå vibreringsprocessen är det nödvändigt att beakta alla samverkande faktorer, dvs. vibratorns dynamiska egenskaper, överföringen av vibrationsenergin till och genom pålen, samverkan mellan den vibrerande pålen och den omgivande jorden samt vågutbredningen i jordlagren och byggnader på eller i jord, se Figur 3.45.



Figur 3.45 Vibrering av påle och jord.

I Europa förekommer nästan uteslutande hydrauliskt drivna vibratorer, som består av följande huvudkomponenter:

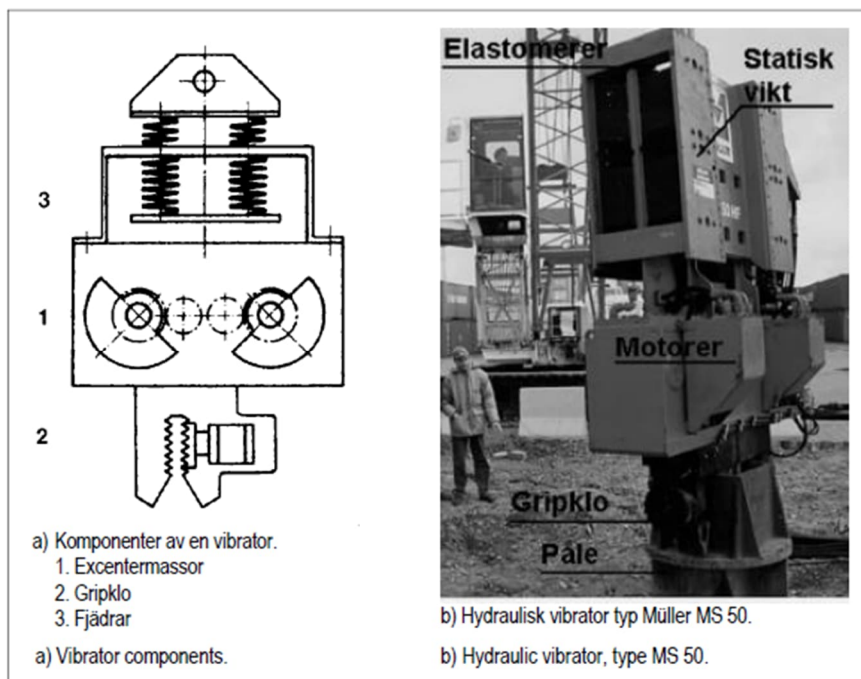
- Excentermassor.
- En statisk massa.
- Fjädrar (elastomerer).
- Gripklo.

Fjädrarna utgör förbindelsen mellan den vibrerande delen (excentermassor, motorer och lager samt vibratorhus) och den statiska delen (upphängningen och den statiska massan). Den statiska massan ovanpå fjädersystemet har till uppgift att öka penetrationsförmågan, men ska också säkerställa en lugn drift genom dynamisk avstämning av vibreringsenheten. Drivningsutrustningen består av följande huvudkomponenter:

- Kraftaggregat.
- Hydrauliska ledningar.
- Vibrator.
- Kontrollpanel.
- Påle.
- Pålkran.

Figur 3.46 visar en principfigur av en vibrator. Figur 3.47 visar en movaxvibrator som har anpassats till vibrering av pålar, där en gripklo fattar tag runt pålen vid vibrering.

För att uppnå ett ur teknisk och ekonomisk synvinkel optimalt drivningsresultat bör de dynamiska egenskaperna hos vibrator och påle anpassas till de aktuella jordlagrens egenskaper.



Figur 3.46 Principbild av en vibrator.



Figur 3.47 Movaxvibrator för vibrering av pålar i lera.

3.4.2.2 Vibratorers verkningsätt

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

$$M = \sum G_m \cdot r \quad \text{Ekvation 3-2}$$

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

$$F_V = M \cdot \omega^2 \quad \text{Ekvation 3-3}$$

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

$$s = M / G_D \quad \text{Ekvation 3-4}$$

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

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

$$s_p = \frac{1}{G_D} \left(M - \frac{R_{\text{Mant}}}{\omega^2} \right) \quad \text{Ekvation 3-5}$$

Dessa parametrar påverkar hur vibratorn och pålen samverkar. Genom att ändra massan, rotationsaxeln och rotationsfrekvensen kan vibratorn anpassas till de lokala förhållandena, innefattande både pålen och jordlagerföljden. I många fall sker övergångar mellan olika jordlager, vilket kan hanteras med en justering av vibratorn.

3.4.2.3 Vågrörelse i påle

Vibrationsenergin överförs från vibratorn genom pålen och till omgivande jordlager. Av särskilt intresse är de faktorer som påverkar pålens eller spontens nedträngning i jord.

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

Vibratorn däremot är normalt fast förbunden med pålen, vilket innebär att nämnvärda energiförluster inte uppstår. Vibratorn försätter pålen i en vertikalt oscillerande svängningsrörelse. En del av rörelseenergin förbrukas längs pålen genom mantelfriktion och omvandlas till värme. Den kvarvarande energin kan användas för att övervinna jordens motstånd vid pålspetsen. Rörelseenergin breder ut sig dels från pålens mantel, dels från pålspetsen till den omgivande jorden. Hur stor del av energin som överförs från manteln respektive spetsen beror huvudsakligen på jordlagrens dynamiska egenskaper. Vid penetration genom ett djupt sandlager uppstår ett koniskt vågfält som utbreder sig från pålens mantel, eftersom spetsmotståndet normalt är lågt. Vid penetration genom fasta skikt eller vid stoppslagning överförs huvuddelen av energin från spetsen i form av volymvågor (tryck- och skjuvvågor). Växelspelet mellan mantelfriktion och spetsmotstånd är komplicerat och förhållandena ändrar sig när pålen tränger ner genom olika jordlager. Vid samma tidpunkt kan vibrationer alstras längs manteln och från pålspetsen och kan innehålla ett brett frekvensspektrum. I litteraturen redovisas ofta vibrationsmätningar där enbart det horisontella avståndet på markytan från pålen till mätpunkten anges. Däremot saknas den viktiga informationen om pålens djup och avståndet från pålspetsen eller den "neutrala punkten" (centrum för vibrationsutstrålningen) längs pålmanteln. För att realistiskt kunna beräkna vibrationsdämpningen från en vibrerande påle är det således nödvändigt att analysera spets- och mantelmotståndet under hela drivningsförloppet. Det bör också noteras att vid vibrering av en påle uppstår i jorden såväl vertikala som horisontella svängningsrörelser, trots att pålen i huvudsak oscillerar i vertikal riktning.

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

Till skillnad från slagning med fallhejare, där en vågrörelse alstras vid pålskallen, som sedan fortplantar sig genom pålen, framkallas vid vibrering en stående våg i pålen. Våglängden är vid hejarslagningen ("stöt") kortare än pålens längd, och kraften överförs som en stötvåg. Vid vibrering är frekvensen, och därmed våglängden betydligt längre. Som exempel kan antas en betongpåle med vågutbredningshastighet $c_B = 3500$ m/s. Vid en vibreringsfrekvens av 25 Hz är våglängden $l = 140$ m, det vill säga avsevärt större än längden av vanligt förekommande pålar. Det är möjligt att beräkna för olika påltyper (stålpålar respektive betongpålar), vid vilken vibrationsfrekvens belastningsförloppet är dynamiskt eller "pseudo-statiskt" (stelkroppsvibration). Man kan förutsätta att en påle beter sig som en stel kropp när spänningsvågens amplitud vid pålspetsen är minst 90 % av den vid pålskallen.

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

$$Z = \rho \cdot c_B \cdot A = \frac{E \cdot A}{c_B}$$

Ekvation 3-6

Detta diskuteras i kapitel 7 för stötvågsutbredning i pålar, men det är samma princip för pålar som vibreras. Den dynamiska kraften P som överförs till pålskallen och sedan fortplantar sig genom pålen erhålls som produkt av impedansen Z och svängningshastigheten v i pålen (som inte ska förväxlas med vågutbredningshastigheten c_B).

$$P = Z \cdot v = \frac{E \cdot A}{c_B} \cdot v$$

Ekvation 3-7

3.4.2.4 Jordmotstånd vid vibrering

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

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

Fältmätningar i samband med pålvibrering och jordpackning har visat att den vertikala svängningsrörelsen av pålen framkallar såväl vertikala som horisontella svängningscykler i den omgivande jorden (Krogh och Lindgren, 1997). Den horisontella svängningskomponenten uppstår genom friktionen mellan pålmanteln och jorden, och kan vara av storleksordning 30 – 50 % av den vertikala svängningskomponenten. Genom vibreringen uppstår ett "stående vågfält", där det horisontella jordtrycket minskar vid varje nedåtrörelse (respektive uppåtrörelse) av pålen. Den horisontella svängningsfrekvensen är dubbelt så hög som pålens. Denna effekt har även inverkan på en vibrerad påles bärförmåga, eftersom det sker en permanent spänningsomlagring. Denna effekt har också stor betydelse vid jordpackning. Ett flertal undersökningar har visat att det horisontella jordtrycket efter vibrationspackning kan öka med 200 – 500 % (Massarsch, 1993).

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

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

3.4.2.5 Mantel- och spetsmotstånd

Det dynamiska motståndet som uppstår längs manteln och vid spetsen av den vibrerande pålen påverkas i huvudsak av fyra faktorer:

- vibrationsfrekvens (centrifugalkraften)
- pålens svängningshastighet

- förskjutningsamplituden mellan påle och jord
- antalet vibrationscykler.

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

Löst lagrad friktionsjord tenderar att packas tills den har uppnått en "kritisk lagringstäthet". I löst lagrad, vattenmättad friktionsjord ökar porvattentrycket genom vibrering, som reducerar effektivspänningen och därmed skjuvhållfastheten. När porvattenövertrycket når totaltrycket uppstår "jordförvätskning" (liquefaction) och hållfastheten försvinner temporärt. Om vibreringen fortsätter utjämnas porvattenövertrycket igen och effektivspänningen ökar. Friktingsjord övergår efter jordförvätskning i ett fastare lagringstillstånd.

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

3.4.2.5.1 Mantelmotstånd i friktionsjord

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

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

Det stora antalet lastcykler som uppstår vid vibrering bryter ner jordstrukturen. Sandpartiklarna nöts och friktionsvinkeln minskar. I friktionsjord uppnås den bästa nedträngningen genom en ökning av svängningshastigheten i pålen (hög centrifugalkraft). Andra faktorer har underordnad betydelse.

3.4.2.5.2 Mantelmotstånd i kohesionsjord

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

Vibrationsfrekvensen och därmed belastningshastigheten påverkar kohesionsjordens skjuvhållfasthet. Mantelmotståndet ökar med vibrationsfrekvensen. Därför bör vibrationsfrekvensen i kohesionsjord hållas lågt, utan att förorsaka resonanseffekter. Förskjutningsamplituden är den faktor som har störst inverkan på mantelmotståndet i leror. I medelfast och fast lera erfordras en relativt stor förskjutningsamplitud för att kunna övervinna mantelmotståndet. Vidhäftningen mellan påle och kohesionsjord kan minskas när förskjutningsamplituden överskrider ett kritiskt värde, som för medelfasta och fasta leror ligger omkring 10–30 mm.

Lerans skjuvhållfasthet avtar i allmänhet med ökat antal lastcykler och har tendensen att reducera mantelmotståndet. I kohesionsjord utförs vibrationsdrivning lämpligen med stor förskjutningsamplitud. Detta uppnås enklast vid en låg vibrationsfrekvens. I dessa fall bör risken för resonanseffekter beaktas.

3.4.2.5.3 Spetsmotstånd i friktionsjord

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

I lös och medelfast lagrad, vattenmättad friktionsjord uppstår temporärt ett flyttillstånd (jordförvätskning) nära pålspetsen. Porvattentrycket utjämnas dock snabbt i grovkornig friktionsjord. Förskjutningsamplituden måste i allmänhet begränsas vid höga frekvenser. Erfarenheten tyder på att förskjutningsamplituden endast har underordnad betydelse. Lastcykler orsakar en nötning av jordpartiklarna (minskad friktionsvinkel) samt en nedbrytning av jordstrukturen vid spetsen. I löst lagrad jord kan ibland packning uppstå. I fast friktionsjord, däremot, kan ett ökat antal lastcykler resultera i dilatans som gradvis luckrar upp jorden.

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

3.4.2.5.4 Spetsmotstånd i kohesionsjord

Spetsmotståndet i kohesionsjord är hastighetsberoende och tilltar med ökad frekvens. Centrifugalkraften måste vara tillräckligt stor för att bryta ned lerans skjuvhållfasthet. I lera kan det stora antalet lastcykler leda till en reduktion av skjuvhållfastheten.

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

3.4.2.6 Samband mellan vibrering och bärförmåga

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

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

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

3.4.2.7 Resonanseffekter i jord

Vid vibrering av pålar kan resonans uppstå mellan vibratorsystemet och de omgivande jordlagren. Denna effekt kan undvikas, men också förstärkas genom vibrering. Vid användning av moderna, variabla vibratorer kan vibratorfrekvensen och svängningsamplituden varieras under hela drivningsförloppet för att minska markvibrationer.

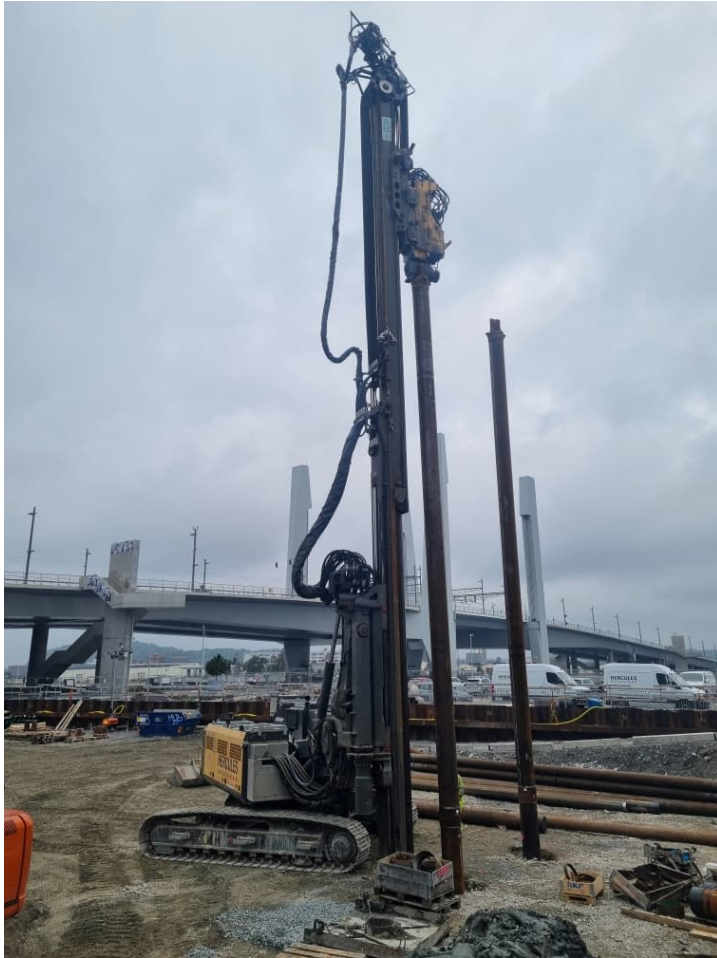
Vid resonans vibrerar vibratoren, pålen och de omgivande jordlagren "i fas" och det uppstår en effektiv vibrationsöverföring från vibratoren genom pålen till de omgivande jordlagren. Resonanseffekten medför att den relativa svängningsrörelsen mellan pålen och jorden, som erfordras för att pålen ska kunna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

Till skillnad från resonanseffekter i jordlager kan resonans även framkallas i pålen. Genom resonanseffekten förstärks svängningsrörelsen i pålen, som ger ökad penetration. Påfrestningarna på påle och utrustning samt energiförbrukningen är dock mycket höga.

3.4.2.8 Vibrationsutrustning

Vibrationsdrivning kan vara effektiv vid installation av pålar och spont, förutsatt att arbetet utförs av kompetent personal och med lämplig utrustning. Ett exempel på där en vibrator har anpassats till en standard pålmaskin visas i Figur 3.48. Följande frågor bör övervägas vid projekt där vibrator ska användas för pål- eller spontdrivning:

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



Figur 3.48 API spontmaskin anpassad för att vibrera pålar.

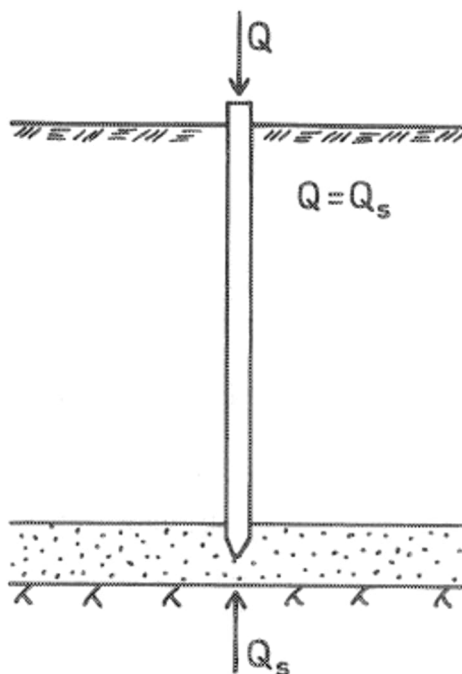
3.5 PÅLARS VERKNINGSSÄTT

Med utgångspunkt från det sätt laster överförs från pålarna till jorden delas pålar ofta in i spetsburna respektive mantelburna pålar. I svenskt språkbruk görs ofta skillnad mellan mantelburna pålar i friktionsjord (friktionspålar) och mantelburna pålar i kohesionsjord (kohesionspålar). I t.ex. engelskt språkbruk görs ingen sådan åtskillnad, utan mantelburna pålar såväl i friktionsjord som i lera benämns "friction piles". Pålar är sällan renodlat spetsburna eller mantelburna. I exempelvis silt- och sandjordarter överförs lasten till jorden ofta både på spetsen och via manteln, se mer om pålars funktion och verkningsätt i Kapitel 5.

3.5.1 Spetsburna pålar

Spetsburna pålar överför lasten huvudsakligen via spetsen till berg eller fast jordlager, se Figur 3.49.

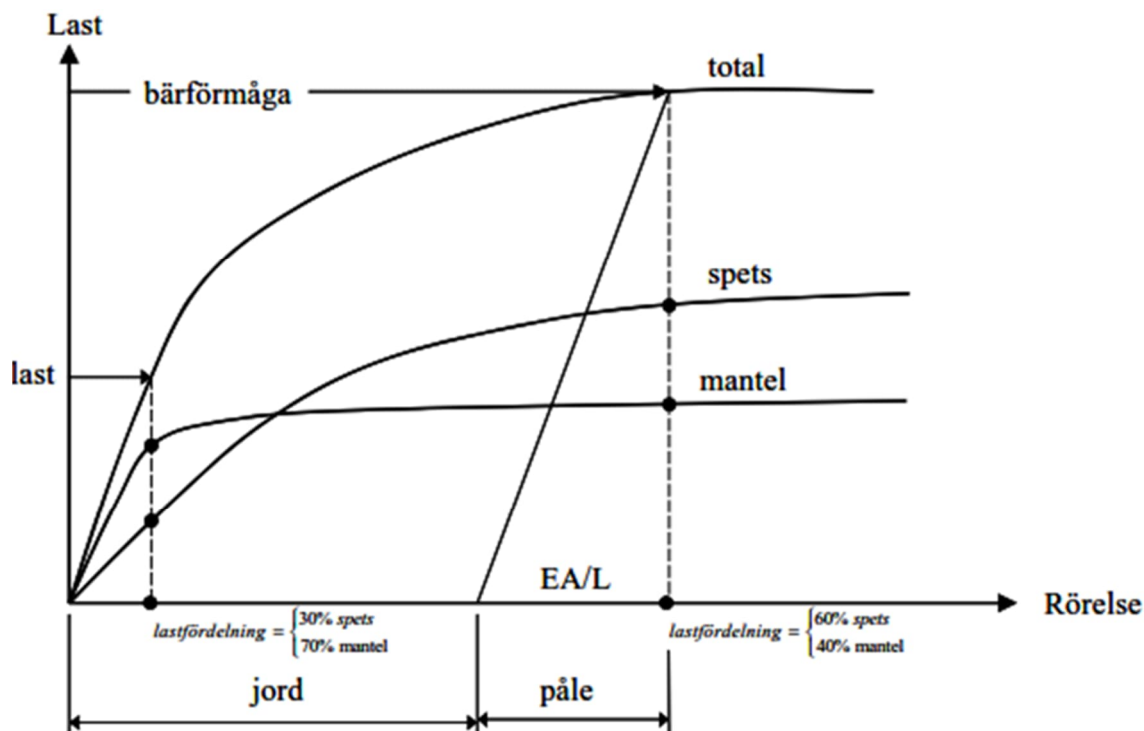
I det fall en påle är slagen till berg överförs huvuddelen av lasten via pålspetsen. Mantelbärförmågan kan då vara av underordnad betydelse, framförallt vid korta pålar i lera.



Figur 3.49 Funktionssätt hos spetsburen påle (Olsson och Holm, 1993).

Är pålen däremot slagen till ett fast jordlager har pålen en viss mantelbärförmåga även om dess spetsbärförmåga är dominerande. Störst betydelse för en spetsburen påles last-deformationsegenskaper har själva pålelementets elastiska egenskaper, spetsareans storlek samt egenskaperna hos jorden eller berget närmast under pålspetsen.

För en spetsburen påle som är installerad till eller in i kristallint berg är vanligtvis den geotekniska bärförmågan högre än pålens strukturella/konstruktiva bärförmåga. Pålar slagna till fasta jordlager under lös jord utgör ett mellanting mellan spetsburna och mantelburna pålar. Bärförmågan består dels av mantelbärförmåga, dels av spetsbärförmåga, men spetsbärförmågan är oftast dominerande. Principiellt så mobiliseras mantelbärförmågan innan lasten når ner till pålspetsen. Vid låga belastningar (i förhållande till den geotekniska bärförmågan) kan även en "spetsburen" påle bära huvuddelen av lasten på manteln, se Figur 3.50.



Figur 3.50 Funktionssätt hos spetsburen påle vid pålastning, vid låga laster mobiliseras inte spetsbärförmågan.

I avsnitt 3.3 redovisas en översikt över de flesta på marknaden förekommande påltyper. De påltyper som vanligtvis kan komma till användning som spetsburna pålar är:

- prefabricerade betongpålar
- slagna och borrade stålpålar
- stål kärnepålar
- grävpålar.

De i dag vanligaste påltyperna är prefabricerade betongpålar, slagna stålrörspålar och borrade stålrörspålar. Om det inte finns hinder i mark såsom sprängstensfyllning, block eller kraftigt släntberg som försvårar installationen eller begränsningar avseende omgivningspåverkan så är vanligtvis betongpålar den mest ekonomiskt fördelaktiga påltypen för medelhöga lasteffekter och slagna stålrörspålar för lite lägre lasteffekter.

Olika påltypers normala bärförmåga finns redovisade i Figur 3.5.

Prefabricerade betongpålar och valsade stålprofiler installeras alltid som slagna, tryckta eller vibrerade pålar. Utförandet av dessa pålar styrs av SS-EN 12699:2015: Utförande av geokonstruktioner – Massundantärgande pålar (SIS, 2015a).

Stålrörspålar kan installeras antingen genom borring, slagning, tryckning eller vibrering. Utförande av borrade slanka stålrörspålar styrs av SS-EN 14199:2015, Utförande av geokonstruktioner – Mikropålar (SIS, 2015b). För borrade grova stålrörspålar styrs utförandet av SS-EN 1536:2010, Utförande av geokonstruktioner – Grävpålar (2010a). Övriga installationssätt för stålrörspålar styrs av SS-EN

12699:2015 (SIS, 2015a). Stålkärnepålar installeras genom borrhning och styrs av SS-EN 14199:2015 (SIS, 2015b). Stålkärnepålar kan utföras så att stålkärnan antingen överför lasten via manteln till berg, vilket kräver relativt lång inborrningslängd i berget, eller via spetsen på stålkärnan direkt mot berg och då räcker det vanligtvis med 0,3-0,5 m inborrningslängd i friskt berg.

Stålkärnepålar kan med fördel borraras in i berg för att föra över lasten från stålkärnan till berg via manteln. Med detta utförande minskar risken förknippad med "dåligt berg" och svårigheter att verifiera den geotekniska bärförmågan med stoppslagning och stötvågmätning. Stålkärnan ska då förses med rillor för att öka vidhäftningen mellan stålkärna och bruk. Stålkärnepålar som bär lasten på manteln verifieras med statisk eller dynamisk provbelastning, med s.k. Wave-up-metod. Beskrivning av detta görs i kapitel 7 och 9.

För rent spetsburna pålar på fast friktionsjord eller berg är installationsmetoden i regel av underordnad betydelse för pålens geotekniska och konstruktiva bärförmåga.

Dimensionering av spetsburna pålars geotekniska bärförmåga redovisas i kapitel 7. Information om underlag från geotekniska undersökningar beskrivs i kapitel 2.

3.5.2 Mantelburna pålar

Mantelburna pålar överför huvuddelen av lasten till omgivande jord genom skjuvspänningar i kontaktytan mellan pålens mantelyta och omgivande jord. Då den geotekniska bärförmågan verifieras på olika sätt beroende på vilken jord en påle installeras i brukar indelning göras i mantelburna pålar i kohesionsjord och mantelburna pålar i friktionsjord.

I avsnitt 3.3 redovisas en översikt över de flesta på marknaden förkommande påltyper. De påltyper som vanligtvis kan komma till användning som mantelburna pålar är:

- träpålar
- prefabricerade betongpålar
- slagna stålplålar
- borrade injekterade pålar
- grävpålar.

Prefabricerade betongpålar och stålplålar kan vanligtvis användas både i kohesionsjord och friktionsjord. Om det inte finns hinder i mark såsom sprängstensfyllning och eller annan svårforcerad fyllning eller block som försvårar installationen eller begränsningar avseende omgivningspåverkan så är det normalt mest ekonomiskt fördelaktigt att installera träpålar, betongpålar eller grova stålplålar genom slagning och slankare stålplålar genom slagning eller vibrering.

Borrade injekterade pålar kan vara ett bra alternativ där det är stora krav på begränsningar i omgivningspåverkan såsom markförskjutning och buller. Påltypen är också lämpad för att ta både drag- och tryckkrafter.

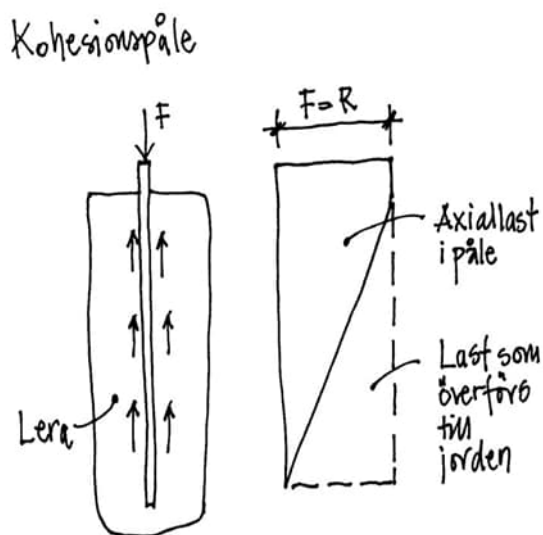
Dimensionering av mantelburna pålars geotekniska bärförmåga redovisas i kapitel 7, se även kapitel 9. Information om underlag från geotekniska undersökningar beskrivs i kapitel 2.

3.5.2.1 Mantelburen påle i kohesionsjord

Den geotekniska brottlasten för en kohesionspåle i lös och medelfast lera har en fördelning enligt Figur 3.51.

Den geotekniska bärförmågan utgörs i stort sett enbart av mantelbärförmåga. Pålspetsen har mycket liten bärförmåga och kräver dessutom större rörelser än manteln för mobilisering av brottlast i jorden.

Lasten från pålen förs ut i den omgivande jorden och ger upphov till sättning i denna. Sättningarna påverkar det byggnadsverk som pålningen utförs för och omgivningen. Pålslängden anpassas normalt så att acceptabla sättningar erhålls.



Figur 3.51 Mantelburen påle i lös och medelfast kohesionsjord.

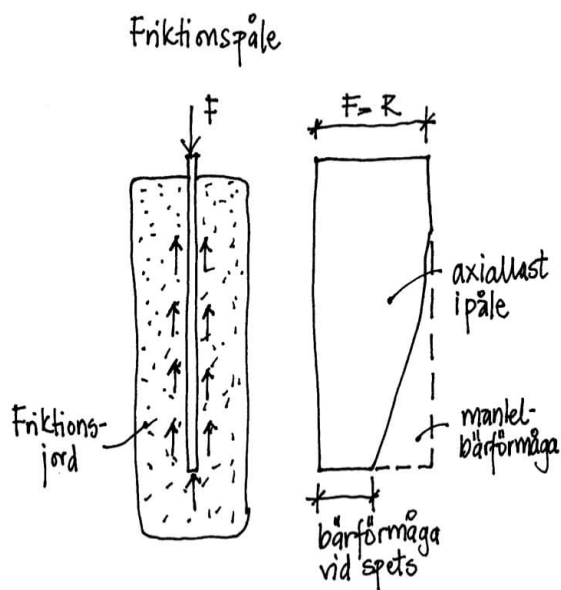
För mantelburna pålar i kohesionsjord, s.k. kohesionspålar, erhålls den geotekniska bärförmågan huvudsakligen genom beräkningar. För mantelburna pålar i kohesionsjord som inte är mycket fast, verifieras eller kontrolleras inte den beräknade bärförmågan vid grundläggningsarbetena. Den vid projekteringen beräknade erforderliga pållängden används vid grundläggningsarbetena. Om eventuella ändringar görs av pållängd eller pålens utformning i övrigt så beräknas pålens geotekniska bärförmåga igen på samma sätt som gjorts vid projekteringen. För en kohesionspålad grundläggning är det dock vanligt att en viss pållängd valts för att nedföra lasterna till sådant djup att sättningarna blir acceptabla varför pållängden inte kan ändras enbart av bärförmågeskäl. Ledning för dimensionering av kohesionspålar redovisas i kapitel 7.

3.5.2.2 Mantelburen påle i friktionsjord

Den geotekniska brottlasten för en påle i friktionsjord har en fördelning längs pålen enligt Figur 3.52 nedan.

Den geotekniska bärförmågan utgörs av både spets- och mantelbärförmåga. Det erfordras en relativt större rörelse vid spetsen än vid manteln för mobilisering av geoteknisk bärförmåga.

Slagning av pålar i löst lagrad friktionsjord kan ge upphov till sättningar, vilket kan skada omgivningen.

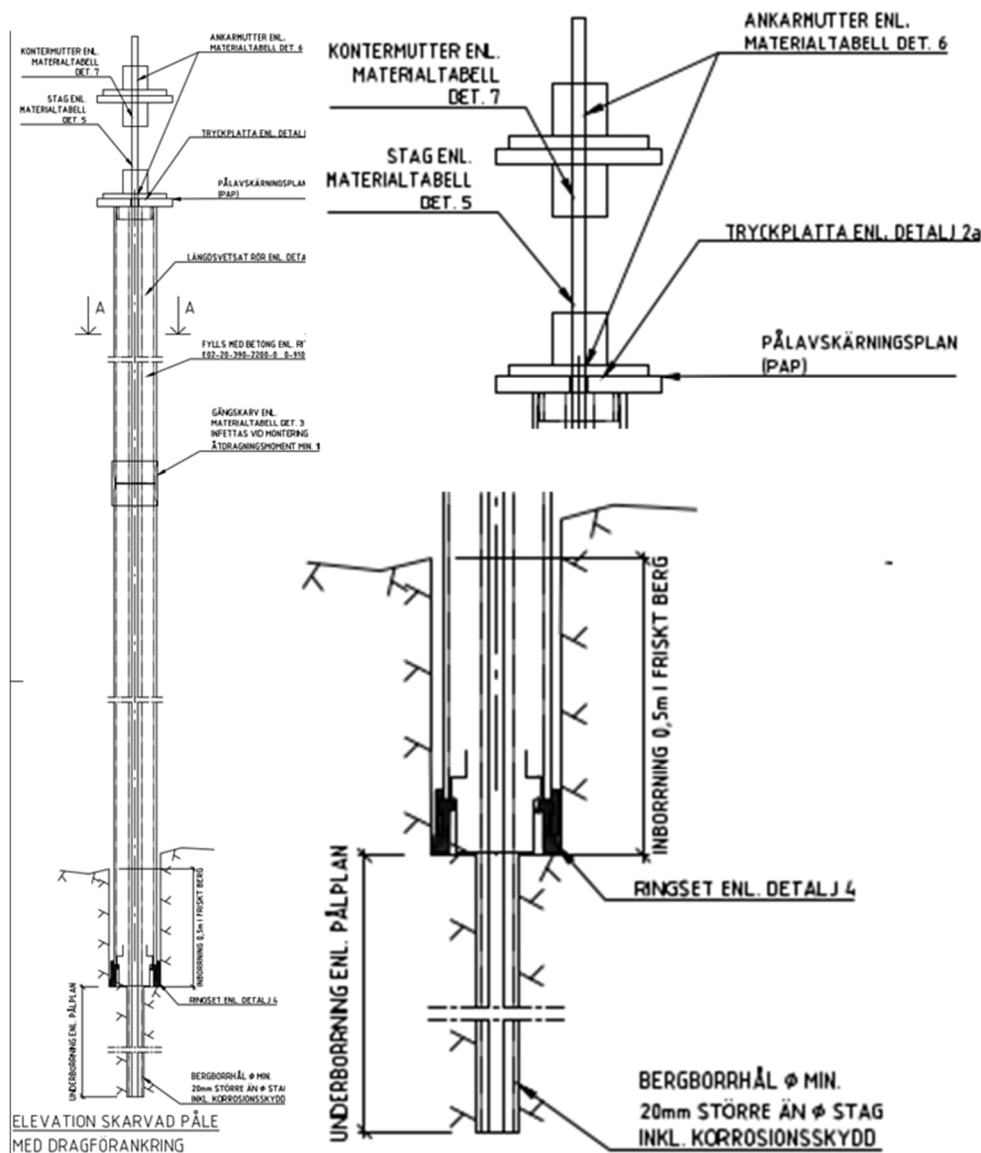


Figur 3.52 Mantelburen päle i friktionsjord.

Om verifiering av den geotekniska bärförmågan för pålar i friktionsjord, s.k. friktionspålar, görs med enbart beräkningar, då övervägande del består av mantelbärförmåga, blir pålarna ofta onödigt långa p.g.a. hög partialsäkerhetsfaktor. Därför används den vid projekteringen beräknade pållängden vanligen som utgångslängd vid grundläggningsarbetena, men verifieringen av den geotekniska bärförmågan utförs med slag-/ sjunkningsmätning och dynamisk provning med efterföljande signalmatchning (CAPWAP). Partialsäkerhetsfaktorerna blir då avsevärt mycket lägre och förfarandet därmed betydligt mycket mer ekonomiskt. Detta är dock avhängigt projektets storlek. Vid mindre pålentreprenader kan verifieringen vara tvungen att utföras med enbart beräkningar. Det beror på att provpålar, för vilka bärförmågetillväxt behöver påräknas, inte får störas av omkringliggande produktionspålning. Ledning för dimensionering av friktionspålar redovisas i kapitel 7. Om dimensioneringen ska utföras enbart med beräkningar så behöver det geotekniska underlaget utgöras av CPT-sonderingar till minst samma djup som pålspetsnivån.

3.6 FÖRANKRINGAR I PÅLAR

De flesta stål kärnepålar har i Sverige ersatts med borrade stålörspålar med invändiga dragstag för att ta upp dragkrafter, när pålarnas mantelbärförmåga inte räcker för att bära uppträdande dragkrafter. Förankringarna ska utföras enligt SS-EN 1537:2013 (SIS, 2013a) och bärförmågan för drag verifieras enligt SS-EN ISO 22477-5:2018 (SIS, 2018d). Ett exempel visas i Figur 3.53.



Figur 3.53 Exempel på utformning av borrade rörpåle med invändigt dragstag.

Förankringar kräver en "fri längd", enligt definition i standarden, vilket kan åstadkommas med plasthylsor (densobindor funkar mycket dåligt) genom stålörspålen. Provningen kommer att vara dimensionerande för staget, den får maximalt utföras till $0,9 \cdot f_{yk}$ och $0,8 \cdot f_{uk}$. I praktiken handlar det dock om maximalt angivna lasteffekter enligt leverantörens provningar, eftersom stågmaterialet inte har enhetliga egenskaper över tvärsnittet, vilket i sin tur beror på kallbearbetning vid tillverkningen.

Verifieringen ska svara mot lasteffekten i gränstillstånd GEO, SK2. Provdragningen verifierar dock (i ett normalfall) enbart snitten stål-injekteringsbruk och injekteringsbruk-berg. Bergkonen, vilken alltid ska kontrolleras i beräkningen, kan oftast inte verifieras med provdragning. Se vidare beskrivning i kapitel 7.

Det rekommenderas att en eventuell förspänning av förankringen utförs mot stålroret och inte mot färdig konstruktion. Det leder till mindre problem och det är enbart den delen av staget som ligger ovanför pålavskärningsplan (PAP) som då inte förspänns.

Vid projektering måste hänsyn tas till skarvhylsornas storlek vid bestämning av bergborrhålets dimension och till hur stor bergborrkrona som kommer igenom stålplåns ring-set för fortsatt borrhning.

3.7 PROVPÅLNING OCH SIMULERING MED WEAP

Med provpålning kan man via belastningsförsök av olika slag analysera och utvärdera geoteknisk kort- och långtidsbärförmåga samt cyklisk och dynamisk bärförmåga. Provpålning kan även ge information om erforderliga pållängder, installationslasteffekter, installationstid, erforderlig installationsutrustning, erforderliga energier för slagna pålar, eventuella skadeeffekter för olika påltyper o.s.v.

De geotekniska undersökningar som utförs före provpålning med efterföljande provbelastning ska ha sådan omfattning att beräkning av erforderliga pållängder kan göras för såväl prov- som eventuella mothållspålar. Sålunda måste jordens sammansättning och fasthet bestämmas genom hela den jordlagerföljd som berörs av en tänkt pålgrundläggning. Om det bedöms att mindre bärkraftig jord, speciellt kohesionsjord, finns under de tänkta pålspetsnivåerna, måste undersökningen utsträckas till större djup.

För att säkrare kunna bestämma möjligheter att installera en viss påltyp, bestämma tidsåtgång och installationsgång med säkrare kostnadskalkyl, utreda risker för bortslagning, falska pålstopp etc. kan provpålning utföras. Storleken på pålningsentreprenaden får givetvis avgöra om kostnaden för ett sådant förfarande kan rättfärdigas. Vid stora pålningsarbeten bör en provpålning alltid övervägas. Viss ledning kan också erhållas vad gäller omgivningspåverkan, men ofta är antalet provpålar för få för att få något annat än indikationer på t.ex. portryckspåverkan, massförskjutningar eller packningseffekter. Värden på vibrationer kan emellertid erhållas.

Provpålningen kan utföras i olika skeden och av olika aktörer. Utförs den som en separat upphandlad entreprenad kan den infogas i ett efterföljande förfrågningsunderlag för hela pålningsentreprenaden och bidra till en mer tillförlitlig upphandling. Med provpålning menas därför i normala fall fullskaleförsök, för att så nära som möjligt efterlikna en produktionssituation. Viktigt är därmed att provpålningen är väl definierad och innehåller alla relevanta data och inte exempelvis enbart en bärförmåga för en viss påltyp. Ett fullständigt installationsförfarande bör ingå, med slagningsräkning, kontinuerlig dynamisk mätning under neddrivning och bärförmågor för olika stoppslagningsskriterier. Om pålningen ska utföras som s.k. friktionspålning bör provpålningen utföras med olika påltyper och längder, med bärförmågemätningar vid ett flertal tillfällen, för att fånga bärförmågetillväxt på ett korrekt sätt. Hur själva provningsresultaten ska redovisas framgår av standarder för provning, t.ex. SS-EN ISO 22477-1:2018 (SIS, 2018a) och SS-EN ISO 22477-2:2023 (SIS, 2023a) för statisk provbelastning och SS-EN ISO 22477-4:2018 (SIS, 2018b) för dynamisk provning.

Tidigare utgjordes en provpålning ofta av ett installationsförfarande med efterföljande statisk provbelastning, se t.ex. Pålkommissionens rapport 59 - Anvisningar för provpålning med efterföljande provbelastning (Pålkommissionen, 1980). Detta var innan den dynamiska provningen infördes på bred front i Sverige. Numera utförs de flesta provpålningarna med dynamisk provbelastning och med efterföljande signalmatchning (s.k. CAPWAP), vilket täcker in de flesta dimensioneringssituationer. Endast ett fåtal situationer kräver numera statisk provbelastning. Pålkommissionens rapport 59 (Pålkommissionen, 1980) kan fortsatt studeras som kunskapsdokument.

Simulering av en installationssekvens kan inledningsvis hjälpa till att t.ex. utesluta vissa förfaranden och utrustningar inför en provpålning. Denna simulering utförs i normalfallet med hjälp av programmet GRL-WEAP. Simuleringen kan också ge information om vilken utrustning som kan krävas för att påvisa en geoteknisk bärförmåga med PDA-mätning (s.k. Pile Driving Analyzer). Indikationer om förväntad geoteknisk bärförmåga kan också erhållas, se vidare kapitel 7. Simulering får endast användas för att beräkna dimensionerande geoteknisk bärförmåga för rent spetsburna pålar och då med en relativt hög totalsäkerhet. För övriga pålar måste verifieringen utföras med provning eller i vissa fall beräkningar.

Ytterligare information om provpålning ges i kapitel 7 och 9.

Slagningssimulering, ofta benämnt WEAP efter förkortningen av Wave Equation Analysis Program, är ett värdefullt verktyg för att bland annat förutse resultat av ett installationsförlopp. Till exempel kan analysen ge en indikation på hur många slag som behövs för att driva pålen till ett visst djup, om pålen håller för stoppslagningen och om det är möjligt att verifiera bärförmågan med den valda slagningsutrustningen.

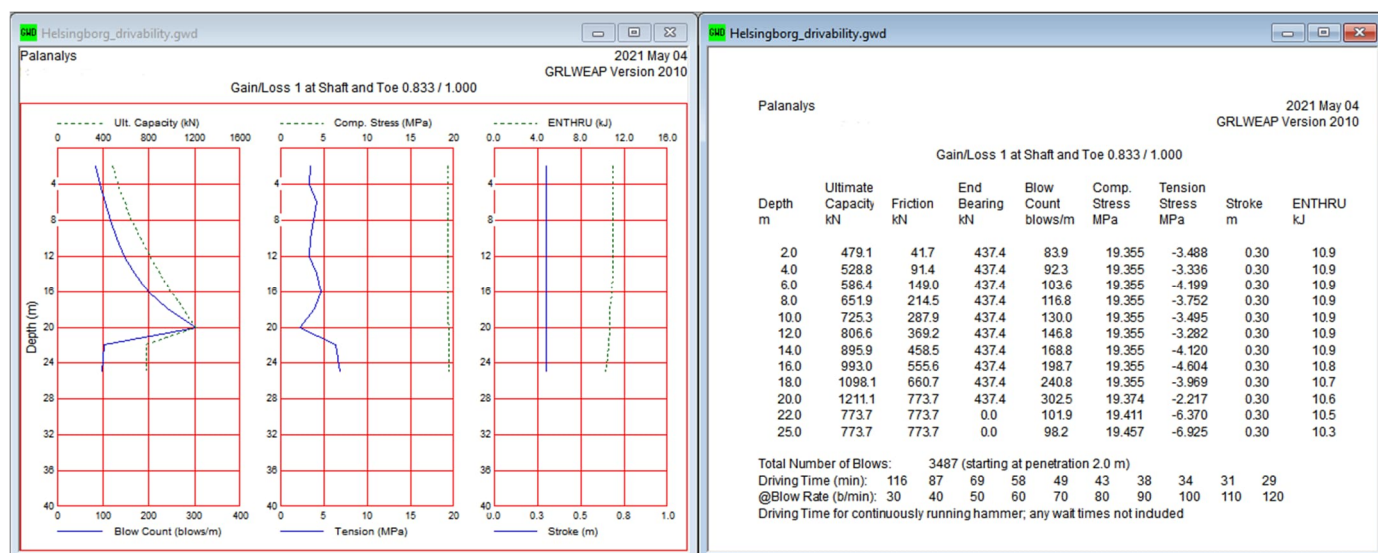
Detta avsnitt redovisar simuleringens möjligheter, begränsningar, in- respektive utparametrar på ett övergripande kortfattat sätt. Se även kapitel 7.

I de flesta fall kombineras slagningssimuleringen med en efterföljande dynamisk provbelastning, men i ett projekteringsskede kan det vara nödvändigt att utföra simuleringen för att hitta en kostnadsoptimal kombination av påle och slagningsutrustning för det aktuella fallet.

Slagningssimulering kan användas för att:

- bedöma lämpligt val av slagningsutrustning givet påltyp och last
- bedöma spänningar vid slagning, både direkt skadliga men också för pålmaterialets utmattning
- optimera slagningen genom förfinad analys baserad på data från faktisk provning
- "verifiera bärförmåga" dvs. fastställa ett dimensionerande stoppslagningsvillkor för stoppslagning av spetsburna pålar.

Förutom att studera om pålelementet kan ta upp den dimensionerande lasteffekten måste också pålelementet studeras utifrån perspektivet om det kan motstå de påkänningar som uppkommer vid installationen och om det är möjligt att installera pålen till det djup som den geotekniska analysen visat behövs. Detta brukar benämnas pålens drivbarhet (*output för utmattning*, se Figur 3.54).



Figur 3.54 Output från en drivbarhetsanalys från simuleringsverktyget GRLWEAP.

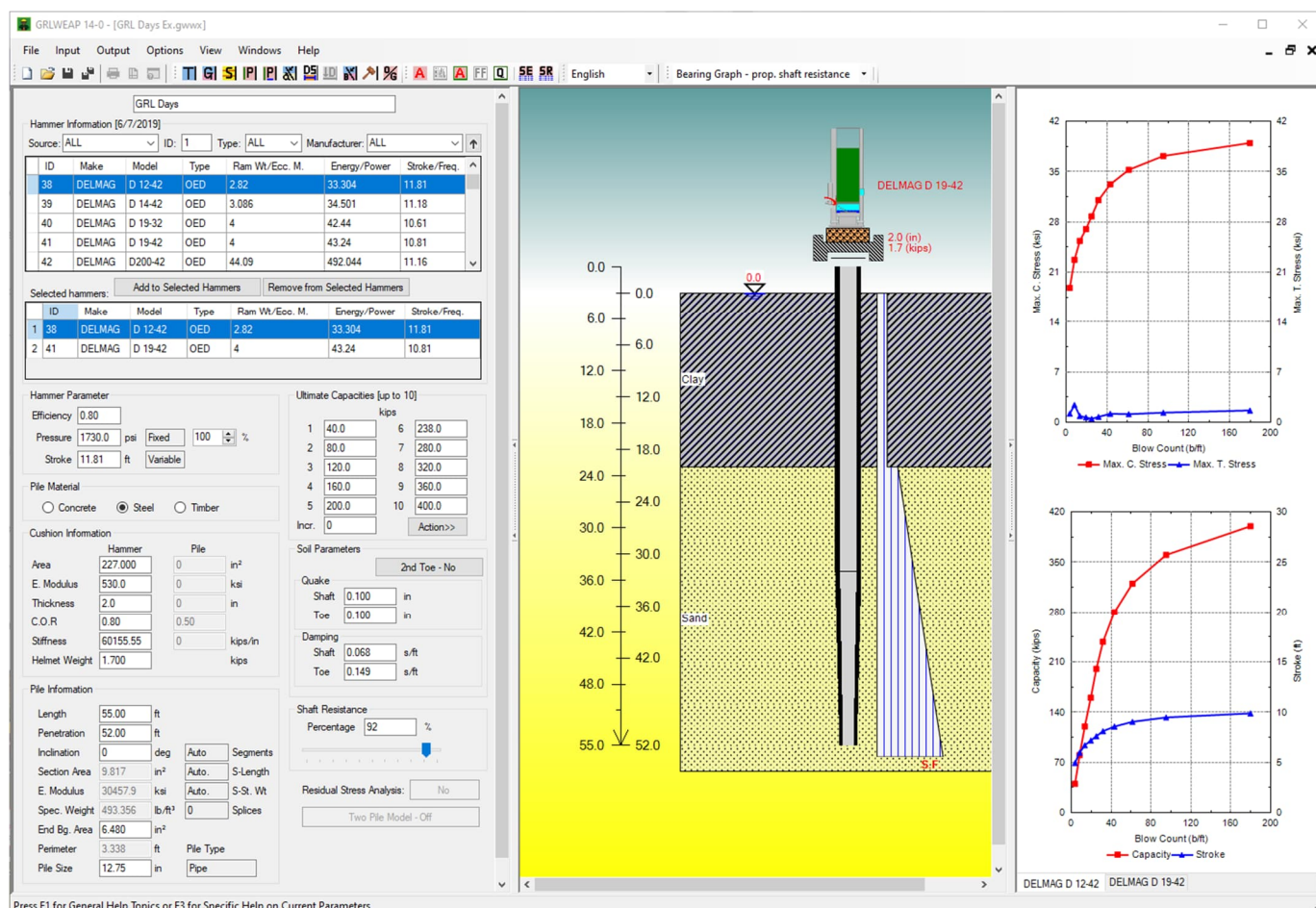
Påkänningarna i pålen beror på:

- geotekniska förhållanden på platsen
- vald slagningsutrustning och fallhöjd.

Pålens avsedda bärförmåga uppnås genom att pålen slås till:

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

Det ingår i projekteringen av en pålgrundläggning att bestämma lämplig slagningsutrustning, slagningssätt och verifieringsmetod för den valda påltypen. I en simulering ingår ett antal antaganden beträffande jordparametrar. Det krävs därför försiktighet vid val av parametrar beroende på vilken output som är kritisk (bärförmåga, påkänningar, drivbarhet). Lämpligast görs därför ett flertal simuleringar med olika indataparametrar för att på så sätt analysera känsligheten i simuleringen och resultatet, se Figur 3.55.



Figur 3.55 Skärmbild från simuleringsprogrammet GRLWEAP.

I de flesta fall är det aktuellt med verifiering av både geoteknisk bärförmåga och pålens integritet genom dynamisk provbelastning efter installationen. Under väl kända geologiska förutsättningar med förhållandevis låga laster (nivå 1) och där pålarna med säkerhet stoppslås mot berg är det tillåtet enligt eurokoderna och de nationella valen att använda slagningssimulering utan efterföljande provbelastning.

På motsvarande sätt som vid stötvågsmätning måste bärförmågan begränsas med hänsyn till pålmaterialets hållfasthet när stoppslagningskriterier bestäms med slagningssimulering. Se vidare kapitel 5 och 7.

Vid WEAP-analys för verifiering av geoteknisk bärförmåga med stoppslagning för vald påle och slagningssystem ska det statiska motståndet i jorden ansättas med fördelning av hur mycket av motståndet som verkar på manteln respektive spetsen. Det är viktigt att komma ihåg att dessa värden ska motsvara drivningsmotståndet och inte motståndet efter lång tid av tillväxt. Normalt ansätts ett antal motstånd med stigande värde som vart och ett analyseras.

Det finns också verktyg i WEAP som hjälper till med att ansätta en jordprofil baserat på generella riktvärden från programtillverkaren. För en mer djupgående bestämning av det geostatiska motståndet, som i första hand blir aktuellt vid en drivbarhetsanalys, hänvisas till kapitel 7. Det är av stor vikt att värdera beräknade värden mot tidigare erfarenhet och lokal kännedom.

Förutom det statiska motståndet i jorden ska ett medelvärde av jordens dämpning och fjädring, på mantel och spets, ansättas i modellen. Internationellt accepterade indatavärden för jordens dämpning och fjädring vid mantel och spets, som bland annat redovisas i manualen till programmet GRLWEAP anges i Tabell 3.20. Värdena brukar anses ge ett acceptabelt medelvärde för drivning i en vanlig friktionsjord.

Tabell 3.20 Indatavärden för jordens dämpning och fjädring vid mantel och spets.

		Dämpning (m/s)	Fjädring, quake (mm)
Mantel	Friktionsjord	$J_s=0,15$	2,5
	Kohesionsjord	$J_s=0,65$	
Spets	Friktionsjord	$J_s=0,5$	D/120
	Kohesionsjord	$J_s=0,5$	

För pålar med homogen tvärsnittsarea över hela längden, omfattas indata till pålmaterialets tvärsnittsarea, E-modul, specifika vikt, pålens totala längd samt längd i jord, se Tabell 3.21.

Tabell 3.21 Indatavärden för pålar med homogen tvärsnittsarea avseende E-modul och tunghet.

Material	Elasticitetsmodul (MPa)	Tunghet (kN/m ³)
Betong	40 000	24,5
Stål	210 000	77,5
Trä	14 400	9

När det kommer till själva slagningssystem och dyna återfinns i moderna program, såsom GRLWEAP, en omfattande databas med flertalet hejare på marknaden. Om dessa data ej finns ska uppgifter om hejarens mått och vikt matas in. Ytterligare parametrar som behövs är fallhöjd och effektivitet. Definition på effektivitet är:

Effektivitet= nettofallhöjden/bruttofallhöjden.

Programmet hjälper även till att välja rätt indata på dynträ, nytt dynträ eller ihopslaget. Vid analys som ska ligga till grund för stoppslagning ska dynträet vara ihopslaget med minst 300 slag.

3.8 GRUNDFÖRSTÄRKNING (VAKANT)

Avsnittet kompletteras i kommande utgåvor av Pålhandboken.

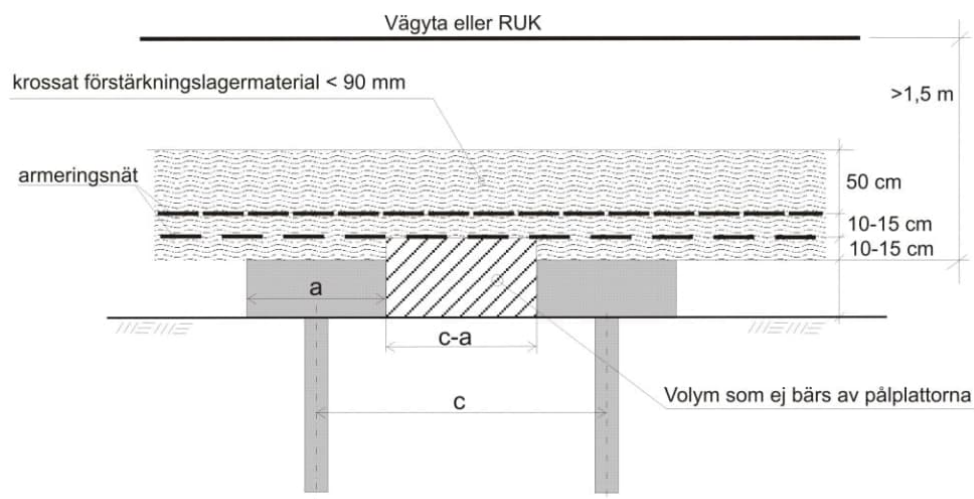
3.9 BEFINTLIGA PÅLAR (VAKANT)

Avsnittet kompletteras i kommande utgåvor av Pålhandboken.

3.10 BANKPÅLAR

Begreppet "bankpålar" utgörs inte av någon speciell typ av påle utan är en metod som handlar om att utföra en geokonstruktion med pålar och pålplatta (bankpåleplatta), som överför jordlast och trafiklast från en väg- eller järnvägsbank via pålar ner till bärkraftiga jordlager eller berg. Bankpålning ska utformas så att valvverkan uppstår mellan pålplattor. Detta görs genom ett lastfördelande jordlager av bergkrossmaterial och anpassning av avståndet mellan pålplattorna (plattäckningsgrad). Plattäckningsgraden kan minskas genom att använda geosyntetisk armering i det lastfördelande jordlagret. Det horisontella jordtryck som bildas i slänterna ska tas upp av lutande pålar, jordarmering eller en kombination av dessa.

Något som gör bankpålar speciella är att en bankpåle inte per automatik kan betraktas som sidostyr i påltoppen. Om inte påltoppen är sidostyr kommer pålens konstruktiva bärförmåga att vara avsevärt lägre än för en påle med sidostyr påltopp (se kapitel 5 och 6). Ett sätt att hantera detta är att använda lutande pålar eller att kombinera lutande pålar under bankslänterna med geonät, placerat i det lastfördelande jordlagret ovanför pålplattorna, för att horisontalstabilisera vägbanken/järnvägsbanken. Detalj av utformning av bankpålning med geonät i det lastfördelande jordlagret visas i Figur 3.56.



Figur 3.56 Detalj av utformning av bankpålning med geonät i det lastfördelande jordlagret (Trafikverket, 2025b).

För att kunna glesa ut pålarna maximalt och få en bra nyttjandegrad av pålarnas konstruktiva och geotekniska bärförmåga används, som nämnts tidigare, ett lastfördelande jordlager av krossat förstärkningslagermaterial < 90 mm (se Trafikverket, 2025b) kombinerat med ett eller flera lager med geosyntetisk armering (geonät/geotextil). Geonätet sprider lasten effektivare mellan pålplattorna genom valvverkan till närstående pålplatta och påle. Om plattäckningsgraden understiger 40 % krävs normalt lastfördelande jordlager med geonät. Bankpålning som metod kan användas i kombination med annan typ av jordförstärkning som tex. kalk/cement-pelare, singulära eller i skivor/raster. Pålplattorna kan installeras som platsgjutna över enskilda pålar eller prefabricerade som lyfts på plats och efterinjekteras för

att erhålla tillräcklig rotationsstyvhet så att en funktionell lastspridande effekt säkerställs genom valvverkan för det lastspridande jordlagret med eller utan geonät. För bank med lastspridande jordlager utan geonät ska avståndet mellan vägyta/räls underkant och överkant på platta överstiga 2,5 m och med lastspridande jordlager med geonät 1,5 m. Utformning med geonät visas i Figur 3.56.

Krav och råd avseende dimensionering och utformning av bankpålning redovisas i TRVINFRA-00230, Geokonstruktion, Dimensionering och utformning (Trafikverket, 2025b). Krav och råd avseende material, utförande och kontroll av bankpålning redovisas i AMA Anläggning 23 och RA Anläggning 23 (Svensk Byggtjänst, 2023).

Förslag på arbetsgång vid projektering av bankpålning:

- Välj ett centrumavstånd mellan pålarna i ett rut- eller triangelmönster. Bestäm dimensionerande lasteffekt på pålarna med beaktande av bankhöjd (över pålattan), pålattan vikt, trafiklast, installationstolerans och eventuell påhängslast. Hänsyn bör tas till en felslagningstolerans på cirka 0,1 m för last på pålar och pålplattor samt cirka 0,2 m för last på lastfördelande lager inklusive eventuella geonät. Rekommendationen är att lägga mönstret med huvudlinjen så att den följer bankens längdriktning och eventuella brofundament. Sedan justeras yttersta pålraden med hänsyn till släntfotens geometri och erforderliga kontroller enligt nedan.
- Påltyp bestäms med avseende på erforderlig bärförmåga kontra lasteffekt med beaktande av krav på beständighet (exponeringsklasser, rostmån etc). Pålelementen designas enligt normalförfarande för respektive vald påltyp.
- Designa pålattan för dimensionerande ytlast samt linjelast i pålattan rand för laster utanför pålattan och beakta krav på beständighet. Dimensionera för erforderlig tvärkraft (skjuvkraft), moment och stansning. Pålattan ska dimensioneras för hela lasten av lastfördelande lager, övrig bankfyllning och trafiklast m.a.p. pålarnas projekterade centrumavstånd inklusive installationstoleranser.
- Kontrollera plattäckningsgraden och krav på erforderlig tjocklek på lastfördelande lager med eller utan geonät.
- Designa eventuellt geonät baserat på krav enligt TRVINFRA-00230 (Trafikverket, 2025b).
- Kontroll utförs av jämviktsvillkor d.v.s. att det aktiva jordtryck som bildas vid släntkrön kan tas upp av lutande pålar, jordarmering (geonät) eller en kombination av dessa.
- Kontroll utförs av erforderlig stabilitet utanför yttersta pålattan. Kontrollen görs både från banken med avseende på bankstabiliteten samt in mot banken för att verifiera att inga skadliga rörelser påverkar bankpålarna med hänsyn till sidoförskjutning och pålarnas konstruktiva bärförmåga.
- Kontroll görs av sättningar utanför yttersta pålattan, så att sättningarna inte leder till sidoförskjutning av pålar eller att bankpålarnas konstruktiva bärförmåga begränsas.
- Krav på redovisning i bygghandling görs i TRVINFRA-00230 (Trafikverket, 2025b).

3.11 ENERGIPÅLAR

Vatten har unika egenskaper, vilket gör det intressant när det gäller energilagring. För en pålad byggnad går det även att använda pålarna för överföring av energi och lagring i omgivande jord och vatten. I princip räcker det att installera slangar/kollektorer för cirkulation av kylbärarvätska i pålarna, vilket liknar installationen i en vanlig bergvärmebrunn.

Värmeöverföring sker genom konduktion (ledning), konvektion (strömning) eller genom strålning. I jord är konduktion den dominerande mekanismen för värmeöverföring, följt av konvektion, beroende på vattnets möjlighet till förflyttning i jordlagren. Några storleksordningar på termisk konduktion för material aktuella vid energipålar:

- | | |
|---------------------------|----------------|
| • vatten | 0,6 W/mK |
| • jord och berg generellt | 0,2 - 5 W/mK |
| • vattenmättad lera | 0,9 – 2,3 W/mK |
| • betong | 1,4 – 3,6 W/mK |
| • stål | 30 – 60 W/mK. |

Ett materials förmåga att lagra energi kallas värmekapacitet eller värmekapacitivitet. Några exempel:

- | | |
|---------------|-----------------------------|
| • vatten | 4,2 MJ/m ³ /K |
| • jordmineral | ~ 2,3 MJ/m ³ /K |
| • luft | 0,001 MJ/m ³ /K. |

Av ovanstående värden framgår att vatten har en god förmåga att lagra energi. Jämfört med andra material är dock vattnet mobilt, vilket kan vara såväl positivt som negativt när det kommer till energilagring. I homogen lera kan man säga att vattnet i princip står helt still, vilket medför att inlagrad energi inte försvinner iväg via konvektion. Men lera medför också en begränsning genom att den vattenvolym man effektivt kan värmeväxla mot blir begränsad till någon eller några meter runt varje påle. När den största temperaturgradienten lokalt kring pålen förflyttas längre bort från pålen blir det trögare att lagra in ytterligare energi i en större jordvolym. Detta styr ett idealt centrumavstånd för energipålar i lera. Om man ser systemet i lera som ett laddningsbart batteri, så blir batteriet fulladdat, och för bäst nytta bör man därför eftersträva en cyklisk energibalans, t.ex. över en årscykel med kylbehov på sommarhalvåret och värmebehov på vinterhalvåret. Annars värmer eller kyler man ut sitt magasin med tiden och tappar verkningsgrad.

I en permeabel friktionsjord är vattnet oftast i rörelse. Vid ett strömmande grundvattenflöde kan värmen från pålen alltså försvinna iväg med vattnet med konvektion. I gengäld finns det i en permeabel jord ett grundvatten i strömning, mot vilket man kan värmeväxla mer kontinuerligt, men inom ett mindre temperaturspann.

Vid värmelagring är man intresserad av mängden energi man kan lagra totalt, men även vilken effekt man kan få ut under en begränsad tid. Dessa förmågor är förstas beroende av de lokala förutsättningarna i påle och jord, vilket kan kräva fältförsök för att utvärdera och bedöma.

För en första bedömning kan följande schablonvärden användas:

- | | |
|--------------------|--|
| • Effektuttag: | upp till 40-50 W/m påle, men vanligen ~15-20 W/m |
| • Max energiuttag: | 50-100 kWh/m påle |

Jordens termiska egenskaper in-situ kan undersökas med ett s.k. termiskt responstest (TRT), där man helt enkelt tillför en kontrollerad mängd värme och utvärderar hur jorden svarar på denna över en tidssekvens.

Ändrad temperatur i jorden kan också påverka dess geotekniska egenskaper. Extremfallet är när leran fryser och sedan tinar, då dess struktur kollapsar med mycket stora deformationer som följd. Runt en frusen/tinad påle i lera blir sättningarna i storleksordningen meter. Tekniskt är det alltså vitalt att ha ett robust styrsystem, som säkerställer att frysning av lera aldrig kan inträffa.

Vattnets viskositet är påtagligt temperaturberoende, vilket t.ex. påverkar lerans konsolideringsförlopp, som går snabbare vid högre temperatur. Det är också rimligt att förvänta sig ökade krypsättningar vid högre temperaturer i leran. Storleksordningen är dock beroende på lerans spänningshistoria, pålens installationssätt, aktuella temperaturintervall samt graden av hållfasthetsmobilisering i jorden runt pålen. Vid slagna pålar i lös lera har det konstaterats via utförda fältförsök att risken för temperaturdrivna krypsättningar är liten. Detta på grund av den kraftiga omlagring som sker runt pålen under installationen.

Ibland används pålgrundläggning även vid löst lagrade sediment av silt och sand. Vad gäller de geotekniska egenskaperna bedöms friktionsjord vara okänslig för termisk påverkan. Miljömässigt kan det däremot erfordras utredningsarbete vid installation av energipålar i närheten av vattentäkt och liknande. Riskerna kan gälla direkt förorening genom läckage av kylbärarvätska, men eventuellt även mer diffusa effekter av en förändrad temperatur i grundvattnet.

Vid praktisk implementering av energipålar i ett projekt är den stora utmaningen att få en god samordning mellan alla de kompetenser och gränssnitt som berörs: geoteknik, konstruktion, installationsteknik, eventuell juridik och regelverk m.m. De påverkar varandra och måste därför samverka från första början, såväl i projekteringsfasen som vid utförandet. Den initiala förutsättningen är att byggnadens energibehov och installationssystem passar ihop med de geotekniska och geologiska förutsättningarna.

Energipålar är inte lämpligt i alla byggprojekt, men vid rätt förutsättningar kan det vara ett intressant alternativ.

Information om energipålar kan exempelvis erhållas från "In-situ testing of floating thermal piles in soft sensitive clay" (Bergström, 2017). Se även kapitel 2, Underlag för projektering.

3.12 VERIFIERING OCH KONTROLL

Verifiering och kontroll ska utföras i erforderlig omfattning och är beroende av påltyp och pålarnas verkningssätt.

Kapitel 9 behandlar kontroll och verifiering av slagna pålar, borrade pålar, grävpålar, stålrörspålar och injekteringspålar samt dragstag i stålpålar. I kapitel 9 redovisas följande:

- Grundkontroll av ett pålningsarbete innefattande:
 - o innehåll i en kontrollplan
 - o kontroll av slagna pålar, borrning av stålrörspåle, montering och gjutning av dragförankring, injekterade pålar, grävpålar och stålkärnepålar
 - o rakhetsmätning, kontroll av en påles integritet, pålinmätning och kontroll av korrosionsåtgärder
 - o buller, markrörelser och vibrationer.
- Tilläggskontroll, omfattande produktionskontroll med provbelastning samt övriga kontrollmetoder.
- Verifiering av geoteknisk bärförmåga genom statisk provbelastning, dynamisk provbelastning med stötvågsmätning och hävdvunna åtgärder samt genomförande av provpålning.
- Kontrollprogram för omgivningspåverkan avseende vibrationer i mark och byggnader, grundvattenpåverkan och porttrycksförändringar i mark, deformationer i mark, spridning av föroreningar samt buller.

Ovanstående punkter ska beaktas vid projektering av en pålgrundläggning. Vad gäller kontrollprogram för omgivningspåverkan, se även avsnitt 3.1.8 och kapitel 10.

När det gäller verifiering av geoteknisk bärförmåga redovisas information om preliminär bedömning av geoteknisk bärförmåga inklusive begräsningar med hänsyn till installation i kapitel 7.

Statisk provbelastning är relativt kostsamt, speciellt för långa pålar, då det ställs höga krav på mothållande krafter och små rörelser. Dock kan statisk provbelastning utföras relativt enkelt om mothållet redan finns tillgängligt, som exempelvis vid grundförstärkningar. Beskrivning av statisk provbelastning görs i kapitel 7 och 9.

Dynamisk provbelastning med hjälp av stötvågsmätning är den vanligast förekommande kontrollmetoden vid pålningsarbeten. Platsspecifika stoppslagningskriterier kan tas fram med sådan provning för att säkerställa att tillräcklig energi förs ner i pålelementet utan att förstöra den konstruktiva bärförmågan. Mätningen kan oftast göras samtidigt som pålen slås ner i jorden. Med hjälp av CASE och CAPWAP – programvara för dynamisk mätning – kan den mobiliserade geotekniska bärförmågans storlek och fördelning längs pålen studeras för enskilda hejarslag. För pålar där tillväxten av mantelbärförmågan är viktig, framförallt för friktionspålar eller för pålar där dragbärförmågan längs manteln ska utvärderas behöver pålens bärförmåga hinna växa till tillräckligt före provningen. Det är viktigt att tillräcklig energi tillförs för att verifiera önskad bärförmåga. Hejarvikten ska vara minst 1-1,5% av den karakteristiska bärförmågan, som tumregel kan en hejarvikt på 2% av erforderlig dimensionerande bärförmåga användas. Detta gäller särskilt för stålpålar av mindre dimensioner, som ofta slås med för små hydraulhejare. Beskrivning av dynamisk provbelastning görs i kapitel 7 och 9. Se även avsnitt 3.7.

Vad gäller verifiering och kontroll se även AMA Anläggning och RA Anläggning (Svensk Byggtjänst, 2023).

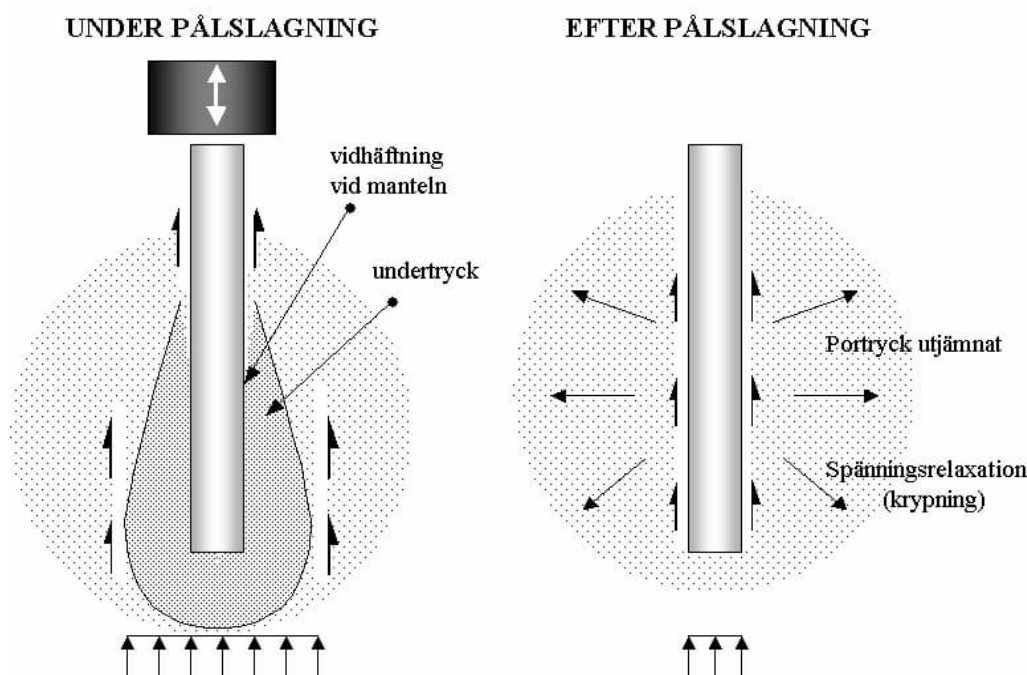
3.13 FALSKA PÅLSTOPP

3.13.1 Bakgrund

Med "falskt pålstopp" åsyftas att pålen vid drivning och stoppslagning uppvisar ett större drivningsmotstånd, dvs. en minskad sjunkning per slag, än vid efterslagning. Det höga drivningsmotståndet vid stoppslagningen motsvarar alltså inte någon hög statisk bärförmåga för den färdiga pålen. Redan några timmar efter avslutad slagning kan drivningsmotståndet ha minskat så att pålen med relativ lätthet kan drivas vidare, det vill säga bärförmågan är lägre än vad som kan uppskattas vid stoppslagning. Man kan därefter räkna med att drivningsmotståndet successivt ökar igen under den fortsatta slagningen tills skenbar stoppslagning återigen sker.

Normalt brukar falska pålstopp ske i fast lagrad siltig jord. Fenomenet har även inträffat i överkonsoliderad lera med relativt hög andel silt och i finsand. Utomlands har falska pålstopp dessutom noterats vid slagning i vissa typer av lerskiffer. Falska pålstopp är relativt sällsynta och förekomst av siltig jord behöver inte betyda att risken för falska stopp är överhängande. I dag finns inte någon enhetlig bild av vilka kriterier som krävs för uppkomst av falska pålstopp.

Orsaken till "falska pålstopp" tillskrivs ett porvattenundertryck på grund av dilatation som gör att kornen pressas hårt mot varandra så att en "klumpfot" bildas kring pålspetsen under slagning, se Figur 3.57.



Figur 3.57 Förklaringsmodell för falska pålstopp (Möller, 1991). a) visar hur negativa portryck ökar drivmotståndet och b) visar hur portrycket utjämnas efter pålslagning.

Porvattenundertrycket gör att jorden sugas fast vid pålen och på så sätt ökar dess effektiva area och att effektivspänningsnivån tillfälligt blir större vid varje slag. Redan inom några timmar efter avslutad slagning kan detta porundertryck ha försvunnit, vilket leder till en reduktion av effektivspänningarna kring pålspetsen och följaktligen en minskning av pålens spetsbärförmåga. Samtidigt sker även en utjämnning av spänningarna kring pålspetsen på grund av spänningsrelaxation (spänningsomlagringar). Detta leder också till en reduktion av effektivspänningarna kring pålspetsen och följaktligen en minskad spetsbärförmåga. Observera att här orsakar spänningsrelaxation alltså en reduktion av effektivspänningarna kring spetsen. Spänningsrelaxation i omgivande jordvalv kring pålen kan också orsaka en ökning av normalspänningen mot pålens mantelyta som leder till en ökad mantelbärförmåga.

3.13.2 Åtgärder

Om falska pålstopp uppstår är konsekvenserna ofta allvarliga. Om det aktuella lagret är relativt mäkligt, så att man inte kan slå igenom det till bärkraftigare lager, kan följande åtgärder eller kombination av åtgärder behöva göras:

- Efterslagning av pålarna, (se kapitel 9).
- Reducera lasten på pålarna så att den motsvarar den geotekniska bärförmågan som är möjlig att uppnå i det aktuella jordlagret (se kapitel 7).
- Utökad provpålning/produktionskontroll möjliggör att en lägre partialkoefficient kan användas vid utvärdering av dimensionerande geoteknisk bärförmåga (Se kapitel 9).
- Försöka penetrera det aktuella lagret genom en växelvis slagning av pålarna.
- Byte till tyngre hejare.
- Byte av påltyp.

I dag finns inte något säkert sätt att genom geotekniska undersökningar förutse falska stopp i ett visst jordlager. CPT-undersökning samt hejarsondering i kombination med provtagning (jordartsbedömning) kan däremot ge en indikation om det finns en förhöjd risk för falska stopp, se kapitel 2. Kännedom om tidigare pålning i området kan i det här avseendet vara ovärderlig. Provpålning är därför det bästa sättet att undersöka risken för falska stopp, se kapitel 9. Provpålning bör ske i ett så tidigt skede i projekteringen att det möjliggör nödvändiga förändringar t.ex. byte av påltyp, utökad provpålning, anpassad last, stoppslagning i ett specifikt lager. Notera att falska stopp kan vara ett mycket lokalt problem och stora variationer kan förekomma inom samma arbetsplats. För att kontrollera eventuell förekomst av falska stopp bör efterslagning (alternativt kontrollslagning) göras och detta tidigast ett antal timmar efter avslutad slagning.

3.14 REFERENSER

Arbetsmiljöverket, 2023. *AFS 2023:3, Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd (AFS 2023:3) om projektering och byggarbetsmiljösamordning – grundläggande skyldigheter*. Arbetsmiljöverkets författningssamling.

Bech-Andersen, J., 1992. *The dry rot fungus and other fungi in houses*. Doc. No. IRG/WP/2389, 23rd Annual Meeting, Harrowgate, UK.

Bergman, G., Boutelje, J.B., Enestedt, K.O., Granstrand, G., Göransson, B., Lindh, A., 1979. *Kontrollerad bevattning för bevarande av träpålar och rustbäddar*. Byggforskning Rapport R62:1979

Bergström, A., 2017. *In-situ testing of floating thermal piles in soft sensitive clay*. Chalmers Tekniska Högskola, Thesis for the degree of licentiate of engineering in geotechnical engineering.

Björdal, C.G., 2000. *Waterlogged archaeological wood. Biodegradation and its implications for conservation*. Sveriges Lantbruksuniversitet. Dissertation.

Blanchette, R.A., Nilsson, T., Daniel, G., Abad, A.R., 1990. *Biological degradation of wood*. Archaeological Wood, utgiven av Rowell och Barbour, Am. Chem. Soc., Washington DC, p. 141-174.

Boutelje, J.B., Göransson, B., Granstrand, G., , 1974. *Mikrobiologisk nedbrytning av grundläggningsvirke*. Kapitel 14 i Byggforskning Rapport R20:1974.

Boutelje, J.B., 2000. *Beständighet av trägrundläggningar*. Underlagsrapport till Pålkommisionens projekt Gemensamma dimensioneringsprinciper. Professor Julius Boutelje.

Boverket, 2010. *BFS 2010:2, BKR 13. Boverkets föreskrifter om ändring i verkets konstruktionsregler (1993:58) – föreskrifter och allmänna råd*.

Boverket, 2011. *BFS 2011:10, EKS 8, Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder)*.

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)*.

CEN, 1992. *EN 335-1:1992 - Durability of wood and wood-based products - Definition of hazard classes of biological attack - Part 1: General*. Standarden är upphävd. Numera gäller följande Svenska standard: *SS-EN 335:2013 - Träskydd - Definitioner och tillämpning av användningsklasser - Massivt trä och träbaserade produkter*.

CEN, 1994a. *EN 350-1:1994 - Durability of wood and wood-based products - Natural durability of solid wood - Part 1: Guide to the principles of testing and classification of the natural durability of wood*. Standarden är upphävd. Numera gäller följande Svenska standard: *SS-EN 350:2016 - Trä och träbaserade produkters beständighet - Provning och klassificering av beständighet mot biologisk nedbrytning hos trä och träbaserade material*.

CEN, 1994b. *EN 350-2:1994 - Durability of wood and wood-based products - Natural durability of solid wood - Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe*. Standarden är upphävd. Numera gäller följande Svenska standard: *SS-EN 350:2016 - Trä och träbaserade produkters beständighet - Provning och klassificering av beständighet mot biologisk nedbrytning hos trä och träbaserade material*.

CEN, 1994c. *EN 460:1994 - Durability of wood and wood-based products. Natural durability of solid wood. Guide to the durability requirements for wood to be used in hazard classes*. Standarden är upphävd. Numera gäller följande Svenska standard: *SS-EN 460:2023 - Beständighet för trä och träbase-rade produkter - Vägledning om prestanda*.

Chapman, T., Anderson, S., Windle, J., 2007. *CIRIA 653. Reuse of foundations*.

Chillis, R.D., 1961. *Pile foundations*. Second edition. McGraw, Hill. New York, Toronto, London.

Eureka Projekt Eu 1069, 1997. Eurobor/Venezia care. Final report.

IEG, 2013. *IEG Rapport 2:2008, Rev 3 – Tillämpningsdokument, Grunderna i Eurokod 7*.

IEG, 2016. *IEG Rapport 8:2008, Rev 3 – Tillämpningsdokument, EN 1997-1 Kapitel 7, Pålgrundläggning*.

Jerbo, A., 1999. *Träpålar*. Rapport 222, föreläsning III, Helsinki, 11-02-1999 (information från Jerbol AB).

Jerbo, A., 2000. *Preliminary report. Boron compounds in water solution – Sterilisation in anaerobic environment*. Report 231 (information från Jerbol AB).

Jendeby, L., 2019. Shear resistance during and after installation of driven piles in soft clay. Proceedings of the XVII ECSMGE-2019.

Krogh, P. & Lindgren, A., 1997. *Dynamic field measurements during deep compaction at Changi airport, Singapore*. Examensarbete 97/9, JOB, KTH, Stockholm.

Lagerberg, T. och Forsell, C., 1930. *Rötskador å barrvike i vatten*. IVAs handlingar nr 104, Stockholm.

Lillevrå Såg AB, www.lillevra.se

Lloyd, J.D., 1998. *Borates and their biological applications*. IRG/WP 98-30178. 29th Annual Meeting, Maastricht, Netherlands.

Massarsch, K. R., 1993. Man-made Vibrations and Solutions, State-of-the-Art Lecture, Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, June 1 - 6, 1993, Vol. II, pp. 1393 - 1405.

Naturvårdsverket, 2024. *Informationsskrift: Ansvarig för avhjälpan av miljöskador - En vägledning om miljöbalkens regler och rättlig praxis*.

Nordiska Träskyddsrådet, 1998. Nordiska träskyddsklasser. Del 1 – Furu och andra lättimpregnerbara träslag. NTR Doc. Nr1:1998.

Norman, E., 1976. *The vertical distribution of the wood-boring molluscs Teredo navalis L., Psiloteredo megotara H. and Xylophaga dorsalis T. on the Swedish West Coast*. Mat. U. Org. 11:p303-316.

NGF, 2019. *Peleveledning 2019*. Norsk geoteknisk förening, Den norske Pelekomité.

Olsson, C., och Holm, G., 1993. *Pålgrundläggning*. Svensk Byggtjänst och Statens Geotekniska Institut. ISBN 91-7332-663-1.

Pålkommissionen, 1980. *Rapport 59 - Anvisningar för provpålning med efterföljande provbelastning*,

Pålkommissionen, 1993. *Rapport 90 - Grova stålrörspålar – anvisningar för dimensionering, utförande och kontroll*.

Pålkommisionen, 1998. *Rapport 96:1 – Dimensioneringsprinciper för pålar, Lastkapacitet*. Författare: Gunnar Ehnåge.

Pålkommisionen, 2000. *Rapport 98 – Dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålpålar*. Författare: Åke Bengtsson, Bo Berglars, Sven Hultsjö och Jan Romell.

Pålkommisionen, 2008. *Tekniskt PM 1:2008 – Utredning av dimensioneringsprinciper för bergskor och skarvar till pålar*. Författare: Gunnar Holmberg, Ebbe Rosell, Mikko Toivonen, Håkan Karlsson, Fredrik Andersson, Leena Haabma Hintze, Göran Camitz, Ulf Bergdahl och Gunnar Westberg.

Pålkommisionen, 2015. *Teknisk PM 4:2015 - Korrosion av stålkonstruktioner med lång förväntad livslängd – nuläggessammanställning*. Författare: Bertil Sandberg.

Pålkommisionen, 2024. *Rapport 108 – Samverkanspålar av stål & betong*. Författare: Håkan Karlsson, Simon Håkansson och Fredrik Sarvell.

SBUF, 2019. *Installation av pålar och spont i förorenad mark, Spridningsrisk och ansvarsfördelning*. SBUF ID: 13413. Redaktör: Ellen Samuelsson.

SIS, 1999. *SS 02 52 11 Vibration och stöt – Riktvärden och mätmetod för vibrationer i byggnader orsakade av pålning, spontering schaktning och packning*.

SIS, 2002. *SS-EN 1990:2002 - Eurokod - Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk + SS-EN 1990/A1:2005*.

SIS, 2002-2006. *SS-EN 1991. Avser följande eurokoder: SS-EN 1991-1-1+ AC:2009: Tunghet, egen tyngd, nyttig last för byggnader, SS-EN 1991-1-2+AC2:2013, Allmänna laster – Termisk och mekanisk verkan av brand, SS-EN 1991-1-3+AC:2009, A1:2015: Allmänna laster – Snölast, SS-EN 1991-1-4:2005+AC:2009, AC:2010, A1:2010: Allmänna laster – Vindlast, SS-EN 1991-1-5+AC:2009: Allmänna laster – Temperaturpåverkan, SS-EN 1991-1-6:2005+AC:2013: Allmänna laster - Last under byggskedet, SS-EN 1991-1-7:2006+AC:2010, A1:2014: Allmänna laster – Olyckslast, SS-EN 1991-2+AC:2010: Trafiklast på broar, SS-EN 1991-3:2006+AC:2013: Last av kranar och maskiner, SS-EN 1991-4:2006+AC:2013: Silor och behållare*.

SIS, 2003. *SS-EN 13509 - Mätmetoder vid katodiskt skydd*.

SIS, 2004. *SS-EN 1995-1-1:2004 - Dimensionering av träkonstruktioner - Del 1-1: Allmänt - Gemensamma regler och regler för byggnader + SS-EN 1995-1-1:2004/AC:2006, SS-EN 1995-1-1:2004/A2:2014, SS-EN 1995-1-1:2004/A2:2014 och SS-EN 1995-1-1:2004/A1:2008*.

SIS, 2005a. *SS-EN 12794:2005+A1:2007 - Förtillverkade betongprodukter – Betongpålar + A1:2007/AC:2008*.

SIS, 2005b. *SS-EN 1992-1-1:2005 - Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader + SS-EN 1992-1-1:2005/AC:2008, SS-EN 1992-1-1:2005/AC:2010, SS-EN 1992-1-1:2005/AC:2010, SS-EN 1992-1-1:2005/A1:2014 och SS-EN 1992-1-1:2005/A1:2014*.

SIS, 2005c. *SS-EN 1992-2:2005 - Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 2: Broar + SS-EN 1992-2:2005/AC:2008*

SIS, 2005d. *SS-EN 1997-1:2005 - Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner - Del 1: Allmänna regler + SS-EN 1997-1:2005/AC:2009 Tillägg: SS-EN 1997-1:2005/A1:2013, SS-EN 1997-1:2005/A1:2013*.

SIS, 2005e. SS-EN 1993-1-1:2005+AC:2009, A1:2014 - Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader.

SIS, 2005f. SS-EN 1993-1-9:2005+ AC:2009 - Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner - Del 1-9: Utfattning.

SIS, 2006. SS-EN 1993-2:2006+ AC:2013 - Eurokod 3 : Dimensionering av stålkonstruktioner - Del 2: Broar.

SIS, 2007. SS-EN 1993-5:2007 - Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner - Del 5: Pål- och spont inklusive SS-EN 1993-5:2007/AC:2009.

SIS, 2009a. SS-EN 1090-1:2009+A1:2011 - Utförande av stål- och aluminiumkonstruktioner - Del 1: Bedömning av bärverksdelars överensstämmelse med ställda krav.

SIS, 2009b. SS-EN 13670:2009 - Betongkonstruktioner – Utförande.

SIS, 2010a. SS-EN 1536: 2010 - A1:2015 - Utförande av geokonstruktioner – Grävpålar.

SIS, 2010b. SS-EN 1538: 2010 + A1:2015 - Utförande av geokonstruktioner – Slitsmurar.

SIS, 2013a. SS-EN 1537:2013 - Utförande av geokonstruktioner – Förankringar.

SIS, 2013b. SS-EN 206:2013+A2:2021 - Betong - Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse.

SIS, 2015a. SS-EN 12699:2015 - Utförande av geokonstruktioner - Massundanträngande pålar.

SIS, 2015b. SS-EN 14199:2015 - Utförande av geokonstruktioner – Mikropålar.

SIS, 2015c. SS 137003:2015 - Betong - Användning av EN 206 i Sverige. Upphävd standard.

SIS, 2016a. SS-EN 338:2016 - Träkonstruktioner - Konstruktionsvirke – Hållfasthetsklasser.

SIS, 2016b. SS-EN 14081-1:2016 + A1:2019 - Träkonstruktioner - Sågat konstruktionsvirke - Del 1: Allmänna krav för visuell och maskinell hållfasthetssortering.

SIS, 2018a. SS-EN ISO 22477-1:2018 - Geoteknisk undersökning och provning - Provning av geokonstruktioner - Del 1: Statisk provbelastning av pålar med axiell trycklast (ISO 22477-1:2017).

SIS, 2018b. SS-EN ISO 22477-4:2018 - Geoteknisk undersökning och provning - Provning av geokonstruktioner - Del 4: Dynamisk provbelastning av pålar (ISO 22477-4:2018).

SIS, 2018c. SS-EN 1090-2:2018+A1:2024 - Utförande av stål- och aluminiumkonstruktioner – Del 2: Tekniska krav för stålkonstruktioner.

SIS, 2018d. SS-EN ISO 22477-5:2018 - Geoteknisk undersökning och provning - Provning av geokonstruktioner - Del 5: Provning av förankringar (ISO 22477-5:2018).
SIS, 2022. SS 460 48 60 - Vibration och stöt - Metod för synförrättning av byggnader och anläggningar i samband med vibrationsalsterande verksamhet.

SIS, 2023a. SS-EN ISO 22477-2:2023 - Geoteknisk undersökning och provning - Provning av geokonstruktioner - Del 2: Provning av pålar: Statisk provdragbelastning (ISO 22477-2:2023).

SIS, 2023c. SS-EN 1990:2023 - Eurokod - Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk.

SIS, 2024a. SS-EN 13369:2024 - Gemensamma regler för förtillverkade betongprodukter.

SIS, 2025. SS 137003:2021+T2:2025, *Betong – Användning av SS-EN 206:2013+A2:2021 i Sverige*.

Svensk Byggtjänst, 2023. *AMA Anläggning 23 och RA Anläggning 23*.

Sveriges Riksdag, 1998. SFS 1998:808: *Miljöbalk*.

Sättningskartan (<https://sattningskartan.se/sv/>).

Taxen, C., Sandberg, B., 2015. *Strömningshastighetens inverkan på erforderlig rostmåln. Swerea Kimab rapport 11659:4*.

Trafikverket, 2025a. TRVINFRA-00227 - *Krav med rådstext - Bro och broliknande konstruktion, Byggande*. Version 6.0, Publiceringsdatum 2025-07-01.

Trafikverket, 2025b. TRVINFRA-00230 - *Krav med rådstext - Geokonstruktion, Dimensionering och utformning*. Version 3.0, Publiceringsdatum 2025-05-01.

Transportstyrelsen, 2018. TSFS 2018:57 - *Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av eurokoder*.

Viking, K., 1998. *Driveability studies of vibro-driven model piles in non-cohesive soils – laboratory simulations*, Licentiate Thesis 2029, JOB, KTH, Stockholm.

Vägverket, 2004. *Bro 2004*. VV Publ 2004:56.

Westerberg, E., Massarsch, K. R. och Eriksson, K., 1996. Soil resistance during vibratory pile driving. Proceedings, International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'95, Volume 3, s. 241 - 250.

Wälchli, O., 1970. *Influence of the content of organic matter of soil on the degradation of wood by soft rot fungi*. IRG-möte september 1970 i Nancy.