

# CHALMERS



## Grova borrhade stålrörspålar för broar

Undersökning när tekniken kan vara lämplig

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Byggingenjör*

JOEL SANDBERG & JOHAN SUNDMAN

Institutionen för bygg- och miljöteknik  
Avdelningen för Geologi & Geoteknik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2013  
Examensarbete 2013:38



EXAMENSARBETE 2013:38

# Grova borrade stålrörspålar för broar

Undersökning när tekniken kan vara lämplig

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

JOEL SANDBERG & JOHAN SUNDMAN

Institutionen för bygg- och miljöteknik  
*Avdelningen för Geologi & Geoteknik*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2013



Grova borrarade stålrörspålar för broar  
Undersökning när tekniken kan vara lämplig  
*Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet*  
*Byggingenjör*

JOEL SANDBERG & JOHAN SUNDMAN

© JOEL SANDBERG & JOHAN SUNDMAN, 2013

Examensarbete / Institutionen för bygg- och miljöteknik,  
Chalmers tekniska högskola 2013:38

Institutionen för bygg och miljöteknik  
Avdelningen för Geologi & Geoteknik  
Chalmers tekniska högskola  
412 96 Göteborg  
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:  
Bro byggd på grova borrarade stålrörspålar som övergår till pelare (Styrud, 2013).

[Chalmers Reproservice]  
Göteborg 2013



Grova borrade stålrörspålar för broar

Undersökning när tekniken kan vara lämplig

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Byggingenjör*

JOEL SANDBERG & JOHAN SUNDMAN

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för Geologi & Geoteknik

Chalmers tekniska högskola

## SAMMANFATTNING

Grova borrade stålrörspålar är en i Sverige relativt ny teknik för grundläggning av broar. Tekniken går ut på att ett stålrör borrar ned i marken till bärkraftigt berg. För att öka rörets lastkapacitet fylls normalt röret med armering och betong. När grova stålrörspålar används till broar finns möjlighet att låta pålen ovan mark fortsätta som pelare hela vägen upp till brobanan. Syftet med denna rapport är att undersöka var och när tekniken med grova borrade stålrörspålar för broar kan vara lämplig att använda. Undersökningen genomförs genom en intervjustudie med olika intressenter inom branschen och en jämförelsekalkyl mellan en traditionellt grundlagd bro och ett förslag där grova borrade stålrörspålar används. Resultatet visar att som påle är den grova borrade stålrörspålen ett dyrt alternativ mätt per uppburet ton. Tekniken har dock flera andra fördelar gentemot traditionella pålar så som slagna betongpålar. Till exempel orsakar installationen mindre omgivningspåverkan och klarar tuffare geotekniska förutsättningar så som blockrik jord. För metoden där pålen övergår till pelare finns fördelen att dyra arbetsmoment som spont och schakt undviks, något som gör att produktionstiden kan kortas ned i jämförelse med traditionella stöd. Jämförelsekalkylen visar att avgörande för när stålrörspålar blir ekonomiskt lönsam är dels avstånd till bärkraftigt berg, dels omgivande förhållanden som påverkar alternativ grundläggning. Där pålning behövs samtidigt som stöd placeras i eller nära vattendrag kan grova borrade stålrörspålar bli det ekonomiskt bästa alternativet, lite beroende på djup till berg. Slutsatsen är att grova borrade stålrörspålar för broar bör lämpa sig främst när de används som pålar som övergår till pelare. Förutsättningar så som stöd i vatten, trafikavstängningar i produktionsfasen eller förstärkning av befintliga stöd ökar chansen att de är lönsamma. Inom ett par områden finns förbättringspotential, främst gällande dimensionering och kontroller. Detta skulle kunna göra att tekniken lämpar sig i fler fall i framtiden.

Nyckelord: stålrörspålar, bro, grundläggning, brostöd, geoteknik, pålning

## Large diameter drilled steel pipe piles for bridges

An examination of when the technique may be suitable  
Diploma Thesis in the Engineering Programme  
Building and Civil Engineering

JOEL SANDBERG & JOHAN SUNDMAN

Department of Civil and Environmental Engineering  
Division of GeoEngineering  
Chalmers University of Technology

### ABSTRACT

Using large diameter drilled steel pipe piles on bridges is a relatively new technique in Sweden. It consists of a steel pipe that is drilled into the soil all the way down to solid rock. Normally the pipe is also filled with concrete and reinforcement. When used on bridges the pile can continue above ground all the way up to the bridge deck. The purpose of this thesis is to examine where, and when large diameter drilled steel pipe piles may be suitable for bridges. This is done by an interview study and a cost calculation between a bridge with a traditional foundation and a suggested alternative with large diameter drilled steel pipe piles. The result shows that the examined technique is expensive compared to other piling techniques when measured by load capacity. However, the large diameter drilled steel pipe piles have several advantages. For example it can be installed in difficult ground conditions such as rocky soil. When using the method where the pile continues all the way up to the bridge deck operations like excavating, placing retaining walls and casting of piers can be avoided, this shortening the production time. This could possibly make the technique the most economical option. The study shows that the depth to solid rock is of great importance to when large diameter drilled pipe piles are economically beneficial. The surrounding circumstances affecting any alternative foundation are also important. The conclusion is that large diameter drilled steel pipe piles should be beneficial mostly when they continue all the way up to the bridge deck. Circumstances like piers placed in water and traffic suspensions during bridge construction increases the chance that the examined technique is the most beneficial. Improvements in areas like dimensioning and verifications could lead to more situations where this applies.

Key words: steel pipe piles, bridge, foundation, pier, geotechnics, piling



# Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
ORDLISTA	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Syfte	1
1.2 Avgränsning	1
2 METOD OCH MATERIAL	2
2.1 Intervjustudie när tekniken kan användas	2
2.2 Jämförelsekalkyl	2
3 BORRADE STÅLRÖRSPÅLAR	3
3.1 Utförande	4
4 GRUNDLÄGGNING AV BROAR	8
4.1 Traditionella grundläggningsmetoder	8
4.1.1 Platta på jord eller berg	8
4.1.2 Pålade stöd	9
4.2 Grova borrarade stålrörspålar för broar	10
4.2.1 Som traditionell pålning	10
4.2.2 Påle som övergår till pelare	11
4.2.3 Exempel i Sverige	12
5 NÄR GROVA BORRADE STÅLRÖRSPÅLAR KAN ANVÄNDAS	18
5.1 Geoteknik	19
5.2 Yttre förutsättningar och störningar	20
5.3 Produktion	20
5.4 Miljö	21
5.5 Ekonomi	22
5.6 Projektering	23
5.7 Övrigt	24
6 JÄMFÖRELSEKALKYL	25
6.1 Samtliga stöd	26
<b>CHALMERS, Bygg- och miljöteknik, Examensarbete 2013:38</b>	<b>III</b>

6.2	Stöd 4	26
7	DISKUSSION	27
7.1	Intervjustudien	27
7.2	Jämförelsekalkylen	27
7.3	Analys av resultatet	28
8	SLUTSATS	32
	REFERENSER	34
	Muntliga källor	35
	Figurkällor	35
	BILAGOR	37
	Bilaga 1	37
	Bilaga 2	38
	Bilaga 3	45
	Bilaga 4	47

## Förord

Denna rapport är en del av det examensarbete som avslutar byggingenjörutbildningen på Chalmers Tekniska Högskola. Examensarbetet omfattar 15 högskolepoäng och är skrivet på avdelningen Geologi och Geoteknik. Rapporten är skriven i samarbete med Styrud Ingenjörfirma AB, ett entreprenadföretag som främst inriktar sig mot borring.

Författarna vill uttrycka sin tacksamhet gentemot Styrud och vår handledare Johan Blomdahl för feedback och givande samtal om metoder för att nå resultat. Ett stort tack riktas också till vår handledare och examinator på Chalmers, Claes Alén, för hjälp med arbetets struktur och beräkningar.

Denna rapport hade inte varit möjlig att skriva utan alla som ställt upp på intervjuer, ett stort tack också till Er. Bland dessa riktas extra tacksamhet till Pär Johansson på Vectura för hjälp med att plocka fram material till jämförelsekalkylen. Utöver dessa har även ett stort antal personer, både på Chalmers och i näringslivet, hjälpt till med tips och information som hjälpt oss att slutföra arbetet, ett stort tack även till Er.

Göteborg, juni 2013

Joel Sandberg, Johan Sundman

# Ordlista

Följande ord presenteras med dess faktiska innebörd i detta arbete.

Betongpåle	En prefabricerad påle av betong.
Borrad påle	Påle som installeras genom borrhning.
Borrkrona	Den del som forcerar ned i jorden, längst ned vid spetsen av stålröret, vid borrhning av stålrörspålar.
Bottenplatta	Den platta brostödet byggs på. Fungerar även som påplint.
Brolansering	När farbanan eller delar av bärande element förs till sin slutliga placering.
Bärförmåga	Hur mycket last en påle eller pelare klarar att bära.
Dynamisk provning	En provningsmetod där den geotekniska bärförmågan verifieras med hjälp av stötvågor.
Foderrör	Ytterrör som skyddar pålen. Inte del av den bärande konstruktionen.
Förhöjd grundläggning	Grundläggning där bottenplattan är placerad ovanför marknivån.
Godstjocklek	Tjockleken på stålet hos en stålrörspåle.
Grov påle	Påle med stor diameter. Avser här dimensioner över 300 mm.
Grävpåle	Påle som installeras genom grävning eller borrhning. Ej att förväxla med borrad stålrörspåle.
Hejare	En vikt som släpps på pålen för installation eller verifiering.
Kontrollslagning	Slagning på stålrörspålen när borrhningen är avslutad. Utförs för att säkerställa att pålen står på bärkraftigt berg.
Lager	Konstruktionsdel som överför krafter och laster från brobanan till stöd.
Mantelbärande påle	Påle som bär last genom friktion eller kohesion till omgivande jordmaterial.
Massundanträngning	Jord eller annan massa som trycks undan när pålen installeras.

Nyckeltal	Tal som värderar och gör det möjligt att göra kalkyler och kostnadsjämförelser. Exempel på enhet är kr/m.
Planskild korsning	En korsning där två vägar eller väg/järnväg möts i olika höjd, det vill säga ena vägen går över den andra.
Pålkommissionen	Organisation som bedriver forskning, utveckling och utredningar inom pålgrundläggning och stödkonstruktioner.
Slagen påle	Påle som installeras genom att pålen slås ned i marken.
Slagsko	Den del som svetsas fast på stålrörspålen innan borring och sammanbinder ringborrkronan med röret.
Slank påle	Påle med liten diameter. Avser här dimensioner på 300 mm eller mindre.
Spann	Den del av bro som finns mellan två stöd.
Spetsbärande påle	Påle som huvudsakligen bär last via sin spets till underliggande berg eller bärkraftigt jordlager.
Spontlås	Konstruktionsdel som håller ihop pålarna så de bildar en spont.
Spännvidd	Avstånd mellan två brostöd.
Statisk provning	Provning av påle genom att placera en stor last på pålen under en längre tid.
Stålkärnepåle	En påle som består av ett foderrör med en stålkärna inuti.
Stålrörspåle	En påle som består av ett stålrör.
Traditionell grundläggning	Grundläggning på prefabricerade betongpålar alternativt grundläggning direkt på berg/fast material.
Tolerans	Hur mycket påltoppens läge får avvika från teoretiskt tilltänkt läge.
Tätplatta	Betongplatta som gjuts under bottenplatta vid hög vattennivå. Förhindrar plattan att röra sig uppåt på grund av vattentryck.
Tvärbalk	Tvärgående balk som binder samman stålrörspålarna i toppen.



# 1 Inledning

Grova borrade stålrörspålar som grundläggning för broar är en ny teknik i Sverige som hittills bara använts ett fåtal gånger. Vid traditionell grundläggning i Sverige gjuts en bottenplatta på slagna betongpålar, direkt på berg eller på packat material. Stålrörspålar kan användas som traditionella pålar där bottenplatta gjuts ovanpå pålarna, men när det gäller broar finns möjlighet att pålen ovanför marken övergår till pelare som sedan brobanan placeras på. Med denna metod öppnar sig möjligheten att undvika gjutning av bottenplatta och separata brostöd och i teorin borde därmed både tid och pengar kunna sparas. I Finland är detta en vanlig metod där fler än 400 broar byggts på stålrörspålar som övergår till pelare.

Eftersom metoden fortfarande är ny i Sverige tycks få undersökningar ha gjorts, både när grova borrade stålrörspålar i allmänhet och metoden där pålen övergår till pelare lämpar sig. Rapporten skrivs i samarbete med Styrod Ingenjörfirma AB, ett företag som utför borring av stålrörspålar. Styrod ser möjligheter till användning av grova borrade stålrörspålar, där av intresset för denna undersökning.

## 1.1 Syfte

Syftet med denna rapport är att undersöka var och när grova borrade stålrörspålar för broar kan vara lämpligt att använda. För- och nackdelar undersöks utifrån parametrar som geotekniska förutsättningar, yttre förhållanden, ekonomi, produktion och projektering.

## 1.2 Avgränsning

Grova stålrörspålar räknas här som stålrör med diameter över 300 mm i enlighet med Trafikverkets bronormer. Bara spetsburna pålar utreds. Rapporten fokuserar främst på den typ av stålrörspålar som beskrivs i Pålkommisionens rapport 104, *Borrade stålrörspålar*, alltså där stålröret borrar ned i berg eller fast material. Stålröret lämnas också kvar och utgör del av den bärande konstruktionen.

## 2 Metod och material

Rapporten inleds med en teoretisk del om grova borrade stålörspålar och brogrundläggning där information inhämtas från litteratur inom ämnet. Delar av informationen angående utförandet och de byggda exemplen kommer från de intervjuer som gjorts till intervjustudien.

Rapportens resultatdel består av två delar där den ena delen presenterar när tekniken med grova borrade stålörspålar på broar kan vara lämplig och baseras på en intervjustudie. Den andra delen består av en ekonomisk jämförelsekalkyl mellan en bro grundlagd på traditionellt sätt där ett förslag på alternativ utformning med grova borrade stålörspålar tagits fram.

### 2.1 Intervjustudie när tekniken kan användas

Intervjustudien har genomförts genom att olika intressenter med kunskap om broar och grundläggning intervjuats. Vissa frågor har ställts till samtliga medan vissa frågor anpassats beroende på personens arbetsroll. Frågorna har också delvis ändrats beroende på hur intervjuerna fortskridit. Elva av intervjuerna har utförts genom personliga möten, samtliga dessa intervjuer har spelats in. En intervju har genomförts via telefon, också denna intervju har spelats in. Två av intervjuerna har utförts via mail. För att ge exempel på hur frågorna varit utformade finns frågorna till mailintervjuerna i bilaga 1.

De personer som har blivit intervjuade valdes för att få en blandning av olika intressenter inom branschen vilket inkluderar entreprenörer, konsulter och beställare. Samtidigt har det eftersträvat att personerna ska ha så mycket relevant erfarenhet som möjligt.

Åsikterna har sammanställts genom att svaren delats in efter relevanta kategorier så som för- och nackdelar, geoteknik, miljö och så vidare. Därifrån sammanställdes åsikterna till ett resultat uppdelat efter de fem parametrar som anges i syftet. I resultatet anges vem eller vilka som uttryckt vilken åsikt. Innan publicering har sammanställningen skickats ut till de intervjuade där de givits chansen att kontrollera att de blivit korrekt tolkade.

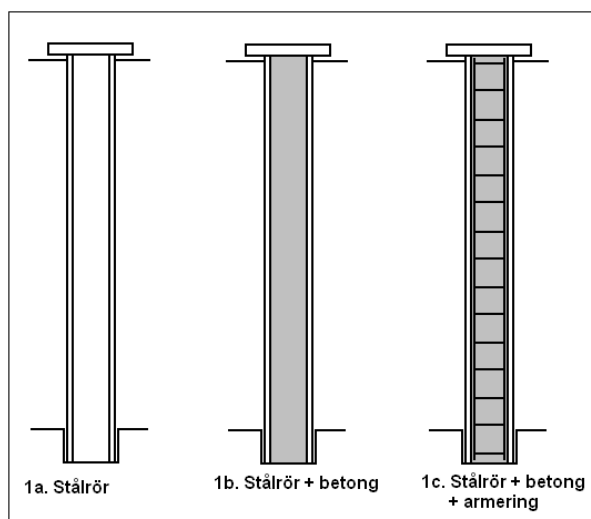
### 2.2 Jämförelsekalkyl

Jämförelsekalkylen har genomförts genom att en befintlig bro med traditionell grundläggning över Ätran i Vessigebro studerats. Ett förslag på alternativ utformning av stöd och grundläggning med grova borrade stålörspålar har sedan tagits fram. En konstruktionsmässig rimlighetsbedömning av den alternativa utformningen har gjorts genom en jämförelse med en liknande byggd bro och vissa beräkningar. Därefter har en kalkyl med hjälp av nyckeltal och beräkningar från olika entreprenörer på de båda utformningarna tagits fram. En omräkning med olika djup till berg på ett av stöden har även gjorts.



### 3 Borrade stålörspålar

Stålörspålar kom till Sverige i mitten av 1970-talet, då som slagna pålar (Bredenberg et al, 2010). Principen för en stålörspåle är att ett stålör förs ned i marken som sedan oftast fylls med betong och armering, se Figur 1. Denna metod användes till en början främst till grundförstärkning men har senare fått fler användningsområden, däribland grundläggning av hamnar och broar.



Figur 1: Principen för en stålörspåle (Bredenberg et al, 2010).

Borrade stålörspålar är en metod som på senare år kommit till Sverige. Borrade stålörspålar är precis som namnet antyder en stålörspåle som borrar ned i marken till berg eller morän. I de flesta fall borrar pålen även en bit in i bärkraftigt berg. Borrade stålörspålar i allmänhet har fördelarna att:

- Installationen har minimal massundantörning och inverkan på omgivningen.
- Installationen ger mindre buller och vibrationer än påslagning.
- Pålarnas kan installeras med stor precision och stoppas inte av hinder i marken så som stenblock, vilket i sin tur ger mindre risk för förseningar i utförandet.
- Pålarna går att få fast även på sluttande berg genom att borra ned i berget (Finnish Road Administration, 2003).

En förutsättning för att borrade spetsbärande pålar ska kunna användas är dock att bärkraftigt berg eller morän finns inom rimligt djup. Stålrör för borrning finns med en diameter från 100 mm upp till drygt 800 mm med en godstjocklek mellan 5 och 16 mm. Borrade stålörspålar började tas upp som en egen kategori i Pålkommisionens pålstatistik 2007 och den senaste utgåvan anger att 2011 borrades totalt 158 000 meter stålörspålar i Sverige (Pålkommisionen, 2012). Detta utgjorde 7% av den totala mängden installerade pålar i Sverige det året.

Den borrade stålörspålen har stora likheter med stålörspålen. En stålörspåle består av ett neddrivet foderrör där en kärna av stål sedan installeras (Bredenberg,

2000). Mellan stålkärnan och foderröret gjuts betong. I princip är det alltså en stålrörspåle med en stålkärna i mitten. Skillnaden är dock att stålröret i en stålkärnepåle endast har funktionen av foderrör och inte utgör en del av den bärande konstruktionen. Fördelarna med stålkärnepålen är att de tar sig igenom svåra markförhållanden, har mindre omgivningspåverkan och snabbare installation än konventionella pålningsmetoder som prefabricerade betongpålar. Fördelarna med stålkärnepålar är alltså till stor del liknande fördelarna med stålrörspålar.

Stålrörspålen har också stora likheter med det som i Sverige benämns som grävpålar. Grävpålar kan ses som ett samlingsnamn som definieras som en i jorden gjuten påle som är icke jordundandrängande (Berggren, 1992). Fördelar som lyfts fram med grävpålen är att den har hög lastkapacitet, är skonsam mot omgivningen och att installationen genererar lite buller. Utförandet av borrhålet för grävpålar kan vara både genom grävning eller borrhning (Shiltagh, 2010). Vid borrhning kan precis som med borrarade stålrörspålar ett stålrör drivas ned. Skillnaden är dock att detta endast är ett foderrör som normalt dras upp igen i samband med gjutningen av pålen. Även om röret kvarlämnas syftar det inte till att utgöra någon bärande funktion som är fallet för stålrörspålen. Magnus Ruin<sup>1</sup> säger också att en viktig skillnad är att grävpålen med dagens teknik inte kan borraras in i berget. På engelska benämns grävpålarna som *bored piles* medan de borrarade stålrörspålarna, som undersöks i denna rapport, normalt benämns som *drilled piles*.

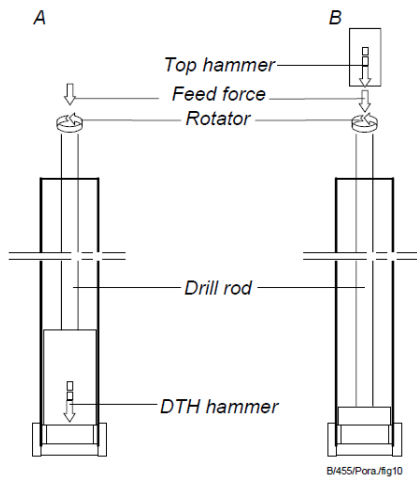
### 3.1 Utförande

Vilken bormetod som väljs när stålrörspålar installeras beror på markens förutsättningar och rörens dimension (Finnish Road Administration, 2003). För mindre rör, med dimensioner upp till 200 mm, kan toppborrhammare användas medan sänkborrhammare används till de grövre dimensionerna. En toppborrhammare genererar de tryckstötter som ska föra röret nedåt vid toppen av röret, se Figur 2. En del av kraften dämpas i röret och når aldrig rörets spets, vilket gör att denna metod inte kan användas till grova rör eller där längden på rören blir allt för lång.

En sänkborrhammare klarar borra rör med diameter upp till en meter. Fördelarna gentemot toppborrhammaren är att de är effektivare och borrar rakare. En sänkborrhammare arbetar längst ned vid rörets spets och påverkas därför inte av hur långt röret är då kraften alltid genereras längst ned, se Figur 2. Detta för också med sig att röret ovanför dämpar slagljud, något som leder till tystare installation.

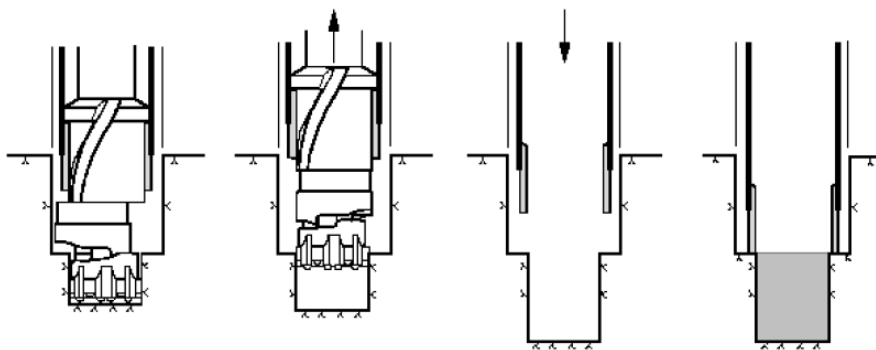
---

<sup>1</sup> Magnus Ruin, intervjuad av författarna 2013-04-19.



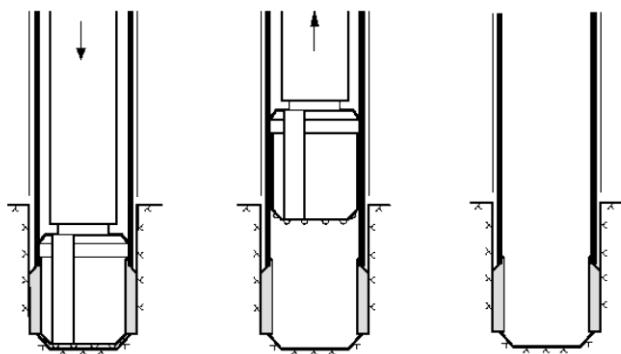
**Figur 2:** A visar principen för sänkborrhammare där kraften genereras längst ned. B visar principen för toppborrhammare där kraften genereras i toppen av röret (Finnish Road Administration, 2003).

Borringen kan utföras genom så kallad excentrisk eller centrisk borring. Metoderna går att använda tillsammans med både topphammare och sänkborrhammare. Vid excentrisk borring svetsas en borrar fast längst ned på röret innan borringen börjar. Borrarrens uppgift är att föra över stötkaften från kraftkällan till röret (Bredenberg et al, 2010). Under borringen svänger den så kallade rymmaren ut vilket gör att borrhålet får lite större diameter än stålröret, se Figur 3. När berg nåtts måste betong fyllas längst ned för att undvika att röret blir stående på en hylla. Excentrisk borring klarar en godstjocklek på maximalt 5-6 mm. Fördelen med excentrisk borring är att borkronan kan tas upp när installationen av pålen är klar.



**Figur 3:** Excentrisk borring, bilden längs till vänster visar hur rymmaren borrar ur ett hål som är större än ytterrörets diameter. När sedan borkronan förts upp måste betong gjutas för att undvika att röret blir stående på en hylla (Bredenberg et al, 2010).

Den andra metoden, centrisk borrar, är det enda alternativet när godstjockleken är mer än 5-6 mm, vilket den allt som oftast är då grova stålrörspålar används. Vid centrisk borrar svetsas en slagsko tillsammans med en ringborrkrona fast längst ned på röret. Borrar-kronan kopplas sedan ihop med ringborrkronan och driver ned röret. När röret nått berg vilar röret på ringborrkronan, vilket gör att denna inte går att få upp och återanvända, se Figur 4. Detta ses som negativt med centrisk borrar då kostnaden för ringborrkronan är relativt stor. Fördelar med metoden är att den beräknas ge rakare borrhål och ger en bättre penetrationsförmåga jämfört med excentrisk borrar.



**Figur 4: Exempel på centrisk borrar.** Den ljusare delen som pålen vilar på är ringborrkronan som lämnas kvar längst ned. Ovanför borrar-kronan, den del som förs upp igen, sitter piloten. Det är den del som genererar slag nedåt samtidigt som den roterar (Bredenberg et al, 2010).

Den jord som hamnar i röret plockas upp vilket gör att borrarde stålrörspålar genererar mycket liten massundanträngning. Jorden kan tas upp på flera sätt, bland annat genom vatten-, luft- eller bentonitdrivet system (Finnish Road Administration, 2003). De vanligast förekommande systemen är vatten- eller luftdrivna. När jorden förs upp är det viktigt att inte mer jord än rörets volym tas upp. Detta kan hända framförallt i finkornig jord när luftdrivet system med sänkborrhämmare används (Bredenberg et al, 2010). Håkan Eriksson<sup>2</sup> menar att för grova pålar används uteslutande luftdrivna system då trycket inte blir tillräckligt stort med vattenburna system. Sammanfattningsvis är det med dagens teknik alltså centrisk borrar med luftdriven sänkborrhämmare som är det enda praktiskt genomförbara alternativet när det gäller grova borrarde stålrörspålar.

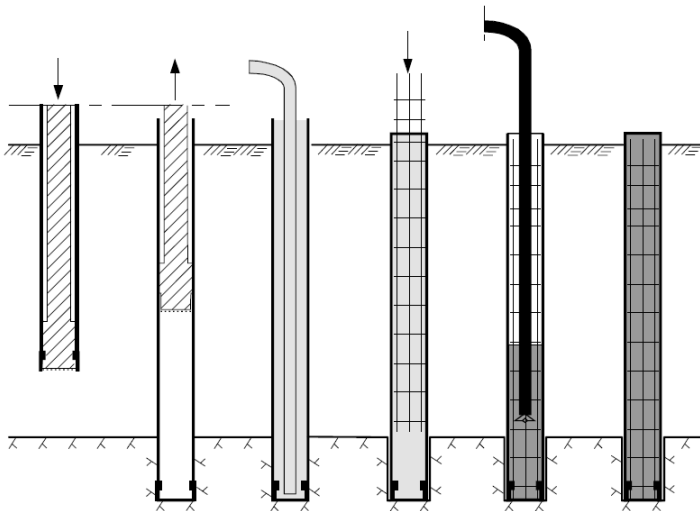
Beroende på pålens längd kan skarvning vara nödvändigt. Hur långa delar som kan installeras styrs av maskinen och höjden på dess mast. För de maskiner som klarar grova stålrörspålar tycks normal maxlängd ligga mellan 9-14 meter. För slanka stålrör finns skarvhylsor som skruvas direkt på rören men för skarvning av grova stålrör är svetsning den idag enda tillgängliga metoden. Enligt Boverkets handbok om stålkonstruktioner ska kontroll av svetsen göras med oförstörande provning när utnyttjandegraden hos stålet är högre än 50 procent vilket innebär att svetsen ska svalna minst 16 timmar innan provning utförs (Boverket, 2007). Enligt Peter Alheid<sup>3</sup> är föreskrifterna i Eurokod i princip detsamma.

<sup>2</sup> Håkan Eriksson, intervjuad av författarna 2013-04-18.

<sup>3</sup> Peter Alheid, intervjuad av författarna 2013-03-12.

När röret är nere på önskat djup ska kontrollslagning göras på pålen för att kontrollera att röret gått igenom allt löst material (Bredenberg et al, 2010). Detta kan göras med hejare där kravet är att hejarens vikt ska vara minst lika stor som pålens vikt per meter. Dessutom ska bergets geotekniska bärförmåga verifieras vilket normalt görs med stötvågmätning som är en form av dynamisk provning. Provningen görs då genom att en tung hejare släpps på toppen av röret och därefter mäts stötvågorna genom röret. Stötvågmätning är dock inte möjligt att utföra på en betongfylld stålrörspåle när godstjockleken är för stor. Alternativet till dynamisk provning är statisk provning, men metoden är både dyr och tidskrävande. I Finland finns inte krav på denna form av provning utan där består kontrollerna endast av prover från berget och stoppslagning med den hammare som används vid borrhningen (Finnish Road Administration, 2003).

När alla kontroller är klara rengörs stålröret varpå en armeringskorg förs ned. Till sist gjuts betongen i pålen som i Figur 5.



**Figur 5:** De olika stegen i en installation av borrarad stålrörspåle. Först borrar pålen ned, pilot och borrhigg tas upp och röret tvättas rent. För att öka bärförmågan läggs armering i innan betong fylls på (Finnish Road Administration, 2003).

## 4 Grundläggning av broar

Grundläggning av broar görs för att säkerställa bronns och anslutande vägars funktion (Ronnebrant, 1996). Vilken grundläggningsteknik som väljs beror bland annat på:

- Grundförhållandena som innefattar bärförmåga, stabilitet och sättningar
- Grundvatten eller den fria vattenytans läge
- Tjalsäkert djup
- Vilken brotyp som är tilltänkt
- Hur utförandet av arbetet är tänkt att gå till
- Hur omgivningen ser ut och om där finns närliggande konstruktioner

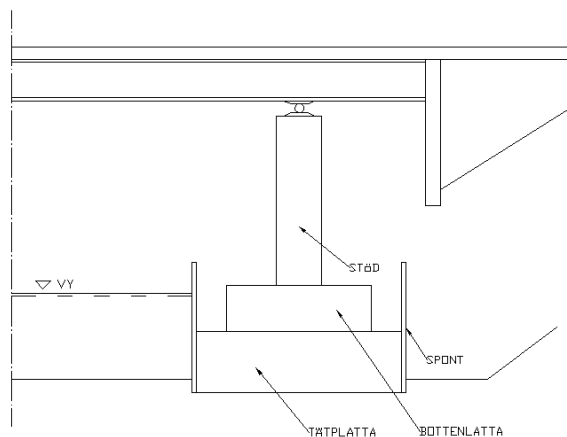
Broar är mycket känsliga för sättningar, och framförallt om sättningarna blir ojämna (Nilsson, 2003). Om detta uppstår eller om stödpunktsförskjutningar inträffar kan oönskade spänningar uppstå i bron vilket i sin tur kan leda till minskad bärrighet.

### 4.1 Traditionella grundläggningsmetoder

Grundläggningsmetoder för broar kan delas in i flera olika typer och kategorier. För att kunna jämföra borrade stålörspålar med andra metoder beskrivs här två vanligt förekommande grundläggningsmetoder för broar i Sverige: platta på jord eller berg och pålade stöd med slagna betongpålar.

#### 4.1.1 Platta på jord eller berg

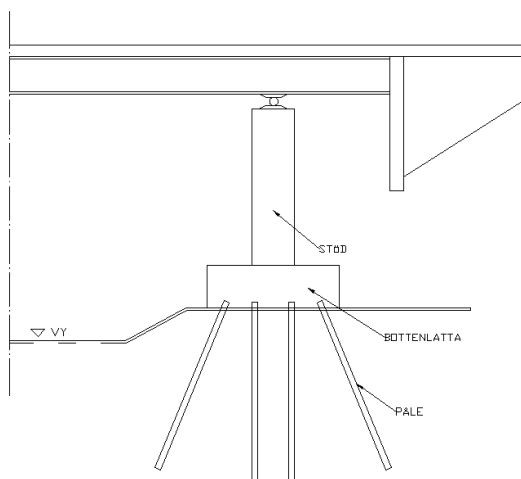
Då bärkraftig jord, alternativt berg, finns inom rimligt djup för att schaktas fram kan platta gjutas utan övrig förstärkningsåtgärd (Ronnebrant, 1996). Detta kallas platta på jord eller platta på berg. Det är en fördel om plattan gjuts i torrhet, vilket kan leda till att sponter behövs för att hålla grundvatten borta då grundläggning sker under grundvattennivån. Om grundvattennivån är hög sätts först spont upp varefter en tätplatta gjuts som är tillräckligt tjock för att inte lyfta av vattentrycket underifrån, se Figur 6. Plattan kan också gjutas under vatten. Ovanpå bottenplattan gjuts sedan någon typ av stöd, till exempel ett skivstöd eller ramben.



**Figur 6: Brostöd anlagt direkt på jord eller berg intill vattendrag.**

### 4.1.2 Pålade stöd

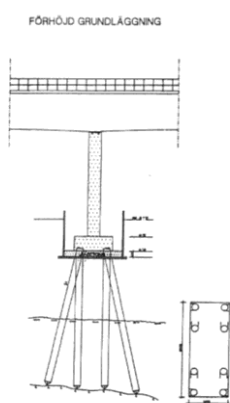
Då inte bärkraftig jord eller berg finns inom rimligt djup kan pålning vara ett alternativ för uppnå tillräcklig bärighet för brostödet, se Figur 7 (Ronnebrant, 1996). Pålarna kan vara mantelburna eller spetsburna. Spetsburna pålar installeras ned till bärkraftigt material, till exempel morän eller berg. I Sverige dominerar slagna prefabricerade betongpålarna som pålningsmetod. Pålarna gjuts ihop med bottenplattan och precis som med platta på jord eller berg så gjuts något form av stöd ovanpå som bär bron. Andra påltyper och metoder, som stålrörspålar, används traditionellt främst vid svåra geotekniska förhållanden, till exempel blockrik jord där de slagna betongpålarna inte tar sig ned.



**Figur 7: Brostöd grundlagt på pålar.**

## 4.2 Grova borrade stålörspålar för broar

Grova stålörspålar för broar har använts på ett flertal broar i Sverige men tidigare bara som slagna. Ett exempel på hur det då använts är bro C339 över Ekolsundsviken som grundlades 1990. Pålning med slagna grova stålörspålar valdes framför det i programhandlingarna föreslagna alternativet med betongpålar (Bredenberg, 1991). En ekonomisk kalkyl visade att alternativen var likvärdiga ur ekonomisk synpunkt, men stålörspålar ansågs ge mindre risk för skador och förskjutningar på pålarna vilket kan leda till förseningar och ökade kostnader. Alternativet innebar en så kallad förhöjd grundläggning där bottenplattan placerades en bit upp i vattnet som visas i Figur 8. Stålörspålar, med 711 mm diameter, står alltså delvis fritt i vattnet. Dock beräknades stålet som helt borttrostat och fungerar i teorin bara som en kvarsittande form på en armerad betongpåle.



Figur 8: Tvärsektion på förhöjd grundläggning på bro C339 (Bredenberg, 1991).

Grova borrade stålörspålar till broar har börjat användas i Sverige först de senaste åren. Här kan användningen av pålarna delas in i två kategorier: pålar under bottenplatta, alltså samma princip som vid konventionell pålning, och pålar som övergår till pelare. För just grova borrade stålörspålar, alltså med diameter över 300 mm i diameter, har endast fyra broar byggts enligt Mats Larsson<sup>4</sup>. I samtliga fall har pålarna övergått till pelare ovan mark och fortsatt hela vägen upp till brobanan.

### 4.2.1 Som traditionell pålning

Borrade stålörspålar under bottenplatta innebär att brokonstruktionen ovan grundförstärkningen är oförändrad mot konventionell grundläggning. Detta kan tillämpas på alla brotyper och kan vara fördelaktigt när en bro byggs nära existerande konstruktioner då massundanträngningen blir minimal (Bredenberg, 2010). Ett exempel då detta använts med slanka borrade stålörspålar i Sverige är utbyggnaden av Jordfallsbron vid Bohusmotet 2010. Där borrades stålörspålar med 220 mm diameter ned. Detta alternativ valdes enligt Gunnar Holmberg<sup>5</sup> på Skanska dels då det

<sup>4</sup> Mats Larsson som tidigare arbetat för stålörslverantören Ruukki, intervjuad av författarna 2013-04-12.

<sup>5</sup> Gunnar Holmberg, intervjuad av författarna 2013-03-06.

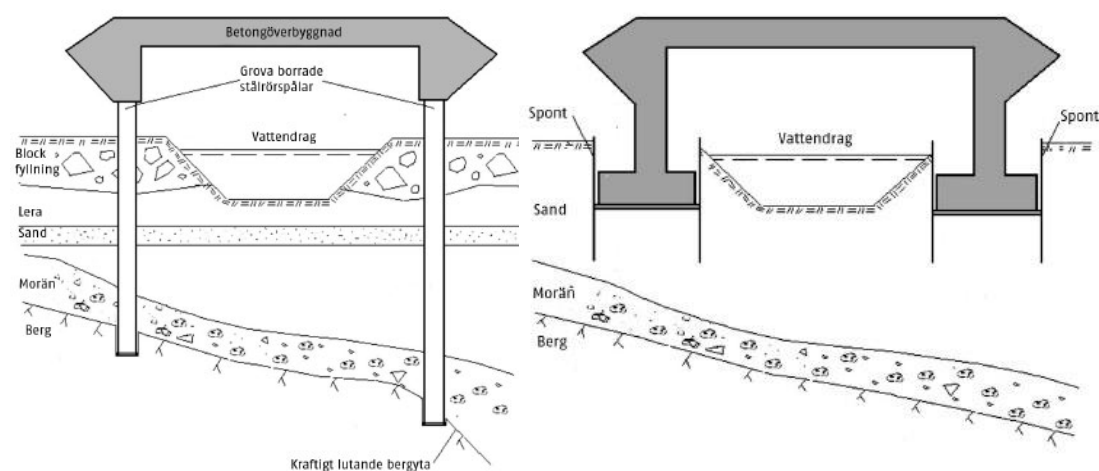


var släntberg och svårt att få fäste med andra pålalternativ, dels för att undvika massundantäckning och vibrationer nära den befintliga delen av bron. Detta var också enligt Holmberg första gången borrarade stålrörspålar av något slag godkändes av Trafikverket på broar i Sverige. Just grova borrarade stålrörspålar tycks dock ännu inte ha använts i Sverige på detta sätt.

## 4.2.2 Påle som övergår till pelare

Borrarade stålrörspålar som övergår till pelare innebär att pålen fungerar även som bärande element ovan mark, se Figur 9 (Ruukki, 2011). Detta ger fördelar genom att ingen bottenplatta eller separata brostöd behöver gjutas som till höger i Figur 9. Det kan i sin tur ge kortare byggtid och förenklar utförandet av brostöd i och omkring vattendrag. Tekniken, som även kan göras med slagna stålrörspålar, kommer ursprungligen från Finland där mer än 400 broar har byggts på detta sätt.

Tekniken har där blivit särskilt populär vid byte av järnvägsbroar. Pålarna, som också fungerar som pelare för den nya bron, installeras då vid sidan av den utjänta bron och när de är på plats stängs bron av för att riva den gamla broplattan samtidigt som den nya lanseras in, ofta från sidan. Sedan kan trafik släppas på medan det sista arbetet, som rivning av gamla brostöd och iordningställande, slutförs. Denna metod har också använts framgångsrikt där nya planskilda korsningar mellan befintlig järnväg och en ny väg ska byggas. Detta kan antas vara anledningen till att normaltiden för trafikavstängning vid lansering av järnvägsbroar i Finland endast är 15 timmar. Motsvarande tid i Sverige är normalt 32 timmar (Ruukki, 2011).



**Figur 9: Principen för borrarade stålrörspålar som övergår till pelare till vänster och traditionell plattgrundläggning för liknande bro till höger (Ruukki, 2011).**

För mindre broar kan det räcka med att två pelare på vardera sidan om bron borraras ned. När det är fallet väljs enligt stålleverantören Ruukki borrarade stålrörspålar om det finns hinder i marken eller markytan är kraftigt lutande, annars väljs normalt slagna stålrörspålar. På större broar kan antalet stöd och pelare per stöd utökas beroende på hur stora spännvidderna är.

### 4.2.3 Exempel i Sverige

Fram till och med våren 2013 fanns fyra stycken broar byggda på grova borrade stålrörspålar i Sverige, dessa var:

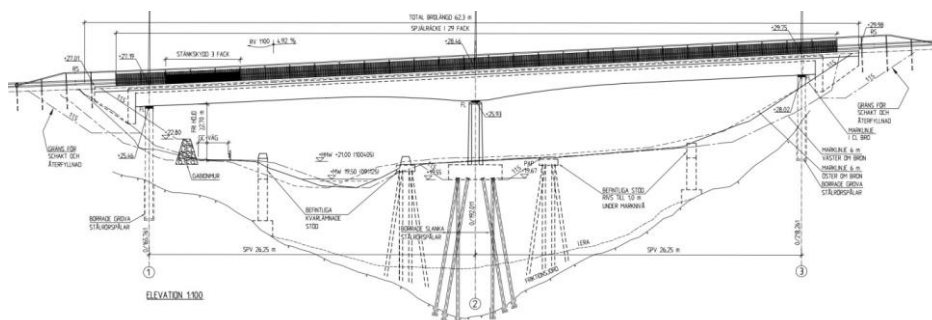
- 1) En vägbro över Forsån på Perstorpsvägen i Stockholm.
- 2) En vägbro över Lagan i Ljungby, Småland.
- 3) En järnvägsbro över Avbördningskanal i Kiruna.
- 4) En vägbro i Rydöbruk, fyra mil nordost om Halmstad.

Utöver det har enligt Mats Larsson<sup>6</sup> en järnvägsbro över Dyrån utanför Gävle projekterats för borrade pålar men där slagna stålrörspålar valdes i slutändan. För att ge exempel på hur broar kan konstrueras med denna teknik ges här en kortare beskrivning av dessa.

#### 4.2.3.1 Bro på Perstorpsvägen

Bron på Perstorpsvägen i Stockholm var en gammal befintlig bro i flera spann som behövde bytas ut. Enligt konstruktören Lars Erik Lundenberg<sup>7</sup> kom idén till att använda grova borrade stålrörspålar som går upp till brobanan då beställaren ville ha så kort avstängning av vägen som möjligt. Som visas i Figur 10 finns ett mittstöd byggt på konventionellt sätt som kunde byggas under den befintliga bron. Ändstöden, som består av stålrörspålar med 610 mm diameter, borrades genom ett hål i den befintliga bron och på så sätt behövde bara ett körfält stängas av i taget. Anledningarna till att pålarna borrades istället för att slås i detta fall var att det var släntberg och att avståndet mellan ovasida mark och fast berg var litet, vilket skulle gjort slagna pålar för ostabila för att konstruktionen skulle fungera.

Bron skulle under tiden byggas vid sidan om och lanseras in under ett stopp på tre veckor. I slutändan stängdes dock vägen av i alla fall och bron byggdes direkt på plats. Den här bron är den hittills enda där stålrörets bärförmåga tillgodoräknats i hela pålen.



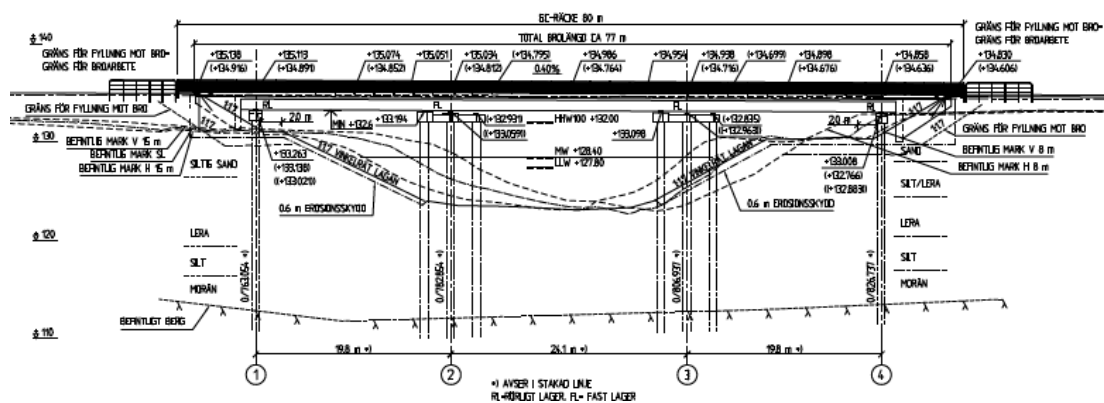
Figur 10: Elevationsritning (Lundenberg, 2010).

<sup>6</sup> Mats Larsson, intervjuad av författarna 2013-04-12.

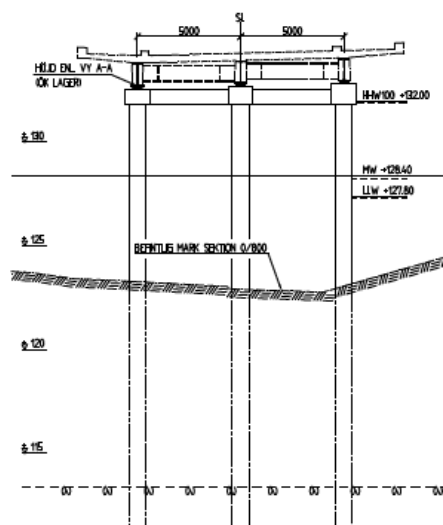
<sup>7</sup> Lars Erik Lundenberg, intervjuad av författarna 2013-04-18.

### 4.2.3.2 Bro i Ljungby

Vägbron över Lagan, som ingår i en förbifart utanför Ljungby, är grundlagd helt på grova borrarade stålrörspålar (Kalleny, 2012). Bron har fyra stöd med tre pelare i varje, två av stöden är placerade i vatten, se Figur 11. Varje påle har en diameter på 813 mm och är cirka 24 meter lång. Pålarna är nedborrade 1,5 meter i fast berg och övergår i marknivån till pelare. På toppen av pålarna sitter en tvärbalk, se Figur 12 (Björnström, 2012). Brobanan är en samverkanskonstruktion av stålbalkar och farbana i betong.



Figur 11: Elevationsritning (Björnström, 2011).



Figur 12: Sektionsritning över stöd i vatten (Björnström, 2011).

Anledningen till att metoden med pålar som övergår till pelare valdes var för att undvika arbetet med schakter, spontning, gjutning av tåtkaka med mera i vattnet. Pär Johansson<sup>8</sup> på Vectura, som var med och projekterade bron, menar att arbetet med gjutning av stöd i och nära vatten är besvärligt, dyrt och riskfyllt. De borrarade stålrörspålarna borrarades direkt från land, som i Figur 13, och på så sätt undveks dessa moment och grundläggningen gick dessutom vidare.

<sup>8</sup> Pär Johansson, intervjuad av författarna 2013-03-11.



**Figur 13:** En borrhög installerar en stålrörspåle vid byggandet av bron utanför Ljungby (Styrud, 2013).

Enligt en av konstruktörerna Grétar Páll Jónsson<sup>9</sup> är de pålar som står i vatten extra utsatta för korrosion. Med hänvisning till TK Bro, Trafikverkets dåvarande bronorm, och Pålkommisionens rekommendationer räknades stålet helt bort ovanför marken. Detta betyder att teoretiskt fungerar stålrören där bara som kvarsittande form.

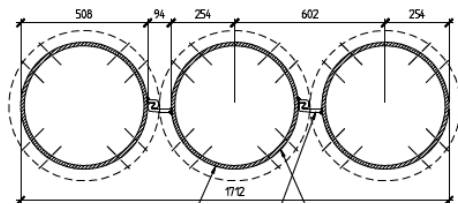
Då detta är en av de första broarna som byggts på detta sätt menar både Jónsson och Johansson att det går att dra många lärdomar av projektet. Till exempel ställde toleransen, det vill säga hur mycket pålarnas position får avvika från det teoretiska läget, till det. Från början räknades med en tolerans kring 100 mm, något som visade sig vara för lite. Detta gjorde att vissa korrigeringar behövde göras i lager och på stålbalkarna för att de skulle passa in.

---

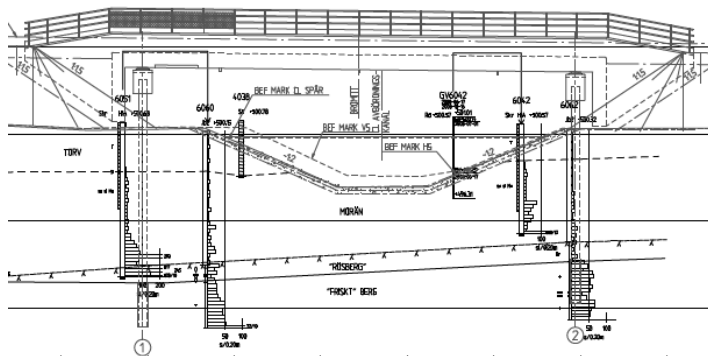
<sup>9</sup> Grétar Páll Jónsson, intervjuad av författarna 2013-04-10.

### 4.2.3.3 Bro i Kiruna

Järnvägsbron över Avbördningskanal i Kiruna var den första bron med grova borrade stålrörspålar i Sverige. Idén uppkom enligt Mats Larsson<sup>10</sup> då man fick problem med att det fanns permafrost i moränen som grundläggningen skulle göras i. Lösningen blev att bron grundlades på fyra stöd med tre 508 mm stålrör i varje stöd (Bäck, 2011). Stålrören är också utformade med spontlås som låser pålarna till varandra, se Figur 14. Pålarna borrades genom moränen och ned cirka 2,5 meter i friskt berg. Uptill fortsätter pålarna upp till en tvärbalk som ansluter direkt mot brobanan, se Figur 15.



Figur 14: Detalj på stålrörspålarna som visar hur de hålls ihop av spontlås (Bäck, 2011).

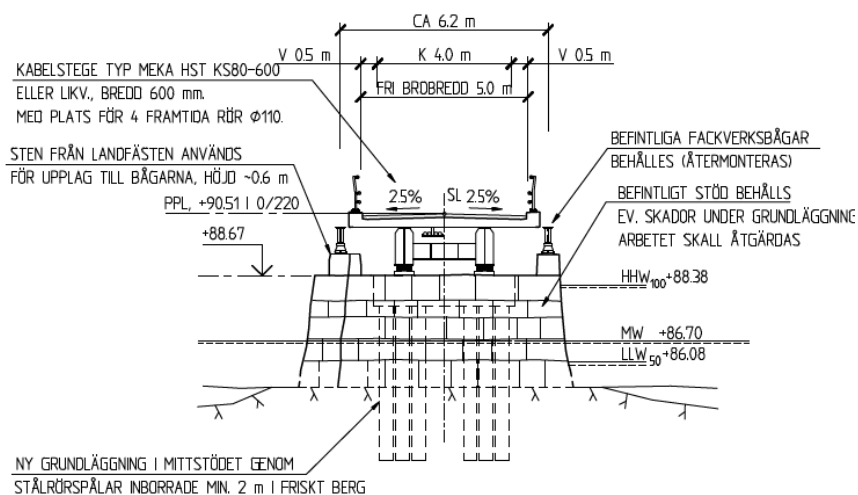


Figur 15: Elevationsritning på Kirunabron (Sarvell, 2013).

<sup>10</sup> Mats Larsson, intervjuad av författarna 2013-04-12.

#### 4.2.3.4 Bro i Rydöbruk

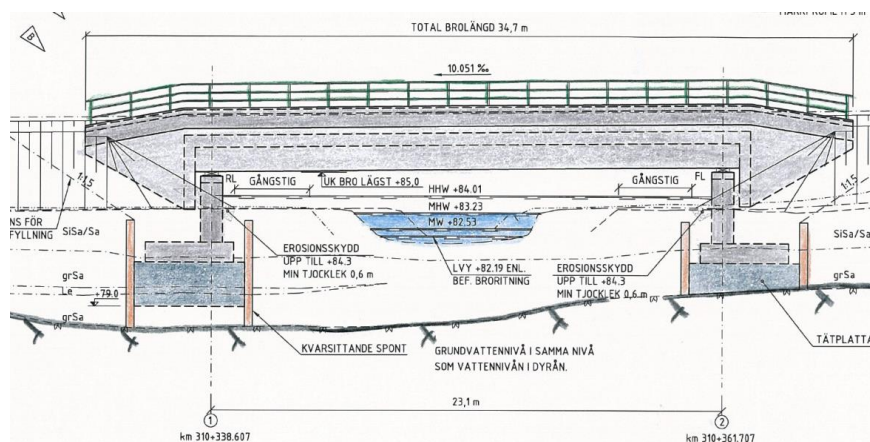
Bron över Nissan i Rydöbruk har tidigare varit med i Trafikverkets plan för bevarandevärda broar (Trafikverket, 2011). När bron behövde bytas ut skulle arkitekturen vara så lik den gamla bron som möjligt. Detta avgjorde valet av stålrörspålar som borrhats genom de befintliga stöden, se Figur 16. De nya stöden är utformade med sex stycken 406 mm stålrörspålar som sitter samman med spontlås tre och tre (Björnström, 2012). Ovanpå dessa ligger en samverkansbro med stålbalkar och betongöverbyggnad. Den nya bron är bredare och har högre bärighet vilket gör att även tyngre transporter kan nyttja bron.



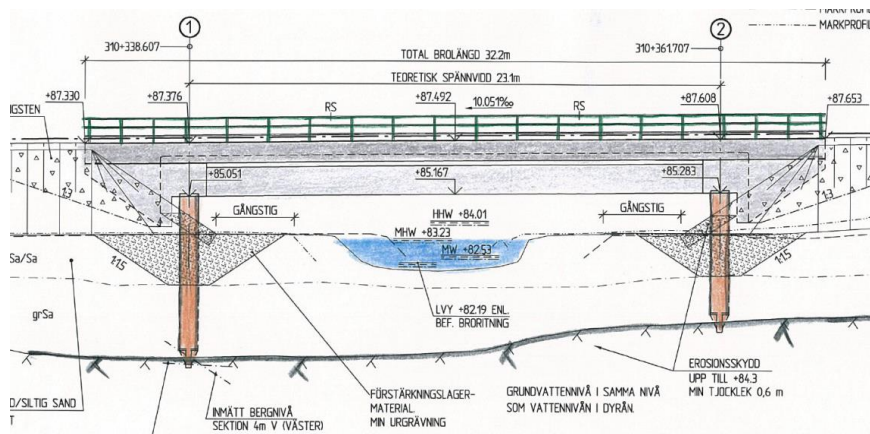
Figur 16: Sektionsritning över mittstöd (Björnström, 2012)

#### 4.2.3.5 Bro över Dyrån

Järnvägsbron över Dyrån utanför Gävle föreslogs från början med traditionella brostöd men NCC tillsammans med Cowi tog fram ett sidoförslag med stålörspålar som Figur 17 och 18 visar (Darholm, 2011). Grundläggningen består av fyra stycken stålrör med 813 mm diameter. Enligt Mats Larsson<sup>11</sup> projekterades bron med borrarade stålörspålar men ändrades senare till slagna. Enligt NCC sparades 40% av kostnaden för grundläggningsarbetet med det nya förslaget mot ursprungsförslaget (Lundberg, 2012). Produktionstiden kortades också med tre till fyra veckor. Vid installationen av pålarna uppstod vissa problem då en av pålarna först inte fastnade på berget utan började kana och blev lite sned.



Figur 17: Ursprungligt förslag (Darholm, 2011).



Figur 18: Slutlig utformning (Darholm, 2011).

<sup>11</sup> Mats Larsson, intervjuad av författarna 2013-04-12.

## 5 När grova borrade stålörspålar kan användas

Det presenterade resultatet är ett urval av de åsikter som framkommit under intervjustudien. Frågorna har varit öppna och spända över många områden vilket gör att det är författarnas bedömning om vilket område svaret tillhör som avgjort var åsikterna hamnat. Att frågorna varit öppna gör att en åsikt som tillskrivs en person inte innebär att övriga motsäger sig detta, utan endast att personen i fråga är den enda som tagit upp detta. De som intervjuats finns listade i tabell 1 med den förkortning de omnämns i texten.

**Tabell 1: De personer som intervjuats, listade i intervjuordning.**

<b>Namn och förkortning</b>	<b>Företag</b>	<b>Roll</b>
Johan Blomdahl, JB	Styrud, borrningsentreprenör	Affärsområdeschef grundläggning
Martin Laninge, ML1	Trafikverket, beställare	Brospecialist
Gunnar Holmberg, GH	Skanska Sverige AB, entreprenör	Projekteringsledare, specialitet pålning
Tobias Larsson, TL	NCC, entreprenör	Brokonstruktör
Pär Johansson, PJ	Vectura, konsult	Projektör anläggning
Peter Alheid, PA	Hercules grundläggning AB, entreprenör	Geokonstruktör
Grétar Páll Jónsson, GJ	Verkís Consulting, konsult	Beräkningsingenjör
Thomas Darholm, TD	Cowi, konsult	Avdelningschef brokonstruktion
Mats Larsson, ML2	Vectura, konsult	Geoteknisk konsult
Lars Erik Lundenberg, LEL	WSP Sverige AB, konsult	Brospecialist
Håkan Eriksson, HE	GeoMind, konsult	Geoteknisk konsult
Magnus Ruin, MR	Teroc, konsult	Geoteknisk konsult
Håkan Bredenberg, HB	Bredenberg Teknik, konsult	Geoteknisk konsult
Bo Berggren, BB	Berggren Tech, konsult	Geoteknisk konsult



## 5.1 Geoteknik

Att borrhade stålrörspålar blir aktuellt som grundläggningsmetod vid tuffa markförhållanden är alla intervjuade överens om. Flertalet menar att en fördel med grova borrhade stålrörspålar är att man tar sig igenom hinder i backen som block och sten. PA menar liknande att en fördel är att borren alltid går nedåt och att inga pålar går av. GH påpekar att det även finns andra metoder än just borrhade stålrörspålar när markförhållandena är tuffa. GH är precis som PA inne på att borrhade stålrörspålar blir ett alternativ först när ingen annan metod fungerar. TD är inne på liknande spår och säger att det finns ingen anledning att borra ned stålrören om bra förutsättningar till att slå finns. HE menar att borrhade stålrörspålar börjar bli intressant redan då det är svårt att slå eftersom kostnaden för borring är kalkylerbar och har mindre överraskningar än slagna pålar. Detta kan i ett tidigt skede vara viktigare än kostnaden.

TD och ML1 menar att slagna stålrör kan hamna snett om de stöter på något eller slinta på släntberg, vilket inte är en risk med borrhade pålar. Enligt ML2 var det just detta som skedde vid bron över Dyrån där stålrörspålarna slogs ned och en av dem hamnade snett då den gled på berget.

Enighet råder om att de geotekniska förutsättningarna kräver att berg måste finnas inom rimligt djup för att borrhade stålrörspålar ska bli ett alternativ. ML2 betonar också att det måste vara bärkraftigt berg. Han hävdar att vilket djup som är rimligt är en ekonomisk fråga men kan även vara en borrhsteknisk fråga beroende på markförhållandena. JB säger att hans företag har borrhade 40-50 meter utan problem men att det därefter troligtvis blir problematiskt att borra rent tekniskt då luften inte klarar att trycka upp den borrhade jorden.

ML2 framhåller att bergytan måste vara noggrant inmätt och att vattentrycket där nere är kontrollerat. Om det är ett artesiskt vattentryck kan detta vara ett problem då vatten riskerar att spolans upp under borringen.

Flera säger också att det inte bör finnas någon metall i marken för att borring ska vara möjlig. Även trä är problematiskt. HE menar också att åsjord kan vara jobbigt att borra igenom.

Enligt PA och ML2 fås en sockel när man borrhade ned i berg, vilket gör att man kan få pålen fast inspänd och som i sin tur leder till kortare knäcklängd. Även TD menar att den grova borrhade stålrörspålen är en fördel om man vill ha fast inspänning. Dock menar flera att de geotekniska egenskaperna kan göra att slagna och borrhade pålar får samma beräknade knäcklängd, vilket gör att den teoretiska fördelen med att gå ned i berget försvinner. Detta beror på djupet och jordens hållfasthet.

## 5.2 Yttre förutsättningar och störningar

JB och TL menar att en fördel med grova borrade stålrörspålar är att man kan borra genom befintliga stöd om de inte innehåller för mycket armering. På så sätt kan gamla konstruktioner bevaras och bärigheten på äldre broar höjas.

GH, PJ, TL, HE, ML2 och MR säger att grundläggning med borrade pålar genererar mindre omgivningspåverkan vilket kan vara en fördel är när man ska bygga nära befintliga konstruktioner och vill undvika störningar av dessa. JB, HE och ML1 säger liknande att en fördel är att den borrade stålrörspålen inte ger någon massundanträngning.

Samtidigt menar JB och ML2 att grova borrade stålrörspålar inte är helt fria från påverkan. När maskinen pressar ner luft för att få upp material kan luften sippra ut underifrån om man driver borringen för hårt. Detta kan leda till sättningar och i känsliga områden kan utgöra en risk för skred. ML2 menar också att gångar upp till markytan kan bildas av denna luft som förorenat vatten kan sippra ner i. Han menar dock att detta inte är någon risk om det utförs av en kunnig borrare.

MR påtalar också att maskinerna som krävs för att borra stålrörspålar är mindre än de som används när de slås ned, något som kan väga till borrade pålars fördel då utrymme för installation är knappt. Även LEL ser detta som en fördel. PA är dock tveksam till att maskinerna som utför installation av grova borrade stålrörspålar är mindre och lättare än motsvarande maskin som utför slagning av pålar.

ML1 menar att borrade stålrörspålar kan användas där det finns krav på lågt buller. Även JB, GH, HE och MR säger att tekniken minskar bullret. Samtidigt menar ML2 att borringen vid grova borrade stålrörspålar ger kraftigt buller, om än inte lika högt som motsvarande påslagning.

## 5.3 Produktion

JB, TL, PA, PJ och GJ menar att metoden med grova borrade stålrörspålar kortar produktionstiden. Dels, menar några, går själva pålningen snabbare med få stora pålar som borrar än många små som slås. Framförallt går det snabbare och är lättare i de fall där man låter pålen gå hela vägen upp till brobanan och därmed slipper schakt och eventuell spont för bottenplattan. Dessutom slipper man formning och gjutning av bottenplattan och separat brostöd. PJ, GJ och TD är inne på att denna fördel är extra stor när stöd behöver placeras i och omkring vattendrag på grund av svårigheterna att gjuta bottenplattan där. LEL menar även att samma fördel uppkommer om grundvattennivån är hög.

Av samma anledning bör tekniken då användas när tidsåtgången för byggnation är pressad menar JB och TL. Detta kan också vara en fördel när trafik ska stängas av för brobyte då avstängningstiden ska kunna minskas enligt ML1, TL, PA, PJ och ML2. Alla tillfrågade är av den anledningen positivt inställda till tekniken vid byte av järnvägsbroar så som den används i Finland, se kapitel 4.2.2. LEL säger att i de fallen bör borring väljas som metod för att få ned pålarna då det inte är lämpligt att slå grova stålrör intill järnvägen. ML2 säger att han ser fram emot när den här metoden för järnvägsbrobyte ska användas första gången i Sverige och menar att den gärna får

vara i flera spann. GH menar dock att det finns andra lösningar som skulle kunna vara ännu bättre alternativ när järnvägsbroar byts. ML1 förklarar också att avstängningstider för framförallt järnvägsbroar är fasta och att stoppen måste planeras in minst 18 månader i förväg, innan någon entreprenör antagits.

ML2 menar att man minimerar de tekniska riskerna genom att låta pålen gå upp till brobanan just genom att man slipper den annars obligatoriska schakten. Bland annat slipper man problem med att schakten ska hålla för de tunga pålmaskinerna. TD, BB och PA menar också att borrade stålrörspålar är den säkraste pålmetoden och att man minimerar risker i själva pålningen genom att borra. GH menar att detta också gör tidplanen för grundläggningen säker och minimerar risken för förseningar. ML2 påpekar dock att detta gäller endast om djupet till berg verkligen stämmer då pålarna är måttbeställda på decimetern. Även LEL menar att det blir dyrt om grundförutsättningarna med djup till berg och bergets kvalitet inte stämmer med vad man tänkt sig. HE och MR menar att en nackdel kan vara att det är mer känsligt om man misslyckas om man bara har en stor borrade stålrörspåle mot om man har många små som är fallet vid konventionell grundläggning. ML2 menar dock att man kan rädda ett grovt borrad stålrör genom att sätta en stålkärna inuti.

Kontroll av svetsen vid skarvning, se avsnitt 3.1, nämner GH, TL, PJ och MR som problematiskt ur produktionssynpunkt. Enligt PA gäller det att ha ett flertal pålar som kan borraras under tiden som svetsen svalnar för att undvika stillestånd.

## 5.4 Miljö

När frågor kring miljö behandlades var de flesta osäkra och svaren ska ses som resonemang och antaganden mer än fakta som baseras på undersökningar.

JB och PA menar att den kortare produktionstiden bör leda till mindre dieselförbrukning. TL tror också att samma anledning gör att det blir mindre koldioxidutsläpp under produktionen. MR tror dock att mer diesel går åt om det är grova stålrörspålar som ska borraras, detta eftersom luften som pressas ned för att få upp jorden drivs av stora kompressorer. Samtidigt tror MR att mindre material går åt att bygga bron om pålen övergår till pelare, något som gör den totala miljöbelastningen svår att sja om. PJ instämmer i MR;s resonemang kring mindre materialanvändning.

ML2 menar att det vid borring i vattendrag gäller att ta hand om det material som borraras upp så föroreningar inte hamnar i vattnet. Samtidigt ger han ett exempel då han rekommenderat lösningen till en entreprenör som skulle göra stöd i ett vattendrag som inte fick störas överhuvudtaget.

Materialmässigt säger de flesta att inga tydliga resultat finns av vad som är bäst av betong- och stålrörspålar ur miljösynpunkt. ML1 menar dock att miljöcertifiering kommer börja användas på broar i Sverige inom kort och då kommer det ge en klarare bild av vilken metod som är minst miljöfarlig, sett både till material och produktionssätt.

## 5.5 Ekonomi

Alla som intervjuats är överens om att stålrörspålar är betydligt dyrare än slagna betongpålar per uppburet ton. De är också överens om att borrhade stålrörspålar är dyrare än slagna stålrörspålar per uppburet ton. GH är säker på att anledningen till att grova borrhade stålrörspålar inte använts vid fler tillfällen är att det funnits billigare alternativ.

ML2 tror dock att metoden med stålrörspålar som övergår till pelare är ekonomiskt lönsam bara de rätta geotekniska förutsättningarna finns, se avsnitt 5.1, och säger att han har svårt att se en kalkyl som skulle tala för något annat med tanke på de arbetsmoment, inklusive schakter, som undviks. HE menar att det faktum att finländarna använder metoden även när andra metoder är geotekniskt möjliga är bevis nog för att det kan vara ekonomiskt lönsam. Många säger att djupet till berg är en ekonomiskt avgörande faktor. Samtidigt kan ingen ge några tydliga siffror på vilka djup som är ekonomiskt rimliga.

LEL och GJ är inne på att metoden med borrhade stålrörspålar som övergår till pelare bara använts ett fåtal gånger. De menar att om fler broar byggs kommer vanan öka och därmed blir det också billigare.

MR påstår att maskinerna är dyrare än för andra metoder. Detta är också TL inne på då han menar att etableringskostnaden kan bli stor då maskinerna är ovanliga. BB menar att detta kan göra tekniken oekonomisk främst på små broar med små spann. Han menar dock att utländska entreprenörer som har stora resurser för grova stålrör nu har etablerat sig i Sverige.

Angående ekonomin på de broar som faktiskt byggts med grova borrhade stålrörspålar säger PJ att ingen jämförande ekonomisk kalkyl gjorts på bron i Ljungby, men menar på att denna metod inte valts om det funnits andra metoder som gjort byggnationen billigare. Bron på Perstorpsvägen projekterades under förutsättningen att avstängningen skulle vara så kort som möjligt och därför gjordes ingen ekonomisk jämförelse. Under produktionens gång ändrades förutsättningarna och bron stängdes ändå av en längre tid. Om de nya förutsättningarna var kända från början är inte LEL säker på att metoden med borrhade stålrörspålar hade använts.

PA säger att stålpriset varierar mycket, något som kan göra det svårt att förutse kostnader. Han menar att betongpriset är mer stabilt.

## 5.6 Projektering

ML1, PA och TD påstår att en fördel med borrade stålrörspålar är att de kan konstrueras så att de kan ta draglaster. En annan sak som väger till grova stålrörspålar fördel menar HB och TD är att de klarar långa knäckningslängder och tar stora böjmoment. LEL framför att valet av dimension på pålen kan ha att göra med knäcklängden.

Flera av de intervjuade påtalar att tekniken är ny och att konstruktörer inte har vana att använda den. JB och ML1 menar liknande att kunskapsbrist hos de involverade kan vara en anledning till att inte fler broar byggts på detta sätt. Samtidigt menar PA att rent beräkningsmässigt är det inga större skillnader att räkna på borrade stålrörspålar mot andra påltyper. GJ som utförde beräkningar till Ljungbybron menar att dessa tog längre tid än motsvarande beräkningar för konventionella metoder. Anledningarna till detta var att det kändes nytt och beräkningarna skedde samtidigt som övergången till Eurokod.

Flera menar också att en anledning att fler broar inte byggts med grova borrade stålrörspålar är att beställaren har svårt att ta till sig ny teknik. TD som projekterade bron över Dyrån menar att stålrörspålar som övergår till pelare beräkningsmässigt hamnar i utkanten för vad som är godkänt i gällande normer, vilket gör det viktigt att de som kontrollerar är positivt inställda till att testa tekniken. ML1 som arbetar på Trafikverket menar att de är öppna för alla tekniker om de uppfyller de krav som ställs. Han menar också att Trafikverket försöker öppna upp för nya tekniska lösningar genom att arbeta allt mer med totalentreprenader där det ställs funktionskrav. Där funktionskrav ställs är det upp till varje budgivare att lämna anbud som uppfyller kraven utan att vara styrda av ett visst material eller teknik. Flera av de intervjuade menar också att övergången till nya regelverk kommer göra att vi får se fler nya tekniska lösningar likt den med grova borrade stålrörspålar till broar.

Flera framför att borrade pålar har en större precision än slagna pålar vilket är en fördel. Som pelare har då en grov borrad stålrörspåle högre precision än en slagen men mindre precision än ett separat brostöd, vilket gör att toleranserna måste vara större när det används enligt metoden där påle övergår till pelare, enligt GJ och ML1. HB skriver liknande att det kan vara svårt att uppnå tillräckligt snäva toleranser om till exempel sex pelare ska placeras i linje.

Många har påpekat problematiken kring korrosion på pålarna. PA och TL säger att i och runt vatten orsakar korrosion stora problem. TD och PJ, som projekterat broar där stålrörspålar står fritt i eller intill vatten, menar att det mesta av stålet måste räknas bort eftersom rostmånen räknas på pålens hela livslängd. PA menar dock att det inte är alltför svårt att skydda pålen från rost och säger att det kan göras med ett utanpåliggande plaströr där betong fylls mellan stålet och plasten. Det skulle i så fall också skydda mot eventuell is. Om stålet inte får räknas med alls fungerar pålen i teorin som en betongpåle och ingen samverkan mellan stål och betong räknas. Just utnyttjande av stål-betong i samverkan är något som kan göras bättre enligt HB. PA säger också att just samverkan kan vara besvärligt att räkna på och att det kan var svårt att få det godkänt.

PJ och MR menar att verifieringen av den geotekniska bärförmågan, som idag normalt görs med stötvågsmätning, är ett problem för grova borrarade stålrörspålar. PJ säger att så stora pålar är svåra att stötvågsmäta och ifrågasätter vad det egentligen ger. Han öppnar för möjligheten att göra som i Finland där prover på berget och sedan stoppslagning räcker som verifiering. HE anser att möjligheterna till att göra som i Finland finns och menar att stötvågsmätningen kan ersättas med simuleringar men påpekar att någon typ av slagning måste göras. Även MR menar att möjligheten till att slippa stötvågsmätningen kan finnas om en JB3 sondering görs i pålläget. PA anser att provslagning alltid bör göras för att kontrollera att man verkligen nått bärkraftigt berg. Han tror dock inte att det går att förenkla dagens kontrollmetoder så mycket mer. ML2 kan till viss del förstå att vi gör fler kontroller i Sverige än i Finland då vi har mer sedimentära bergarter. Ingen har sett statisk provbelastning som ett ekonomiskt hållbart alternativ.

Flertalet menar att metoden med en påle som övergår till pelare är en intressant metod och ser inga problem med tekniken i sig. ML2 ser metoden som ett tekniksprång.

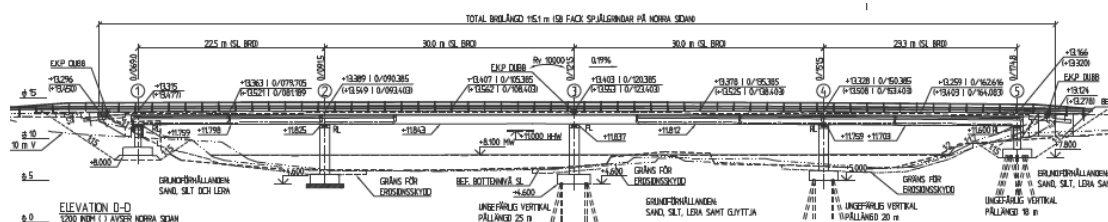
## 5.7 Övrigt

ML1 menar att metoden där stålröret övergår till pelare kan vara negativt ur estetisk synvinkel vilket kan tala mot användandet. HE tror också att tekniken sällan är tilltalande för en arkitekt. BB tycker dock att broarkitekten har för stor makt och är tveksam till att det finns estetiska nackdelar. LEL nämner att pålarna kan bli något sneda vid installationen och att denna lutning kan uppfattas som ett estetiskt problem. Detta problem kan lösas genom att gjuta på ett betongskal utanpå pålens synliga del. Han menar på att denna metod används i Finland och ger möjligheter till valfritt arkitektoniskt uttryck.

De flesta intervjuade tror att användandet av tekniken med grova borrarade stålrörspålar på broar kommer öka i framtiden. BB är inne på att alternativet med borrarade stålrörspålar alltid bör utredas.

## 6 Jämförelsekalkyl

Jämförelsen har gjorts på bron över Ätran i Vessigebro som färdigställdes 2010. Bron är byggd på fem stycken skivstöd, varav tre av stöden är pålade med betongpålar, se Figur 19 och bilaga 3.



Figur 19: Elevationsritning bro över Ätran i Vessigebro. De fem stöden är numrerade från vänster till höger (Olsson, 2010).

Överbyggnaden består av två stålbeams som ansluter till skivstöden genom varsitt lager. Jämförelsen är gjord under antagandet att varje skivstöd skulle kunna ersättas med två stycken stålrovspålar som via en tvärbalk skulle ansluta till lagren, en lösning mycket lik bron i Ljungby, se avsnitt 4.2.3.2. Överbyggnaden antas i jämförelsen vara oförändrad. Alla stålrovspålar antas borrade 1,5 m ned i berg. I beräkningen ingår inte kostnad för verifiering av den geotekniska bärförmågan av stålrovspålar. Beskrivning av vilka arbetsmoment som beräknats för varje stöd finns i bilaga 4. Förutsättningarna för de olika stöden i korthet:

- Stöd 1 är ett opålat stöd som står uppe på land. Djupet till berg är cirka 36 m från underkant bottenplatta vilket gör att stålrovspålar blir ungefär 40 m långa.
- Stöd 2 är ett opålat stöd stående i vatten. Djupet till berg är cirka 28 m från befintlig botten vilket gör att stålrovspålar blir ungefär 35 m långa.
- Stöds 3 är ett pålat stöd stående i vatten. Djupet till berg är cirka 28 m från befintlig botten vilket gör att stålrovspålar blir ungefär 35 m långa.
- Stöds 4 är ett pålat stöd stående i vatten. Djupet till berg är cirka 22 m från befintlig botten vilket gör att stålrovspålar blir ungefär 30 m långa.
- Stöd 5 är ett pålat stöd som står uppe på land. Djupet till berg är cirka 20 m från underkant bottenplatta vilket gör att stålrovspålar blir ungefär 25 m långa.

Stålrovspålar har precis som på Ljungbybron valts till 813 mm i diameter med godstjocklek 16 mm. Rören är fyllda med betong och 23 stycken längsgående armeringsjärn med 32 mm diameter. Genom jämförelse av laster och förhållanden med bron i Ljungby och vissa kontrollberäkningar, se bilaga 3, kan konstateras att den här utformningen förmodligen inte skulle vara dimensioneringsmässigt okej på samtliga stöd med nuvarande lagerutformning och beräkning av horisontella laster. Dock visar det att konstruktionen trots allt inte bör vara orimlig om vissa förändringar görs i hur de horisontella lasterna tas upp.

## 6.1 Samtliga stöd

Jämförelsen har här gjorts varje stöd för sig med verkliga förhållanden. Tabell 2 visar den kalkylerade kostnaden för varje stöd med nuvarande utformning och förslaget med grova borrade stålrörspålar.

**Tabell 2: Kostnader per stöd med de båda utformningarna. Positivt tal i differensen visar att nuvarande utformning blir billigare medan negativt tal visar att den alternativa utformningen blir billigare.**

Stödnummer	1	2	3	4	5
Nuvarande (kkr)	340	970	1 210	1 150	490
Grova borrade stålrörspålar (kkr)	1 390	1 210	1 200	1 040	920
<b>Differens (kkr)</b>	1 050	240	-10	-110	430

## 6.2 Stöd 4

Jämförelsen har här gjorts för endast stöd 4 med teoretiskt olika djup till berg. Tabell 3 visar den kalkylerade kostnaden för varje djup, mätt från underkant bottenplattan ned till den nivå betongpålarna antas sluta, med nuvarande utformning och förslaget med grova borrade stålrörspålar. Påldimensionerna har antagits vara oförändrade för båda utformningarna. Priserna för stålrörspålarna har tagits fram med nyckeltal per meter påle baserat på att samtliga pålar på hela bron har samma längd. Exempelvis innebär det att vid djupet 5 meter har priset beräknats på att samtliga stöd har djupet 5 meter. Meterpriset är högre för kortare pålar eftersom effekten av etableringskostnaden blir större. Meterpriset för betongpålarna är detsamma för samtliga djup då etableringskostnader redan är separerad från meterpriset. För ytterligare information hur kostnaderna beräknats se bilaga 4.

**Tabell 3: Kostnader med olika djup till berg. Positivt tal i differensen visar att nuvarande utformning blir billigare medan negativt tal visar att den alternativa utformningen blir billigare.**

Djup (m)	5	10	15	20
Nuvarande (kkr)	1 020	1 060	1 110	1 150
Grova borrade stålrörspålar (kkr)	650	780	910	1 050
<b>Differens (kkr)</b>	-370	-280	-200	-100



## 7 Diskussion

Diskussionen är indelad i tre delar där de två första diskuterar hur resultaten i de båda studierna kan värderas och den avslutande delen sammanställer hur författarna analyserat det sammantagna resultatet.

### 7.1 Intervjustudien

Intervjustudien, som baseras på 14 intervjuer där majoriteten gjorts personligen, syftade till att ta undersöka när grova borrhade stålrörspålar kan vara lämpligt som grundläggning för broar. Målsättningen var att intervjua personer som har kunskap och erfarenhet av grova borrhade stålrörspålar för broar och att få en bra blandning på intervjuobjekten mellan de olika intressenterna beställare, entreprenörer och konsulter. Problem med att hitta beställare med rätt erfarenhet gjorde att endast en sådan intervju utfördes, i övrigt anses att den önskade blandningen uppnåtts. Studien har också en relativt jämn fördelning mellan personer som främst arbetar med geoteknik eller med brokonstruktion.

Ett problem med ämnet är att grova borrhade stålrörspålar på broar har flera infallsvinklar när det gäller jämförelse. Till exempel skulle en föreslagen fördel med grova borrhade stålrörspålar på broar kunna vara en fördel som gäller:

1. Stålrörspåle istället för betongpåle.
2. Påle som är borrhade istället för slagen.
3. Grov påle istället för slank.
4. Metoden påle som övergår till pelare istället för bottenplatta och separat stöd.

Den här problematiken kan anses ge en viss osäkerhet i resultatet, dock har de intervjuade fått chansen att läsa igenom och godkänna det sammanställda resultatet vilket bör minska risken för feltolkningar.

### 7.2 Jämförelsekalkylen

Jämförelsekalkylen baseras på en bro byggd på traditionell grundläggning där ett förslag tagits fram av författarna med grova borrhade stålrörspålar. Som även nämns i resultatet är detta förslag baserat på grova förenklingar och tveksamheter finns om bron faktiskt skulle kunna utformas på detta sätt. Dels ur dimensioneringssynpunkt, de kontrollberäkningar som gjorts gäller endast kontroll av pålen i brotsgränstillstånd och detta går dessutom inte riktigt ihop i stöd tre med det nuvarande sättet att ta upp horisontallaster. Dels ur stabilitetssynpunkt, ingen byggd bro som författarna kommit över har varit på endast två stålrörspålar per stöd över så många spann. Detta kan bero på att konstruktionen då inte anses tillräckligt stabil med denna utformning.

I kalkylen saknas kostnaden för verifiering av den geotekniska bärförmågan för de borrhade stålrörspålarna. Å andra sidan har de beräknats med den högsta stålqualité som finns på marknaden samtidigt som stålet inte tillgodoräknas i dimensioneringen. Dessa tveksamheter gör att kalkylerna inte kan ses som en direkt jämförelse mellan vilken av utformningarna som är mest ekonomiskt lönsam. Däremot kan kalkylerna fortfarande ses som jämförelser mellan hur förhållanden som djup till berg, vatten,

schaktdjup och pålningsbehov påverkar den ekonomiska lönsamheten med grova borrarade stålörspålar. Det var också detta som var kalkylens huvudsakliga syfte.

### 7.3 Analys av resultatet

Först och främst har intervjustudien slagit fast att en förutsättning för att metoden med grova borrarade stålörspålar ska kunna användas är att bärkraftigt berg eller morän finns inom rimligt djup. Detta överensstämmer också med vad som framkommit i studerad litteratur. Dagens teknik tycks sätta stopp vid 40-50 meter. Dessutom går det inte att borra om metall finns i marken och även trä försvårar borrhningen.

När det gäller grova borrarade stålörspålar som traditionell pålning under bottenplatta så kan resultatet kortfattat beskrivas som att borrarade stålörspålar är en dyr metod, dyrare än de flesta grundläggningsmetoder. Den borrarade stålörspålen har fördelar när det gäller att ta sig ned i marken, minskad omgivningspåverkan, mindre störning och bättre precision. Den grova stålörspålen har förutom detta fördelen att den kan ta stora laster och moment. Situationer när metoden lämpar sig kan vara:

1. När de geotekniska förutsättningarna är svåra, som block i marken eller släntberg. Här kan det diskuteras om det är endast när det är omöjligt att slå pålar eller om det är redan när de geotekniska förhållandena gör det svårt att slå. Valet tycks vara en värdering mellan kalkylerad kostnad och säkerhet i kalkyl och tidsplan.
2. När det är viktigt med en så liten omgivningspåverkan som möjligt. Grova stålörspålar tycks dock ha mindre fördel än slanka både när det gäller risk för påverkan i marken, buller och storlek på maskinerna.

Sammantaget har intervjustudien visat ungefär samma faktorer för användningen av grova borrarade stålörspålar på broar som presenterades för borrarade stålörspålar i allmänhet i teoridelen i kapitel 3. Enda anledningen att välja grova istället för slanka pålar i dessa fall tycks vara att de klarar större laster. Grova borrarade stålör har som tidigare nämnt större omgivningspåverkan än slanka och skarvningen försvåras då det inte finns några skarvhylsor för grova stålörspålar. Detta gör det svårt att se många situationer på små och medelstora broar där grova borrarade stålörspålar skulle innebära det bästa alternativet. Detta styrks också med det faktum att, oss veterligen, inga broar har byggts med denna metod i Sverige. På större broar med långa spann finns det troligtvis fler situationer då de är lönsamma med argument som pålarnas förmåga att ta stora laster och moment. Det är dock oklart om detta gäller främst för den här typen av borrarade stålörspålar, troligtvis är det mer ett argument för användandet av någon typ av grävplålar där ännu större dimensioner kan användas.

Ses istället på metoden med grova borrarade stålörspålar där pålen fortsätter som pelare upp till brobanan ändras förutsättningarna. Med denna teknik har fördelar framkommit att vissa arbetsmoment kan undvikas så som schakt och eventuell tillhörande spont, formning och gjutning av bottenplatta, gjutning av separat brostöd och eventuell tätplatta. Eventuellt kan även andra arbetsmoment undvikas beroende på brotyp och yttre förutsättningar. Detta skulle också kunna innebära minskad materialanvändning, något som kan vara gynnsamt ekonomiskt och kanske också miljömässigt. Vissa åsikter menar att detta i sig skulle göra att många broar, speciellt de med stöd i vatten eller vid högt grundvatten, skulle bli billigare med metoden där

påle övergår till pelare. För detta argument talar NCC:s kalkyl på Dyrån, se avsnitt 4.2.3.5.

Här kan också resultatet från jämförelsekalkylen ge vissa indikationer. Vid stöd 1, där originalförslaget stod på land, inte hade några pålar, djupet till berg var stort (cirka 30 m) och ingen extra schakt behövde utföras, så var stålrörspålarna betydligt dyrare. Vid stöd 5, där förutsättningarna var de samma förutom att stödet var pålat och djupet till berg var något mindre så var stålrörspålarna fortfarande dyrare men med mindre differens. På stöd 3 och 4, som står i vatten och är pålade tillkommer stora kostnader för spont, vattensänkning och schakt och då blev stålrörspålar istället ett något billigare alternativ.

Resultatet av den andra jämförelsen visar att kostnaden för grundläggningen med stålrörspålarna varierar kraftigt med jorddjupet och att mindre djup ger högre lönsamhet för stålrörspålarna. Sammantaget visar jämförelserna att lönsamheten för metoden när en grov stålrörspåle som övergår till pelare påverkas av vilka moment som behöver utföras vid traditionell grundläggning; pålning, spont, schakt och tätplatta. Desto fler av dessa moment som behöver utföras desto större lönsamhet för alternativet med grova stålrörspålar. Dessutom gäller generellt desto mindre djup till berg desto större lönsamhet för alternativet med grova stålrörspålar, i alla fall så länge den traditionella grundläggningen behåller samma arbetsmoment som vid det större djupet. Med stöd av detta bör det i situationer där stöd står i vatten med litet avstånd till berg finnas situationer där grova borrade stålrörspålar är det produktionsmässigt billigaste alternativet även utan hänsyn till andra faktorer.

Det mest frekventa argumentet för varför grova borrade stålrörspålar som övergår till pelare skulle vara lönsam är annars att produktionstiden kan kortas ned. En kortare produktionstid är av intresse både för entreprenör och beställare. För entreprenören betyder detta lägre kostnader för arbetet. För beställaren innebär en kortare byggtid att bron kommer i bruk snabbare och eventuella trafikavstängningar kan kortas ned. Intervjustudien har dock visat på problem hur denna vinning ska kunna jämföras ekonomiskt då inga system tycks användas för att bedöma ekonomisk besparing vid förkortad avstängningstid av varken vägar eller järnvägar.

När det kommer till att låta pålen gå hela vägen upp till brobanan så finns som tidigare nämnt det undersökta alternativet att borra grova stålrörspålar eller att slå dem. Enighet råder om att slagning är en billigare metod än borrar per uppburet ton. Stålrörsleverantören Ruukki har tidigare angivit att när metoden används på små broar med totalt fyra stålrör så borrar stålrören om hinder finns i marken eller berget är kraftigt lutande, i annat fall väljs normalt slagning. Baserat på valet mellan borrade och slagna stålrörspålar på de broar som byggts och information som framkommit i intervjustudien verkar det dock finnas fler faktorer som gör att borrade kan vara att föredra. En faktor är den som avgjorde i bron över Perstorpsvägen där djupet mellan markytan och berg var för litet för att slagna stålrörspålar skulle kunna användas, borrade blev därmed enda alternativet. Liknande visar intervjustudien att det finns situationer där ett litet djup mellan markytan och berget och jordens egenskaper gör att en borrade påle blir beräkningsmässigt mer gynnsam än en slagen i samma situation eftersom den borrar in i berget.

En annan faktor är toleransen som avgjorde valet på bron i Ljungby, se avsnitt 4.2.3.2. Intervjustudien påtalar att en borrade stålrörspåle som används som pelare har en

svaghet i att den inte är lika precis i positionen som ett separat gjutet stöd. Ett exempel på detta är just Ljungbybron där toleranserna ställde till vissa besvär. I intervjustudien har också framkommit att vid ett stort antal pålar i rad är det svårt få alla i linje. Detta påtalar att begränsningen i hur stora broar som kan byggas med metoden där påle övergår till pelare ligger i just precisionen. Pålkommisionens rapport 104 nämner rakare borring som en utvecklingspotential, vilket skulle kunna ge större broar med fler stöd, men också högre lastkapacitet för varje enskild påle.

Samtidigt har studerad litteratur och intervjustudien visat att en borrade stålrörspåle har bättre precision än en slagna. Problemen som uppstod vid bron över Dyrån, se avsnitt 4.2.3.5, visar att det finns risker att använda slagna stålrörspålar även där markförhållandena upplevs som goda. Där markförhållanden är goda kan alltså valet mellan slagna eller borrade stålrörspålar ses som en avvägning mellan kalkylerad kostnad och säkerhet i utförandet. Slagna pålar blir billigare men medför större tekniska risker i utförandet medan borrade pålar kostar mer, men ger ett säkrare resultat. Eftersom fler pelare i samma stöd verkar kräva högre precision pekar resultatet på att desto större bro, i avseende på antal stöd och antal pelare per stöd, desto svårare blir det att konstruera en bro med slagna stålrör. På en bro med många pelare per stöd lämpar sig alltså borrade stålrörspålar bättre än slagna.

Ytterligare en situation som studien visat där borring är ensamt alternativ som grundläggning med stålrör är när förstärkning av redan existerande stöd utförs, som bron i Rydöbruk. Slagna stålrör tar sig inte igenom existerande brostöd och kan därför inte användas för detta ändamål. Studien antyder att borra igenom ett äldre stöd fungerar bra så länge inte stödet består av trä eller innehåller för mycket stål. Därför framstår grova borrade stålrörspålar som en bra metod för att förstärka äldre broar utan att behöva riva existerande stöd.

Ett problem som studien visat med alla typer av stålrör, borrade som slagna, är korrosion. Om röret står i eller i närheten av vatten måste en stor del av stålet räknas bort eftersom det på lång sikt beräknas rosta och tappa sin bärförmåga. Metoden där man låter pålen övergå till pelare har många av sina fördelar just i dessa miljöer, där vattnet gör det svårt att gjuta platta och stöd. Enligt studien har dock stålet i dessa förhållanden hittills i Sverige alltid räknats bort och endast betongen och armeringen har räknats som bärande. När metoden med stålrör väljs som grundläggning står rören för en stor kostnad och att inte använda dessa till mer än kvarsittande form känns som ett slöseri med resurser. Under intervjustudien har det framkommit att det kan finnas lösningar för att skydda den mest utsatta delen, den som ligger i skvalpzonen. En lösning som diskuterats är ett foderrör av plast som sätts utanpå pålen innan betong injekteras i mellanrummet mellan plast och stålrör. Att korrosion är ett problem är alla överens om men att ingen skyddsmetod ännu provats i Sverige visar på att ingen lösning blivit helt accepterad än. För att göra stålrörspålar som övergår till pelare mer konkurrenskraftiga ekonomiskt och för att metoden ska kännas resurseffektiv är intrycket att korrosionsfrågan behöver lösas så att stålets bärförmåga kan tillgodoräknas under alla förutsättningar. Om istället nuvarande situation kvarstår på längre sikt känns en utveckling av grävplålar, se kapitel 3, med metoden påle som övergår till pelare som ett intressant alternativ då stålet där kan tas bort. Dock kräver det att tekniken för grävplålar utvecklas till att kunna ta sig ned i berg.

Något som vållat till diskussion under intervjuerna är hur kontrollen av den geotekniska bärförmågan ska kontrolleras när pålarna är installerade. Idag verkar

uteslutande dynamisk provning väljas då statisk provning är allt för omständligt. Frågetecken tycks finnas vad det är den dynamiska provningen faktiskt visar på de grövre pålarna. Det framgår också att en betongfylld stålrörspåle med godstjocklek över ett visst värde inte ens kan stötvågs mätas. Det är därför tveksamt om denna provning idag är accepterad som en bra verifieringsmetod på de grova stålrörspålarna och om det verkligen är ekonomiskt försvarbart att tillämpa i alla situationer. I Finland, där grova borrade stålrörspålar på broar används mer frekvent än i Sverige, görs inte den här typen av kontroller, se avsnitt 3.1. Exempel har framkommit i litteratur och intervjustudien där pålarna har sjunkit väldigt mycket vid kontrollslagningen. Förvisso finns ingen information om hur noggranna mätningar som var gjorda på berget i dessa fall men det talar ändå starkt emot att göra som i Finland.

Av intervjustudien att döma är det mycket svårt att se några tydliga för- och nackdelar med borrade stålrörspålar gentemot andra grundläggningstekniker när miljöbelastning ska beaktas. De intervjuade byggde sina åsikter på antaganden och resonemang kring produktionstid och materialanvändning men alla var försiktiga att sätta någon teknik före någon annan. Att inga noggrannare undersökningar kring vilken miljöbelastning olika grundläggningmaterial och tekniker för med sig kan ses som lite överraskande, men samtidigt är det sällan detta påverkar vilket val av material och metod som väljs. Förhoppningsvis kommer miljömedvetenheten öka i samband med att certifieringssystem börjar tillämpas för infrastruktur- och anläggningsprojekt. Därigenom kommer troligtvis också oberoende undersökningar göras som ger bättre information om grova borrade stålrörspålars miljöpåverkan i jämförelse med andra metoder.

I studien har vissa åsikter framkommit att metoden med stålrörspåle som övergår till pelare inte skulle vara estetiskt tilltalande och illa omtyckt av landskapsarkitekter. Det faktum att pålarna inte är estetiskt särskilt olik en vanlig pelare och att det finns sätt att visuellt lösa problemet att pelarna lutar skulle kunna tala för att detta inte borde vara något problem. Å andra sidan är varken författarna eller någon av de intervjuade några landskapsarkitekter så detta är en fråga som kan anses ligga utanför rapportens område.

För att sammanfatta diskussionen om när metoden med borrade stålrörspålar kan lämpa sig kan sägas att vilken bro och grundläggningsteknik som väljs allt som oftast verkar landa i vilken bro som är mest ekonomiskt lönsam att bygga. Eftersom alla intervjuade är överens om att grova borrade stålrörspålar är dyrare per uppburet ton än andra grundläggningsmetoder är andra gynnsamma faktorer nödvändiga. Det kan vara besvärliga grundförhållanden eller yttre omständigheter som omöjliggör andra metoder eller åtminstone gör dem så osäkra att utföra att grova borrade stålrörspålar används för att minska de ekonomiska riskerna i projektet. Det kan också vara att utformningen på bron, likt den där pålen övergår till pelare, ger en fördel genom förenklad byggnation eller kortad produktionstid som kan ge en lägre kostnad.

## 8 Slutsats

Rapporten visar att grova borrade stålrörspålar på broar kan användas i ett flertal situationer men också att förutsättningarna för olika broar gör det svårt att säga generellt när det blir lönsamt.

Ett krav för att ens överväga grova borrade stålrörspålar är att bärkraftigt berg finns inom rimligt avstånd, absolut inte mer än 40-50 meter, förmodligen mindre. På små och medelstora broar är grova borrade stålrörspålar främst lönsam med tekniken där pålen övergår till pelare och fortsätter hela vägen upp till brobanan. Situationer när den då skulle kunna vara lönsam är:

- Det förenklade utförandet av brostöden gör att produktionstiden kortas ned och de yttre omständigheterna, till exempel trafikavstängningar, är sådana att en kortare produktionstid är gynnsamt.
- Det förenklade utförandet av grundläggning och brostöd minskar kostnader och risker i produktionen, till exempel vid stöd i vattendrag, så mycket att en grundläggning med grova borrade stålrörspålar är gynnsam.
- Geotekniska förutsättningar, så som block i marken, eller yttre förutsättningar så som gamla brostöd som ska bevaras eller känsliga närliggande konstruktioner, gör att grova borrade stålrörspålar blir det enda rimliga alternativet.

Andra speciella omständigheter då tekniken påle som övergår till pelare kan vara lönsam finns också men de hör mestadels ihop med dessa tre situationer. En kombination av dessa situationer ökar sannolikheten att det totalt sett är lönsamt att välja grova borrade stålrörspålar. Djupet till berg påverkar lönsamheten där mindre djup ger generellt en större fördel. Lönsamheten påverkas dock av vilken grundläggning som är alternativet vilket gör att inga direkta slutsatser kan göras angående vilket som är optimalt djup till berg. Lönsamheten ökar desto fler stöd bron innehåller då detta minskar effekterna av den stora etableringskostnad som finns för grova borrade stålrörspålar idag. Samtidigt sätter dagens teknik stopp för att göra alltför stora spännvidder på grund av begränsningar i storleken på rör som kan borraras och den precision de kan borraras med.

På stora broar kan möjligtvis grova borrade stålrörspålar utförd som en traditionell påle vara ett alternativ, detta på grund av att varje påle kan ta stora laster och stora böjmoment som då förekommer. Om de geotekniska förutsättningarna försvårar installation av andra typer av grova pålar skulle grova borrade stålrörspålar kunna vara det lönsammaste alternativet. Studien har dock begränsad täckning för denna slutsats.

Rapporten visar ett antal områden med utvecklingspotential som möjliggör fler situationer då grova borrade stålrörspålar kan lämpa sig:

- Tekniskt kan borrarutrustningen utvecklas så att rör med större diameter kan borraras och med högre precision. På så sätt kan större broar konstrueras med metoden påle som övergår till pelare. Dimensioneringen skulle då kunna optimeras eftersom mindre avvikelser behöver beräknas.
- Bättre anpassade metoder för verifiering av den geotekniska bärförmågan kan utvecklas. Ingen mätmetod som finns idag verkar vara optimerad för grova stålrörspålar. Med en mätmetod som alla anser som pålitlig och effektiv skulle borrade stålrörspålar förmodligen ha lättare att få acceptans och upplevas som säkrare.
- Dimensioneringen med avseende på korrosion och samverkan mellan stål och betong kan förbättras. Idag tillgodoräknas sällan stålet, dels på grund av att det i utsatta miljöer riskerar att helt rosta bort, dels för att samverkan är komplicerat att få igenom. Detta kan ses som ett resursslöseri. Om en accepterad metod att skydda stålet i de mest utsatta miljöerna tas fram och metoderna för att beräkna samverkan förenklades skulle påldimensionen kunna optimeras och grova borrade stålrörspålar skulle kunna bli mer lönsamt.

## Referenser

- Berggren, B. (1992) *Grävpålar*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning.
- Bredenberg, H. (1991) *Bro C339 över Ekolsundsviken Grundläggning på stålrörspålar*. Linköping: Pålkommisionen. (Pålkommisionen rapport: 87).
- Bredenberg, H. (2000) *Stålkärnepålar Anvisningar för projektering, dimensionering utförande och kontroll*. Linköping: Pålkommisionen. (Pålkommisionen rapport 97).
- Bredenberg, H. Berglars, B. Rankka W. Holmberg, G. Eronen, S. Jokiniemi, H. (2010) *Borrade stålrörspålar*. Linköping: Pålkommisionen. (Pålkommisionen rapport: 104).
- Bäck, J. (2011) Presentation: *Projekt Kiruna*. 2011-06-01.  
<http://www.ruukki.se/~media/Sweden/Files/Infra/Stalpaledagen%202011/Ruukki-Projekt-Kiruna-stalpaledagen-2011.pdf> (2013-05-10).
- Darholm, T. (2011) Presentation: *Dyrån, en dynamisk jvg bro*. 2011-04-13.  
<http://www.ruukki.se/~media/Sweden/Files/Infra/GrundlaggarOnsdag%20april%202011/Ruukki-Dyran-en-dynamisk-jvgbro-GrundlaggarOnsdag-april-2011.pdf> (2013-05-21).
- Finnish Road Administration. (2003) *Instructions for drilled piling*. Helsingfors: FINNRA.
- Kalleny, S. (2012) Premiär för finskt brobygge i Sverige. *Betong*. 2012-11-12.  
<http://www.betong.se/?p=6159> (2013-02-04).
- Lundberg, J. (2012) Snabbare och 40% billigare. *Trafikverket*. 2012-02-13.  
<http://www.trafikverket.se/Foretag/Bygga-och-underhalla/Branschsamarbete/Fornyelse-i-anlaggningsbranschen-FIA/Goda-exempel1/Struktur-Goda-exempel/Snabbare-och-40--billigare/> (2013-05-10).
- Lundenberg, L E. (2011) Presentation: *Projekt Perstorpsvägen*. 2011-05-26.  
<http://www.ruukki.se/~media/Sweden/Files/Infra/Stalpaledagen%202011/Ruukki-Projekt-Perstorpsvagen-stalpaledagen-2011.pdf> (2013-05-13).
- Nilsson, A och Torén, K. (2003) *Grundläggningsmetoder för mindre broar – en teknisk och ekonomisk studie* Luleå: Luleå Tekniska Universitet (Examensarbete inom institutionen för Väg- och vattenbyggnad, Avdelningen för Geoteknik)
- Pålkommisionen. (2012) *Pålstatistik för Sverige 2011*. Linköping: Pålkommisionen. (Pålkommisionen information 2012:1).
- Ronnebrant, R. Glans, L-Å. (1996) *Broprojektering – En handbok*. Borlänge: Enheten för statlig väghållning.
- Ruukki. (2011) *Modern grundläggning*. Mars 2011.  
[http://www.ruukki.se/~media/Sweden/Files/Infra/Ruukki\\_Modern-grundlaggning\\_Magasin.ashx](http://www.ruukki.se/~media/Sweden/Files/Infra/Ruukki_Modern-grundlaggning_Magasin.ashx) (2013-05-10).



Shiltagh, S. (2010) *Grävpålar*. Lund: Lunds tekniska högskola (Examensarbete inom avdelningen för byggnadsmekanik).

Svenska betongföreningen. (2010) *Svenska betongföreningens handbok till Eurokod 2*. Stockholm: Svenska betongföreningen (Vol 1, kap X4.3)

Trafikverket. (2011) *Tekniskt PM Bro, tillhörande arbetsplan för väg 687 Sofieslätt-Rydöbruk* Halmstad: Trafikverket.

## Muntliga källor

Alheid, P. Intervju 2013-03-12.

Berggren, B. Svar på intervjufrågor via mail 2013-04-23.

Blomdahl, J. Intervju 2013-02-20.

Bredenberg, H. Svar på intervjufrågor via mail 2013-04-21.

Darholm, T. Intervju 2013-04-11.

Eriksson, H. Intervju 2013-04-18.

Holmberg, G. Intervju 2013-03-06.

Johansson, P. Intervju 2013-03-11.

Lanninge, M. Intervju 2013-02-21.

Larsson, M. Intervju 2013-04-12.

Larsson, T. Intervju 2013-03-08.

Lundenberg, L E. Intervju 2013-04-18.

Páll Jónsson, G. Telefonintervju 2013-04-10.

Ruin, M. Intervju 2013-04-19.

## Figurkällor

Bredenberg, H. (1991) *Bro C339 över Ekolsundsviken Grundläggning på stålrörspålar*. Linköping: Pålkommisionen. (Pålkommisionen rapport: 87).

Bredenberg, H. Berglars, B. Rankka W. Holmberg, G. Eronen, S. Jokiniemi, H. (2010) *Borrade stålrörspålar*. Linköping: Pålkommisionen. (Pålkommisionen rapport: 104).

Bäck, J. (2011) Presentation: *Projekt Kiruna*. 2011-06-01.  
<http://www.ruukki.se/~media/Sweden/Files/Infra/Stalpaledagen%202011/Ruukki-Projekt-Kiruna-stalpaledagen-2011.pdf> (2013-05-10).

- Björnström, G. (2011) Ritningar bro över Lagan i Ljungby. 2011-10-07.
- Björnström, G. (2012) Ritning bro i Rydöbruk. 2012-01-02.
- Darholm, T. (2011) Presentation: *Dyrån, en dynamisk jvg bro*. 2011-04-13.  
<http://www.ruukki.se/~media/Sweden/Files/Infra/GrundlaggarOnsdag%20april%202011/Ruukki-Dyran-en-dynamisk-jvgbro-GrundlaggarOnsdag-april-2011.pdf>  
(2013-05-21).
- Finnish Road Administration. (2003) *Instructions for drilled piling*. Helsingfors: FINNRA.
- Fridholm, A. (2013) Presentation: *Bro 7-709-1 över Lagan Söderleden i Ljungby*. 2013-01-31.  
<http://www.ruukki.se/~media/Sweden/Files/Infra/Stalpaledagen%202013/3%20Bro%20i%20Ljungby.pdf> (2013-05-23).
- Lundenberg, L E. (2011) Presentation: *Projekt Perstorpsvägen*. 2011-05-26.  
<http://www.ruukki.se/~media/Sweden/Files/Infra/Stalpaledagen%202011/Ruukki-Projekt-Perstorpsvagen-stalpaledagen-2011.pdf> (2013-05-13).
- Olsson, R (2010) Ritning bro över Ätran i Vessigebro. 2010-11-08.
- Ruukki. (2011) *Modern grundläggning*. Mars 2011.  
[http://www.ruukki.se/~media/Sweden/Files/Infra/Ruukki\\_Modern-grundlaggning\\_Magasin.ashx](http://www.ruukki.se/~media/Sweden/Files/Infra/Ruukki_Modern-grundlaggning_Magasin.ashx) (2013-05-10).
- Sarvell, F. (2013) Presentation: *Ruukki*. 2013-05-10.
- Styrud (2012) Bild från borring över Lagan i Ljungby.
- Styrud (2013) Bild borrad grundläggning.  
<http://www.styrud.se/tjanster/grundlaggning/entreprenad/> (2013-05-22).
- Vägverket (2008) *Teknisk beskrivning (TBb) Objektnummer 380206*. Göteborg: Vägverket. 2008-11-21.

# Bilagor

## Bilaga 1

### Frågor ställda på intervjuer via mail:

Vilken erfarenhet har du från grova borrade stålrörspålar på broar?

Vad är din reflektion kring dessa broar? Vad gjordes bra, vad kunde ha gjorts bättre?

Vad avgör valet mellan följande pålalternativ på broar:

Betongpålar eller stålrörspålar?

Slanka eller grova stålrörspålar?

Slagna eller borrade stålrörspålar?

Hur ser du på metoden med påle som övergår till pelare och fortsätter upp till brobanan? För- och nackdelar?

Finns det som du vet några kostnadsjämförelser mellan borrade stålrörspålar och konventionella pålar på broar?

Vad ser du för fördelar/nackdelar med grova borrade stålrörspålar som grundläggningsmetod vid brobyggande?

I vilka situationer tycker du att man bör överväga grova borrade stålrörspålar som grundläggningsteknik på broar? Med hänsyn till faktorer som brotyper, geotekniska förhållanden, yttre förhållanden, produktionstid, miljö osv.

Varför tror du att inte fler broar byggs på detta sätt i Sverige?

## Bilaga 2

### Rimlighetskontroll alternativ utformning med stålrörspålar

För att kontrollera att det på bron i Vessigebro går att byta ut de skivstöd som idag bär brobanan till stålrörspålar har enklare kontrollberäkningar gjorts på stålrörspålarna i brottsgränstillstånd.

Beräkningar har gjorts på stöd 4, samma stöd där en jämförelse mellan olika djup görs. De laster som används, horisontella och vertikala, kommer från de ritningar där lagerkrafter redovisas. Med nuvarande utformning av lager tas de största horisontella lasterna i mittenstödet, stöd 3. Om bron ska vara möjlig att konstruera enligt den beräkningsmodellen vi använt behöver detta förändras. Det kan göras dels med en annan utformning av lager där de horisontella lasterna delas på flera stöd, dels genom att ändskärmarna tar större horisontella laster. Görs en översiktlig bild av lagerlasterna på bron i Vessigebro och den bro i Ljungby som är byggd på stålrörspålar visar det att de totalt sett är likvärdiga, enda skillnaden att horisontallasterna är mer jämnt fördelade på Ljungbybron. Därmed bör ett byte till stålrörspålar inte vara orimligt på bron i Vessigebro med en annan utformning av lager eller andra beräkningsmetoder för att ta upp horisontella laster.

För att utföra dessa enklare kontrollberäkningar har hjälp fåtts av Claes Alén, Chalmers, som använt en mathcad-fil med beräkningar enligt Pålkommisionens rapport 101, Transversalbelastade pålar. Med hjälp av denna fil har maxmoment, djup till maxmoment och utböjning fåtts fram enligt nedan:

Huvudsakliga indata:

Jordens skjuvhållfasthet:  $c_{uk} = 100kPa$

Laster:  $H_x = 423kN$

$$H_y = 329kN$$

$$V = 8462kN$$

$$N_{pål} = 2$$

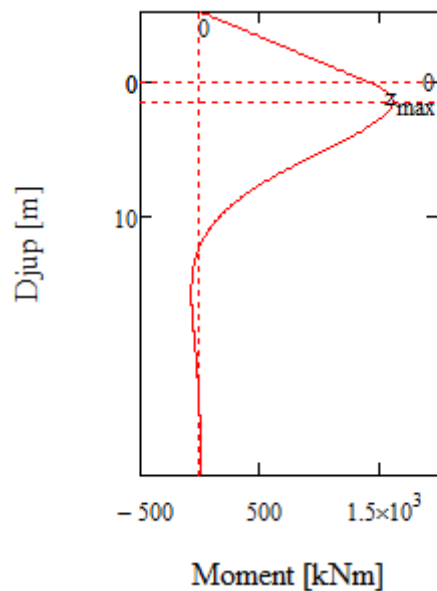
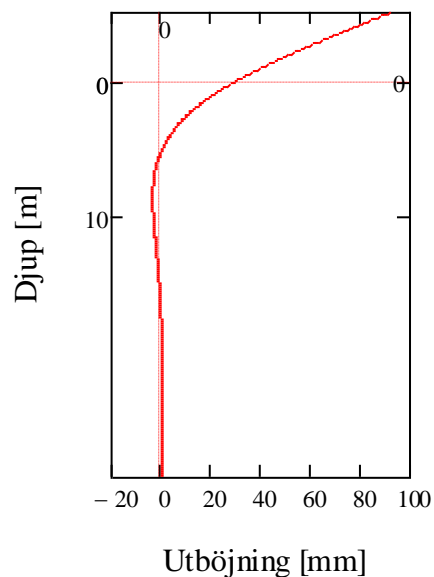
$$F_x = \frac{1}{N_{pål}} \cdot \sqrt{H_x^2 + H_y^2} = 267,9kN$$

$$N = \frac{V}{N_{pål}} = 4200kN$$

Pållängd:  $L = 29,5m$

Fri pållängd:  $H = 5,2m$

Diagram för utböjning och moment:



$$M_{max} = 1608kNm$$

$$Z_{max} = 1,5m$$

Kontroll av tvärsnittets kapacitet görs enligt Svenska betongföreningens handbok till Eurokod 2 Vol. 1, kapitel X4.3.

$$\frac{t}{h} = \frac{0,05}{0,781} = 0,0640$$

t=Avstånd armering till ytterkant

h=Betongtvärsnittets diameter

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{0,0185 \cdot 435 \cdot 10^6}{0,460 \cdot 33,3 \cdot 10^6} = 0,524$$

$$m = \frac{M}{h \cdot A_c \cdot f_{cd}} = \frac{1608 \cdot 10^3}{0,781 \cdot 0,460 \cdot 33,3 \cdot 10^6} = 0,134$$

$$n = \frac{N}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{4200 \cdot 10^3}{0,460 \cdot 33,3 \cdot 10^6} = 0,274$$

Enligt interaktionsdiagram för cirkulärt tvärsnitt sidan 2-59 gäller:

$$m \leq 0,22 \text{ för } n = 0,274 \quad \text{OK!}$$

Eftersom beräkningarna i Mathcad inte är våra egna gör vi vår egen handberäkning baserat på den modell som användes på bron i Ljungby, se Figur 20:

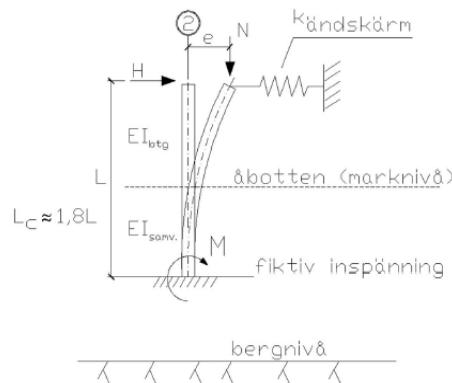
Normalkraftskapacitet:  
(endast armerad betong)

Momentkapacitet  
(samverkanstvårsnitt SS-EN  
1994-1-1 kap 6.7)

- Horisontella krafter,  $M_h = H \cdot L$
- Excentrisk normalkraft,  $M_v = N \cdot e$

(antaget  
 $e = 100 + 35 = 135 \text{ mm}$ )

- + förstörningsfaktor mht. andra ordningens moment pga. relativt slanka pälår.



Figur 20: Beräkningsprincip på bro i Ljungby (Fridholm, 2013).

Pelartvårsnitt ska dimensioneras för samtidigt böjande moment  $M_{ED}$  och normalkraften  $N_{ED}$  så att följande villkor uppfylls.

$$M_{Rd} \geq M_{Ed} \quad \text{dock minst} \quad M_{Rd} \geq N_{Ed} \cdot e_0$$

$N_{Ed}$  = tryckande normalkraft (lasteffekt), dimensioneringsvärde i brottgränstillstånd

$M_{Ed}$  = dimensionerande moment i brottgränstillstånd bestämd med hänsyn till andra ordningens effekter

$M_{Rd}$  = tvärsnittets momentkapacitet med  $N_{ED}$  placerad i tvärsnittets centrum

$e_{min}$  = minsta excentricitet

Pålens momentkapacitet:

Horisontella krafter:  $M_H = F_x \cdot L$

Excentrisk normalkraft:  $M_V = N \cdot e$

$$\text{Antaget } e = 100\text{mm} + 35\text{mm}$$

Antaget  $e$  görs efter samma modell som användes vid Ljungbybron, se Figur 20.

Pållängd:  $L = 5,2 + 1,5 = 6,7\text{m}$

L från påltopp till maxmoment enligt mathcadberäkning.

$$M_H = 267,9 \cdot 6,7 = 1795 \text{ kNm}$$

$$M_V = 4200 \cdot 0,135 = 567 \text{ kNm}$$

Första ordningens moment:  $M_{0Ed} = 1795 + 567 = 2362 \text{ kNm}$

Knäcklängd:  $L_c \approx 1,8L \approx 1,8 \cdot 6,7 \approx 12,06 \text{ m}$

Antagen knäcklängd  $L_c$  görs efter samma modell som användes vid Ljungbybron, se Figur 20.

För att kunna beräkna teoretisk knäcklast och senare dimensionerande moment av andra ordningen tas pålens böjstyvhet,  $EI$ , fram. Böjstyvheten skiljer sig ovan och under mark enligt Figur 20. Beräkningarna görs på samma påltyp som bron i Ljungby, det vill säga stålrör med diameter 813 mm och 16 mm godstjocklek. Armeringen består av 23 armeringsstänger med diameter 32 mm.

Betong: C 50/60.

$$EI_{btg} = \frac{k_1 \cdot k_2}{1 + \varphi_{ef}} \cdot E_{cd} I_c + E_s I_s$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20}} = \sqrt{\frac{50}{20}} = 1,58$$

$$k_2 = \frac{N_{Ed}}{f_{cd} A_c} \cdot \frac{\lambda}{170} = \frac{4200 \cdot 10^3}{33,3 \cdot 10^6 \cdot 0,460} \cdot \frac{60,6}{170} = 0,0975$$

$$\lambda = \frac{L_c}{i} = \frac{12,06}{0,199} = 60,6$$

$$i = \sqrt{\frac{I_c}{A_c}} = \sqrt{\frac{0,0183}{0,460}} = 0,199$$

$$I_c = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot 0,781^4}{64} = 0,0183$$

$$\varphi_{ef} = 1,2 \quad \text{Uppskattat värde}$$

$$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{1,2} = \frac{37 \cdot 10^9}{1,2} = 33,3 \cdot 10^9$$

$$E_{cm} = 37 \text{ GPa} = \text{Betongens elasticitetsmodul}$$

$$E_s = 200 \text{ GPa} = \text{Stålet elasticitetsmodul}$$

$$I_s = A_s \cdot \left(\frac{d}{2} - x_{tp}\right)^2 \cdot n = 8,038 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{0,781}{2} - 0,05\right)^2 \cdot 23$$

$$= 1,85 \cdot 10^{-3}$$

$$\left(\frac{d}{2} - x_{tp}\right) = 0,3405 = \text{avstånd mellan armeringens tyngdpunkt och tvärsnittets tyngdpunkt}$$

$$n = 23 = \text{antal armeringsstänger}$$

$$EI_{btg} = \frac{1,58 \cdot 0,0975}{1 + 1,2} \cdot 33,3 \cdot 10^9 \cdot 0,0183 + 200 \cdot 10^9 \cdot 1,85 \cdot 10^{-3} = 4,68 \cdot 10^8$$

$$EI_{sam} = E_a I_a + E_s I_s + K_e E_{cm} I_c \quad (\text{enligt formel 6.40 i SS-EN 1994-1-1:2005})$$

$$K_e = 0,6$$

$$E_a = 200 \text{ GPa}$$

$$I_a = \frac{\pi}{64} \cdot (\varnothing_y^4 - \varnothing_i^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (0,809^4 - 0,781^4) = 0,00276$$



$\emptyset_y = 0,809$  Stålrörets ytterdiameter efter korrosion

$\emptyset_y = 0,781$  Stålrörets innerdiameter

$$EI_{sam} = 200 \cdot 10^9 \cdot 0,00276 + 200 \cdot 10^9 \cdot 1,85 \cdot 10^{-3} + 0,6 \cdot 33,3 \cdot 10^9 \cdot 0,0183 \\ = 1,39 \cdot 10^9$$

Teoretisk knäcklast,  $N_B$ :

$$N_B = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l_0^2}$$

$$N_{B,btg} = \frac{\pi^2 \cdot 4,68 \cdot 10^8}{12,06^2} = 31,7 \text{ MN}$$

$$N_{B,sam} = \frac{\pi^2 \cdot 1,39 \cdot 10^9}{12,06^2} = 94,0 \text{ MN}$$

$$N_{B,tot} = N_{B,btg} \cdot \frac{L_o}{L} + N_{B,sam} \cdot \frac{L_u}{L} = 31,7 \cdot 10^6 \cdot \frac{5,2}{6,7} + 94,0 \cdot 10^6 \cdot \frac{1,5}{6,7} = 45,7 \text{ MN}$$

$L_o$  = Längd ovan mark

$L_u$  = Längd under mark

Dimensionerande moment,  $M_{ED}$ , med hänsyn till andra ordningens effekter:

$$M_{ED} = \left( 1 + \frac{\beta}{\frac{N_{B,tot}}{N_{Ed}} - 1} \right) M_{0Ed}$$

$\beta = 1,0$  Faktor som beror på krökningsfördelningen på grund av första och andra ordningens moment.

$$M_{ED} = \left( 1 + \frac{1,0}{\frac{45,7 \cdot 10^6}{4,2 \cdot 10^6} - 1} \right) \cdot 2,362 \cdot 10^6 = 2,60 \text{ MNm}$$

Återigen används tabeller ur Svenska betongföreningens handbok till Eurokod 2 Vol. 1, kapitel X4.3 för att kontrollera stålrörspälarnas bärförmåga:

$$m = \frac{M_{ED}}{h \cdot A_c \cdot f_{cd}} = \frac{2,60 \cdot 10^6}{0,781 \cdot 0,460 \cdot 33,3 \cdot 10^6} = 0,217$$

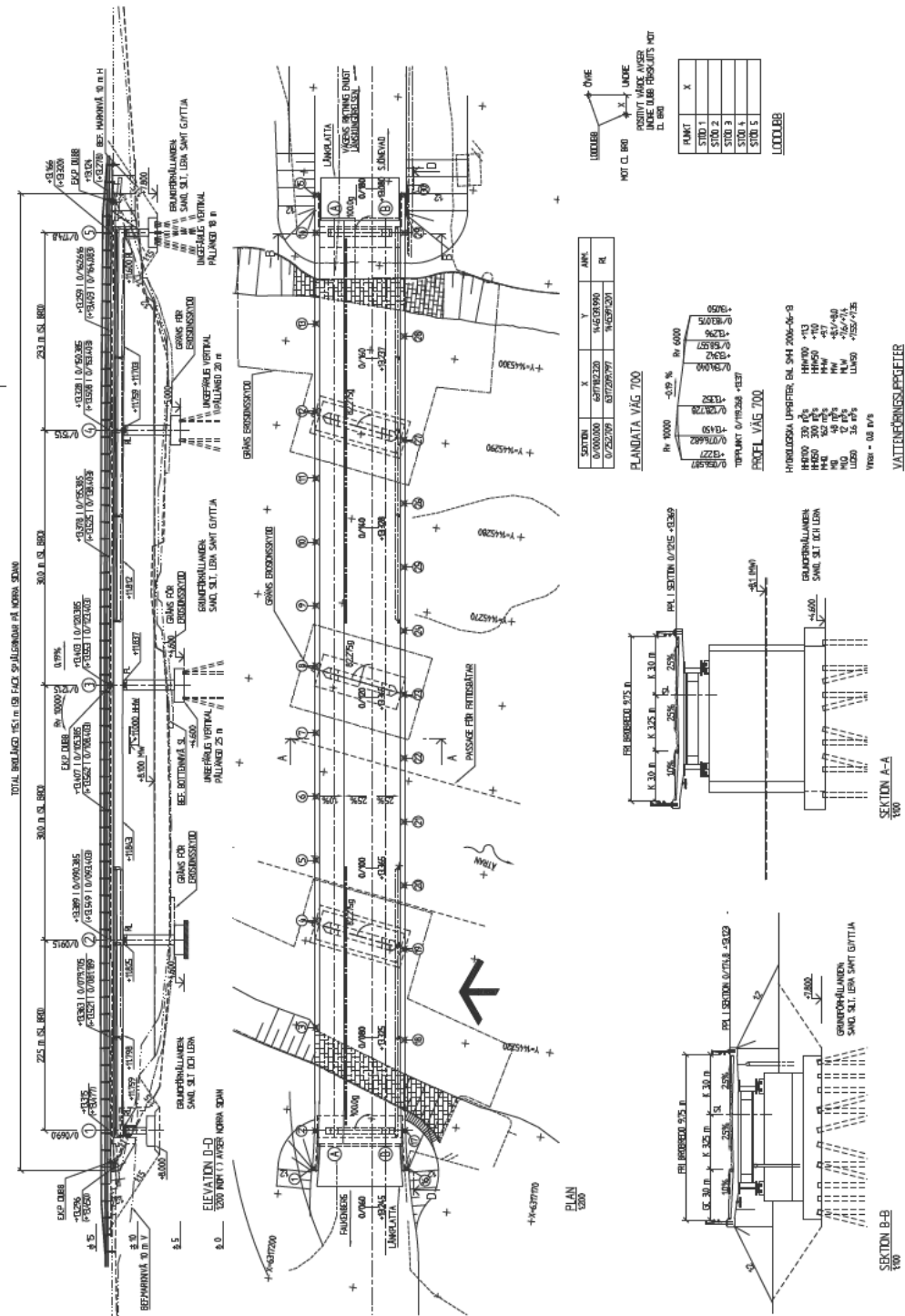
$$n = \frac{N}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{4200 \cdot 10^3}{0,460 \cdot 33,3 \cdot 10^6} = 0,274$$

Enligt interaktionsdiagram för cirkulärt tvärsnitt sidan 2-59 gäller:

$$m \leq 0,22 \text{ för } n = 0,274 \quad \text{OK!}$$

# Bilaga 3

## Bygghandlingar från bro över Ätran i Vessigebro



Figur 21: Sammanställning (Olsson, 2010)

Tabell 4: Markförhållanden (Vägverket, 2008).

Jordart	Stöd 1	Stöd 2	Stöd 3	Hållfasthet	Deformation	Tunghet
Bank-fyllning	+13,0 +11,0	-	-	$\varphi'_k = 37^\circ$ $\gamma_m = 1,2$	$E_k = 40 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 12 \text{ kN/m}^3$
saf Le	+11,0 +9,8	-	-	$c_{uk} = 90 \text{ kPa}$ $\gamma_m = 1,6$	$M_{ok} = 35 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$
gr Sa	+9,8 +8,2	-	+6,4 +5,2	$\varphi'_k = 38^\circ$ $\gamma_m = 1,2$	$E_k = 40 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$
saf Le	+8,2 +2,5	+6,3 +3,4	+5,2 +3,6	$c_{uk} = 100 \text{ kPa}$ $\gamma_m = 1,6$	$M_{ok} = 40 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$
le Sa	+2,5 +0,0	+3,4 +0,0	+3,6 +1,0	$\varphi'_k = 34^\circ$ $\gamma_m = 1,2$	$E_k = 15 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$
Sa	+0,0 -3,0	+0,0 -3,0	+1,0 -2,0	$\varphi'_k = 38^\circ$ $\gamma_m = 1,2$	$E_k = 40 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$
Le	-3,0 -17,0	-3,0 -16,0	-2,0 -12,0	$c_{uk} = 110 \text{ kPa}$ $\gamma_m = 1,6$	$M_{ok} = 50 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$
Sa/ Morän	-17,0 -28,0	-16,0 -22,5	-12,0 -22,0	$\varphi'_k = 38^\circ$ $\gamma_m = 1,3$	$E_k = 40 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$
Berg	-28,0	-22,5	-22,0	-	-	-

Jordart	Stöd 4	Stöd 5	Hållfasthet	Deformation	Tunghet
Bank-fyllning	-	+13,0 +10,0	$\varphi'_k = 37^\circ$ $\gamma_m = 1,2$	$E_k = 40 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 12 \text{ kN/m}^3$
mu Sa	+6,5 +6,1	-	$\varphi'_k = 32^\circ$ $\gamma_m = 1,3$	$E_k = 10 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 12 \text{ kN/m}^3$
si Le	-	+10,0 +7,8	$c_{uk} = 25 \text{ kPa}$ $\gamma_m = 1,6$	-	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$
Gy. gy Si. gyLe	-	+7,8 +5,0	$c_{uk} = 31 \text{ kPa}$ $\gamma_m = 1,6$	-	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$
gr Sa	+6,1 +5,0	-	$\varphi'_k = 38^\circ$ $\gamma_m = 1,3$	$E_k = 40 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$
saf Le	+5,0 +3,6	-	$c_{uk} = 100 \text{ kPa}$ $\gamma_m = 1,6$	$M_{ok} = 40 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$
sa le Si	-	+5,0 +3,0	$\varphi'_k = 32^\circ$ $\gamma_m = 1,2$	$E_k = 15 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$
le Sa	+3,6 +1,5	+3,0 +1,0	$\varphi'_k = 34^\circ$ $\gamma_m = 1,2$	$E_k = 15 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$
Sa	+1,5 -2,0	-	$\varphi'_k = 38^\circ$ $\gamma_m = 1,2$	$E_k = 40 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$
Le	-2,0 -12,0	+1,0 -7,0	$c_{uk} = 110 \text{ kPa}$ $\gamma_m = 1,6$	$M_{ok} = 50 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$
Sa/ Morän	-12,0 -17,0	-7,0 -13,0	$\varphi'_k = 38^\circ$ $\gamma_m = 1,3$	$E_k = 40 \text{ MPa}$ $\gamma_m = 1,4$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$
Berg	-17,0	-13,0	-	-	-

## **Bilaga 4**

### **Jämförelsekalkyl**

Nedan redovisas kostnad för de arbetsmoment som antas skilja sig mellan de två förslagen.

#### **Kalkyl 1, samtliga stöd verkligt förhållande:**

##### **Stöd 1**

Eftersom det är svårbedömt vilken del av schakten som varit nödvändig för övriga brokonstruktionen om inget separat brostöd gjutits så bortses denna från kalkylen.

Kostnad nuvarande konstruktion, inkluderar totalkostnad för tätplatta, bottenplatta och skivstöd: Total kostnad=340 000 kr

Kostnad nytt förslag, inkluderar 2 st stålrörspålar 40,5 m/st med betong, armering och rostskyddsmålning och en tvärbalk: Total kostnad=1 390 000 kr

##### **Stöd 2**

Kostnad nuvarande konstruktion, inkluderar totalkostnad för grundvattensänkning, spont, schakt, tätplatta, bottenplatta och skivstöd: Total kostnad=970 000 kr

Kostnad nytt förslag, inkluderar 2 st stålrörspålar 35 m/st med betong, armering och rostskyddsmålning och en tvärbalk: Total kostnad=1 210 000 kr

##### **Stöd 3**

Kostnad nuvarande konstruktion, inkluderar totalkostnad för grundvattensänkning, spont, schakt, pålning, tätplatta, bottenplatta och skivstöd: Total kostnad=1 210 000 kr

Kostnad nytt förslag, inkluderar 2 st stålrörspålar 34,5 m/st med betong, armering och rostskyddsmålning och en tvärbalk: Total kostnad=1 200 000 kr

##### **Stöd 4**

Kostnad nuvarande konstruktion, inkluderar totalkostnad för grundvattensänkning, spont, schakt, pålning, tätplatta, bottenplatta och skivstöd: Total kostnad=1 150 000 kr

Kostnad nytt förslag, inkluderar 2 st stålrörspålar 29,5 m/st med betong, armering och rostskyddsmålning och en tvärbalk: Total kostnad=1 040 000kr

##### **Stöd 5**

Schakten försummas även här med samma anledning som för stöd 1.

Kostnad nuvarande konstruktion, inkluderar totalkostnad för pålning, tätplatta, bottenplatta och skivstöd: Total kostnad=490 000 kr

Kostnad nytt förslag, inkluderar 2 st stålrörspålar 25,5 m/st med betong, armering och rostskyddsmålning och en tvärbalk: Total kostnad=920 000 kr

### **Kalkyl 2, stöd 4 olika djup till berg**

Siffrorna är beräknade för samma arbetsmoment som i Kalkyl 1. Avståndet anger djupet från underkant bottenplatta till det djup de slagna betongpålarna antas sluta enligt underlaget. Bergytan ligger cirka 2 meter under detta. Kostnaden för stålrörspålarna är beräknade på att samtliga tio pålar på hela bron har samma längd. Betongpålarna är beräknade med samma nyckeltal som i Kalkyl 1.

#### **5 m djup**

Nuvarande med 5 m betongpålar=1 020 000 kr

Nytt förslag med 14,5 m stålrörspålar=650 000 kr

#### **10 m djup**

Nuvarande med 10 m betongpålar =1 060 000 kr

Nytt förslag 19,5 m stålrörspålar=780 000 kr

#### **15 m djup**

Nuvarande med 15 m betongpålar =1 110 000 kr

Nytt förslag 24,5 m stålrörspålar=910 000 kr

#### **20 m djup**

Nuvarande med 20 m betongpålar =1 150 000 kr

Nytt förslag 29,5 m stålrörspålar=1 050 000 kr