

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research



Verifiering av geoteknisk bärförmåga för pålar enligt Eurokod

Praktiska råd och rekommendationer
vid projektering och kontroll

Peter Alheid
Gary Axelsson
Bo Berggren
Bo Berglars
Ingemar Hermansson
Fredrik Sarvell



STOCKHOLM 2014
Rapport 106

Rapport

Pålkommissionen
Klara Norra Kyrkogata 31
Tel 08-508 938 08
Fax 08-508 938 01
Box 22307
104 22 STOCKHOLM

Beställning

Svensk Byggtjänst
www.byggtjanst.se
08-457 10 00

ISSN
ISRN

0347-1047
IVA/PAL/R—14/106—SE

Upplaga

400 ex

Tryck

F4-Print AB, Stockholm, februari 2014

Förord

Efter införandet av Eurokod i Sverige har dimensionering och verifiering av geoteknisk bärförmåga förändrats. Denna rapport ger en överblick av metoder för verifiering av pålars geotekniska bärförmåga. De pålar som avses är slagna förtillverkade betongpålar, slagna stålpålar, borrade stålpålar och in-situ tillverkade pålar med tvärsnittsmått som understiger 0,6 m.

När dimensionering, installation och verifiering nu ska göras enligt Eurokod beslutade Pålkommisionen i februari 2012 att utveckla ett synsätt som stöds av Eurokod och tidigare regelverk med syfte att säkerställa rätt kvalitet vid grundläggning med pålar och undvika feltolkningar av Eurokod samt att likställa arbetsmetoder och kostnader. Föreliggande rapport är ett resultat av detta arbete.

De parter som främst berörs av pålning i ett grundläggningsprojekt är byggherren, konstruktören, geoteknikern, mätningsteknikern och entreprenören. Pålkommisionen har insett att en skärpning av parternas syn på ansvar behövs av flera skäl när det gäller dimensionering och verifiering av pålars bärförmåga.

Med hänsyn till ekonomiska planer och tidsplaner, är det viktigt att alla i processen i ett grundläggningsprojekt, från idéstadium till projektering, anbudsutformning och slutprojektering, installation och kontroll är medvetna om sin del av ansvaret att projektets resultat blir det avsedda, bl.a. att

- byggherren säkrar projektets finansiering
- projektören utformar konstruktionen och upprättar ett korrekt förfrågningsunderlag
- entreprenören genomför grundläggningsarbeten enligt tydliga beskrivningar
- geoteknikern genomför ändamålsenliga provningar

I Eurokod ställs krav att ansvarig geokonstruktör ska delta i dimensioneringen av geokonstruktioner. Så är inte alltid fallet i praktiken. Vid dimensionering av geokonstruktioner ska den ansvarige geokonstruktören bl.a. ta hänsyn till:

- geologiska och geotekniska förhållanden
- data från tidigare projekt
- omfattning av fält- och laboratorieundersökningar
- osäkerhet i beräkningsmodell
- typ av brottmekanism (sprött eller segt)

Den geotekniska bärförmågan för pålar ska bedömas eller bestämmas vid olika tillfällen, i olika projekteringsskeden, i tekniska beskrivningar, i förfrågningsunderlag samt under utförande av grundläggningsarbeten.

I ett byggprojekts första fas beslutar byggherren att investera i projektet. Kostnadsramar och finansieringsmöjligheter fastställs. En del av projektet utgörs av mark- och grundläggningsarbeten. Byggherren måste vara medveten om att de geologiska förhållandena kan innebära speciella åtgärder, som kan vara både dyrbara och tidskrävande.

I nästa skede genomförs projekteringen, i vilken det kan visa sig att grundläggningen måste utföras med pålar. En preliminär pålplan upprättas av projektören i samverkan med geoteknikern. I pålplanen

finns typ av pålar och antal. Idealt ska också finnas en beskrivning av hur verifiering av pålarnas bärförmåga ska tillgå och omfattningen av verifieringen.

Den preliminära pålplanen ligger till grund för anbudsinfordran. En entreprenör utses, som oftast engagerar en underentreprenör att utföra pålningsarbetet. Underentreprenören ska godta pålplanen eller, om inte alla detaljer finns angivna, tillsammans med den ansvarige geokonstruktören genomföra en egen dimensionering, som innehåller detaljer hur pålningen och verifieringen av bärförmåga ska gå till. I verifieringen kan ingå att utföra stötvågsmätningar i en provpålning. Det är den ansvarige geokonstruktören som tillsammans med utföraren av stötvågsmätningarna avgör om pålarna uppfyller ställda krav på geoteknisk bärförmåga. Om förhållandena så kräver kan byte av pålar, ändring av installationsrutiner och ytterligare kontroller behövas. Det är därför viktigt, med hänsyn till ekonomiska planer och tidsplaner, att alla i processen, från idéstadium till projektering, anbudsutformning och slutprojektering är medvetna om detta och därför tar det ansvar som varje part förväntas ta.

Projekt, där grundläggning utförs med pålar, kan ha olika storlek och olika krav på beständighet samt utföras i olika geologiska formationer. Därmed kan omfattningen av verifieringen av pålarnas geotekniska bärförmåga behöva vara olika. Kunskapen om olika styrande faktorer och betydelse kan dessutom vara olika bland de aktörer som deltar i processen. Det är väsentligt att öka kunskapen hos alla aktörer, via information och utbildning. Ett stort ansvar för detta arbete har Svenska Geotekniska Föreningen, SGF, som har övertagit de dokument och kursplaner som IEG, Implementeringskommissionen för Europastandarder inom Geoteknik, lät utveckla.

Rapporten har utarbetats av en projektgrupp bestående av:

Bo Berggren	Berggren Tech, gruppens ordf.
Peter Alheid	Hercules Grundläggning
Gary Axelsson	ELU Konsult
Ingemar Hermansson	Pålanalys i Göteborg
Fredrik Sarvell	Ruukki Sverige
Bo Berglars	Piling Development

Rapporten har granskats av en referensgrupp bestående av:

Gunnar Holmberg	Skanska Sverige
Per-Evert Bengtsson	Statens geotekniska institut
Johan Lindgren	Nilsson & Lindgren Markkonsult
Kurt Palmqvist	Trafikverket
Karin Larsson	Pålkommisionens sekreterare
Lovisa Moritz	Trafikverket
Hans Gullström	Pålplintar

Stockholm i januari 2014

Bo Berggren

Sammanfattning

I rapporten ges regler och rekommendationer för dimensionering av pålars geotekniska bärförmåga. Reglerna sammanfaller med de krav som ställs i Eurokod.

Enligt Boverkets Författningssamling, BFS, kan pålars geotekniska bärförmåga bedömas och beräknas på olika sätt och med olika underlag. Enligt Trafikverkets regler, som är kopplade till Eurokod, kan betongpålar till broar stoppslås enligt hävdvunna åtgärder i TK Geo (2011:46), Tabell 2.5-4, vilken i rapporten återges i Tabell 5.1.

Dimensionering av kohesionspålars geotekniska bärförmåga utförs i Sverige vanligast med hjälp av beräkningar enligt Pålkommisionens Rapport 100. Dimensionerande värden erhålls enligt IEG:s rapport 8:2008, rev 2, Tillämpningsdokument för EN 1997-1, Kapitel 7 Pågrundläggning, TD Pålar.

Dimensionering av geoteknisk bärförmåga för friktionspålar ges i Pålkommisionens Rapport 103, Slagna friktionspålar med dimensionerande värden enligt IEG:s rapport TD Pålar.

Pålkommissionsrapport 97, Stålkärnepålar, kap 4.4, innehåller anvisningar för att beräkna geoteknisk bärförmåga för både spetsburna och mantelburna stålkärnepålar. Dimensionerande värden erhålls enligt IEG:s rapport TD Pålar.

Pålkommisionens Rapport 102 behandlar geoteknisk bärförmåga för injekterade pålar.

Pålkommisionens Rapporter 100 och 103 innehåller avsnitt om beräkning av geoteknisk dragbärförmåga. Pålkommisionens Rapport 97 Stålkärnepålar, avsnitt 4.4.3, och TK Geo avsnitt 2.5.1.3.1 inklusive Trafikverkets tillägg innehåller beräkning av geoteknisk bärförmåga hos mantelburna dragna stålkärnepålar.

Slagningssimulering, WEAP-analys eller likvärdig, är att betrakta som dimensionering genom beräkning och används för att ta fram ett stoppslagningskriterium samt för att bedöma erforderlig hejarvikt och fallhöjd för att slå pålar med större dimensioner och längder än de vanligt förekommande. Det kan gälla exempelvis stålörspålar med diameter 400 – 1000 mm. I en WEAP-analys ingår en rad antaganden beträffande jordparametrar varför även dynamisk provning bör utföras i samband med att ett projekt påbörjas.

Provpålning med stötvågsmätning utförs ofta i Sverige fortlöpande under produktionsskedet. I samråd med mätteknikern beslutar den ansvarige geoprojektören under arbetets gång om eventuell produktionskontroll med hänsyn till de avvikande förhållanden eller ändrade förutsättningar som påträffas. Gränsen mellan produktionskontroll och provpålning blir därigenom flytande. Förfarandet är inte alltid lämpligt utan provpålningen bör utföras före produktionspålningen för att kunna utvärdera eller bestämma t.ex. lämplig påltyp med hänsyn till pålbarhet vid blockig jord eller släntberg och vid neddrivningsdjup i morän.

Vid stora och komplexa pålningsarbeten rekommenderas att provpålning utförs i god tid före produktionen, för att exempelvis få fram ett väl underbyggt förfrågningsunderlag eller för att få tid att beställa och tillverka rätt påltyp med rätt dimension.

I Eurokods utförandeanvisningar för pålningsarbeten anges att provbelastning ska utföras enligt EN 1997-1 samt ISO 22477-1 och -2 (finns i dagsläget endast som utkast). I TRVFS 2011:12 och BFS 2013:10 EKS 9 avsnitt 7.5.3(1) i EN 1997-1 föreskrivs att dynamisk provbelastning ska vara kalibre-

rad mot statiska provbelastningar för samma påltyp, med liknande längd och tvärsnitt samt liknande markförhållanden. I Pålgrundläggningshandboken beskrivs olika metoder för utförande av en statisk provbelastning samt hur utvärdering av brottlast utförs enligt krypmetoden och enligt Pålkommissionens Rapport 59. Dynamiska provbelastningar kan anses vara tillräckligt tillförlitliga och korrelerade mot statiska provbelastningar för följande påltyper och förhållanden:

- Slagna stål- och betongpålar (förtillverkade), som till övervägande del är spetsburna på berg och friktionsjord (morän).
- Förtillverkade mantelburna friktionspålar tillsammans med CAPWAP-analys.
- Stålkärnepålar och borrade stålrörspålar, spetsburna på berg eller morän.
- Mantelburna stålkärnepålar ingjutna i berg med bedömning av stötkraft vid överkant bruk genom wave-up metod.

Med CASE-metoden beräknas bärförmågan för spetsburna pålar. För pålar med stort mantelmotstånd bör CAPWAP-analys utföras.

Dragbärförmågan kan utvärderas från stötvågsmätning. Enligt både BFS och TRVFS får endast 70 % av mantelbärförmågan för tryckbelastning användas som dragbärförmåga för pålar i friktionsjord. Modellfaktorn 1,3 ska användas när bärförmågan utvärderas med CAPWAP-analys för mantelburna pålar och där spetsbärförmågan är fullt mobiliserad.

Vid dimensionering genom dynamisk provbelastning beräknas dimensionerade bärförmåga, baserad på medelvärde eller minvärde, bestämd genom stötvågsmätning enligt kapitel 7.6 i rapporten. Dimensionerande bärförmåga, bestämd genom statisk provbelastning, beräknas på liknande sätt som för dynamisk provbelastning enligt kapitel 7.6.2. Provbekastningar och dimensionering samt val av antalet representativa pålar ska alltid utvärderas av geotekniskt kvalificerad personal.

Lasteffekter på pålar ska beräknas både för gränstillståndet STR (konstruktiv dimensionering) och GEO (geoteknisk dimensionering). Påldimensionering enligt Eurokod ska utföras enligt dimensioneringssätt 3 (DA3) för STR och dimensioneringssätt 2 (DA2) för GEO.

Vid beräkning av negativ mantelfriktion för pålar i lera rekommenderas att ett korrigerat värde med avseende på flytgränsen används för den odränerade skjuvhållfastheten c_u . För pålar i friktionsjord och överkonsoliderade leror under rent dränerade förhållanden kan antas att den negativa mantelfriktionen per ytenhet är en funktion av det effektiva överlagringsstrycket.

Enligt Eurokod finns tre gränsnivåer av bärförmåga beroende på typ av dimensionering och omfattning på veriferingen. I Tabell 8.1 – 8.4 i rapporten rekommenderas minsta mätinsats för respektive nivå för betongpålar resp. stålpålar. Större mätinsats krävs enligt kapitel 9 för högre lastutnyttjande eller för att pålningsförhållandena bedöms kräva det. Slutlig omfattning av mätinsatsen bestäms efter provpålningen, under produktionskontrollen eller baserat på observationer under pålningsarbetet. Tabellerna 8.1 – 8.4 kan användas vid projektering eller som regleringsnivå vid upphandling av pålningsarbeten, tillsammans med en antagen provningsomfattning.

Vid dimensionering genom provning är lämpligt antal pålar som ska provas starkt beroende av områdets geoförhållanden. Som underlag för dimensioneringen ska stötvågsmätning normalt utföras på minst fyra pålar enligt TRVFS och BFS. Antalet pålar som får medräknas vid dimensionering ska utgöra ett representativt underlag med avseende på installationsätt, verkningsätt och markförhållanden vid den aktuella platsen. Med hänsyn till att jordens egenskaper kan variera kraftigt rekommenderas att inte ha ett för stort avstånd mellan pålar inom ett kontrollområde. I rapporten föreslås att ytan för ett kontrollobjekt inte överskrider $25 \times 25 \text{ m}^2$.

I TRVFS och BFS används begreppet "enhetliga geotekniska förhållanden". Med enhetliga förhållanden avses att variationen är liten med avseende på

- Geologiska förhållanden
- Geotekniska egenskaper
- Markytans nivå
- Jordlagers tjocklek
- Bergytans nivå i det fall pålar grundläggs på eller nära berg
- Pålars avskärningsplan
- Pålars längd och tvärsnittsarea

Eurokod anger att produktionskontroll med bestämning av bärförmågan ska göras när iakttagelser under installationen tyder på stora avvikelser från förväntat beteende med avseende på de geotekniska förhållandena eller tidigare erfarenheter på platsen. Produktionskontroll med bestämning av bärförmågan görs vanligtvis med dynamisk provbelastning eller genom statisk provning i drag. En högre andel än som föreslås i tabell 9.1 bör användas för små objekt med totalt sett ett relativt fåtal pålar. Förutom dynamisk provbelastning finns ett flertal metoder som kan komma till användning vid produktionskontroll. I rapporten ges förslag på situationer, där produktionskontroll med provbelastning rekommenderas.

I många situationer kan provbelastning kompletteras av andra metoder för produktionskontroll. Exempel på sådana metoder är slagräkning, protokollföring av antal slag per 0,2 m sjunkning av pålen och kontinuerlig registrering av hejarens anslagshastighet (slagenergi).

Abstract

This report gives recommendations according to Eurocode on design and verification of geotechnical bearing capacity of piles.

According to Boverket, the Swedish National Board of Housing, Building and Planning, geotechnical bearing capacity can be estimated and calculated in different ways. According to Trafikverket, the Swedish Transport Administration, precast concrete piles can be driven to refusal following old-established measures in "TK Geo, 2011:46", see Table 5.1. in the report. TK Geo is linked to Eurocode.

In Sweden the Swedish Pile Commission has published reports where recommendations are given on designing the geotechnical bearing capacity, e.g.:

- Design of the geotechnical bearing capacity of cohesion bearing piles is commonly made using Report 100. Design values are established using IEG Report 8:2008 rev 2 "Tillämpningsdokument för EN 1997-1", hereafter "TD Piles".
- The geotechnical bearing capacity of friction bearing piles is usually designed according to Report 103 "Driven friction piles" with design values according to TD Piles.
- In Report 97 "Stålkärnepålar" recommendations are given to calculate the geotechnical bearing capacity of both point bearing and skin friction bearing steel core piles. Design values according to TD Piles.
- In Report 102 geotechnical bearing capacities of injected piles are found.
- Reports 100 and 103 give recommendations on calculation of geotechnical bearing capacity in tension piles. Report 97 and TK Geo give recommendations on calculation of geotechnical bearing capacity of skin friction steel core piles in tension.

WEAP and similar analyses are to be regarded as design via calculation and are used to estimate driving criteria including drop height for large diameter piles, develop refusal criteria and to estimate required drop height for driving piles with large dimensions and lengths, e.g. steel tube piles with diameters between 400 and 1000 mm.

Test piling with stress wave measurements is often performed in Sweden continuously during the production phase. The responsible geotechnical engineer and the engineer responsible for the dynamic testing decide during production on control regarding observed variations in the soil conditions. The division between production control and test piling is thereby diffuse. The procedure is not always suitable especially in soil with boulders or in thick hard till or where sloping rock surface can be found.

In large and complex piling works test piling should be performed in good time before production, e.g. to established high quality specifications and to order or produce piles of right type and dimensions.

Eurocode demands load testing according to EN 1997-1 and ISO 22477-1 and -2. According to BFS, regulations by the Swedish National Board of Housing, Building and Planning, and TRVFS, regulations by the Swedish Transport Administration, dynamic load tests shall be calibrated with static load tests for piles of the same type, similar length and dimension and similar soil conditions. In Sweden dynamic load tests are considered to be calibrated with static load tests for the following pile types and conditions:

- Driven steel and precast concrete piles mainly point bearing on rock or hard till.
- Precast concrete skin friction concrete bearing piles together with CAPWAP analyses.

- Steel core piles and drilled steel pipe piles, point bearing on rock and hard till.
- Skin friction steel core piles concreted into rock together with calculated dynamic force at the top level of the concrete via the wave-up method.

The bearing capacity of point bearing piles is calculated with the CASE method while the CAPWAP method is used for piles with a large portion of skin friction resistance.

The bearing capacity of tensile piles can be estimated from stress wave measurements. According to TRVFS and BFS only 70 % of skin friction bearing capacity is allowed as tensile bearing capacity of piles in non-cohesive soils. A model factor of 1.3 shall be used when the bearing capacity is evaluated with a CAPWAP analysis for skin friction piles where the point bearing capacity is fully mobilised.

When designing via dynamic load testing the design bearing capacity is based on mean values or min value of stress wave measurements. Design via static load tests is made similarly. Load tests and design and choice of representative piles shall always be evaluated by qualified geotechnical personnel.

Load effect on piles shall be calculated both in limit state STR (structural design) and GEO (geotechnical design). Pile design according to Eurocode shall be made according to design approach DA3 in STR and design approach DA2 in GEO.

When calculating negative skin friction for piles in cohesive soils the report recommends a corrected value of undrained shear strength c_u with respect to liquid limit. For piles in non-cohesive soils and over-consolidated cohesive soils in drained conditions the negative skin friction resistance should be calculated as a function of the effective overburden pressure.

According to Eurocode there are three levels of bearing capacity depending on the type of design and the quantity of the verification. In Tables 8.1 – 8.4 in the report minimum quantities of measurements are recommended in each class for precast concrete piles and steel piles. Larger quantity is required for larger load utilisation and when piling conditions so demands. The final quantity of measurements is decided after test piling, during production control or based on observations during piling. Tables 8.1 – 8.4 can be used in preliminary design, as regulation level at procurement together with an accepted test quantity.

When designing via testing the number of piles to be tested is strongly dependent on the geo conditions. As a basis stress wave measurement shall be performed for at least four piles according to TRVFS and BFS. The number of piles shall be representative with respect to installation method, pile function and soil conditions. In the report it is recommended that the control area does not exceed $25 \times 25 \text{ m}^2$ but when soil conditions and properties may have a large variation it is recommended to choose a small distance between test piles in a control object area.

In TRVFS and BFS the concept of "uniform geotechnical conditions" is utilised, meaning that the variation shall be small with respect to

- Geological conditions
- Geotechnical properties
- Ground surface elevation
- Thickness of soil layers
- Rock surface elevation when piles are founded on rock or close to rock
- Pile cap elevations
- Pile lengths and dimensions

Eurocode states that production control of bearing capacity shall be made when observations during installation implies large deviation from expected behaviour with respect to geotechnical conditions or from earlier experience at site.

Production control through determination of bearing capacity is commonly made with dynamic load tests or with static tensile load tests. In small piling works with relatively few piles a larger quantity of piles than in Table 9.1 should be tested. Besides dynamic load testing there are several methods that can be used in production control to get a better view of the piling results. In the report suggestions are given for situations where load tests are recommended.

Innehållsförteckning

FÖRORD	3
SAMMANFATTNING	5
ABSTRACT	8
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	9
1 INLEDNING	13
1.1 BAKGRUND OCH SYFTE	13
1.2 AVGRÄNSNINGAR	13
1.3 FÖRUTSÄTTNINGAR	13
1.4 RAPPORTENS INNEHÅLL	14
2 HISTORIK	18
2.1 ALLMÄNT	18
2.2 STOPPSLAGNING ENLIGT STÖTVÅGSTEORI	19
2.2.1 SBN 1975:8	19
2.2.2 Pålkommissionen, Tillämpningsanvisningar för stoppslagning av betongpålar (1982)	19
2.2.3 Pålkommissionen rapport 92	20
2.2.4 Bro 94	20
2.2.5 Pålkommissionen rapport 94	21
2.2.6 Pålkommissionen rapport 98	21
3 STYRANDE DOKUMENT	24
3.1 ALLMÄNT	24
3.1.1 Gällande normer	24
3.1.2 Nationella anpassningar av normer	24
3.1.3 Utförandestandarder	24
3.1.4 Krav och Tekniska beskrivningar	25
3.1.5 Övriga dokument som bl.a. behandlar geoteknisk dimensionering av pålar	25
4 LASTEFFEKT	26
4.1 ALLMÄNT	26
4.2 LASTEFFEKT PÅ PÅLAR FÖR STR INKLUSIVE PÅHÄNGSLAST	26
4.3 LASTEFFEKT PÅ PÅLAR FÖR GEO INKLUSIVE PÅHÄNGSLAST	28
4.4 DIMENSIONERINGSVÄRDEN FÖR LASTER	28
4.5 BERÄKNINGSMODELLER FÖR NEGATIV MANTELFRIKTION	29
5 HÄVDVUNNA ÅTGÄRDER	31
5.1 STOPPSLAGNING AV BETONGPÅLAR ENLIGT TK GEO (2011:46)	31
5.2 STOPPSLAGNING AV BETONGPÅLAR ENLIGT PÅLKOMMISSIONEN RAPPORT 94	31
5.3 STOPPSLAGNING AV STÅLPÅLAR	32
6 DIMENSIONERING GENOM BERÄKNING	36
6.1 ALLMÄNT	36
6.2 KOHESIONSPÅLAR	36
6.3 FRIKTIONSPÅLAR	37
6.4 STÅLKÄRNEPÅLAR	37
6.5 INJEKTERADE PÅLAR	38
6.6 DRAGBELASTADE PÅLAR	38

6.7	SLAGNINGSSIMULERING	39
7	DIMENSIONERING GENOM PROVNING	40
7.1	ALLMÄNT	40
7.2	PROVPÅLNING, UTFÖRANDE OCH MÄNGD	41
7.3	UTVÄRDERING AV BÄRFÖRMÅGA MED STATISK PROVBELASTNING	42
7.4	UTVÄRDERING AV BÄRFÖRMÅGA MED DYNAMISK PROVBELASTNING	42
7.5	UTVÄRDERING AV BÄRFÖRMÅGA FÖR DRAGLAST	43
7.6	DIMENSIONERING GENOM PROVNING	43
7.6.1	Dynamisk provbelastning	43
7.6.2	Statisk provbelastning	46
8	PRELIMINÄR BEDÖMNING AV BÄRFÖRMÅGA	47
8.1	SPETSMOTSTÅND PÅ BERG OCH MORÄN	47
8.2	BÄRFÖRMÅGA SOM KAN PÅVISAS MED STÖTVÅGSMÄTNING	48
8.3	ERFARENHETSVÄRDEN FRÅN STÖTVÅGSMÄTNINGAR, K_1	51
8.4	ÖVERVAKNING AV SPÄNNINGAR, K_2	52
8.5	INVERKAN AV PÅLENS LÄNGD OCH HEJARVIKTEN	52
9	PRODUKTIONSKONTROLL MED BESTÄMNING AV BÄRFÖRMÅGA	54
9.1	ALLMÄNT	54
9.2	FÖRSLAG TILL PRODUKTIONSKONTROLL	54
9.3	KOMPLETTERANDE KONTROLLMETODER	56
10	RIKTLINJER FÖR UTFÖRANDE AV PROVNING	57
10.1	FÖRBEREDANDE ARBETEN	57
10.2	PROVPÅLNING	58
10.3	EFTERSLAGNING	58
10.4	UTVÄRDERING AV BÄRFÖRMÅGA	58
10.5	UTVÄRDERING AV STOPPSLAGNINGSKRITERIUM/NEDSLAGNINGSDJUP	59
10.6	PRODUKTIONSKONTROLL AV PÅLAR	59
10.7	UTVÄRDERING AV PRODUKTIONSKONTROLL	60
10.8	INTEGRITETSKONTROLL	60
10.9	PROVPÅLNING MED STATISK PROVBELASTNING	60
11	RIKTLINJER FÖR REDOVISNING AV PROVNING	62
11.1	PROVPÅLNING MED STÖTVÅGSMÄTNING	62
11.2	PRODUKTIONSKONTROLL	62
11.3	INTEGRITETSKONTROLL	63
11.4	PROVPÅLNING MED STATISK PROVBELASTNING	63
12	REFERENSER	64
A	BERÄKNINGSEXEMPEL	65
A.1	SLAGEN SPETSBUREN STÅLRÖRSPÅLE PÅ BERG	65
A.2	SLAGEN SPETSBUREN BETONGPÅLE PÅ MORÄN	67
B	JÄMFÖRELSE MELLAN NYA OCH GAMLA REGELVERK FÖR STÖTVÅGSMÄTNING	69
B.1	SS-EN 1997 + NATIONELLA BILAGOR	69
B.2	BRO 2004 VS TRVFS 2011:12	70
B.3	BRO 2004 VS TRVFS 2011:12 VID STYVA FUNDAMENT	72
B.4	PÅLKOMMISSIONENS RAPPORT 98 I JÄMFÖRELSE MED BFS 2013:10	73
B.5	PÅLGRUNDLÄGGNINGSHANDBOKEN I JÄMFÖRELSE MED BFS 2013:10	74
B.6	BFS 2013:10 I JÄMFÖRELSE MED TRVFS 2011:12 VID STYVA FUNDAMENT	75

1 Inledning

1.1 Bakgrund och syfte

I och med införandet av Eurokod i Sverige har förfarandet för verifiering av geoteknisk bärförmåga förändrats. Dels när det gäller vilka säkerhetsfaktorer som ska appliceras på uppmätta stötvågsmätta värden, både på medel- och minimivärden, vilket delvis har att göra med att säkerheter flyttats från bärförmågesidan till lasteffektsidan, dels i hur Eurokod ser på provning respektive produktionskontroll. Dessutom har föreskrivande myndigheter, Boverket och Trafikverket, gjort olika bedömningar avseende vissa partialkoefficienter. Eftersom det är ett nytt regelverk har också olika tolkningar av vissa delar uppstått, vilket är helt naturligt, men kanske inte önskvärt. Informationen i Eurokoderna är också utspridd på flera dokument, vilket har gjort den delvis svåröverskådlig. På grund av detta och på grund av uppmaningar från branschen har Pålkommisionen sett sig föranledd att ge ut sammanställda rekommendationer för att ge branschen en gemensam plattform att stå på, med gemensamma spelregler, och på så sätt likställa arbetsmetoder och kostnader.

1.2 Avgränsningar

För att klargöra omfattningen och avgränsningen av denna rapport på ett åskådligt sätt visas i Figur 1.1 ett flödesschema över pålprojektering, där delarna, som behandlas i denna Rapport, är de blåmarkerade, dvs. verifiering av geoteknisk bärförmåga. I viss utsträckning berörs även andra delar, speciellt gäller det lasteffekter på pålar (de gröna delarna). De rödmarkerade delarna berör verifieringen av den strukturella (konstruktiva) bärförmågan, förr ofta benämnd lastkapacitet, kapacitet mot knäckning osv.

I Figur 1.2 redovisas ytterligare ett flödesschema, delvis överlappande, över geoteknisk bärförmåga, med hänvisningar till kapitel och anvisningar i denna rapport.

1.3 Förutsättningar

Innehållet i denna rapport kan givetvis med behållning läsas av samtliga inblandade aktörer i grundläggningsprocessen.

SS-EN 1997-1 är avsedd för beställare, konstruktörer, entreprenörer och myndigheter, och ger vägledning för geoteknisk dimensionering av byggnader och anläggningar och är avsedd att tillämpas tillsammans med EN 1990 - 1999.

I avsnitt 1.3 i SS-EN 1997-1 anges vilka villkor som standarden baseras på:

- Uppgifter som krävs för dimensioneringen ska samlas, registreras och tolkas av därtill kvalificerad personal.
- Konstruktionen ska dimensioneras av därtill kvalificerad och erfaren personal.
- Adekvat samverkan ska råda mellan all den personal som arbetar med datainsamling, dimensionering och byggande.
- Adekvat tillsyn och kvalitetskontroll ska genomföras på byggplatser.

- Utförandet ska genomföras enligt relevanta standarder och specifikationer och av personal med tillräcklig kompetens och erfarenhet.
- Konstruktionsmaterial och produkter ska användas enligt de specifikationer som ges i standarden (SS-EN 1997-1) eller i relevanta material- eller produktspecifikationer.
- Konstruktionen kommer att användas för det ändamål som anges vid dimensioneringen.

Det anges vidare att dessa förutsättningar behöver iakttas av både konstruktören och beställaren. Detta innebär naturligtvis ingen skillnad gentemot hur arbetet bedrevs tidigare.

Lägg alltså märke till att den som väljer en påle för en angiven lasteffekt (strukturell/konstruktiv bärförmåga), eller väljer ett sätt att verifiera en sådan lasteffekt (geoteknisk bärförmåga), är att betrakta som ansvarig geokonstruktör av densamma och ska därmed också vara kvalificerad och ha erfarenhet för uppgiften. Den ansvarige konstruktören har dessutom ansvar att kontrollera att de förutsättningar som ligger till grund för dimensioneringen också uppfylls, såsom raket, längd, omgivande pålar m.m. Till detta kommer också ansvar för pålningens omgivningspåverkan, stabilitet, bärighet för de maskiner som krävs för att utföra arbetet osv. Det kan också innebära upprättande av kontrollplan/kontrollprogram och uppföljning av desamma.

För att vara godkänd ska byggprodukten (pålen) också ha bedömda egenskaper. Begreppet ska ersätta begreppen "typgodkända" eller "tillverkningskontrollerade" material och produkter. Enligt BFS 2013:10, EKS9, § 4 definieras byggprodukter med bedömda egenskaper som produkter som tillverkas för att permanent ingå i byggnadsverk. I samma paragraf anges i punkterna a) till d) vilka produkter som anses ha bedömda egenskaper;

- a) CE-märkta produkter. Betongpålar med tillhörande beslag tillverkas enligt SS-EN 12794. Eftersom SS-EN 12794 är en harmoniserad standard är det krav på att betongpålar ska vara CE-märkta från och med 2013-07-01.
- b) Är typgodkända och/eller tillverkningskontrollerade enligt bestämmelserna i 8 kap. 22-23 §§ plan- och bygglagen (2010:900). Stålpålar omfattas inte av någon harmoniserad standard vilket innebär att de tillsvidare kan typgodkännas. Det är dock möjligt att frivilligt CE-märka stålpålar och deklarerar produktens egenskaper enligt en ETA, European Technical Approval.
- c) Har certifierats enligt ett certifieringsorgan som ackrediterats för uppgiften och för produkten i fråga enligt förordning (EG) nr 765/2008 av den 9 juli 2008 om krav för ackreditering och marknadskontroll i samband med saluföring av produkter och upphävande av förordning (EEG) nr 339/93.
- d) Har tillverkat i en fabrik vars tillverkning och produktionskontroll och utfallet därav för byggprodukten fortlöpande övervakas, bedöms och godkänns av ett certifieringsorgan som ackrediterats för uppgiften och för produkten i fråga enligt förordning (EG) nr 765/2008.

För att byggprodukten ska anses ha bedömda egenskaper ska verifieringen vid tillämpning av alternativen c) och d) ha en sådan omfattning och kvalitet att det säkerställs att uppgivna material- och produktens egenskaper stämmer med de faktiska. Verifieringen ska motsvara minst vad som är beslutat för CE-märkning av liknande produkter.

Slutligen ska pålen installeras i enlighet med de normativa utförandestandarder som finns. Dessa anges i 3.1.3 och gäller Grävpålar, Mikropålar och Massundanträngande pålar.

1.4 Rapportens innehåll

Föreliggande rapport kan läsas i sin helhet eller i de delar den är tillämplig.

I kapitel 2 ges en kort historik över verifiering av geoteknisk bärförmåga för pålar i Sverige.

I kapitel 3 redovisas vilka dokument som är styrande vid dimensionering av geoteknisk bärförmåga.

I kapitel 4 görs en genomgång av vilka lasteffekter på pålarna som ska verifieras av den geotekniska bärförmågan. Lasteffekter på pålar ska enligt SS-EN 1997-1 beräknas både för gränstillståndet STR (rödmarkerat) och GEO (blåmarkerat), se Figur 1.1. Eftersom dimensionering av pålens strukturella bärförmåga utförs enligt dimensioneringssätt 3 (DA3) för STR och verifiering av pålens geotekniska bärförmåga enligt dimensioneringssätt 2 (DA2) för GEO beräknas också lasteffekterna olika. I kapitlet om Lasteffekter beskrivs vidare ett rekommenderat förfarande för beräkning av dimensionerande lasteffekt när påhängslast förekommer. I IEG:s rapport 8:2008, rev 2, Tillämpningsdokument för EN 1997-1, Kapitel 7 Pålgrundläggning (TD Pål) ges exempel på hur säkerhetsklass kan väljas för pålar i STR och i GEO. Det är alltså inte ovanligt att lasten som ska verifieras (med t.ex. stötvågsmätning) inte är densamma som den last, som en beräkning ska verifiera av pålelementets strukturella bärförmåga avseende böjknäckning.

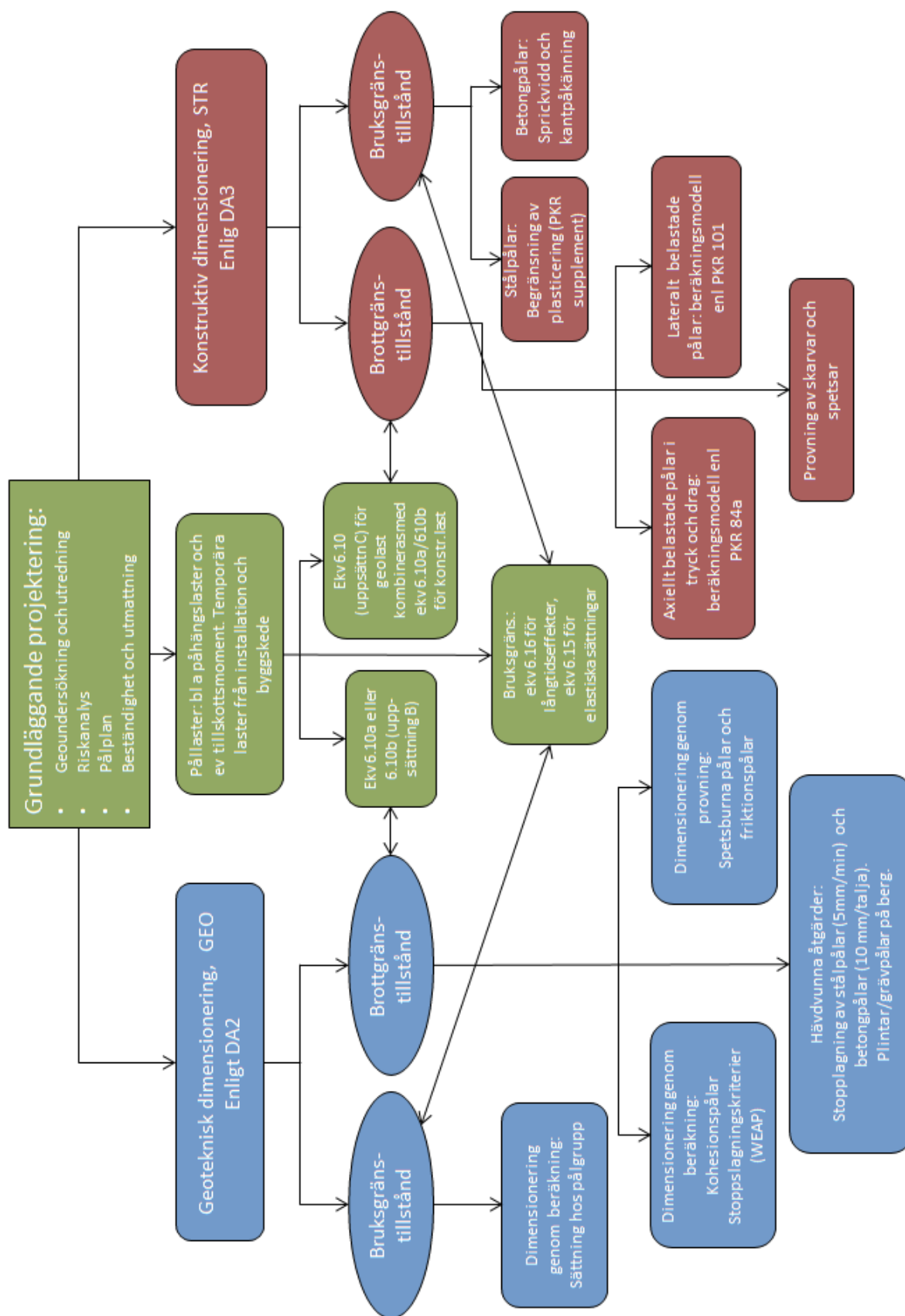
I kapitel 5, 6 och 7 beskrivs olika sätt med vilka geoteknisk bärförmåga kan verifieras, med hävdvunna åtgärder, genom beräkning och genom provning/provpålning. Lägg märke till att Eurokod gör klar åtskillnad på provning/provpålning och produktionskontroll, som i Sverige under senare år tenderat att alltmer flyta samman.

Kapitel 8 redovisar sätt att preliminärt bedöma vilken geoteknisk bärförmåga som kan uppnås för en påle.

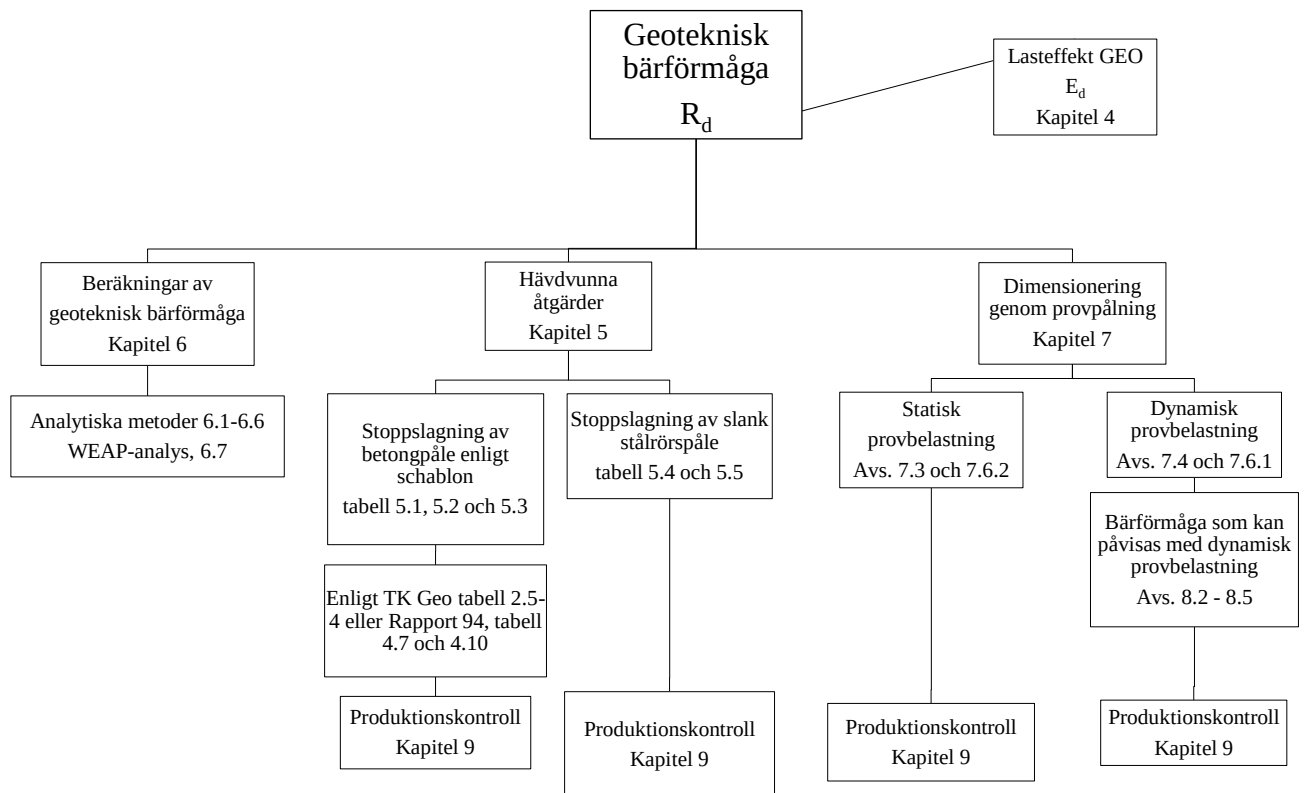
I kapitel 9 definieras olika typer av produktionskontroll, främst kontroll med provbelastning, men också alternativ, som rekommenderas i olika typer av projekt.

Sedan följer kapitel 10 och 11 med rekommenderade riktlinjer för utförande och redovisning av dynamisk provbelastning och produktionskontroll.

Bilaga A redovisar två beräkningsexempel för en typisk slagen, slank, stålpåle och en slagen betongpåle och bilaga B visar en jämförelse mellan det gamla och nya regelverket för stötvågsmätning.



Figur 1.1. Flödesschema över projektering av pålgrundläggning. I denna rapport behandlas i huvudsak den geotekniska delen.



Figur 1.2. Flödesschema över geoteknisk bärförmåga med hänvisningar till kapitel och avsnitt i föreliggande rapport.

2 Historik

2.1 Allmänt

Regler för stoppslagning och stötvågsmätningar av pålar för verifiering av geoteknisk bärförmåga har en lång tradition i Sverige. Bland de första objekten där dokumenterad stötvågsmätning utfördes var vid en ombyggnad av Stockholms Central på 1940-talet där stötvågsmätningar utfördes på stålpålar. Mätningarna gjordes genom att man på toppen av ett antal stålpålar hade monterat en speciell mät-dyna där överdel och underdel var separerade med ett antal svärtade stålkulor. Därefter slog man på pålarna med olika fallhöjder, varefter man skruvade isär mätdynan och mätte upp de svärtade avtrycket som dessa kulor orsakat på dynans över- och underdel. Med hjälp av beräkningsformler, Hertzska tryck, kunde anslagskraften till pålen approximativt beräknas.

En annan mycket tidig stötvågsmätning som utfördes på uppdrag av IVA:s Pålkommitté, senare Pålkommisionen, var slagning och provbelastning av långa betongpålar vid grundläggning av en bro i Gubbero, Göteborg. I pålar med längden 60-70 m hade man på armeringsjärn, på olika nivåer, monterat trådtöjningsgivare. Måtsignaler leddes upp till toppen av pålarna med ingjutna kablar. Mätningarna gjordes normalt på nivå ca 2-3 m respektive 20-25 m upp från pålspets. Pålningen utvärderades med stoppslagningsformler, stötvågsmätningar samt statiska provbelastningar. Provningsen finns dokumenterad i Rapport 99 (1964) från Byggforskningsrådet.

I mitten av 1970-talet började man allt mer införa stötvågsmätningar som ett hjälpmedel att bestämma pålars geotekniska bärförmåga. Tidigare hade stötvågsmätningar mer använts som forskning i olika projekt. CASE-metoden började användas mer allmänt i fält tack vare att mätgivare och datorsystem blivit mer fältmässiga.

Begreppet ”Typgodkännande” har under åren haft något varierande innebörd. Typgodkännande för olika typer av pålar omfattade i början av 1990-talet hela pålsystem, dvs. tillverkning, transport, installation, dimensionering med avseende på lastkapacitet i brott- och bruksgränstillstånd samt verifiering av geoteknisk bärförmåga. I typgodkännandet ingick systembeskrivningar och projekteringsanvisningar och omfattande provningar.

Vissa tillverkare utvecklade också ett eget system för att ta fram säkerhetsfaktorer för dynamiska stötvågsmätningar, baserade på beta-metoden, där hänsyn togs till spridningen i resultaten och mängden provade pålar. Härifrån härrör texter om ”Typgodkända pålsystem” på konstruktionsritningar, som man kan se ännu idag.

Ungefär ett decennium senare ändrades reglerna för typgodkännanden och det enda som då kunde typgodkännas var själva den tillverkade produkten/pålen och sedan dess finns inga typgodkända pålsystem, utan endast pålelement.

I fråga om betongpålar har sedan september 2005 den gamla standarden SS811103, vilken innefattade SP1-3, dragits in och ersatts av SS-EN 12794, vilken utgör ett ramverk för förtillverkade betongpålar. Utformningen av betongpålar är numera mycket friare, pålarna kan optimeras för sin användning på ett helt annat sätt. Som ett litet förtydligande kan nämnas för betongpålar att eftersom pålarna SP1, SP2 och SP3 i allt väsentligt egentligen inte på något sätt strider mot SS-EN 12794, så tillverkas fortsatt pålar med dessa beteckningar. Eftersom beteckningarna är välkända och för att själva pålkonfigurationen (sidmått, armeringsinnehåll osv.) sedan tidigare är optimerad för svenska förhållanden, så lever de också kvar, om än inofficiellt.

SS-EN 12794 är en harmoniserad standard (hEN) vilket innebär att betongpålar i dagsläget måste vara CE-märkta för att få användas som byggprodukt. I och med att en harmoniserad standard för tillverkning av betongpålar existerar så kan inte betongpålar längre typgodkännas. För stålrörspålar finns ingen hEN-standard varför dessa i stället kan CE-märkas enligt en ETA (European Technical Approval). Typgodkännande för stålrörspålar kan fortfarande utfärdas fram till dess att en hEN-standard har upprättats.

2.2 Stoppslagning enligt stötvågsteori

2.2.1 SBN 1975:8

Stoppslagningsregler, upprättade från stötvågsteori presenterades första gången 1975 i SBN Godkännande Regler 1975:8 Pålar. Reglerna omfattade både stål- och betongpålar. I Tabell 2.1 redovisas stoppslagningsreglerna för betongpålar. Dessa regler infördes i Bronorm 1976 (TB 108, Vägverket).

Tabell 2.1. Stoppslagningsregler för betongpålar enligt SBN 1975:8.

Last, kN	Max sjunkning, mm/10 slag vid hejare		Fallhöjd i meter vid pållängd ca.		
	3 ton	4 ton	< 10 m	25 m	50 m
< 330	13	18	0,3	0,4	
450	10	13	0,4	0,5	0,6
600	5	7	0,5	0,5	0,6

Stoppslagningsreglerna enligt Tabell 2.1 gällde för 3 och 4 tons linhejare. Vid slagning med frifallshejare kunde fallhöjder sänkas till 80 % av ovan angivna värden. Reglerna beräknades till att ge en säkerhet av $\gamma_{\text{tot}} = 3,0$ till angivna lasteffekter i Tabell 2.1.

2.2.2 Pålkommissionen, Tillämpningsanvisningar för stoppslagning av betongpålar (1982)

Eftersom stötvågsmätningar blev allt vanligare och man observerade att sjunkningsvärden enligt Tabell 2.1 gav klart högre geoteknisk bärförmåga än vad som angetts i SBN 1975:8 gav IVA Pålkommissionen 1982 ut förslag till "Tillämpningsanvisningar för stoppslagning av betongpålar". Pålingen enligt dessa anvisningar indelades i fyra metoder enligt

- Metod 1: Stoppslagning av pålar enligt SBN 1975:8, Pålar.
- Metod 2: Provpålning och stötvågsmätning på ca 5 % av pålarna, dock minst 4 pålar. Krav på säkerhet $\gamma_{\text{tot}} = 2,5$ för frifallshejare och $\gamma_{\text{tot}} = 2,75$ för linhejare.
- Metod 3: Provpålning på ca 5 % av pålarna samt produktionskontroll ca 10-25 %. Krav på säkerhet $\gamma_{\text{tot}} = 2,0$ för frifallshejare och $\gamma_{\text{tot}} = 2,25$ för linhejare.
- Metod 4: För pålar med högre last än 600 kN ställdes, förutom krav enligt Metod 2 eller 3, även krav på att pålarna skulle vara typgodkända.

Under början och mitten av 1980-talet arbetade entreprenörer fram typgodkännanden för betongpålar enligt ovanstående regelsystem. De första typgodkända stålpålarna utvecklades av entreprenörer i slutet av 1980-talet. Varje entreprenör hade då sin egen stålpåle. Reglerna för dessa typgodkända stålpålar var till vissa delar tveksamma då reglerna medgav att pålar kunde stoppslås med alltför lätta hejare. Med hejarvikter < 1 ggr pålvikt per löpmeter fås ingen säkerhet i stoppslagning. Fjädringar vid pålspetsen omöjliggör säker stoppslagning. Dessutom var laster på pålar satta så högt som $S_d = 0,4$ à $0,5$ ggr F_{stuk} ($F_{\text{stuk}} = f_{yk} \times A$) utan någon direkt kontroll. Bara i enstaka fall utfördes stötvågsmätning eller statisk provbelastning. För att man skulle få godtagbar säkerhet krävdes pålstopp mot berg. Pålsy-

stemet "Systempålar" redovisas i Pålkommisionens rapport 81 (1989). Krav på hejarvikter i relation till pålvikt per löpmeter infördes först år 2000 i Pålkommisionens rapport 98.

Den första stålpålen där krav ställdes på stötvågskontroller vid stora laster var Gustavsbergs G-påle som typgodkändes 1991. Pålningen indelades på liknande sätt som för betongpålarna i tre pålningsmetoder:

- Metod 1: Max last $S_d = 0,28 \times F_{stuk}$, enbart stoppslagning
- Metod 2: Max last $S_d = 0,35 \times F_{stuk}$, stötvågskontroll minimum 10 %
- Metod 3: Max last $S_d = 0,45 \times F_{stuk}$, stötvågskontroll minimum 25 %

I början av 1980-talet användes simuleringsprogrammet WEAP för att studera olika faktorer inverkan på pålars bärförmåga som funktion av sjunkningen, Pålkommisionens Rapport 68, Parameterstudie.

I slutet av 1980-talet och i början av 1990-talet började man arbeta med datorberäkningar av stoppslagning. Med datorsimulering av stoppslagning kunde man beräkna vilka hejarvikter, fallhöjder och sjunkningar som krävdes för stoppslagning av pålar till en godtagbar geoteknisk bärförmåga. Resultat från datorberäkningarna jämfördes med resultat från stötvågsmätningarna.

2.2.3 Pålkommisionen rapport 92

I Pålkommisionens rapport 92 (1993) "Datorsimulering av påslagning" redovisas hur man kan arbeta med datorberäkning av påslagning och beräkna stoppslagningsregler för olika pålar och laster. Med datorsimulering av slagning beräknas även kraftspelet i pålen i drag och tryck för olika slagningsförfallanden. Datorberäkning av stoppslagning kom efter denna rapport att användas vid de vidare arbetena med stoppslagningsregler.

2.2.4 Bro 94

I Vägverkets BRO 94 (1994) infördes stoppslagningsregler för betongpålar utifrån datorberäknade stoppslagningsregler. Samtidigt upprättades nya krav på säkerheter vid stötvågsmätningar i och med att man införde beräkningar av laster enligt partialkoefficient-metoden. Regler för dimensionerande geoteknisk bärförmåga vid stoppslagning av betongpålar framgår av Tabell 2.2 och krav på totalsäkerhetsfaktorer vid stötvågsmätning av Tabell 2.3. Påslagning räknades enligt normer i SK 2.

Tabell 2.2. Dimensionerande geoteknisk bärförmåga R_d (SK 2), i kN för fallet sjunkning 10 mm/10 slag. Regler enligt BRO 94 till BRO 2004.

Hejare	Fallhöjd, m	Dimensionerande geoteknisk bärförmåga R_d (SK 2), kN	
		235 × 235, mm ²	270 × 270, mm ²
3 ton	0,3	435	500
	0,4	520	600
	0,5	595	670
4 ton	0,3	490	585
	0,4	585	685
	0,5	655	770

Tabell 2.3. Krav på säkerhet (γ_{tot}) vid stötvågsmätning (SK2). Regler enligt BRO 94 till BRO 2004.

Antal pålar	Jord	Berg
3	1,95	1,70
4	1,85	1,60
6	1,80	1,55
10	1,70	1,50
20	1,65	1,45
alla	1,60	1,40

2.2.5 Pålkommisionen rapport 94

I Pålkommisionens rapport 94 (1996) "Standardpålar av Betong-lastkapacitet och geoteknisk bärförmåga" redovisas stoppslagningsregler för betongpålar slagna med frifallshejare och linhejare och beräkning av dimensionerande bärförmåga för de olika säkerhetsklasserna SK1, SK2 och SK3.

Stoppslagningsreglerna är i princip samma som i Bro 94 förutom att det förts in begränsningar i fallhöjder för korta pålar för att inte slå sönder dessa. Rapporten redovisar även beräkningar av lastkapacitet för standardpålarna SP1, SP2 samt SP3 inklusive deras bergskor och skarvar.

Exempel på stoppslagningsregler och beräkning av dimensionerande bärförmåga i SK 2 för SP1 pålar med 3, 4 och 5 tons frifallshejare redovisas i Tabell 2.4.

Tabell 2.4. Stoppslagning samt Dimensionerande geoteknisk bärförmåga R_d (SK 2), i kN för sjunkning 10 mm/10 slag samt 3 mm/10 slag för SP 1 pålar. Regler enligt Pålkommisionen Rapport 94. Beräkning i SK 2.

SP1 [mm/10 slag]	Fallhöjd [m]	3 ton	4 ton		5 ton	
			L>8 m	L< 8 m	L>8 m	L< 8 m
10 (jord)	0,2	320	370	410	435	500
	0,3	435	490	550	535	<u>550</u>
	0,4	520	580		<u>575</u>	
	0,5	<u>550</u> ¹⁾				
3 (berg)	0,2	350	410	455	480	550
	0,3	475	550	<u>550</u>	580	
	0,4	565				

¹⁾ Understrukna tabellvärden innebär att fallhöjden ska sänkas med 5 cm

2.2.6 Pålkommisionen rapport 98

För att få enhetliga regler för olika slanka stålplåtar gav Pålkommisionen ut rapport 98 (2000) "Dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålplåtar". Reglerna i rapport 98 omfattar regler för stoppslagning och stötvågsmätningar men även regler för beräkning av lastkapacitet inkl. skarvar och bergskor, storlek på avrostning i olika jordar samt regler för rakhetsmätningar.

Kraven på totalsäkerhetsfaktorer vid stoppslagning och stötvågsmätningar i rapport 98 var samma som enligt reglerna i Bro 94, se Tabell 2.5. Skillnaden i regler mellan Bro 94 och rapport 98 var att reglerna för Bro 94 gällde för ett objekt av typ ett brostöd (utan angivelse av storlek). I rapport 98 ges krav på mätning både av ett minsta antal pålar men även krav på att en viss procentandel av pålarna

skulle stötvågskontrolleras. Detta för att bättre få in en statistisk bild av möjliga variationer i pålgrundläggningen.

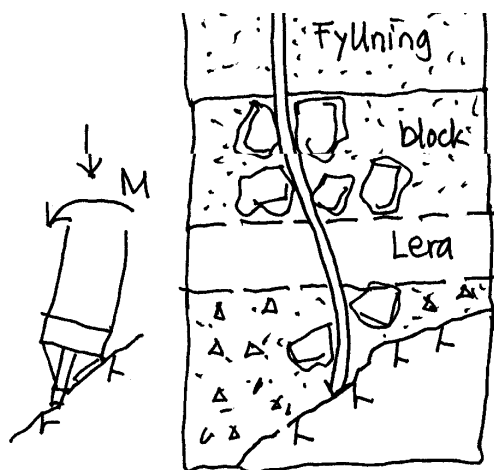
Tabell 2.5. Krav på säkerheter enligt Bro 94 t.o.m. Bro 2004 samt Pålkommisionen rapport 98.

Antal prov per objekt	Motsvarar i procent ca	Krav Säkerhetsfaktor Pkr 98; SK 2		Krav Säkerhetsfaktor Bro 94; SK 2	
	Rapport 98	Jord	Berg	Jord	Berg
0	0 %	2,3	2,1	2,3	2,1
3	5 %			1,95	1,7
4	10 %	1,85	1,65	1,85	1,6
6				1,8	1,55
10	25 %	1,7	1,5	1,7	1,5
Alla eller mätt påle	100 %	1,6	1,4	1,6	1,4

Eftersom tabellen i Bro 94 även kom att användas för långsträckta bankpålningar infördes i Bro 2004 en begränsning av storleken för objektet (stödet) till max $30 \times 30 \text{ m}^2$. Vid större objekt skulle objektet indelas i delområden, se skrivningar i Bro 2004.

Lastbegränsning

En påle kan inte stoppslås hårdare än dess lastkapacitet för stoppslagning (R_{dyn}). Stötvågen vid stoppslagning belastar pålen med tryck, drag och moment samtidigt, se Figur 2.1. Momentet i pålen skapas av snedslag, pålens krokighet eller excentricitet nere vid spetsen. Bro 94 och Bro 2004 anger ingen regel för hur hårt man kan stoppslå en påle utan enbart krav på säkerhetsfaktorer γ_{tot} .



Figur 2.1. Geotekniska omständigheter och lasteffekter i en installerad påle

Pålens lastkapacitet vid stoppslagning beräknas enligt rapport 98 som:

$$R_{dyn} = F_{max} \leq f_{yk} / (1/As + e/W_p) \approx 0,85 F_{stuk} \quad \text{Ekv 2.1}$$

där

R_{dyn} = Pålens lastkapacitet vid slagning (den övre gränsen för hur hårt man kan slå på pålen)

F_{max} = Max stötvågs kraft i pålen

A_s = Pålens tvärsnittsarea
 W_p = Pålens plastiska böjmotstånd (betecknas ofta med Z)
 e = Excentricitet satt till största värdet av $D_y/20$ alt. $D_{dubb}/10$

Enligt Pålkommissionens rapport 98 indelas pålningen i tre metoder, vilka begränsar pålarnas dimensionerande geotekniska bärförmåga eller dimensionerande lasteffekt S_d . Den övre gränsen styrs av pålens kapacitet för stoppslagning, R_{dyn} , och de krav som ställs på säkerhet i stoppslagning. Hur dessa nivåer har tagits fram redovisas i rapport 98.

Indelning

I rapport 98 indelas pålningen i tre nivåer (utförandeklasser) enligt:

- 2A: Maximal last $S_d = 0,3 \times F_{stuk}$, enbart stoppslagning
- 2B: Maximal last $S_d = 0,4 \times F_{stuk}$, stötvågskontroll minimum 10 %
- 2C: Maximal last $S_d = 0,5 \times F_{stuk}$, stötvågskontroll minimum 25 %

Stoppslagningstabellen för betongpålar enligt Bro 2004 var beräknad med datorsimulering av stoppslagning (WEAP) för konservativa val av jordparametrar med krav på totalsäkerhetsfaktor $\gamma_{tot} = 2,3$ enligt Tabell 2.5. Datorberäkning av stoppslagning och valet av jordparametrar redovisas i Pålkommissionens rapport 92 (1993).

På motsvarande sätt beräknades stoppslagningsregler för RR-pålar (Rautaruukki-pålar) i kombination med olika frifallshejare. Stoppslagningstabeller redovisades i typgodkännandet (1993) för pålarna RR90 till RR220 vid slagning med olika frifallshejare. Beräkningar gjordes på samma sätt som för betongpålar med datorprogram WEAP och med krav på totalsäkerhetsfaktor $\gamma_{tot} = 2,3$.

Jordmodellen för datorberäkningen av de slanka stålpålarna redovisas i rapport 98. Lasteffekten på pålarna begränsades till $S_{d,max} = 0,3 \times F_{stuk}$ med hänsyn till pålarnas lastkapacitet vid stoppslagning. Tabell 2.6 visar ett exempel på stoppslagningstabell.

Tabell 2.6. Dimensionerande geoteknisk bärförmåga i kN vid stoppslagning av några RR-pålar till sjunkning $s = 5$ mm/10 slag. Lågbelastade pålar - enbart stoppslagningsregel. Beräkning i SK2.

Påle	F_{stuk} , kN	R_d , kN	Hejare	Fallhöjd i meter vid pållängd ca.			
		$0,30 \times F_{stuk}$	ton	5 m	10 m	15 m	30 m
RR140/8	1456	437	2	0,3	0,45	0,55	0,70
RR140/10	1793	538	3	0,25	0,40	0,45	0,60
RR170/10	2188	656	3	0,35	0,50	0,60	0,80
RR220/12,5	3570	1070	4	0,45	0,65	0,75	1,00

Krav på hejare vid slagning av stålpålar

Stålpålar kan stoppslås antingen med fallhejare eller med snabbslående dubbelverkande hydraul- eller lufthejare. Det vanligaste är stoppslagning är med "lätta" hydraulhejare i kombination med kontrollslagning med fallhejare och stötvågsmätning. I kapitel 5 anges krav på hejare vid stoppslagning av stålpålar.

3 Styrande dokument

3.1 Allmänt

För påldimensionering i gränstillståndet GEO är nedanstående, i avsnitt 3.1.1, 3.1.2 och 3.1.3, angivna dokument styrande, normativa, nedan, eller kan ge vägledning vid dimensionering enligt Eurokod. De dokument som inte är normativa utgörs av krav, tekniska beskrivningar och rapporter som utgör branschpraxis i Sverige vid dimensionering och utförande av pålning.

3.1.1 Gällande normer

Följande Eurokoder är i första hand tillämpliga vid geoteknisk dimensionering av pålar.

<u>BENÄMNING</u>	<u>INNEHÅLL</u>
SS-EN 1990	Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk
SS-EN 1991-1-1	Laster på bärverk – Del 1-1: Allmänna laster – Tunghet
SS-EN 1997–1:2005	(inkl. AC 2009) Dimensionering av geokonstruktioner – Allmänna regler

3.1.2 Nationella anpassningar av normer

I Sverige har både Boverket och Trafikverket gett ut nationella anpassningsdokument till Eurokoderna.

<u>BENÄMNING</u>	<u>INNEHÅLL</u>
BFS 2013:10 EKS 9	EKS: Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder
VVFS 2004:43	Trafikverkets (f.d. Vägverkets) grundföreskrifter om tillämpningen av europeiska beräkningsstandarder
TRVFS 2011:12	Trafikverkets ändringar i föreskrifterna VVFS 2004:43

3.1.3 Utförandestandarder

Följande utförandestandarder är en del av Eurokoderna och är normativa.

<u>BENÄMNING</u>	<u>INNEHÅLL</u>
SS-EN 14199:2005	Utförande av geokonstruktioner - Mikropålar
SS-EN 12699:2000	Utförande av geokonstruktioner - Massundanträngande pålar
SS-EN 1536:2010	Utförande av geokonstruktioner - Grävpålar

3.1.4 Krav och Tekniska beskrivningar

Nedanstående dokument utgör byggherrens tekniska krav och råd vid dimensionering och utförande av bl.a. pålgrundläggning.

<u>BENÄMNING</u>	<u>INNEHÅLL</u>
TK Geo 11, Publ. 2011:047	Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner
AMA Anläggning 10	Allmän material- och arbetsbeskrivning. Utgör ett referensverk

3.1.5 Övriga dokument som bl.a. behandlar geoteknisk dimensionering av pålar

Följande dokument kan användas som ledning vid dimensionering av pålar. Vissa av dessa dokument refereras även till i TK Geo 11 avseende bl.a. beräkningsmodeller. Dokumenten är inte anpassade till Eurokod vid val av säkerhetsfaktorer, partialkoefficienter o dyl.

<u>BENÄMNING</u>	<u>INNEHÅLL</u>
Handboken Pålgrundläggning ¹	Övergripande om påldimensionering samt vägledning till Boverkets Nybyggnadsregler
Pålkommisionens rapport 59 (1980)	Statisk provbelastning
Pålkommisionens rapport 68 (1982)	Parameterstudie
Pålkommisionens rapport 86 (1991)	Friktionspålars bärförmåga
Pålkommisionens rapport 89 (1992)	Integritetskontroll av pålar
Pålkommisionens rapport 91 (1994)	Friktionspålar – bärförmågans tillväxt
Pålkommisionens rapport 92 (1993)	Datorsimulering av påslagning
Pålkommisionens rapport 93 (1994)	Korrosion och korrosionsskydd av stålspålar
Pålkommisionens rapport 94 (1996)	Standardpålar av betong
Pålkommisionens rapport 97 (2000)	Stålkärnepålar
Pålkommisionens rapport 98 (2000)	Slanka stålspålar
Pålkommisionens rapport 100 (2004)	Kohesionspålar
Pålkommisionens rapport 102 (2004)	Injekterade pålar
Pålkommisionens rapport 103 (2007)	Slagna friktionspålar
Pålkommisionens rapport 104 (2009)	Borrade stålrospålar
Pålkommisionens rapport 105 (2009)	Stålspålars beständighet mot korrosion i jord

¹Utgiven av Svensk Byggtjänst och SGI

4 Lasteffekt

4.1 Allmänt

Lasteffekter på pålar ska beräknas både för gränstillståndet STR (konstruktiv dimensionering) och GEO (geoteknisk dimensionering). Eftersom påldimensionering enligt Eurokod ska utföras enligt dimensioneringssätt 3 (DA3) för STR och dimensioneringssätt 2 (DA2) för GEO beräknas också lasteffekten något olika. IEG:s Tillämpningsdokument EN 1997-1 Kapitel 7 Pågrundläggning (IEG Rapport 8:2008, rev 2) ger en beskrivning av detta.

Att pålen klarar lasteffekten för STR verifieras nästan uteslutande med beräkning av den strukturella bärformågan hos pålelementet. För GEO verifieras att pålen klarar lasteffekten vanligtvis med statisk eller dynamisk provbelastning (stötstångsmätning) när det gäller spetsburna pålar och friktionspålar och genom beräkning när det gäller kohesionspålar. När det gäller friktionspålar utförs ofta en inledande beräkning för att kunna bedöma erforderlig pållängd, som sedan slutligen bestäms i samband med provpållningen.

Dimensionerande lasteffekt kan skilja sig åt mellan gränstillstånden STR och GEO i de fall det förekommer geotekniska laster, exempelvis sidolast av jordtryck eller påhängslast på grund av negativ mantelfriktion. Den kan också skilja sig åt i de fall den beräknas för olika säkerhetsklasser. Ett exempel kan vara att pålelementet dimensioneras i säkerhetsklass 3 men där verifiering av pålens geotekniska bärformåga görs i säkerhetsklass 2. Nedan beskrivs ett rekommenderat förfarande för beräkning av lasteffekten när påhängslast är förekommande.

4.2 Lasteffekt på pålar för STR inklusive påhängslast

Beräknad påhängslast G_{neg} för påle i friktionsjord eller kraftigt överkonsoliderad lera baseras vanligtvis på effektivspänning och effektiv friktionsvinkel mellan påle och jord. I kohesionsjord däremot beräknas påhängslasten vanligtvis utifrån odränerad skjuvhållfasthet. För gränstillståndet STR och dimensioneringssätt 3 (DA3) ska jordparametrarna baseras på karakteristiska värden X_k för den aktuella geokonstruktionen och där ett högt värde (ogynnsamt) ska användas, dvs.:

$$X_k = \bar{X} / \eta \quad \text{Ekv 4.1}$$

där

$\bar{X}$ = Medelvärde (härlett värde) på materialegenskapen

η = Omräkningsfaktor som tar hänsyn till osäkerheter relaterade till jordens egenskaper och aktuell konstruktion (både pålarna och ovanförliggande konstruktion)

Notera att η -faktorn inte nödvändigtvis blir samma som den vid beräkning av böjknäckning i lera, vilket beskrivs i IEG:s tillämpningsdokument Pågrundläggning. I normala fall kan man räkna med att η kommer att ha ett värde mellan 0,80 och 0,95 beroende bland annat på hur omfattande, noggrann och adekvat undersökningen är samt om ett medelvärde över hela pålens längd används. Ett η -värde större än 1 ska inte användas. För jordens tunghet (effektivspänningsberäkning) används oftast tabellerade värden för tunghet i olika material. Val av η -faktorn beror då på hur konservativt detta värde bedöms vara.

Nedan redovisas en förenklad lastkombination i **brottgränstillstånd (ULS)** för konstruktioner utsatta för **geoteknisk last** enligt ekvation 6.10 (SS-EN 1990) inklusive påhängslast, med dimensioneringsvärden för laster enligt de nationella bilagorna för tillämpning av europeiska beräkningsstandarder/konstruktionsstandarder (TRVFS respektive BFS), uppsättning C:

$$E_{d,geo} = \gamma_d 1,1 (G_G + G_{neg}) + \gamma_d 1,4 Q_G \quad \text{Ekv 4.2}$$

där

$E_{d,geo}$ = Dimensionerande geoteknisk lasteffekt

γ_d = Partialkoefficient för säkerhetsklass

G_G = Karakteristiskt värde för permanent geoteknisk last

G_{neg} = Karakteristiskt värde för påhängslast pga. negativ mantelfriktion

Q_G = Karakteristiskt värde för variabel geoteknisk last

För en vertikal påle utsatt endast för påhängslast från en jämn omkringliggande sättningsjord är Q_G och G_G vanligtvis noll, där G_G utgör pålens egentyngd ned till neutrala lagret. Dessa lastkomponenter kan däremot vara verksamma exempelvis som horisontella (transversella) laster samtidigt med den vertikala påhängslasten.

Den geotekniska lasten ska sedan kombineras med **konstruktionslasten** enligt ekvation 6.10a (SS-EN 1990), med dimensioneringsvärden för laster enligt TRVFS respektive BFS, uppsättning B:

$$E_d = E_{d,geo} + \gamma_d 1,35 G_k + \gamma_d 1,5 \psi_0 Q_{k,långtid} \quad \text{Ekv 4.3}$$

där

G_k = Karakteristiskt värde för permanent **konstruktionslast**

ψ_0 = Faktor för kombinationsvärde för variabel last

$Q_{k,långtid}$ = Karakteristiskt värde för variabel långtidslast

Kortvariga variabla konstruktionslaster behöver normalt inte medräknas tillsammans med påhängslast. Hur lång tid som är att betrakta som "kortvarig" beror på hur sättningsjorden utvecklas i tid. Vanligtvis krävs ca 3-5 mm relativ rörelse mellan påle och jord för att mobilisera maximal friktion. På den delen av pålen som är påverkad av en axiell påhängslast på grund av negativ mantelfriktion kan man för kortvariga laster tillgodoräkna sig en positiv mantelfriktion på den övre delen av pålens mantelyta, dvs. man erhåller ett bärförmågebidrag istället för påhängslast. Naturligtvis bör man kontrollera att ekvation 6.10 b inte är styrande, vilket blir fallet om de kortvariga variabla lasterna är tillräckligt stora.

Notera att säkerhetsklass 3 bör väljas för pålar i STR om brott i pålarna befaras ge stora rörelser som kan orsaka kollaps i ovanförliggande konstruktion, t.ex. vid böjknäckning hos pålar med del i luft, vatten eller i mycket lös jord.

När det gäller effekten av påhängslast i **bruksgränstillstånd (SLS)** beräknas lasten normalt med kvasi-permanent¹ lastkombinationer med ekvation 6.16b (SS-EN 1990), som tillämpas för långtidseffekter. När det gäller betongpålar kontrolleras sprickvidden samt kantpåkänningen med hänsyn till betongkrypning.

¹ Den totala tiden för vilket lastvärdet kommer överskridas är en stor del av referensperioden. Uttrycks som en del av den karakteristiska lasten, $\psi_2 Q_k$

Den frekventa² lastkombinationen, ekvation 6.15b, är aktuell vid beräkning av elastiska deformationer (reversibelt gränstillstånd) hos pålar.

För pålar beräknas även bärförmågan i bruksgränstillstånd utan att tillåta plastiska deformationer hos varken pålmaterialet eller i jorden, dvs. irreversibelt gränstillstånd (permanent deformation) får inte uppnås. Att så inte blir fallet kontrolleras genom att använda karakteristiska³ lastkombinationer med ekvation 6.14b. För karakteristiska lastkombinationer behöver påhängslast sällan medräknas såvida inte den permanenta andelen av lasten är klart dominerande och pålarnas längd i sättningsbenägen jord är stor.

4.3 Lasteffekt på pålar för GEO inklusive påhängslast

Påhängslast G_{neg} som beräknas med utgångspunkt från effektiv friktionsvinkel eller odränerad skjuvhållfasthet för gränstillståndet GEO och dimensioneringssätt 2 (DA2) bör baseras på **härlett värde** med avseende på medelvärdet, $\bar{X}$. Geotekniska laster behandlas på samma sätt som konstruktionslast. SS-EN 1990, ekvation 6.10, uppsättning C, används inte.

Eftersom axiella påhängslaster och kortvariga variabla laster normalt inte behöver kombineras blir ekvation 6.10a styrande för pålar som inte är utsatta för transversella laster. Nedan redovisas en förenklad lastkombination i **brottgränstillstånd (ULS)** enligt ekvation 6.10a (SS-EN 1990) inklusive påhängslast och med dimensioneringsvärden för laster enligt TRVFS respektive BFS, uppsättning B:

$$E_d = \gamma_d 1,35 (G + G_{neg}) + \gamma_d 1,5 \psi_0 Q_{k,långtid} \quad \text{Ekv 4.4}$$

där

$G =$ Karakteristisk värde för permanent last (geoteknisk last och konstruktionslast)

Vanligtvis används säkerhetsklass SK2 för pålar i GEO. Detta gäller dock inte alltid för kohesionspålar där ett deformationsmjuknande beteende kan förväntas (progressivt brottförlopp) efter att brott har uppnåtts. Säkerhetsklass SK3 bör därför användas om samtidigt många personer vistas i och i närheten av konstruktionen. Notera att vid stor andel kortvariga variabla laster kan ekvation 6.10b i SS-EN 1990 vara styrande.

I **bruksgränstillstånd** gäller normalt att långtidsättningar kontrolleras enligt kvasi-permanenta kombinationen med ekvation 6.16b i SS-EN 1990. För enbart elastiska sättningar är däremot ekvation 6.15b i SS-EN 1990 aktuell.

4.4 Dimensioneringsvärden för laster

Tabell 4.1 redovisar övergripande dimensioneringsvärden i brott- och bruksgränstillstånd för laster vid olika lastkombinationer enligt SS-EN 1990, med nationella val enligt BFS 2013:10 EKS 9 och TRVFS 2011:12. För exceptionella dimensioneringssituationer (olyckshändelse eller olyckssituation) gäller ekvation 6.11 b.

² Endast under en liten del av referensperioden kommer lastvärdet överskridas, $\psi_1 Q_k$

³ Huvudsakligt representativt värde för en last.

Tabell 4.1 Dimensioneringsvärden för laster enligt SS-EN 1990.

Gränstillstånd	Ekv.	Permanenta laster		Variabel huvudlast	Samverkande variabla laster	
		Ogynnsamma	Gynnsamma		Största last	Övriga laster
ULS: GEO/STR (exceptionell)	6.11b	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$(\psi_{1,1} \text{ eller } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1}$		$\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$
ULS: GEO/STR	6.10a ¹⁾	$\gamma_d \cdot 1,35 \cdot G_{kj,sup}$	$1,0 \cdot G_{kj,inf}$		$\gamma_d \cdot 1,5 \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1}$	$\gamma_d \cdot 1,5 \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
ULS: GEO/STR	6.10b ¹⁾	$\gamma_d \cdot \xi \cdot 1,35 \cdot G_{kj,sup}$	$1,0 \cdot G_{kj,inf}$	$\gamma_d \cdot 1,5 \cdot Q_{k,1}$		$\gamma_d \cdot 1,5 \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
ULS: STR (geolast)	6.10 ²⁾	$\gamma_d \cdot 1,1 \cdot G_{kj,sup}$	$1,0 \cdot G_{kj,inf}$	$\gamma_d \cdot 1,4 \cdot Q_{k,1}$		$\gamma_d \cdot 1,4 \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
SLS	6.14b	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$Q_{k,1}$		$\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
SLS	6.15b	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$		$\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$
SLS	6.16b	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$		$\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$

¹⁾ Dimensioneringsvärden för laster (STR/GEO) i DA2 samt andra laster än geotekniska laster i DA3. $\xi = 0,89$ reduktionsfaktor för ogynnsamma laster (nationellt val).

²⁾ Dimensioneringsvärden för laster (STR) i DA3.

4.5 Beräkningsmodeller för negativ mantelfriktion

Negativ mantelfriktion kan beräknas med följande uttryck för en påle med konstant tvärsnitt:

$$G_{neg} = g_{neg} \cdot \theta \cdot L_{akt} \quad \text{Ekv 4.5}$$

där

g_{neg} = Mantelfriktionen/kohesionen per ytenhet

θ = Påltvärsnittets omkrets

L_{akt} = Pållängd i del av jord där sättning pågår (ned till aktuellt tvärsnitt för STR)

För pålar i lösa leror kan den negativa mantelkohesionen per ytenhet beräknas enligt följande förenkade uttryck där faktorn 0,7 är en empiriskt bestämd vidhäftningsfaktor (α) för långtidsfallet:

$$g_{neg} = 0,7 \cdot c_u \quad \text{Ekv 4.6}$$

För den odränerade skjuvhållfastheten c_u rekommenderas att ett **korrigerat** värde med avseende på flytgränsen används. Här kan c_u antingen vara karakteristiskt värde eller medelvärde beroende på dimensioneringssätt (DA), se IEG Rapport 8:2008, rev 2. Notera att i Pålkommisionens rapport 100 föreslås däremot att ett okorrigerat värde baserat på enbart vingborrvärden ska användas vid beräkning av mantelkohesionen. Om dimensionering utförs enligt rapport 100 får okorrigerade värden användas.

För pålar i friktionsjord och överkonsoliderade leror under rent dränerade förhållanden (långtidsfallet) antas den negativa mantelfriktionen per ytenhet vara en funktion av det effektiva överlagringsstrycket:

$$g_{neg} = \beta \cdot \overline{\sigma'_{vo}} \quad \text{Ekv 4.7}$$

För friktionsjord används vanligtvis erfarenhetsvärdet $\beta = 0,2$, som utgörs av produkten av jordtrycks-koefficienten K_m och friktionskoefficienten mellan påle och jord, $\tan \delta'_m$. Något högre värde är relevant för leror under långtidsförhållanden och är vanligtvis i storleksordningen 0,25 - 0,30.

Notera att ovan angivna sätt att beräkna negativ mantelfriktion och betrakta det som en yttre last är ett förenklat förfaringssätt. Ett mer korrekt sätt är att utföra en samverkansanalys där hänsyn tas till pålens styvhet och där det neutrala lagrets läge bestäms. Samverkansanalys är i första hand lämplig när dimensioneringen utförs genom beräkning och när både positiv och negativ mantelfriktion uppträder i samma typ av jordlager eller när sättningen relativt pålen är liten och inte beräknas bli fullt mobiliserad i jordlagrets nedre del. Neutrala lagrets läge bör i första hand bestämmas med karakteristiska laster och härledda parametervärden för att hamna så nära verkligt läge som möjligt.

För mer information om påhängslaster hänvisas till handboken Pålgrundläggning eller till Pålkommissionens Rapport 100 när det gäller kohesionspålar.

5 Hävdvunna åtgärder

5.1 Stoppslagning av betongpålar enligt TK Geo (2011:46)

Enligt Trafikverkets regler kan betongpålar till broar stoppslås enligt regler i TK Geo (2011:46), Tabell 2.5-4, vilken här återges i Tabell 5.1. Denna tabell för stoppslagning av betongpålar enligt Eurokod är att jämföra med stoppslagningen enligt Bro 2004, se Tabell 2.2 i Kapitel 2.

Observera att värden enligt Tabell 5.1 nedan är 10 % högre än motsvarande för Bro 2004, se Tabell 2.2. Bärförmågan som tidigare räknades i SK2 har justerats upp med 10 % på grund av att hänsyn till säkerhetsklass har flyttats från bärförmågesidan till lastsidan enligt SS-EN 1990.

Tabell 5.1. Dimensionerande geoteknisk bärförmåga enligt TK Geo för stoppslagning av betongpålar med frifallshejare till sjunkning $s = 10$ mm/10 slag.

Hejare	Fallhöjd, m	Dimensionerande bärförmåga enligt TK Geo, kN	
		Tvärsnittsarea, m ²	
		0,055	0,073/0,076
3 ton	0,3	480	550
	0,4	575	660
	0,5	655	740
4 ton	0,3	540	640
	0,4	645	755
	0,5	720	850
5 ton	0,3	590	680
	0,4	690	825

Stoppslagningstabellen enligt Bro 2004 var beräknad med datorsimulering av stoppslagning (WEAP) med krav på säkerhet $\gamma_{tot} = 2,3$ enligt beräkning i SK 2. I Tabell 5.1 gäller således krav på totalsäkerhetsfaktor vid stoppslagning enligt $\gamma_{tot} = 2,3/1,1 \approx 2,1$.

"Vid stoppslagning mot berg ska inmejsling utföras med 300 slag med fallhöjd 20 cm och avslutas med tre serier om 10 slag med 80 % av fallhöjden. Sjunkningen per serie ska vara mindre än 3 mm och då godtas att R_d ökas med 10 %. Om en påle förlängs med knekt under stoppslagningen väljs 0,1 m högre fallhöjd." (TK Geo)

5.2 Stoppslagning av betongpålar enligt Pålkommisionen rapport 94

I Pålkommisionens rapport 94 (1996) "Standardpålar av Betong - lastkapacitet och geoteknisk bärförmåga" redovisas stoppslagningsregler för betongpålar med linhejare och frifallshejare och beräkning av dimensionerande bärförmåga för säkerhetsklasserna SK1, SK2 och SK3.

I Tabellerna 5.2 samt 5.3 redovisas stoppslagningsregler enligt rapport 94 för betongpålar SP1 samt SP2/ SP3 beräknade i SK1, dvs. enligt dagens regler. För accelererande hejare hänvisas till Pålkommisionens tekniska PM 1:2012 "Accelererande hejare", nedanstående tabeller kan inte användas för dessa hejartyper.

Tabell 5.2. Stoppslagning samt dimensionerande geoteknisk bärförmåga R_d i kN för sjunkning 10 mm/10 slag samt 3 mm/10 slag för SP1 pålar. Regler enligt Pålkommisionen Rapport 94.

SP1 mm/10 slag	Fallhöjd m	3 ton	4 ton		5 ton	
			L>8 m	L< 8 m	L>8 m	L< 8 m
10 (jord)	0,2	350	410	450	480	550
	0,3	480	540	605	590	<u>605</u>
	0,4	570	640		<u>635</u>	
	0,5	<u>605¹⁾</u>				
3 (berg)	0,2	385	450	500	530	605
	0,3	525	605	<u>605</u>	640	
	0,4	625				

Tabell 5.3. Stoppslagning samt dimensionerande geoteknisk bärförmåga R_d i kN för sjunkning 10 mm/10 slag samt 3 mm/10 slag för SP2/SP3 pålar. Regler enligt Pålkommisionen Rapport 94.

SP2/ SP3 mm/10 slag	Fallhöjd m	3 ton	4 ton	5 ton
10 (jord)	0,2	410	475	500
	0,3	525	620	670
	0,4	630	730	800
	0,5	725	825	<u>850</u>
3 (berg)	0,2	450	525	550
	0,3	580	680	740
	0,4	690	800	<u>830</u>
	0,5	800	<u>855</u>	

¹⁾ Understrukna tabellvärden innebär att fallhöjden ska sänkas med 5 cm

5.3 Stoppslagning av stålplålar

För att få enhetliga regler för olika slanka stålplålar gav Pålkommisionen ut rapport 98 (2000) "Dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålplålar". Reglerna i rapport 98 omfattar regler för stoppslagning och stötvågmätningar av plålar, regler för beräkning av lastkapacitet för pålelement inklusive skarvar och bergskar. Rapporten ger även rekommenderade värden för avrostning på stål i olika jordar samt krav och regler för rakhetsmätningar.

I Tabell 5.4 redovisas stoppslagningsregler för stålplålar vid stoppslagning med frifallshejare. För accelererande hejare hänvisas till Pålkommisionens tekniska PM 1:2012 "Accelererande hejare". Den dimensionerande bärförmågan som anges i tabellen är räknad i SK 1 dvs. att de dimensionerande värdena på bärförmåga har ökat med faktorn 1,1 jämfört med tidigare regelsystem där bärförmåga vanligtvis räknades i SK 2. Tabell 5.4 visar stoppslagning av olika stålplålar till dimensionerande bärförmåga $R_d = 0,33 \times F_{stuk}$. Tabellen är framräknad med datorsimulering av stoppslagning enligt program WEAP. Jordmodell för datorsimulering se Pålkommisionen rapport 98.

Vid stoppslagning som hävdvunnen åtgärd är kvalitén på stålplålarplårens skarv av väsentlig betydelse. Tabell 5.4 grundar sig på skarvar med följande kvalitetskriterier:

Momentkapacitet: $M_{skarv} \geq W_{el, plålar} \times f_y$
Tryckhållfasthet: $N_{c, skarv} \geq A_{s, plålar} \times f_y$
Draghållfasthet: $N_{t, skarv} \geq 0,15 \times A_{s, plålar} \times f_y$
Böjstyvhet: $EI_{skarv} \geq 0,75 \times EI_{plålar}$ (i momentintervall 0,3 - 0,8 x M)

Tabell 5.4. Dimensionerande geoteknisk bärförmåga i kN vid stoppslagning av slanka stålrörspålar med frifallshejare till sjunkning $s = 5 \text{ mm/10 slag}$.

Påle	F_{stuk} kN ($f_{yk}=440 \text{ MPa}$)	R_d kN ($0,33 \times F_{\text{stuk}}$)	Hejare kN	Fallhöjd i meter vid pållängd			
				5 m	10 m	15 m	30 m
76,1/6,3	608	201	5	0,40	0,45	0,55	0,80
			10	0,20	0,30	0,35	0,45
88,9/6,3	719	237	5	0,50	0,65	0,80	1,10
			10	0,30	0,40	0,45	0,60
114,3/6,3	941	311	10	0,35	0,50	0,60	0,80
			20	0,20	0,30	0,35	0,50
114,3/8,0	1176	388	10	0,45	0,60	0,70	0,95
			20	0,25	0,35	0,40	0,55
139,7/8,0	1456	480	20	0,30	0,45	0,55	0,70
			30	0,20	0,30	0,40	0,55
139,7/10,0	1793	592	20	0,35	0,50	0,60	0,85
			30	0,25	0,40	0,45	0,60
168,3/10,0	2188	722	30	0,35	0,50	0,60	0,80
			40	0,25	0,40	0,50	0,65
168,3/12,5	2692	888	30	0,40	0,55	0,65	0,95
			40	0,30	0,45	0,55	0,70
219,1/10,0	2890	954	30	0,50	0,45	0,85	1,20
			40	0,40	0,55	0,65	0,90
219,1/12,5	3570	1178	30	0,60	0,80	0,95	1,30
			40	0,45	0,65	0,75	1,00

Krav på hejare vid stoppslagning av stålpålar

Stålpålar kan stoppslås antingen med fallhejare eller med snabbslående dubbelverkande hydraul- eller lufthejare, s.k. "lätta hydraulhejare" eller "hydraulhammare". Det vanligaste är stoppslagning med hydraulhammare i kombination med efterslagning med fallhejare och stötvågsmätning. För data på olika hydraulhammare se

Tabell 5.5.

- Hejaren ska vara gejderstyrd och slå centriskt på pålarna.
- Hejarens data (slagkolv och slagenergi) ska vara väl dokumenterad och utprovad för de dimensioner på pålar som ska stoppslås. Man måste kontrollera både att hejaren inte slår för hårt eller för löst. För vissa av de tyngre hydraulhejarna måste man reducera slagenergier för att de ska passa för stoppslagning av pålar.
- Om stoppslagning till ett objekt enbart görs med "lätta" hejare ska stoppslagningsregler vara verifierad med datorsimulering (WEAP) som visar att hejaren uppfyller ställda krav. Alternativt kan man utföra kontrollslagning med en fallhejare, se exempel i Tabell 5.4.
- Krav på hejarvikter (slagkolvar).
Fallhejare: slagkolvikt > 5 ggr pålvikt/ löpmeter
Lufthejare: slagkolvikt > 3 ggr pålvikt/ löpmeter
Hydrauhejare: slagkolvikt > 2 ggr pålvikt/ löpmeter

Tabell 5.5. Data på olika hammare enligt specifikation från tillverkarna.

Hammare	Kolvvikt [kg]	Max slag-energi enligt tillverkare [J]	Max fall-höjd [m] ¹⁾	Spettvikt [kg] ²⁾	N _{min} [slag/min]	N _{max} [slag/min]
Furukawa:						
HB 3G	9,45	392	4,23	13	550	1450
HB 5G	16,7	686	4,19	23	400	1050
HB 8G	28,6	1079	3,85	40	400	850
HB 10G	47,9	1765	3,76	67	450	1050
HB 15G	68,3	2746	4,10	96	400	900
HB 20G	101,0	4119	4,16	141	400	800
F 5	12,2	710	5,93	17	700	900
F 6	18,2	884	4,95	25	650	1600
F 9	31,0	1305	4,29	43	400	1400
F 12	46,0	2320	5,14	64	450	900
F 19	64,0	3579	5,70	90	400	750
F 22	95,0	4572	4,91	133	360	700
F 35	135,0	6883	5,20	189	320	600
F 45	174,0	8829	5,17	244	300	500
Krupp:						
HM 110	11,8	450	3,89	17	850	1000
HM 200	24,0	800	3,40	34	480	650
HM 700	60,5	2400	4,04	85	400	500
HM 800	93,0	3200	3,51	130	300	600
HM 900	95,0	3850	4,13	133	450	900
HM 2000	135,0	8500	6,42	189	325	585
Atlas Copco:						
TEX 200/250	12,1	565	4,76	17	300	900
TEX 600	22,0	1100	5,10	31	360	720
Tryckluftshejare:						
MKT 5	91	1380	1,55	39		300
MKT 6	181	3460	1,95	91		275
MKT 7	363	5740	1,61	140		225
BSP 500N; MK2	91	1650	1,85	113		330
BSP 600N; MK2	227	4150	1,86	227		250
BSP 700N; MK2	385	6500	1,72	281		225

¹⁾ Slagenergi omräknad till fallhöjd ($W = m \cdot g \cdot h$)

²⁾ Vikt på spett antagen till 1,4*vikt slagkolv

Fallhöjder vid stoppslagning av de slanka stålplåarna med frifallshejare varierar normalt mellan ca 0,3 och 1,0 m. Fallhöjden beror förutom av värdet på geoteknisk bärförmåga helt av relationen mellan hejarens vikt och plåens längd. Korta plåar kan stoppslås med låga fallhöjder medan långa plåar kräver hög fallhöjd.

Räknas slagenergi om till fallhöjder för luft- och hydraulhejare stoppslås de slanka stålplåarna normalt med fallhöjder motsvarande ca 1,5 -2,0 m med lufthejare och med fallhöjder motsvarande ca 4-6 m med hydraulhejare. Stålplåar med diameter från 76 mm till 220 mm slås med fördel med lätta hydraulhejare med slagkolvikt 2-3 ggr plåens vikt per löpmeter. Därefter efterslås plåar med fallhejare och stötvågmäts i den omfattning som krävs.

Fördelen med slagning med lätta - snabbslående hydraulhejare är att slagningen går snabbt samt att plåar blir klart mycket rakare än om de drivs ned och stoppslås med fallhejare.

Nackdelen med lätta hydraulhejare är att plåar kan få stopp i steniga lager. Det är viktigt att tillräckligt tunga slagkolvar används samt att plåar stoppslås till små sjunkningsvärden (normalt $s < 5$ mm/minut). Vid eventuell osäkerhet i plåstopp ska kontrollslagningar alltid göras med fallhejare.

För borrarade plåar i berg gäller som för slagna plåar till berg att plåarnas geotekniska bärförmåga ska verifieras med stoppslagning. Krav på hejarvikter är samma som för plåar som drivs ned och stoppslås mot berg, se punkt d) ovan. Samtliga plåar ska stoppslås för accept.

6 Dimensionering genom beräkning

6.1 Allmänt

Det klassiska exemplet på dimensionering av den geotekniska bärförmågan genom beräkning utgörs av kohesionspålar, vilka i Sverige i stort sett uteslutande dimensioneras med denna metod. Det finns dock möjligheter att dimensionera den geotekniska bärförmågan med beräkning också för andra pålar. Detta gäller främst friktionspålar. Andra exempel på dimensionering genom beräkningar är olika typer av dragna pålar, WEAP-simuleringar och beräkning av spetsbärförmågan hos olika pålar mot jord eller berg.

I de nationella anpassningsdokumenten till Eurokoderna från Boverket, BFS 2013:10 EKS 9 och Trafikverket, VVFS 2004:43 (grundföreskrift) med ändringar enligt TRVFS 2011:12 (se kapitel 3, Styrande dokument), framgår de val av bl.a. modellfaktorer som gäller i Sverige. En bra "genomgång" återfinns i TK Geo 11, Publ. 2011:047, avsnitt 2.5.1, med bl.a. tabellerade modellfaktorer för olika typer av pålar.

De lasteffekter (GEO) som ska verifieras med hjälp av de här beskrivna beräkningarna framgår av kapitel 4, Lasteffekt, i denna rapport.

Modellfaktorerna vid beräkningar är starkt knutna till beräkningsmetod och kan vara mer eller mindre korrelerade med de geotekniska undersökningarna på platsen. I IEG:s TD Pålar (IEG Rapport 8:2008, Rev. 2) ges förslag på modellfaktorer baserat på huvudtyp av metod, men de ska också vara knutna till beräkningsmodellens ursprung.

6.2 Kohesionspålar

Verifiering av kohesionspålars bärförmåga kan utföras genom provning, exempelvis med hjälp av statisk provbelastning enligt Pålkommisionens rapport 59. I sällsynta fall kan dynamisk stötvågsmätning användas, men metoden är inte väl lämpad för kohesionspålar och ställer en hel del krav på design, utförande och utvärdering.

Den förhärskande metoden i Sverige är sedan länge att dimensionera kohesionspålars geotekniska bärförmåga med hjälp av beräkningar. Här finns Pålkommisionens rapport 100 Kohesionspålar att tillgå. För närvarande bedrivs arbete med att uppdatera denna rapport i enlighet med Eurokod. När detta arbete är slutfört och rapporterat bör man givetvis använda sig av dessa nya rekommendationer.

För att erhålla dimensionerande värden kan IEG:s rapport 8:2008, rev 2, Tillämpningsdokument för EN 1997-1, Kapitel 7 Pålgrundläggning (TD Pålar) utnyttjas. Tillämpningsdokumentet ger också riktlinjer för hur η -värden för skjuvhållfastheten, avseende böjknäckning i lera, ska tas fram. Notera att η -värdet gäller för beräkningar av STR i DA3. Vid beräkning av påhängslaster, som kombineras med lasteffekter i STR för beräkning av påles konstruktiva/strukturella bärförmåga på olika nivåer används alltså η -värden, däremot inte vid beräkning av påhängslasterna för kontroll av den geotekniska bärförmågan i GEO. Lägg också märke till att SS-EN 1997-1, avsnitt 7.6.2.3, anger att dimensioneringen kan utföras med s.k. modellpåleanalogi, vilket inte är samma tillvägagångssätt som i Pålkommisionens rapport 100. Det bör emellertid kunna anses egalt om beräkningarna baseras på enskilda geotekniska undersökningsresultat, vilka därefter sammanvägs och reduceras med korrelationskoefficienter och partialkoefficienter till ett dimensionerande värde (modellpåleanalogi), eller om man med hjälp av sin geotekniska kompetens och all tillgänglig kunskap sammanväger de olika geotekniska under-

sökningsresultaten först och därefter utför en beräkning, med beaktande av korrekta reduktionsfaktorer enligt tabell A.10 i SS-EN 1997-1, vilka baseras på mängden undersökningar. Inget nationellt val har gjorts av dessa korrektionsfaktorer vare sig i TRVFS eller i BFS. Tabellen anges också i IEG:s rapport 8:2008 (TD Pålar), tabell 4.1. Det senare tillvägagångssättet kan betraktas som svensk praxis och är i linje med hur t.ex. Skredriskkommissionen och SGF Notat 4:2005 rekommenderar att utvärderingen ska utföras. Observera att SGF Notat 4:2005 är en utredning kring riktlinjer hur vi ska tillämpa Eurokod och att den i sådana avseenden är inaktuell.

För den odränerade skjuvhållfastheten, c_u , rekommenderas att ett korrigerat värde med avseende på flytgränsen används vid indexförsök, t.ex. vingborr, konförsök och CPT. Här kan c_u antingen vara karakteristiskt värde eller härlett medelvärde beroende på dimensioneringssätt (DA), se IEG Rapport 8:2008, rev 2. Notera att ett härlett värde inte behöver betyda att det är korrigerat. Notera vidare att i Pålkommisionens rapport 100 föreslås att ett okorrigerat värde baserat på enbart vingborrvärden ska användas vid beräkning av mantelkohesionen. Om man istället väljer ett korrigerat värde, med utgångspunkt från flera sonderingsmetoder, för den beräkningsmodellen, så måste man också ta frågan om en justering av modellfaktorn i beaktande.

6.3 Friktionspålar

Riktlinjer och metoder för beräkning av den geotekniska bärförmågan för friktionspålar, specifikt massundanträngande förtillverkade slagna pålar, ges i Pålkommisionens rapport 103, Slagna friktionspålar. För att erhålla dimensionerande värden används IEG:s rapport 8:2008, rev 2, Tillämpningsdokument för EN 1997-1, Kapitel 7 Pålgrundläggning (TD Pålar). Användning av modellpåleanalogin gäller också för friktionspålar. Även här kan man anföra argument att göra en total sammanställning av de geotekniska parametrarna, se ovan. Emellertid bör man vid ett sådant förfarande vara medveten om att en friktionspåle inte sällan kan ha relativt stor bärförmåga vid spetsen, något som bortses ifrån när det gäller kohesionspålar, och därmed kan också relativt tunna skikt och mycket lokala variationer påverka den totala bärförmågan betydligt. Dimensioneringen kan på detta sätt utföras med beräkning, men den totala säkerhetsnivån enligt Eurokod för ett sådant förfaringsätt blir hög. Detta beror på relativt stora spridningar i beräkningsresultaten, både beroende av beräkningsmetod och geologi. Man bör vid ett beräkningsförfarande alltså beakta att olika beräkningsmetoder ger olika säkra resultat, vilket framgår tydligt av Pålkommisionens rapporter 86 Friktionspålar bärighet och 103 Slagna friktionspålar. Slutsatsen måste dras att man därför bör använda olika modellfaktorer beroende på vilken beräkningsmetod som används. Indirekt innebär detta också att det blir olika modellfaktorer för olika geotekniskt underlag, dvs. de metoder som visar minst spridning och fel i resultaten är baserade på CPT-sonderingar, t.ex. LCPC- eller ICP-metoden, vilka ger mest rättvisande geotekniskt resultat. Detta visas också i TD Pålar, Tabell 4.3.

Ett förfarande med enbart beräkning av den geotekniska bärförmågan leder alltså ofta till en för dyr slutprodukt. Därför används oftast ett förfarande där verifieringen görs med stötvågmätning och efterföljande signalmatchning med CAPWAP-analys. Mindre vanlig är verifiering med statisk provbelastning.

Beräkning av den geotekniska bärförmågan hos friktionspålar är dock inte ointressant, tvärtom är det viktigt att ha en något så när klar bild över vilka pållängder man kan förvänta sig i ett projekt innan provpållningen inleds, inte minst för bedömning av kostnader. Dessa beräkningar används för att utarbeta karakteristiska värden på den geotekniska bärförmågan.

6.4 Stålkärnepålar

Pålkommisionens rapport 97, Stålkärnepålar, kap 4.4, innehåller anvisningar för att beräkna geoteknisk bärförmåga för både spetsburna och mantelburna (i berg) stålkärnepålar. Dimensionerande värden erhålls med hjälp av IEG:s rapport 8:2008, rev 2, Tillämpningsdokument för EN 1997-1, Kapitel 7 Pålgrundläggning (TD Pålar). Modellpåleanalogin kommer inte ifråga, utan här används istället ett kompletterande tillvägagångssätt, med extra modellfaktor, se också TK Geo 11 2.5.1.5.

Den geotekniska bärförmågan för olika stålkärnepålar, spetsburna och mantelburna, tryckta och dragna, kan beräknas enligt Pålkommisionens rapport 97, avsnitt 4.4 Geoteknisk bärförmåga. Där visas hur man kan beräkna spetsbärförmågan för en spetsburen stålkärna på berg och bärförmågan för en mantelburen kärna, ingjuten i berg.

Hos tryckbelastade stålkärnepålar verifieras idag oftast den geotekniska bärförmågan med stötvågs-mätning, främst gäller detta för spetsburna stålkärnor. Mätningarna utförs när stålkärnan ännu inte gjutits fast. Det kan också godtas att verifiera tryckbelastning med dragprovning, vilket givetvis kräver att stålkärnan är mantelburen. För att beräkna erforderlig ingjutningslängd i berg för en sådan påle ska beräkningar av vidhäftning utföras i gränssnittet mellan stålet och betongen och mellan betongen och bergytan, se vidare avsnitten 4.4.2.1 och 4.4.2.2 i Pålkommisionens rapport 97. Dragprovningen kan sedan utföras som en statisk provbelastning. Stötvågsmätningar på mantelburna tryckbelastade stålkärnepålar kan också utföras. Utvärdering görs med den s.k. wave-up metoden. Hänsyn ska tas till skador/upsprickning hos de övre delarna av betongen i ingjutningen. I båda fallen är det viktigt att kärnan endast sitter fast i berget när provningarna utförs, eftersom det är vidhäftningen mot berget man vill prova. Antingen gjuts endast bergborrhålet igen runt kärnan inför provningen, eller också måste kärnan vara fri från betongen i foderröret, vilket exempelvis kan åstadkommas med den-sobinda.

När det gäller dragbelastade stålkärnor är dessa givetvis mantelburna och ingjutningslängden ska också för dessa beräknas enligt ovan. Dessutom ska beräkningar utföras för en brottkropp i berg, enligt avsnitt 4.4.3. I den norska Peleveledningen 2012, kapitel 7.7.1 finns ett avsnitt "Utrivning av berglegeme", som behandlar detta. Bergkonens utseende är lika, men i Peleveledningen tillåts även skjuvning och friktion längs bergkonens utsidor. Bidrag från skjuvning och friktion i sprickzonerna måste värderas i varje enskilt fall. Lägg märke till att i de fall stålkärnorna förväntas utsättas för dragbelastning samtidigt kan bergkonerna överlappa varandra, speciellt om kärnorna sitter tätt. Beräkningen av den dimensionerande bergkroppen kan då snabbt bli mycket besvärlig och kärnorna kan behöva göras avsevärt längre än man först avsåg. Provning med dragbelastning för att verifiera denna brottmod är svår att utföra, eftersom mothållet måste anordnas så pass långt ifrån själva kärnan att bergkonen, med eventuell ovanliggande, medverkande, jord, inte belastas. I praktiken utförs inga sådana provningar.

6.5 Injekterade pålar

Pålkommisionens rapport 102, Injekterade pålar, kapitel 4.4, behandlar geoteknisk bärförmåga för injekterade pålar. Inte heller för dessa pålar är det intressant eller önskvärt att dimensionera endast med beräkningar. Rapporten rekommenderar, i avsnitt 4.4.3, statisk provbelastning för verifiering av den geotekniska bärförmågan. Ofta kan den konservativt utföras som dragprovning. För de injekterade pålarna bör man vara uppmärksam på knäckningsproblematiken, eftersom dessa pålar kan vara slanka. Om man enbart drar i pålarna kan man, trots en påvisad geoteknisk bärförmåga, förbise att pålarna egentligen skulle ha knäckt i det tryckta lastfallet som pålarna i permanentskedet ska utsättas för. Verifiering genom dynamisk provbelastning (stötvågsmätning) har också utförts, men man bör vara medveten om att pålen då alltid blir skadad. Det rekommenderas därför att man endast utför denna form av provning på pålar som inte kommer att ingå i den bärande strukturen.

6.6 Dragbelastade pålar

Pålkommisionens rapporter 100 och 103 innehåller avsnitt om beräkning av geoteknisk dragbärförmåga. Lägg märke till att η -värden för jordparametrar kan skilja sig från de som används för tryckta pålar. Reduktionsfaktorn μ anges i TK Geo 2.5.1.3 till 1,0 för mantelburna pålar med konstant tvärsnitt i kohesionsjord och till 0,7 – 0,9 i friktionsjord. μ -faktor = 0,7 ska användas för pålar i friktionsjord, där bärförmågan baseras på uppmätt eller beräknad bärförmåga i tryckbelastning och om ingen analys utförs.

Pålkommissionens rapport 97 Stålkärnepålar, avsnitt 4.4.3, och TK Geo, avsnitt 2.5.1.3.1, innehåller beräkning av geoteknisk bärförmåga hos mantelburna dragna stålkärnepålar. TK Geo kompletterar med Trafikverkets tillägg.

6.7 Slagningssimulering

Slagningssimulering, WEAP-analys, används för att ta fram ett dimensionerande stoppslagningskriterium och är att betrakta som dimensionering genom beräkning. Metoden används alltså inte vid provpålning för att bestämma bärförmågan. Stoppkriteriet används som produktionskontroll på samtliga pålar. Pålkommissionens rapport 92 behandlar datorsimulering av påslagning. Dimensionering av geoteknisk bärförmåga med enbart WEAP-analys tillåts, enligt Eurokod och de nationella valen, endast av rent spetsbärande pålar och då med en modellfaktor på 1,3. Simuleringen utgör dock ett bra redskap för att exempelvis erhålla korrekt slagningsutrustning, optimera installationsfasen, kontrollera tryck- och dragspänningar i pålen under slagning (se nedan) och, på samma sätt som vid beräkningar av friktionspålar, ge indikation om pållängd.

På motsvarande sätt som vid stötvågsmätning måste bärförmågan begränsas med hänsyn till pålmaterialets hållfasthet när stoppslagningskriterier bestäms med slagningssimulering. $R_{d,max}$ beräknas enligt Ekv 6.1 och Ekv 6.2, vilket motsvarar kompletterande tillvägagångssätt enligt SS-EN 1997-1, se även tillämpningsdokument Pålgrundläggning (TD Pålar):

$$R_{d,max} = \frac{R_k}{\gamma_{tot}} \quad \text{Ekv 6.1}$$

$$\gamma_{tot} = \gamma_t \cdot \gamma_{Rd} \cdot 1,4 \quad \text{Ekv 6.2}$$

där:

R_k = Antagen karakteristisk bärförmåga (ett "försiktigt" utvärderat medelvärde) utan att för höga spänningar genereras i pålen

γ_t = Partialkoefficient för bärförmåga enligt Tabell A.7-A.9 i TRVFS respektive Tabell I-7 – I-9 i BFS, se även Tabell 7.1 - Tabell 7.3 nedan

γ_{Rd} = Modellfaktor, väljs till minst 1,3 för spetsburna pålar på berg/morän enligt TK Geo 11 och BFS 2013:10 EKS 9. Om pålen simuleras med en stoppslagning på berg med mindre än 3 mm/10 slag, samt att pålen är inborrad i berg och stoppslagen med en hejare > 2 ggr pålvikt/löpmeter, föreslås att en faktor 1,1 kan användas. Ett Trafikverksprojekt får då $\gamma_{tot} = 1,2 \times 1,1 \times 1,4 = 1,85$ och ett Boverksprojekt $\gamma_{tot} = 1,3 \times 1,1 \times 1,4 = 2,00$.

Från slagningssimuleringen fås också spänningarna i pålen. R_k väljs så att god marginal till F_{stuk} erhålls. För frifallshejare bör inte högre spänningar utnyttjas än $0,8 f_{yk}$ för stål respektive $0,7 f_{ck}$ för betong. Om accelererande hejare används utan kontinuerlig mätning av tillförd energi¹ för stoppslagning bör dessa värden sänkas med 0,10. Observera att samtliga pålar ska stoppslås med en hejarvikt som motsvarar minst 2 ggr pålens vikt per meter.

I kapitel 8.1 anges hur beräkning kan utföras av geoteknisk bärförmåga för pålar som är inborrade i berg eller som står på berg eller morän.

¹ t.ex. genom registrering av hejarens anslagshastighet

7 Dimensionering genom provning

7.1 Allmänt

Provpålning utförs före produktionsskedet eller vid produktionsstart, för att utvärdera drivnings- och stoppslagningskriterier, föreslå eller fastställa en kontrollplan och, i förekommande fall, välja lämplig pålningsmetod. Provpålning innefattar normalt de inledande pålarna i varje kontrollobjekt och används som underlag för att bestämma den dimensionerande bärförmågan. Vid stora pålningsarbeten eller vid komplexa förhållanden rekommenderas att provpålning utförs i god tid före produktionen för att få fram ett bra förfrågningsunderlag. Provpålning bör generellt utföras i god tid före produktion vid följande förhållanden:

- blockig jord/släntberg (val av pålningsmetod)
- mäktiga moränlager (falska stopp, bärförmågetillväxt, neddrivningsdjup)
- friktionsjord (bärförmågetillväxt, packningseffekter för pålgrupper)
- omgivningspåverkan (vibrationer, portryck, massrörelser m.m.)

I Sverige har de senaste åren en praxis utvecklats för projekt med slagna spetsburna pålar där pålningsförhållandena är väl kända (geoteknik, påle och slagutrustning). I dessa projekt utförs oftast dynamisk provning fortlöpande eller vid enstaka tillfällen under produktionsskedet. Under arbetets gång måste därmed den ansvarige geokonstruktören för pålningen i samråd med mätansvarig besluta om eventuell produktionskontroll är nödvändig med hänsyn till avvikande förhållanden eller förändrade förutsättningar.

När det gäller stötvågs-mätning finns det oftast ingen anledning att provbelasta produktionspålarna med en mindre kraft än för provpålningsspålar. Detta innebär att produktionspålarna även kan användas som underlag i dimensioneringen för att reducera korrelationskoefficienten (säkerhetsfaktorn). Därmed finns möjlighet att stoppslå pålarna med ett mildare kriterium eller att reducera pålarnas längd i jord fortlöpande under produktionsskedet.

I TRVFS 2011:12 och BFS 2013:10 EKS 9 har avsnitt 7.5.3(1) i EN 1997-1 gjorts till föreskrift. Här anges att dynamisk provbelastning förutsätts vara kalibrerad mot statiska provbelastningar för samma påltyp, med liknande längd och tvärsnitt samt liknande markförhållanden. Dynamiska provbelastningar kan anses vara tillräckligt tillförlitliga och korrelerade mot statiska provbelastningar för följande påltyper och förhållanden:

- Slagna stål- och betongpålar (förtillverkade), som till övervägande del är spetsburna på berg och friktionsjord (morän)
- Förtillverkade mantelburna pålar i friktionsjord (friktionspålar) tillsammans med CAPWAP-analys
- Stålkärnepålar och borrarade stålrörspålar, spetsburna på berg (eller morän)
- Mantelburna stålkärnepålar ingjutna i berg utvärderade genom bedömning av uppåtgående stötkraft (wave-up metod) från överkant bruk. Metoden gäller när bruket är intakt. Statisk provbelastning bör utföras vid indikation på dålig ingjutning

Som referens för korrelation mellan statisk och dynamisk provbelastning för förtillverkade pålar kan flera internationella artiklar användas, t.ex. "CAPWAP correlation studies" av G Likins et al. (1996).

För följande påltyper och förhållanden rekommenderas däremot en korrelation mot statisk provbelastning för de aktuella förhållandena på platsen:

- Kohesionspålar
- Spetsburna pålar på lermorän, och vissa sedimentära bergarter
- In-situ gjutna helt eller delvis mantelburna pålar, grävpålar
- Borrade och injekterade pålar, MAI, TITAN-pålar
- Slagna injekterade pålar, t.ex. Soilex, Franki

7.2 Provpålning, utförande och mängd

Nationella val av partialkoefficienter och korrelationskoefficienter för provbelastning av pålar finns i Boverkets BFS 2013:10 EKS 9, tabellerna I-7 till I-11 samt i Trafikverkets TRVFS 2011:12, tabellerna A.6 - A.9 och A.11. Tabellerna presenteras även nedan i avsnitt 7.6.

Om statisk provbelastning utförs bör minst två pålar provas för att få ett underlag för dimensionering. Enligt SS-EN 1997-1 tillåts dock att endast en provning utförs. Att endast prova en eller två pålar förutsätter självklart att man har en god överblick av de geotekniska förhållandena och att området, för vilket pålarna ska representera, är begränsat till storlek samt att variationen av geoförhållanden är liten (geologisk, geoteknisk och geometrisk). I BFS och TRVFS samt i AMA Anläggning 10 får avståndet mellan provade pålar inom ett område som definieras som kontrollobjekt inte överstiga 25 m. Statisk provbelastning kan med fördel användas tillsammans med dynamisk provbelastning för att verifiera resultaten och för att välja ingående parametrar.

Om dynamisk provbelastning (stöt vågsmätning) utförs som underlag för dimensionering ska normalt minst fyra pålar mätas enligt TRVFS och BFS. Om avståndet mellan pålar inom ett kontrollobjekt är mindre än 25 m godtas att tre provpålar mäts. Det rekommenderas dock att minst tre pålar alltid mäts inom en yta motsvarande $25 \times 25 \text{ m}^2$. Antalet pålar som får medräknas vid dimensionering ska utgöra ett representativt underlag med avseende på installationssätt, verkningssätt och markförhållanden vid den aktuella platsen. Pålarna bör vara jämnt utspridda över området eller lokaliserade till områden där sämst geotekniska förhållanden ur pålningssynvinkel kan förväntas råda. I TRVFS och BFS används begreppet "enhetliga geotekniska förhållanden". Med hänsyn till att jordens egenskaper kan variera kraftigt rekommenderas att inte ha ett för stort avstånd mellan pålar inom ett kontrollobjekt. Föreliggande rapport föreslår att ytan för ett kontrollobjekt inte överskrider $25 \times 25 \text{ m}^2$, vilket motsvarar ungefär en provpåle per 200 m^2 , men i vissa fall kan så tätt som 10 - 15 m mellan provpålar behövas för att upptäcka de varierande geotekniska förhållandena på platsen. När gruppeffekt bedöms få en avgörande betydelse kan pålar till och med behöva slås i grupp för att utvärdera bärförmåga och verkningssätt. I de fall jorden är stenig/blockig och där en stor spridning i stoppnivåer, stoppsjunktionsvärden eller det föreligger en förhöjd skaderisk för pålen är det inte att betrakta som enhetliga förhållanden och en större mätomfattning bör därmed väljas.

Det är inte enkelt att ge rekommendationer om lämpligt antal pålar som ska provas eftersom detta är starkt avhängigt av de geotekniska förutsättningarna på den aktuella platsen. Utvärdering av provbelastningar och dimensionering samt val av antalet representativa pålar ska alltid göras av geotekniskt kvalificerad och erfaren personal. Om stor variation bedöms råda på platsen kan det vara nödvändigt att utöka provpålningen så att det finns tillräckligt många representativa pålar för att utvärdera den dimensionerande geotekniska bärförmågan. Produktionskontroll kan sedan vara lämplig att utföra för att verifiera resultatet vid provpålning och för att förtäta antalet provpunkter. I vissa fall kan produktionspålningen i sig ge upphov till förändrade förutsättningar, vilket kan föranleda produktionskontroll, t.ex. packning av jord, förhöjda portryck, massundanträngning och hävning.

Ibland används i projekt olika metoder för att bestämma bärförmågan. Vanligast är att stöt vågsmätning utförs med CASE-metoden och att signalmatchning (CAPWAP-analys) sedan utförs på några av

de CASE-utvärderade pålarna för att korrelera metoderna. Om god korrelation erhålls kan de övriga pålarna utvärderade med CASE-metoden använda den lägre modellfaktorn för CAPWAP. Förenklat kan man säga att CASE-metoden uppgaderas till CAPWAP-analys.

När dynamisk provning utförs av spetsburna stålplåtar med litet mantelmotstånd som stoppslås på berg där bärförmågan inte mobiliseras (dvs. en sjunkning < ca 1 mm per slag) är den uppmätta bärförmågan i princip proportionell mot pålens tvärsnittsarea (impedans). I sådana fall kan pålar med olika tvärsnittsareor tänkas ingå i samma underlag vid utvärdering av dimensionerande bärförmåga. Vid beräkning av dimensionerande bärförmåga för respektive påldimension görs en proportionering med avseende på kvoten mellan tvärsnittsareorna mellan de ingående påltyperna. Bedömning att det föreligger tillräckligt bra korrelation mellan pålar av olika tvärsnittsarea ska dock endast göras av kvalificerad personal i samband med utvärdering av resultaten. Resultaten bör verifieras för några produktionspålar, se kapitel 9.

7.3 Utvärdering av bärförmåga med statisk provbelastning

I Eurokod anges att man bör välja en sättning hos pålhuvudet som motsvarar 10 % av pålens diameter som brottkriterium när man har svårt att utvärdera ett tydligt brott pga. en kontinuerlig krökning hos last-sättningskurvan, vilket är speciellt vanligt hos pålar i friktionsjord med deformationshårdnande beteende. Det är emellertid inte speciellt lämpligt att välja detta som ett generellt brottkriterium. För det första innebär mätning av sättning hos pålhuvudet att pålens egen elastiska hoptryckning försummas vilken kan vara stor för långa och slanka pålar. För det andra innebär kriteriet för pålar med stor diameter, exempelvis grävpålar med diameter 1-2 m, risk för stora sättningsdifferenser, som inte överliggande konstruktion är dimensionerad för. I stället rekommenderas att brottkriterium väljs med hänsyn till den sättning som överliggande konstruktion klarar i brottgränstillstånd.

I Pålgrundläggningshandboken beskrivs olika metoder för utförande av en statisk provbelastning. Dessutom redovisas hur utvärdering av brottlast utförs enligt krypmetoden respektive Pålkommisionens klassiska metod enligt Pålkommisionens rapport 59, i vilken rekommendationer ges hur en statisk provbelastning bör utföras. Notera att stötvågsmätning, där bärförmågan bestäms med CASE-metoden eller CAPWAP-analys, är metoder som är korrelerade mot statisk provbelastning utvärderad med Davisons brottkriterium, vilket är ett relativt konservativt kriterium. Metoden beskrivs i Pålkommisionens rapport 103. Även krypmetoden är konservativ om ovanförliggande konstruktion inte klarar stora rörelsedifferenser i brottgränstillstånd. Det finns andra metoder som också är värda att nämna, bl.a. Chins metod som ofta beskrivs i internationell litteratur, t.ex. av Tomlinson (2008).

I Eurokodens utförandeanvisningar för pålningsarbeten (mikopålar, grävpålar samt massundanträngande pålar) anges att provbelastning ska utföras enligt EN 1997-1 samt ISO 22477-1 till 2 (endast som utkast i dagsläget). Dessutom ska provpålningsrapporten följa anvisningarna i SS EN 1997-1. Även i IEG rapport 4:2008, Dokumenthantering, beskrivs vad en försöksrapport ska innehålla.

7.4 Utvärdering av bärförmåga med dynamisk provbelastning

CASE-metoden består egentligen av en matematisk formel för att beräkna bärförmågan för spetsburna pålar från ingående stötvåg samt reflexen från spetsen. I metoden beräknas med stöd av empiri både den dynamiska och den statiska bärförmågan. Den statiska delen beräknas genom att använda en empirisk korrelerad dämpningsfaktor (J_c , CASE-dämpningsfaktorn), som antas förenklat vara linjärt proportionell mot partikelhastigheten vid spetsen. Korrelation av dämpningsfaktor har gjorts mot statiska provbelastningar. Eftersom dämpningsfaktorn är osäker för pålar med stort mantelmotstånd bör CAPWAP-analys utföras. CAPWAP-analys är en metod baserad på endimensionell vågteori, där pålen delas in i diskreta element av massor och fjädrar. Omgivande jords inverkan delas upp i diskreta punkter (elementgränserna), som påverkar pålen i form av fjädring, dämpning och bärförmåga. De uppmätta stötvågorna används sedan som indata från vilka man bygger en förenklad modell av samverkan mellan jorden och pålen. När pålen står på berg eller mycket fast morän har valet av CASE-dämpningsfaktorn liten eller ingen inverkan på bärförmågan. Om pålen uppvisar en

hög spetsfjädring kan CAPWAP-analys utföras för val av denna dämpningsfaktor. Vid dynamisk provning av kohesionspålar är den dynamiska dämpningen däremot en stor andel av den totala bärförmågan och dynamisk provning bör vara korrelerad mot statiska provbelastningar på likvärdiga pålar i närheten.

När påhängslast på grund av negativ mantelfriktion förekommer ska den bärförmåga som utvärderas längs denna del av pålen inte medräknas för lastfall med permanent last och långtidslast. För lastfall med kortvariga laster kan däremot denna bärförmåga medräknas, dock inte mer än storleken på den kortvariga lasten.

7.5 Utvärdering av bärförmåga för draglast

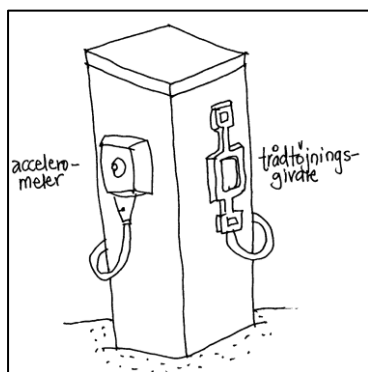
Det är vanligt att man utvärderar dragbärförmågan från stötvågsmätning, vilket är en provbelastning i tryck. För pålar i friktionsjord får, enligt både BFS 2013:10 och TRVFS 2011:12, endast 70 % av mantelbärförmågan för tryckbelastning användas som dragbärförmåga, dvs. en reduktionsfaktor $\mu = 0,7$. Dessutom måste en modellfaktor på 1,3 användas när denna utvärdering görs med CAPWAP-analys. Detta gäller för tydligt mantelburna pålar där även spetsbärförmåga är i det närmaste fullt mobiliserad, vanligtvis vid en permanent sjunkning per mätslag om ca 3 - 6 mm. Notera att för dragbelastade pålar är partialkoefficienten 0,1 högre än för tryckbelastade pålar, se Tabell 7.1 - Tabell 7.3. För pålar där det är svårt att utvärdera bärförmågan på manteln respektive spetsen med tillräckligt stor tillförlitlighet bör en högre modellfaktor än 1,3 användas. Alternativt utvärderas mantelbärförmågan konservativt i närheten av spetsen. I detta fall är det svårt att ge generella rekommendationer om lämplig modellfaktor eller utvärderingsmetodik, det måste bestämmas i varje enskilt fall av den ansvarige mättingenjören som utför analysen.

Utförda fältförsök på mantelburna stålkärnepålar, med stötvågsmätning och efterföljande provdragning, har visat att wave-up metoden även kan användas för att bestämma bärförmågan i drag. Vid utvärdering av dragbärförmågan med wave-up metoden föreslås att en reduktionsfaktor $\mu = 0,7$ används för att ta hänsyn till tvärkontraktionen, samt en modellfaktor $\gamma_{Rd} = 1,0$.

7.6 Dimensionering genom provning

7.6.1 Dynamisk provbelastning

Dynamisk provbelastning, även kallad stötvågsmätning, utförs genom att trådtöjningsgivare och accelerometrar appliceras på pålen varefter en stötvåg alstras i pålen med hjälp av ett slag från en hejare. För att mobilisera bärförmågan hos en påle krävs en kvarstående sjunkning på några millimeter varför hög fallhöjd kan erfordras, speciellt om pålarna är huvudsakligen spetsbärande. För betongpålar är det oftast påmaskinen som slagit pålen som slår ett mätslag. För stålplålar, som slagits med tryckluftshejare eller liknande, krävs normalt en tyngre frifallshejare för att alstra ett mätslag.



Figur 7.1. Montering av givare för stötvågsmätning samt exempel på mätutrustning.

Dimensionerade bärförmåga, baserad på medelvärde, bestämd genom stötvågsmätning beräknas enligt:

$$R_d = \frac{R_m}{\gamma_t \gamma_{Rd} \xi_5} \quad \text{Ekv 7.1}$$

där

R_m = Uppmätt geoteknisk bärförmåga, medelvärde. Rekommenderade värden på spetsmotstånd kan användas som ledning för att uppskatta vad som är möjligt att verifiera för spetsburna pålar, se avsnitt 8.1.

γ_t = Partialkoefficient för bärförmåga enligt Tabell A.7-A.9 i TRVFS respektive Tabell I-7 – I-9 i BFS, se även Tabell 7.1 -Tabell 7.3 nedan.

γ_{Rd} = Modellfaktor för stötvågsmätning enligt Tabell 2.5-3 i TK Geo 11 respektive Tabell I-11 i BFS. Normalt väljs 1,0 för CASE-metoden och 0,85 om mätkurvorna analyseras med CAPWAP eller om pålarna är stoppslagna i mycket fast morän eller mot berg. För pålar nedborrade och stoppslagna i berg föreslås en modellfaktor på 0,8¹. För wave-up metoden föreslås en modellfaktor 0,85. Notera att produkten mellan modellfaktor och korrelationskoefficient inte får understiga 1,0.

ξ_5 = Korrelationskoefficient som tar hänsyn till antalet provade pålar och det uppmätta medelvärdet enligt Tabell A.11 i TRVFS respektive Tabell I-11 i BFS (se Tabell 7.4 nedan). Enligt TRVFS respektive BFS för järnvägstillämpningar får ξ_5 divideras med en faktor 1,1 om pålarna står i ett styvt fundament som kan överföra laster från svaga (veka) till starka (styva) pålar. ξ_6 gäller för uppmätta minvärden.

Notera att produkten ($\gamma_{Rd} \xi_5$) aldrig får vara mindre än 1,0. Detta gäller även om det minsta uppmätta värdet är styrande och ξ_6 används. Det ligger alltid på geokonstruktören att välja ett lämpligt värde på modellfaktorn. Detta kan t.ex. vara aktuellt när mycket sten och block bedöms föreligga och det finns en stor osäkerhet i bestämningen av dimensionerande bärförmåga.

Tabell 7.1. Partialkoefficienter för verifiering av geoteknisk bärförmåga (γ_R) för slagna pålar

Bärförmåga	Symbol	Uppsättning R2	
		TRVFS	BFS
Spets	γ_b	1,2	1,3
Mantel (tryck)	γ_s	1,2	1,3
Total/kombinerad (tryck)	γ_t	1,2	1,3
Mantel (dragning)	$\gamma_{s,t}$	1,3	1,4

Tabell 7.2. Partialkoefficienter för verifiering av geoteknisk bärförmåga (γ_R) för grävpålar

Bärförmåga	Symbol	Uppsättning R2	
		TRVFS	BFS
Spets	γ_b	1,3	1,4
Mantel (tryck)	γ_s	1,3	1,4
Total/kombinerad (tryck)	γ_t	1,3	1,4
Mantel (dragning)	$\gamma_{s,t}$	1,4	1,5

¹ Förutsätter att samtliga pålar stoppslås med tillräckligt tung hejare/slagkolv; minst 2 ggr pålens vikt per meter.

Tabell 7.3. Partialkoefficienter för verifiering av geoteknisk bärförmåga (γ_R) för CFA-pålar

Bärförmåga	Symbol	Uppsättning R2	
		TRVFS	BFS
Spets	γ_b	1,3	1,4
Mantel (tryck)	γ_s	1,3	1,4
Total/kombinerad (tryck)	γ_t	1,3	1,4
Mantel (dragning)	$\gamma_{s;t}$	1,4	1,5

Tabell 7.4. Korrelationskoefficienter, ξ för bestämning av karakteristisk geoteknisk bärförmåga hos pålar baserat på resultat från dynamisk provbelastning^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 8} (n – antal provade pålar), utdrag ur BFS 2013:10 EKS 9.

ξ för $n =$	3 ⁷	4	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20	≥ 40	Samtliga pålar
ξ_5	1,60	1,55	1,50	1,45	1,42	1,40	1,35	1,30
ξ_6	1,50	1,45	1,35	1,30	1,25	1,25	1,25	1,25

1 I tabellen givna ξ -värden gäller för dynamisk provbelastning utvärderad med CASE-metoden.

2 I tabellen givna ξ -värden multipliceras med modellfaktorn 0,85 när signalmatchning av stötvågorna utförs eller då permanent sjunkning ≤ 2 mm per mätslag samt utvärderad spetsfjädring $< D/60$ för spetsburna pålar.

3 Om grundläggningen består av olika påltyper behandlas var typ för sig vid val av antal provpålar, n .

4 Vid utvärdering av bärförmåga vid drag från signalmatchning får maximalt 70 % av mantelns bärförmåga utnyttjas. Modellfaktorn för bärförmåga vid drag ska när värderingen baseras på signalmatchning väljas lika med 1,3.

5 Signalmatchning ska alltid utföras för huvudsakligen mantelburna pålar.

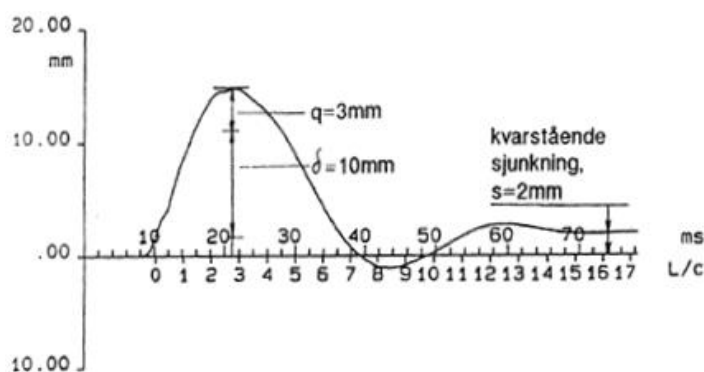
6 Påslagningsformler får inte kombineras med dessa korrelationskoefficienter.

7 Tillämpbar endast vid enhetliga geotekniska förhållanden och med ett avstånd mellan pålar inom kontrollobjektet på maximalt 25 meter. Med kontrollobjekt avses en grupp av pålar med enhetligt installations- och verkningssätt i en enhetlig jordvolym.

8 Vid järnvägstillämpningar får, i de fall bärförmågan inte bestäms av lokalt värde på materialegenskapen och byggnadsverket har tillräcklig styvhet och hållfasthet för att överföra laster från svaga pålar, korrelationskoefficienterna ξ_5 och ξ_6 divideras med 1,1.

Om lastberäkning och dimensionering utförs enligt BFS ska $\gamma_t = 1,3$ användas för slagna pålar. Enligt TRVFS samt TK Geo ska däremot γ_t sättas till 1,2. För CFA-pålar och grävpålar (insitu-tillverkade pålar) är partialkoefficienten en faktor 0,1 större. I detta avseende kan även en borrarad och stoppslagen stålpåle till berg anses som en slagen påle.

Enligt både BFS och TRVFS kan modellfaktorn γ_{Rd} väljas till 0,85 vid stötvågsmätning på spetsburen påle med liten spetsfjädring ($<$ påldiameter / 60) och en permanent sjunkning mindre än 2 mm eller för stötvågsmätning där CAPWAP-analys har utförts. I detta avseende kan även en mantelburen stål-kärnepåle utvärderad med wave-up metoden anses som en spetsburen påle med liten fjädring och sjunkning. Figur 7.2 visar hur spetsfjädringen kan bestämmas från en fjädringsmätning, i detta fall från en stötvågsmätning. Fjädringsmätning kan även utföras manuellt, se Pålkommissionens rapport 103 för mer information. Notera att stötvågen är en funktion av tiden och att pålen sällan är utsatt för en samtidig jämn tryckkraft över hela pålens längd. I övriga fall där endast CASE-mätning utförs väljs $\gamma_{Rd} = 1,0$. Modellfaktorer anges i IEG:s tillämpningsdokument Pålar samt i TK Geo. För pålar nedborrade och stoppslagna i berg föreslås att en modellfaktor på 0,8 kan användas.



q = utvärderad fjädring hos jorden
 $\delta = \frac{F(t)L}{EA}$ = pålmaterialets elastiska fjädring
 c = stötvågens utbredningshastighet
 L = längd
 F = Stötvågskraften i pålen
 E = Elasticitetsmodul
 A = Pålens tvärsnittsarea

Figur 7.2. Utvärdering av spetsfjädringen q från stötvågmätning för en 270 mm betongpåle. Spetsfjädringen 3 mm < $D/60=4,5$ mm, vilket innebär att en modellfaktor på 0,85 kan användas utan att behöva utföra CAPWAP- analys.

Enligt TRVFS samt järnvägsprojekt med BFS, får ξ_5 divideras med 1,1 om last kan överföras från svaga (veka) pålar till närliggande starka (styva) pålar via t.ex. ett styvt fundament eller för pålar under en styv väggkonstruktion, se Tabell 7.4. Notera att produkten av γ_{Rd} och ξ_5 inklusive eventuell reduktion för styvt fundament inte får vara mindre än 1,0. BFS tillåter i dagsläget inte reduktion av ξ_5 för bärförmåga bestämd genom stötvågmätning men däremot en reduktion av motsvarande korrelationskoefficient ξ_1 vid statisk provbelastning samt av ξ_3 vid dimensionering genom beräkning baserad på geotekniska undersökningar, vilket inte är att betrakta som ett konsekvent förhållningssätt.

7.6.2 Statisk provbelastning

Dimensionerande bärförmåga, baserad på medelvärde, bestämd genom statisk provbelastning beräknas på liknande sätt som för dynamisk provbelastning, dvs. enligt:

$$R_d = \frac{R_m}{\gamma_t \gamma_{Rd} \xi_1} \quad \text{Ekv 7.2}$$

där

R_m = Geoteknisk bärförmåga från statisk provbelastning utvärderad med lämpligt brottkriterium med hänsyn till brott i ovanförliggande konstruktion, medelvärde.

γ_t = Partialkoefficient för bärförmåga enligt Tabell A.7-A.9 i TRVFS respektive Tabell I-7 – I-9 i BFS, se även Tabell 7.1 - Tabell 7.3 ovan.

γ_{Rd} = Modellfaktor för statisk provbelastning som vanligtvis sätts till 1,0

ξ_1 = Korrelationskoefficient som tar hänsyn till antalet provade pålar och det uppmätta medelvärdet enligt Tabell A.9 i TRVFS respektive Tabell I-10 i BFS (se Tabell 7.5 nedan). Enligt TRVFS respektive BFS för järnvägstillämpningar får ξ_1 divideras med en faktor 1,1 om pålarna står i ett styvt fundament som kan överföra laster från svaga (veka) till starka (styva) pålar. ξ_2 gäller för uppmätta minvärden.

Tabell 7.5. Korrelationskoefficienter, ξ för bestämning av karakteristisk geoteknisk bärförmåga hos pålar baserat på resultat från statisk provbelastning¹ (n – antal provade pålar), utdrag ur BFS 2013:10 EKS 9.

ξ för n =	1	2	3	4	≥ 5
ξ_1	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
ξ_2	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

¹ Tillämpbar endast vid enhetliga geoteknisk förhållanden och med ett avstånd mellan pålar inom kontrollobjektet på maximalt 25 meter. Med kontrollobjekt avses en grupp av pålar med enhetligt installations- och verkningsätt i en enhetlig jordvolym.

8 Preliminär bedömning av bärförmåga

8.1 Spetsmotstånd på berg och morän

I Pålkommisionens Information 2007:1 "Pålgrundläggning – Grundinformation för projektörer" anges tumregler för vilket spetsmotstånd som är möjlig att påvisa med stötvågsmätning för betongpålar med tvärsnittet 270 x 270 mm² (motsvarar de gamla beteckningarna SP2, SP3) till 2500 kN för bergstopp samt 2000 kN för stopp mot bottenmorän. För en påle där bergdubben är stoppslagen mot berg som förväntas ta all last kan spetsmotståndet beräknas enligt Coates & Gyenges formel (1973), se Pål-kommisionens rapport 98, Stålkärnepålar.

Nedan ges några generella rekommendationer på spetsmotstånd σ_b (medelvärde) som är möjliga att mäta upp med stötvågsmätning för spetsburna pålar, där q_u är bergets enaxliga tryckhållfasthet:

- Nedborrad påle $> 2d$ i intakt berg eller inmejslad bergdubb: $\sigma_b = 5q_u$
- Bergdubb ($d < \text{ca } 150 \text{ mm}$) på intakt berg (halvoändligt medium): $\sigma_b = 4q_u$
- Påle på intakt berg (halvoändligt medium): $\sigma_b = 3q_u$
- Påle stoppslagen på mycket fast grovkornig bottenmorän: $\sigma_b = 25 - 30 \text{ MPa}$
- Påle stoppslagen på mycket fast bottenmorän med hög andel silt/finsand: $\sigma_b = 20 \text{ MPa}$

Bärförmågan kan sedan beräknas enligt:

$$R_m = \sigma_b A \quad \text{Ekv 8.1}$$

där

R_m = Geoteknisk bärförmåga som bedöms möjlig att mäta upp genom dynamisk provbelastning

A = Pålens eller dubbens tvärsnittsarea i kontakt med berg eller morän.

Enaxlig tryckhållfasthet (q_u) för intakt kristallint berg (granit, gnejs) är vanligen i storleksordningen 150 - 250 MPa. För pålar med bergspets kan man anta att en del av pålens tvärmått även är i kontakt med berg/morän efter inmejsling av bergdubben. Den geotekniska bärförmågan blir därför sällan dimensionerande. Låg fallhöjd behövs för att inte skada dubben under inmejslingen. Om moräntäcket är litet till måttligt kan man anta att stålupålar kan drivas till bergstopp medan betongupålar antas bli stoppslagna i moränen. Hejarsondering antas normalt motsvara pålstopp för slagna pålar, men fungerar inte tillfredsställande i jord med sten eller block. En kombination av jordberg-sondering och hejarsondering brukar däremot ge ett gott underlag för bedömning av pålstoppsnivå och dessutom ge en indikation på om jorden innehåller block och sten, vilket är viktigt. Om undersökningen dessutom utökas med CPT1 med speciell robust spets som klarar upp till 100 MPa i spetstryck samt provtagning med moränprovtagare eller sonic-borring fås ett bra underlag att bedöma spetsbärförmåga, neddrivningsdjup i friktionsjord samt om risk föreligger för falska stopp. I en artikel av Axelsson, Dangré & Elvin (2004) redovisas, utifrån en databas, uppmätta bärförmågor på standard betongupålar med tvärsnittet 235 x 235 mm² och 270 x 270 mm² som funktion av stoppsjunkningen (sjunkning/10 slag) för olika vikt av frifallshejare och för olika fallhöjder. Artikeln kan användas för att få en uppfattning om vilken bärförmåga som är rimlig att uppnå för olika hejarvikter, fallhöjder och påldimensioner.

8.2 Bärförmåga som kan påvisas med stötvågsmätning

Den geotekniska bärförmågan i gränstillståndet GEO kan bestämmas genom stötvågsmätning. Vid stötvågsmätning ska spänningen i pålen, som uppkommer vid slagning, begränsas enligt anvisningar i utförandestandarderna för massundanträngande pålar och mikropålar, se kapitel 3. Detta leder till ett övre gränsvärde för den geotekniska bärförmågan, som är rimlig att uppnå utan att pålen skadas. Observera att rekommendationer som anges nedan inte avser vad pålar klarar i gränstillståndet GEO, dvs. pålens geotekniska bärförmåga kan vara begränsande.

Sammanfattningsvis kan man enligt Eurokod urskilja tre huvudnivåer av bärförmåga beroende på typ av dimensionering och omfattning av verifieringen. I Tabell 8.1 -Tabell 8.4 redovisas en rekommenderad minsta omfattning på mätinsatsen för respektive nivå för betongpålar och stålpålar i projekt som dimensioneras enligt BFS respektive TRVFS. Tabellerna kan med fördel användas vid projektering eller som regleringsnivå vid upphandling av pålningsarbeten. I tabellerna anges en övre gräns på geotekniska bärförmågan som funktion av pålens karakteristiska stuklast F_{stuk} .

- För stålpålar är F_{stuk} definierad som; tvärsnittsarean multiplicerat med stålets flytgräns, dvs. $F_{stuk} = A_{stål} f_{yk}$.
- För betongpålar är F_{stuk} definierad som; effektiv tvärsnittsarea multiplicerat med betongens tryckhållfasthet vid tidpunkten för slagning, dvs. $F_{stuk} = A_{tot} f_{cck}$ där $A_{tot} = A_{betong} + A_{stål} (E_{stål}/E_{betong} - 1)$. Notera att F_{stuk} även kan begränsas av stuklast för pålspets och skarvar.

För att minimera risken för överbelastning av pålarna i samband med installation och stoppslagning är det viktigt att konstruktören anger vilken hållfasthetsklass som betongpålar ska ha uppnått vid installationstillfället. Även för stålpålar ska hållfastheten anges så att pålentreprenören kan anpassa spänningen i pålen vid slagning.

Vid upprättande av förfrågningsunderlag måste man göra ett antagande om vilken omfattning på provning som kan tänkas behövas, men det är först under provpålningen som lämplig omfattning klargörs tydligare. Ibland är det först under produktionspålningen som anomalier upptäcks som kräver en utökad provning.

Det rekommenderas att man anger en mätnivå i förfrågningsunderlaget enligt nedanstående tabeller. Observera att mätinsatsen som redovisas i tabellerna är en miniminivå. Större mätinsats krävs för ett högre lastutnyttjande eller för att pålningsförhållandena bedöms kräva det, se kapitel 9, Produktionskontroll, för en rekommenderad omfattning av mätinsatsen. Slutlig omfattning av mätinsatsen bestäms efter provpålningen eller under produktionskontrollen beroende på inkomna resultat samt observationer under pålningsarbetet.

Vid större variationer i pållängder, bärförmåga, samt slagningsförhållanden kan det krävas både utökad provpålning och utökad produktionskontroll jämfört med vad som anges i nedanstående tabeller. Notera att om fler provpålar än tre utförs inom kontrollområdet (max 25 x 25 m²) kan ett högre lastutnyttjande användas än vad som anges i tabellerna. Se nedan hur dimensionerande bärförmåga påverkas av antalet mätta pålar.

För nivå 2 förutsätts att minst 5 % av pålarna mäts, antingen som en del av provpålningen eller inkluderande i en eventuell produktionskontroll. För slagna pålar är det oftast svårt att från det geotekniska underlaget bestämma om någon av de föreslagna problemsituationerna som redovisas i kapitel 9 föreligger. En produktionskontroll/provpålning på minst 5 % bör därför vara ett krav. För stålpålar borrade och stoppslagna på berg är oftast behovet av produktionskontroll inte så stort.

För nivå 3 har antagits att minst fyra produktionskontrollpålar provbelastas och att korrelationskoefficienten reduceras med inkomna resultat från produktionskontrollen samt medräknas i provpålningsresultatet.

Tabell 8.1. Rekommenderad maximal bärförmåga för stålplåtar med hänsyn till slagning samt minsta omfattning på verifiering av bärförmåga. Tabellen anger rekommendationer för projekt i enlighet med BFS.

Verifieringsnivå	Rekommenderad maximal bärförmåga med hänsyn till begränsning av belastning av plåtmateriäl vid slagning ¹	Verifieringens omfattning
Nivå 1 Härdvunna åtgärder eller beräkning (WEAP)	$R_{d,max} = 0,33 \times F_{stuk}$ för stålplåtar	Stoppsslagning av samtliga plåtar enligt schablon ² eller efter resultat från WEAP-analys
Nivå 2 Provpålning	$R_{d,max} = 0,40 \times F_{stuk}$ för stålplåtar	Provpålning med minst 5 % av plåtarna dock minst tre representativa mätpålar inom ett område om max 25 x 25 m ² . Produktionskontroll efter behov, se kapitel 9.
Nivå 3 Provpålning och produktionskontroll	$R_{d,max} = 0,50 \times F_{stuk}$ för stålplåtar	Provpålning enligt ovan samt minst 10 % produktionskontroll ³ . För lämplig omfattning på produktionskontroll, se kapitel 9.

Tabell 8.2. Rekommenderad maximal bärförmåga för betongplåtar med hänsyn till slagning samt minsta omfattning på verifiering av bärförmåga. Tabellen anger rekommendationer för projekt i enlighet med BFS.

Verifieringsnivå	Rekommenderad maximal bärförmåga med hänsyn till begränsning av belastning av plåtmateriäl vid slagning ¹	Verifieringens omfattning
Nivå 1 Härdvunna åtgärder eller beräkning (WEAP)	För standard betongplåtar (SP1-SP3) enligt tidigare stoppslagningstabeller i PKR 94 ⁴ eller enligt TK Geo 11	Stoppsslagning av samtliga plåtar enligt schablon ² eller efter resultat från WEAP-analys
Nivå 2 Provpålning	$R_{d,max} = 0,30 \times F_{stuk}$ för betongplåtar	Provpålning med minst 5 % av plåtarna dock minst tre representativa mätpålar inom ett område om max 25 x 25 m ² . Produktionskontroll efter behov, se kapitel 9.
Nivå 3 Provpålning och produktionskontroll	$R_{d,max} = 0,40 \times F_{stuk}$ för betongplåtar	Provpålning enligt ovan samt minst 10 % produktionskontroll ³ . För lämplig omfattning på produktionskontroll, se kapitel 9.

Tabell 8.1 och Tabell 8.2 gäller för enkla och enhetliga slagningsförhållanden och projekt som dimensioneras enligt Boverkets BFS.

¹ Avser neddrivning, stoppslagning och stötvågmätning

² 10 mm/10 slag för betongplåtar och 5 mm/10 slag för stålplåtar stoppslagna med frifallhejare och 5 mm/min för stålplåtar stoppslagna med luftdriven hammare/hydraulhammare

³ Slutlig omfattning beror på observationer vid provpålningen och produktionskontrollen

⁴ Maximal bärförmåga väljs i säkerhetsklass 1.

Tabell 8.3. Rekommenderad maximal bärförmåga för stålplåtar med hänsyn till slagning samt minsta omfattning på verifiering av bärförmåga. Tabellen anger rekommendationer för projekt i enlighet med TRVFS eller för tillämpning av BFS vid järnvägsprojekt.

Verifieringsnivå	Rekommenderad maximal bärförmåga med hänsyn till begränsning av belastning av plåtmateriäl vid slagning ¹	Verifieringens omfattning
Nivå 1 Härdvunna åtgärder eller beräkning (WEAP)	$R_{d,max} = 0,33 \times F_{stuck}$ för stålörspålar	Stoppslagning av samtliga pålar enligt schablon ² eller efter resultat från WEAP-analys
Nivå 2 Provpålning	$R_{d,max} = 0,44 \times F_{stuck}$ för stålörspålar	Provpålning med minst 5 % av pålarna dock minst tre representativa mätpålar inom ett område om max 25 x 25 m ² . Produktionskontroll efter behov, se kapitel 9.
Nivå 3 Provpålning och produktionskontroll	$R_{d,max} = 0,55 \times F_{stuck}$ för stålörspålar	Provpålning enligt ovan samt minst 10 % produktionskontroll ³ . För lämplig omfattning på produktionskontroll, se kapitel 9.

Tabell 8.4. Rekommenderad maximal bärförmåga för betongpålar med hänsyn till slagning samt minsta omfattning på verifiering av bärförmåga. Tabellen anger rekommendationer för projekt i enlighet med TRVFS eller för tillämpning av BFS vid järnvägsprojekt.

Verifieringsnivå	Rekommenderad maximal bärförmåga med hänsyn till begränsning av belastning av plåtmateriäl vid slagning ¹	Verifieringens omfattning
Nivå 1 Härdvunna åtgärder eller beräkning (WEAP)	För standard betongpålar (SP1-SP3) enligt tidigare stoppslagningstabeller i PKR 94 ⁴ eller enligt TK Geo 11	Stoppslagning av samtliga pålar enligt schablon ² eller efter resultat från WEAP-analys
Nivå 2 Provpålning	$R_{d,max} = 0,33 \times F_{stuck}$ för betongpålar	Provpålning med minst 5 % av pålarna dock minst tre representativa mätpålar inom ett område om max 25 x 25 m ² . Produktionskontroll efter behov, se kapitel 9.
Nivå 3 Provpålning och produktionskontroll	$R_{d,max} = 0,44 \times F_{stuck}$ för betongpålar	Provpålning enligt ovan samt minst 10 % produktionskontroll ³ . För lämplig omfattning på produktionskontroll, se kapitel 9.

Tabell 8.3 och Tabell 8.4 gäller för enkla och enhetliga slagningsförhållanden och projekt som dimensioneras enligt TRVFS eller BFS för järnvägstillämpningar. Om konstruktionen medger att last kan överföras från starka till svaga pålar kan ovanstående värden multipliceras med 1,1.

¹ Avser neddrivning, stoppslagning och stötvågmätning

² 10 mm/10 slag för betongpålar och 5 mm/10 slag för stålörspålar stoppslagna med frifallhejare och 5 mm/min för stålörspålar stoppslagna med luftdriven hammare/hydraulhammare

³ Slutlig omfattning beror på observationer vid provpålningen och produktionskontrollen

⁴ Maximal bärförmåga väljs i säkerhetsklass 1.

Nedan redovisas ett förenklat sätt att bedöma ett övre gränsvärde $R_{d,max}$ på den geotekniska bärförmågan som kan påvisas utan att pålens hållfasthet överskrider i samband med stötvågsmätning och som kan användas som riktvärde vid projektering. Om slagningssimulering utförs fås ett mer nyanseerat värde på maximal bärförmåga med hänsyn till pålens hållfasthet under slagning och speciellt om skadliga dragkrafter kan uppstå.

Notera att den påvisade bärförmågan är objektspecifik och kan vara lägre än vad som erhålls med användning av nedanstående koefficienter.

$R_{d,max}$ beräknas enligt Ekv 8.2 och Ekv 8.3:

$$R_{d,max} = \frac{F_{stuk} k_1 k_2}{\gamma_{tot}} \quad \text{Ekv 8.2}$$

$$\gamma_{tot} = \gamma_t \gamma_{Rd} \xi_5 \quad \text{Ekv 8.3}$$

där

F_{stuk} = Pålens karakteristiska stuklast.

k_1 = Erfarenhetsvärde som är kvoten av pålens statiska neddrivningsmotstånd (utvärderat enligt CASE- eller CAPWAP-metod) och pålens totala neddrivningsmotstånd (statiskt- och dynamiskt motstånd), se Tabell 8.5 och Tabell 8.6. Detta är ett värde som reglerar vilken maximal geoteknisk bärförmåga som är rimlig att mäta upp med hänsyn till storleken på returstötvågen.

k_2 = Koefficient som tar hänsyn till spänningen i pålen och beror på om man har kontroll på spänningsnivån under slagning, se nedan.

γ_t = Partialkoefficient för bärförmåga enligt Tabell A.7 - A.9 i TRVFS respektive Tabell I-7 - I-9 i BFS, se även Tabell 7.1 - Tabell 7.3.

γ_{Rd} = Modellfaktor för stötvågsmätning enligt Tabell 2.5-3 i TK Geo respektive Tabell I-11 i BFS.

ξ_5 = Korrelationskoefficient som tar hänsyn till antalet provade pålar och det uppmätta medelvärdet enligt Tabell A.11 i TRVFS respektive Tabell I-11 i BFS, se även Tabell 7.4.

8.3 Erfarenhetsvärden från stötvågsmätningar, k_1

Rekommenderade värden på k_1 för stål respektive betongpålar anges i Tabell 8.5. I Tabell 8.6 ges rekommendationer för reduktion av k_1 för några vanliga situationer. För accelererande hejare föreslås en reduktion när spänningarna eller anslagshastigheten inte övervakas genom mätning. Detta på grund av svårigheten att bedöma anslagshastigheten från endast fallhöjden och den stora variation i anslagshastighet som blir följden.

Tabell 8.5. Rekommenderade maxvärden på k_1

Typ av situation	k_1 stål	k_1 betong
Pålar nedborrade i berg, liten mantelfriktion	0,85	-
Pålar stoppslagna på berg, liten mantelfriktion	0,80	0,75
Pålar stoppslagna i fast morän, liten mantelfriktion	0,75	0,70

Tabell 8.6. Förslag på reduktionsvärden för k_1 -värden.

Typ av situation	Reduktion av k_1
Spetsburna pålar, pållängd > 20 m, måttligt till stort mantelmotstånd	0,1 - 0,2
Pålar stoppslagna i mäktigt lager morän eller i en siltig/finsandig morän	0,1 - 0,2

8.4 Övervakning av spänningar, k_2

Värden på k_2 redovisas i Tabell 8.7. Om stötvågmätning utförs på stålspänningar övervakas under installation, stoppslagning och provbelastning kan k_2 i Ekv 8.2 sättas till 1,1 (dvs. 1,1 ggr stålets flytgräns) enligt utförandestandard SS-EN 12699:2000, Massundanträngande pålar. Om däremot spänningen i pålen inte övervakas under produktionen sätts denna koefficient till 0,9. Motsvarande för slagna betongpålar är 0,9 (dvs. 0,9 ggr betongens tryckhållfasthet) vid övervakning av spänningar respektive 0,8 om det inte utförs någon övervakning. De högre värdena kan även användas om skonsam drivning och stoppslagning utförs tydligt under pålmaterialets stukgräns. Om spänningarna i pålarna övervakas under installation och stoppslagning tillåts högre spänningar i pålen. En sådan övervakning av spänningarna bör utföras under en fortlöpande produktionskontroll. För att övervaka spänningarna i pålen kan mätning av anslagshastigheten hos hejaren vara ett alternativ till stötvågmätning.

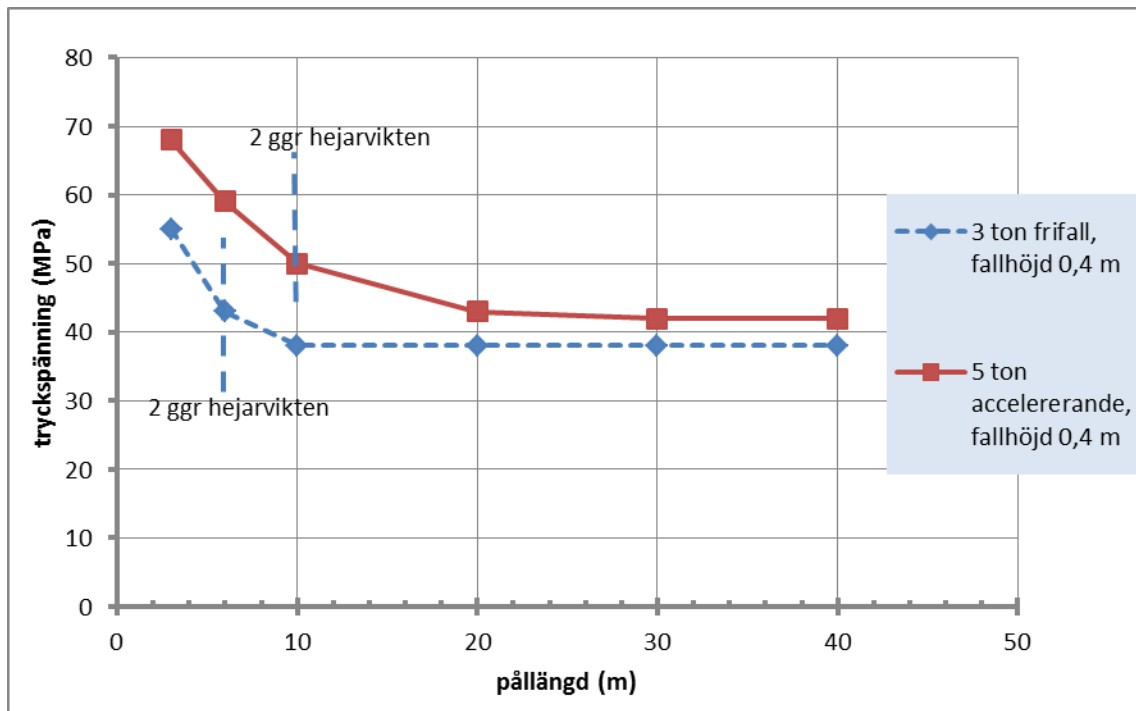
För pålar som stoppslås med accelererande hejare utan kontinuerlig mätning av tillförd energi (t.ex. genom registrering av hejarens anslagshastighet) bör värdena i Tabell 8.7 reduceras med 0,10 om inte hejarens anslagshastighet mäts fortlöpande under produktion.

Tabell 8.7. Värden på k_2 enligt utförandestandarder.

Typ av situation	k_2 stål	k_2 betong
Ingen risk att spänningsnivån i pålen överskrider under installation och stoppslagning. Kontroll utförs vid behov genom stötvågmätning eller genom att mäta anslagshastigheten hos hejaren.	1,1	0,9
Risk föreligger att spänningsnivån i pålen kan överskridas och ingen kontroll sker under produktion.	0,9	0,8

8.5 Inverkan av pålens längd och hejarvikten

Den fallhöjd hos hejaren (anslagshastighet) som krävs för att verifiera bärförmågan ska väljas med hänsyn till resultatet från provpålningen. För korta pålar i förhållande till hejarens storlek (impedans) ska lägre fallhöjd väljas för att verifiera samma bärförmåga som för medellånga till långa pålar. Om fallhöjden inte sänks för korta pålar är risken stor att dessa överbelastas under stoppslagningen eller vid provpålningen. Som korta pålar kan man överslagsmässigt räkna pålar kortare (i enheten meter) än vad som motsvarar dubbla hejarvikten i ton, se exempel i Figur 8.1. Även i kapitel 5 redovisas exempel på lämplig fallhöjd för olika längder av pålar med stoppslagningsregel enligt hävdvunna åtgärder. Slagningssimulering är annars ett utmärkt hjälpmedel att bedöma reduktion av fallhöjd hos korta pålar. Vid stoppslagning av stålspänningar med hydraul- eller tryckluftshammare bör slagkolvens vikt vara minst 2 gånger pålens vikt per meter.



Figur 8.1. Förhållande mellan tryckspänning i en betongpåle (270 x 270 mm²) och pålens längd för olika hejarvikter.

9 Produktionskontroll med bestämning av bärförmåga

9.1 Allmänt

Produktionskontroll med bestämning av bärförmågan görs vanligtvis med stötvågsmätning (dynamisk provbelastning) eller genom statisk provning i drag. Statisk provning i tryck som produktionskontroll är idag inte så vanlig i Sverige.

SS-EN 1997-1, avsnitt 7.9 anger att samtliga pålar ska följas upp under produktionen och pålprotokoll ska föras. Produktionskontroll med t.ex. bestämning av bärförmågan och pålens integritet ska göras när iakttagelser under installationen tyder på stora avvikelser från förväntat beteende med avseende på de geotekniska förhållandena eller tidigare erfarenheter på platsen. Installation av ersättningspåle kan behöva göras om osäkerheter råder om pålens kvalitet. Val av lämpligt antalet pålar som ska kontrolleras ska väljas på basis av det som observeras under installationen. Produktionskontrollen är ett komplement till provpålningen (dimensionering genom provning).

Enligt Eurokod 7, avsnitt 7.5.2.3, finns möjlighet att utföra produktionskontroll med en provlast som är minst lika stor som dimensionerande last. Detta är i första hand tillämpligt vid statisk provbelastning, t.ex. för mantelburna pålar, injekterade pålar eller kohesionspålar där man inte vill riskera att mobilisera bärförmågan innan pålarna vuxit fast helt. För statisk provbelastning som produktionskontroll rekommenderas dock att minst 1,1 gånger dimensionerande last används. Notera att dessa pålar inte ingår i dimensioneringsunderlaget utan har som syfte att verifiera pålarnas funktion. Denna möjlighet har däremot ingen större praktisk användning vid dynamisk provbelastning eftersom det sällan är förknippat med en större kostnad att provbelastar upp till samma lastnivåer som vid provpålningen. Om provlasten motsvarar den vid provpålningen är det möjligt att successivt under produktionen revidera den dimensionerande bärförmågan. Allteftersom nya data inkommer kan korrelationskoefficienten ξ reduceras med hänsyn till ökat antal provningar.

9.2 Förslag till produktionskontroll

Nedan ges förslag på situationer där produktionskontroll med provbelastning rekommenderas. Listan är inte fullständig och det kan finnas många fler orsaker till att utföra produktionskontroll. Det är lämpligt att efter utförd provpålning besluta vilken omfattning och typ av produktionskontroll som ska göras. Observationer under produktionen kan dock sedan leda till ändring av detta beslut.

- 1) Små förändringar av påldimension. Förnyad provpålning är inte alltid nödvändig vid mindre förändringar i pålens tvärsnittsarea eller påldiameter. Däremot bör man verifiera stoppslagningskriteriet och att det råder god korrelation avseende bärförmåga mellan påldimensionerna. För stålplålar på berg med liten permanent sjunkning och där bärförmågan inte mobiliseras under provbelastningen kan en större skillnad i kvot mellan största och minsta tvärsnittsarea accepteras, upp till max det dubbla är rimligt. Vid större förändringar rekommenderas förnyad provpålning.
- 2) Vid falska pålstopp, dvs. när stoppsjunkningen ökar vid efterslagning en viss tid efter stoppslagningen. Efterslagningen bör göras minst 12 timmar efter stoppslagningen. Kontroll av falska pålstopp kan även göras genom kontroll av sjunkningen under samma betingelser som under stoppslagningen. Fjädringsmätning kan också ge indikation om falska stopp.
- 3) Lokalt släntberg med liten överliggande tjocklek av stabiliserande friktionsjord.

- 4) Blockig jord, där risk finns för bortslagning eller där stoppslagningen är osäker. Block i en fast bottenmorän är oftast inget stort problem eftersom omgivande jord är stabiliserande.
- 5) Kraftigt varierande geotekniska förutsättningar eller dålig geologisk överblick av området och där risken finns att provpålarna inte ger en fullständig bild av situationen. En indikation på detta kan vara att provpålarna uppvisar en stor spridning i bärförmåga eller att det är stor skillnad i hur pålarna uppför sig under installationen, t.ex. en stor skillnad i antalet slag.
- 6) Hävning och förlorad spetsbärförmåga vid slagning av näraliggande pålar. Detta kan även kontrolleras genom inmätning av pålarna.
- 7) Pålgruppseffekter, dvs. påverkan på närliggande pålar vid slagning av pålar i grupp. Huvudsakligen beroende på packningseffekter eller förändring av effektivspänningen i jorden under kort (portryckshöjning) respektive lång tid.
- 8) Vid utnyttjande av en hög geoteknisk bärförmåga, där lokal erfarenhet saknas eller är liten. Exempel på högt utnyttjande av jordens hållfasthet är mer än 20 MPa eller 25 MPa spetsmotstånd i en siltig respektive grovkornig morän eller mer än 100 kPa mantelmotstånd i en friktionsjord.
- 9) Vid byte av installationsutrustning. Kontroll bör göras att den nya hejaren har likvärdig effektivitet och ger motsvarande stoppkriterium.
- 10) In-situ tillverkade pålar. Denna typ av pålar, t.ex. grävpålar, kan uppvisa en större spridning i strukturell och geoteknisk kvalitet än förtillverkade pålar.
- 11) Kontroll av spänningar under neddrivning och stoppslagning. Ett större utnyttjande av pålens bärförmåga kan användas om spänningarna kontrolleras. Se faktor k_2 under kapitel 8.
- 12) Hög utnyttjandegrad med avseende på pålarnas konstruktiva bärförmåga eller en osäkerhet i pålens funktion efter installation, på grund av t.ex. glapp i skarvar, skador hos betongpålar, krokighet hos stålpålar etc.

Tabell 9.1. Förslag på omfattning hos produktionskontroll genom stötvågsmätning.

Kontroll-situation	Andel, %	Minsta avstånd	Antal pålar	Specificerade pålar
1			≥ 3 st	
2	10 - 25	10 - 20 m		
3	10 - 25			
4	10 - 25			
5		<5 - 15 m		
6	5 - 10		Minst en per pålgrupp	T.ex. den först slagna pålen i gruppen
7	5 - 10			Högt belastade pålar
8	5 - 10			
9			≥ 3 st	
10	10 - 25			
11	5 - 10			
12	10 - 20			Pålar i Nivå 3

Den högre andelen som föreslås i Tabell 9.1 bör användas för små objekt med totalt sett ett relativt fåtal pålar. För att få tillräcklig information om pålningsförhållandena bör en produktionskontroll inte understiga fyra pålar, hur litet objektet än är.

Mängden produktionspålar kan väljas på basis av ett eller flera av följande alternativ:

- En procentuell andel av slagna pålar
- Ett minsta avstånd mellan provade pålar. Lämpligt om syftet är att verifiera de geotekniska förhållandena inom området
- Ett bestämt antal pålar, t.ex. en påle i varje pålgrupp

- Vissa specifika pålar, t.ex. de högst belastade pålarna eller den först slagna pålen i en pålgrupp

Om flera situationer är tillämpliga i ett projekt väljs den andel som ger flest antal mätta pålar, ovanstående procentandelar behöver alltså inte adderas ihop.

9.3 Kompletterande kontrollmetoder

I många situationer kan provbelastning kompletteras med andra kontrollmetoder. Exempel på några sådana metoder är:

- Slagräkning, protokollföring av antal slag per 20 cm sjunkning hos pålen
- Kontinuerlig registrering av hejarens anslagshastighet (slagenergi)
- Integritetskontroll (eng. low strain testing). Detektering och bestämning av läge för eventuella skador för oskarvade betongpålar
- Stoppslagning vid kontrollslagning eller vid efterslagning
- Fjädringsmätning för att upptäcka veka pålars bärförmåga, kraftigt krökta pålar eller förhöjda portryck
- Rakhetsmätning av stålörspålar med inklinometer. Nedsänkning av en uppochnervänd ficklampa kan användas för att välja ut lämpliga pålar där kraftig krökning befaras. Användning av tolk är också ett alternativ, risk finns dock att tolken fastnar vid för stor krökning

En eller flera av dessa kontrollmetoder kan användas tillsammans med stötvågs-mätning för att få en hög och kostnadseffektiv kontroll och för att optimera pålningsarbetet.

Följande kontroller används i första hand för att kontrollera rörelser eller stabilitet i omgivningen:

- Precisionsinmätning av pålar och punkter på markytan för att kontrollera sättning, hävning eller horisontalförskjutning
- Automatisk registrering av olika installationsparametrar för borrar pålar
- Portrycksgivare i marken. Kontroll av förhöjda portryck som kan indikera för låg bärförmåga hos pålar eller stabilitetsproblem i omgivningen
- Inklinometermätning, mätning av massförskjutning som kan indikera hävning och stabilitetsproblem i omgivningen

10 Riktlinjer för utförande av provning

Som framgår av kapitel 7 har, för okomplicerade projekt med spetsburna pålar och kända pålningsförhållanden, en praxis utvecklats som innebär att provpålning och eventuell produktionskontroll utförs fortlöpande under produktionsskedet. Införandet av kontrollområden, där ett antal pålar testas i varje kontrollområde, har påskyndat denna utveckling.

Provpålningen blir för denna typ av projekt ofta något förenklad, men bör dock i princip utföras enligt beskrivning nedan.

10.1 Förberedande arbeten

Före provpålning, stoppslagning och stötvågsmätning ska geotekniska förhållanden och slagningsförsättningar utvärderas enligt följande:

- Jordtyper på arbetsplatsen och jordens variationer.
- Förväntad tillväxt i bärförmåga mellan drivning och efterslagning.
- Tidpunkt när pålen ska provbelastas.
- Pålens konstruktiva bärförmåga för kontroll av att pålarna inte överbelastas vid drivning, stoppslagning eller efterslagning.
- Vid mantelburna pålar: beräkning av preliminär längd i jord enligt geostatisk beräkningsmetod.
- Vid spetsburna pålar: preliminär stoppslagningsregel som uppfyller ställda krav på geoteknisk bärförmåga. Stoppslagningsregeln ska beräknas enligt Pålkommisionens rapport 92 Datorsimulering av pålslagning alternativt enligt stoppslagningsstabeller i Trafikverkets dokument TRVFS. Preliminära stoppslagningsregler ska jämföras med mätresultat vid provpålning.
- Erforderlig hejarvikt och fallhöjd bör bedömas. För stoppslagning av stålpålar rekommenderas att hejarvikten för lätta hejare är minst 2 gånger pålens vikt per meter. Detta gäller även för borrarade stålrörspålar. Vid dynamisk provning av stålpålar brukar en hejarvikt på 2,5 % av pållasten och en fallhöjd på 6 - 7 % av pållängden vara tillräckligt för att verifiera bärförmågan. För korta pålar som slås mot berg kan hejarvikt och fallhöjd vara något lägre. Datorprogrammet WEAP kan användas för att närmare bedöma erforderlig fallhöjd.
- Påpekas bör att verifiering av bärförmåga för stålpålar med last i Nivå 3 enligt kapitel 8 ställer extra höga krav på att det finns förutsättningar för att hejaren träffar pålen med väl centrerade slag för att inte riskera överbelastning av stålet. Detta innebär exempelvis att stor noggrannhet krävs vid kapning och att det finns möjlighet att justera hejarens lutning och anliggning mot pålen. Hejaren bör givetvis kunna styras med hjälp av en gejder. Om stötvågsmätning utförs med givarna placerade på en s.k. mätkekt är detta ännu mer angeläget eftersom det uppstår förluster vid kraftöverföring mellan hejaren och pålen. Arrangemanget försvårar dessutom centreringen av slagen på pålen. Om pålarna är mycket högt belastade kan det vara svårt att verifiera erforderlig bärförmåga om mätkekt används.
- För stålrörspålar med högt lastutnyttjande avseende gränstillstånd GEO kan ett alternativ vara att öka pålens styvhet genom att pålarna fylls med betong och utföra stötvågsmätning efter att betongen härdar. Det är viktigt att pålarna fylls med betong ända upp till överkanten, se Pålkommisionens rapport 104 Borrarade stålrörspålar. Enligt rapport 104 kan ofta erforderlig bärförmåga verifieras utan betongfyllning för mindre påltvärsnitt medan betongfyllning krävs för grövre borrarade stålrörspålar, exempelvis 406 x 12,5. Vid stötvågsmätning av betongfyllda stålrörspålar är det risk för att samverkan mellan stål och betong minskar i övre delen av pålen, vilket bör beaktas om betongen har en lastbärande funktion för gränstillstånd STR.

- Provpålarne bör märkas upp varje meter (om inte antal slag per meter sjunkning registreras automatiskt av pålkranen).

10.2 Provpålning

Provpålarne bör slagräknas under hela drivningen. Antalet slag mot pålsjunkning (slag/m eller slag/0,2 m) samt fallhöjd dokumenteras.

Stötvågsmätning utförs från nivå, där jordens hållfasthet är av intresse för upprättande av stoppslagningsregler. Om spänningar i pålen under drivningen är av intresse ska stötvågsmätning utföras vid relevanta nivåer eller hellre som en kontinuerlig mätning under hela drivningsförloppet. Vid "stopp-slagning" mäts bärförmågan vid olika sjunkningsvärden.

Provpålning och stötvågsmätning ska omfatta minst tre pålar/kontrollområde enligt Boverkets BFS 2013:10, tabell I-7 till I-11 samt i Trafikverkets TRVFS 2011:12, tabell A.6 - A.9 och A.11. Tabellerna presenteras även i avsnitt 7.6.

Den geotekniska bärförmågan ska bedömas med ledning av resultat av beräknat och verifierat stoppslagningskrav. En påle slagen i mäktiga lager av fast jord visar vanligen en betydande tillväxt i bärförmåga med tiden. Större delen av denna tillväxt beror på att mantelmotståndet ökar efter att ha blivit stört vid pålens neddrivning, se Pålkommisionens rapport 103 för ytterligare information.

10.3 Efterslagning

Stötvågsmätning vid efterslagning av pålarne ska göras dels för kontroll av att falska stopp inte föreligger, dels för bedömning av tillväxt i geoteknisk bärförmåga. Pålarne bör efterslås tidigast 12 timmar efter neddrivning. För pålar som slås i siltiga jordar kan det krävas längre tid mellan installation och provning, se BFS 2013:10 EKS 9, kapitel 7.1, 2 §. Om tillväxten i bärförmåga ska kunna tillgodoräknas, krävs att tidpunkten för efterslagningen anpassas till jordtypen. Påle slagen i grovkorniga jordar (grus/sand) efterslås lämpligen 1 - 10 dagar efter neddrivningen. Påle slagen i finkorniga jordar (silt/lera) efterslås lämpligen 1 - 4 veckor efter neddrivningen. För att erhålla en säkrare tillväxtprognos på den geotekniska bärförmågan bör mätningar utföras vid mer än två tillfällen. För mer information, se Pålkommisionens rapport 91.

10.4 Utvärdering av bärförmåga

Bärförmågan ska bestämmas genom utvärdering av stötvågsförlopp, där både kraft och partikelhastighet registreras. Vid utvärderingen ska de geotekniska förhållandena beaktas. Utvärdering ska göras av erfaren personal som är välutbildad med avseende på stötvågsteori och stötvågsmätningar och har ett gott geotekniskt kunnande. För tolkning av mätresultat hänvisas till handboken Pålgrundläggning, avsnitt 9.3.

Pålars bärförmåga kan för huvudsakligen spetsburna pålar utvärderas med enbart CASE-metoden med lämpligt vald jorddämpning (J_C -faktor). Alternativt kan signalmatchning utföras av stötvågen enligt datorprogram CAPWAP eller likvärdigt. Datoranalys med signalmatchning ska användas för kontroll av mätresultat och kontroll av CASE-metodens J_C -faktor om:

- pålarne uppvisar stor andel mantelmotstånd
- stora sjunkningar förekommer, där sjunkning $s > D/50$ mm per slag vid slagning med frifallshejare eller $s > 20$ mm/minut vid slagning med tryckluftshejare
- pålarne har varierande tvärsnitt och impedans

- pålarnas funktion i jord eller mätresultatet avviker från förväntade förhållanden

Rekommenderad mängd CAPWAP-analyser är vanligtvis 20 - 40 % av de mätta pålarna, dock minst 2 st. Om korrelationen är godtagbar kan man tillgodoräkna sig de övriga CASE-utvärderade pålarna som om även de är signalmatchade och därmed kan en lägre totalsäkerhet användas (lägre modellfaktor). På motsvarande sätt kan en korrelation mellan statisk och dynamisk provbelastning användas och ge en lägre korrelationsfaktor.

CAPWAP-analys är oftast inte nödvändig för spetsbärande pålar som slås genom lös lera ned till fast morän. För pålar genom lösa jordlager med stopp mot berg är både J_c -faktor och CAPWAP-analys ointressant. För mantelburna pålar i ler- och siltjord, eller där stor variation råder i bärförmåga, pållängd, pålningsförhållanden etc., kan däremot fler CAPWAP-analyser än 20 - 40 % vara motiverat.

10.5 Utvärdering av stoppslagningskriterium/nedslagningsdjup

För huvudsakligen spetsburna pålar upprättas objektspecifikt stoppslagningskriterium, med beaktande av:

- stoppslagning vid drivning
- tillväxt i bärförmåga
- eventuella påhängslaster från negativ mantelfriktion
- att pålen inte skadas av slagningen
- variationer avseende geotekniska förhållanden, pållängder samt hejarens effektivitet.

Sjunkningsvärden vid stoppslagning ska normalt väljas inom intervallet:

$s = 5 - 30 \text{ mm/10 slag}$ vid slagning med fallhejare

$s = 5 - 30 \text{ mm/minut}$ vid slagning med tryckluftshejare eller slaghammare.

För mantelburna pålar kan stoppslagningsregel kombineras med eller ersättas av ett nedslagningsdjup. För bestämning av vilken pållängd i jord som uppfyller ställda krav på geoteknisk bärförmåga redovisas mantelmotstånd per längdenhet (ofta 1 eller 2 m) och totalt mantelmotstånd mot pålspetsdjup. Fördelningen av mantelbärförmåga jämförs med geoteknisk undersökning för kontroll av att datoranalyserat slag representerar jordförhållandena. Datoranalys utförs på representativa pålar för att säkerställa att jordens eventuella variation beaktas.

Val av pållängd för objektet blir en sammanvägning av resultat från:

- geoteknisk bedömning
- egenskaper vid drivning
- egenskaper vid efterslagning

10.6 Produktionskontroll av pålar

För verifiering av att pålar, installerade enligt anvisningarna från provpålningen, uppfyller ställda krav kan stötvågmätningar utföras i form av produktionskontroll. Produktionskontroll omfattar följande:

- a) att pålarna fungerar i jord motsvarande provpålarna
- b) att bärförmågan uppfyller ställda krav
- c) att pålarna inte är skadade (integritetskontroll)

Om pålarna inte uppfyller ställda krav, görs kompletterande utredning av pålningen. Produktionskontrollen ska utföras av personal som är speciellt utbildad i stötvågsmätteknik och som kontinuerligt arbetar med stötvågsmätningar.

10.7 Utvärdering av produktionskontroll

En påles bärförmåga utvärderas normalt enligt CASE-metoden med J_c -värde enligt provpålning. Integritetskontrollen av pålar, enligt stötvågsmätning med kraft- och hastighetskurvor, ska visa att pålarna är funktionsdugliga.

10.8 Integritetskontroll

Med en påles integritet avses dess funktionsduglighet. Integritetskontroll genom stötvågsmätning utförs vid ett hejarslag på pålen och innebär kontroll med avseende på skador i pålmaterial eller skarvar. Integritetskontroll kan utföras antingen med tung hejare (high strain) för såväl stål- som betongpålar eller med lätt hejare (low strain) för betongpålar. Integritetskontroll med tung hejare görs i samband med en normal stötvågsmätning för bestämning av bärförmåga.

Vid integritetskontroll med lätt hejare alstras stötvågen i pålen via ett slag till exempel med en handslägga. Metoden är både snabb och enkel och indikerar förekomst och läge på sprickor och andra skador. Metoden ger dock normalt en avsevärt sämre bestämning av skadegrad än vid användning av tung hejare. Integritetskontroll med lätt hejare godtas dock endast för oskarvad påle eftersom stötvågen normalt inte klarar att passera en skarv. Överslagsmässigt kan metoden användas för en pållängd av cirka 30 gånger pålens tvärsnittsmått (kantmått eller diameter).

Pålar kan vid en integritetskontroll indelas efter skadegrad (β -faktor) enligt Pålkommisionens rapport 89. Ett riktmärke kan vara att β -faktorn bör vara större än 0,8 för att pålarna ska kunna godtas för full last, men eftersom slakarmerade betongpålar innehåller såväl skarvar som sprickor bör detta bedömas från fall till fall för denna påltyp. Om en gradvis reducerad styvhet konstateras för en betongpåle som testas strax efter slagningen är uppföljande mätningar intressanta eftersom betongsprickor kan "läkas ihop" med tiden.

10.9 Provpålning med statisk provbelastning

Statisk provbelastning utförs ibland i Sverige. I kapitel 7.3 samt Pålgrundläggningshandboken avsnitt 9.2 och Pålkommisionens rapport 59 ges information om utförande och tolkning av resultat. Statisk provbelastning kan utföras för såväl tryck som drag. Vid tryckbelastning, som idag utförs relativt sällan i Sverige, används ofta mothållspålar som slagits runt pålen som ska provbelastas. Vid provbelastningen placeras ett balksystem mellan mothållspålarna vilka då dragbelastas medan provpålen tryckbelastas med hjälp av domkraft. Ett annat alternativ är att arrangera mothållsvikter på ett balksystem ovanpå pålen och tryckbelasta med domkraft. För grävpålar finns möjlighet att utvärdera pålens bärförmåga (både spets och mantel) genom att installera en eller flera så kallade Osterberg-celler på lämplig nivå i pålen. Eventuell armeringskorg förses därvid med en överlappande skarv i samma tvärsnitt. Pålen kan sedan fortsatt användas som produktionspåle.

Dragprovning utförs för att påvisa storleken på mantelbärförmågan hos exempelvis ingjutna stål-kärnepålar och för borrarade injekterade pålar, exempelvis Titanpålar eller MAI-stag. Det tillåts också att påvisa trycklast på samma sätt. För de injekterade pålarna bör man då vara mycket uppmärksam på knäckningsproblematiken, då dessa kan vara mycket slanka. Om man enbart utsätter pålarna för en dragkraft kan man, trots en påvisad geoteknisk bärförmåga, missa att pålarna egentligen skulle ha knäckt i det tryckta lastfall som pålarna egentligen ska utsättas för. Man bör också vara uppmärksam på att själva provningsförfarandet brukar vara det dimensionerande lastfallet. Det är lätt att utgå ifrån pålens sträcklast och dimensionera dragbärförmågan efter den, men vid provningen räcker sällan en

säkerhetsfaktor på 1,0. Ofta vill man inte heller belasta staget/pålen ända upp till sträckgränsen, utan ha en liten marginal, vilket ytterligare bidrar till problematiken.

11 Riktlinjer för redovisning av provning

Som framgår av kapitel 7 och 7.1 kan omfattningen av provpålning och eventuell produktionskontroll variera beroende på hur komplext ett pålningsprojekt är. Det innebär att även omfattningen av redovisningen kan variera, men bör i huvudsak utföras enligt beskrivning nedan. För övrig dokumentation av pålningsarbeten såsom pålprotokoll hänvisas till AMA Anläggning 10.

11.1 Provpålning med stötvågsmätning

Resultat från provpålning och efterslagning redovisas i en provpålningsrapport på sådant sätt att variationer i slagningsbetingelser kan observeras. Rapporten ska utformas så att personer med ringa kunskap om stötvågsmätning kan förstå rapportens innehåll och de slutsatser som ligger till grund för upprättandet av regler för påslagningen.

Till provpålningsrapporten kan en kontrollplan kopplas som bland annat anger mängden pålar som ska produktionskontrolleras, gränsvärden för bärförmåga, pållängd och stoppslagssjunkning, samt åtgärder när kraven inte uppfylls.

En provpålningsrapport ska redovisa:

- uppdragsgivare
- en beskrivning över objektet
- vem som utfört stötvågsmätning och analys
- information om geotekniska förhållanden alternativt hänvisning till geoteknisk utredning
- hur pålarna förväntas fungera i jord
- hejare och påltyper samt laster på pålar
- i diagram eller tabell redovisa antal slag/0,2 m sjunkning, totalt antal slag, fallhöjd samt uppmätt bärförmåga mot spetsens nivå
- representativa stötvågskurvor med analys för alla stötvågstestade pålar För tolkning av mätresultat, se Pålgrundläggningshandboken, avsnitt 9.3
- omfattning av stötvågsmätningen, hur denna lagts upp, hur stötvågsresultatet överensstämmer med geotekniska förhållanden, samt slutsatser gällande regler för stoppslagning
- beräkning av geoteknisk bärförmåga
- eventuellt behov av produktionskontroll

11.2 Produktionskontroll

Produktionskontrollen ska sammanfattas i en rapport med angivande av resultat från stötvågsmätningar samt eventuellt avvikande beteende. För varje produktionskontrollerad påle ska karakteristiska kraft- och hastighetskurvor redovisas med analys av mätresultat.

11.3 Integritetskontroll

Integritetsmätningar av typ "high strain" ska redovisas tillsammans med övriga mätresultat i såväl provpålning- som produktionskontrollrapport. Observationer gällande skador och sprickor ska kommenteras. Integritetsmätningar typ "low strain" med accelerometer och handslägga ska redovisas i en separat rapport där hastighetskurvan från varje testad påle visas.

11.4 Provpålning med statisk provbelastning

Statisk provbelastning kan redovisas enligt Pålgrundläggningshandboken avsnitt 9.2. Se även Pålkommissionens rapport 59 samt avsnitt 7.3 i denna rapport.

12 Referenser

Olsson C. och Holm G. (1993), "Pålgrundläggning", handbok, AB Svensk Byggtjänst.

Likins G. et al. (1996), "CAPWAP correlation studies", Proc. 5th int. conf. on the appl. of stress-wave theory to piles, Orlando, Florida.

Axelsson G., Lindgren J., Giding J. (2012), "Dynamisk provning av Mantelburna stålkärnepålar" Samhällsbyggaren nr 1/12.

Coates and Gyenge (1973), "Incremental design in rock mechanics", Mines Branch monograph; no. 880.

Axelsson G, Dangré M., Elvin E. (2004), "Toe resistance of piles driven into dense moraine", Proc. 7th int. conf. on the appl. of stress-wave theory to piles, Kuala Lumpur, Malaysia.

Den norske Pelekomité, Norsk Geoteknisk Forening, Schram Simonsen A. m fl (2012), "Pele-veiledningen 2012".

Hermansson, I. (2011). "Visa bärförmågan – ett fall för en riktig hejare" Påldag 11, Göteborg 2011-05-12.

Grävare CJ, Hermansson I, Mure JN, Kightley ML. CAPWAP – an alternative to traditional load testing of piles. Väg- och vattenbyggaren 7-8 1983.

Typgodkännande 3198/89 Regler för betongpålar. Boverket 1990-01-08.

Typgodkännande 0656/94, RR-pålar, Ruukki Sverige AB

Bilagor

A Beräkningsexempel

A.1 Slagen spetsburen stålrörspåle på berg

Exemplet beskriver tillvägagångssätt för preliminär bedömning av vilken geoteknisk bärförmåga som kan påvisas med dynamisk stötvågsmätning samt ämnar ge svar på vilka fallhöjder och hejarvikter som krävs för att mobilisera framräknad bärförmåga vid en provpålning. Pålgrundläggningen avser bära laster från konstruktioner som regleras av Boverket, BFS 2013:10 EKS 9. För ändamålet har stålrörspåle RR170/10 enligt SS-EN 10219 med stålsort S460MH valts. Om projektet utförs i Nivå 3 inkluderas resultaten från produktionskontrollen i provpålningen, totalt 7 mätta pålar inom kontrollområdet.

Geometrisk indata

Ytterdiameter: $D_y = 168,3 \text{ mm}$

Tjocklek: $t = 10,0 \text{ mm}$

Tvårsnittsarea: $A = 4,97 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$

Materialdata

Flytspänning: $f_y = 460 \text{ MPa}$

Stuklast: $F_{stuk} = f_y A \rightarrow F_{stuk} = 2,29 \cdot 10^3 \text{ kN}$

Geoteknisk bärförmåga som kan verifieras med hänsyn till pålens hållfasthet

Ekv 8.2: $R_{d,max} = \frac{F_{stuk} k_1 k_2}{\gamma_{tot}}$

Ekv 8.3: $\gamma_{tot} = \gamma_t \gamma_{Rd} \xi_5$

Spetsburen stålrörspåle
stoppslagen mot berg ger:
(Se kap 7.1, Tabell 8.5) $k_1 = 0,80$

Övervakning av spänningar:
(Se kap 7.1, avsnitt 8.4) $k_2 = 0,90$ för Nivå 2 samt $k_2 = 1,1$ för Nivå 3

Partialkoefficient för bärförmåga:
(Se kap 7, Tabell 7.1) $\gamma_t = 1,3$

Spetsburen påle på berg
 $S < 2 \text{ mm/slag}$: $\gamma_{Rd} = 0,85$

Korrelationskoefficient för
uppmätt medelvärde: $\xi_5 = 1,60$ för Nivå 2 (3 mätta pålar per kontrollområde)
 $\xi_5 = 1,48$ för Nivå 3 (totalt 7 mätta pålar)

Beräkning

$$\begin{aligned}\text{Nivå 1} \quad R_{d,max} &= 0,33 F_{stuk} = 0,33 * 2,29 * 10^3 = 756 \text{ kN} \\ \text{Nivå 2} \quad R_{d,max} &= \frac{0,80*0,90}{1,3*0,85*1,60} F_{stuk} = 0,41 * 2,29 * 10^3 = 939 \text{ kN} \\ \text{Nivå 3} \quad R_{d,max} &= \frac{0,80*1,1}{1,3*0,85*1,48} F_{stuk} = 0,54 * 2,29 * 10^3 = 1236 \text{ kN}\end{aligned}$$

För nivå 1 används stoppslagningskriterier enligt hävdvunna åtgärder eller beräknade med WEAP-analys. För stålplåtar rekommenderas att hejarvikten för lätta snabbslående hejare är minst 2 gånger plåstens vikt per meter samt att sjunkningsvärden vid stoppslagning normalt väljs inom intervallet $s = 5 - 30$ mm/minut. Sjunkningsvärden vid stoppslagning med fallhejare ska normalt väljas inom intervallet $s = 5 - 30$ mm/10 slag. Vikt och fallhöjd väljs enligt Nivå 2 och 3 nedan.

För Nivå 2 och 3 kan rekommendationer enligt kapitel 10 användas, nämligen att vid dynamisk provning av stålplåtar brukar en hejarvikt på 2,5 % av pållasten och en fallhöjd på 6-7 % av pållängden vara tillräckligt för att verifiera bärförmågan. För korta plåtar som slås mot berg kan hejarvikt och fallhöjd vara något lägre. Datorprogrammet WEAP kan användas för att närmare bedöma erforderlig fallhöjd.

Om det i ovanstående exempel antas att plåtarna blir ca 8 m långa erfordras en ca 2 ton tung hejare och en fallhöjd motsvarande ca 0,5 m.

Bedömning av geoteknisk bärförmåga

En rimlighetskontroll av geoteknisk bärförmåga kan utföras med hjälp av avsnitt 8.1. Ett underlag som intakt berg kan antas bära $3q_u$ där q_u konservativt kan sättas till 150 MPa. Detta ger för en stålplåtsplåte med dimension 168,3/10 där hela plåtvärsnittet mot berget antas verksamt en bärförmåga R_m motsvarande 2200 kN vilket är 1,8 ggr högre än $R_{d,max}$ för nivå 3.

Följande geotekniska bärförmåga kan därmed förväntas kunna uppnås vid stoppslagning respektive provning:

Nivå 1, alternativ a: (WEAP-analys) enligt Ekv 6.1 och Ekv 6.2: $R_d = \frac{2200}{1,3*1,3*1,4} = 930 \text{ kN} > 756 \text{ kN}$.
Stoppslagningskriterier bestäms genom WEAP-analys utan att $0,9 \times F_{stuk}$ överskrids.

Nivå 1, alternativ b: (stoppslagningsregel) enligt Tabell 5.4: $R_d = 756 \text{ kN}$ ($f_y = 460 \text{ MPa}$)

Nivå 2 (provb belastning) enligt Ekv 7.1: $R_d = \frac{2200}{1,3*0,85*1,6} = 1244 \text{ kN} > 939 \text{ kN}$

Nivå 3 (provb belastning) enligt Ekv 7.1: $R_d = \frac{2200}{1,3*0,85*1,48} = 1345 \text{ kN} > 1236 \text{ kN}$

A.2 Slagen spetsburen betongpåle på morän

Exemplet beskriver tillvägagångssätt för preliminär bedömning av vilken geoteknisk bärförmåga som kan påvisas med dynamisk stötvågsmätning, samt ämnar ge svar på vilka fallhöjder och hejarvikter som krävs för att mobilisera framräknad bärförmåga vid en provpålning. Pålggrundläggningen avser bära laster från konstruktioner som regleras av Boverket (BFS). För ändamålet har betongpåle 270-0812 (SP2) enligt SS-EN 12794:2005 valts. Pålens slutliga betongklass är C50/60, men vid installation är den C40/50. Om projektet utförs i Nivå 3 inkluderas resultaten från produktionskontrollen i provpålningen, totalt 7 mätta pålar inom kontrollområdet.

Geometrisk indata

Pålens sidmått: $B_y = 270 \text{ mm}$

Huvudarmeringsdimension: $\emptyset = 12 \text{ mm}$

Pålens totala area: $A_{tot} = 270 \cdot 270 = 72,9 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$

Armeringsarea: $A_{stål} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 = 452,4 \text{ mm}^2$

Betongarea: $A_{bet} = A_{tot} - A_{stål} = 72,4476 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$

Materialdata

Betongklass vid installation C40/50: $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$

Stålets elasticitetsmodul: $E_s = 200 \text{ GPa}$

Betongens sekantmodul
vid installation: $E_{cm} = 35,2 \text{ GPa}$

Pålens ekvivalenta area: $A_{ekv} = A_{bet} + A_{stål} \cdot \left(\frac{E_{stål}}{E_{bet}} - 1 \right) \text{ mm}^2$

$$A_{ekv} = 72,4476 \cdot 10^3 + 452,4 \cdot \left(\frac{200}{35,2} - 1 \right) = 74566 \text{ mm}^2$$

Stuklast: $F_{stuk} = f_{ck} A_{ekv} \rightarrow F_{stuk} = 2,983 \cdot 10^3 \text{ kN}$

Geoteknisk bärförmåga som kan verifieras med hänsyn till pålens hållfasthet

Ekv 8.2: $R_{d,max} = \frac{F_{stuk} \cdot k_1 \cdot k_2}{\gamma_{tot}}$

där Ekv 8.3 ger: $\gamma_{tot} = \gamma_t \cdot \gamma_{Rd} \cdot \xi_5$

Spetsburen betongpåle
stoppslagen i morän, liten
mantelfriktion ger:
(Se kap 8, Tabell 8.5)

$$k_1 = 0,70$$

Övervakning av spänningar:
(Se kap 8, avsnitt 8.4)

$$k_2 = 0,80 \text{ för Nivå 2 samt } k_2 = 0,9 \text{ för Nivå 3}$$

Partialkoefficient för bärförmåga: $\gamma_t = 1,3$
(Se kap 7, Tabell 7.1)

Spetsburen påle i morän, antingen
utvärderad enligt Capwap-analys
eller med $s < 2$ mm/slag och
spetsfjädring $< D/60$: $\gamma_{Rd} = 0,85$

Korrelationskoefficient för $\xi_5 = 1,60$ för Nivå 2 (3 mätta pålar per kontrollområde)
uppmätt medelvärde: $\xi_5 = 1,48$ för Nivå 3 (totalt 7 st mätta pålar)

Beräkning

Nivå 1 Stoppsslagningsregel enligt tabell 4.10 i Pålkommisionens rapport 94, eller Tabell 5.3 i denna rapport: $R_{d,max} = 855$ kN. Angivna fallhöjder får ej överskridas.

Nivå 2 $R_{d,max} = \frac{0,70 \cdot 0,80}{1,3 \cdot 0,85 \cdot 1,60} F_{stuk} = 0,32 \cdot 2,983 \cdot 10^3 = 945$ kN

Nivå 3 $R_{d,max} = \frac{0,70 \cdot 0,90}{1,3 \cdot 0,85 \cdot 1,48} F_{stuk} = 0,39 \cdot 2,983 \cdot 10^3 = 1163$ kN

För nivå 1 används stoppslagningskriterier enligt hävdvunna åtgärder, se kapitel 5, eller framtagna genom WEAP-analys. Med dessa metoder kan en dimensionerande geoteknisk bärförmåga på maximalt 855 kN enligt tabell 4.10 i Pålkommisionens rapport 94 uppnås.

För verifiering i nivå 2 och 3 av bärförmågan för betongpålar med tvärsnitt max 350 x 350 och måttliga längder brukar hejarna som används vid slagningen (4-5 ton med max 1,2 m fallhöjd) vara tillräckliga. För pålar med större tvärsnitt eller för mycket långa pålar kan tyngre hejare och högre fallhöjd krävas. Datorprogrammet WEAP kan användas för att närmare bedöma erforderlig fallhöjd. Om det i ovanstående exempel antas att pålarna blir ca 10 m långa erfordras en ca 4 ton tung hejare och en fallhöjd motsvarande ca 0,7 m.

Bedömning av geoteknisk bärförmåga

En rimlighetskontroll av geoteknisk bärförmåga kan utföras med hjälp av avsnitt 8.1. Vid stoppslagning på mycket fast bottenmorän kan spetsmotståndet antas vara 25 MPa. Detta ger för en 270 x 270 betongpåle en bärförmåga R_m motsvarande 1820 kN. Följande geotekniska bärförmåga kan man därmed förväntas kunna uppnå vid stoppslagning respektive provning:

Nivå 1 (WEAP-analys) enligt ekvationer 6.1 och 6.2: $R_d = \frac{1820}{1,3 \cdot 1,3 \cdot 1,4} = 769$ kN

Där $R_k = 1820$ kN antogs för WEAP-analysen och utan att $0,8F_{stuk}$ överskrids. Notera att detta ger ett värde lägre än hävdvunnen åtgärd enligt Pålkommisionens rapport 94. Om det å andra sidan varit TRVFS, med pålarna installerade i ett styvt fundament som gällt, så hade resultatet blivit 917 kN, dvs. högre än hävdvunnen åtgärd.

Nivå 1 (stoppsslagningsregel) enligt tabell 4.10 i Pålkommisionens rapport 94: 855 kN

Nivå 2 (provb belastning) enligt ekv 7.1: $R_d = \frac{1820}{1,3 \cdot 0,85 \cdot 1,6} = 1029$ kN > 945 kN

Nivå 3 (provb belastning) enligt ekv 7.1: $R_d = \frac{1820}{1,3 \cdot 0,85 \cdot 1,48} = 1113$ kN < 1163 kN

B Jämförelse mellan nya och gamla regelverk för stötvågsmätning

I denna bilaga presenteras en jämförelse mellan nuvarande och tidigare regelverk. Med nuvarande regelverk menas SS-EN 1997 inklusive nationell bilaga, vilken kan vara Trafikverkets föreskrift TRVFS 2011:12 eller Boverkets föreskrift BFS 2013:10 EKS 9 beroende på vilken myndighet som reglerar byggnationen. Med tidigare regelverk menas Bro 2004 för projekt i dåvarande Vägverkets regi samt Pålkommisionens rapport 98, Dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålpålar alternativt Pålgrundläggningshandboken, för projekt i Boverkets regi.

Eftersom Eurokod anger partialkoefficienten för säkerhetsklass på lastsidan jämförs värden enligt Bro 2004, Tabell 32-2, samt Pålkommisionens rapport 98, Tabell 6.3a, i säkerhetsklass 1, se även Tabell B.2 och Tabell B.5 nedan.

B.1 SS-EN 1997 + Nationella bilagor

För spetsburna pålar ska dimensionerande geoteknisk bärförmåga bestämmas enligt

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_t \gamma_{Rd}} \quad \text{där} \quad R_k = \min\left(\frac{R_{medel}}{\xi_5}; \frac{R_{min}}{\xi_6}\right) \quad \text{Ekv B.1}$$

- R_k = Karakteristisk geoteknisk bärförmåga, baserad på det minsta av ett korrelerat uppmätt medelvärde eller ett korrelerat uppmätt minimivärde. Rekommenderade värden på spetsmotstånd kan användas som ledning för att uppskatta vad som är möjligt att verifiera för spetsburna pålar, se avsnitt 8.1.
- γ_t = Partialkoefficient för bärförmåga enligt Tabell A.7-A.9 i TRVFS 2011:12 samt Tabell I-7 enligt BFS 2013:10 EKS 9, se även Tabell 7.1 - Tabell 7.3 i föreliggande rapport. I Trafikverketprojekt sätts denna till 1,2 och i Boverketprojekt till 1,3.
- γ_{Rd} = Modellfaktor för stötvågsmätning. Normalt väljs 1,0 för CASE-metoden och 0,85 om mätkurvorna analyseras med CAPWAP eller om pålarna är stoppslagna i mycket fast morän eller berg. I det aktuella fallet sätts $\gamma_{Rd} = 0,85$ och som förslag från Pålkommisionen anges även $\gamma_{Rd} = 0,80$ som gäller för pålar nedborrade och stoppslagna i berg.
- ξ = Korrelationskoefficient som tar hänsyn till antalet provade pålar och det uppmätta medelvärdet (ξ_5) eller det minsta uppmätta värdet (ξ_6) enligt Tabell A.11 samt Tabell I-12 i TRVFS 2011:12 respektive BFS 2013:10 EKS 9, se även Tabell B.1 nedan. För byggnadsverk som kan överföra laster från svaga till starka pålar kan ξ_5 och ξ_6 divideras med 1,1. I BFS 2013:10 EKS 9 begränsas dessa byggnadsverk till järnvägstillämpningar.

Begreppet påträffas inte i Eurokod men för att tydliggöra jämförelsen definieras här en totalsäkerhetsfaktor enligt: $\gamma_{tot} = \gamma_t \gamma_{Rd} \xi$

Tabell B.1. Korrelationskoefficienter ξ_5 och ξ_6 beroende på antal provbelastade pålar.

Antal mätta pålar	3	4	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20	≥ 40	Samtliga pålar
ξ_5	1,60	1,55	1,50	1,45	1,42	1,40	1,35	1,30
ξ_6	1,50	1,45	1,35	1,30	1,25	1,25	1,25	1,25

B.2 Bro 2004 vs TRVFS 2011:12

Enligt Bro 2004 ska dimensionerande geoteknisk bärförmåga för spetsburna pålar bestämmas enligt:

$$R_d = \frac{R_m}{\gamma_{tot}} \quad \text{Ekv B.2}$$

där

R_m = Uppmätt geoteknisk bärförmåga, medelvärde. Varje enskilt värde ska minst vara 0,85 gånger det uppmätta medelvärdet.

γ_{tot} = Värden för totalsäkerhetsfaktorn γ_{tot} anges nedan i Tabell B.2. Observera att dessa värden motsvarar de som angivits i Bro 2004 Tabell 32-2, men för säkerhetsklass 1.

Tabell B.2. Antal mätta pålar och motsvarande γ_{tot} enligt Bro 2004 i säkerhetsklass 1.

Antal mätta pålar	3	4	6	10	≥ 20	Samtliga pålar
$\gamma_{tot,medel}$ berg	1,55	1,45	1,41	1,36	1,32	1,27
$\gamma_{tot,medel}$ jord	1,77	1,68	1,64	1,55	1,50	1,45
$\gamma_{tot,min}$ berg	1,31	1,24	1,20	1,16	1,12	1,08
$\gamma_{tot,min}$ jord	1,51	1,43	1,39	1,31	1,28	1,24

I Tabell B.3 och Tabell B.4 nedan presenteras totalsäkerhetsfaktorer för uppmätta min- och medelvärden enligt TRVFS 2011:12. Som förslag från Pålkommisionen anges även värden för $\gamma_{Rd} = 0,80$.

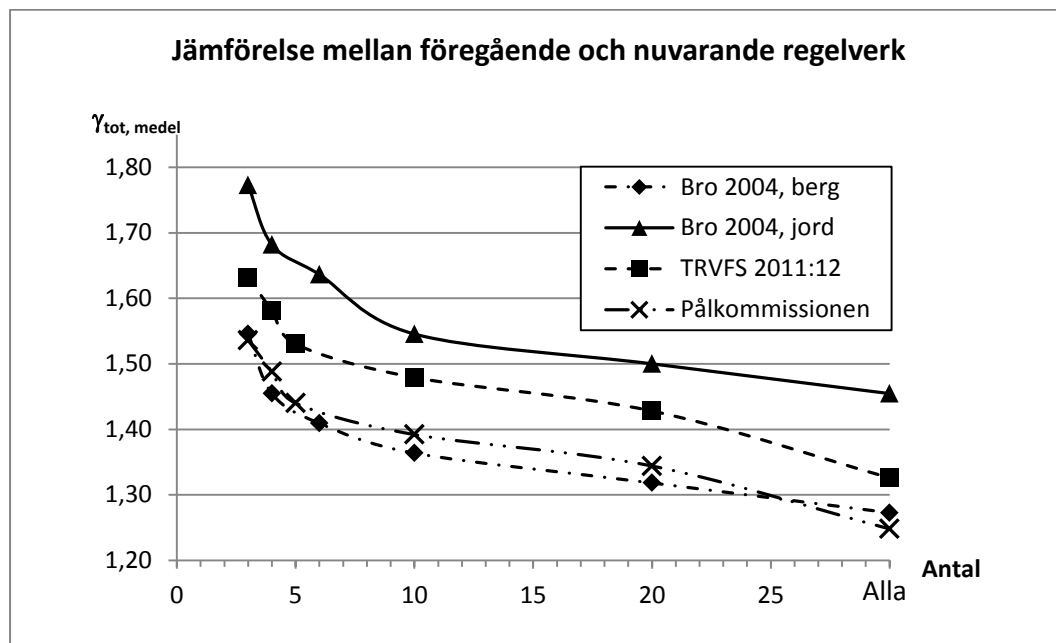
Tabell B.3. Antal mätta pålar och motsvarande medelvärde på γ_{tot} enligt TRVFS 2011:12 och förslag från Pålkommisionen.

Antal mätta pålar	3	4	6	10	≥ 20	Samtliga pålar
$\gamma_{tot,medel}$ (TRVFS 2011:12)	1,63	1,58	1,53	1,48	1,43	1,33
$\gamma_{tot,medel}$ (Pålkommisionen)	1,54	1,49	1,44	1,39	1,34	1,25

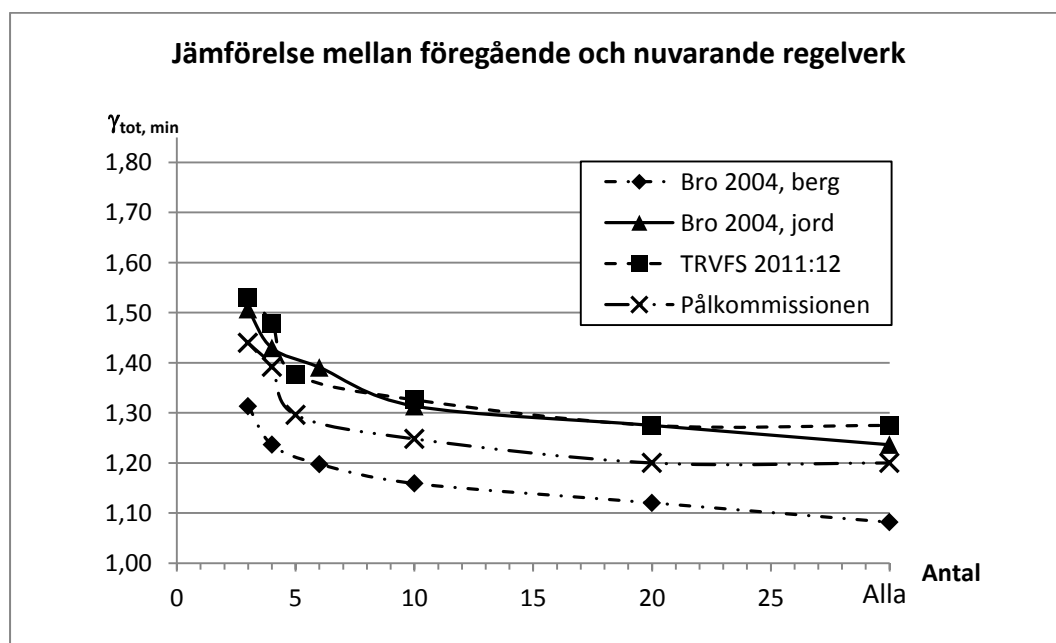
Tabell B.4. Antal mätta pålar och motsvarande minvärde på γ_{tot} enligt TRVFS 2011:12 och förslag från Pålkommisionen.

Antal mätta pålar	3	4	6	10	≥ 20	Samtliga pålar
$\gamma_{tot,min}$ (TRVFS 2011:12)	1,53	1,48	1,38	1,33	1,28	1,28
$\gamma_{tot,min}$ (Pålkommisionen)	1,44	1,39	1,30	1,25	1,20	1,20

Figur B.1 och Figur B.2 nedan återges värden från Tabell B.2, Tabell B.3 och Tabell B.4. Medelvärden enligt "Bro 2004, berg" ger ca 5 – 8 % högre dimensionerande geoteknisk bärförmåga än vad "TRVFS 2011:12" ger. Om Pålkommisionens förslag med $\gamma_{Rd} = 0,80$ för nedborrade pålar i berg tillämpas så erhålls värden för nuvarande regelverk som nära nog är identiska med tidigare regelverk. Pålkommisionens förslag med avseende på minimivärden i Figur B.2 begränsas av att produkten mellan modellfaktor och korrelationskoefficient inte får understiga 1,0.



Figur B.1. Jämförelse av totalsäkerhetsfaktorer $\gamma_{tot, medel}$ enligt TRVFS 2011:12 och Bro 2004 samt enligt förslag från Pålkommisionen.

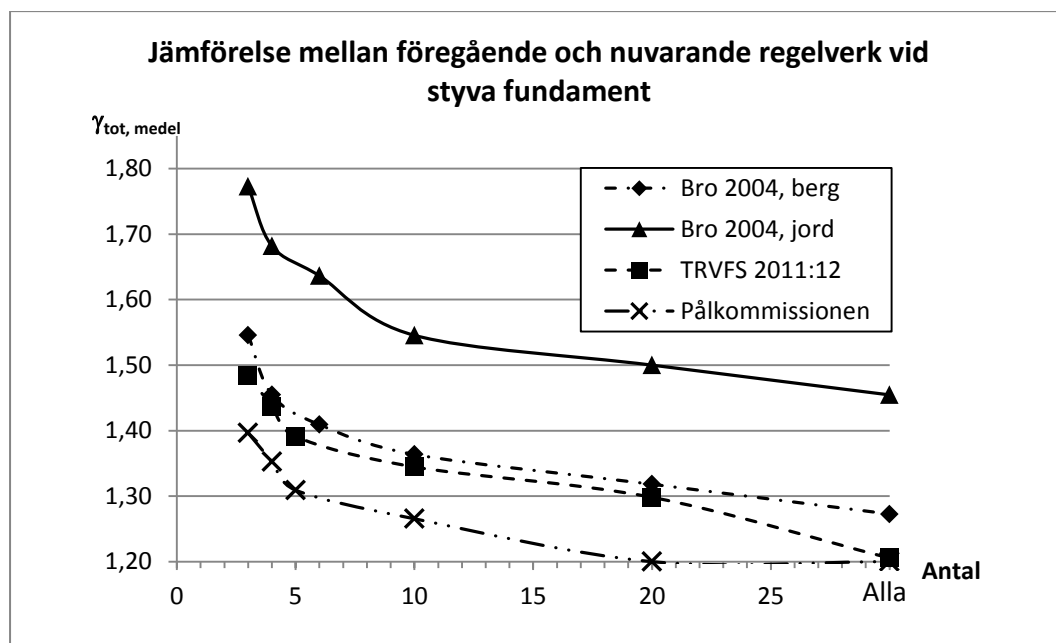


Figur B.2. Jämförelse av totalsäkerhetsfaktorer $\gamma_{tot, min}$ enligt TRVFS 2011:12 och Bro 2004 samt enligt förslag från Pålkommisionen.

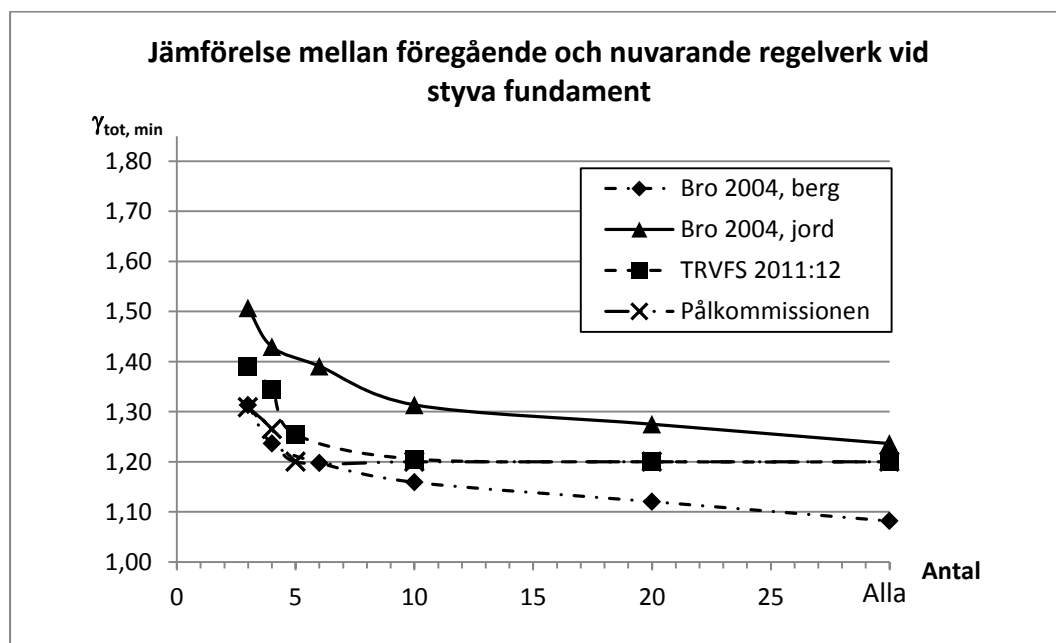
B.3 Bro 2004 vs TRVFS 2011:12 vid styva fundament

Om exakt samma analys utförs enligt ovan men för styva fundament, dvs. om värden i Tabell B.3 och Tabell B.4 divideras med 1,1, ser resultatet ut enligt Figur B.3 och Figur B.4 nedan.

Av samma anledning som tidigare, men nu även med avseende på uppmätta medelvärden, begränsas totalsäkerhetsfaktorn enligt "Pålkommissionen" till 1,2, eftersom antalet testade pålar överstiger 20 st. För minimivärden enligt Figur B.4 begränsas totalsäkerhetsfaktorn för "TRVFS 2011:12" och "Pålkommissionen" redan vid 10 respektive 5 mätta pålar.



Figur B.3. Jämförelse av totalsäkerhetsfaktorer $\gamma_{tot,medel}$ enligt TRVFS 2011:12 och Bro 2004 samt enligt förslag från Pålkommissionen.



Figur B.4. Jämförelse av totalsäkerhetsfaktorer $\gamma_{tot,min}$ enligt TRVFS 2011:12 och Bro 2004 samt enligt förslag från Pålkommissionen.

B.4 Pålkommisionens rapport 98 i jämförelse med BFS 2013:10

Enligt Pålkommisionens rapport 98 ska dimensionerande geoteknisk bärförmåga för spetsburna pålar bestämmas enligt:

$$R_d = \frac{R_m}{\gamma_{tot}} \quad \text{Ekv B.3}$$

där

R_m = Uppmätt geoteknisk bärförmåga, medelvärde. Varje enskilt värde ska minst vara 0,85 gånger det uppmätta medelvärdet.

γ_{tot} = Värden för totalsäkerhetsfaktorn γ_{tot} anges nedan i Tabell B.5. Observera att dessa värden motsvarar de som angivits i rapport 98 Tabell 6.3a, men för säkerhetsklass 1.

Tabell B.5. Antal mätta pålar och motsvarande γ_{tot} , enligt Pålkommisionens rapport 98 i säkerhetsklass 1.

Antal mätta pålar	GK2B: 4 st dock min. 10 %	GK2B: 5 st dock min. 25 % (I det aktuella fallet har antagits att 10 st motsvarar 25 %)	Samtliga pålar
$\gamma_{tot,medel}$, berg	1,50	1,35	1,25
$\gamma_{tot,medel}$, jord	1,70	1,55	1,45
$\gamma_{tot,min}$, berg	1,28	1,15	1,06
$\gamma_{tot,min}$, jord	1,45	1,31	1,24

I Tabell B.6 och Tabell B.7 nedan presenteras totalsäkerhetsfaktorer för uppmätta min- och medelvärden enligt BFS 2013:10 EKS 9. Som förslag från Pålkommisionen anges även värden för $\gamma_{Rd} = 0,80$.

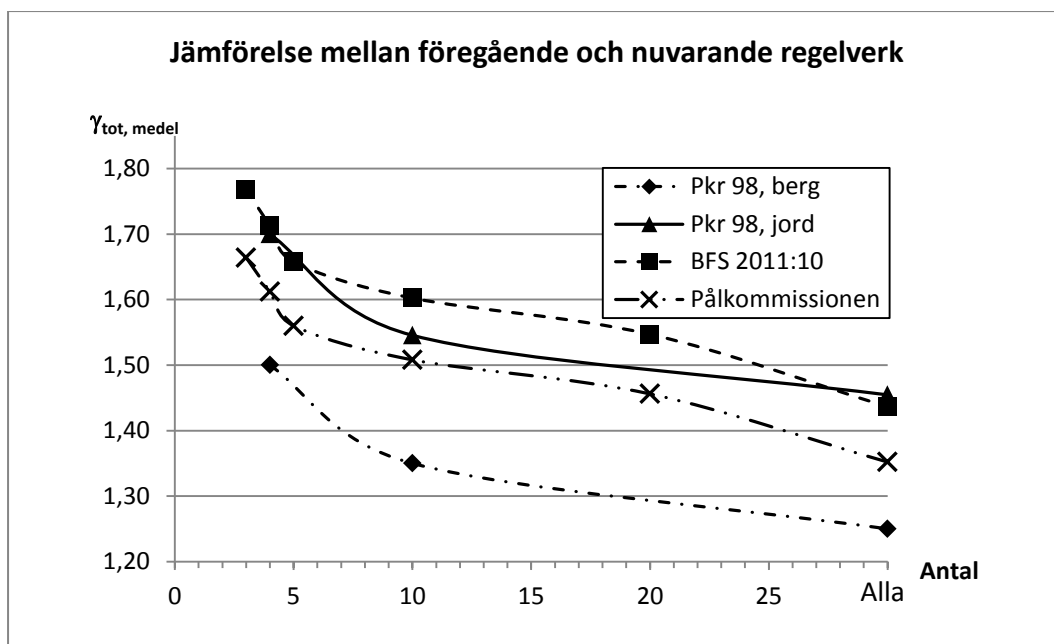
Tabell B.6. Antal mätta pålar och motsvarande medelvärde på γ_{tot} enligt BFS 2013:10.

Antal mätta pålar	3	4	6	10	≥ 20	Samtliga pålar
$\gamma_{tot,medel}$ (BFS 2013:10)	1,77	1,71	1,66	1,60	1,55	1,44
$\gamma_{tot,medel}$ (Pålkommisionen)	1,66	1,61	1,56	1,51	1,46	1,35

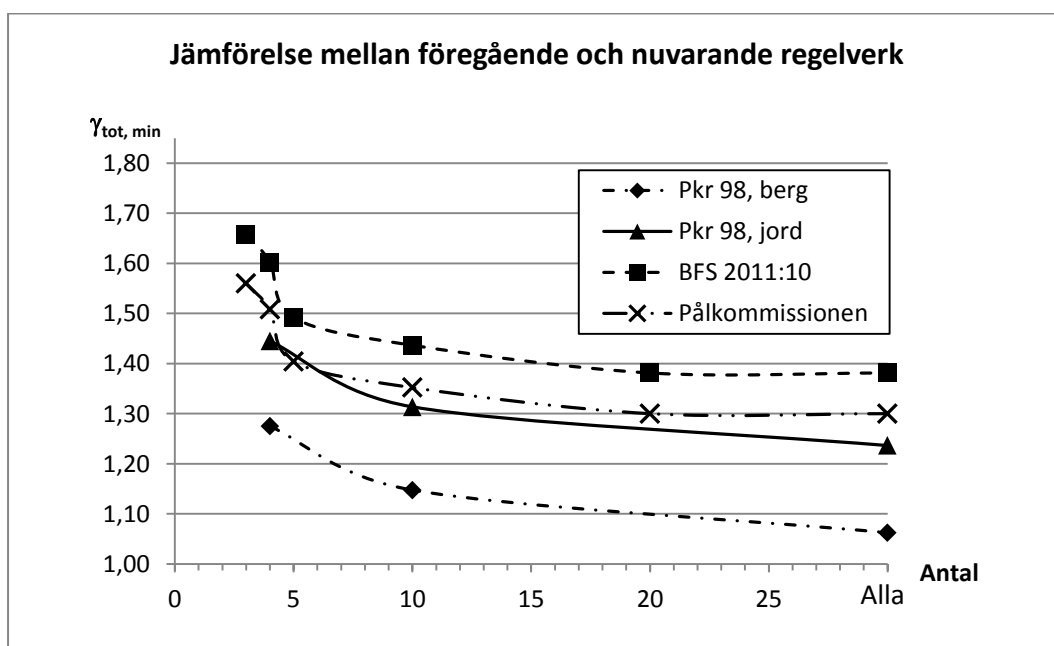
Tabell B.7. Antal mätta pålar och motsvarande minvärde på γ_{tot} enligt BFS 2013:10.

Antal mätta pålar	3	4	6	10	≥ 20	Samtliga pålar
$\gamma_{tot,min}$ (BFS 2013:10)	1,66	1,60	1,49	1,44	1,38	1,38
$\gamma_{tot,min}$ (Pålkommisionen)	1,56	1,51	1,40	1,35	1,30	1,30

I Figur B.5 och Figur B.6 nedan återges värden från Tabell B.5 Tabell B.3 och Tabell B.7. Medelvärden enligt "Pkr 98, berg" ger ca 12 – 15 % högre dimensionerande geoteknisk bärförmåga än vad "BFS 2013:10" ger. Om Pålkommisionens förslag med $\gamma_{Rd} = 0,80$ för nedborrade pålar i berg tillämpas så erhålls följaktligen värden för nuvarande regelverk som ger ca 7 – 10 % högre dimensionerande geoteknisk bärförmåga jämfört med tidigare regelverk. Pålkommisionens förslag med avseende på minimivärden i Figur B.6 begränsas av att produkten mellan modellfaktor och korrelationskoefficient inte får understiga 1,0. Begränsningen inträder vid mätning av fler än 20 st pålar.



Figur B.5. Jämförelse av totalsäkerhetsfaktorer $\gamma_{tot, medel}$ enligt BFS 2013:10 och Pkr 98 samt enligt förslag från Pålkommisionen.



Figur B.6. Jämförelse av totalsäkerhetsfaktorer $\gamma_{tot, min}$ enligt BFS 2013:10 och Pkr 98 samt enligt förslag från Pålkommisionen.

B.5 Pålgrundläggningshandboken i jämförelse med BFS 2013:10

Statistisk beräkning enligt handboken Pålgrundläggning kap 6.33 och 9.37:

Den karakteristiska bärförmågan beräknas som $R_k = (1 - k_5 \times v) \times R_m$, där k_5 = koefficient enligt 9.37:1 i Pålgrundläggningshandboken

R_m = Medelvärde av bärförmåga (Case) i kN
 σ = Standardavvikelse (kN)

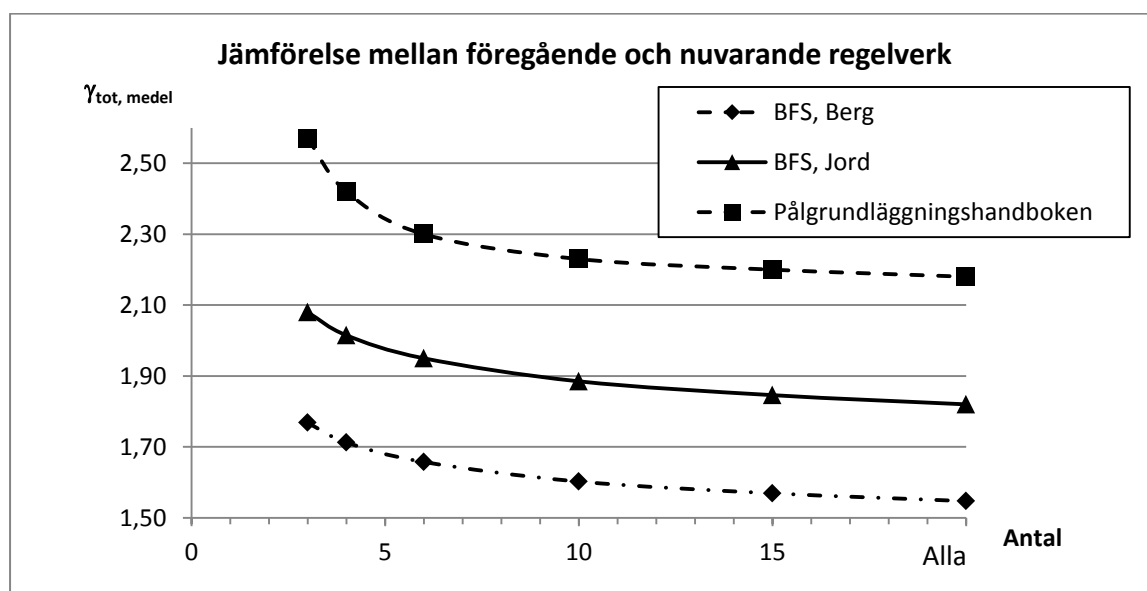
$$v = \sigma / R_m = \text{variationskoefficient (\%)}$$

Tabell B.8. Antal mätta pålar och motsvarande medelvärde på γ_{tot} enligt kap 6.33 och 9.37 för provpålning (dvs. 5 % mätning utan produktionskontroll) enligt Pålgrundläggningshandboken och BFS.

Antal mätta pålar	3	4	6	10	15	20
$\gamma_{tot,medel}$ (Pålgrundläggningshandboken)	2,57	2,42	2,3	2,23	2,20	2,18
$\gamma_{tot,medel}$ BFS, CASE-metoden, $\gamma_{Rd} = 1,0$	2,08	2,01	1,95	1,88	1,85	1,82
$\gamma_{tot,medel}$ BFS, CAPWAP, $\gamma_{Rd} = 0,85$	1,77	1,71	1,66	1,60	1,57	1,55

Eftersom beräkningen för provpålning enligt Pålgrundläggningshandboken utförs genom statistisk bearbetning av uppmätta värden är jämförelsen inte helt relevant. Exempelvis beräknas variationskoefficienten från uppmätta värden, i jämförelsen har variationskoefficienten antagits till 10 %. I Pålgrundläggningshandboken görs ingen skillnad om pålarna slås mot berg eller jord.

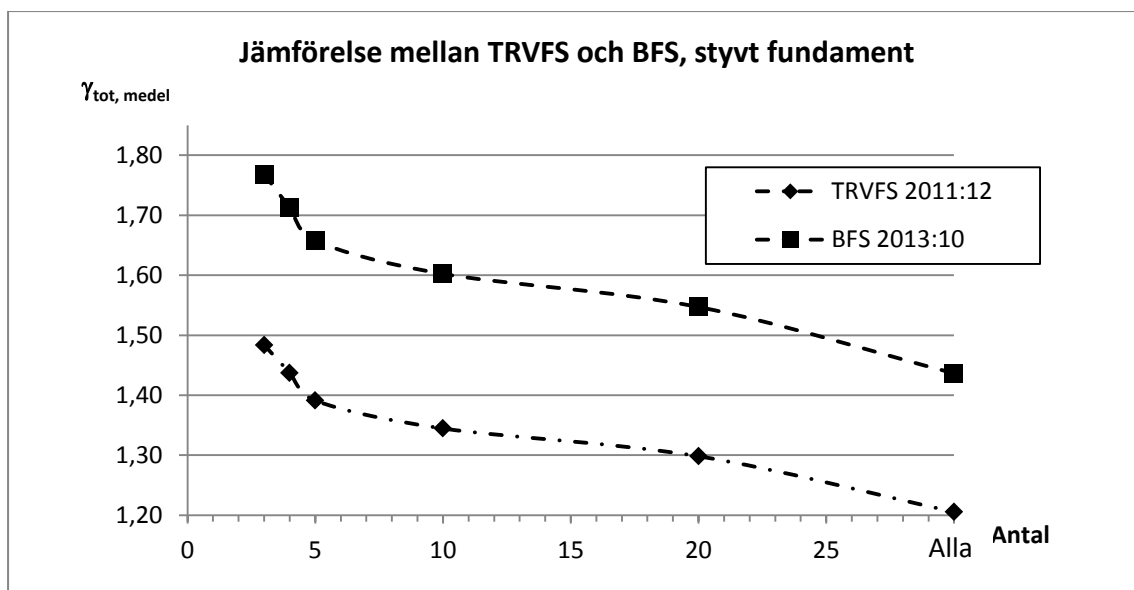
Figur B9 visar att verifiering av bärförmåga för betongpålar enligt Pålgrundläggningshandboken, speciellt när relativt få pålar testades, innebär att en betydligt högre totalsäkerhetsfaktor krävdes tidigare jämfört med BFS.



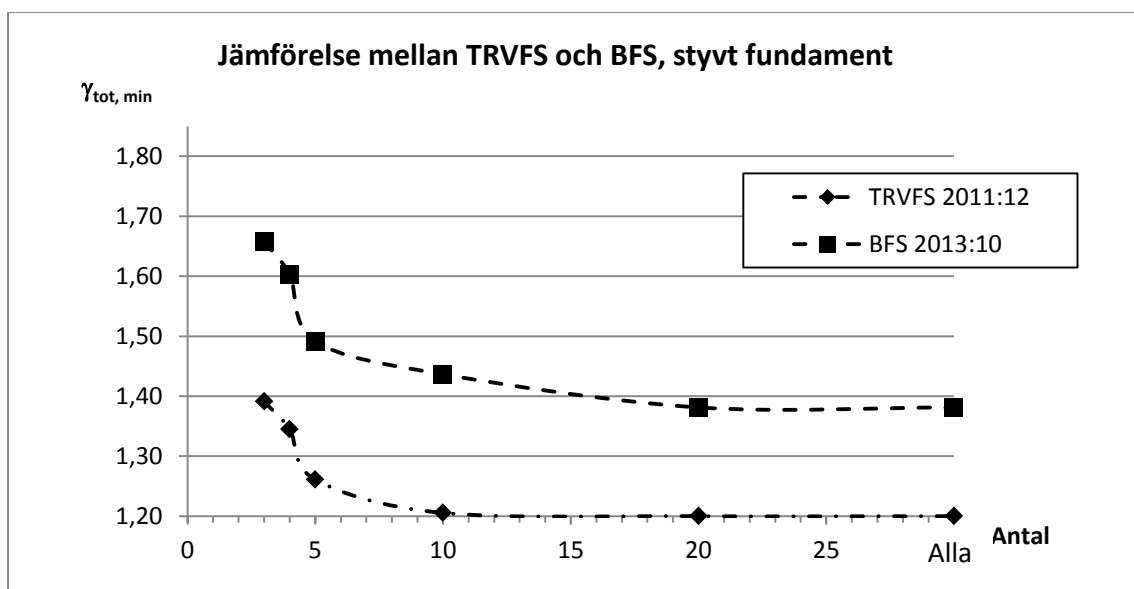
Figur B.7. Jämförelse av totalsäkerhetsfaktorer $\gamma_{tot,medel}$ enligt Pålgrundläggningshandboken och BFS 2013:10.

B.6 BFS 2013:10 i jämförelse med TRVFS 2011:12 vid styva fundament

Skillnaden i totalsäkerhet mellan TRVFS och BFS är en faktor 1,19 som mest beroende på en högre partialkoefficient (1,3 respektive 1,2) samt att hänsyn inte får tas till effekten av styva fundament genom att dividera säkerheten med 1,1 enligt BFS, se Figur B.8. Notera att den lägsta totalsäkerheten 1,2 uppnås vid 10 st mätta pålar för minvärden, se Figur B.9.



Figur B.8. Jämförelse av totalsäkerhetsfaktorer $\gamma_{tot, medel}$ enligt BFS 2013:10 och TRVFS 2011:12 för styvt fundament.



Figur B.9. Jämförelse av totalsäkerhetsfaktorer $\gamma_{tot, min}$ enligt BFS 2013:10 och TRVFS 2011:12 för styvt fundament.

PÅLKOMMISSIONEN



Februari 2014

I september 1959
bildades Påkommittén för
påslagning och påbärighet.

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

Ytterligare upplysningar om
Påkommissionens verksamhet
och medlemskap lämnas
av kommissionens
sekreterare.

Påkommissionen, c/o Branschkansliet, Box 22307,
104 22 Stockholm, www.palkommissionen.org