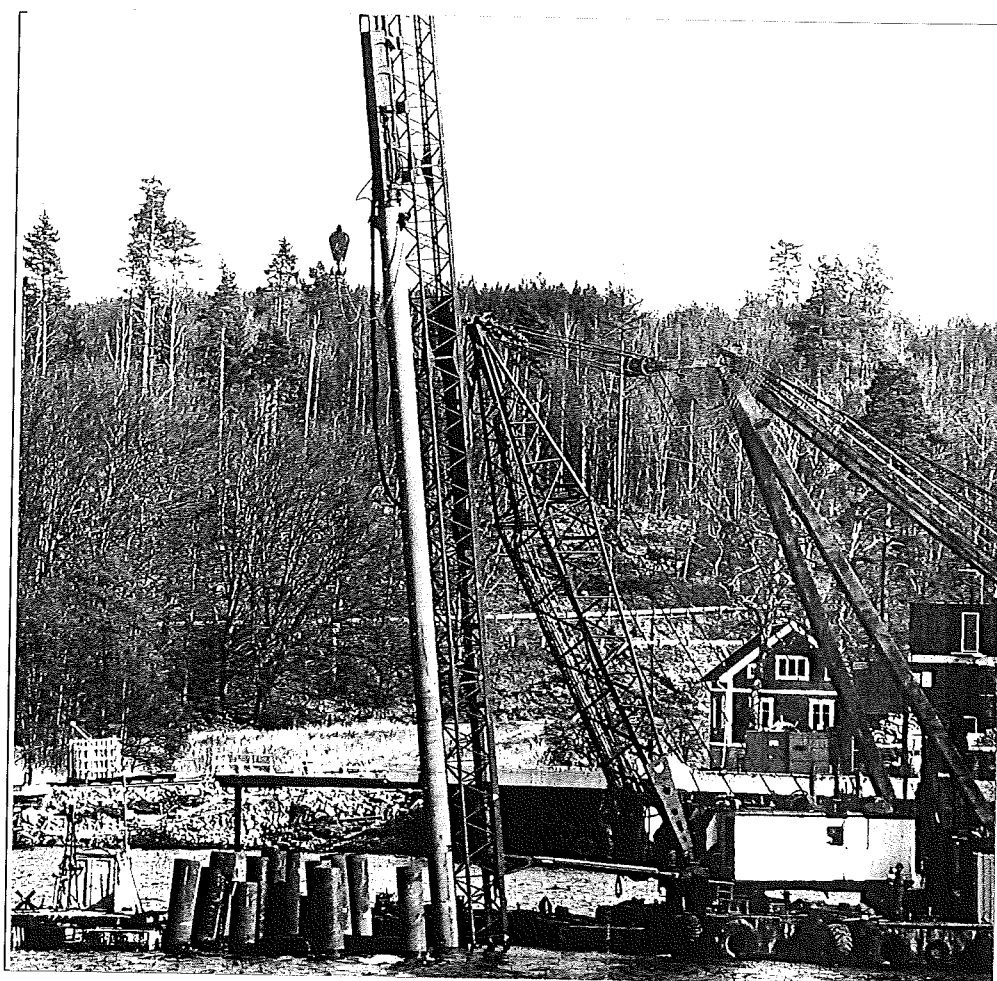


INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

GROVA STÅLRÖRSPÅLAR - anvisningar för dimensionering, utförande och kontroll



rapport 90

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

rapport 90

**GROVA STÅLRÖRSPÅLAR -
anvisningar för dimensionering,
utförande och kontroll**

Linköping 1993

Rapport	IVA Pålkommisionen 581 93 Linköping
Beställning	Statens geotekniska institut Växeln/biblioteket Tel. 013-11 51 00 Fax. 013-13 16 96
ISSN	0347-1047
ISRN	IVA/PAL/R--93/90--SE
Upplaga	400 ex
Tryck	Tryck-Center, Linköping, oktober 1993

Förord

Grundläggning med grova stålrörspålar har under senare år rönt ett ökat intresse vid grundläggning av broar och hamnkonstruktioner. Särskilt för pålgrundläggning av djupa brostöd i vatten erbjuder denna typ av påle ett flertal fördelar, exempelvis stor lastkapacitet och hög utförandekvalitet.

Utvecklingen har dock i viss mån hämmats av brist på accepterade anvisningar för dimensionering och utförande. Syftet med denna rapport är att ge ett underlag för användningen av grova stålrörspålar, främst för bro- och hamnkonstruktioner. Rapporten behandlar anvisningar för dimensionering, utförande och kontroll och riktar sig till geotekniker och konstruktörer samt beställare och entreprenörer.

Arbetet med rapporten har skett inom IVA Pålkommision under tiden 1991 till 1993. Utredningsarbetet kommer att fortsätta i vissa avseenden, exempelvis planeras tillämpningsexempel.

Arbetsgruppen "Grova Stålrörspålar" har bestått av följande personer :

- Thorild Blomdahl	Hercules Grundläggning AB	ordförande
- Håkan Bredenberg	Bredenberg Geo AB	utredare, författare och samordnare
- Lars Hellman	Hellman Byggråd AB	utredare, författare
- Per-Evert Bengtsson	Statens geotekniska institut	sekreterare
- Clas Alén	NCC/Chalmers tekniska högskola	rådgivare
- Åke Bengtsson	ELU-konsult AB	-"
- Allan Ekström	Banverket	-"
- Bo Jansson	ByggPaul AB	-"
- Björn Lundahl	Stabilator AB	-"
- Clas-Göran Rydén	Vägverket, Borlänge	-"
- Arne Sjöberg	Rautaruukki AB	-"

Ordföranden och författarna framför ett varmt tack till alla som tagit del i det utförda arbetet. Huvuddelen av arbetet har skett inom ramen för IVA Pålkommisionens ordinarie verksamhet som finansierats av BFR samt olika företag i branschen. Ett särskilt tack riktas till Rautaruukki AB, som bidragit till en del av insatserna och som dessutom lämnat värdefullt material till rapporten. Jan Lindgren, Statens geotekniska institut, har svarat för redigering och layout av rapporten.

Stockholm i oktober 1993

Thorild Blomdahl

X / / /

Blank

Innehållsförteckning

FÖRORD	3
DEFINITIONER	8
BETECKNINGAR	14
ENGLISH SUMMARY	16
1. INLEDNING	17
Fördelar	
Aktuella pållaster	
Förundersökningar	
Påltyper och dimensioner	
Öppna och slutna pålrör, drivning	
Maskinutrustning, arbetsutförande	
Kostnad, produktionskapacitet	
Lasteffekt	
Erfarenheter, referensobjekt	
2. PROJEKTERING	21
2.1 Produktionstekniska förutsättningar	21
<i>Pålningsmaskin</i>	
<i>Drivningsutrustning</i>	
<i>Stoppslagning</i>	
<i>Drivningskapacitet</i>	
<i>Stoppslagning</i>	
<i>Pållutning</i>	
2.2 Förundersökningar	23
<i>Förundersökningskrav relaterade till överbyggnadens funktion</i>	
<i>Geotekniska förundersökningskrav</i>	
2.3 Omgivningspåverkan	24
2.4 Lasteffekt	25
2.5 Korrosion	26
2.6 Kontroll	26
2.7 Kvalitetssäkring	26
3. KONSTRUKTION	27
3.1 Lasteffekt	27
3.1.1 <i>Dimensionerande lasteffekt</i>	
3.1.2 <i>Aktuella lasteffekter för grova stålrörspålar</i>	
3.1.3 <i>Påtvingad rörelse</i>	
3.2 Dimensionerande bärförmåga	29
3.3 Lastkapacitet	30
3.3.1 <i>Maximal lastkapacitet</i>	
- <i>Ofyllt stålrör</i>	
- <i>Stålrörspålar med bärande betongkärna</i>	

3.3.2	Utmattning	
3.3.3	Egenspänningar	
3.3.4	Avvikelse i mått och form (bucklor m m)	
3.3.5	Buckling, ofyllda rörpålar	
3.3.6	Initialkrokighet och lastexcentricitet vid ändar	
	- Ofyllt rör	
	- Rör med bärande betongkärna	
3.3.7	Knäckning	
	- Elasticitetsmodul, skjuvmodul och tvärkontraktionstal	
	- Böjstyvhet	
	- Samverkan mellan stålrör och betong	
	- Jordens och pålens bäddmodul	
	- Gränstryck mellan påle och jord	
	- Dimensionerande värde för bäddmodul. Partialkoefficienter	
	- Specialfall tom stålpåle. Beräkning av reduktionsfaktor vid böjknäckning, konstant bäddmodul	
	- Beräkning av initialkrökt påle belastad med vertikalkraft, horisontalkraft och moment	
3.3.8	Pålar med varierande styvhet och bäddmodul	48
3.4	Geoteknisk bärförmåga	
	Antagen jordmodell	
	Karakteristiska värden för jordens hållfasthet	
	Beräkning av rörelser	
	Beräkning av pålens last-rörelsesamband och kraftfördelning i pålen	
3.5	Sidobelastade pålar	52
	Påle omgiven av elastiskt medium	
	Påle som står fritt i luft eller vatten	
	Generell modell för sidobelastad påle	
	Gruppverkan	
3.6	Dimensionering med hänsyn till slagning	56
	Initialstötvåg	
	Spetskraft	
	Reflexstötvåg	
	Beräkning av drivningsskedet	
	Stötvågsmätning. CAPWAP-analys, beräkning av bärförmåga	
3.7	Dimensionering med hänsyn till korrosion	59
	Korrosionsskydd	
	Dimensionerande livslängd	
	Korrosionshastighet	
	Rostmån	
3.8	Utformning av påldetaljer för grova stålrörspålar	62
	Infästning av grova stålrörspålar i överbyggnad	
	Skarvar för grova stålrörspålar	
	Förstärkningsring vid öppen stålrörspåle	
	Plan pålsko för grova stålrörspålar	
	Bergsko med bergdubb för grov stålrörspåle	
3.9	Utformning av pålgrupper med grova stålrörspålar	67
	Geometrisk utformning	
	Särdrag för grova stålrörspålar	
	Samverkan mellan pålar och överbyggnad	
3.10	Negativ mantelfriktion	69

4. ARBETSUTFÖRANDE	70
4.1 Allmänt	70
<i>Skarvning med svetsning</i>	
<i>Lyftning</i>	
4.2 Utrustning för pålinstallation	70
<i>Fallhejare</i>	
<i>Dubbelverkande hydraul- eller luftdrivna hejare</i>	
<i>Dieselhejare</i>	
<i>Vibrohejare</i>	
<i>Bottenslagning</i>	
<i>Inmejsling i berg</i>	
4.3 Neddrivning	74
<i>Provpålning</i>	
<i>Verifiering av geoteknisk bärförmåga</i>	
4.4 Åtgärder efter neddrivningen	75
<i>Kontroll att pålen är oskadd efter avslutad slagning</i>	
<i>Rakhetsmätning</i>	
<i>Mätning av bucklor</i>	
<i>Kapning</i>	
4.5 Armering och gjutning	76
<i>Armering</i>	
<i>Gjutning</i>	
5. KONTROLL	77
5.1 Leveranskontroll	77
<i>Stålrörellement</i>	
<i>Bergskor</i>	
5.2 Drivningsfärdigt pålelement	78
5.3 Drivning	78
<i>Hejarens funktion</i>	
<i>Sjunkningsmätning</i>	
5.4 Efter drivning	79
<i>Läge, lutning och rakhet</i>	
<i>Armering och gjutning</i>	
5.5 Kvalitetssäkring	79
<i>Allmänt</i>	
<i>Kvalitetssäkring i projektering och konstruktion</i>	
<i>Kvalitetssäkring i upphandlingen</i>	
<i>Kvalitetssäkring i utförandet</i>	
5.6 Checklista	80
6. LITTERATUR	82
7. SAKORDSREGISTER	85
TVÄRSNITTSKONSTANTER	91

Definitioner

Nedan angivna begrepp avser föreliggande rapport om grova stålrörspålar och är inte nödvändigtvis helt överensstämmande med definition av begrepp i andra publikationer, t ex TNC 89 och Pålgrundläggningshandboken.

anslagshastighet	hejarens eller slagkolvens hastighet då den träffar dynan eller liknande anordning
arbetsberedning	av entreprenör upprättad beskrivning över arbetsutförandet
bergdubb	härdat spets avsedd att monteras på bergsko
bergsko	på pålspets monterad anordning avsedd för kraftöverföring påle/berg
bortslagning	vid neddrivning skadad påle som kasseras
bottenslagning	påle som drivs med hejare som inne i pålröret slår mot pålens botten
brottgränstillstånd	tillstånd där konstruktionsdelen är på gränsen till brott enligt aktuella kriterier
bruksgränstillstånd	tillstånd där ytterligare lastökning medför att krav som ställs på konstruktionsdelens normala funktion ej längre uppfylls
buckling	stabilitetsbrott för tunnväggigt tvärsnitt
bunden last	avser last vars läge ej varierar
byggnadsskrot	avfall eller lämningar från ej längre använda byggnadsverk
bärförmåga	för pålar den största kraft pålen kan påföras med iakttagande av ställda krav på säkerhet och funktion
bäddmodul	linjäriserat förhållande mellan normalspänning och motsvarande rörelse
böjstyvhet	produkten av elasticitiesmodul och tröghetsmoment (EI)
CAPWAP	datorprogram för beräkning av vissa pålegenskaper med utgångspunkt från stötvågsmättningsresultat

dieselhejare	hejare där slagkolven höjs genom explosion av dieselgas
dimensionerande lasteffekt	lasteffekt multiplicerad med partialkoefficienter
drivningsegenskaper	slagningsutrustnings kännetecken avseende drivning vid olika förutsättningar
dyna	mellanlägg mellan hejare och påle avsedd att eliminera krafttoppar och för att fördela slagkraften över pålskallen
efterslagning	slagning som utförs efter det att pålstopp uppnåtts första gången
egenspanningar	inre materialspanningar som existerar i stålspålerör vid leveransen eller uppkommer under slagning
fallhöjd	sträcka som motsvarar fritt fall hos fallhejare
falskt stopp	vid en tidpunkt uppnått pålstopp som vid förnyad drivning inte återuppnås
flytgräns (lera)	vattenkvot för lera då intryck av 60 g kon är 10 mm
friktionspålar	pålar vars geotekniska bärförmåga huvudsakligen består av mantelfriktion
funktionstid	den tidsrymd under vilken ställda krav på säkerhet och stadga samt krav på funktion skall gälla
förhöjd grundläggning	grundläggning där påsplints undersida placerats över underliggande mark eller sjöbotten så att ett fritt utrymme däremellan med avsikt erhållits
förundersökningar	undersökningar och utredningar som ligger till grund för projektering, konstruktion och utförande
geoteknisk bärförmåga	bärförmåga för pålen med avseende på den jord som omger pålen
godstjocklek	tjockleken hos stålspåleröret
gruppverkan	pålars beteende beroende på interferens mellan närbelägna pålar
gränstryck	tryck mellan påle och jord vid vilken rörelsen växer obegränsat utan ytterligare tryckökning
hejare	anordning avsedd för neddrivning av pålar

hinder	yttre faktorer som orsakar minskad drivningskapacitet och i vissa fall bortslagning
hylsa	innefattning för bergdubb
hårdmetallpålägg	metall som anbringas på bergdubb för att öka penetrationsförmågan vid bergkontakt
impedans	pålens axiella styvhet AE dividerad med den longitudinella våghastigheten (ca 5100 m/s för stål)
initialbucklor	bucklor som finns hos pålröret efter installationen
initialkrokighet	krokighet hos pålröret efter installationen
inspänningssnitt	tvärsnitt där påle i teoretisk mening är inspänd
karakteristiska värden	statistiskt valda värden på laster och materialegenskaper på vilka partialkoefficienter ej applicerats
kantavstånd	minsta avstånd mellan påles yta och närmaste kantlinje hos överbyggnad
katodiskt skydd	åtgärd eller anordning för korrosionsskydd där pålen utgör katod
knäckning	brottfenomen som kännetecknas av att pålens rörelse, då den belastas axiellt med mindre kraft än den som motsvarar pålmaterialets stukgräns, växer obegränsat utan ytterligare lastökning
knäckningslängd	vanligen längd som motsvarar Eulerknäcklängden
kohesionspålar	pålar vars geotekniska bärförmåga huvudsakligen beror av omgivande jords kohesion
kollektivparameter	förhållandet mellan minsta och största lastökningen inom ett typiserat lastkollektiv
korrosionshastighet	hastighet varmed för omständigheterna relevant typ av godstjockleksminskning genom korrosion uppkommer
korrosionsskydd	ytbehandling eller annan åtgärd med syfte att minska korrosionshastigheten
kvalitetssäkring	sammanfattande beteckning för åtgärder med syftet att säkerställa specificerad utförandekvalitet

last	yttre kraft eller liknande som angriper konstruktionsdel
lasteffekt	den inverkan en last har på en konstruktionsdel
lastkapacitet	den installerade pålens bärförmåga med avseende på risken för brott i pålmaterialet
lastmultiplikator	faktor med vilken last multipliceras eller divideras för att föreskrivna säkerhetsmarginaler skall uppnås
lastväxling	förlopp som vanligen innebär att last ändras så att spänningar i konstruktionsdel växlar tecken.
leveranskontroll	kontroll som entreprenören utför, i samband med att material levereras till arbetsplatsen, avseende kvantitet, kvalitet samt ev transportskador och liknade
miljöklass	anger korrosionsbenägenheten hos pålens omgivning
minimiavstånd	minsta godtagbara avstånd mellan närbelägna pålar
negativ mantelfriktion	fenomen som uppkommer genom att jorden kring pålen rör sig nedåt i förhållande till pålen
olyckslast	last som uppkommer som resultat av olyckshändelse
omgivningspåverkan	pålningens inverkan på omgivning, i första hand under arbetsutförandet
partialkoefficient	koefficient avsedd för division eller multiplikation av karakteristiska värden för laster och materialegenskaper, varvid dimensionerande värden erhålls
permanent	förhållande som ej varierar nämnvärt i tiden
plansk	tätplåt eller liknande monterad vid pålspets
plint	konstruktion som bär överbyggnad, vanligen av betong, för ingjutning av pålskallar
propp	jordpropp som bildas inne i ett nedtill öppet pålrör och som kan röra sig nedåt tillsammans med pålen
probelastning	med statisk eller dynamisk metod anbringad kraft på pålen under det att samhörande värden på krafter och rörelser mäts eller utvärderas

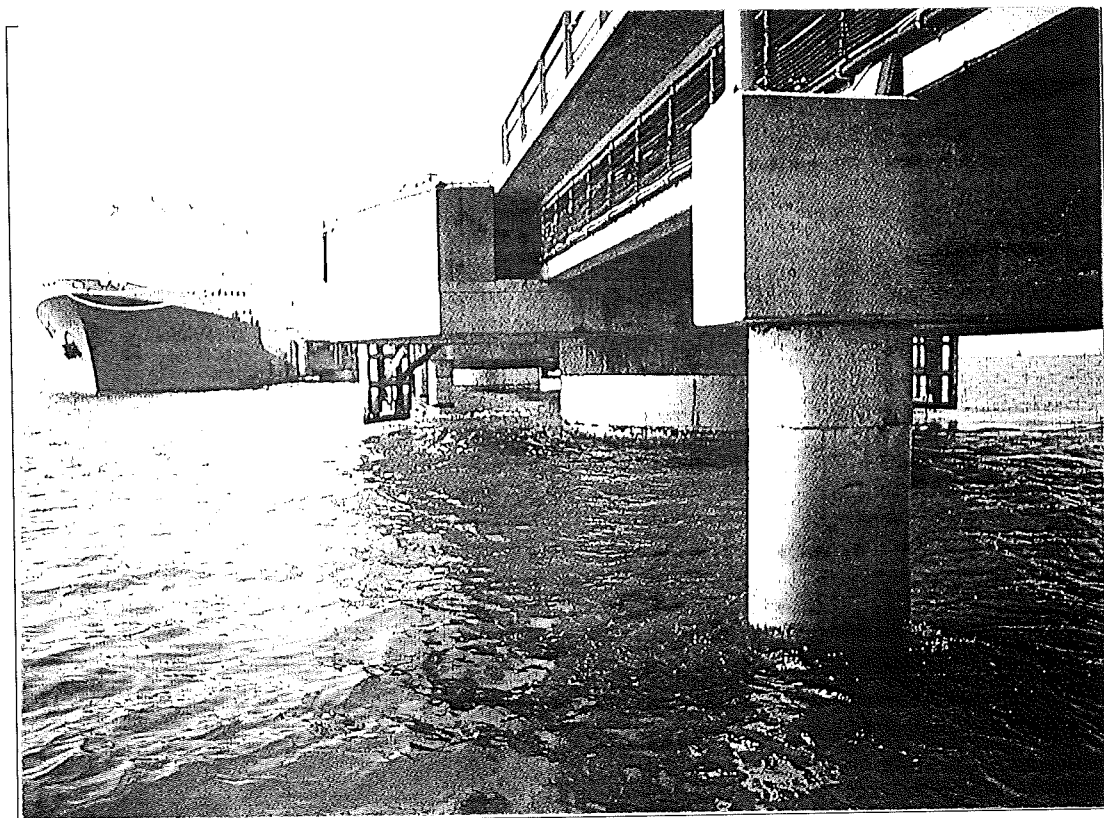
pålgrupp	ett antal pålar som samverkar
pållutning	pålaxelns avvikelse från lodlinjen på den nivå där pålen skall kapas slutgiltigt
pålmantel	pålens yttre begränsningsyta mellan pålhuvud och pålspets
pålsko	anordning monterad vid påles spets för förstärkning av denna
rakhetsmätning	mätning som utförs i syfte att fastställa den verkliga pålaxelns avvikelse från dess teoretiska läge. Den teoretiska pålaxeln utgör en rätlinje från överytans centrum till motsvarande punkt på underytan.
recept	sammansättning av betong (med tillsatsmedel)
resistivitet	motstånd mot elektrisk ström. Ger ett mått på jords korrosions-agressivitet
rostmån	ökning av godstjockleken med syftet att vid viss korrosionshastighet öka funktionstiden
samverkan	interaktion mellan material (t ex stål och betong) eller konstruktionsdelar (t ex pålar och överbyggnad).
sidotryck	normalspänning mellan påles mantelyta och omgivande jord vid motsvarande rörelse (sidorörelse)
sjunkningsmätning	mätning av en påles kvarstående sjunkning för ett visst antal slag vid bestämda slagningsförhållanden
skal	konstruktionselement av tunnväggigt tvärsnitt, belastat i sitt plan
slankhetsparameter	modifierat förhållande mellan knäckningslängd och tröghetsradie
spetsburen påle	påle vars bärförmåga huvudsakligen utgörs av kraft mot pålspetsen
spetsmotstånd	kraft som krävs för att pålspets skall penetrera in i underliggande jord- eller bergmaterial utan att någon kraft mot pålmanteln verkar
spänningsvidd	amplitud mellan två extremvärden för spänningar
stighastighet	hastighet med vilken betongytan stiger i pålrör då detta fylls med betong

stigtid	mått på hastighet varmed stötkraft ökar i pålmaterialet
strömtryck	tryck eller kraft som strömmande vatten orsakar
stoppslagning	skede av påslagningen under vilket pålens geotekniska bärför- måga skall verifieras
styrning	anordning som syftar till att säkerställa att hejaren träffar pålen centriskt
styv påplint	pålgrupp med pålar ingjutna i plint som är så styv att den ur statisk synpunkt kan betraktas som en stel kropp
stöt vågsmätning	sammanfattande beteckning på mätningar som under drivning mäter töjningar och accelerationer i pålen
säkerhetsklass	kategoriindelning med avseende på risken för personskada som kan uppkomma till följd av brott i konstruktionen
tolk	anordning för att mäta påles raket
tvärsnittsklass	indelning enligt BSK med avseende på risken för buckling
utförandekontroll	kontroll av utförandet som beställare eller entreprenör utför,
utmattning	påverkan på material av upprepade lastväxlingar och som efter många lastcykler kan leda till materialbrott vid förhållandevis låga spänningar
vibrationshastighet	den maximala, vanligen vertikala, partikelhastigheten för en punkt som påverkas av vibrationer
vibrohejare	påldrivningsutrustning som arbetar huvudsakligen med relativt snabbt pulserande belastning
WEAP	datorprogram för simulering av påldrivning
Wincklerunderlag	balkunderlag som kännetecknas av proportionalitet mellan anliggningstryck och motsvarande rörelse ("spiralmadrass")

Beteckningar

A	area
AE	axialstyvhet (A=area)
β	knäcklängdsfaktor, $L_c = L_a \cdot \beta$
c	longitudinell våghastighet
c_h	horisontell konsolideringskoefficient
c_u	odränerad skjuvhållfasthet
c_v	vertikal konsolideringskoefficient
D, d	rördiameter
D_i	innerdiameter
D_y	ytterdiameter
δ	initialutböjning
E_c	dimensionerande elasticitetsmodul, betong
E_{ck}	karakteristisk elasticitetsmodul, betong
E_{ef}	fiktiv elasticitetsmodul
EI	böjstyvhet (I=tröghetsmoment)
E_s	dimensionerande elasticitetsmodul, stål
E_{sk}	karakteristisk elasticitetsmodul, stål
F	Kraft, kraftvektor
F_i	initialvåg, intensitet
F_r	reflexvåg, intensitet
F_s	spetskraft
f	kraftkomponent
f_{cc}	dimensionerande hållfasthet betong
f_{ck}	karakteristisk hållfasthet, betong
f_{mk}	mantelspanning, tangentiell
f_{rd}	dimensionerande utmattningshållfasthet, stål
f_{rk}	karakteristisk utmattningshållfasthet, stål
f_{yd}	dimensionerande hållfasthet, stål
f_{yk}	karakteristisk hållfasthet, stål
ϕ	friktingsvinkel (friktingsjord)
ϕ_e	effektivt krytalt
G	skjuvmodul
γ_h	partialkoefficient, beror av säkerhetsklass
γ_m	partialkoefficient, beror av material
γ_{Rd}	partialkoefficient, beror av modellosäkerhet
i	tröghetsradie
k	jordens bäddmodul (kraft/längd ³)
kd	pålens bäddmodul
K_p	passiv jordtryckskoefficient
κ	kollektivparameter
L_a	ekvivalent längd
L_c	knäckningslängd
L_e	elastisk längd

λ	slankhetsparameter
M	moment
m	hejarvikt
N	normalkraft
n	förhållandet mellan elasticitetsmodul för stål och betong
n_h	tillväxtfaktor för bäddmodul
Q_{spets}	spetsspänning (normalspänning)
r	rörradie
σ_h	horisontellt gränstryck
σ_{veff}	effektivt vertikalt tryck
T_v	tidsfaktor
t	godstjocklek eller tid
u	rörelse
v	anslagshastighet, hejare
w_L	flytgräns för lera
w_r	amplitud hos buckla
ω	reduktionsfaktor för knäckning
Z	impedans



English Summary

Unlike its neighbouring countries, Sweden has been slow to employ large diameter steel tube piles. Such piles have been used in only a few projects, so far. In these instances the tubes have been filled with reinforced concrete. When calculating the bearing capacity, the steel tube has been assumed to completely disintegrate due to corrosion. The steel tube has thus merely served as formwork for the concrete, a very costly solution indeed.

In order to establish better economy for such piles, it is necessary to allow at least part of the load to be carried by the driven steel tube. One reason this has not been so before are the rules and recommendations for large diameter piles to be in accordance with Swedish Building Codes which have not been available so far. This report aims at closing this gap. The design principles suggested in the report are in harmony with the Swedish Code for Steel Design BSK 1987 and the Swedish Concrete Code, BBK-79.

This report, in addition to concrete filled piles, also deals with empty steel tube piles. For such piles, it is important to take into account the fatiguing effect caused by driving. Further, the risk of local buckling of the tube must be calculated. For many other types of piles such considerations are not needed.

The calculation of bearing capacity reduction due to extensive driving (fatigue) and due to general and local buckling, is described. The methods recommended meet the requirements in the Swedish Building Code for steel structures.

Procedures for the calculation of vertical and horizontal bearing capacity of piles are given in the report.

Recommendations for the calculation of driving stresses are given. Also a brief description of commonly used software for analyzing driving behaviour and for predicting bearing capacity is given.

The importance of quality assurance (QA) at the design stage as well as at the construction site is emphasized in the report. A check list intended for use at the driving site is provided.

The authors express their hope that the report will prove to be useful for anyone working with large diameter steel tube piles.

1. Inledning

Denna rapport lämnar anvisningar för dimensionering, utförande och kontroll av grundläggning med grova stålrörspålar.

Slagna stålrörspålar med stor diameter är vanliga utomlands. Intresset för grova stålrörspålar ökar i Sverige, främst inom brobyggnadsområdet. Stålrörspålar ger en hög utförandekvalitet, exempelvis vid grundläggning av brostöd vid stort vattendjup.

De grundläggningar med grova stålrörspålar som hittills utförts i Sverige har skett med pålar som efter neddrivningen fyllts med betong. Stålröret har vid dimensioneringen antagits vara helt eller till större delen bortrostat. Det kan då sägas utgöra en temporär konstruktion i form av stoppslagingsobjekt samt form för en platsgjuten betongpelare.

En nackdel med detta synsätt är att pålningskostnaden blir hög. När stålet inte har någon funktion i slutprodukten, väljs en jämförelsevis mycket liten godstjocklek. Därigenom försvåras och förlängs drivningen, samtidigt som risken för sönderslagning ökar. Utomlands används ofta tomma stålrörspålar, eller betongfyllda pålar där stål och betong beräknas samverka.

Fördelar

Det finns förhållanden där slagna stålrör har givna fördelar och där användningen därför kommer att öka. Som exempel kan nämnas

- *svåra slagingsförhållanden med hinder i marken*
- *pålar med mycket stora pållaster*
- *stora horisontalkrafter, exempelvis från istryck*
- *nötning av is och vatten påverkar pålarna*
- *stor böjstyvhet krävs*
- *knäckning utgör en lastbegränsande faktor*
- *endast liten jordundantäringning kan godtas (gäller öppna pålar)*

Sådana förhållanden gäller ofta vid pålgrundläggningar för broar och kajer. Att man här tidigare ändå knappast alls använt sig av slagna stålrörspålar kan delvis förklaras av att erfarenheter och konstruktions-praxis saknats. För betongpålning finns sedan lång tid tillbaka produktionsanpassade tekniska lösningar. Stålrörspålning ställer dock andra krav, exempelvis tyngre hejare.

Aktuella pållaster

En pålad grundkonstruktions utformning bestäms till största delen av överbyggnadens funktion och samspelet med denna. Detta medför bl a att de pållaster som brukar bli aktuella för grova slagna stålrörspålar återfinns inom intervallet 1 000 - 5 000 kN.

Till skillnad från förtillverkade, slanka betongpålar kan grova stålrörspålar ta upp stora böjmoment. Medan ett normalt karakteristiskt värde för böjmomentkapaciteten i brottgränstillstånd för en slank betongpåle är ca 50 kNm, kan motsvarande värde för en inte alltför stor stålrörspåle uppgå till ca 200 kNm. Detta medför att grova stålrörspålar kan användas för att ta upp horisontalkrafter genom sidomotstånd i mycket större utsträckning än vad som är fallet med slagna betongpålar.

Förundersökningar

Dimensionering förutsätter att de geotekniska förhållandena är kända i tillräckligt stor utsträckning. Undersökningarna bör minst ha den omfattning som redovisas i anvisningar utfärdade av Vägverket, publ 1989:7. Särskilt vid slagning mot berg är det viktigt att känna berglägen och bergkvalitet. Undersökningarna utgör tillsammans med belastnings- och beständighets-kraven förutsättningarna för detaljprojekteringen. Undersökningarnas omfattning beror av pålarnas förutsatta funktionssätt.

De geotekniska förundersökningarna skall också klarlägga i vilken omfattning hinder förekommer som kan påverka pålningen. Vidare skall det vara möjligt att ur undersökningsresultatet bedöma vilket drivningsmotstånd som kan uppkomma.

I många fall är miljöbetingelserna viktiga att undersöka. Detta gäller särskilt när det finns anledning att misstänka korrosionsaggressiv miljö eller risk för ej godtagbar omgivningspåverkan.

Påltyper och dimensioner

Med stor diameter för stålrörspålar brukar man i Sverige avse 0,3 m och mer. Normalt väljs rördimensioner inom intervallet 0,4 - 0,8 m. Exempel på stålrörspålar med betydligt större diameter finns dock. De godstjocklekarna som är aktuella varierar mellan ca 10 - 20 mm. Det är normalt ekonomiskt gynnsamt att arbeta med hög kvalitetsklass för stålmaterial. För att hålla tidplaner brukar det krävas att förutsatt rördimension och materialkvalitet som normalt hålls i lager. Vanligen är det fråga om spiralsvetsade rör.

I allmänhet gäller som huvudvillkor för dimensioneringen att pålen skall ta upp viss axialbelastning. Om stålet skall ta upp lasten innebär detta 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 och möjligheten att transportera och driva röret.

Det är lämpligt att inför dimensioneringsarbetet ta kontakt med en rörleverantör för att undersöka vilka dimensioner och plåttjocklekarna som finns tillgängliga, särskilt vid mindre arbeten och snabb igångsättning. Man bör inte utan särskild undersökning förutsätta större plåttjocklek än 20 mm.

Öppna och slutna pålrör, drivning

Stålrörspålar kan drivas med sluten eller öppen ände. Vid öppen pålände monteras en förstärkningsring vid spetsen. Genom att slå pålarna med öppen spets uppnås flera fördelar;

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

En öppen pålspets medför givetvis att jord kan tränga in i pålen. Om jorden är mycket lös 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. Under andra betingelser kan en propp bildas. En påle med propp blir jordundantäckande, vilket kan vara en betydande nackdel.

För en slutna påle kan spetsen utgöras av ett lock i form av en påsvetsad stålplatta, s k plansko. Denna typ av pålsko kan användas för friktionspålar där man önskar hindra vatten och jord att tränga in i pålen under slagningen.

Vid drivning av rörpålar med slutna 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.

Grova stålrörspålar kan med viss komplettering i många fall drivas med utrustning som används för att slå förtillverkade betongpålar. För att slå pålar med stor diameter kan det löna sig att använda utrustning som är särskilt anpassad för drivning av grova rörpålar.

Maskinutrustning, arbetsutförande

För pålar som omfattas av denna rapport förutsätts slagning ske med fallhejare eller annan liknande utrustning. Slagenergin skall vara så stor att pålarnas dimensionerande bärförmåga kan utvärderas från neddrivning och efterslagning.

Stålrörspålar drivna med vibrohejare behandlas inte. Används vibroaggregat eller jämförbar drivningutrustning, kan pålarnas dimensionerande bärförmåga utvärderas enligt metoder som redovisas i IVA Pålkommisionens Rapport nr 58, 1979, *Grävpåle-anvisningar*. Resultaten måste dock anpassas till "vibrationsförhållanden".

Kostnad, produktionskapacitet

Kostnaden per lastenhet och pålmeter är i de flesta fall högre för stålrörspålar än för betongpålar. Hur stor kostnaden blir för ett enskilt objekt beror på flera faktorer, t ex

arbetets omfattning, svårighetsgrad och speciella villkor samt vilken bärförmåga som kan utnyttjas. Valet av påltyp påverkar även kostnaden för överbyggnaden. Eftersom det är den **sammanlagda** kostnaden som skall minimeras är det därför inte alltid motiverat att söka minimera pålkostnaden.

Normalt driver man högst ca 10 pålar per dag på land och kanske 1 - 3 pålar per dag från ponton. Detta förutsätter att pållängden inte överstiger ca 25 m, rördiametern inte är mer än ca 0,5 m och att slagningsförhållandena kan betecknas som gynnsamma.

Kostnaden för personal och maskiner är i stort sett konstant vare sig slagning utförs eller ej, d v s stilleståndskostnaderna är stora. Utformning av konstruktionerna så att optimal kapacitet kan uppnås kan ofta ge större besparingar än en ensidig strävan att minimera antalet pålar. Produktionsanpassade lösningar kräver att projektören och konstruktören samarbetar med en entreprenör.

Lasteffekt

Belastningar på pålar från en överbyggnad enligt senare normer och bestämmelser skiljer sig i allmänhet från de som erhöles med tidigare SBN-föreskrifter. Som exempel kan nämnas att lasteffekten enligt Boverkets byggregler kan vara betydligt större än enligt SBN. Även andra lastföreskrifter, exempelvis för väg- och järnvägsbroar, kan innebära ökad lasteffekt jämfört med äldre förutsättningar.

Givetvis måste samma regler och förutsättningar gälla för lastberäkning som för beräkning av bärförmåga.

Erfarenheter, referensobjekt

I Norge, Finland och på kontinenten har grundläggning med grova stålrörspålar använts i större utsträckning än i Sverige. Ett ökat samarbete mellan länderna i Europa kommer troligen att medföra att andelen slagna stålrörspålar ökar i vårt land.

Alla rörpålar för broprojekt som hittills utförts i Sverige består av stålrör som efter neddrivning och verifiering av bärförmågan fyllts med betong. Stålröret har inte medräknats som bärande. Pålarna har därför dimensionerats som armerade betongpelare i enlighet med gällande betongbestämmelser och bronormer.

2. Projektering

För att avgöra om grova stålrörspålar utgör en lämplig lösning erfordras tillräckligt ingående uppgifter om de projekteringsförutsättningar som behandlas nedan. Detaljutformning av pålarna, liksom arbetsutförande och kontrollinsatser, behandlas närmare i kapitel 3 och 5.

2.1 Produktionstekniska förutsättningar

Pålningsmaskin

Vid grundläggning med grova stålrörspålar är det lämpligt att använda långa rörsektioner. Minst 20 m långa pålsegment bör därför kunna lyftas in i riggen. Det kan dock vara ekonomiskt att arbeta med riggar i vilka kan lyftas in pålrörsegment som är längre än 20 m. Upp till 40 m längd kan uppnås med vissa typer av pålningsmaskiner som används utomlands. Om skarvning av rören krävs är det fördelaktigt att utföra denna innan slagningen påbörjas.

Pålningsmaskinen måste ha tillräcklig lyftkapacitet för de längder och dimensioner som förutsätts. Som exempel kan nämnas att ett 40 m långt stålrör med diametern 0,8 m och godstjockleken 20 mm väger ca 15 ton. Det är vidare ett krav att slagningsutrustningen anpassas till påltypen. En konventionell pålningsmaskin för betongpålar kräver en del ändringar och kompletteringar.

Drivningsutrustning

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

Drivningsutrustningen skall vara produktionsanpassad med avseende på service- och miljökrav och uppfylla följande krav;

- ge tillräcklig kraft för verifisering av bärförmågan
- ge tillräcklig drivningskapacitet

Drivningskapacitet

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 produktionstekniskt fördelaktigt att använda sig av relativt tunga hejare (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. Som tumregel gäller att man väljer en så tung hejare som är praktiskt möjligt.

Det finns hejare som är speciellt utformade för drivning av grova stålrörspålar. Sådana hejare ges en förhöjd acceleration genom att en gasvolym komprimeras över hejaren då den lyfts. Då hejaren frigörs i sitt övre läge genererar gastrycket en pådrivande kraft i samma riktning som tyngdkraften. För vissa gasdrivna hejare dubblas accelerationen i jämförelse med frifallshejare. Detta innebär 2 ggr större anslagshastighet och därmed 4 ggr större anslagsenergi. Uppmätta ökningarna i drivningskapacitet är 100-150 %. Trots att en sådan specialhejare är betydligt dyrare än en konventionell tung fallhejare, kan det ändå i vissa fall löna sig att använda en gastryckhejare genom den vinst i produktionstid som uppnås.

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 geo-parametrar.

Stoppslagning

I Sverige och länder med liknande geologi brukar ofta ett krav på hejarvikt, fallhöjd och acceptabel sjunkning/10 slag anges som mått på att pålen uppnått erforderlig bärförmåga. Hejaren, vanligen av stål, väger 5-15 ton. Fallhöjderna varierar under drivning mellan ca 0,5-1,2 m och vid stoppslagning mellan ca 2 till 5 m.

Ett säkrare sätt att verifiera bärförmågan är med stötvågsmätning och analys av mätresultatet.

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, som leder till kallbearbetning och risk för sprödbrott. Deformationens storlek beror på den tidsrymd spänningsöverskridandet verkat. Därför föreskrivs att stoppslagning inte får utföras så att större stålspänning än stålets karakteristiska hållfasthet uppkommer. På så sätt elimineras teoretiskt risken för att röret deformeras vid stoppslagningen.

Pållutning

Vid pålgrundläggningar där grova stålrörspålar är aktuella, förekommer i allmänhet 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 à 6:1 väljas. På så sätt undviks många problem vid arbetsutförandet. Den ökning av pålantal som en brantare lutning medför, uppvägs i allmänhet 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 till föremål för samråd mellan projektör och en entreprenör.

2.2 Förundersökningar

I begreppet förundersökningar ingår insamlandet av ett flertal uppgifter som är nödvändiga för att planlägga och genomföra pålgrundläggningens. Merparten av detta arbete behöver emellertid projektören och konstruktören inte befatta sig med. De förundersökningar som är aktuella är bl a sådana som gäller överbyggnadens funktion och samverkan med pålarna. Vidare måste projektören undersöka och utvärdera inverkan av de geotekniska förhållandena. Därtill kommer förundersökningar om det planerade arbetets inverkan på omgivningen och förhållanden som rör lagar, tredje man och avtal.

Förundersökningskrav relaterade till överbyggnadens funktion

En konstruktion grundläggs med pålar för att begränsa uppkommande rörelser. Genom att dimensionera med utgångspunkt från godtagbara rörelser och deformationer hos överbyggnaden kan pålningen optimeras. Föreskrivna säkerhetsmarginaler måste innehållas, både för bruksgräns- och brottgränstillstånd. På projekteringsstadiet skall därför alltid undersökas vilka rörelser och lutningar som kan godtas hos överbyggnaden.

En nödvändig del av förundersökningarna är att klarlägga vilka lasteffekter som skall förutsättas. Detta gäller såväl inverkan av de krafter som verkar på pålgrundläggningen, som de rörelser som påtvingas pålarna. Exempel på lasteffekter vid grundläggning med grova stålörspålar redovisas senare i detta kapitel.

Geotekniska förundersökningskrav

De geotekniska undersökningarna skall ge besked om förutsättningarna för drivningen av pålarna och göra det möjligt att analysera pålarnas förmåga att bära överbyggnaden med påverkande laster.

Förutom sedvanliga geotekniska fältundersökningar (olika typer av sondering och provtagning) är det viktigt att beakta behovet av följande geoundersökningar;

- *Grundvattenytans läge och variationer. Ett högt grundvattenstånd kan t ex ge stora lyftkrafter på slutna, ofyllda grova stålörspålar.*

- *Bestämning av jordens elektriska resistivitet och grundvattnets aggressivitet för beräkning av korrosionshastigheten.*

Av den geotekniska förundersökningen skall vidare framgå vilka hinder för pålningen som skall förutsättas. Exempel på hinder är förekomst av sten, block och byggnadsrester liksom fyllning som innehåller byggnadsskrot och liknande.

Även övriga geotekniska förhållanden, som kan inverka på pålningens genomförande och pålarnas funktion, skall redovisas. Som exempel kan nämnas:

- *områden med låg markstabilitet*
- *förekomst av ytor med låg bärighet, förstärkningsbehov*
- *pågående sättningar eller andra rörelser i marken*
- *tidigare erfarenhet av pålning i området*

Andra förhållanden som är lämpliga att undersöka och redovisa är ström-, vind-, våg- och isförhållanden, om pålningen skall utföras från ponton. Vidare är det viktigt att klarlägga lägen, funktion och tillstånd hos hus, ledningar och andra markförlagda anläggningar som kan komma att påverkas av pålningsarbetet.

2.3 Omgivningspåverkan

Med omgivningspåverkan menas den inverkan pålningsarbetet har på anläggningar, byggnader och förhållanden i närheten av arbetsplatsen. I första hand gäller det uppkomst av sättningar, markrörelser och vibrationer och buller som påslagning genererar. Men även faktorer som pålgrundläggningens inverkan på framtida grundläggningsförutsättningar i närheten bör ingå.

De förundersökningar som avser omgivningspåverkan bör minst omfatta följande:

- *beräkning av sättningar* som pålningen beräknas medföra och inverkan av dessa. Särskilt i löst lagrad friktionsjord kan avsevärda rörelser i jorden uppkomma. Befintliga anläggningar, som tidigare satt sig ojämnt, löper särskilt stor risk att skadas.
- *markförskjutningar*. Grova stålrörspålar som drivs med sluten spets undantränger en jordvolym motsvarande pålens, vilket kan skada angränsande konstruktioner.
- *portrycksökningar*. Vid pålning i jord med låg permeabilitet uppkommer samtidigt med undanträngningen av jord ett ökat porvattentryck. Under ogynnsamma omständigheter kan en sådan portrycksökning accumuleras och åstadkomma skred. För grova stålrörspålar med sluten spets bör detta förhållande ägnas särskild uppmärksamhet.
- *portrycksminskning*. I vissa typer av finkorning friktionsjord kan fenomenet "falskt stopp" uppkomma. Orsaken antas vara kraftigt ökat motstånd beroende på lokala minskningar i jordens portyck i samband med drivningen. Man kan räkna med att problemet ökar med ökande diameter hos pålen. Risken för falskt stopp bör därför särskilt beaktas i samband med projektering av grundläggning på grova stålrörspålar som har större diameter än konventionella betongpålar.
- *vibrationer*. Influensområdet för de vibrationer påslagningen medför är i allmänhet större än det för jordundanträngning och portrycksökning. En utredning om vilka vibrationer som kan uppkomma, liksom en kartläggning av de angränsande objekt som kan skadas eller påverkas, ska därför alltid ingå i förundersökningarna. Det är viktigt att uppmärksamma att godtagbar vibrationshastighet vid pålning måste bestämmas efter andra kriterier än de som gäller för sprängning. Påslagning, särskilt

slagning med den typ av tunga hejare som krävs vid drivning av grova stålrörspålar, alstrar mer lågfrekventa vibrationer. Detta innebär lägre acceptabel vibrationshastighet. Vidare måste projektören ta hänsyn till att människor störs av endast ca 1/10 av den vibrationshastighet som är skadlig för byggnader av normalt utförande.

- *buller*. Drivning av grova stålrörspålar hör till en av de mest bulleralstrande aktiviteterna inom grundläggningsområdet. Särskilt gäller detta högeffektiva hejare utvecklade för drivning av grova stålrörspålar. En analys av vilka bullernivåer som kan beräknas uppkomma och vad som kan godtas skall därför tas med i projekteringsstadiets förundersökningar.
- *avgaser*. Med dieselhejare kan ofta hög drivningskapacitet uppnås för grova stålrörspålar. Denna hejartyp genererar emellertid dieselrök, avgaser och sot som på många platser innebär ett hinder för användningen. Det är oftast möjligt att direkt avgöra om sådana hejare kan användas eller inte.

Som framgår ovan är kravet på de förundersökningar som gäller omgivningspåverkan vid planering av grundläggningsarbeten på grova stålrörspålar större än för andra påltyper. Detta gäller bl a inverkan av buller på omgivningen. Grova stålrörspålar är, beroende på sådan omgivningspåverkan, därför i många fall ett mindre lämpligt val i tät bebyggelse.

2.4 Lasteffekt

Vid projekteringen skall samtliga lasteffekter klarläggas. Vissa lasteffekter är så klart definierade att någon diskussion inte kan uppkomma vid senare detaljutformning av pålarna. Förvånansvärt ofta uppkommer emellertid tvister i fråga om vilka lasteffekter som därutöver skall förutsättas. Det kan gälla frågor av mer formell karaktär, exempelvis vilka normer och regler som skall gälla och hur programhandlingar skall tolkas, men även lastfall som inte alls beaktats vid projekteringen kan bli aktuella.

Exempel på sådana "oförutsedda" lastfall är lasteffekter orsakade av olika typer av tvång, dvs överbyggnadsrörelser som genom att pålarna tvingas med i en rörelse medför uppkomst av krafter och moment i pålarna. Andra exempel är inverkan av strömmande vatten kring fristående pålar och liknande mer ovanliga fenomen.

Transport- och utförandeskedet kan medföra lasteffekter som måste beaktas tillsammans med driftstadiets inverkan. Som exempel kan nämnas utmattningsinverkan orsakad av långvarig och hård drivning. Pålen kan på så sätt få en del av sin kapacitet "förbrukad" innan den införlivas med överbyggnadskonstruktionen.

Vertikala lasteffekter är normalt dominerande. Vid grundläggning med grova stålrörspålar är det ofta aktuellt att även ta upp horisontella laster. Vidare måste alltid inverkan av de rörelser som överbyggnaden och den omgivande jorden påtvingar pålarna undersökas.

2.5 *Korrosion*

Hänsyn till korrosion måste tas i projekteringsstadiet när bärande stålör förutsätts. Korrosionsfrågor i samband med grova stålörspålar behandlas närmare i kapitel 3, "Konstruktion".

2.6 *Kontroll*

För att uppnå förutsatt utförandekvalitet skall redan på projekteringsstadiet fastställas vilka kontrollinsatser som kommer att krävas. Åtgärdena är i allmänhet till vissa delar specificerade i gällande normer. Därutöver kan kontrollåtgärder beroende på speciella förhållanden vid det enskilda projektet krävas, s k tilläggskontroll. Som exempel kan nämnas kompletterande geotekniska undersökningar där man väntar sig att grundförhållandena varierar kraftigt.

Kontrollåtgärdena kan i huvudsak indelas enligt följande:

- *leveranskontroll*
- *utförandekontroll före slagning*
- *dito under slagning*
- *dito efter slagning*
- *kontroll under driftförhållanden*

De olika kontrollinsatserna behandlas detaljerat i kapitel 5. Det bör framhållas att de anvisningar för konstruktionsutformning som redovisas i följande kapitel förutsätter motsvarande kontrollinsatser. Exempelvis kan krävas att svetsfogar för pårören skall kunna kontrolleras och inspekteras efter nedslagningen. En sådan kontrollåtgärd är givetvis nödvändig att beakta redan vid projekteringen.

2.7 *Kvalitetssäkring*

I många projekt föreskrivs att ett kvalitetssäkringsprogram skall följas i de olika utförandefaserna. Vissa beställare sätter som villkor att entreprenören skall kunna uppvisa ett godkänt sådant program för att han skall anses kvalificerad och komma ifråga som entreprenör.

3. Konstruktion

3.1 Lasteffekt

För laster och lasteffekter gäller i allmänhet föreskrifter utgivna av ansvariga myndigheter, exempelvis Vägverket, Banverket eller Boverket. Därutöver kan projektspecifika krav anges.

3.1.1 Dimensionerande lasteffekt

Med lasteffekt avses en observerad eller beräknad inverkan av laster. Effekten kan exempelvis vara en kraft eller ett moment som angriper en stålrörspåle. En dimensionerande lasteffekt bestäms med utgångspunkt från dimensioneringsvärden för laster.

De nämnda föreskrifterna innehåller **karakteristiska värden** för laster. Vid beräkning av **dimensionerande** lasteffekt kombineras lasterna multiplicerade med lastmultiplikatorer i form av partialkoefficienter och reduktionsfaktorer.

Storleken av en lastmultiplikator beror bl a av gränstillstånd och lastens läge och varaktighet:

- GRÄNSTILLSTÅND:

- brottgränstillstånd
- bruksgränstillstånd
- olyckslast
- brand eller fortskridande ras

Beträffande lasters fördelning i rum och tid sker följande indelning;

- | | |
|---------------------------------|-------------------------------|
| - LASTENS LÄGE I RUMMET: | - LASTENS VARAKTIGHET: |
| - bunden | - permanent |
| - fri | - variabel |

Beroende på hur snabbt en last varierar i tiden benämns lasten **statisk** respektive **dynamisk**. Variabla laster som upprepas så många gånger att utmattningsbrott kan uppkomma benämns **utmattningslaster**.

3.1.2 Aktuella lasteffekter för grova stålrörspålar

Den resulterande lasteffekt som påverkar en enskild grov stålrörspåle beror bl a av pålens styvhet och samverkan med överbyggnaden. Till skillnad från konventionella slagna betongpålar kan grova stålrörspålar ta upp mycket stora sidokrafter och böjmoment. Detta motiverar en mer generell beskrivning av de laster som angriper pålarna.

Den yttre lasteffekt som påverkar grova stålrörspålar kan redovisas som en lastvektor $F_d = [f_1, f_2, \dots, f_6]$ som innehåller de dimensionerande lasteffektkomponenterna för

- enskild påle (FIG. 1a) eller för
- pålgrupp i vilken ingår flera pålar (FIG. 1b).

Koordinatsystemet väljs vanligen så att z-axeln vid enskild påle sammanfaller med pålaxeln respektive vid pålgrupp med tyngdkraftens riktning. Lastvektorns komponenter beskrivs nedan. Moment förutsätts vanligen högervridande.

komponent

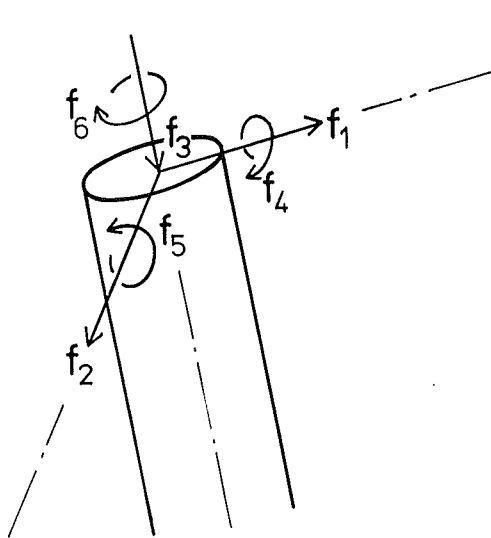
exempel vid vertikal z-axel

f_1 = kraft i x-led
 f_2 = kraft i y-led
 f_3 = kraft i z-led

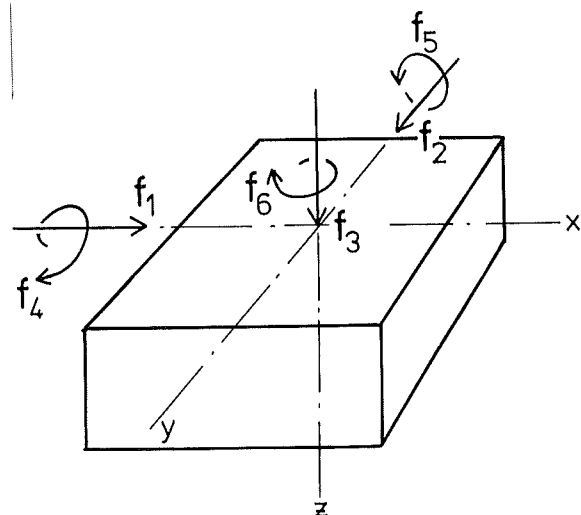
x-horisontallast
 y-horisontallast
 vertikallast

f_4 = moment kring x-axeln
 f_5 = moment kring y-axeln
 f_6 = moment kring z-axeln

x-böjmoment
 y-böjmoment
 vridmoment



Figur 1a. Lasteffekt för enskild påle.



Figur 1b. Lasteffekt för pålgrupp.

För att dimensionering av grova stålrörspålar skall kunna genomföras enligt denna anvisning erfordras, utöver lastkomponenter enligt FIG. 1, även kännedom om följande faktorer;

- säkerhetsklass
- gränstillstånd
- varaktighet

Dessutom skall anges vilka translationer och rotationer som godtas.

3.1.3 Påtvingad rörelse

I vissa fall kan överbyggnadens påverkan uttryckas i translationer och rotationer som påförs en enskild grov stålrörspåle eller en grupp av sådana pålar. Lasttvektorn F_d motsvaras då av en rörelsevektor X_d vars komponenters translations- och rotationsriktningar överensstämmer med motsvarande storheter för F_d .

3.2 Dimensionerande bärförmåga

Vid beräkning av en grov stålrörspåles bärförmåga måste man dels beräkna **lastkapaciteten**, dels den **geotekniska bärförmågan**. Pålens **dimensionerande bärförmåga** utgörs av det minsta av dessa värden. Värdet skall normalt verifieras genom provning.

Lastkapaciteten avser den i jorden installerade pålens bärförmåga med avseende på brott i pålmaterialet. **Geoteknisk bärförmåga** är bärförmåga med avseende på brott i jorden omkring och under pålen eller berg under pålspetsen. I vissa fall beror den dimensionerande bärförmågan av samverkan mellan pålmateriäl och jord, exempelvis knäckning. I sådana fall brukar man använda beteckningen lastkapacitet för motsvarande värde på pålens dimensionerande bärförmåga.

Ett annat kriterium för dimensionering av en grov stålrörspåle kan vara krav på begränsning av **rörelser** i något av gränstillstånden. Man måste i så fall undersöka pålarnas last-rörelsebeteende för respektive tillstånd.

Om pålarnas beräknade rörelser är tillräckligt små, exempelvis vid måttligt långa grova stålrörspålar nedförda till berg, motsvarar i allmänhet den dimensionerande bärförmågan lastkapaciteten.

Partialkoefficienter enligt gällande föreskrifter skall tillämpas vid beräkningarna.

3.3 Lastkapacitet

Lastkapaciteten bestäms av en mängd olika faktorer, vilkas inverkan varierar från fall till fall. Följande faktorer är av betydelse:

1. Materialhållfasthet
2. Utmattning
3. Egenspanningar
4. Initialkrokighet
5. Buckling
6. Knäckning

Denna rapport behandlar slagna stålrörspålar med minst 0,3 m diameter. Pålarna kan i det slutliga utförandet vara ofyllda eller fyllda. Följande utföranden behandlas här:

- ofyllt stålrör
- stålrör fyllt med betong, armerad eller oarmerad. Stålröret antas medverka i lastupptagandet. Hänsyn skall tas till avrostning
- dito, men stålröret antas inte medverka i lastupptagandet

De olika tvärsnittstyperna skiljer sig åt framförallt beträffande lastkapaciteten. Även den geotekniska bärförmågan påverkas av vilket tvärsnitt som är aktuellt, beroende på att pålens styvhet i hög grad påverkas av betongfyllning.

Denna rapport behandlar i första hand ofyllda grova stålrörspålar samt pålar med samverkande stålrör och betongkärna. Pålar där stålröret antas helt bortrostat kan hänföras till betongpålar och beräknas i enlighet därmed.

För dimensionering enligt denna rapport har i tillämpliga delar använts BSK (Bestämmelser för Stålkonstruktioner, 1987), BBK-79 (Bestämmelser för Betongkonstruktioner 1979, utgåva 2 1988) samt BYGG, huvuddel Konstruktionsteknik, kapitel K18, stålkonstruktioner. De krav som i allmänhet gäller för dimensionering av grova stålrörspålar blir därigenom tillgodosedda.

3.3.1 Maximal lastkapacitet

Ofyllt stålrör

Den maximala lastkapaciteten N_{dmax} för en ofyllt grov stålrörspåle med enbart normalkraft, utan knäckningsrisk, beräknas med förutsättningar enligt BSK enligt ekv (1);

$$N_{dmax} = A_{gr} f_{yd} \quad (1)$$

där

$$A_{gr} \quad \text{dimensionerade pådels nettoarea}$$

$$f_{yd} = f_{yk} / (\gamma_n \gamma_m) \quad \text{dimensionerande hållfasthet}$$

f_{yk}	karakteristisk hållfasthet, BSK 2:311
$\gamma_n = 1,0 - 1,2$	partialkoefficient enligt TABELL 1
$\gamma_m = 1,0 - 1,1$	partialkoefficient, BSK 2:313

Tabell 1. Partialkoefficient γ_n vid olika säkerhetsklasser.

Säkerhetsklass	γ_n
1	1,0
2	1,1
3	1,2

Vid dimensionering för olyckslast, för brand samt för fortskridande ras sätts $f_{yd} = f_{yk}$. TABELL 2 anger värden för karakteristisk hållfasthet för några stålsorter som är lämpliga för användning som grova stålrörspålar.

Tabell 2. Karakteristisk hållfasthet f_{yk} för olika stålsorter (äldre beteckningar för kvalitetsklass använda).

Kvalitetsklass			Godstjocklek (mm)	f_{yk} (MPa)
A	B	D		
1311	1312		-40	220
	1412	1414	-40	260
	2172	2174	-16	310
			16-40	300
	2132	2134	-16	350
			16-35	340

Stålrörspålar med bärande betongkärna

I de flesta fall kan man, som nämnts, emellertid inte utnyttja den maximala lastkapaciteten enligt ekv (1). Olika reducerande faktorer medför att den dimensionerande lastkapaciteten blir lägre. Orsakerna till dessa reduktioner är:

- utmattning (vid slagning)
- egenspanningar
- initialkrokighet, buckling och lastexcentricitet
- initialbucklor
- knäckning
- skarvar

Nedan redogörs med hänvisningar till BSK och BBK-79 för inverkan av dessa olika reducerande faktorer. Det bör framhållas att initiella avvikelser i mått och form avser förhållandena för den **installerade** pålen. Exempelvis kan initialkrokighet, i meningen krökning uppkommen före funktionsskedet, bero på utböjning orsakad av betongfyllning i det neddrivna, stoppslagna stålröret.

3.3.2 Utmattning

Dimensioneringsvärdet för utmattningshållfastheten (f_{rd}) beräknas enligt uttrycket 2.32 i BSK;

$$f_{rd} = f_{rk} / (1,1\gamma_n) \quad (\text{BSK 2.32})$$

där

f_{rk} = karakteristisk utmattningshållfasthet

γ_n = partialkoefficient som beror av säkerhetsklassen

Den karakteristiska utmattningshållfastheten f_{rk} beräknas enligt BSK 6:5. Förbandsklassen **C** sätts till värdet 45. Detta värde motsvarar värdet hos f_{rk} i MPa vid $2 \cdot 10^6$ spänningscykler med **konstant** spänningsvidd. Inverkan av **varierande** spänningsvidder beaktas genom val av kollektivparameter κ enligt BSK 6:524.

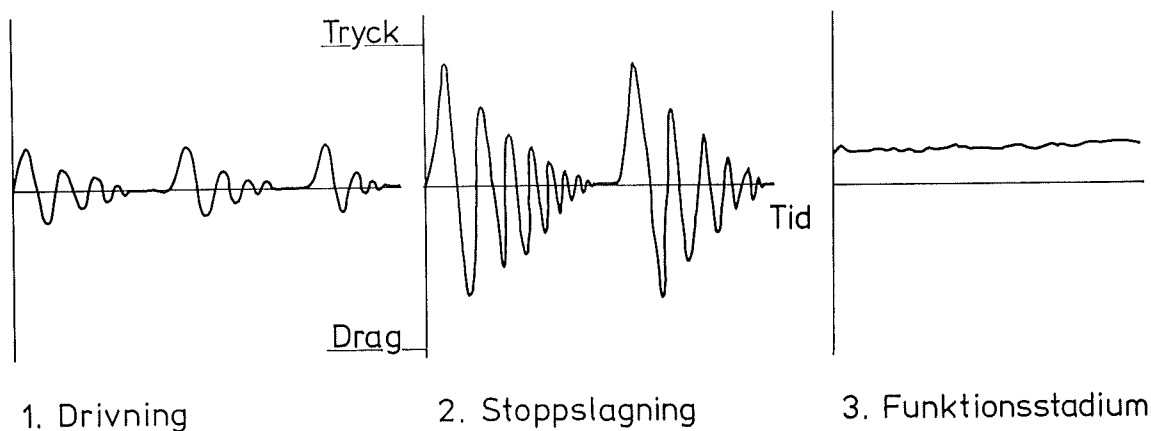
Dimensioneringsvillkoret är att den utmattande lasteffektens spänningsvidd σ_{rd} inte överstiger f_{rd} . Vid färre antal lastväxlingar än 1 000, eller mindre spänningsvidd än 26 MPa, behöver inverkan av utmattning inte undersökas, se BSK 6:5.

För grova stålrörspålar är utmattande last aktuell i samband med drivning och därefter genom inverkan av upprepade på- och avlastning, exempelvis orsakad av trafik. Långvarig, hård drivning kan därför, enskilt eller tillsammans med växlande belastning i funktionsstadiet, avgöra värdet på stålrörspålens lastkapacitet. Det bör observeras att stötvågen i pålen (= partikelrörelse i pålmaterialet) från ett hejarslag reflekteras vid påländarna ett flertal gånger, vilket ökar den utmattande lasteffekten.

De olika förhållanden som är aktuella illustreras i FIG. 2. Vid drivningen utsätts pålröret för ett antal lastväxlingar vars storlek beror av pållängd och drivningsmotstånd. Vid verifieringen av pålens bärförmåga (stoppslagning, ofta med stötvågsmätning) påförs ett mindre antal slag med en stor amplitud. Under funktionsskedet är sedan antalet lastväxlingar normalt mycket stort samtidigt som spänningsvidden är relativt liten. Orsaken till detta är att den permanenta andelen av lasteffekten (vanligen egentygnd) brukar vara betydligt större än den variabla.

Mätningar visar att stötpulsen från ett hejarslag reflekteras ett flertal gånger mot påländarna innan den klingat av. För driftförhållanden föreskrivs det antal lastväxlingar som skall förutsättas, för broar vanligen av storleksordningen ca 10^6 .

Beräkning av kollektivparametern κ redovisas i detalj i SBN avd 2A, Bärande konstruktioner, PFS 1979:7, avsnitt :5214. Med förhållanden som är aktuella vid tomma stålrörspålar och hård, långvarig drivning, kraftig stoppslagning samt förhållandevis stor andel variabel lasteffekt, finner man att värdet på κ i extrema fall kan uppgå till ca 0,3 à 0,4. Detta innebär en kraftig reduktion av den nominella hållfastheten.



Figur 2. Utmattande lasteffekter för grova stålrörspålar.

Inverkan av utmattande lasteffekter är således viktiga att undersöka i de fall bärande stålrör förutsätts. Vid utförandet av drivningen måste sedan kontrolleras att beräkningsförutsättningarna uppfyllts, d v s att oförutsatt hård drivning eller stoppslagning inte förekommer.

3.3.3 Egenspänningar

Egenspänningarnas inverkan på styvheten och bärförmågan i **brottgränstillstånd** skall enligt BSK 2:35 beaktas. För spiralsvetsade stålrörspålar kan detta krav enligt BSK anses tillgodosett genom att böjstyvheten minskas 10 % (till 0,9 EI) jämfört med nominellt värde och att en fiktiv initialutböjning lika med $L_c/400$ förutsätts, BYGG K18:56. Detta innebär att röret antas motsvara tvärsnittstyp c enligt BSK, 6:223. Den fiktiva initialutböjningen skall vid beräkningar i brottgränstillstånd adderas till efter neddrivningen uppmätta initialutböjningar. L_c betecknar pålens knäckningslängd beräknad på det sätt som redovisas senare i denna rapport.

I **bruksgränstillstånd** försummas inverkan av egenspänningar, BSK 2:35.

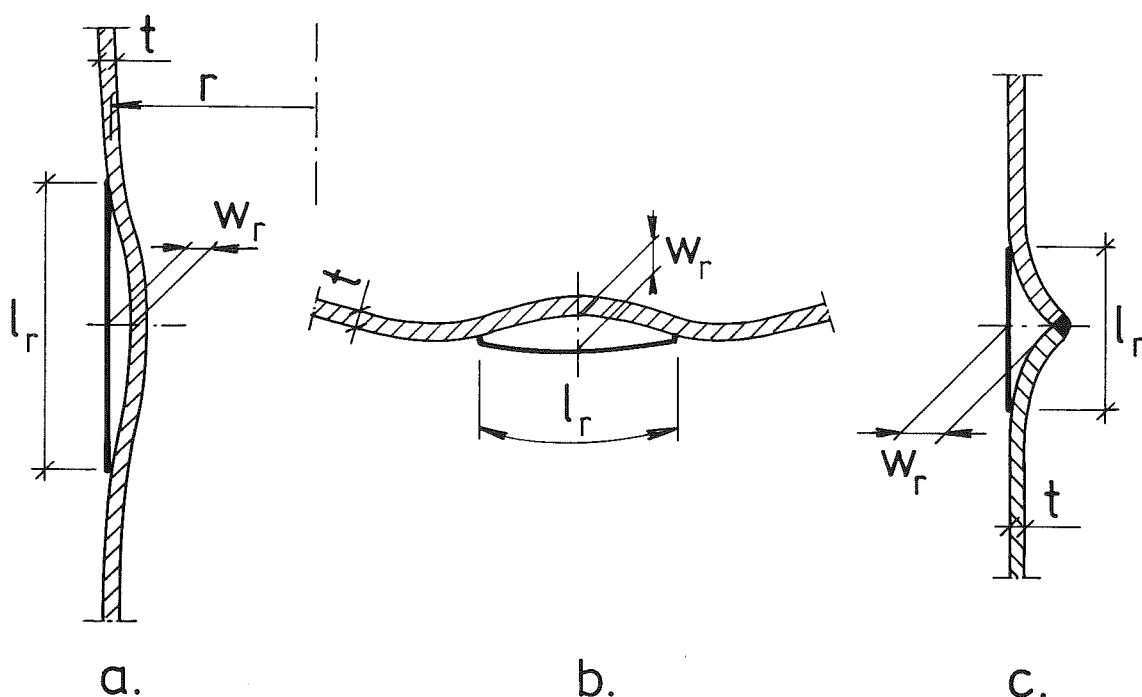
3.3.4 Avvikelser i mått och form (bucklor m m)

Om stålrör förutsätts ensamt bärande skall förekomst av initialbucklor verifieras. Amplituden w_r hos bucklor kan anges på olika sätt, se FIG. 3.

Längden L_r hos linjal och mall enligt a) och b) skall uppfylla villkoret

$$L_r = 4\sqrt{rt} \quad (2)$$

dock inte längre än 95 % av avståndet mellan svetsar. I ekv. 2 betecknar r rörradien och t godstjockleken.



- a) med rak linjal som placeras i pålens längdriktning mellan svetsfogar
- b) med cirkulär mall
- c) med $25t$ lång linjal placerad tvärs svetsar (t = godstjockleken)

Figur 3. Mätning av initialbucklor hos pålrör (enligt Bygg K18:87).

För att förutsättningarna för i Handboken Bygg, kapitel K18, redovisad beräkningsmetod avseende buckling skall vara uppfyllda för kallformade och spiralsvetsade rör, skall den maximala amplituden hos initialbucklor mätt på ovan angivna sätt understiga värdet $L_r/50$.

Mätningen av de initiella bucklorna skall ske på stålrör där drivningen är avslutad.

3.3.5 Buckling, ofyllda rörpålar

Tvärsnittklass 1 och 2

Tvärsnitt indelas med avseende på tvärsnittsdelarnas slankhet i tre klasser enligt BSK 6:211. Tvärsnittsklass 3 innebär, till skillnad från klass 1 och 2, att lokal buckling inträffar för en spänning som är mindre än den karakteristiska hållfastheten.

Det förutsätts att initialkrokigheten är högst $0,0015L$, varvid L avser knäckningslängden. Vid större pilhöjd utförs dimensioneringen enligt reglerna i BSK 6:25 för en böjd och tryckt stång, varvid böjmomentet är lika med tryckkraftens dimensioneringslast multiplicerad med skillnaden mellan den större pilhöjden (som utgör summan av geometrisk initialkrokighet och fiktiv initialkrokighet motsvarande egenspanningar) och värdet $0,0015L$. Är pålen momentbelastad utförs dimensioneringen på motsvarande sätt.

Tvårsnittklass 3

En tom stålörörspåle med bärande stålörör hänförs till tvårsnittklass 3, om villkoret enligt BSK 6:21 uppfylls;

$$r > 0,05E_{sk}t / f_{yk} \quad (\text{BSK 6:21})$$

där

r = pålens medelradie

t = godstjocklek

E_{sk} = karakteristiskt värde för elasticitetsmodulen

f_{yk} = karakteristiskt värde för hållfastheten

För exempelvis stål SS 2174 innebär detta att stålörörspålar med en diameter större än ca 70t är att hänföra till tvårsnittklass 3. Sådana tunnväggiga ör utgör ur konstruktiv synpunkt **skal**. Beräkning kan ske enligt Bygg K18:83, där i detalj redogörs för beräkning av tryckkraftskapaciteten för ett sådant tunnväggigt ör. Även i det fall pålen är belastad av moment, enskilt eller samtidigt med normalkraft, kan beräkning ske enligt Bygg K18:83b respektive K18:83c.

3.3.6 Initialkrokighet och lastexcentricitet vid ändar

Ofyllt ör

Initialkrokigheten förutsätts, om inte annat påvisas riktigare, vara sinus- eller parabelformad med den pilhöjd som mäts upp i pålörret sedan drivningen avslutats. Mätsträckan skall vara L_c , som utgör avståndet mellan två närliggande inflexionspunkter i pålens knäckfigur. Mindre värde än $L_c/666$ för initialkrokigheten får ej förutsättas för bärande stålör, BSK 2:411. I detta antagande anses ingå hänsyn till icke avsedd lastexcentricitet. Beräkning av L_c redogörs för i ett senare avsnitt i denna rapport.

Till dessa geometriska värden på initialkrokigheten skall adderas den fiktiva initialkrokighet som motsvarar antagna egenspanningar. Detta gäller även excentriciteten avseende bergdubbens spets, som brukar antas motsvara ca 25 % av bergdubbens diameter.

Rör med bärande betongärna

För påltvårsnitt med bärande betongarea skall initialkrokigheten förutsättas utgöra det största av värdena 20 mm eller pålens sidmått / 30, enligt BBK-79, 3.4.2.3. Initialkrokigheten skall dock antas vara minst $L_c/300$. Vid betongfyllningen kan stor initialutböjning uppkomma för lutande pålar, särskilt pålar som står fritt eller är omgivna av mycket lös jord.

Till de geometriska värdena på initialkrokigheten skall adderas den fiktiva initialkrokighet som motsvarar antagna egenspanningar vid förutsatt samverkan mellan stålör och betong.

3.3.7 Knäckning

Elasticitetsmodul, skjuvmodul och tvärkontraktionstal

Enligt BSK 2:33 skall för stålmaterialet, om inte andra värden påvisas riktigare, de karakteristiska värdena väljas enligt följande:

$$\begin{array}{ll} E_{sk}=210 \text{ GPa} & \text{elasticitetsmodul} \\ G_{sk}=81 \text{ GPa} & \text{skjuvmodul} \end{array}$$

Som dimensioneringsvärden i **brottgränstillstånd** gäller enligt BSK;

$$\begin{array}{ll} E_{sd}=E_{sk}/(1,0\gamma_n) & \gamma_n \text{ beror av säkerhetsklassen, se tabell 1} \\ G_{sd}=G_{sk}/(1,0\gamma_n) & \end{array}$$

I **bruksgränstillstånd** gäller normalt $E_{sd} = E_{sk}$ och $G_{sd} = G_{sk}$. Tvärkontraktionstalet sätts i båda gränstillstånden till värdet 0,3.

För betongfyllda pålar sätts elasticitetsmodul, skjuvmodul och tvärkontraktionstal till de värden som anges i BBK-79, avsnitt 2.3.4. Värdena beror av gränstillstånd, säkerhetsklass och betongens hållfasthetsklass.

Böjstyvhet

Uppgift om en grov stålrörspåles böjstyvhet, EI , krävs bl a för beräkningar för knäckning och böjning. E betecknar elasticitetsmodul och I tröghetsmomentet med avseende på utböjningsriktningen.

■ BROTTGRÄNSTILLSTÅND

$$\text{Stålröret; } EI=0,9E_{sk}I_s/(1,1\gamma_n) \quad I_s = \text{stålrörets tröghetsmoment}$$

$$\text{Betongen; } EI=0,8E_{ck}I_c/[1,2\gamma_n(1+\phi_e)] \quad I_c = \text{betongens tröghetsmoment}$$

Reduktionen med värdet 0,9 vid beräkning av böjstyvhet för stålröret avser inverkan av egenspanningar i stålröret.

Detta förutsätter att betongen är **osprucken**. Medeltryckpåkänningen i betongen skall vara mindre än $0,6 f_{cc}$, där f_{cc} betecknar dimensioneringsvärdet för betongens tryckhållfasthet, enligt BBK-79, 2.3.1. Det effektiva kryptalet ϕ_e beräknas enligt BBK-79, 2.3.7. Värdet beror på relativ fuktighet kring pålen, tidpunkten då pålen belastas samt lastens varaktighet.

För **sprucken** armerad betong beräknas böjstyvheten enligt BBK 3.4.2.2.

■ BRUKSGRÄNSTILLSTÅND

För stålröret används $E_{sd} = E_{sk}$ och nominellt värde för tröghetsmomentet, om inte annat påvisas riktigare.

För betongen antas $E_{cd} = E_{ck}$, där E_{ck} beror av betongens hållfasthetsklass enligt BBK-79, 2.3.4. Nominellt värde för tröghetsmomentet antas.

Betongens krypning får enligt BBK-79, 4.3 beaktas genom användning av en fiktiv elasticitetsmodul med dimensioneringsvärdet

$$E_{ef} = E_{ck} / (1 + \varphi_e) \quad (\text{BBK 4.3})$$

Betongen får i bruksgränstillstånd, enligt BBK-79, 4.5.3, vid böjning endast antas upptaga dragpåkänningar om den kan förutsättas osprucken.

Vid beräkning av armeringspåkänningar får förhållandet mellan armeringens och betongens elasticitetsmoduler antas vara lika med värdet 15. Då anses hänsyn tagen till inverkan av krypning och krympning på fördelning av påkänningarna, så som anges i BBK-79 4.3.

Samverkan mellan stålrör och betong

Där samtidigt bärande betong och stål antas, måste varje påltvärsnitts funktion med avseende på **samverkan** mellan betong och stål beaktas. Detta är särskilt viktigt vid pålens infästning i plinten och pålavsnitt där stålröret skall förutsättas övergå från bortrostat till existerande tillstånd.

Vid betongfyllda grova stålrörspålar antas pålens resulterande böjstyvhets motsvara summan av stålrörets och betongens böjstyvheter. Samma förhållande antages gälla pålens axiella styvhets, $d v s$ resulterande axialstyvhets utgörs av summan av produkterna av respektive tvärsnittsdelars areor och E-moduler. Detta kräver givetvis att lasteffekten från överbyggnaden påverkar pålen på ett sådant sätt att betong och stål erhåller lika stor sammantryckning.

Det karakteristiska värdet för vidhäftningen mellan stålrör och betong får enligt ett förslag till EC-norm maximalt uppgå till 0,4 MPa. En förutsättning är då att lastöverföringen mellan betong och omgivande stålrör inte kräver större längd än $2D_i$, där D_i = pålens innerdiameter. Vidhäftningen mellan stålrör och betong kan ökas genom att stålröret invändigt förses med kammar, eller liknande anordningar, i erforderlig omfattning. Det skall då även påvisas att de lokala spänningarna kring de vidhäftningsökande anordningarna inte blir för stora.

Vid konstruktioner som förutsätter samverkan mellan stål och betong får enligt BBK-79 armeringens elasticitetsmodul sättas till samma karakteristiska värde som det som gäller för konstruktionsstålet.

Förhållandet mellan stålrörets och betongens E-moduler sätts ofta till värdet 15. Detta gäller såväl brott- som bruksgränstillstånd. Detta innebär att tryckspänningen i betongen är 1/15 av tryckspänningen i stålröret, i de delar av ett tvärsnittet där kompressionen är lika stor i betong och stål. Om en noggrannare beräkning av fördelningen mellan spänningarna i stål respektive betong krävs beräknas förhållandet n ur uttrycket

$$n = \frac{E_{\text{stål}}}{E_{\text{betong}}} = \frac{E_{\text{sk}}}{E_{\text{ef}}}$$

med beteckningar enligt ovan

Den beräknade **kantspänningen** i betongen får inte överstiga värdet $0,6f_{\text{ck}}$. **Medeltryckpåkänningen** får inte överstiga värdet $0,6f_{\text{cc}}$. Dessa värden kan anses vara på säkra säkra sidan. Försök med tryckning av betongfyllda stålörsegment har nämligen visat att sådana tvärsnitt ger väsentligt högre hållfasthet för betongen än betongcylindersegment utan sådan inneslutning. Stålmanteln minskar betongens sidoutvidgning.

Jordens och pålens bäddmodul

Kännedom om den omgivande jordens bäddmodul krävs bl a för beräkning av en påls knäcklast samt uppkommande böjmoment, tvärkrafter och rörelser vid horisontalbelastning.

Jordens bäddmodul betecknas k [kraft/längd³]. Den definieras enligt uttrycket

$$p = ky \quad (3)$$

där p = normalspänning mellan pålyta och omgivande jord
 y = motsvarande rörelse

Pålens bäddmodul betecknas k_d [kraft/längd²]. Den kan approximativt beräknas enligt uttrycket

$$k_d = kD \quad (4)$$

där D = pålens ytterdiameter

■ PÅLENS BÄDDMODUL I KOHESIONSJORD

$$\text{Korttidsförhållanden } k_d = 200c_u \quad (\text{för } t = 0) \quad (5a)$$

$$\text{Långtidsförhållanden } k_d = 50c_u \quad (\text{för } t \geq 2D^2/c_h) \quad (5b)$$

där t = tid
 c_h = horisontell konsolideringskoefficient
 c_u = odränerad skjuvhållfasthet

Med k och c_u avses karakteristiska värden. Den odränerade skjuvhållfastheten förutsätts reducerad m h t jordmaterialets flytgräns w_L enligt uttrycket

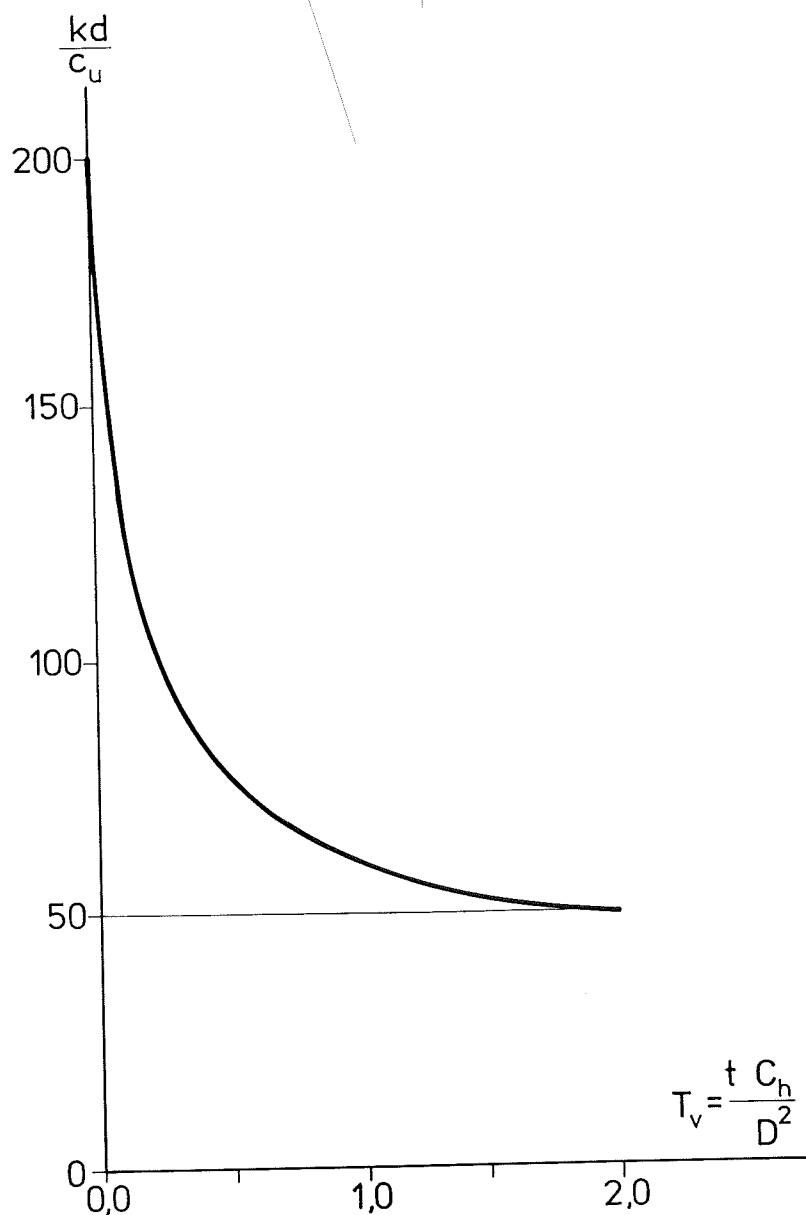
$$c_{u,\text{reducerad}} / c_{u,\text{oreducerad}} = (0,43/w_L)^{0,45} \quad (6)$$

Värden för c_u , c_h och w_L skall vara representativa för en sträcka som motsvarar pålens knäckningslängd L_c i marken. Om inte annat påvisas riktigare kan värdet för c_h sättas lika med $2c_v$. De på så sätt valda värdena på geoparametrarna betraktas som karakteristiska värden. Beräkning av L_c redovisas i ett senare avsnitt i denna rapport.

Kohesionsmaterialet förutsätts vara normalkonsoliderat. För kraftigt överkonsoliderad jord kan bäddmodulvärdena vara större än för motsvarande jordmaterial i normalkonsoliderat tillstånd.

För tidpunkter mellan korttids- respektive långtidsförhållanden, kan pålens bäddmodul utläsas ur FIG. 4. Det har antagits att ensidig horisontell dränering av jorden vid sidan av pålen sker till ett avstånd lika med en påldiameter från pålytan.

För normalkonsoliderade kohesionsmaterial kan för överslagsberäkningar de värden tillämpas som redovisas i TABELL 3. För slutlig konstruktion skall dock alltid geoparametrarna utvärderas från en geoundersökning, som omfattat provtagning och laboratorieundersökning av kohesionsjordens egenskaper.



Figur 4. Pålens bäddmodul k_d i kohesionsmaterial som funktion av den odränerade skjuvhållfastheten C_u vid olika tidpunkter efter pålastningen.

Tabell 3. Typiska värden c_u , w_L och c_h för normalkonsoliderad lera.

Parameter		lös	halvfast	fast
c_u	[kPa]	12,5 - 25	25 - 50	50 - 100
w_L	[%]	150 - 60	70 - 50	60 - 40
c_h	[m ² /år]	0,5 - 1	1 - 3	2 - 5

■ PÅLENS BÄDDMODUL I FRIKTIONSJORD

I friktionsjord brukar förutsättas att jordens bäddmodul ökar linjärt mot djupet från värdet noll vid markytan. Om tillväxtfaktorn benämns n_h , erhålles pålens bäddmodul k_d ur uttrycket

$$k_d = n_h \cdot z \quad (7)$$

där n_h = bäddmodultillväxtfaktor
 z = djup under markytan

Från resultat som erhållits från mätningar på horisontalbelastade pålar i *sand* har följande värden för tillväxtfaktorn föreslagits [37];

Tabell 4. Bäddmodultillväxtfaktorn n_h , MN/m³, sand [37].

Läge	Relativ fasthet		
	låg	medelhög	hög
över grundvattenytan	2,5	7,0	18,0
under grundvattenytan	1,5	4,5	11,0

Värdena i TABELL 4 avser karakteristiska värden. De horisontalrörelser för vilka utvärderingen skedde (s k Wincklerunderlag förutsattes) var relativt stora (några cm). Vid mindre rörelser var motsvarande värden för n_h större. Tabellvärdena avser sand. För silt blir värdena lägre än de som anges i tabellen. Vid grus kan större värden beräknas gälla.

Låg relativ fasthet avser viktsonderingsmotstånd minst 10 hv/20 cm. Med medelhög fasthet avses viktsonderingsmotstånd större än 20 hv/20 cm. Hög relativ fasthet motsvarar mer än 40 hv/20 cm viksondmotstånd. Samband mellan sonderingsmotstånd för olika sonderingsmetoder redovisas i SGI Rapport 20 [3].

Bäddmodulen växer inte obegränsat mot djupet. På tillräckligt stort djup nås ett värde som inte ökar ytterligare. Resultat på osäkra sidan kan därför erhållas om man förutsätter en obegränsat ökande bäddmodul. Större värden än de som anges i TABELL 5 bör inte förutsättas.

Värdena i TABELL 5 avser karakteristiska värden för jordmaterial över grundvattenytan. I de fall annan lagringstäthet råder eller jordmaterialet är beläget under grundvattenytan kan proportionering med utgångspunkt från TABELL 4 ske, i de fall inte andra värden föreligger.

Tabell 5. Övre gränsvärden för bäddmodul för pålar, friktionsjord.

Jordart	Relativ fasthet	Bäddmodul, k_d , MPa
Grus	hög	40
	låg	10
Sand	hög	20
	låg	5
Silt	hög	10
	låg	2

Det bör framhållas att samband mellan spänningar och rörelser i jord i verkligheten är markant olinjära. De redovisade bäddmodulvärdena motsvarar rörelser av storleken någon cm. Beroende på olinjäriteten kan vid små rörelser därför den relevanta bäddmodulen vara betydligt större än vad TABELL 4 och 5 anger.

Många gånger finner man att beräkningsresultatet är relativt okänsligt för variationer i både antagna bäddmodulers storlek och fördelning. Orsaker till detta berörs i samband med beräkning av knäckningslängden L_c .

Gränstryck mellan påle och jord

■ KOHESIONSJORD

När en påle sidoförskjuts ökar normaltrycket mellan pålyta och jord. Vid tillräckligt stor rörelse sker brott i jorden och ytterligare ökning av normaltrycket kan ej uppnås. För kohesionsjord antas gränstrycket σ_h uppgå till värdet

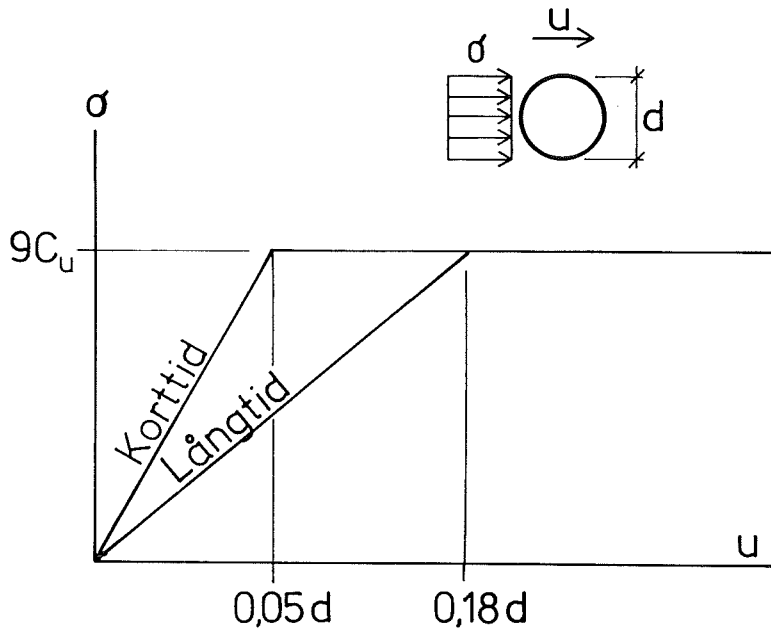
$$\sigma_h = 9 c_u \quad (8)$$

där c_u betecknar odränerad skjuvhållfasthet (reducerat värde)

Motsvarande spänning/rörelseförlopp antas motsvara det som visas i FIG. 5. Normaltrycket mellan pålyta och omgivande jord antas öka linjärt i proportion till jordens bäddmodul tills gränstrycket nås. Vid större rörelse är sedan normaltrycket konstant. Med detta synsätt övervärderas rörelsen för små spänningsvärden, vilket normalt är på säkra sidan.

$$\text{gränsrörelse för kortidsförhållanden} = (9c_u / 200c_u)D = 0,045D \quad (9a)$$

$$\text{gränsrörelse för långtidsförhållanden} = (9c_u / 50c_u)D = 0,18D \quad (9b)$$



Figur 5. Antaget samband mellan sidotryck och sidorörelse för påle i kohesionsmaterial.

■ FRIKTIONSJORD

Vid friktionsjord kan gränstrycket vid sidorörelse beräknas uppgå till

$$\sigma_h = 3\sigma_{\text{veff}} K_{pk} \quad (10)$$

där

σ_{veff} = det vertikala effektivtrycket på aktuell nivå

K_{pk} = den passiva jordtryckskoefficienten, karakteristiskt värde

Den passiva jordtryckskoefficienten är en funktion av jordens inre friktionsvinkel $\varnothing$ (karakteristiskt värde). Om friktionen mellan pålen och jorden försummas erhålls

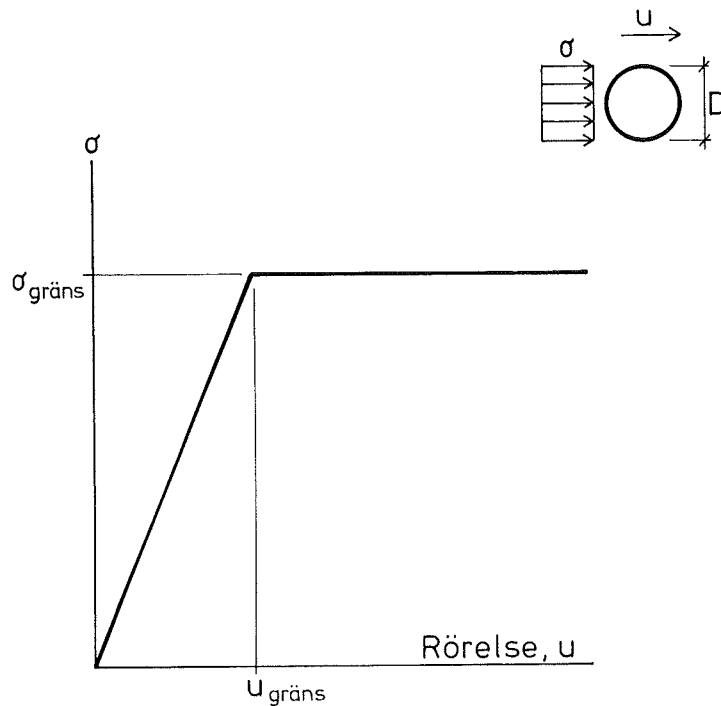
$$K_{pk} = (1 + \sin \varnothing) / (1 - \sin \varnothing) \quad (11)$$

Gränsrörelsens storlek u_g (karakteristiskt värde) kan beräknas ur uttrycket

$$u_g = (\sigma_h / kd_k) D \quad (12)$$

där kd_k = pålens bäddmodul på aktuell nivå

Som nämnts antas för friktionsmaterial samma bäddmodul för både lång- och korttid-förhållanden, vilket medför att samma gränsrörelse erhålls i båda fallen, se FIG. 6. Större gränstryck än 5 MPa bör inte förutsättas kunna mobiliseras, utan närmare utredning.



Figur 6. Antaget samband mellan sidotryck och sidorörelse för påle i friktionsmaterial.

Dimensionerande värde för bäddmodul. Partialkoefficienter

Det värde på pålens bäddmodul (kd_k) som erhålls enligt föregående avsnitt utgör ett **karakteristiskt värde**. För att erhålla motsvarande **dimensionerande värde** skall det karakteristiska värdet **divideras** med partialkoefficienter enligt de regler som gäller i det aktuella fallet.

När det är ogynnsamt för konstruktionen ska de karakteristiska värdena i stället **multiplieras** med partialkoefficienterna. Multiplikation med partialkoefficienter är exempelvis aktuell vid beräkning av differentiella rörelser för närbelägna pålar.

Det dimensionerande värdet för bäddmodulen erhålls ur uttrycket

$$kd_d = kd_k / (\gamma_n \gamma_m) \quad (13)$$

där

γ_n = partialkoefficient som beror av säkerhetsklassen

γ_m = dito för osäkerheten i bestämningen av geoparametern

Värdet av γ_n och γ_m beror även på vilket gränstillstånd som är aktuellt. Värden på γ_m redovisas bl a av Boverket och Vägverket.

Utöver dessa två partialkoefficienter finns ytterligare en partialkoefficient, vanligen betecknad γ_{Rd} , som avser osäkerheten i beräkningsmodellen samt andra osäkerheter som inte beaktas med annan partialkoefficient. Några förslag till val av γ_{Rd} vid olika förhållanden ges inte i denna rapport. Som exempel kan nämnas att Boverket anvisat att

man vid dimensionering baserad på provning inte bör välja γ_{Rd} lägre än 1,4 inom ett intervall mellan 1,2 till 1,8. Vid beräkning av lastkapacitet hos påle enligt Bronorm 88 förutsätts dock modellosäkerheten vara 1,0 då dimensionerande värde på bäddmodulen beräknas. Rapport 84, IVA Pålkommisionen [30] rekommenderar $\gamma_{Rd} = 1,0$ vid analys av knäckning. Förslag till val av partialkoefficienter redovisas även i handboken Pålggrundläggning [32]. De bör nämnas att γ_{Rd} inte nödvändigtvis måste vara $>1,0$.

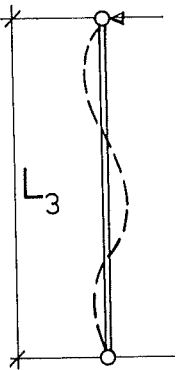
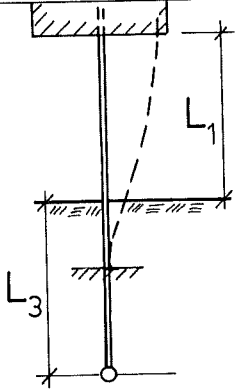
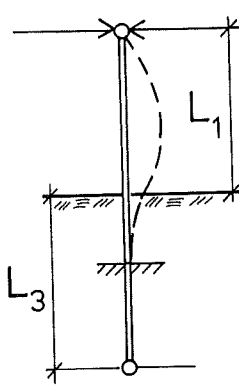
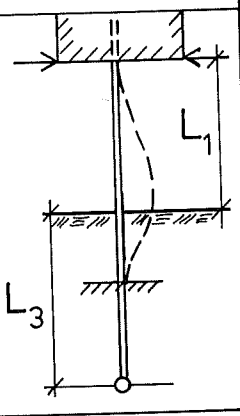
Specialfall tom stålpåle. Beräkning av reduktionsfaktor vid böjknäckning, konstant bäddmodul

För påle omgiven av jord med konstant bäddmodul beräknas pålens dimensionerande knäckningslängd L_c (Eulerknäcklängd) med uttrycket

$$L_c = L_a \beta$$

(BSK 6:232)

där L_a = ekvivalent längd som beräknas enligt FIG. 7.
 β = knäcklängdfaktor som väljs enligt FIG. 7.

	Påle helt omgiven av jord. Styrd upptill	Fast inspänd men ej styrd upptill	Ledad och styrd upptill	Fast inspänd och styrd upptill
				
L_a :	$1,57 L_E$	$L_1 + 1,1 L_E$	$L_1 + 1,0 L_E$	
β :	1,0	1,2	0,8	0,6
Villkor:	$L_3 > 4 L_E$	$L_1 > 2,5 L_E$ $L_3 > 2,5 L_E$	$L_1 > 1,4 L_E$ $L_3 > 2,5 L_E$	

Figur 7. Ekvivalent längd L_a och knäcklängdfaktor β för beräkning av böjknäckning enligt BSK. Pålen förutsätts ledad nedtill vid spetsen. Elastisk pållängd $L_e = (4E_{sk}I/kd_d)^{1/4}$.

I FIG. 7 uttrycks den ekvivalenta längden L_a som en funktion av pålens elastiska längd L_e . Denna beräknas enligt uttrycket

$$L_e = (4E_{sk}I/kd_d)^{1/4} \quad \text{för konstant bäddmodul} \quad (14a)$$

$$L_e = 1,8(E_{sk}I/n_h)^{1/5} \quad \text{för linjärt ökande bäddmodul} \quad (14b)$$

där karakteristiskt värde för pålens E-modul och dimensionerande värde för pålens bäddmodul används (stort värde på den elastiska längden är ogynnsamt). I de fall kort elastisk längd L_e är ogynnsam, används istället dimensionerande värde för pålens E-modul och karakteristiskt värde för pålens bäddmodul. Värdet n_h utgör bäddmodultillväxten.

Sedan pålens knäckningslängd L_c beräknats, beräknas slankhetsparametern λ_c enligt uttrycket

$$\lambda_c = (L_c/\pi i) \cdot (f_{yk}/E_{sk})^{0,5} \quad (\text{BSK 6:233a})$$

där i = pålens tröghetsradie = $(I/A)^{0,5}$

A = pålens area

I = pålens tröghetsmoment

L_c = knäckningslängden

f_{yk} = karakteristiskt värde på hållfastheten

E_{sk} = karakteristiskt värde på elasticitetsmodulen

Slutligen beräknas reduktionsfaktorn för knäckning ω_c enligt uttrycket

$$\omega_c = \alpha - (\alpha^2 - 4,4\lambda_c^2)^{0,5} / (2,2\lambda_c^2) \quad \text{dock } \omega_c \leq 1,0 \quad (\text{BSK 6:233b})$$

där

$$\alpha = 1 + \beta_1(\lambda_c - 0,2) + 1,1\lambda_c^2$$

$$\beta_1 = 0,49 \quad (\text{grupp c för rör, enligt tabell BSK 6:233})$$

Under förutsättning att stålrörspålen kan hänföras till tvärsnittsklass 1 eller 2 enligt BSK 6:23 utförs dimensioneringen enligt följande;

Tryckkraftskapaciteten beräknas enligt uttrycket

$$N_{Rcd} = \omega_c A_{gr} f_{yd} \quad (15)$$

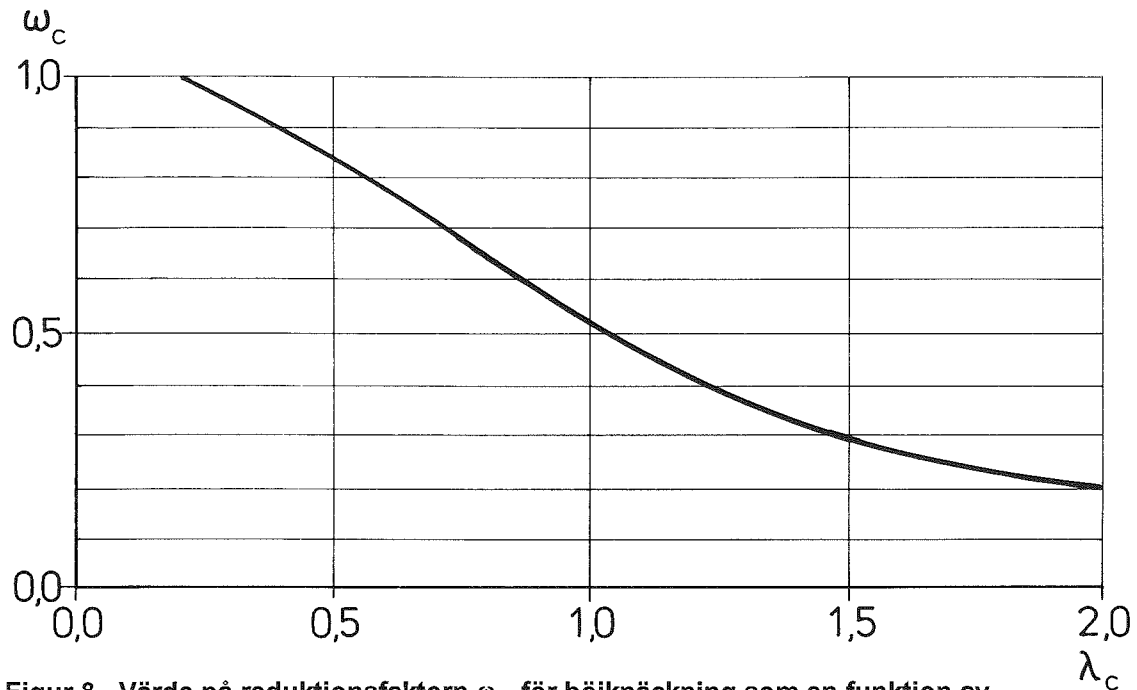
där

ω_c = reduktionsfaktor för knäckning enligt ovan

A_{gr} = den grova stålrörspålens nettoarea

f_{yd} = den grova stålrörspålens dimensionerande hållfasthet

Värdet på ω_c kan även avläsas i FIG. 8, som motsvarar fig 6:233 i BSK, kurva c. Maximal godstjocklek för grupp c är 40 mm.



Figur 8. Värde på reduktionsfaktorn ω_c för böjknäckning som en funktion av slankhetsparametern λ_c (enligt BSK 6:233).

Beräkning av initialkrökt påle belastad med vertikalkraft, horisontalkraft och moment

Där pålen samtidigt belastas med både axialkraft och moment, kan det resulterande böjmomentet M_d , med vissa förenklade förutsättningar, beräknas med uttrycket

$$M_d = (M_o + N_d \delta) / (1 - N_d / N_c) \quad (16)$$

där

N_d = normalkraft-lasteffekt

M_o = böjmoment-lasteffekt

δ = initialutböjning

N_c = knäcklast = $\pi^2 EI / L_c^2$

Det aktuella snittet kontrolleras sedan i enlighet med BSK med uttrycket

$$M_d / M_{Rd} + N_d / N_{Rd} \leq 1 \quad \text{BSK (6:251a)}$$

där

M_{Rd} = momentkapacitet

N_{Rd} = tryckkraftskapacitet

Ekv 16 förutsätter att initialutböjningen är sinusformad.

3.3.8 *Pålar med varierande styvhet och bäddmodul*

De fall som behandlats ovan utgör specialfall med konstant böjstyvhet och bäddmodul för pålen. Ofta varierar emellertid både styvhet och jordegenskaper. Dessutom brukar axialkraften variera längs pålen. Sådana förhållanden komplicerar givetvis beräkningarna. En mer generell beräkningsmetod som kan användas vid varierande förutsättningar måste då användas.

3.4 Geoteknisk bärförmåga

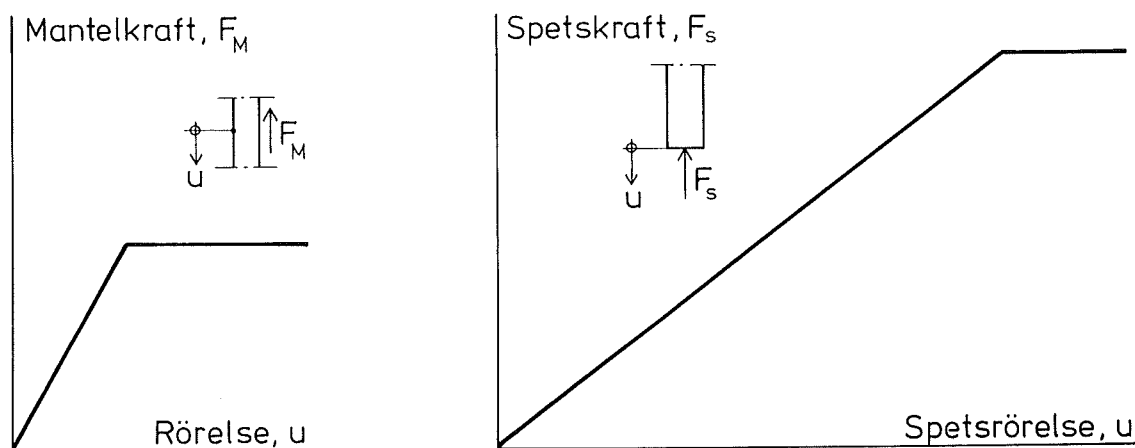
Traditionellt har beräkning av en påles bärförmåga med avseende på jorden kring och under pålen, d v s den geotekniska bärförmågan, ofta skett utan närmare hänsyn till vilken rörelse som motsvarar den beräknade bärförmågan. De metoder som använts har nämligen normalt inneburit att det blivit fråga om så små rörelser att dessa varit utan praktisk betydelse.

Som nämnts i föregående avsnitt krävs dock i vissa fall en beräkning av pålens rörelser. Detta kan gälla såväl brott- som bruksgränstillståndet. Föreskrivna partialkoefficienter skall användas vid beräkningen av den geotekniska bärförmågan. För beräkning av bärförmåga relaterad till olyckslast behövs dock endast undersökning av uppträdande krafter.

En grov stålrörspåles geotekniska bärförmåga förutsätts enligt denna rapport utvärderad med hjälp av en beräkning som avser pålens eller pålgruppens last/rörelsesamband. Beräkningen skall omfatta intervallet från obelastad påle till brott.

Antagen jordmodell

För att genomföra en sådan beräkning krävs ett definierat samband mellan kraft och rörelse för jorden omkring pålens mantel och för jorden under spetsen. Den modell som används här är densamma som används i s k CAPWAP-analys. När spänningen mellan jorden och pålen ökar så ökar motsvarande rörelse i gränsytan i proportion till spänningen tills ett maximalt värde uppnås och fortsatt rörelse sker utan ytterligare spänningsökning. Förloppet illustreras i FIG. 9 för en axiellt belastad påle. De maximala värdena för spets- och mantelbärförmåga kan beräknas med traditionella geotekniska beräkningsmetoder.



Figur 9. Samband mellan kraft och rörelse för mantel respektive spets.

Karakteristiska värden för jordens hållfasthet

Karakteristiska värden för mantelfriktion eller adhesion mellan pålmantel och omgivande jord, liksom karakteristiskt värde för normaltryck mellan spets och underliggande jord, kan erhållas på olika sätt:

- *geoparametrar utvärderas från geoundersökningsresultat*
- *direkt översättning av sonderingsdata*
- *dynamisk provbelastning*
- *statisk provbelastning*

Utvärdering av geotekniska hållfasthetsdata är i huvudsak gemensam för alla typer av slagna pålar. Denna rapport ger därför ingen detaljerad redovisning av hur storleken av karakteristiska värden för geoteknisk mantel- och spetsbärförmåga beräknas. Istället hänvisas till Pålkommision Rapport 83, Beräkning av pålars last-rörelsesamband med utgångspunkt från sonderingsdata [29]. Se även [4] och [5]. En redogörelse för ett stort antal provbelastade friktionspålar jämförda med teoretiskt beräknade värden har redovisats av Karin Rankka, IVA Pålkommisionen rapport 87, 1992. En detaljerad redogörelse för olika beräkningsmetoder redovisas i handboken Pågrundläggning [32].

I TABELL 9 visas en sammanställning över normala variationsintervall för geotekniska hållfasthetsvärden. Det bör observeras att för beräkning av dimensionerande värden skall aktuella partialkoefficienter användas.

Tabell 9. Mantelfriktion/adhesion (f_{mk}) och spetsstryck (q_{spetsk}) för slagna pålar.

Jordart	Lagringstäthet	f_{mk} [kPa]	q_{spetsk} [MPa]
lera	-	$0,8c_u - 1,1c_u^{x)}$	$6c_u - 9c_u$
silt	-	5 - 50	0,1 - 5
sand	lös	10 - 40	0,1 - 5
sand	fast	30 - 70	2,0 - 8
grus	fast	50 - 100	5,0 - 10
berg	-	-	$2q_{cyl} - 3q_{cyl}$

anm: I tabellen visade värden är karakteristiska värden. c_u avser odränerad skjuvhållfasthet. q_{cyl} avser tryckhållfasthet, cylindriskt prov. Värdena i lera avser ca 3 månader efter drivning.

^{x)} Normalkonsoliderad lera. För överkonsoliderad lera kan värdet gå ned till $0,4c_u$.

Beräkning av rörelser

De rörelser som uppkommer då pålens mantel- och spetsmotstånd mobiliseras kan utvärderas från resultat från samma slags undersökningar som utgör underlag för hållfasthetsbestämningen, d v s geotekniska undersökningsdata och provbelastningar. För en detaljerad redovisning av beräkning av rörelser med utgångspunkt enligt olika alternativ hänvisas till den ovan nämnda Rapport 83 [29] och Rapport 87.

Den förskjutning mellan pålmantel och omgivande jord ($u_{mantelk}$) som med vissa förutsättningar teoretiskt motsvarar att den karakteristiska hållfastheten uppnås kan beräknas ur uttrycket

$$u_{mantelk} = 3f_{mk}D / E_{mantelk} \quad (17)$$

där

f_{mk} = karakteristiskt värde för mantelfriktion/adhesion

D = pålens ytterdiameter

$E_{mantelk}$ = omgivande jords sättningssmodul, karakteristiskt värde

Motsvarande värde för spetsrörelse (u_{spetsk}) beräknas överslagsmässigt med hjälp av uttrycket

$$u_{spetsk} = q_{spetsk}D / E_{spetsk} \quad (18)$$

där

q_{spetsk} = karakteristiskt värde för spetstryck

D = pålens spetsdiameter

E_{spetsk} = sättningssmodul för jord under pålspets, karakteristiskt värde

Sättningssmodulen för friktionsjord under pålspetsen brukar vara avsevärt större än för motsvarande jordmaterial vid sidan av pålen, beroende på slagningens komprimerande inverkan. Vid beräkning av rörelser för pålspetsar på berg måste beaktas att bergytan kan krossas inom ett relativt stort område kring spetsen, vilket leder till betydligt mjukare spetsunderlag än vad som motsvarar intakt berg.

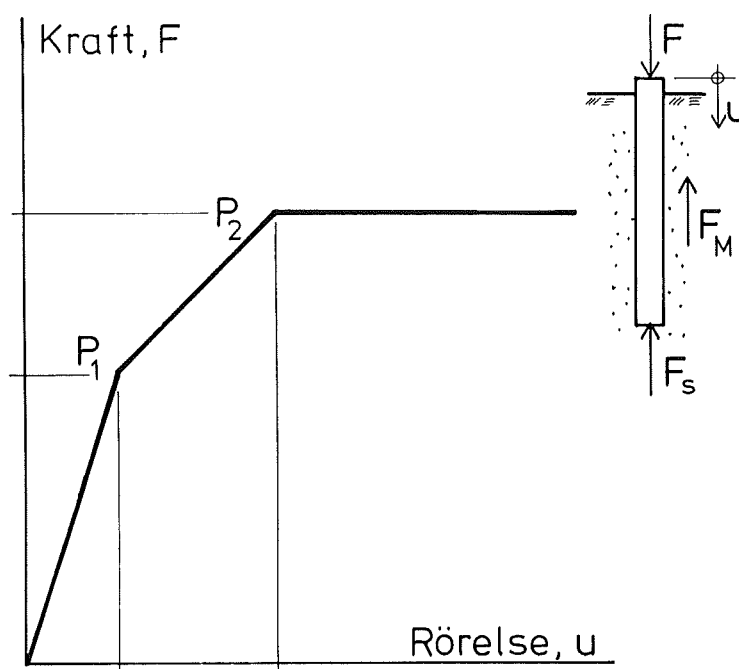
För att mobilisera full mantelfriktion krävs en relativt liten förskjutning, ofta av storleksordningen endast några mm. För att nå fullt spetstryck krävs mycket större rörelse. Här brukar en nedpressning av spetsen motsvarande 2 - 15 % av spetsdiametern anges. Vid successiv pålastning kommer därför till en början manteln att svara för den största andelen av pålens motstånd.

Beräkning av pålens last-rörelsesamband och kraftfördelning i pålen

Med kännedom om ovan beskriva kraft-rörelsesamband för jorden kan en stålrörspålens beteende från obelastat tillstånd tills den uppnår aktuellt gränstillstånd beräknas. Föreskrivna partialkoefficienter skall användas.

Resultatet av en sådan beräkning illustreras i FIG. 10. Beräkningen förutsätter det spänning-rörelsebeteende för jorden som beskrivits ovan i FIG. 8 samt längs pålen konstanta förhållanden beträffande omgivande jord. Det förutsätts vidare att pålen är spänningsfri innan belastningen börjar påföras.

Som framgår av FIG. 10 har last-rörelsesambandet två brytpunkter, P1 och P2. P1 motsvarar att hela mantelfriktionen mobiliserats, medan P2 anger att även fullt spetsmotstånd uppnåtts. I det fall begränsning av rörelser inte utgör någon dimensionerande faktor, utgör således punkt P2 pålens geotekniska bärförmåga. Inverkan av spänningar



Figur 10. Last-rörelsesamband för axialbelastad påle med i jord med linjära egenskaper enligt figur 9.

orsakade av andra lasteffekter än belastningen mot påltoppen måste dock beaktas. Som exempel kan nämnas kvarstående inverkan av neddrivningen samt inverkan negativ mantelfriktion.

En beräkning av detta slag ger även den axiella kraftfördelningen i pålen för hela kraftintervall. Kännedom om hur lasten i pålen är fördelad kan utnyttjas för minskning av pålens dimensioner mot djupet. På så sätt kan förenklad drivning och minskade materialkostnader uppnås.

I de fall pålens tvärsnitt och jorden omkring pålen har samma egenskaper längs hela pålen kan beräkningen utföras för hand. Ofta varierar emellertid geoförhållandena och ibland även påltvärsnittet, vilket gör handberäkningar tidsödande. Datorprogram finns därför utarbetade, exempelvis det svenska PC-programmet PILESET och det norska PIA2.

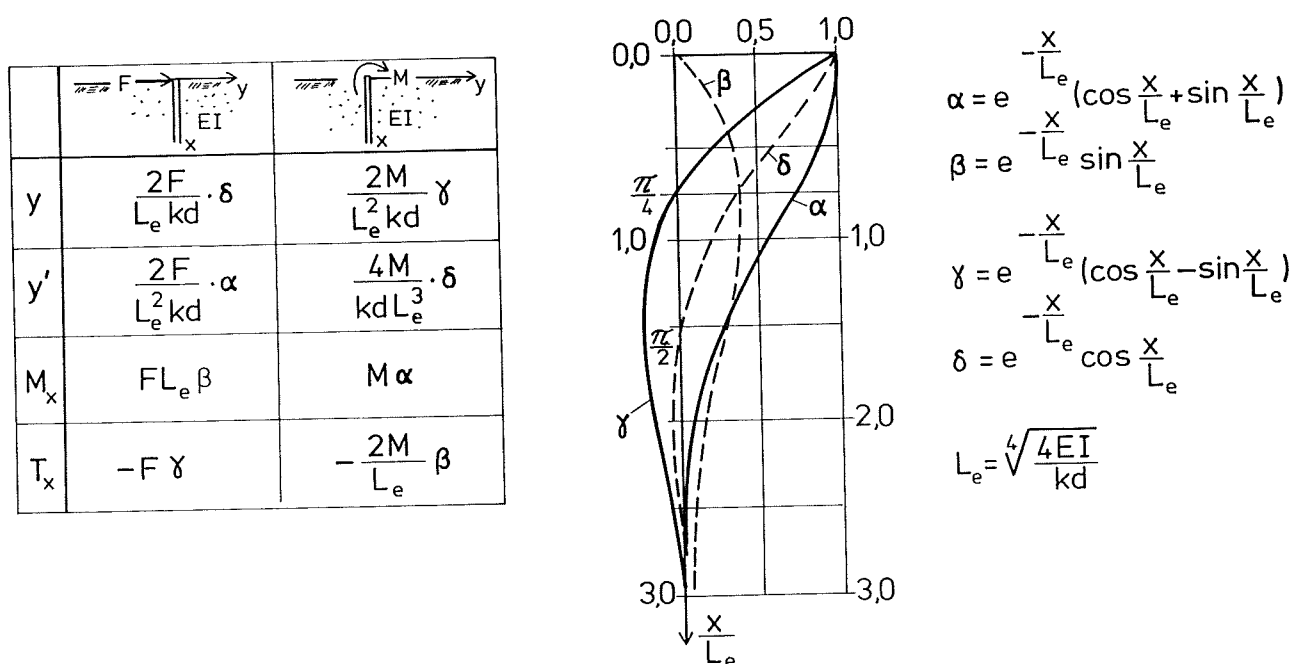
3.5 Sidobelastade pålar

Som nämnts tidigare har grova stålrörspålar den speciella egenskapen att de i jämförelse med slagna betongpålar kan ta upp mycket stora böjmoment och horisontalkrafter. Det är därför motiverat att ge en närmare beskrivning av hur dimensionering av rörpålar med avseende på belastning i form av moment och sidokrafter kan ske.

Påle omgiven av elastiskt medium

Pålar som belastas vid skallen med transversell kraft och/eller moment, kan analyseras med teori för balkar på elastiskt underlag. Beräkningarna förenklas om man antar att pålen är omgiven av en elastisk halvrymd och att såväl pålen som den elastiska omgivningen har konstanta egenskaper.

I FIG. 11 anges uttryck för beräkning av en påle placerad i en halvoändlig elastisk omgivning. Pålens bäddmodul och böjstyvhet antages konstant. Pålen förutsätts styrd men ej inspänd vid pålskallen. I de fall både sidokraft och moment förekommer adderas dessa lasteffekters inverkan.



Figur 11. Påle i halvoändligt elastiskt medium [4].

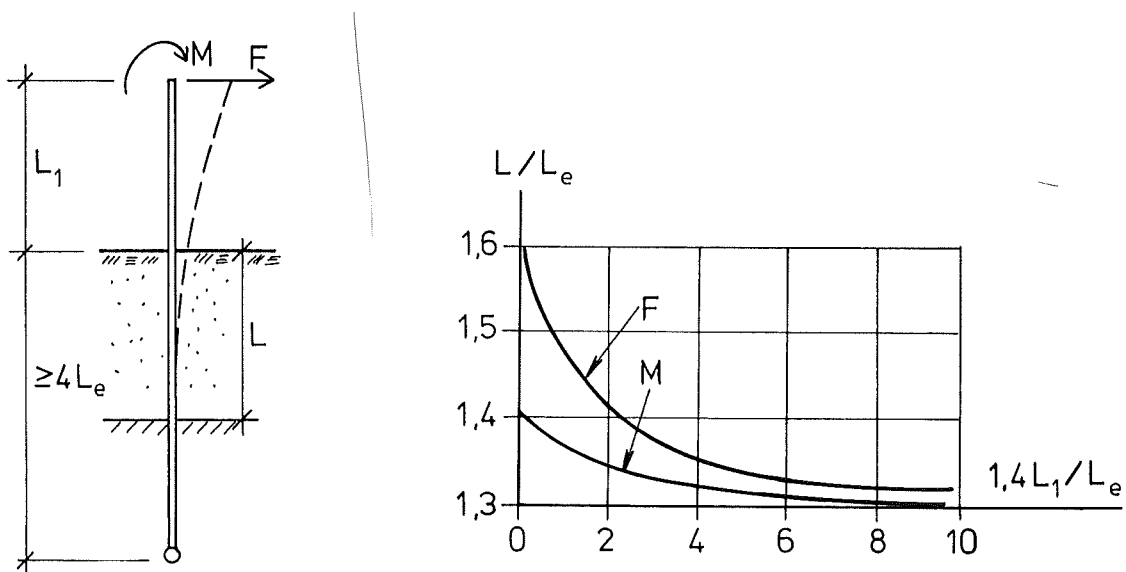
Påle som står fritt i luft eller vatten

Om pålen står fritt en sträcka, exempelvis vid fronten av en kaj, kan påldelen i jord kopplas till den fria delen av pålen med iakttagande av villkoren för geometrisk kompatibilitet i anslutningssnittet.

Alternativt kan pålen antagas inspänd på visst djup under detta snitt. Detta förenklar beräkningarna. Under förutsättning att pålen har tillräcklig längd under markytan samt tillräckligt stor fri längd, sätts avståndet från markytan till det fiktiva inspänningssnittet lika med $1,33L_e$ à $1,60L_e$, där L_e betecknar elastisk längd $= [4EI/kd]^{1/4}$, se FIG. 12. Beträffande kombinationen av karakteristiska respektive dimensionerande värden vid beräkningen av den elastiska längden, hänvisas till tidigare avsnitt om knäckning.

Antagande om ett sådant fiktivt inspänningssnitt förenklar i hög grad beräkningarna eftersom elementära uttryck för tvåstödsbalkar kan användas.

Beräkning av pålens bäddmodul och tillhörande partialkoefficienter sker på det sätt som beskrivits tidigare i avsnittet om knäckning (3.3.7). Pålens längd i jord bör vara minst $4L_e$ för att uttrycken i FIG. 11 och 12 skall gälla med tillräckligt god approximation.



Figur 12. Delvis fristående påle, djup till fiktivt inspänningssnitt [17].

Generell modell för sidobelastad påle

Ovan angivna antaganden utgör i allmänhet grova förenklingar av de verkliga förutsättningarna. För att närmare ta hänsyn till de olika förhållanden som normalt förekommer, krävs en beräkningsmodell för sidobelastade pålar som tar hänsyn till följande faktorer:

- varierande böjstyvhets EI längs pålen
- varierande bäddmodul kd längs pålen (även värdet noll)
- varierande mobiliserbart gränstryck
- varierande initiell utböjning
- varierande axiell kraft längs pålen
- inverkan av egenspanningar
- inverkan av geometriska förändringar vid belastning

En metod att ta hänsyn till detta är att utgå från att pålen delas upp i ett antal element. Varje sådant antas ha konstanta egenskaper. Det använda beräkningselementet skall vid limesövergång (elementlängden går mot noll) ge kända samband för balk på elastiskt underlag.

Beräkningsmetoden skall kunna beakta de lasteffekter som orsakas av utböjningen före belastning och pålens successiva sidoutböjning då pålen belastas. Belastningen kan i beräkningen påföras i steg. I varje steg beräknas andra ordningens inverkningar för varje segment innan nästa steg påförs. Vid traditionell analys beaktas denna inverkan genom att axialkraften multipliceras med en förstöringsfaktor. Sistnämnda tillvägagångssätt förutsätter dock konstanta förhållanden i en omfattning som sällan föreligger, varför missvisande beräkningsresultat kan uppkomma.

En stor mängd beräkningssteg krävs för att ta hänsyn till sådana andra ordningens utböjningar. Med hänsyn till beräkningsnoggrannheten är det lämpligt att arbeta med ett stort antal segment. Det är därför nödvändigt att använda datorstöd för att genomföra beräkningarna.

Gruppverkan

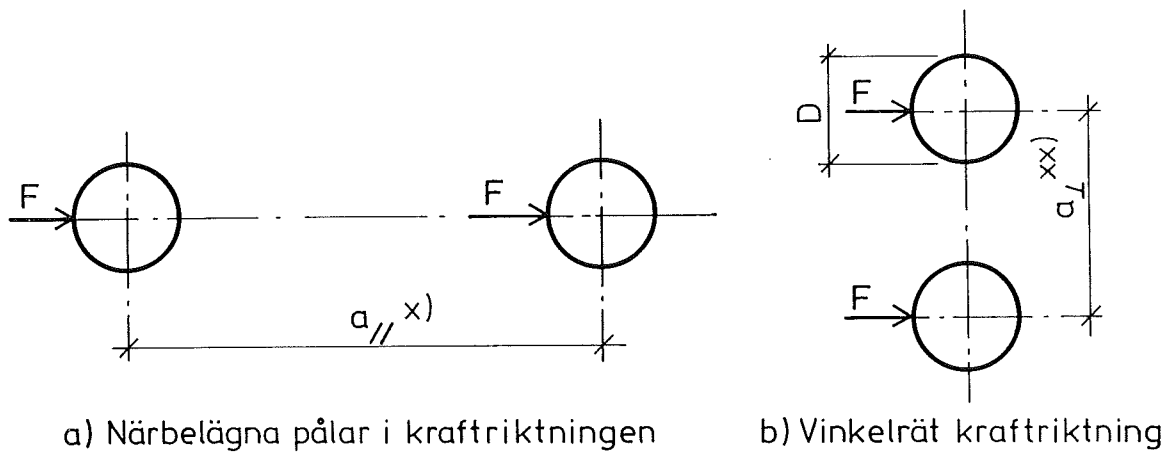
I pålgrupper kan grova stålörspålar stå så nära varandra att spänningsfältet i jorden kring en påle kan påverka närstående pålar. Fenomenet benämns gruppverkan. Hänsyn till sådan interaktion kan tas genom att man räknar med ett, beroende på påldiameter och pålavstånd, reducerat värde på jordens hållfasthet och bäddmodul. Följande rekommendationer bygger på Pålkommisionens Rapport 58, "Grävpåleanvisningarna" [27]:

- Där pålar ej står närmare varandra än 8D i samma riktning som horisontalkraft verkar räknas pålarna som enskilda pålar. Är avståndet mellan pålarna 3D reduceras hållfasthet och bäddmodul till 25% av oreducerat värde. För mellanliggande värden interpoleras rätlinjigt.

- Där pålar ej står närmare varandra än 3D i riktning som är vinkelrät mot angripande horisontalkraft antages att pålarna fungerar som enskilda pålar. Vid mindre avstånd än 2D räknas som om pålarna bildar en hel vägg. För mellanliggande värden interpoleras rätlinjigt.

Dessa anvisningar illustreras i FIG. 13. Med avstånd menas centrumavståndet mellan närliggande pålar. Värdet **D** avser pålarnas ytterdiameter.

De redovisade influensavstånden utgör approximationer. Där det krävs noggrann hänsyn till gruppverkan måste pålar och jord modelleras i tre dimensioner. Det resulterande beräkningsarbetet blir emellertid så omfattande att det i de flesta fall är motiverat att i stället tillämpa de föreslagna förenklingarna.



- x) Ingen reduktion om $a_{//} > 8D$
reduktion till 25 % om $a_{//} < 3D$
- xx) Ingen reduktion om $a_{\perp} > 3D$
om $a_{\perp} < 2D$ räknas som för hel vägg

Figur 13. Gruppverkan vid pålar i pålgrupper.

3.6 Dimensionering med hänsyn till slagning

Vid slagning i samband med drivning och verifiering av bärförmåga utsätts stålröret för spänningar som måste beaktas vid dimensioneringen.

Det är endast **delvis** fråga om lasteffekter som kan beräknas med någon större noggrannhet, exempelvis tryckspänningar från ett väl centrerat hejarslag med känd fallhöjd mot en dyna med väldefinierade egenskaper. Därtill förekommer inverkan som inte närmare kan beräknas. Som exempel kan nämnas de förhållanden som uppkommer när pålröret böjs eller vrids vid drivningen, beroende på excentriskt kraftangrepp vid skalle eller spets.

Initialstöt våg

I det fall pålen drivs utan, eller med lätt, föga elastisk dyna samt tung fallhejare kan den nedåtgående stöt vågen i en lång påle beräknas med uttrycket

$$F_i = vZe^{-(Zt/m)} \quad (19)$$

där

v = hejarens anslagshastighet

Z = pålens impedans = AE/c

A = pålens area

E = pålens elasticitetsmodul

c = den longitudinella våghastigheten i pålen, för stål ca 5100 m/s

t = tiden

m = hejarens massa

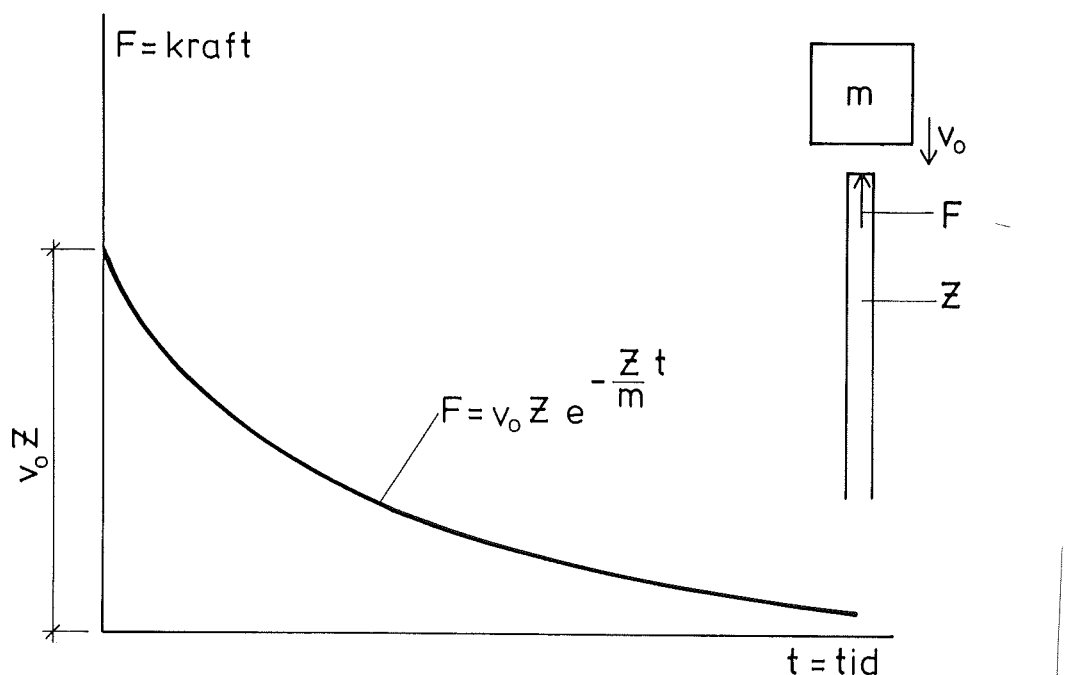
Ekvation (19) illustreras i FIG. 14. Stöt vågformer för andra kombinationer av hejare och dynor redovisas i Bygg del G13:37.

Hejarens anslagshastighet brukar för frifallshejare antagas motsvara fritt fall från ca 80% av den nominella fallhöjden. Denna reduktion motiveras av ofrånkomliga förluster vid anslaget. Vid dåligt centrerade slag kan reduktionen bli avsevärt större. Eftersom excentriska slag även kan skada pålröret är det viktigt att uppnå centriska slag under hela drivningen.

Ekvation (19) anger hur stötkraften varierar med tiden i ett tvärsnitt i närheten av skallen. Då kompressionsvågens front rör sig nedåt eller uppåt i pålen brukar man räkna med att den maximala intensiteten minskar med ca 1% per meter, beroende på inre dämpning i pålmaterialet och dämpande inverkan hos omgivande jord.

Spetskraft

Då den nedåtgående partikelrörelsen (=stöt vågen), som initierats av hejarslaget, når pålspetsen börjar den röra sig nedåt. Ett spetsmotstånd byggs successivt upp. Teoretiskt kan detta nå dubbla intensiteten i initialstöt vågen $F_i[t]$ om spetsen står på ett i matematisk mening stumt underlag. I verkligheten finns dock alltid en viss eftergivlighet. Vid



Figur 14. Initialstöt-våg vid tung hejare, ingen dyna.

stoppslag mot morän eller berg uppmäts normalt ca 1,3 till 1,8 ggr maximal initialstöt-kraft.

Reflexstöt-våg

Skillnaden mellan mot spetsen inkommande initialstöt-våg och uppåtriktad spetsreaktion mellan pålspets och spetsunderlaget, resulterar i en uppåt propagerande partikelrörelse, en reflexstöt-våg. Om inget spetsmotstånd existerar kommer reflexstöt-vågen att motsvara initialstöt-vågen med ombytt tecken. Stora dragkrafter kan på så sätt uppstå i pålen under drivningen. Om spetsen istället står på ett i teoretisk mening helt oeftergivligt underlag reflekteras istället initialstöt-vågen med bibehållet tecken.

När reflexvågens front når påltoppen sker en ny reflex. Innan inverkan av ett hejarslag klingat ut har vanligen flera 10-tals reflexer uppkommit vid varje pålande. På så sätt uppkommer en utmattande lasteffekt som är större än den som svarar mot det nominella antalet hejarslag.

Sammantaget finner man att de teoretiska gränserna för reflexvågens intensitet är en dragkraft respektive en tryckkraft med samma belopp som initialstöt-vågen. Inverkan av dragning, liksom växling mellan drag- och tryckkrafter, måste beaktas vid beräkning av svetsfogar och andra liknade konstruktionsdetaljer för den grova stålrörspålen.

Beräkning av drivningsskedet

Endast renodlade förhållanden som avser kraftförloppet vid drivning och stoppslagning kan analyseras med handberäkningar. Sådana metoder lämpar sig därför endast för överslagsberäkningar. För att samtidigt beakta faktorer som

- andra typer av hejare än fallhejare
- varierande tvärsnittsarea
- varierande jordmotstånd
- massa, elasticitet och hysteres hos dynan
- dämpning och brottillstånd i jorden kring och under pålen
- pålspetsens massa

krävs en datorstödd beräkningsmetod, t ex WEAP, som varit i bruk sedan 1960-talet för analys av kraftspelet i pålar under drivning. Största svårigheten att uppnå tillförlitliga beräkningsresultat beror på osäkerheten i jordens egenskaper.

Stötvågsmätning. CAPWAP-analys, beräkning av bärförmåga

Med hjälp av sk stötvågsmätningssutrustning kan uppträdande krafter och rörelser i pålen under neddrivningen registreras. Med utgångspunkt från dessa mätresultat kan verifieringen av bärförmågan göras.

De uppmätta signalerna matchas mot en numerisk modell av systemet påle/jord. De antagna jordegenskaperna justeras i en iterativ process tills godtagbar likhet mellan uppmätta och beräknade signalvärden uppnås. De på så sätt erhållna geotekniska parametrarna läggs sedan till grund för en beräkning av pålens kraft-rörelsebeteende.

Detta samband kan utnyttjas för att utvärdera pålens bärförmåga. Beräkningarna kräver datorstöd. Ett program som ofta används i detta syfte är CAPWAP. Programmet har successivt modifierats för att tillgodose ökade krav på användarvänlighet.

När stötvågsmätningssresultat läggs till grund för beräkningar som gäller grova stålörspålar är det viktigt att beakta om mätningarna utförs på ett tomt rör, som efter drivning och stoppslagning fylls med betong. Med CAPWAP beräknade värden för pålrörelser och axiell kraftfördelning för tomma rör måste i så fall justeras med hänsyn till pålens ökade styvhet beroende på betongfyllningen. CAPWAP kan användas för sådan modifiering av beräkningsresultaten.

3.7 Dimensionering med hänsyn till korrosion

I likhet med andra stålkonstruktioner måste grova stålrörspålar, där stålröret förutsätts bärande, utformas med beaktande av risken för korrosion. Dessutom måste hänsyn tas till avnötning och liknande företeelser. Den av dessa anledningar försvagade stålrörspålen skall uppfylla ställda krav i brott- och bruksgränstillståndet under hela den avsedda användningstiden.

Den erforderliga plåttjockleken för grova stålrörspålar med bärande ståltvärsnitt väljs bl a med utgångspunkt från pålarnas funktionstid och motsvarande korrosionsförhållanden. Medan funktionstiden kan bestämmas, är det givetvis svårare att mer noggrannt ange korrosionshastigheten.

Det brukar antagas att korrosionen huvudsakligen verkar mot stålrörspålarnas utsida, om pålarna är slagna slutna. Korrosionshastigheten varierar på olika nivåer längs pålen. Den långsammaste avrostningen uppkommer där pålen omges av icke-aggressiv lös lera under grundvattenytan. Ofta förutsätts där högst ca 2 mm korrosion under en tidsrymd av 100 år. Den snabbaste avrostningen uppkommer vanligen någon meter över och under medelvattennivån för en påle som står fritt i vatten. På denna del brukar man antaga ca 5-10 mm korrosion per 100 år för oskyddat, obehandlat stål.

Särskilda förhållanden, exempelvis stålrörspålar placerade i närheten av korroderande utsläpp, kan motivera att snabbare korrosion skall förutsättas. En svårighet vid val av dimensionerande korrosionshastighet är att förutsäga framtida förändringar i pålarnas omgivning som påverkar korrosionsförhållandena.

Pålarna kan ges ett korrosionstillägg motsvarande antagen avrostning, under förutsättning att beställaren godtar ett sådant utförande. Denna åtgärd utgör dock inte något egentligt korrosionsskydd av det slag som uppräknas nedan.

Det är viktigt att tidigt klarlägga vilken typ av korrosionsskyddande åtgärder som skall förutsättas. Kostnaderna och utförandetiden för sådana åtgärder måste beaktas. Allmänt gäller att effektiva korrosionsskyddande åtgärder för så stora dimensioner som det är fråga om i samband med grova stålrörspålar är relativt dyra. Vanligen är en ökning av godstjockleken på utsatta avsnitt istället den mest ekonomiska lösningen.

Genom sammanfogning av rörsektioner med olika godstjocklek kan pålröret anpassas till aktuell miljö, exempelvis ges största tjocklek inom ett avsnitt i närheten av medelvattenytan, om det är fråga om pålar omgivna av fritt vatten. Produktionstekniskt är det dock relativt komplicerat att använda olika tjocklek. Man väljer därför ofta för hela stålrörspålen en godstjocklek som motsvarar den beräkningsmässigt största erforderliga.

Enligt BSK 1:23 skall stålkonstruktioner omgivna av jord, sött eller salt vatten hänföras till miljöklass M4A. Motsvarande aggresivitet betecknas "mycket stor", se tabell 1:23 i BSK.

BSK:s krav på hänsyn till korrosionsrisken uppfylls om stålrörspålen ges erforderligt rostskydd. Med vissa förutsättningar (BSK 8:74) får sådant skydd ersättas av rostmån,

d v s en ökning av godstjockleken med hänsyn till väntad korrosionshastighet och funktionstid.

Korrosionsskydd

De typer av korrosionsskydd som närmast kommer ifråga för grova stålrörspålar är:

- *ingjutning i betong*
- *katodiskt skydd*
- *oorganiska ytbeläggningar*
- *organiska ytbeläggningar*

Dessa åtgärder är relativt dyrbara. Dessutom finns vanligen stor risk för att ett ytskydd som anbringats före pålens installation skadas vid neddrivningen. Möjligheterna att efter nedslagningen genom kontroll upptäcka sådana skador är mycket begränsade. De uppräknade metoderna för korrosionsskydd behandlas därför fortsättningsvis inte i denna rapport. Istället hänvisas till Rapport 93 från IVA Pålkommissionen om korrosionsfrågor i samband med pålar; Korrosion och korrosionsskydd av stålpålar i jord och vatten, av Göran Camitz [42].

Dimensionerande livslängd

För att kunna beräkna värdet på rostmånen (korrosionstillägget) krävs uppgift om förutsatt livslängd. Ju längre funktionstid, desto större godstjocklek och i motsvarande grad dyrare stålrörspålar.

Ett normalt värde för broars förutsatta funktionstid i Sverige är 100 år. För pålade konstruktioner i hamnar är det vanligt med funktionstider av storleken 30-50 år.

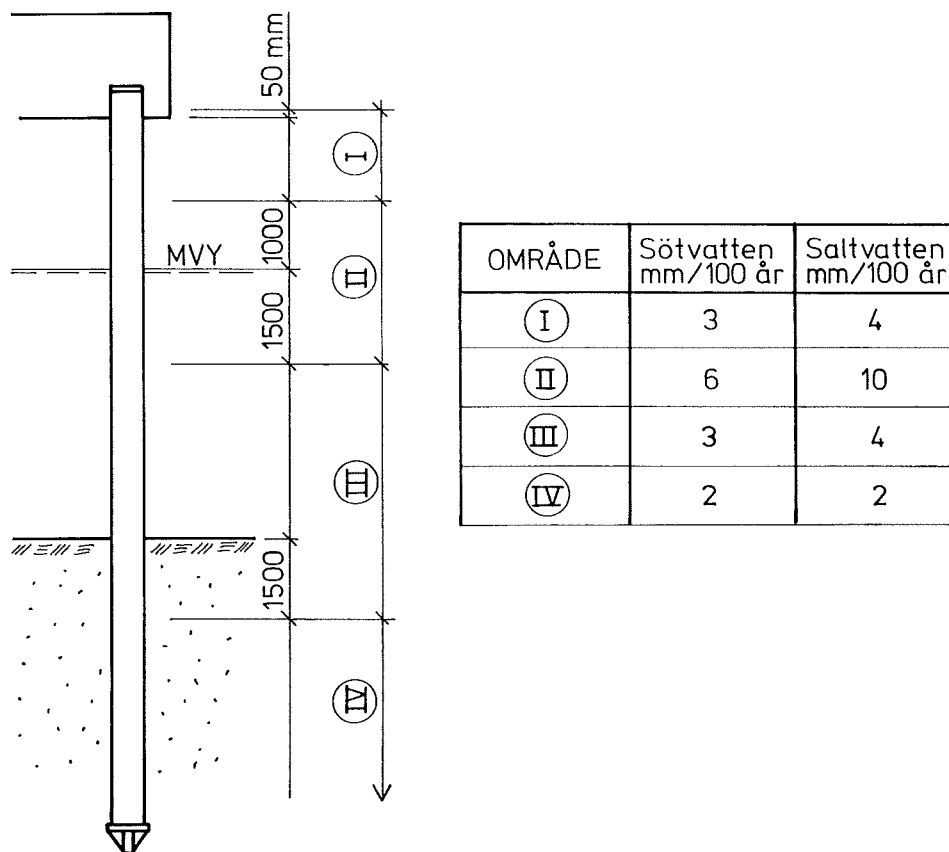
Korrosionshastighet

Man brukar anse att korrosionshastigheten på insidan av en tom, slutna stålrörspålens mantelyta är så låg att den kan försummas. Detta motiveras av att det inre av pålen utgör en slutna volym, som hindrar syre att tränga in.

På utsidan sker däremot korrosionen med en hastighet som styrs av omgivande miljöfaktorer. Enligt BSK 8:74 rekommenderas att rostmånen storlek bedöms från fall till fall i den miljöklass som föreskrivs, M4A.

I *figur 15* visas storleken av den utvändiga avrostning som med ledning av iakttagelser på existerande, korrosionsexponerade konstruktioner kan beräknas uppkomma för pålar som delvis står fritt i vatten. Som framgår av figuren är avrostningen störst i området kring medelvattenytan. Inverkan av viss isnötning ingår i de visade värdena.

Där miljön är, eller kan bli, särskilt aggressiv, skall korrosionsförhållandena utredas närmare. Detta gäller exempelvis om pålen befinner sig i gytta, i sulfid- eller svavelhaltig jord. Exempel på platser som kan innebära mycket stor korrosionshastighet är industriområden och avfallsupplag. Risk för elektisk ström, s k läckströmmar, utgör också en riskfaktor.



Figur 15. Antagna värden för 100 års utväldig avrostning på grova stålrörspålar som står delvis fritt i vatten.

Rostmån

I vissa fall föreskrivs i normer eller projektspecifika handlingar det värde på rostmån som skall förutsättas. Är så ej fallet beräknas värdet för ökningen av godstjockleken med utgångspunkt från användningstid och beräknad korrosionshastighet.

För att BSK:s föreskrifter avseende hänsyn till korrosion skall anses beaktade genom utnyttjande av rostmån såsom åtgärd, gäller vissa krav beträffande kontroll och inspektion. I särskilt aggressiva miljöer kan dessa krav utgöra ett hinder mot användning av stålrörspålar med bärande stålarea.

Som framgår av FIG. 15 kan avrostningen bli olika stor på olika nivåer. Pålen kan då före installationen ges en varierande godstjocklek. Därvid beaktas att varierande rörtjocklek påverkar rörpålens egenskaper både i stoppslagningsskedet och i funktionsstadiet. Om rörsegment med mycket stor skillnad i godstjocklek svetsas ihop uppkommer lokalt stora spänningskoncentrationer samt dragspänningar i samband med drivning och verifiering av bärförmågan. Därför ska större skillnad än vad som motsvarar förhållandet 1:1,5 undvikas.

Det kan nämnas att Bronorm 88 under vissa förutsättningar anger att dimensionering kan ske under antagande av totalt 2 mm avrostning.

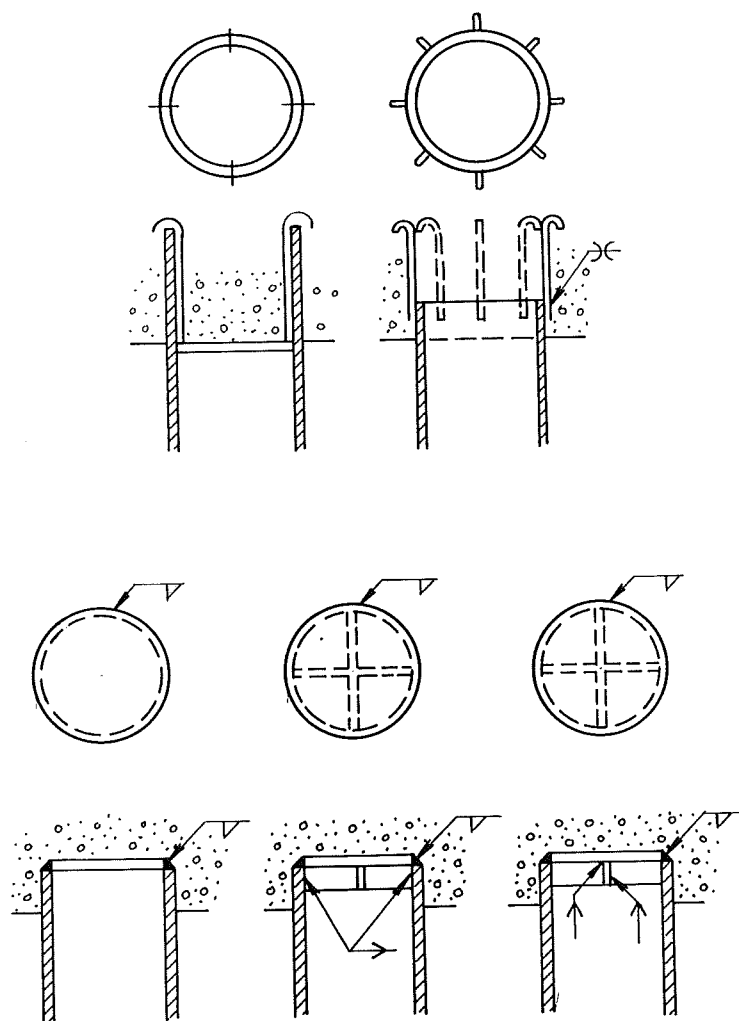
3.8 Utformning av pådetaljer för grova stålrörspålar

Konstruktionsdetaljer för grova stålrörspålar skiljer sig från de konstruktionslösningar som tillämpas för betongpålar. Särskilt gäller detta vid en grov stålrörspåle med bärande stålmantel.

Infästning av grova stålrörspålar i överbyggnad

I figur 16 visas olika typer av anslutningar mellan grova stålrörspålar och överbyggnaden, som förutsätts bestå av armerad betong. Om pålarna förutsatts inspända måste tillräcklig förankring säkerställas. Detta sker genom förankringsstål som gjuts in i pålen (vid betongfylld påle), eller svetsas till pålröret (vid bärande stålrör).

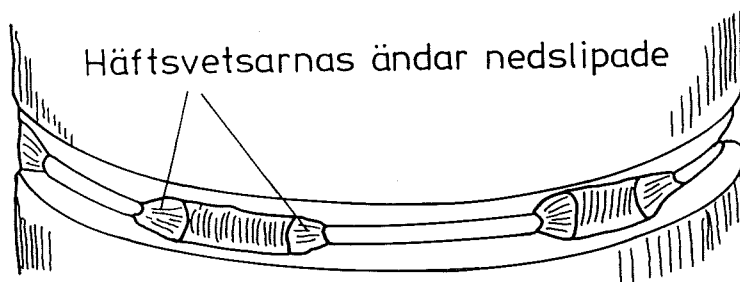
Vid stålrör som antagits bärande kan kraftöverföringen ombesörjas genom att pålen förses med en topplåt, som visas i figuren. Plåten dimensioneras under antagande av att pållasten är jämt fördelad över plåten.



Figur 16. Infästning av grova stålrörspålar i överbyggnad.

Skarvar för grova stålrörspålar

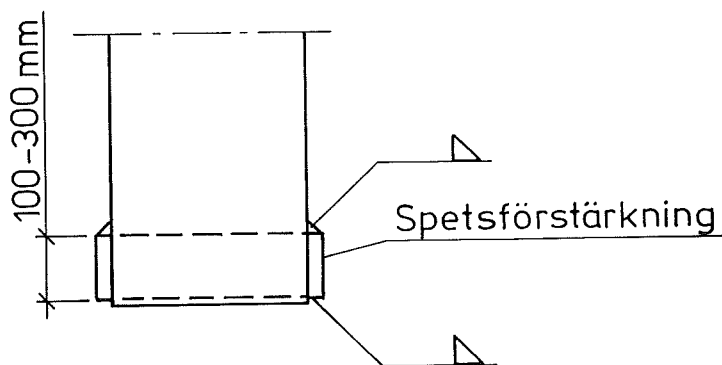
Svetsningen sker i allmänhet endast från utsidan. En V-fog är därför lämplig. Hela tvärsnittet skall genomsvetsas med en jämn rotvulst. Förbandsfaktorn C enligt BSK sätts till 45, om inte annat kan påvisas riktigare.



Figur 17. Svetsfog för grov stålrörspåle.

Förstärkningsring vid öppen stålrörspåle

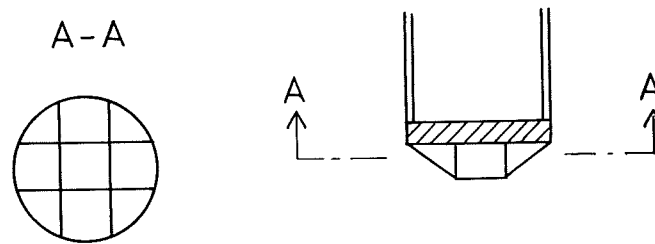
Vid en öppen påle utförs en utvändig förstärkningsring, se FIG. 18. Ringen dimensioneras minst för ett invändigt ringtryck motsvarande 30 % av dimensionerande bärförmåga. Under drivningen kan större krafter uppkomma.



Figur 18. Förstärkningsring för i botten öppen, grov stålrörspåle.

Plan pålsko för grova stålrörspålar

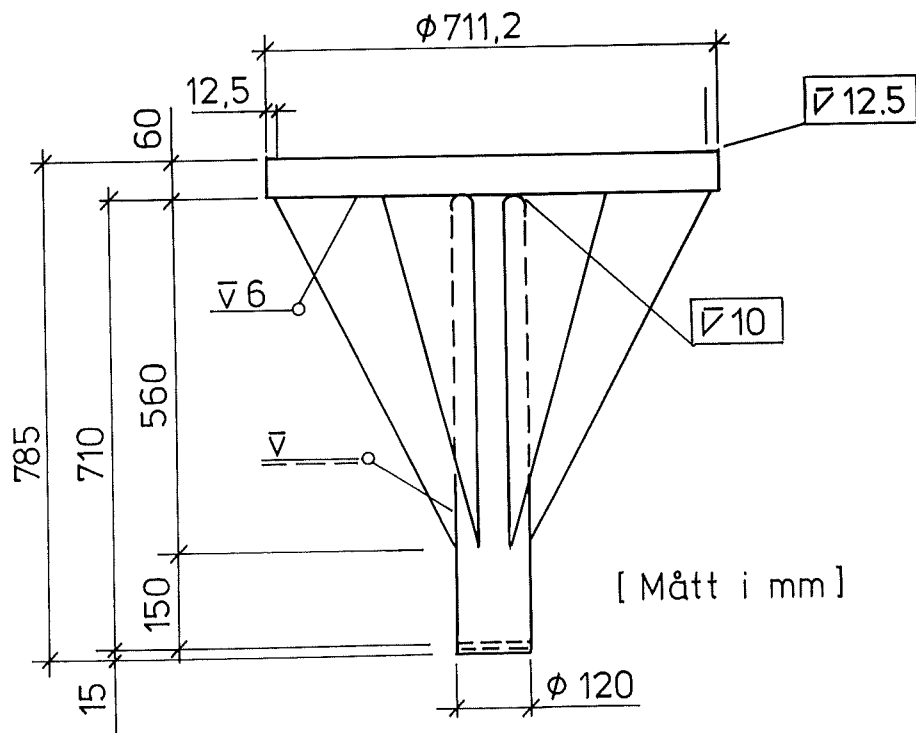
Där en grov stålrörspåle drivs med sluten spets i form av en plansko, dvs en plåt monterad som ett lock vid pålspetsen i sand eller silt, dimensioneras denna plåt under antagande av att pålens spetskraft är jämt fördelad. Förekommer sten i jorden kan det vara lämpligt att räkna med en mer koncentrerad kraft, eller att istället använda sig av en bergsko av det slag som beskrivs nedan. Den plana pålskon kan förstärkas med avstyvningar i form av linjaler som svetsas på plattan.



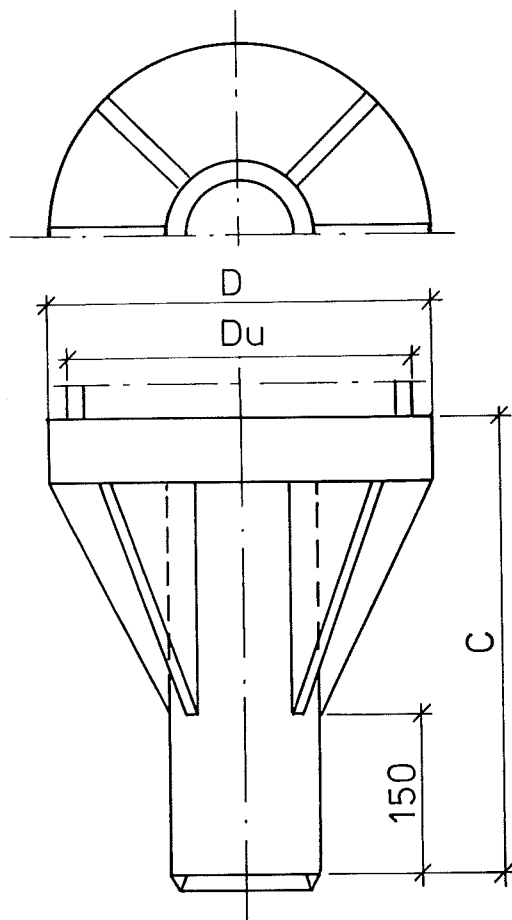
Figur 19. Plan pålsko för grov stålrörspåle.

Bergsko med bergdubb för grov stålrörspåle

En grov stålrörspåle som slås i jord som innehåller hinder i form av block och sten eller som beräknas nå berg skall förses med en bergsko. Denna kan utgöras av en grov bottenplåt med påsvetsade detaljer i form av avstyvningar och bergdubb, se FIG. 20 och 21.



Figur 20. Bergsko för grov stålrörspåle.



D	Du	C
355,6	360	430
406,4	407	460
457,0	459	490
508,0	510	540
559,0	561	570
610,0	612	640
660,0	662	680
711,0	713	760
762,0	764	790
813,0	815	880
914,0	916	970
1016,0	1018	1080
1220,0	1222	1190

[Mått i mm]

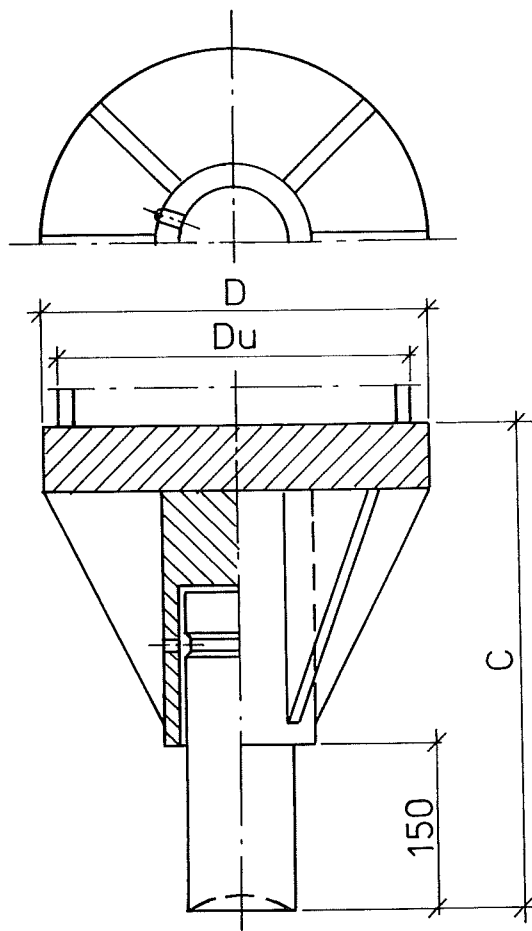
Figur 21. Standardutformning, bergsko för stålrörspålar. Fastsvetsad dubb. Rautaruukki.

Spetsen på bergdubben härddas eller förses med hårdmetallpålägg, beroende på bergets hårdhet. Exempel på bergdubbspecifikationer ges i den Norska Peleveiledningen [25]. Bergdubben bör ha minst samma area som pålröret, om den utgörs av stål i samma kvalitetsklass.

Man bör räkna med att dubben kan få excentrisk belastning motsvarande excentriciteten ca 25 % av dubbdiametern vid neddrivningen. Bergskon skall dimensioneras för en horisontalkraft lika med 30 % av maximal axialkraft i pålen. Horisontalkraften skall antas angripa vid bergdubbens spets. Horisontalkraft och excentricitet behöver dock inte förutsättas verka samtidigt.

Bottenplåtens tjocklek skall vara minst 40 mm. Minst 4 avstyvningar skall användas och avstyvningarnas tjocklek skall vara minst 20 mm. Svetsning i bergdubben får ej utföras så nära utförd härdning att härdningseffekten riskerar att bli förstörd.

För bergskor med lös bergdubb, liknande konventionella slanka betongpålars bergdubbutformning, finns standardutformningar framtagna, se FIG. 22. Det måste dock i varje enskilt fall kontrolleras att beställaren godtar den utformning som väljs.



D	Du	C
355,6	360	450
406,4	407	480
457,0	459	510
508,0	510	560
559,0	561	590
610,0	612	660
660,0	662	700
711,0	713	780
762,0	764	810
813,0	815	900
914,0	916	990
1016,0	1018	1100
1220,0	1222	1210

[Mått i mm]

Figur 22. Standardutförning, bergsko för stålrörspålar. Lös bergdubb. Rautaruukki.

3.9 *Utformning av pålgrupper med grova stålrörspålar*

Beroende på att grova stålrörspålar kan ta upp mycket större lasteffekt än prefabricerade slagna betongtongpålar och därtill klara stora böjmoment, innehåller pålgrupper med grova stålrörspålar i många fall relativt få pålar. Belastningsfallet "avslagen påle" kan då få en avgörande inverkan. Eftersom grova stålrörspålar emellertid i och med hög momentkapacitet kan beräknas vara motståndskraftiga mot påkörning och liknande är det i många fall motiverat att inte behöva förutsätta detta lastfall. Denna fråga avgörs självfallet av beställaren.

Om det är fråga om inte alltför stora horisontalkrafter på en pålgrupp kan snedpålar undvikas och endast vertikala pålar användas, vilket förenklar påldrivningen.

I vissa fall kan grova stålrörspålar fortsätta upp till överbyggnaden utan utförande av påplint och pelare mellan pålarna och överbyggnaden. Detta förutsätter att pålarna kan installeras med tillräckligt snäva toleranser och att utseendemässiga krav tillgodoses genom målning, pågjutning eller liknande åtgärd.

Genom att fästa in grova stålrörspålar momentstyvt i en påplint kan gynnsam statisk inverkan uppnås beträffande överbyggnaden. Detta kan medge ökad spännvidd eller minskade dimensioner.

Geometrisk utformning

Vid brogrundläggning gjuts oftast pålarna upptill in i en styv plint av armerad betong. I Bronormen föreskrivs vissa minimimått beträffande plintens tjocklek, kantavstånd och ingjutningslängd.

Bronormen föreskriver även minsta antalet pålar i en grupp, liksom vissa minimiavstånd mellan pålarna. De värden som anges beror bl a av överbyggnadens utformning samt pålarnas dimension, längd och lutning. Dessa regler har i stor utsträckning varit styrande för utformningen av påplintar och pålplaceringer vid pålgrupper.

Särdrag för grova stålrörspålar

De ovannämnda reglerna är i första hand utformade för slanka, slagna betongpålar av konventionell typ. Vid utformning av pålgrupper med grova stålrörspålar finns några särdrag som behöver beaktas;

- grova stålrörspålar kan ta upp mycket stora sidokrafter vilket minskar, eller eliminerar, behovet av snedpålar jämfört med betongpålar.

- eftersom mycket stora pållaster kan utnyttjas på grova stålrörspålar, krävs ofta kraftigare plintkonstruktion än vid konventionella, slagna betongpålar.

- grova stålrörspålar kan i vissa fall anslutas direkt till överbyggnaden, utan utförande av mellanliggande pålplint.

- produktionstekniska aspekter skall beaktas. Att minimera pålantalet resulterar därför inte nödvändigtvis i den mest ekonomiska gruppformningen. Flackare lutningar än 5:1 bör undvikas.

- vid broar ger s k förhöjd grundläggning vissa fördelar, exempelvis minskad mängd spont vid gjutning av bropelare.

I FIG. 23 visas exempel på förhöjd grundläggning med användande av grova stålrörspålar (Ekolsundsbron C339, väg E18, 1991). Vid pålar som står fritt i vatten på det sätt som visas i figuren är det viktigt att beakta de krafter i form av is- eller strömtryck, påkörning och liknande som kan komma att belasta pålarna på den fria delen i vattnet.

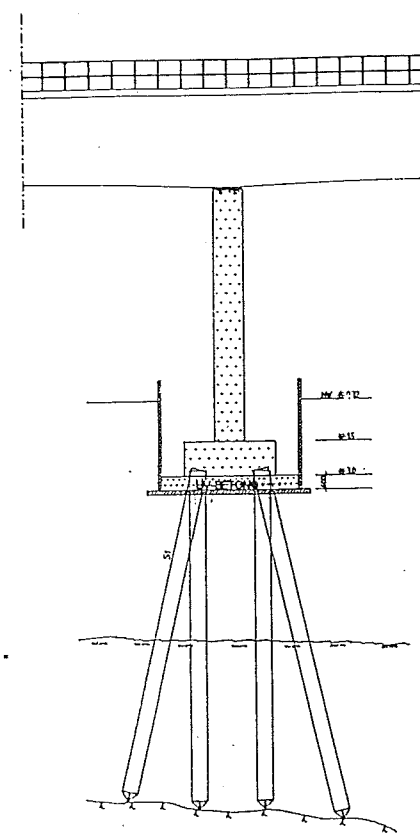


Fig. 23. Ekolsundsbron, C339, väg E18, 1991.
Förhöjd grundläggning på grova
stålrörspålar [7b].

Samverkan mellan pålar och överbyggnad

En pålgrupp samverkar med överbyggnaden. Tidigare bortsågs i stor utsträckning från detta, bl a i syfte att förenkla beräkningarna. Men då försummar man den gynnsamma inverkan jorden kring pålarna har på en pålgrundläggnings förmåga att ta upp sidokrafter och moment. Risken finns också att böjmoment i pålarna undgår upptäckt.

Med modern beräkningsteknik är sådana förenklingar inte längre motiverade. Genom att beakta samverkan mellan överbyggnad, jord och pålar uppnås förenklingar och besparingar. I Pålkommisionens rapport 54, "Pålgrupper med sidomotstånd och in-

spänning" [8], redogörs för beräkning av de gruppstyvhetsfaktorer som behövs vid en samverkansanalys.

Vid användning av grova stålrörspålar är det nödvändigt att ta hänsyn till samspelet mellan pålar och överbyggnad. Risk finns annars att både pålar och anslutna överbyggnadsdelar dimensioneras med felaktiga förutsättningar beträffande krafter och moment.

Som exempel kan nämnas det fel som uppkommer då pålarna antas ledat anslutna till pålplinten, om de utförts så att istället inspanning råder. De "oförutsedda" krafter och moment som uppstår vid inspanningssnitten kan leda till avsevärt större spänningar, sprickor och deformationer än vad som förutsatts. Skador av denna typ är svåra att upptäcka.

En mycket styv pålgrupp (styv ur translations- och rotationssynpunkt) kan kraftigt påverka kraftfördelningen, såväl inom överbyggnaden som mellan olika pålgrupper. Vid beräkning av konstruktioner som grundläggs på grova stålrörspålar är det därför viktigt att de antagna förhållandena motsvarar pålgruppernas verkliga egenskaper. Detta tillåter inga överdrivna förenklingar i antaget funktionssätt. Hänsyn till inspanning och sidomotstånd måste därför tas.

3.10 *Negativ mantelfriktion*

Vid användning av grova stålrörspålar är det viktigt att vara uppmärksam på förhållanden som kan medföra uppkomst av påhängskrafter, då omgivande mark rör sig nedåt, s k negativ mantelfriktion. Pålarnas stora dimensioner kan medföra att inverkan blir mycket stor.

Storleken av uppträdande krafter kan beräknas enligt IVA Pålkommissionens Rapport nr 60, Negativ mantelfriktion längs pålar, [31] samt Pålgrundläggningshandboken [32].

4. Arbetsutförande

4.1 Allmänt

I regel levereras pålarna från fabrik med påspetsbeslag, plansko eller bergsko monterade. Pålmaterialet skall kontrolleras och godkännas vid ankomsten till arbetsplatsen, se kapitel 5. På arbetsplatsen skarvas pålarna till för installationen, lämpliga längder och förses med övriga anordningar som erfordras för att transportera, lyfta och slå pålarna. För dessa arbeten anordnas lämpligen en "verkstad" med erforderlig utrustning och klimatskydd.

För långa och tunnväggiga pålelement skall uppställas hanteringsregler, baserade på hållfasthetsberäkningar. Skarvning av pålarna i samband med neddrivningen kräver anordningar för klimatskydd och uppvärmning. Tunnväggiga rör skadas lätt vid hanteringen, t ex vid lossning och enpunktslyft. En viktig del av pålningsarbetet är utsättning och inmätning av pålarna. På större arbeten är det lämpligt att anordna fasta mätplatser.

Skarvning med svetsning

Skarven skall minst vara jämnstark med pålen i övrigt. Slagen ände av pålröret renkas minst 500 mm.

Pålar skall alltid svetsas av licenssvetsare. Svetsfogarna kontrolleras i en omfattning som avgörs i varje särskilt fall. Anvisning för utförande och kontroll anges på pålritning. Exempel, se FIG. 24. I det fall stålröret ej medverkar som bärande kan mildare krav vara motiverade.

Lyftning

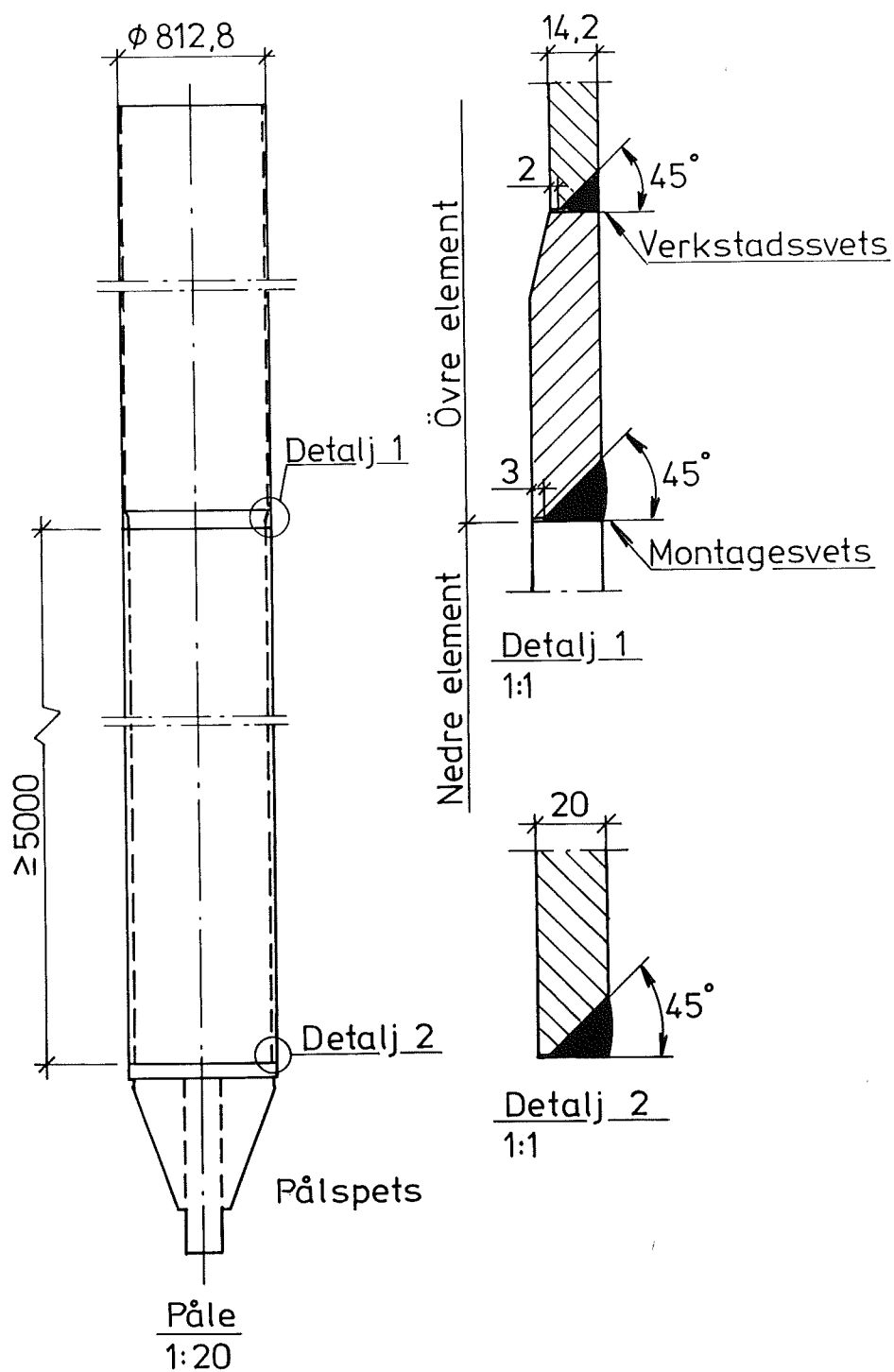
Anvisning skall finnas för hur pålar och pålelement får lyftas. Lyftpunkters placering och eventuella krav på vattenfyllning av påle skall anges. Anvisningen skall vara baserad på hållfasthetsberäkningar och stabilitetskontroll.

4.2 Utrustning för pålinstallation

Slagningstiden är en viktig kostnadsfaktor. Datorsimulering av slagning med olika kombinationer av påle/slagdon underlättar valet av lämplig kombination.

Det är viktigt att slå centriskt och i pålaxelns riktning. Excentriska slag medför att anslagsytan överbelastas lokalt och deformeras, vilket leder till sämre kraftöverföring, längre slagningstid och ökad bortslagning. Välj därför slagdon som är väl styrt, som centrerar slagen mot pålen och som slår i pålens längdriktning.

Vid långvarig slagning i relativt fast jord är det viktigt att använda ett slagdon som ger lång stötvåg och en "slagdyna" som ger lång stigtid och tar bort oönskade spänningstoppar i stötvågen.



Figur 24. Exempel på skarvutformning och föreskrifttext för grov stålrörspåle, ELU-konsult 1993.

ANVISNINGAR

ALLMÄNNA ANVISNINGAR SE RITNING NR...

ARBETET UTFÖRS ENLIGT BRONORM 88, KAP 5 (VV PUBL. 1988:205), BROBREV 6 (PUBL. 1993:1) OCH BESTÄMMELSER FÖR STÅLKONSTRUKTIONER BSK-1987.

SVETSNING FÅR ENDAST UTFÖRAS AV SVETSARE SOM AVLAGT GODKÄNDA PROV ENLIGT SS 065201.

ARBETET UTFÖRS I UTFÖRANDEKLASS GB ENLIGT STÅLBESTÄMMELSER BSK-1987, KAP 8.

SVETSAR UTFÖRS ENLIGT SVETSKLASS WB.

SVETSNING FÅR EJ SKE VID TEMPERATUR $< 0^{\circ} \text{C}$.

FÖRE SKARVNING AV PÅLRÖR KAPAS ÖVRE ÄNDEN AV DEN SLAGNA PÅLEN (C:A 500MM). KAPNINGEN SKALL UTFÖRAS VINKELRÄTT SÅ ATT PÅLENS RAKHETSKRAV INNEHÅLLS.

RAKHET HOS ENSKILT RÖR OCH HOPSVETSAT RÖR:
MAX 7 MM PILHÖJD PÅ 7,0 M MÄTLÄNGD.

DRIVNING AV PÅLE, STOPPSLAGNING, VERIFIERING AV BÄRFÖRMÅGA, BETONG, ARMERING OCH IGJUTNING MM SE RITN. NR ...

KONTROLL.

KONTROLL UTFÖRS ENLIGT BSK-1987 KAP 9 INNEFATTANDE BL.A. GRUNDKONTROLL (KAP 9:4) OCH TILLÄGGSKONTROLL (KAP 9:5).

TILLÄGGSKONTROLL UTFÖRS ENLIGT NEDANSTÅENDE KONTROLLPLAN.

KONTROLLPLAN.

- 1) SYNING AV SVETSAR ENLIGT BSK-1987 MOM 9:531.
- 2) OFÖRSTÖRANDE PROVNING ENLIGT BSK-1987 MOM 9:532. MINSTA OMFATTNING 10% AV VARJE FOG.
- 3) KONTROLL AV RAKHET HOS SÅVÄL ENSKILT RÖR, SOM HOPSVETSAT RÖR.
- 4) KONTROLLANTEN SKALL DOKUMENTERA KONTROLLRESULTATEN FÖR VARJE PÅLE.

Fig 24 (forts). Exempel på skarvutförande och föreskriftstext för grov stålrörspåle, ELU-konsult 1993.

Fallhejare

Fallhejare är fördelaktig när påles bärförmåga skall verifieras dynamiskt, t ex genom stötvågsmätning. Stor kraft måste kunna slås in i pålen för att aktivera spetsbärförmågan, vilket innebär att stor fallhöjd (>2 m) bör kunna användas. Tung hejare är att föredra. Slagenergien kan ökas genom att använda större fallhöjd, men denna möjlighet begränsas av att påkänningen i pålmaterialet växer vid höjning av fallhöjden. Risken för sönderslagning blir då större.

När pålar skall slås till gott fäste mot lutande bergyta är fallhejare lämplig att använda genom att fallhöjden kan varieras.

Dubbelverkande hydraul- eller luftdrivna hejare

I dubbelverkande hejare accelereras slagkolven snabbare än i fallhejare, genom att ett övertryck appliceras på översidan av kolven. I övrigt fungerar den som en fallhejare.

En variant av denna hejartyp är hydrauliskt drivna s k dubbelverkande slagdon. Dessa finns i flera storlekar och är i vissa fall kapslade så att de kan arbeta under vattenytan.

Dieselhejare

Dieselhejare driver pålen relativt snabbt, slår centriskt och ger sällan skador på stålrörspålar trots förhållandevis hård slagning. Effektiviteten, uttryckt som förhållandet mellan uppnådd och teoretisk stötenergi i pålen är dock förhållandevis låg för denna typ av hejare.

Dieselhejare är direkt olämpliga vid pålslagning i lös lera och mot berg. I lös lera är det ofta svårt att få hejaren att arbeta kontinuerligt på grund av att pålmotståndet blir för litet för att förbränningstrycket skall förmå att kasta upp hejaren så högt att den åter tändes. Mot berg ger rekyl från pålspetsen ökad fallhöjd och ökad kraft i hejarslaget varför det finns risk att pålen slås sönder vid spetsen. I ogynnsamma fall kan den rekyl en kraftig spetsreflex orsakar, i kombination med förbränningskraften, bli så stor att slagkolven skjuts ut ur sitt styrrör.

En tumregel är att en dieselhejare driver pålen ungefär lika bra som en fallhejare som har dubbelt så stor slagkolvvikt som dieselhejaren.

Miljöproblem, oljesprut och buller, gör att dieselhejare används allt mindre. I flera länder är deras användning förbjuden i vissa områden.

Vibrohejare

Vibrohejaren har viss likhet med dieselhejaren, så till vida att den i regel fungerar bäst vid drivning i friktionsjord, sämre i kohesionsjord och är direkt olämplig för pålar som slås mot berg.

Vibrohejare spänns i regel fast i pålen hydrauliskt, vilket medför att dragkrafter uppstår i pålen under drivningen.

En del av den tillförda energin går åt att packa jorden i pålens omgivning. I gränsskiktet mot pålen kan jorden packas sämre. Vibrodrivna friktionspålars bärförmåga blir därför ibland lägre än för pålar drivna med diesel- eller fallhejare.

Vibrohejare fungerar bäst i löst lagrad friktionsjord under grundvattenytan och dåligt i fast lagrad friktionsjord. Den kan ge upphov till störande vibrationsutbredning i lera till stora avstånd från pålningsplatsen.

Bottenslagning

Tekniken att slå rörpålar med hejaren i botten av pålen är en specialmetod som ibland kommer till användning. Bottenslagning lämpar sig bäst för huvudsakligen spetsburna pålar och friktionspålar men kan också användas för kohesionspålar.

Fördelen med bottenslagning är att bullernivån blir låg och att neddrivningskraften blir störst där den behövs bäst i slutskedet av nedslagningen. Hejarslaget ger en nedåtriktad tryckvåg mot spetsen och en uppåtgående dragvåg. Ju större spetsmotstånd och ju mindre spetsrörelse som uppkommer, desto mindre blir den energistjälande dragvågen uppåt i pålen. I slutskedet av slagningen av en spetsburen påle kan således större energi tillföras spetsen om man slår där i stället för på pålhuvudet med samma hejare och samma fallhöjd. Detta gäller speciellt för långa pålar med betydande mantelmotstånd.

En nackdel med bottenslagning är att pålröret och pålspetsen utsätts för stora dragkrafter under nedslagningen.

Inmejsling i berg

Vid inmejsling av pålspets mot berg är hög spänningsnivå och kortvarigt stötförlopp nödvändigt. Beträffande berginmejsling av dubbar med stor diameter, av det slag som ofta åsyftas vid bergskor anbringade på grova stålrörspålar, kan tillräckligt kort stigtid för inmejsling vara svår att åstadkomma. I sådana fall uppkommer krossning av berget inom ett område kring dubben. Istället bör rörformad dubb och ändborrad styrdubb användas, om pålen nedtill får dåligt sidostöd av jorden, exempelvis vid lera direkt på berg.

4.3 Neddrivning

Provpålning

Exempel på hur en provpålning kan utföras redovisas i Pålkommisionens Rapport 59, "Anvisningar för provpålning med efterföljande provbelastning" [28]. Tillämpningen av dessa anvisningar anpassas till den aktuella provningens behov och krav.

Verifiering av geoteknisk bärförmåga

Det är sällan möjligt att bestämma det karakteristiska värdet för spetsbärförmågan hos pålar med stor diameter med hjälp av konventionell stötvågsmätning. Detta på grund av

den stora rörelse som i regel krävs för att mobilisera fullt spetsmotstånd. Det krävs nämligen så stor spetsrörelse som ca 5-10 % av påldiametern.

För friktions- och kohesionspålar kan spetsbärförmågan beräknas med geostatisk beräkningsmetod. I vissa fall tillåter överliggande konstruktion inte så stora sättningar som motsvarar högt utnyttjande av spetsbärförmågan. I många fall kan därför bara 1/4-1/10 av spetsens brottbärförmågan utnyttjas. Trots att en geostatisk beräkning innehåller flera osäkerheter kan den ändå vara en godtagbar metod att verifiera spetsbärförmågan.

För spetsburna pålar, kan i regel godtagbar verifiering av förutsatt spetsbärförmåga uppnås genom stötvågsmätning och sjunkningsmätning. Det är viktigt att genom simulering, eller likvärdig metod, i förväg klarlägga hur tung hejare som erfordras för att aktivera spetsbärförmågan, utan att överskrida pålrörets dimensionerande hållfasthet vid verifieringen.

Det är möjligt att driva ned långa pålar med betydligt lättare hejare än som erfordras för att verifiera bärförmågan på ett säkert sätt. Detta gäller speciellt när bärförmågan verifieras vid efterslagning då pålen "vuxit fast" i jorden. Också för detta fall är simulering av slagförloppet lämpligt att utföra i förväg, innan man slutgiltigt bestämmer vilken slagningsutrustning som man skall använda.

4.4 Åtgärder efter neddrivningen

Kontroll att pålen är oskadd efter avslutad slagning

Vid pålning från ponton, men också vid pålning på land till stort djup, föreskrivs ofta att pålarna skall slås vattenfyllda för att minska påfrestningen på rören under slagningen. Före kapning kan, då så föreskrivs, kontrolleras att pålarna är täta genom att pumpa ur vatten till ca 2 m djup under omgivande vattennivå och mäta om vattenytan stiger i röret.

I vissa fall ställs krav på att alla pålar tolkas med rörformad tolk för kontroll att pålarnas tvärsnitt är intakt. Vid behov videofilmas pålen för att identifiera misstänkta skadors läge och utseende för val av åtgärd. Kontrollera om jord har trängt in i läckande påle. Om så är fallet, begränsa vattenpumpningen för att undvika ytterligare jordinträngning som kan medföra att pålen och andra närstående pålar får minskad bärförmåga.

Rakhetsmätning

Rakhetsmätning utförs tidigt efter slagningen i vattenfyllt pålrör, t ex enligt metod beskriven i Pålkommisionens Rapport 87, "Bro C339 över Ekolsundsviken. Grundläggning med stålörspålar. Konstruktion och arbetsutförande", [7b].

Mätning av bucklor

När pålröret förutsätts ensamt bärande måste, efter neddrivning och stoppslagning,

kontrolleras att uppkomna lokala bucklor inte överskrider de värden som förutsatts vid dimensioneringen. Teknik för sådana mätningar redovisas inte i denna rapport.

Kapning

Vid pålning från ponton beaktas behov av och krav på efterslagning innan pålarna kapas.

4.5 Armering och gjutning

Armering

Gles armering är arbetstekniskt fördelaktig. Fria avståndet mellan armeringsstänger bör ej understiga 50 mm.

Armeringskorgar utförs förtillverkade och lyfts på plats. Vid längre pålar än 8-10 m måste armeringskorgarna skarvas. Korgarna måste vara utformade så att lyftning och nedsänkning kan ske utan att skadliga deformationer uppkommer.

Lyftning och sänkning av armeringskorgar utgör farliga arbetsmoment vid vilka olyckor inträffat. De förhållanden som uppkommer om maskinhaveri, linbrott eller liknande inträffar måste beaktas vid planeringen av arbetet.

Gjutning

Gjutningen omgärdas av föreskrifter i normer, exempelvis Bronormen och BBK-79. Därutöver bör hänsyn tas till följande förhållanden.

- Ur gjutteknisk synpunkt är det fördelaktigt med ballast av rundade korn om gjutningen sker i rör. Betongmassan sammansätts så att den flyter ut ordentligt.
- För stålrör med bärande kärna av armerad betong, gjuten i torrhet, skall före gjutning lämpligt betongrecept och förfarande för vibrering utprovas, genom att ett tillräckligt antal ca 3 m långa provbitar av stålrör armeras och gjuts. Sedan betongen hårdnat skärs rören upp och betongytornas utseende undersöks. Detta förfarande minskar eller eliminerar behov av kontroll i form av kärnborrning. Gjutning i torrhet kan i tillämpliga delar ske enligt anvisningar för gjutning av pelare, se BBK-79.
- Vid gjutning under vatten tillförs betongbruket genom rör som under hela gjutningen skall mynna minst 1,5 m under gjutyten. Gjutning i vatten eliminerar behovet av att läns pumpa pålröret. Det är ofta till fördel eftersom den lyftkraft som uppkommer som ett resultat av länsningen kan vara kostsam att ta upp. Gjutrören skall ha täta skarvar. Gjutningen skall ske i en följd och med tillräckligt hög stighastighet. Vanligen krävs minst 0,30 m/tim. Retarderande tillsats brukar användas. Gjutning i pålröret bör ske till ca 0,5 m över nominell nivå för att kompensera för betongmassans sättning och för att säkerställa god betongkvalitet vid påltoppen.

5. Kontroll

Kontrollens omfattning skall anges i en kvalitetsmanual och skall behandlas detaljerat i en arbetsberedning med genomgång av erforderlig och föreskriven dokumentation, vem som skall dokumentera och när dokumentation skall ske.

Det är ett gemensamt intresse för pålningsentreprenören och hans beställare att arbetet löper utan hinder och att fel upptäcks tidigt och åtgärdas på ett tekniskt och ekonomiskt riktigt sätt. Ett nära och förtroendefullt samarbete mellan beställarens kontrollant och pålningentreprenörens personal minskar risken för fel. Det är viktigt att beställarens kontrollant har egen djup sakkunskap om pålning eller har tillgång till sådan sakkunnig rådgivare.

5.1 Leveranskontroll

Stålrörselement

Mottagningskontroll skall omfatta registrering av bucklor, ovalitet och andra skador på rörelementen. Levererat rörelement skall uppfylla de toleranskrav som anges i tabell 10, eller de föreskrifter som gäller för projektet ifråga. Kontrollomfattningen bör framgå av kontraktet.

Varje element skall ha en identifieringsmarkering och till elementet skall höra material-, hållfasthets- och kvalitetsverifikationer från stålverket.

Tabell 10. Rekommenderade toleranser för geometrisk form och dimensioner.

Objekt	Tolerans
Diameter, rör	$300 \leq D_y < 1000$: $\pm (1+0,005D_y)$ mm $D_y \geq 1000$ mm : ± 6 mm
Orundhet	Skillnad mellan största och minsta diameter får ej överskrida 2% av D_y
Godstjocklek	≤ 10 mm : $+ 0,45$ mm : $- 0,35$ mm
"-	> 10 mm : 10 % $-0,5$ mm
Rakhet (pilhöjd)	Max avvikelse 0.1% av rörlängden
Ändytas avvikelse från rät vinkel	$< 0,5$ % av utvändig diam, dock < 4 mm

I de fall pålröret medverkar i lastupptagandet anges även toleranskrav i de normer som ligger till grund för dimensioneringen, vanligen Bestämmelser för Stålkonstruktioner, BSK 1987, kapitel 9, Kontroll.

Bergskor

Kontrollera att levererad bergskos utformning överensstämmer med föreskrivet utförande, med avseende på stålmateriäl, dimensioner samt utförandet av bergdubbens spets och bergskons svetsar.

Om egg på bergdubb utförts i form av påläggssvets kontrolleras denna med avseende på eventuell sprickbildning. Om det är fråga om bergdubb med härdad egg kontrolleras att härdningen inte skadats genom svetsning eller annan åverkan.

5.2 Drivningsfärdigt påelement

Rörpåelement med beslag, t ex berg- eller plansko för slutna pålar, förstövning i öppen påles nederdel, skarvar, lyftöglor, iordningställs i regel på fabrik eller under fabriksliknande förhållanden på arbetsplatsen. Dessa påelement kontrolleras med avseende på kraven i tabell 10 samt de övriga specifikationer som gäller.

Svetsar kontrolleras fortlöpande genom okulärbesiktning och med oförstörande provning. Om så krävs utförs stickprovskontroll av utomstående auktoriserad svetskontrollant. Kontrollen dokumenteras. I BSK finns detaljerade regler för kontroll av svetsning.

5.3 Drivning

Hejarens funktion

Kontrollera att föreskriven hejare används och att tillhörande styrning och slagdyna centrerar hejarslagen och riktar slagen i pålens längdriktning.

Sjunkningsmätning

Ofta föreskrivs att slag/sjunkningsmätning skall utföras för hela slagningsförloppet. Dagens påmaskiner kan förses med utrustning för automatisk registrering. Registreringar överlämnas fortlöpande till beställaren.

Om pålröret skall medverka i lastupptagandet skall hela slagningsförloppet registreras med avseende på antal slag och använd fallhöjd. Härigenom ges underlag för bedömning om den utmattande lasteffekten blir större än vad som förutsatts vid dimensioneringen av pålen.

5.4 Efter drivning

Läge, lutning och rakhet

Pålens avvikelse från avsett läge i plan och nivå samt avvikelse från avsedd lutning och riktning, mäts in efter avslutad slagning. Om misstanke uppstår att pålarna har flyttat sig när grannpålar blivit slagna görs förnyad inmätning. Genom tolkning kontrolleras i vilken mån pålen är bucklad eller krökt.

Armering och gjutning

Har provgjutning utförts skall recept, konsistens och vibreringsinsats kontrolleras.

Betong och armering dimensioneras vanligen med beaktande av föreskrifter i Bronormerna och BBK-79. Detta innebär att i dessa föreskrifter angivna kontrollinsatser måste utföras.

5.5 Kvalitetssäkring

Allmänt

Program för kvalitetssäkring upprättas av entreprenören i samråd med beställaren. Kvalitetssystemet bör uppfylla kraven i ISO 9000. Programmet skall behandla

- *organisation*
- *information*
- *egenkontroll*
- *annan kontroll*
- *dokumentation*

Kvalitetssäkring i projektering och konstruktion

Projektering och konstruktion av anläggningar som innefattar grova stålrörspålar kräver normalt kvalificerad och specialiserad kompetens hos projektörer och konstruktörer. Det är därför viktigt att arbetet redan i detta stadium utförs med tillräckligt hög kvalitet.

Flera företag har egna kvalitetssäkringssystem. För att säkerställa genomförandet finns en eller flera kvalitetsrevisorer. Denne är vanligen en erfaren konstruktör inom företaget, eller någon med liknande bakgrund.

Kvalitetssäkringssystem utarbetas i samråd med de större beställarna, exempelvis Vägverket och Banverket. Systemet läggs till grund för det tillstånd till egenkontroll som företaget kan erhålla. Beställaren skall ha möjlighet att genomföra en egen revision av entreprenörens kvalitetssäkringsprogram.

Kvalitetssäkring i upphandlingen

Kravnivå skall anges i förfrågningsunderlag. Anbudsgivare skall redovisa sitt system i anbudet.

Kvalitetssäkring i utförandet

Kvalitetssäkringen i utförandeskedet kan omfatta:

- 1 - organisation*
- 2 - produktidentifikation och produkttegenskaper*
- 3 - tillverkningskrav*
- 4 - utförandebeskrivning*
- 5 - kontroll och provning*
- 6 - behandling av avvikelser*
- 7 - korrigerande åtgärder*
- 8 - kvalitetsdokument*

Ett beprövat sätt att bedriva kvalitetssäkringsarbete för pålningsarbete med grova stålrörspålar i utförandeskedet är att låta entreprenören upprätta en arbetsberedning i vilken utförandet redovisas så detaljerat som projektförhållandena kräver. I arbetsberedningen skall då alla ovanstående 8 rubriker behandlas. Arbetsberedningen överlämnas till beställaren för granskning i föreskriven tid innan arbetena påbörjas. Normalt gäller att arbetena inte får påbörjas innan beställaren meddelat sitt godkännande.

5.6 Checklista

För att undvika de vanligaste felen i samband med grundläggning på grova stålrörspålar redovisas nedan en checklista. Den gör dock inte anspråk på att vara fullständig, utan för vissa projekt måste listan kompletteras.

1. att rätt stålmaterial används, att rören är riktigt tillverkade och uppfyller ställda toleranskrav.
2. att pålsko, eventuell mellanbotten och spetsförstärkning samt övriga anordningar på pålen är riktigt utförda och enligt specifikation.
3. att påle hanteras på föreskrivet sätt vid transport och lyftning upp i pålmaskinen så att den inte skadas.
4. att påle placeras i avsett läge och ges avsedd riktning och lutning samt att verkligt läge och riktning mäts in efter avslutad slagning och eventuellt också när hela pålgruppen är slagen om risk finns att pålar flyttar sig när grannpålar slås.
5. att påle, om så föreskrivs, fylls med vatten innan den slås.

6. Att lämpligt slagdon används med lämplig kombination av fallhöjd/anslags-hastighet och att därtill hörande utrustning anpassas och brukas så att slagen träffar centriskt och i pålens riktning så att pålskallen inte stukas.
7. att påle kapas och skarvas på riktigt sätt.
8. att påle efter slagningen inte är skadligt krökt eller skadad (läckage), utan uppfyller ställda krav på lastkapacitet och geoteknisk bärförmåga.
9. att armeringskorgar ges tillräcklig hållfasthet för inlyftning i pålen och även i övriga avseenden har en lämplig utformning.
10. att armeringskorg i förekommande fall förses med provtagningsrör för urborrnig av provkroppar av betong.
11. att betongbruket uppfyller kraven på hållfasthet och ges retardationstid som anpassas till pållängden och gjutningstiden.
12. att betonggjutningen genomförs med gjutrör och pump på sådant sätt att oönskad luftinblandning inte uppstår, t ex vid skarvning av gjutrör eller genom att gjutröret dras upp över betongöverytan under gjutningen.
13. att den avslutande betonggjutningen görs så att det översta finkorniga och möjligen vattenkontaminerade betongbruket får rinna över rörkanten eller bortförs på annat sätt.
14. att pålhuvudet förses med ev kompletterande tillsatsbeslag för att kunna överföra last från pålplattan direkt till stålröret.

6. Litteratur

1. **Bengtsson, P-E. & Sällfors, G., (1983).** Floating piles in soft, highly plastic clays. Canadian Geotech. Journal, Vol. 20, nr 1, sid 159-168.
2. **Bergfelder, J. & Berndt, D., (1989).** Knicklängen freistehender Pfähle. Bautechnik 66, nr 11, sid 375-382.
3. **Bergdahl, U. & Eriksson, U., (1983).** Bestämning av jordegenskaper med olika sonderingsmetoder. Rapport No 20, Statens geotekniska institut, Linköping.
4. **Bergfeldt, A., (1954).** Balk på fjädrande underlag, Teknisk Tidskrift, vol 84, nr 6, april 1954, sid 311-313.
5. **Bredenberg, H. & Hintze, S., (1988).** Beräkning av pålars last-rörelsesamband med utgångspunkt från sonderingsdata. Bygg och Teknik, vol 80, nr 8, Stockholm, sid 45-49.
6. **Bredenberg, H. & Hintze, S., (1989).** Evaluation of the Load - Deformation Relationship from Penetration Testing. 2nd International Conference on Tunnels and Foundations, London, Proceedings, Vol. 1, sid 161-167.
- 7a. **Bredenberg, H. & Jansson, B., (1990).** Stålrörspålar för broar och kajer. Bygg & Teknik, vol 82, nr 8, november, sid 42-45.
- 7b. **Bredenberg, H (1991).** Bro C339 över Ekolsundsviken. Grundläggning på stålrörspålar. Konstruktion och utförande. IVA Pålkommisionen, Rapport 87, Linköping.
8. **Bredenberg, H. & Broms, B., (1983).** Pålgrupper med sidomotstånd och inspänning. IVA Pålkommisionen, Rapport 54, Stockholm, 23 sid.
9. **Bronorm & Brobrev,** Vägverket, Borlänge.
10. **BYGG del G, kap G 13, (1984).** Liber förlag, Stockholm, sid 322-345.
11. **BYGG del K, kap K 18, (1984).** Liber förlag, Stockholm, sid 310-347.
12. **Cooke, R.W., (1974).** The settlement of friction pile foundations. Conference on Tall Buildings, Kuala Lumpur, No. 3, sid 7-19.
13. **Cooke, R.W., (1978).** The Design of Piled Foundations. Developments in Soil Mechanics, Applied Science Publishers Ltd, London, sid 275-315.
14. **Davisson, M.T. & Robinson, K.E., (1965).** Bending and Buckling of Partially

- Embedded Piles. VI Int Conf on Soil Mech and Found Eng, Montreal, Canada, Proceedings, Vol. 2, sid 243-246.
15. **de Rutier, J., (1981).** Current Penetrometer Practice. Proc Cone Penetration Testing and Experience, St. Louis. ASCE, New York, sid 1-48.
 16. **Fischer, H.C. & Hellman, L., (1963).** Påslagningen och stötvågsteorin. Väg- och Vattenbyggaren, vol 9, nr 1, sid 9-14.
 17. **Fleming, W.G.K., et al (1985).** Piling Engineering. John Wiley and Sons, New York.
 18. **Forssell, C., (1926).** Knäcksäkerhet hos pålar och pålgrupper. Kungliga Väg- och Vattenbyggnadskårens 75-årsskrift, sid 145-176, Stockholm.
 19. **Grande, L.O., (1976).** Samvirke mellom pel og jord. Thesis, Geoteknikk og Fundamenteringslaere, NTH, Trondheim, sid 1-109.
 20. **Hermansson, I. & Grävare, C-J., (1978).** Static bearing capacity of piles from dynamic measurements. Väg- och vattenbyggaren, vol 24, no. 8-9, sid 45-46.
 21. **Jendeby, L., (1986).** Friction piled foundations in soft clay, A study of load transfer and settlements. Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg.
 22. **Meyerhof, G.G., (1956).** Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Proc. Vol 82, SM1, sid 1-19.
 23. **Meyerhof, G.G., (1976).** Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations. Proc. ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 102, No GT3, sid 197-228.
 24. **Nybyggnadsregler, Kap 6:3 (1988).** BFS 1988:18, Allmänna Förlaget, Stockholm.
 25. **Peleveiledningen (1987).** Norges Byggstandardiseringsråd, Oslo, sid 7.04 - 7.10.
 26. **Poulos, H.G. & Davis, E.H., (1968).** The settlement behaviour of single axially loaded incompressible piles and piers. Geotechnique, Vol 18, No 3, sid 351-371.
 27. **Pålkommisionen, Rapport nr 58 (1979).** Grävpåleanvisningar, Dimensionering, utförande och kontroll av grävda, i jorden gjutna pålar, 66 sid.
 28. **Pålkommisionen, Rapport nr 59 (1980).** Anvisningar för provpålning med efterföljande provbelastning, 57 sid.

29. **Pålkommisionen, Rapport nr 83 (1991).** Beräkning av pålars last-rörelsesamband med utgångspunkt från sonderingsdata, 47 sid.
30. **Pålkommisionen, Rapport nr 84 (1991).** Beräkning av dimensionerande bärförmåga för slagna pålar med hänsyn till pålmaterial och omgivande jord. Linköping, 59 sid.
31. **Pålkommisionen, Rapport 60 (1980),** Negativ mantelfriktion längs pålar, 97 sid.
32. **Pålgrundläggning (1993).** Svensk Byggtjänst, 377 s. Stockholm.
33. **Rehnman, S-E., (1968).** Bärighet hos släntberg vid statisk belastning av bergspets - Resultat av modellförsök. IVA Pålkommision, meddelande 15.
34. **Rehnman, S-E., (1970).** Bergdubbens hållfasthet, Resultat från statiska belastningsförsök. IVA Pålkommision meddelande 17.
35. **Smith, E.A., (1960).** Pile Driving Analysis by the Wave Equation. Journ. of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 86, SM 4, sid 35-61.
36. **Terzaghi, K. & Peck, R.B., (1948).** Soil Mechanics in Engineering Practice. 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, sid 490.
37. **Terzaghi, K., (1955).** Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction. Geotechnique, vol 5, nr 4, sid 297-326.
38. **Thorburn, S. & MacVicar, R.S.L., (1971).** Pile Load Tests to failure in the Clyde alluvium. Proc. of Behaviour of Piles Conference, Inst. of Civil Eng., London, sid 1-7.
39. **Tomlinson, M.J., (1987).** Foundation Design and Construction. 5th edition, Pitman Publishing Inc., London, 774 sid.
40. **Van Weele, A., (1989).** Prediction versus performance. 10th Int. Conference of Soil mech. and Foundation Eng., Rio de Janeiro, Brasil. Proceedings, Vol. 4, sid 2259-2273.
41. **Vijayvergiya, V.N. & Focht, J.A., (1972).** A new way to predict the capacity of piles in clay. Proc. 4th Annual Offshore Tech. Conf., Houston, Vol. 2, sid 865-874.
42. **Camitz, G. (1993).** Korrosion och korrosionsskydd av stålpålar och stålspons i jord och vatten. IVA Pålkommisionen, Rapport 93. Linköping

7. Sakordsregister

A

aggressivitet 59
anlagsenergi 22
anlagshastighet 8, 15, 21, 22, 56, 81
arbetsberedning 8, 77, 80
arbetsutförande 8, 11, 19, 21, 22, 70, 75
armering 37, 76, 79, 81
armeringskorg 76, 81
avgaser 25
avnötning 59
axialbelastad 51

B

BBK-79 16, 30, 31, 35, 36, 37, 76, 79
bergdubb 8, 10, 35, 64, 65, 66, 78
bergsko 8, 19, 63, 64, 65, 66, 70, 74, 78
beräkningsmodell 43, 53
betongbestämmelser 20
betongfyllning 30, 31, 35, 58
betongpelare 20
bortslagning 8, 10, 70
bottenplatta 19
bottenslagning 8, 74
Boverket 20, 27, 43
brand 27, 31
bronorm 20
brottgränstillstånd 8, 18, 23, 27, 33, 36
bruksgränstillstånd 8, 27, 33, 36, 37, 48, 59
BSK 13, 16, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 44, 45, 46, 59, 60, 61, 63, 78
buckling 8, 13, 16, 31, 34
buller 24, 25, 73, 74
bunden 8, 27
BYGG 30, 33
Bygg 34, 35
byggnadsskrot 8, 23
bäddmodul 8, 14, 15, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 52, 53, 54
bärförmåga 8, 9, 10, 11, 12, 13, 19, 20, 21, 22, 29, 30, 32, 33, 48, 49, 50, 56,
58, 61, 63, 73, 74, 75, 81
böjknäckning 44, 46
böjmoment 18, 27, 28, 34, 38, 46, 52, 67, 68
böjstyvhet 8, 14, 33, 36, 37, 47, 52, 53

C

CAPWAP 8, 48, 58
checklista 80

D

datorprogram 8, 13, 22, 51
deformationer 22, 23, 69, 76
dieselhejare 9, 25, 73
dieselrök 25
dimensionerande lasteffekt 27, 28
dimensionering 18, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 36, 37, 44, 45, 52, 56, 59, 61, 76, 78
dragspänning 61
drivningsegenskaper 9
drivningskapacitet 10, 21, 22, 25
dyna 8, 9, 11, 21, 27, 49, 56, 57, 58, 70, 73, 78

E

efterslagning 9, 19, 75, 76
egenspänningar 9, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 53
egentyngd 32
elasticitetsmodul 14, 15, 36, 37, 45
elastisk halvrymd 52
elastiskt medium 52

F

fallhöjd 9, 21, 22, 56, 73, 74, 78, 81
falskt stopp 9, 24
flytgräns 9, 15, 38
fortskridande ras 27, 31
frifallshejare 22, 56
friktionsjord 14, 24, 40, 41, 42, 50, 73, 74
friktionsmaterial 42, 43
funktionsstadie 32, 61
funktionstid 9, 12, 59, 60
förankringsstål 62
förhöjd grundläggning 68
förstärkningsring 63
förundersökning 9, 18, 23, 24, 25

G

gastryckhejare 22
geoteknisk bärförmåga 7, 29, 48, 49, 50, 51, 74, 81
gjutrör 76, 81
godstjocklek 9, 10, 12, 15, 17, 18, 21, 31, 33, 34, 35, 45, 59, 60, 61, 77
grundvattenyta 23, 40, 41, 59, 74
gruppverkan 9, 54, 55
gränstillstånd 8, 18, 23, 27, 28, 29, 33, 36, 37, 43, 48, 50, 59
gränstryck 9, 15, 41, 42, 53

H

hejare 8, 9, 13, 15, 17, 19, 21, 22, 24, 25, 56, 57, 58, 73, 74, 75, 78
hinder 10, 17, 18, 19, 23, 25, 61, 64, 77
horisontalkraft 17, 18, 22, 46, 52, 54, 65, 67
hylsa 10
hårdmetallpålägg 10, 65

I

impedans 10, 15, 56
ingjutning 11, 60, 67
ingjutningslängd 67
initialbucklor 10, 31, 33, 34
initialkrokighet 10, 30, 31, 34, 35
initialstötståg 56, 57
inmejsling 74
inspektion 61
inspänd 10, 52, 53, 62
inspänningssnitt 10, 53, 69
isnötning 60
ISO 9000 79
istryck 17

J

jordmodell 48
jordundanträngning 17, 19, 24
jämnstark 70

K

kantavstånd 10, 67
karaktäristiska värden 11, 27, 36, 38, 40, 41, 43, 49
katodiskt skydd 10, 60
knäckfigur 35
knäckning 10, 12, 14, 15, 17, 29, 30, 31, 33, 34, 36, 38, 41, 44, 45, 46, 53
knäckningslängd 10, 12, 14, 33, 34, 38, 41, 44, 45
kohesionsjord 38, 39, 41, 73
kohesionsmaterial 39, 42
kohesionspålar 10, 74, 75
kollektivparameter 10, 14, 32
konsistens 79
konsolideringskoefficient 14, 38
kontroll 11, 13, 17, 21, 26, 33, 46, 60, 61, 65, 70, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81
korrosion 10, 11, 12, 18, 23, 26, 59, 60, 61
korrosionshastighet 10, 12, 23, 59, 60, 61
korrosionsskydd 10, 59, 60
korrosionstillägg 59, 60
kraftfördelning 50, 51, 58, 69
kvalitetsdokument 80
kvalitetsklass 18, 31, 65
kvalitetssäkring 10, 26, 79, 80
kvalitetssäkringssystem 79

L

lagringstäthet 41, 49
lasteffekt 9, 11, 20, 23, 25, 27, 28, 32, 33, 37, 46, 51, 52, 54, 56, 57, 67, 78
lastenhet 19
laster 10, 11, 17, 23, 25, 27, 67
lastkapacitet 11, 29, 30, 31, 32, 81
lastmultiplikator 11, 27
lastväxling 11, 13, 32
ledning 24, 59

leveranskontroll 11, 26, 77
licenssvetsare 70
linjal 33, 34, 63
lutande bergyta 73
lutningar 23, 62, 68
lyftkapacitet 21
lyftöglor 78
läckage 81

M

mall 33, 34
mantelfriktion 9, 11, 49, 50, 51, 69
markförskjutning 24
markstabilitet 24
maskinutrustning 19
medelvattenyta 59, 60
mellanbotten 80
miljöklass 11, 59, 60
miljökrav 21
minimavstånd 11, 67
minimimått 67
mottagningskontroll 77
målning 67

N

neddrivning 8, 9, 17, 19, 20, 21, 33, 51, 58, 60, 65, 70, 74, 75
negativ mantelfriktion 51, 69
normalkonsoliderad 39, 40, 49
numerisk modell 58

O

okulärbesiktning 78
olyckslast 11, 27, 31, 48
omgivningspåverkan 11, 18, 24, 25
omrörning 19

P

parabelformad 35
Partialkoefficient 31
partialkoefficient 9, 10, 11, 14, 27, 29, 31, 32, 43, 44, 48, 49, 50, 53
permanent 11, 22, 27, 32
PIA2 51
PILESET 51
pilhöjd 34, 35, 77
plansko 19, 63, 70, 78
plint 9, 11, 13, 37, 67, 68, 69
ponton 20, 24, 75, 76
porttrycksminskning 24
porvattentryckökning 19
produktionskapacitet 19
propp 11, 19
provmåstning 11, 49, 74

provning 29, 44, 74, 78, 80
påkörning 67, 68
påldetaljer 62, 63, 64, 65, 66
Pålgrupp 68
pålgrupp 12, 13, 28, 48, 54, 55, 67, 68, 69, 80
pållast 17, 62, 67
Pållutning 22
pållutning 12, 23
pålmantel 12, 49, 50
pålningssmaskin 21
påplint 9, 13, 67, 68, 69
pållritning 70
pållrör 8, 10, 11, 12, 19, 21, 23, 26, 32, 34, 35, 56, 58, 59, 62, 65, 70, 74, 75,
76, 78
pållsko 12, 19, 63, 64, 80
pållspets 8, 11, 12, 19, 29, 50, 56, 57, 58, 63, 70, 73, 74
pållägssvets 78

R

rakhetssmätning 12, 75
recept 12, 76, 79
reduktionsfaktor 15, 27, 44, 45, 46
Reflexstöttvåg 57
reflexstöttvåg 57
resistivitet 12, 23
rostskydd 59
rotationer 28, 29
rotvulst 63

S

samverkan 12, 23, 27, 29, 30, 35, 37, 68, 69
sidokrafter 27, 52, 67, 68
sidomotstånd 18, 68, 69
sidorörelse 12, 42, 43
sidotryck 12, 42, 43
sinusformad 46
sjunkningsmätning 12, 75, 78
skal 12, 35
skarvning 21, 70, 81
skjuvhållfasthet 14, 38, 39, 41, 49
skjuvmodul 14, 36
slankhetsparameter 12, 15, 45, 46
snedpålar 67
sonderingsmotstånd 40
sot 25
specialhejare 22
spetsburen 12, 74
spetsmotstånd 12, 49, 50, 56, 57, 74, 75
spetsrörelse 50, 74, 75
sprickbildning 78
spänningsfri 50
spänningskoncentration 61
spänningsvidd 12, 32
stabilitetskontroll 70

stighastighet 12, 76
stigtid 13, 70, 74
stoppslagning 13, 17, 22, 32, 33, 57, 58, 61, 75
strömtryck 13, 68
styrning 13, 78
styv pålgrupp 69
stålspänning 22
stötkraft 13, 21, 56, 57
stöttvågsmätning 8, 13, 22, 32, 58, 73, 74, 75
svavelhaltig 60
svetsfog 26, 34, 57, 63, 70
säkerhetsklass 13, 14, 28, 31, 32, 36, 43
sättningar 24, 75
sättningsmodul 50
sönderslagning 17, 73

T

tolerans 67, 77, 78, 80
tolk 13, 25, 75, 79
topplåt 62
trafik 32
translation 28, 29, 69
transport 11, 18, 25, 70, 80
tryckspänning 22, 37, 56
tröghetsmoment 8, 14, 36, 37, 45
tröghetsradie 12, 14, 45
tvång 25
tvärkontraktionstal 36
tvärsnittsklass 13, 34, 35, 45
tvärsnittstyp 30, 33

U

utförandekontroll 13, 26
utmattning 13, 14, 22, 25, 27, 30, 31, 32

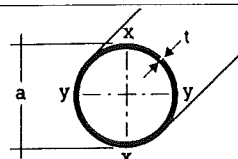
V

varaktighet 21, 27, 28, 36
variabel 27, 32
WEAP 13, 22, 58
Verifiering 74
verifiering 20, 21, 32, 56, 58, 61, 75
vibrationer 13, 24, 25
vibrationshastighet 13, 24, 25
vibrering 76, 79
vibroaggregat 19
vibrohejare 13, 19, 73, 74
Wincklerunderlag 13, 40
Vägverket 18, 27, 43, 79

Y

ytbeläggning 60

Tvärsnittskonstanter

			d = Diameter t = Godstjocklek m = Vikt A = Tvärsnittsarea F = Mantelyta I = Tröghetsmoment			W = Böjmotstånd Z = Plastiskt böjmotstånd i = Tröghetsradie K_v = Vridstyvhets tvärsnittsfaktor W_v = Elastiskt vridmotstånd				
d	t	m	A	F	I	W	Z	i	K _v	W _v
mm	mm	kg/m	mm ²	m ² /m	mm ⁴	mm ³	mm ³	mm	mm ⁴	mm ³
			x 10 ²		x 10 ⁴	x 10 ³	x 10 ³	x 10	x 10 ⁴	x 10 ³
88.9	6.3	12.83	16.35	0.279	140.24	31.55	43.07	2.93	280.47	63.10
139.7	10.0	31.99	40.75	0.439	861.89	123.39	168.55	4.60	1723.79	246.78
184.5	11.5	49.06	62.50	0.580	2348.61	254.59	344.69	6.13	4697.22	509.18
355.6	6.3	54.27	69.13	1.117	10547.21	593.21	768.75	12.35	21094.41	1186.41
355.6	8.0	68.58	87.36	1.117	13201.37	742.48	966.78	12.29	26402.75	1484.97
355.6	10.0	85.23	108.57	1.117	16223.50	912.46	1194.73	12.22	32447.00	1824.92
355.6	12.5	105.77	134.74	1.117	19852.18	1116.55	1472.12	12.14	39704.35	2233.09
406.4	8.0	78.60	100.13	1.277	19873.89	978.05	1269.95	14.09	39747.79	1956.09
406.4	10.0	97.76	124.53	1.277	24475.81	1204.52	1571.66	14.02	48951.63	2409.04
406.4	12.5	121.43	154.68	1.277	30030.67	1477.89	1940.12	13.93	60061.33	2955.77
457.0	8.0	88.58	112.85	1.436	28446.36	1244.92	1612.98	15.88	56892.73	2489.83
457.0	10.0	110.24	140.43	1.436	35091.32	1535.73	1998.42	15.81	70182.65	3071.45
457.0	12.5	137.03	174.55	1.436	43144.80	1888.18	2470.40	15.72	86289.61	3776.35
508.0	8.0	98.65	125.66	1.596	39279.96	1546.46	2000.17	17.68	78559.92	3092.91
508.0	10.0	122.81	156.45	1.596	48520.25	1910.25	2480.37	17.61	97040.49	3820.49
508.0	12.5	152.75	194.58	1.596	59755.40	2352.57	3069.65	17.52	119510.80	4705.15
508.0	13.0	158.70	202.16	1.596	61960.98	2439.41	3186.06	17.51	123921.96	4878.82
559.0	8.0	108.71	138.48	1.756	52564.94	1880.68	2428.98	19.48	105129.89	3761.36
559.0	10.0	135.39	172.47	1.756	65001.14	2325.62	3014.34	19.41	130002.28	4651.24
559.0	12.5	168.47	214.61	1.756	80161.82	2868.04	3733.93	19.33	160323.63	5736.09
559.0	13.0	175.05	222.99	1.756	83143.31	2974.72	3876.24	19.31	166286.61	5949.43
610.0	8.0	118.77	151.30	1.916	68551.35	2247.59	2899.40	21.29	137102.71	4495.17
610.0	10.0	147.97	188.50	1.916	84846.56	2781.85	3600.33	21.22	169693.13	5563.71
610.0	12.5	184.19	234.64	1.916	104754.73	3434.58	4463.23	21.13	209509.47	6869.16
610.0	14.2	208.65	265.79	1.916	118003.90	3868.98	5041.64	21.07	236007.79	7737.96
660.0	8.0	128.63	163.87	2.073	87087.94	2639.03	3401.00	23.05	174175.89	5278.06
660.0	10.0	160.30	204.20	2.073	107870.51	3268.80	4225.33	22.98	215741.02	6537.61
660.0	12.5	199.60	254.27	2.073	133306.41	4039.59	5241.35	22.90	266612.83	8079.18
660.0	14.2	226.15	288.10	2.073	150263.08	4553.43	5923.17	22.84	300526.15	9106.85
711.0	8.0	138.70	176.68	2.234	109162.15	3070.67	3953.84	24.86	218324.30	6141.33
711.0	10.0	172.88	220.23	2.234	135301.41	3805.95	4914.34	24.79	270602.81	7611.89
711.0	12.5	215.33	274.30	2.234	167343.25	4707.26	6099.43	24.70	334686.49	9414.53
711.0	14.2	244.01	310.85	2.234	188735.23	5309.01	6895.48	24.64	377470.47	10618.02
711.0	15.0	257.47	327.98	2.234	198692.07	5589.09	7267.36	24.61	397384.14	11178.18
762.0	8.0	148.76	189.50	2.394	134683.01	3534.99	4548.30	26.66	269366.01	7069.97
762.0	10.0	185.45	236.25	2.394	167028.35	4383.95	5655.37	26.59	334056.71	8767.89
762.0	12.5	231.05	294.33	2.394	206730.99	5426.01	7022.53	26.50	413461.99	10852.02
762.0	14.2	261.87	333.60	2.394	233271.23	6122.60	7941.66	26.44	466542.46	12245.21
762.0	15.0	276.33	352.02	2.394	245633.75	6447.08	8371.26	26.42	491267.49	12894.16
813.0	8.0	158.82	202.32	2.554	163900.55	4031.99	5184.37	28.46	327801.09	8063.99
813.0	10.0	198.03	252.27	2.554	203363.90	5002.80	6448.42	28.39	406727.81	10005.60
813.0	12.5	246.77	314.36	2.554	251860.34	6195.83	8010.65	28.31	503720.69	12391.65
813.0	14.2	279.73	356.35	2.554	284314.90	6994.22	9061.71	28.25	568629.80	13988.43
813.0	15.0	295.20	376.05	2.554	299442.36	7366.36	9553.18	28.22	598884.72	14732.71
813.0	16.0	314.48	400.62	2.554	318221.72	7828.33	10164.71	28.18	636443.45	15656.67
914.0	8.0	178.75	227.70	2.871	233651.37	5112.72	6566.86	32.03	467302.73	10225.44
914.0	10.0	222.94	284.00	2.871	290147.16	6348.95	8172.49	31.96	580294.31	12697.91
914.0	12.5	277.90	354.02	2.871	359708.40	7871.08	10159.43	31.88	719416.80	15742.16
914.0	14.2	315.10	401.41	2.871	406344.46	8891.56	11497.84	31.82	812688.92	17783.13
914.0	15.0	332.56	423.64	2.871	428105.80	9367.74	12124.14	31.79	856211.59	18735.48
914.0	16.0	354.34	451.38	2.871	455141.80	9959.34	12903.83	31.75	910283.61	19918.68
1016.0	10.0	248.09	316.04	3.192	399849.67	7871.06	10120.69	35.57	799699.33	15742.11
1016.0	12.5	309.35	394.07	3.192	496123.06	9766.20	12588.30	35.48	992246.11	19532.40
1016.0	14.2	350.82	446.91	3.192	560761.98	11038.62	14252.12	35.42	1121523.96	22077.24
1016.0	15.0	370.29	471.71	3.192	590950.20	11632.88	15031.14	35.39	1181900.41	23265.76
1016.0	16.0	394.58	502.65	3.192	628479.38	12371.64	16001.37	35.36	1256958.76	24743.28
1220.0	10.0	298.40	380.13	3.833	695737.89	11405.54	14641.33	42.78	1391475.79	22811.08
1220.0	12.5	372.23	474.18	3.833	864326.55	14169.29	18226.35	42.69	1728653.10	28338.58
1220.0	14.2	422.26	537.91	3.833	977764.57	16028.93	20647.10	42.63	1955529.13	32057.85
1220.0	15.0	445.76	567.84	3.833	1030812.26	16898.56	21781.50	42.61	2061624.53	33797.12
1220.0	16.0	475.08	605.20	3.833	1096821.66	17980.68	23195.22	42.57	2193643.32	35961.37