

EXAMENSARBETE

Konstruktion av pipelinebro i Charagua, Bolivia

Examensarbete inom ämnet Maskinteknik
C-nivå 30 Poäng
VT 2008

Samuel Bergström
Andreas Gunstedt

Handledare: Per Hellström M.Sc.Eng
Examinator: Tobias Andersson PhD

Sammanfattning

Guazuigua är en liten by i Bolivia som länge haft för liten tillgång på vatten, och främst i bevattningssyfte. Efter att en förstudie gjorts startades ett projekt att med ett kanalsystem förse byn med vatten från närliggande stad. Projektet finansieras av en personlig gåva. För att kanalsystemet skulle kunna genomföras behövdes en akvedukt byggas där kanalen är tvungen att passera en uttorkad flodbädd. Metoder att leda vatten över dessa flodbäddar har gjorts på ett flertal platser i området, där konstruktionerna havererat. Rapportens syfte är att bidra med en lösning på detta problem. Mitt under fältstudien förändrades projektets inriktning, varav man valde att bygga ett brunnsystem istället. Denna förändring var en bättre lösning på byns vattenproblem. Rapporten kvarstod ändå vid att lösa problemet med akveduktkonstruktionen. Beräkningar visar att ett fritt liggande rör över flodbädden skulle plasticera och haverera. Rapporten föreslår en stödkonstruktion som liknar en kabelupphängd bro, som är byggd på material som är billiga, och finns tillgängliga i området.

Abstract

Guazuigua is a small village in Bolivia, which has had too small water resources, especially for irrigation. A project started after some studies were made, to create a canal to provide the village with water from a nearby town. To make the canal work it had to cross a dried out river. There have been several attempts to cross these dried out rivers, but with poor results. The purpose of the report is to provide a solution for this problem. During the field studies, the project changed direction, and a decision was made to build a well system instead. This proved to be a better solution for the village's water problem. The report still remained with solving the canal problem. Calculations show that a pipe placed across the dried out river would break down. The report suggests a support construction which resembles a cable stayed bridge, which is build economical and by materials accessible in the area.

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Begränsningar	1
1.2 Målet med rapporten	1
1.3 Förväntade resultat	1
1.4 Datainsamling	2
2 Bakgrund	2
2.1 Bolivia	2
2.1.1 Departementet Santa Cruz	2
2.2 Allmän information om Guazuigua	3
2.3 Klimat	3
2.4 Organisationen på plats	4
3 Projektbeskrivning	4
3.1 Projektet innan förändringen	4
3.2 Projektbeskrivning efter förändringen	4
4 Ekonomi	5
5 Problemformulering	6
5.1 Förutsättningar och Förkunskaper	6
5.1.1 Utgångsläge för beräkningar	6
5.2 Belastning på röret och marken	7
5.3 Betongfundamenten under röret	7
5.4 Hållfasthetsberäkningar på röret	9
6 Lösningsförslag	11
6.1 Utvärdering av lösningsförslag	13
7 Val av brokonstruktion	13
8 Stödkonstruktionen	13
8.1 Järnvägsrälsarna	14
8.1 Kraftmätning på vajrarna	18
8.2 Fundamenten under järnvägsstängerna	18
8.3 Toppen på järnvägsstängerna	19
8.4 Ankarfundamenten	19
8.5 Erosionsproblemet	19
8.6 Logistik	19
9 Redundans	19
10 Riskanalys	20
11 Budget	20
12 Diskussion	21
13 Referenser	23
Tack till	24

1 Inledning

Brist på bevattningsvatten i byar i Santa Cruz i Bolivia gör att människor där inte längre kan leva på jordbruket. Istället flyttar fler in till Santa Cruz de la Sierra, som är den stora staden i området, i hopp om att få det bättre. Få lyckas dock och de flesta lever i fattigdom i de stora kåkstäderna runt staden. Pingstkyrkan i Karlskrona har under flera år haft ett nära samarbete med en församling i Charagua, Santa Cruz. Här har man tydligt kunnat se en urbanisering från byarna och 2005 började det planeras för ett projekt för att öka tillgången på vatten. Innan projektet startade, gjordes en förstudie på hur man kan leda vatten från en närbelägen grannby för att lösa Guazuiguas vattenproblem. Projektet kommer att finansieras med svenska medel från en gåva av en privatperson genom pingstkyrkan i Karlskrona. En av grundtankarna med projektet är att erfarenheter och lärdomar skall tas till vara för att kunna utföra liknande projekt i området i framtiden.

Metoderna som använts för att sammanställa denna rapport är:

- Litteraturstudier
- Fältstudier på plats i området kring Charagua
- Lokala kunskaper

1.1 Begränsningar

Rapporten är ett examensarbete omfattande 30 högskolepoäng per person vilket är likvärdigt med 800 arbetstimmar per person, varav 200 är fältstudier. Alla längdmått är gjorda med måttband och är därför inte alltid helt exakta. Under fältstudiens gång skedde en förändring som innebar att den lokala projektledningen valde att investera i ett pumpsystem och därmed frångå projektets ursprungsidé. Vi har valt att inte närmare gå in på konstruktionen av pumpsystemet, utan ge ett förslag för byggnation av den akveduktkonstruktion som var tänkt att användas från början.

1.2 Målet med rapporten

Målet med rapporten är att hitta en konstruktion för att leda vattenkanaler över fördjupningar i marken, exempelvis uttorkade flodbäddar. Konstruktionen skall vara hållbar, billig, enkel och av lättillgängliga material. Målet är också att ge en lösning som kan användas inte bara i detta projekt utan också vid framtida projekt med liknande förutsättningar.

1.3 Förväntade resultat

Rapporten kommer förhoppningsvis att leda till en billig och hållbar lösning på de problem som kan tänkas uppstå på ett flertal platser med liknande förutsättningar. Rapportens innehåll och konstruktionsförslag kan också bidra till inspiration, idéer och vägledning för framtida projekt.

1.4 Datainsamling

Under cirka en månads tid var Samuel Bergström på plats i Charagua. Uppgiften var att samla in information om området och platsen där brokonstruktionen skulle byggas. Konstruktionsplatsen mättes upp, tillgängligheten av byggmaterial undersöktes och jämförelse av priser gjordes. Under fältstudiens gång hölls regelbunden kontakt med Sverige för beräkningar och fördjupade litteraturstudier.

2 Bakgrund

2.1 Bolivia

Bolivia ligger i Sydamerika och har ca 9 miljoner invånare. Bolivia blev självständigt 1825 och är uppkallat efter frihetskämpen Simón Bolívar. Sedan landet blev självständigt har politiken svängt kraftigt, med ca 200 regeringsbyten, en hel del av dessa militära. Landet blev demokratiskt 1980, och är mycket fattigt. Bolivia var länge en koloni under spanjorerna, och landets huvudspråk är spanska. 18 december 2005 valdes för första gången en indian till president i landet. Landets huvudstad är La Paz och ligger på ca 3400 m över havet, och är en av världens högst belägna städer [1].



Figur 1 Karta av Sydamerika med Bolivia markerat.

2.1.1 Departementet Santa Cruz

Departementet Santa Cruz är det största av totalt nio departement i Bolivia, det har en area på 370 621 km², vilket är cirka 34 % av Bolivias totala yta (1098580 km²). Huvudstad i departementet är Santa Cruz de la Sierra, här bor 75 % av departementets befolkning på totalt 2 029 471 invånare. Santa Cruz är uppdelat i mindre provinser som i sin tur är indelat i kommuner.

2.2 Allmän information om Guazuigua

Den lilla byn Guazuigua tillhör Charagua kommun i departementet Santa Cruz, se figur 2. Charagua ligger ca 35 mil sydväst om Santa Cruz de la Sierra vid foten av Anderna och Guazuigua ligger ytterliggare cirka tio km öster ut från Charagua. Befolkningen i området består av mestiser och quecha som mestadels bor i städerna och pratar spanska. På landsbygden däremot bor mestadels guarani vilka oftast inte talar spanska. Det finns även en stor koloni av mennoniter, vilka är ett självförsörjande folk som talar låglandstyska men även spanska.

2.3 Klimat

Klimatet i området runt Charagua är mycket torrt, och nederbörden är inte tillräcklig för att driva ett effektivt jordbruk. Projektplatsen är belägen vid foten av en bergskedja vilket gör att det blir svalt på kvällarna då kall luft kommer ner från bergen. På sommaren uppgår medeltemperaturen till 32°C och under denna period regnar det stora mängder i bergen som sedan bildar floder på sin färd neråt. Dessa floder övergår sedan i quibradas (uttorkade flodbäddar). Under vintern är medeltemperaturen 21°C och även om regnskurar förekommer är de inte i närheten av de regn som faller under sommaren [2]. Med jämna mellanrum blåser så kallade "surs", kalla sydliga vindar från Patagonien och Argentinas pampas. De fungerar som en kallfront som för med sig en kallluftsmassa söderifrån och temperaturen kan sjunka kraftigt på bara några timmar (Petra Johansson, personlig kontakt, SMHI, 2008). Vegetationen i området är mestadels snår, buskar och mindre träd. Genomträngligheten är begränsad, och vid konstruktion kommer en viss rensning behövas. Marken består mestadels av torr jord och lera.



Figur 2 Karta över Bolivia, där Charagua är markerad med en rund ring.

2.4 Organisationen på plats

De som bär ansvar för projektets genomförande är kyrkan i Charagua, under ledning av pastor Óscar som också är ekonomisk ansvarig. Kyrkan samarbetar med Guazuiguas arbetsföra befolkning, och har bildat ett råd där beslut rörande projektet tas. Óscar distribuerar därefter ut ekonomiska medel efter rådets beslut. Inom byn Guazuigua är flertalet kristna vilket bidrar till ett stort förtroende för kyrkans verksamhet.

3 Projektbeskrivning

En förstudie till projektet gjordes 2005 av en inhyrd ingenjör från Santa Cruz. Ett par år gick tills projektet till slut fick en ekonomisk lösning genom en personlig gåva av en privatperson, och via Karlskrona Pingstkyrka. Projektets mål är att förse byn Guazuigua med vatten för bevattning. Förstudien beskrev en metod där en befintlig kanal i den närliggande staden Charagua delas upp och en ny kanalränna konstrueras som ska leda vatten till Guazuigua. Efter ungefär två och en halv veckas arbete inom projektet beslutade den lokala ledningen att projektets vattenkälla skulle vara en brunn istället för en fördelning av Charaguas vatten.

3.1 Projektet innan förändringen

En kanal med en lutning på 1 % grävs och kopplas på den befintliga kanalen i Charagua. På vägen måste kanalen passera två stycken quibradas som skär kanalens planerade väg. Över dessa skall kanalen ledas i akvedukter. Dessa akvedukter har vid tidigare liknande anordningar fallerat på grund av ogenomtänkta kortsiktiga lösningar. Kanalens totala längd skulle vara 2 km och efter ca 1,2 km skulle en dammkonstruktion med stor kapacitet byggas. Dammen byggs för att målgruppen ska kunna reglera och portionera ut vattnet vid önskad tid och mängd, oberoende av Charaguas reglering.

3.2 Projektbeskrivning efter förändringen

Efter två och en halv vecka räknas budgeten om, för att ligga till grund för en annan inriktning inom projektet. Istället för att leda vatten från Charagua visade det sig att de ekonomiska medlen skulle räcka till ett pumpsystem. Det nya systemet skulle drivas med vindkraft i form av en vindsnurra. Den lokala kunskapen om dessa anordningar är mycket bra. Anledningen till detta är att det i området runt Charagua finns en stor mennonitkoloni, där i stort sett varje familj har ett pumpsystem med vindsnurra som de själva byggt.

Ungefär 800 m från bevattningsplatsen fanns redan en borrhål brunn, som projektet genom överenskommelser fått till sitt förfogande. Brunnen ligger ungefär 15 m högre än bevattningsområdet, har bra vattentillförsel och passar därmed utmärkt till sitt syfte. Planerna är att pumpa upp vattnet, och direkt leda det via slang till den högst belägna platsen nära bevattningsmarkerna. Vattenprover kommer att göras på brunnsvattnet för att se om det även kan ge byn bättre tillgång till dricksvatten. Ger proverna bra resultat kommer det att byggas två tankar på platsen, en för bevattning och en för dricksvatten. Om proverna däremot inte är bra kommer endast en tank för bevattning att byggas. Vattnet leds först till en tank som har ett överrinningskydd. Vattnet som rinner genom

översvämningsskyddet går till en annan tank med större volymkapacitet. Vattnet som befinner sig i den första tanken kommer att användas som dricksvatten för Guazuiguas befolkning, eftersom det behövs mer dricksvatten om byn i framtiden kommer att expandera. Vattnet i den andra, större tanken kommer sedan att distribueras och användas för bevattning.



Figur 3 En av byns arbetare i den uttorkade flodbädden.

4 Ekonomi

Projektet finansieras med svenska medel. Det totala kapital som projektet har till sitt förfogande är 70 000 svenska kronor. Dessa pengar kommer huvudsakligen från en privatperson och betalas ut till församlingen i Charagua genom Pingstkyrkan i Karlskrona. Karlskrona Pingstkyrka har många år av bra och nära samarbete med församlingen på plats och har skickat ut en erfaren missionär under projektets start, som under många år arbetat i området kring Charagua. Byns medlemmar tillsammans med församlingen i området har bildat ett ekonomiskt råd, som beslutar hur pengarna skall fördelas. Detta råd beslutade också om förändringen i projektet som bidrog till att akveduktkonstruktionen inte blev konstruerad.

Hur stor del av den totala budgeten som skulle användas till konstruktionen den här rapporten fokuserar på är därför svår att bedöma, eftersom detta inte beslutats av rådet förrän projektet tog en ny riktning. Allt arbete som inte kräver en specialist är egeninsats från främst männen i byn, men även församlingsmedlemmar som samlas och hjälper till med vissa moment.

5 Problemformulering

Syftet med rapporten är att ge en hållbar lösning till hur man kan föra över vatten från en sida av den uttorkade flodbädden till den andra. För att lösa detta, måste problemet först analyseras och ställas mot de förutsättningar och förkunskaper som redan finns.



Figur 4 Uttorkad flodbädd på projektplatsen.

5.1 Förutsättningar och Förkunskaper

Vad gällande konstruktionen, ansåg delaktiga i projektet att det smidigaste sättet att få över vattnet är att använda sig av någon form av rör. Röret måste ha en stark motståndskraft mot rost och kräva minsta mån av underhåll. Vid tidigare användning av rör utomhus i området har ett stålrör av cortenstål används. Cortenstål är framställt för att kunna användas i utomhusmiljö utan att behöva målas. Detta beror på egenskapen att det rostar lätt, men när rosten nått en viss nivå bidrar den till ett rostskydd mot sig själv. Med andra ord rostar röret till en viss grad, men sedan inte längre. Dock är stålet inte gjort för att vara i ständig kontakt med vatten, eftersom det stör oxidationsprocessen vilket leder till att stålet rostar i alltför snabb takt. Därför kommer det att krävas att insidan på röret som skall användas målas [3]. Cortenstålrör finns tillgängligt i Santa Cruz, de används av oljebolagen i området och finns i diverse storlekar.

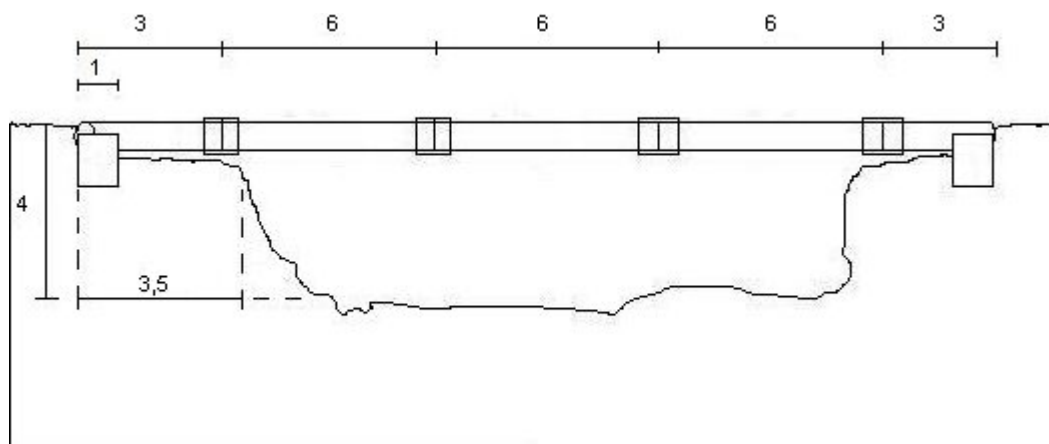
5.1.1 Utgångsläge för beräkningar

Det utgångsläge som beräkningarna kommer att baseras på är en enkel konstruktion där det kommer att behövas ett 24 m långt cortenstålrör med en ytterdiameter på 0,5 m och en innerdiameter på 0,48 m. Röret ligger på två fundament på vardera sidan av

flodbädden. Rör av den här längden existerar inte och en form av skarvning måste till. Rören levereras med en längd av sex meter.

Skarvningen

Röret kommer att behöva skarvas på fyra platser vilket görs med gängning av överlappande rör med en innerdiameter på 0,50 m och en ytterdiameter på 0,52 m. Detta överlappande kommer att medföra en försvagning av röret på grund av att rörets diameter kommer att öka vid skarvarna. Dessutom kommer det att bildas en del spänningar i gängorna, dessa ses dock som försumbara, i jämförelse med den stora böjspänningen som är det största problemet som skall åtgärdas. De eventuella svetsningar som kommer att göras på rördelarna i ändarna kommer att göras i Charagua då tekniken att svetsa cortenstål är för komplicerad för att utföras på plats. Svetsningarna kommer bland annat innebära små utstående plattor på skarvrören, detta för att underlätta gängningen. Montering kommer i sin tur att göras på plats. För att motverka läckage kommer gängtejp att användas.



Figur 5 Röret lagt fritt på fundamenten sett ifrån sidan med längder utsatta i m.

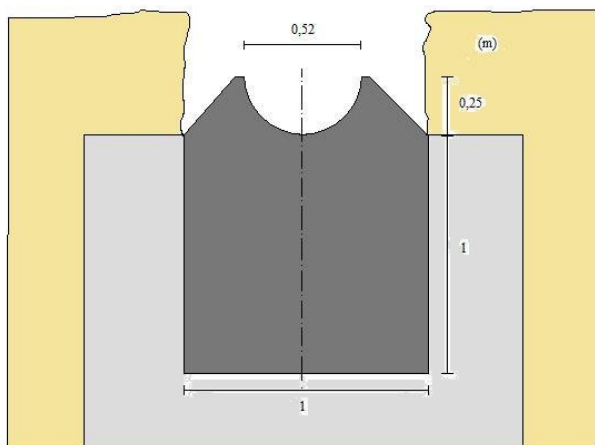
5.2 Belastning på röret och marken

De krafter som först kommer att analyseras är de krafter som röret utsätts för. Först och främst är det vattnets massa, men också rörets egenvikt. Vattnets massa beräknas då röret är 100 % fullt av vatten, detta för att mäta på den mest kritiska situationen. Vattnets massa i röret är 4343 kg. Cortenstål har en densitet på 7800 kg/m^3 [4] och bidrar till en egenvikt på 2881 kg. Marken kommer att utsättas för krafter från fundamenten, som i sin tur bör ses över. Dessa kan bidra till spänningar i flodväggen och leda till ras. Fundamenten kommer att göras på ungefär 1 m^3 och kommer att gjutas en halv meter under marken, i samma nivå som kanalen ansluter till röret.

5.3 Betongfundamenten under röret

Vad som är viktigt vid konstruktion av dessa fundament är att röret ligger fritt ovanpå och inte låses fast. Detta är framför allt för att inte plastisering eller brott skall ske när temperaturskillnader bidrar till att rörets längd och bredd varierar. Då markförhållandena inte är helt kända baseras utformningen av fundamenten på ungefärliga uppskattningar. Fundamentets placering kommer att vara en halvmeter under markytan för att röret skall hamna i samma nivå som den inkommande kanalen.

Vid gjutning av fundamenten kommer det först att läggas ett lager av singel på tre decimeter. Fundamenten kommer att brännas direkt i en träkonstruktion innehållande armering. Tillgången på sten, i olika storlekar är obegränsad, och för att konstruktionen skall vara hållbar används stenar med en medeldiameter på ungefär tre decimeter. Fundamenten kommer sedan att byggas upp som en skåra där röret placeras. Skårans diameter kommer vara två centimeter större än rörets diameter, detta för att tillåta viss glidning och utvidgning på bredden.



Figur 6 Bärandefundament i genomskäring sett från flodbädden med mått.

Betongfundamentets totala volym kommer att vara $1,09 \text{ m}^3$. Belastningen på marken betongfundamenten kommer att utgöra endast med sin egenvikt är $1,09 \text{ m}^3 \times 2350 \text{ kg/m}^3 = 2562 \text{ kg}$ [5]. Vikten som adderas av röret beror på hur stor last som kan ledas bort med stödstrukturen. Röret kommer vid montering att läggas i skåran kant i kant, så hela fundamentet kommer att ligga under röret. Efter att röret är monterat kommer kanalen vid mynningen att formas med cement, så att vattnet förs in i röret, utan att på något sätt låsa fast röret.



Figur 7 Platsen för bygget av akvedukten

5.4 Hållfasthetsberäkningar på röret

Målet med den här beräkningen är att se vilken påfrestning som kommer att ske på röret, och om plastisering beräknas ske på röret. Beräkningarna görs med en säkerhetsfaktor tre. Detta beslut baseras på antagandet att bron kommer att användas som bro av förbipasserande för att korsa flodbädden.

Tabell 1 Givna värden som används vid utförda beräkningar

Sträckgräns	$\sigma_y = 345 \text{ MPa}$
Längd mellan skarvar	$l = 6 \text{ m}$
Rörets totala längd	$L = 24 \text{ m}$
Rörets ytterradie	$Y = 0,25 \text{ m}$
Rörets tjocklek	$t = 0,01 \text{ m}$
Rörets medelradie	$a = 0,245 \text{ m}$
Utbredd last	$w = 3349 \text{ N/m}$

För att beräkna böjspänningen används följande formel:

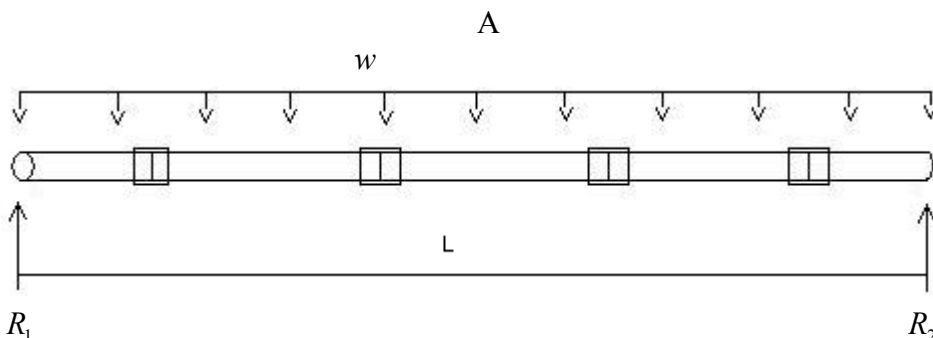
$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_B} \quad (1)$$

Där M_B är det böjande momentet och W_B är böjmotståndet, vilket beräknas på skarvrörets radie.

$$W_B = \pi a^2 t \approx 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2)$$

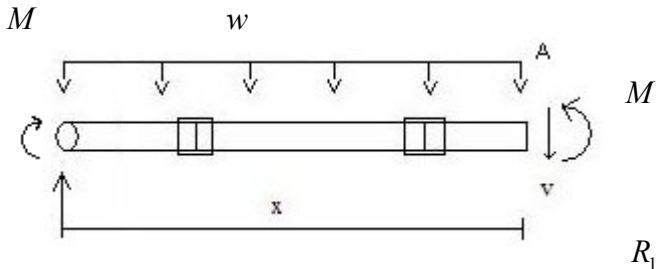
Beräkning av det maximala böjmomentet M_{\max}

För att få fram M_{\max} ses det sammansatta röret som en fritt upplagd balk, se figur 8, och snittar för att se var momentet är högst.



Figur 8 Fritt upplagd balk med utbredd last.

Snitt A:



$$x = L/2$$

Jvt:

$$\uparrow: R_1 - v - wx = 0 \quad (3)$$

$$\widehat{A}: R_1 \frac{L}{2} - M - w \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{L}{4} \right) = 0 \quad (4)$$

$$M = \frac{wL^2}{8} + R_1 \frac{L}{2} \quad (5)$$

$$R_1 = v - wx = \{v = 0 \text{ p\u00e5 grund av symmetri}\} = 40,2 \text{ kN} \quad (6)$$

F\u00f6r att se om plastisering kommer att ske ber\u00e4knas det maximala momentet till:

$$M_{\max} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

Ekvation (2) och (5) i ekvation (1) ger b\u00f6jsp\u00e4nningen

$$\sigma_{\max} = 120 \text{ MPa}$$

Med en s\u00e4kerhetsfaktor $n = 3$ f\u00e5s

$$\sigma_n = n\sigma_{\max} = 360 \text{ MPa}$$

$\sigma_n > \sigma_y$ allts\u00e5 beh\u00f6vs en st\u00f6dkonstruktion.

Resultat

Resultatet visade att det finns risk f\u00f6r att r\u00f6ret kommer att plastisera om det ligger fritt i luften utan n\u00e5gon form av st\u00f6danordning, eller eventuell sp\u00e4nnings\u00f6verf\u00f6ring. Vid r\u00f6rskarvarna finns geometriska \u00f6verg\u00e5ngar vilket \u00f6kar sp\u00e4nningen. Denna konstruktion fungerar allts\u00e5 inte utan en st\u00f6dkonstruktion.

6 Lösningsförslag

Konstruktionen som skall byggas är en form av pipelinebro som är vanliga på många håll i världen. Utgångspunkten låg därför i att studera sådana konstruktioner för att se om lösningar som kunde användas i projektet kunde identifieras.

Fem olika typer av brokonstruktioner kunde identifieras som möjliga lösningar på problemet: balkbro, fackverksbro, bågbro, kabelupphängdbrö och hängbro. Skillnaden mellan brotyperna är hur de hanterar krafterna i konstruktionen. För att hantera dessa krafter kan bron antingen fördela krafterna eller överföra dem som en hängbro.



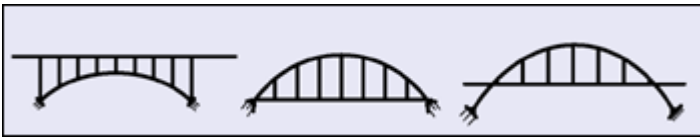
Figur 9 Balkbro [6]

Balkbron är den enklaste konstruktionen. Den är huvudsakligen en horisontell konstruktion som stöts av fundament på vardera sidan och den kan även ha kraftupptagande stöd underifrån mellan fundamenten. Dessa fundament stöttar hela vikten av bron och den last som läggs på bron.



Figur 10 Fackverksbro [6]

I en fackverksbro är lasten buren av en skelettkonstruktion gjord av ett stort antal små balkar. Detta är ett bra val för platser där stora delar och tung utrustning inte kan levereras.



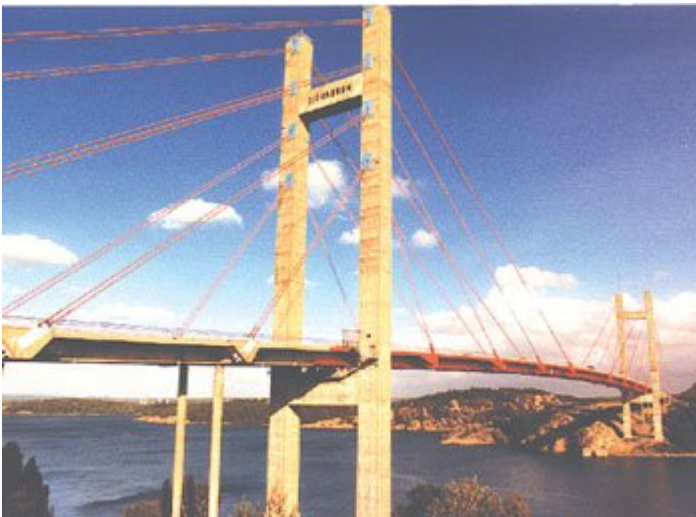
Figur 11 Bågbro [6]

Den semicirkulära konstruktionen av en bågbro överför naturligt lasten från bron till fundamenten på sidorna. Detta medför att marken vid fundamenten måste vara fast för att bron skall vara stabil.



Figur 12 Hängbro [6]

Hängbron består av två torn på mitten av brons spännvidd. Mellan dessa torn hänger bron i vajrarna med små ankare, och utåt från tornen mot brons ändar går vajrar som är fastankrade i ett fundament. Hängbroarna överför lasten från balken till tornen, som i sin tur tar upp alla tryckkrafter.



Figur 13 Kabelupphängd bro [6]

Den kabelupphängda bron ser på många sätt ut som en hängbro. Precis som hängbron så består den av en eller fler torn som tar upp kompressionskrafterna som överförs. Skillnaden är istället att kablarna från tornen är direkt fastsatta i balken [7].

6.1 Utvärdering av lösningsförslag

När val av konstruktion skall ske är det viktigt att inte bara se till konstruktionen i sig. Hänsyn måste tas till lokal kunskap, tillgänglighet på byggmaterial, möjlighet att transportera byggmaterial till konstruktionsplatsen och inte minst ekonomiska faktorer. Med tanke på förutsättningarna på konstruktionsplatsen, är de flesta brotyperna inte möjliga lösningar. Stödkonstruktioner under röret bör undvikas eftersom detta kan bidra till en risk när floden vid kraftiga regnfall fylls med vatten, med kraftiga strömmar och medföljande bråte som följd. Flodbäddens väggar består av mjuk jord och är därför mycket skör, ostabil och känslig för erosion.

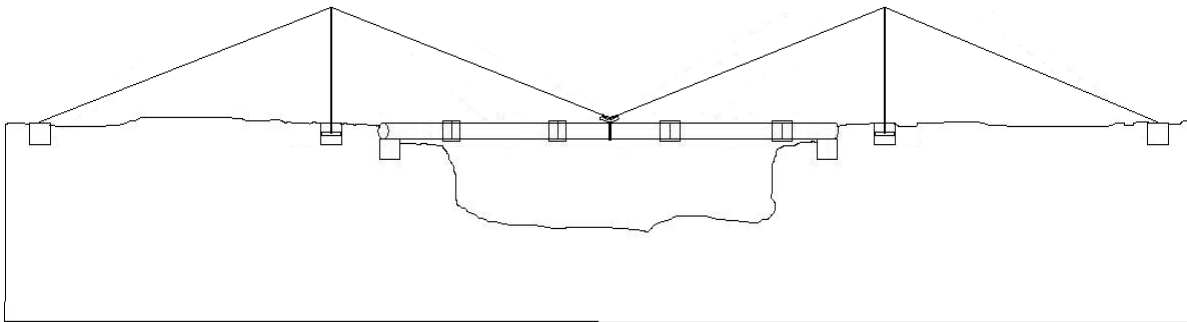
7 Val av brokonstruktion

De två områden som antas ha högst risk för att konstruktionen skall haverera är att röret plastiserar eller att marken mellan sidofundament och flodbädd rasar. Dessa två riskområden ställt mot kostnad, underhåll, logistik och effekt har gjort att två tänkbara brokonstruktioner ställts mot varandra, fackverkskonstruktion och kabelupphängd-brokonstruktion.

Styrkan med fackverkskonstruktionen är att den är enkel, stabil och kräver litet underhåll. Nackdelen är att den kräver mycket stål, som i sin tur är dyrt. Den baserar också all belastning på fundamenten röret ligger på, vilket bör motverkas. Fördelarna med den kabelupphängdabron är att de tryckande stolparna som kommer att uppta en stor del av den vikt som röret utgör, kan placeras en bra bit från flodbädden. Den här konstruktionen använder sig också av mer betong och mindre stål än fackverkskonstruktionen, vilket gör den billigare. Nackdelen är att den är mer komplicerad och kräver mer precision. Den här konstruktionen är också något mindre stabil. De punkter som är viktigast för valet av konstruktionen är att minska risken för ras genom att flytta belastningen ifrån flodfåran, samt priset på materialet. Den konstruktion som kommer att byggas för stöd för röret är en kabelupphängd brokonstruktion, se figur 14.

8 Stödkonstruktionen

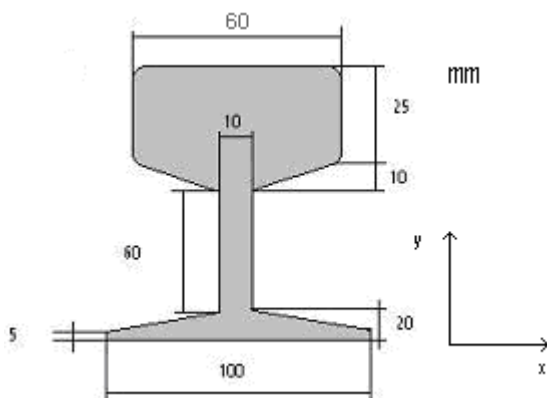
Stödkonstruktionens huvudsyfte är att bära upp röret, i den mån att spänningarna hamnar på en säkerhetsfaktor tre från det att plastisering inträffar. Konstruktionen kommer att byggas med material som är tillgängliga i området och ligger inom den ekonomiska ramen för projektet.



Figur 14 Översiktsbild av konstruktionen sett från sidan. Brokonstruktionen består av två stycken torn, gjorda av järnvägsräls, på vardera sidan av flodbädden. Dessa bär upp en vajer som dels är fäst på mitten av röret, och dels i ankarfundamenten.

8.1 Järnvägsrälsarna

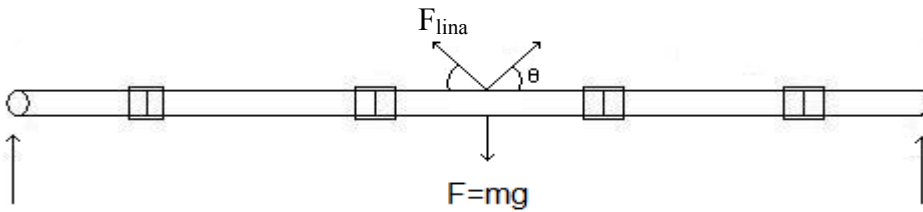
Som lyftande tornliknande del i konstruktionen kommer det att användas järnvägsrälsar. Dessa är lättillgängliga i området och relativt billiga. De levereras med längden 11,9 m och har ett I-balksliknande tvärsnitt.



Figur 15 Järnvägsrälsen i genomskärning med mått.

En anledning till att järnvägsrälsar ser ut som I-balkar är för att de skall kunna ta upp starka böjspänningar. Konstruktionen som valts utsätter rälsen för helt andra belastningar än den är konstruerad för. I stället för en belastning i y-led kommer den att utsättas för en belastning i längsled. I vilken mån balken klarar av denna belastning måste ses över och beräknas.

Antag: hela röret hänger i linorna, extremfall.



$$R_V=0$$

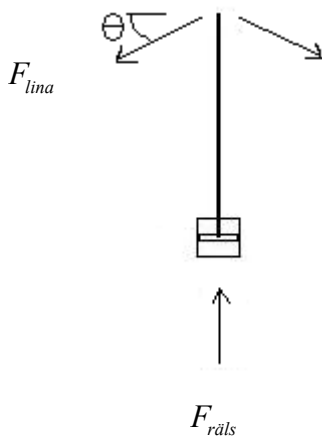
$$R_H=0$$

$$\uparrow: 2F_{lina} \sin \theta - mg = 0$$

$$\Rightarrow F_{lina} = \frac{mg}{2 \sin \theta}$$

(7)

Friläggning av järnvägsräls



$$\uparrow: -2F_{lina} \sin \theta + F_{räls} = 0$$

$$\Rightarrow F_{räls} = 2F_{lina} \sin \theta$$

(8)

Ekvation (7) i (8) ger

$$F_{räls} = wL = 80,4 \text{ kN}$$

$$F = 80,4 \text{ kN}$$

$$A = 3650 \text{ mm}^2 = 3,65 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$I_y = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$n_k = 3$$

Kraften F är beräknad på rörets vikt när det är helt fyllt med vatten. Arean A är järnvägsrälsens tvärsnittsarea, yttröghetsmomentet I baseras på de valda

järnvägsrälsarna och säkerhetsfaktorn valdes till tre. Dessa fyra värden användes för att beräkna den maximalt tillåtna höjden på tornen med nedanstående ekvationer [8][9].

Den maximalt tillåtna höjden på järnvägstängerna beräknas utifrån knäckning. Minsta yttröghetsmomentet fås runt y-axeln. Järnvägsstången är fast inspänd i ena änden och anses fri i den andra änden där endast vajern vilar, detta ger Eulers första knäckfall [8].

$$P_k = \frac{\pi^2 EI}{4l^2} \quad (9)$$

Med en säkerhetsfaktor $n_k = 3$ på knäckkraften fås den maximala höjden på järnvägsrälsen till:

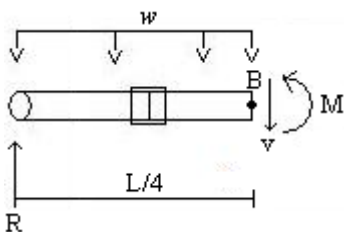
$$l = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{4Fn_k}} = 2,02 \text{ m} \quad (10)$$

Resultatet visade att det tryck som järnvägsstången kommer att utsättas för klaras av, såvida kraften är centrerad och höjden inte överstiger 2,02 m. Vidare kan det antas att om några böjande krafter kommer att verka på balken kommer dessa ske i linje med röret. Det kan därför vara klokt att placera rälsen på ett sådant sätt att den kan hantera dessa krafter.

$$\sigma_{till} = \frac{Fn_k}{A} = \frac{80,4 \cdot 10^3 \cdot 3}{3,65 \cdot 10^{-3}} \approx 66 \text{ MPa} \quad (11)$$

Beräkningar visar att normalspänningen i rälsen är acceptabel då den inte överstiger sträckgränsen, se ekvation 11.

För att se om stödkonstruktionen hjälper tillräckligt beräknas det maximala momentet då linorna på mitten spänts så att de tar upp halva rörets vikt. Detta ger att böjmomentet i röret blir mindre vid dess mitt.



$$R = \frac{wL}{4} \quad (12)$$

$$R \cdot \frac{L}{4} - w \frac{L}{4} \cdot \frac{L}{8} - M = 0 \quad (13)$$

$$\Rightarrow M = R \frac{L}{4} - w \frac{L^2}{32} = \frac{wL^2}{16} - \frac{wL^2}{32} = \quad (14)$$

$$= wL^2 \left(\frac{1}{16} - \frac{1}{32} \right) = 3349 \cdot 24^2 \left(\frac{1}{16} - \frac{1}{32} \right) = 6,0 \cdot 10^4 \text{ Nm} \quad (15)$$

Insatt i ekvation (1) fås

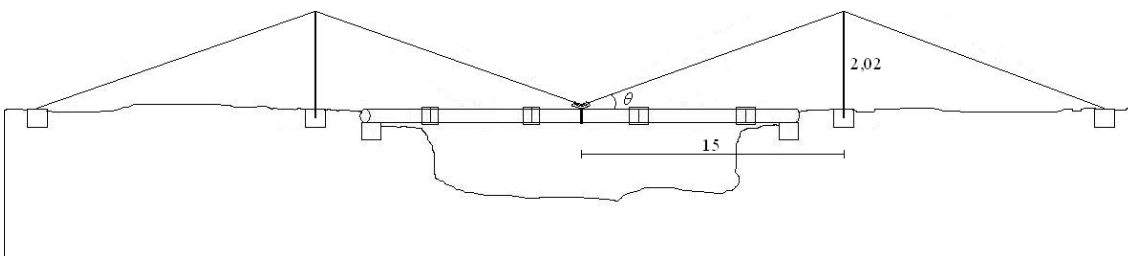
$$\sigma_{\max} = \frac{6,0 \cdot 10^4}{2,0 \cdot 10^{-3}} = 30 \text{ MPa}$$

Med en säkerhetsfaktor $n = 3$ fås

$$\sigma_n = n \sigma_{\max} = 90 \text{ MPa}$$

$\sigma_n < \sigma_y$ alltså hjälper stödkonstruktionen tillräckligt om linorna spänns så att de tar upp halva lasten.

För att beräkna diametern på vajern antas att järnvägsstången placeras tre meter från änden på röret och att höjden är två meter vilket ger att $\theta = 7,6$, se figur 16.



Figur16 Stödkonstruktionen med utsatta mått i meter. Röret är 24 m långt och järnvägsstångerna är placerade tre meter från respektive ände av röret vilket ger att avståndet från mitten på röret till järnvägsstången är 15 meter.

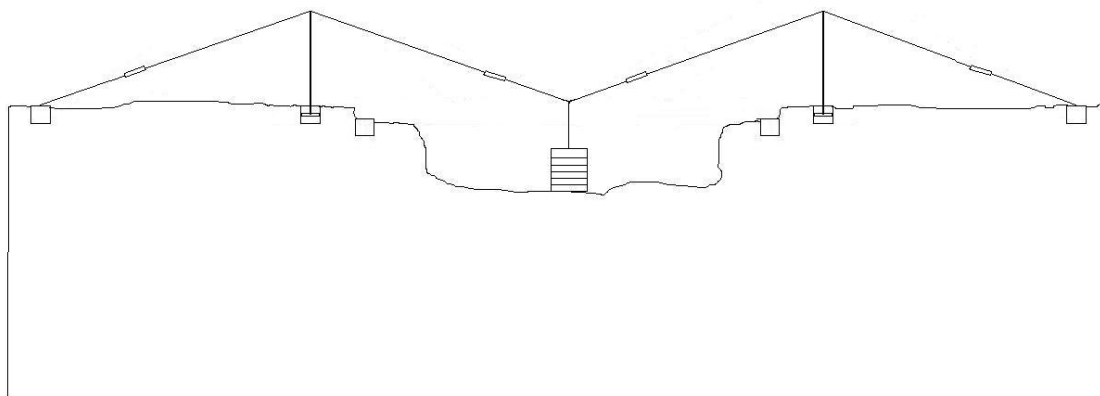
$$F_{lina} = \frac{wL}{2 \sin \theta} = \frac{3349 \cdot 24}{2 \sin 7,6} \approx 300 \text{ kN} \quad (16)$$

Med en säkerhetsfaktor $n_k = 3$ fås att $F_{n_{lina}} = 900 \text{ kN}$ detta ger en vajerdiameter på 40 mm [10]. Normalspänningen i järnvägsrålsarna beräknas till 33 MPa, se ekvation 17.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F_{lina} \sin \theta}{A} = \frac{900 \cdot 10^3 \sin 7,6}{3,65 \cdot 10^{-3}} \approx 33 \text{ MPa} \quad (17)$$

8.1 Kraftmätning på vajrarna

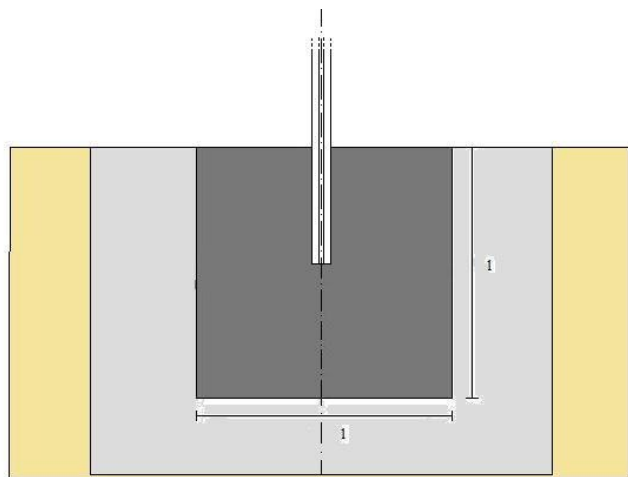
För att mäta hur vantskruvarna skall spännas för att vajrarna skall ta upp de rätta krafterna används en simpel metod. Metoden innebär att en vikt motsvarande den som stödstrukturen skall bära placeras på flodfårens botten och fästs till vajrarna, se figur 17. Därefter spänns vantskruvarna tills dess att vikten lyfter från marken. Antalet varv som vantskruvarna spändes noteras och vid slutmonteringen spänns vantskruvarna samma antal varv.



Figur 17 Beskrivning av kraftmätningssättet i vajrarna. Vantskruvar visas på vajrarna i figuren.

8.2 Fundamenten under järnvägsstängerna

Dessa fundament, se figur 18, liknar fundamenten som är placerade under röret vad gällande mått. Skillnaden är främst att de inte placeras en halv meter under markytan, utan dess övre kant kommer att vara i marknivå. En annan sak som skiljer dessa fundament från de övriga är att de kommer att ha en annan utformning på dess övre yta. Eftersom dessa fundament endast kommer att bära belastningar ovanifrån är det viktigt att kraften fördelas ut över hela fundamentet. Järnvägsrälsarna kommer att gjutas fast i mitten av betongfundamenten.



Figur 18 Fundament under en järnvägsräls, med mått i meter.

8.3 Toppen på järnvägsstängerna

Järnvägsstängernas övre del fyller en viktig del i konstruktionen. Vajrar har ett värde på hur tung last de kan bära, men de försvagas kraftigt när det blir veck på vajern. För att motverka detta i största möjliga mån, kommer de övre delarna av rälsarna att kapas av som en halvcirkel för att minska böjradien. Denna halvcirkel kommer att ha diametern 0,115 m, baserat på rälsens mått. Rälsarnas tvärsnittsarea är oregelbunden, och kommer därför inte att vara lämplig för att fördela kraften och hålla vajrar på plats, se figur 10. För att få en lösning på detta, och även sprida ut den nedtryckande kraften som vajrarna kommer att bidra med, kommer det svetsas en metallplatta med samma böjning som järnvägsrelsens ovansida på järnvägsrälsens topp. På plattans ovansida kommer därefter ett böjt rör, med samma böjning som plattan, och med tillgänglig diameter svetsas, som har uppgiften att hålla vajrarna på plats.

8.4 Ankarfundamenten

Ankarfundamentens huvudsyfte är att med sin vikt motverka förflyttning i sidled. Vikten hos strukturen är viktig främst i vad gällande massan som skall lyftas vid röret. Konstruktionen som planeras byggas har en liknande uppbyggnad som fundamenten rören ligger på. Eftersom jordförhållandena är osäkra byggs en konstruktion på ca 1x1x1 m. Fundamenten skall konstrueras med dess övre kant i marknivå, för att ta hjälp av marken för att motverka glidning. Fundamenten kommer att vara armerade på samma sätt som fundamenten under röret. Likaså kommer en moring gjutas fast i fundamentets övre del. Denna ring kommer vajern att fästas vid.

8.5 Erosionsproblemet

Ett utav de problem, som skall motverkas är erosionen under brokonstruktionen på flodbäddens väggar. För att motverka detta används en konstruktion, baserad på lokal kunskap. Konstruktionen används på ett flertal platser runt om i Bolivia. Stora påsar av nät hängs längs flodbäddens vägg. Dessa fylls därefter med stenar av storleksordningen en till två decimeter i diameter. Dessa hängs där erosionen skall motverkas. (Anders Bertling, personlig kontakt, handledare i Bolivia, 2007)

8.6 Logistik

Transporten av materiel kommer i huvudsak att ske med lastbil. Detta gäller transport från Santa Cruz. Vägarna mellan Santa Cruz och Charagua är tillfredsställande. De transporter som därefter måste göras de 1,5 km från staden Charagua till platsen för akveduktkonstruktionen kommer att ske med traktor med släp, som finns tillgängliga i Charagua. Väg finns till den uttorkade flodbädden från Charagua, men om det skulle inträffa svårigheter, exempelvis sämre väglag på grund av väder, kan materiell även bäras raka sträckan till rännan.

9 Redundans

Om någon del i konstruktionen skulle haverera, försvagas den avsevärt. De områden i stödkonstruktion som bedöms mest kritiska är fästena för vajrarna, samt de platser där

vajrarna böjs och har en viss försvagning. Eventuella reservåtgärder skulle kunna vara att använda dubbla vajersystem, samt dubbla fästen för vajrarna i fundamenten på skilda platser. Konstruktionen är beräknad på kritiska tillfällen exempelvis när röret är helt fyllt med vatten. Detta är ett scenario som sannolikt inte kommer äga rum ofta. Vid ett eventuellt haveri skulle tid finnas för reparation.

10 Riskanalys

	Sannolikhet	Konsekvens	Riskvärde
Dålig kvalitet på material	2	4	8
Inte tillräckligt med material tillgängligt	2	1	2
Dåliga markförhållanden	3	3	9
Läckage vid skarvarna på röret	2	4	8
Transportproblem	3	1	3

Dålig kvalitet på material – Då exakta materialdata inte har gått att få fram för konstruktionens alla delar och därför har fått uppskattats finns en risk att vissa delar inte klarar de påfrestningar de kommer att utsättas för.

Inte tillräckligt med material tillgängligt – Förseningar på grund av otillräckligt med material utgör ingen betydande risk för projektets mål.

Dåliga markförhållanden – Då marken runt flodfåran är väldigt lös och kraftiga regnskurar förekommer i området finns risk för att stora jordmassor sköljs bort och kan underminera konstruktionen.

Åtgärd: Viktigt att förarbetet till fundamenten görs ordentligt.

Läckage vid skarvarna på röret – Eftersom stålet i röret inte tål att vara i ständig kontakt med vatten är det viktigt att förhindra att vatten kan läcka ner i skarvarna mellan röret och bli liggande där. Detta skulle kunna bidra till en kraftigt sänkt hållfasthet på röret.

Åtgärd: Täta ordentligt vid montering och kontrollera regelbundet.

Transportproblem – Vägarna i området är svårframkomliga vilket skulle kunna resultera i förseningar, dock är konsekvensen av detta inte av betydande storlek.

11 Budget

Tabell 2 Kostnader för projektet. Bol = Bolivianos, 1 bol = 0.8 SEK, usd = US dollar, 1 usd = 6 SEK [11].

	å pris	antal	totalt	totalt i SEK
Cement	50 bol/säck	166	8300 bol	6640
Sand	180 bol/lass	2	360 bol	288
Sten	300 bol/lass	2	600 bol	480
Järnvägsräls	300 bol/m	5	1500 bol	1200
Armering	30 bol/m	60	1800 bol	1440
Vajer	60 bol/m	50	3000 bol	2400
Cortenstålrör	30 usd/m	28	840 usd	5040
Övrigt			500 bol	400
SUMMA				17888

Cementen köps i 25 kg säckar, varje säck uppskattas ge 0,085 m³ [12] färdig betong och totalt beräknas ungefär 12 m³ betong behövas. Detta medför att det åtgår ca 142 säckar cement, utöver dessa är det en extra marginal på 10 %. Sand och sten levereras i lass om 3 m³, dessa utgör tillsammans ca 80 % av betongen och det uppskattas att två lass av varje behövs. Uppskattningsvis kommer det att behövas 10 m armeringsjärn till vardera av de sex fundamenten vilket resulterar i totalt 60 m. Eftersom allt arbete är egeninsats från bybor och församlingsmedlemmar utgör detta ingen ytterligare kostnad. På grund av att projektet ändrade riktning går det inte att säga hur stor del av den totala budgeten på 70 000 SEK som skulle avsats till brokonstruktionen, men en rimlig uppskattning är ungefär 35 000 SEK.

Baserat på detta antagande har budgeten för brokonstruktionen inte överskridits och dessutom finns det en god marginal för oväntade utgifter.

12 Diskussion

Projektets mål var att förbättra tillgången på bevattningsvatten i byn Guazuiguas. Detta skulle göras genom att en kanal grävdes, från grannstaden Charagua, vilket är en vanligt förekommande metod i området. En förstudie gjordes och den visade att kanalen skulle behöva passera en uttorkad flodbädd. Förstudien föreslog en lösning på hur kanalen skulle ledas över flodbädden men projektledningen ansåg, baserat på tidigare erfarenheter, att den inte var tillfredställande. Vår uppgift och målet med denna rapport var därför att hitta en annan lösning.

Under fältstudiernas gång visade det sig att det fanns färdigborrade men outnyttjade brunnar i närheten av Guazuiguas. Projektledningen beslutade här att frångå ursprungsidéen om en kanal och istället satsa på att pumpa upp vatten ur brunnshålen och leda det till tankar. Denna lösning ger inte bara bevattningsvatten utan också ett tillskott på dricksvatten och dessutom blir inte Guazuiguas beroende av Charaguas reglering.

Det beslutades att arbetet med att hitta en lösning på att leda kanaler över flodbäddar skulle fortsätta eftersom det planeras liknande projekt för framtiden. Även om lösningen med en brunn visade sig vara bättre skulle den knappast kunnat genomföras inom projektbudgeten om inte brunnen redan varit borrade. Däremot är det synd att vi inte får tillfälle att testa våra teorier i praktiken.

Redan tidigt i arbetet bestämdes att ett rör av cortenstål skulle användas för att leda kanalen över flodfåran. Detta berodde på att cortenstål är tacksamt att använda i en utomhusmiljö, att det är relativt lätt att komma över i området och att det har använts för liknande ändamål tidigare med goda resultat. Efter noggrannare efterforskningar framgick att cortenstål kunde rosta mycket snabbt om vatten blir liggande på ytan. För att skydda insidan av röret föreslås att det målas. Någon lösning på hur skarvarna skall tätas för att inget vatten ska kunna krypa ner och bli liggande där har vi inte i nuläget.

Baserat på efterforskningar vid platsen för konstruktionen visade det sig att marken är väldigt lös, vilket gjorde att följande två teoretiska lösningar vidtogs. För det första valde vi att placera rörets fundament ungefär 3,5 m ifrån flodbäddens kant. Detta för att att det föreligger en risk för underminering av fundamenten om de placeras vid kanten.

För det andra anser vi att fundamenten bör göras relativt stora då förhoppningen är att detta kan ge en stadigare konstruktion.

När det gäller brokonstruktionen valdes en kabelupphängd bro, detta beslut grundades på att vi ville undvika stödjande konstruktioner placerade i flodfåran och att mängden stål som används är minimal. Vi tycker dock att beslutet om typ av bro togs en aning förhastat och att alla alternativ borde ha undersökts mer ingående innan beslutet togs. De tre brotyper som inte valdes avfärdades baserat på antaganden snarare än fakta. Vi tror ändå att vi tagit rätt beslut och att detta skulle framgå vid närmare undersökningar.

Anledningen till att järnvägsräls används till tornen beror på att det under rådande omständigheter var det mest logiska alternativet. Vi vet dock inte vilken typ av stål rälsen är gjord av men vid utförda beräkningar har ett normal värde för stål antagits. Hade vi haft möjlighet att fritt välja material till tornen hade vi inte valt järnvägsräls utan någonting som är mer lämpat för uppgiften.

Vad gäller priserna som används för beräkning av budgeten så är dessa ungefärliga då endast en leverantör för varje material har tillfrågats och inga prisjämförelser skett. Detta medför att vid ett genomförande av projektet kan priserna avvika från ovanstående nämnda vilket bör tas i beaktande. Även mängden material är uppskattningar vilket också kan förändra den totala summan för konstruktionen. Men vi anser oss ha en så pass god marginal att dessa möjliga felkällor ändå ryms inom den avsatta budgeten.

Målet med rapporten var att hitta en hållbar, billig och enkel konstruktion för att leda vattenkanaler över fördjupningar i marken. Målet var också att ge en lösning som kan användas vid framtida projekt i området. Vi anser att vi uppnått dessa mål eftersom konstruktionen dels ryms inom de ekonomiska ramarna och dels är relativt enkel och hållbar. Vi tror även att konstruktionen är möjlig att byggas på fler platser.

13 Referenser

1. Wikipedia
http://en.wikipedia.org/wiki/Santa_Cruz_de_la_Sierra
[Hämtad 07.12.14]
2. Bolivia Web
<http://www.boliviaweb.com/cities/scruz.htm#Climate>
[Hämtad 07.12.14]
3. National steel bridge alliance, *Steel bridge design handbook*
Tillgängligt på Internet: <http://www.steelbridges.org/pdfs/Chapter23.pdf>
[Hämtad 08.04.23]
4. Utah State University, *Mechanical and Aerospace Engineering Department*
http://www.neng.usu.edu/mae/faculty/stevef/info/MProp/Steel_ASTM242.htm
[Hämtad 08.04.23]
5. Grus och betong
http://www.grusochbetong.se/betong_egenskaper.asp
[Hämtad 08.05.27]
6. Batman bro och tunnel management
https://batman.vv.se/batinfo/Handbok30/DEF_BrotyperFastaBroar
[Hämtad 08.12.20]
7. Vägverket
www.vv.se/templates/page3____14079.aspx
[Hämtad 07.07.20]
8. Sundström, B., m.fl. (1998) *Handbok och formelsamling i hållfasthetslära (2: a upplagan)* Södertälje: Fingraf AB
9. Beer, F.P., Johnston, ER. jr., Dewolf, JT. (2002) *Mechanics of materials (3:e upplagan)* New York: McGraw-Hill.
10. Erlandsson, O., Lagerkrans, S., Näslund, R., Vourinen, E. (2000)
Maskinhandboken
Lund: Studentlitteratur
11. Coinmill
http://Coinmill.com/BOB_calculator.html
[Hämtad 08.05.27]
12. Heidelbergcement
http://www.heidelbergcement.com/se/sv/betongindustri/vad_ar_betong.htm
[Hämtad 08.05.27]

Tack till.....

Pingstkyrkan i Karlskrona för att vi fick möjligheten att medverka i projektet.

Bengt Person och Fyndhörnet Secondhand utan vars generösa gåva detta projekt inte hade kunnat genomföras.

Anders Bertling, vår handledare i Charagua som med sin kunskap om området, språket och befolkningen var ovärderlig för arbetet på plats.

Per Hellström, vår handledare vid Institutionen för Teknik och Samhälle på Högskolan i Skövde.

Paul Olsson och Marcus Bertling för värdefulla tips och råd under arbetet med projektet.

Ingmar Bergström

Salomón Yavita Chaury, byansvarig, och Javier Yavita Chaury, kassör, i Guazuigua för deras hjälp under vistelsen i Bolivia och guidning och vägledning i området.

Óscar Garzon pastor i Iglesia Charagua ansvarig för projektet.

Anders Biel, för all hjälp med våra beräkningar.

Maria Blixth för all hjälp med skrivandet av rapporten.