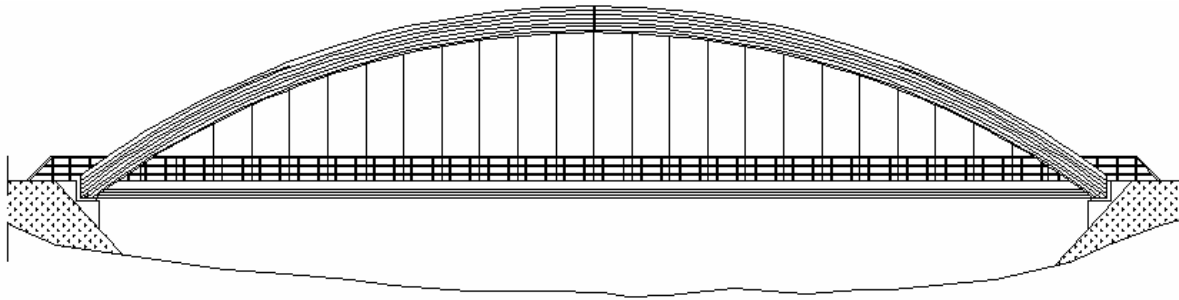


CHALMERS



Dimensionering av en bågbro i limträ – Konstruktion och utformning

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Byggingenjör

ERIK MARTIN
ALEXANDER PERSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2006
Examensarbete 2006:47

Examensarbete 2006:47

Dimensionering av en bågbro i limträ

Konstruktion och utformning

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Byggingenjör

ERIK MARTIN, ALEXANDER PERSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2006

Dimensioning of a glue laminate arch bridge
Construction and design
ERIK MARTIN, 1982
ALEXANDER PERSSON, 1980

© ERIK MARTIN, ALEXANDER PERSSON

Diploma thesis 2006:NN
Department of Civil and Environmental Engineering
Chalmers University of Technology
SE-412 96 Göteborg
Sweden
Telephone + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
CAD ritning över vår bro, där de olika delarna av konstruktionen presenteras övergripande.

Chalmers
Göteborg, Sweden 2006

Sammandrag

Vår uppgift har varit att konstruera och arbeta fram ett Excel-underlag som ska vara till hjälp vid projektering av bågbroar i limträ. Underlaget ska inte bara vara fackmannamässigt utformat utan också lättanvändligt för konstruktörer.

Tillsammans med företaget Moelven Töreboda har vi tagit fram beräkningar på en viss typ av GC-bro. Brotypen har en bärande konstruktion i form utav två par parabelformade limträbågar.

I dimensioneringen avgränsar vi oss till brons bärförmåga i brottgränstillstånd och bruksgränstillstånd för de viktigaste detaljerna. Samtliga beräkningar för brons delar är införda i ett Excel-dokument och tanken är att det ska vara tillämpbart på en mängd olika spännvidder och bredder.

I detta examensarbete dimensionerar vi en bro med bredden 4 m och spännvidden 50 m. Beräkningsgång samt dimensioneringsexempel från Excel redovisas i form utav bilagor längst bak i rapporten.

I arbetet har vi använt oss av flertalet böcker som behandlar byggstatik och brobyggnad samt konsulterat våra handledare Roberto Crocetti, konstruktör på Moelven Töreboda samt Sören Lindgren universitetslektor på Chalmers.

Som slutsats till resultaten av vårt arbete kan nämnas att en 50 m spännvidd troligen är en ungefärlig övre gräns för limträbroar med bågform. Större spännvidder skulle enligt våra resultat kräva väldigt stora dimensioner på bågelementen, och troligen skulle en annan typ av bro vara mer ekonomisk.

Abstract

The goal of this degree thesis is to create a design program in Excel to help the company Moelven Töreboda in their plans on starting building glue laminated arch bridges for pedestrian. A bridge with span 50 m and width 4 m is developed.

The information we have used to complete the computing procedure comes from various structural design books and supervision from our tutors Sören Lindgren at Chalmers and Roberto Crocetti at Moelven Töreboda.

The result of this thesis is the Excel program which handles the design codes concerning the stability of the arch and the beams. It also presents calculations handling vibrations and joints. The program can be used in designing 3-joint glue laminated arch bridges in the span of 20-50 m.

The conclusions of the results are that the 50 m span probably is the upper limit concerning dimensions on the glue laminated arch elements. Lager spans would require very large dimensions for the arch elements, and a different type of bridge is probably more economical.

Keywords: design, Excel program, gluelaminated arch, Moelven Töreboda

Förord

Med detta förord vill vi passa på att tacka de personer som hjälpt oss med råd och tips i vårt arbete. Det har varit en stor trygghet att kunna konsultera dessa personer i de stunder då vi stötte på svårigheter.

Roberto Crocetti, konstruktör vid Moelven Töreboda, som i förstadiet gav oss ett studiebesök i företagets fabrik. Detta var mycket lärorikt då vi fick förståelse för tillverkningen av limträ och materialet i allmänhet. Han gav oss också många tips inför vårt arbete under detta besök. Det var också han som kom med idén till detta examensarbete.

Sören Lindgren, universitetslektor vid Chalmers, vår handledare som också var till stor hjälp. Vi är mycket tacksamma att vi fick möjlighet att ha honom som handledare då han utan invändningar alltid tog sig tid för våra frågor. Under hela arbetsfasen har vi haft kontinuerliga möten med honom och det har verkligen underlättat vårt arbete.

Innehållsförteckning

Sammandrag.....	I
Abstract.....	II
Förord.....	III
Innehållsförteckning.....	1
1. Beteckningar.....	2
1. Inledning.....	3
1.1. Bakgrund.....	3
1.1.1. Syfte, avgränsningar.....	3
1.1.2. Metod.....	3
2. Fakta om limträ i allmänhet.....	4
2.1. Fördelar med limträ.....	4
2.2. Tillverkning av limträ.....	4
3. Bågen som konstruktionselement.....	5
3.1. Bågbroar.....	5
3.2. Utformning och val av bågtyp.....	6
4. Projektering av limträbroar.....	7
4.1. Dimensionering.....	7
4.2. Beständighet.....	7
5. Gång- och cykelbroar.....	8
5.1. Laster.....	8
6. Beräkningsförfarande av en bågbro.....	9
6.1. Ingångsvärden.....	9
6.1.1. Bestämning av bågform.....	9
6.1.2. Uppskattning av egentygnd och volym för de olika brodelarna.....	10
6.2. Brottgränstillstånd.....	10
6.2.1. Beräkning av krafter och moment i bågen.....	10
6.2.2. Dimensionering av bågen (med avseende på knäckning).....	11
6.2.3. Knäckning vinkelrätt bågplanet.....	11
6.2.4. Dimensionering av farbanebalkar.....	12
6.2.5. Beräkning av vindlast.....	13
6.2.6. Beräkning av bromskraft.....	14
6.2.7. Dimensionering av syllar.....	15
6.2.8. Dimensionering av slitlager.....	16
6.2.9. Dimensionering av räcke.....	18
6.2.10. Dimensionering av hängstag.....	19
6.2.11. Kontroll om bron tippar över pga. vindlast.....	20
6.3. Brukgränstillstånd.....	21
6.3.1. Nedböjning av Balkar.....	21
6.3.2. Nedböjning av Syllar.....	22
6.3.3. Egensvängningar i balk.....	23
6.4. Dimensionering av detaljer.....	24
6.4.1. Limträklossar som fäster hängstag i båge.....	24
6.4.2. Dragbandsinfästning.....	25
6.4.3. Dimensionering av ledad balkskarv i form av ett mellanlägg.....	27
7. Avslutning.....	29
8. Referenser.....	30
8.1. Litteratur.....	30
8.2. Muntliga källor.....	30
Bilaga 1 Illustration av bron i längdled.	
Bilaga 2 Illustration av bron i sidled.	
Bilaga 3 Excel-underlaget i tryckt form.	

1. Beteckningar

b	bredden på ett element/brobredd
h	höjden på ett element
p	utbredd trafiklast
P	punktlast från renhållningsfordon
$\psi \cdot \gamma$	partialkoefficient
B	bromskraft längsmed bron
S	bromskraft i sidled
g	egentyngd
q	utbredd trafiklast
f	pilhöjd
L	spännvidd
M, S	moment
H	horisontalkraft
N	normalkraft
R_{md}	momentkapacitet
R_{cd}	tryckkraftkapacitet
R_{vd}	tvärkraftskapacitet
E	elasticitetsmodul
I_w	tröghetsmoment veka leden
W	böjmotstånd
R	kraftresultant
G_f	effektiv egentyngd
f_k	karaktäristiskt hållfasthetsvärde limträ
f_d	dimensionerade hållfasthetsvärde limträ
cc	avstånd centrum-centrum
D	diameter
y	nedböjning
σ	böjpåkänning
τ	skjuvpåkänning

1. Inledning

Limträ har sedan många år varit ett populärt material att använda vid byggandet av gång- och cykelbroar (GC-broar). Moelven Töreboda har sedan 2 år tillbaka erfarenhet i konstruerandet av limträbroar och har nu för avsikt att börja tillverka en GC-bro med bärande konstruktion utgörandes av två parallella limträbågar.

1.1. Bakgrund

Tillsammans med Moelven Töreboda ska vi ta fram en dimensioneringsgång för en GC-bro med bärande konstruktion utgörandes av två parallella limträbågar med hängare. Bron vi kommer att räkna på kommer ha en spännvidd på 50m och en bredd på 4m. Lastförutsättningarna hämtas från Bro 2004.

1.1.1. Syfte, avgränsningar

Syftet med examensarbetet är att utforma och dimensionera bronns alla delar. Vi fokuserar uteslutande på de delar av konstruktionen som verkar ovanför mark. Syftet med detta arbete är också att göra ett Excel dokument som ska underlätta framtida dimensionering av likartade konstruktioner.

1.1.2. Metod

Med hjälp av litteratur, egna kunskaper samt konsultation med våra handledare har vi behandlat bronns konstruktion, utformning och beständighet. Lasterna kommer från Bro 2004, vindlast, last från renhållningsfordon, bromslast och egenvikt. Samtliga beräkningar som gäller dimensioneringen kommer att läggas in i ett Excel underlag för att underlätta dimensioneringsarbetet.

2. Fakta om limträ i allmänhet

I slutet av 1800-talet började limträtekniken utvecklas i Tyskland. Den första svenska konstruktionen av limträ tillverkades i Töreboda år 1918. Fram till 1960-talet var produktionen av limträ inte så omfattande i Norden, efter hand har den dock ökat och idag är den i de Nordiska länderna 200 000 m³ per år.

2.1. Fördelar med limträ

- Estetiskt vackert
- God beständighet i kemisk aggressiv miljö
- Låg egenvikt, detta ger låga transportkostnader
- Högt motstånd mot brand
- Bra värmeisolerande egenskaper
- Hög hållfasthet i förhållande till egyptyngden, stora spännvidder kan användas

2.2. Tillverkning av limträ

Limträ är ett antal plank eller lameller som är hoplimmade och på så sätt bildar balkar då dimensionerna blir allt större. Spännvidden på dessa balkar kan göra långa tack vare fingerskarvning. Denna metod där ändarna på lamellerna sågas som kilar och sedan limmas ihop med nästa lamell gör att limträbalkar kan få spännvidder upp till 60 m. Längden begränsas dock till 30m för att det ska vara möjligt att transportera balkarna på vägarna.



Bild 1 (Törebodas gamla fabrik, limträbågar i taket)

3. Bågen som konstruktionselement

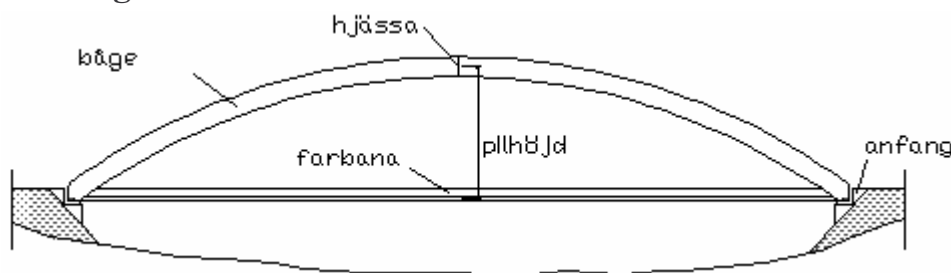
Användningen av bågen som konstruktionselement är en lång tradition. Det finns bevarade byggnadsverk sen romartiden som utnyttjar bågen som bärande element. Troligen kommer bågens idé från att murningsskrået förstod att ett murverk endast kan uppta tryckkrafter. Det gällde alltså att utforma konstruktionen så att den fick en tryckkraft mellan stenarna och det åstadkoms genom att bågen förde ner krafter till grunden. De första bärande bågkonstruktionerna dominerades av cirkelformen och gav namn till en ny byggnadsstil, rundbågestilen eller den romanska stilen.



Bild 2 (Tillverkning av bågselement på Moelven Limträ, Moelv, Norge)

Dagens bågkonstruktioner kan optimeras tack vare bredare kunskaper i hållfasthetslära och byggstatik. Nu förekommer också bättre konstruktionsmaterial såsom stål och armerad betong, och det har förstås ökat möjligheterna markant för vad som kan konstrueras. Teoretiskt kan mycket stora spännvidder uppnås under förutsättning att bron inte utsätts för några rörliga lastdelar, samt att ingen hänsyn tas till vindlast eller måttavvikelser från den teoretiskt korrekta bågformen. Det finns också gränser för vad som är ekonomiskt försvarbart. Vid riktigt stora spännvidder ses hängkonstruktionerna som det mest konkurrenskraftiga alternativet.

3.1. Bågbroar



Figur 1

Bågbroar görs i huvudsak av betong eller limträ. Det finns olika alternativ hur farbanan läggs i förhållande till den bärande bågkonstruktionen. Beroende på omgivningen kan farbanan hänga under bågen med hjälp av hängstag eller så placeras farbanan uppstolpad ovanför bågen. Farbanan kan även följa bågens form men då gäller det att inte pilhöjden blir för stor. Bågen blir i huvudsak utsatt för tryck och bågens form ska försöka anpassas efter trycklinjen som uppstår av egentygden och belastningen. Bågen kan ha en parabel- eller cirkelform.

3.2. Utformning och val av bågtyp

Vid valet av bågtyp är det först och främst grundförhållandena och montagesätt som styr. Ur ett rent ekonomiskt perspektiv är det som regel mest fördelaktigt att välja 0-ledsbågen eftersom den kräver minst material i förhållande till belastningen. Detta under förutsättning att grundförhållandena är bra och att tvärsnittshöjden på bågen kan varieras. Då sämre grundförhållanden råder är 2-ledsbåge ett bättre alternativ då dragbandet tar upp alla horisontella krafter och stödkrafterna på landfästet endast blir vertikala.

3-ledsbågen kan också vara ett alternativ eftersom den är enkel att montera och den inte är lika känslig för sättningar. 3-ledsbågen är att föredra vid spännvidder upp till 60-70 m. Är spännvidden större krävs det i regel att bågen tillverkas och transporteras i mindre delar och sammanfogas momentstyvt på plats.

Limträ är väl lämpat att använda för bågkonstruktioner tack vare att den krökta formen kan framställas i en rad olika tvärsnittshöjder utan större merkostnad. Oftast används ett massivt tvärsnitt med en konstant höjd men det finns även möjlighet att utforma bågen med I- eller lådform.

För att så små moment som möjligt ska uppstå i bågen väljs bågens form efter trycklinjen som uppstår för den dominerande lastkombinationen. En bågkonstruktion belastas av en rad olika lastkombinationer som var för sig har en unik trycklinje. Därför är det omöjligt att konstruera en båge som blir helt utan momentpåverkan.

Bågar kan ha en rad olika former. Vanligast är att en parabel- eller cirkelform väljs men andra former som t.ex. elliptisk form förekommer också.

Lasterna på bågen förs som sagt ner i ändarna och upplagen måste kunna ta upp de horisontella krafterna som uppstår. Med goda grundförhållanden kan horisontalkrafterna tas upp av anfangen annars får de tas upp av så kallade dragband. För att begränsa de horisontella krafterna, då en parabelbåge används, väljs en pilhöjd som är större än 0,14 ggr bågens spännvidd.

4. Projektering av limträbroar

Målet med broprojekteringen är att få fram den bästa utformningen av bron med utgångspunkt ifrån de givna förutsättningarna som bronns läge, terrängförhållanden, geotekniska och hydrologiska förhållanden, utrymmeskrav, väggeometri etc.

Dessutom bör man bedöma de ekonomiska och estetiska aspekterna samt avgöra vilka krav på drift och underhåll som ställs.

4.1. Dimensionering

I Sverige används särskilda normer för dimensionering av broar, Bro 2004, som ges ut av Vägverket. I publikationen anges krav vid projektering, konstruktion, nybyggnad och förbättringar av broar. Alternativt är det nu tillåtet att dimensionera träbroar enligt Eurocode 5. En brokonstruktions bärförmåga beräknas på samma sätt för husbyggnadskonstruktioner, men det måste tas hänsyn till bronormernas förutsättningar gällande lastkombinationer, klimatförhållanden samt krav på säkerhet.

4.2. Beständighet

Träkonstruktioner har normalt en ganska god beständighet mot väder och vind. Flera historiska byggnader visar det. När träkonstruktioner utsätts för solljusets UV-strålar eroderar och färgförändras träytan och sprickor uppstår. Om omgivningen utsätter konstruktionen för fukt bör man försöka se till att fuktkvoten i virket inte är högre än 20 % under längre perioder. Överskrids kvoten kan konstruktionen utsättas för träförstörande svampar. För att undvika detta bör konstruktionen ha en god utformning av överbyggnaden för att skydda träet. Ligger däremot träet under mark eller av andra skäl inte kan skyddas mot fukt i tillräcklig grad kan träet förstärkas med ett kemiskt träskyddsmedel, impregnering.

Impregnerat trä är dock inte helt ofarligt för miljön, så i Sverige tillåts endast impregnering som innehåller krom- eller arsenikföreningar i särskilda situationer då träet:

- ligger i markkontakt eller är en del av en marin anläggning,
- är en del av räcke eller annan säkerhetsanordning,
- är konstruktionselement i fukthotad miljö som är svåra att byta ut

Görs bedömningen att träet bör skyddas mot yterosion, sprickbildning eller mot för hög fuktkvot kan konstruktionen kläs in med ett klimatskydd eller ytbehandla den. För att skydda mot vattenupptagning används antingen ett vattenavvisande medel som reducerar kapillärsugning eller så stryks en filmbildande ytbehandling på som hindrar vattnet att nå träets yta. Skydd mot UV-strålning fås genom att blanda i en tillsats av pigment som inte släpper igenom ljus. Normalt behövs ytbehandlingen förnyas genom att stryka på ett nytt lager med några år mellanrum.

5. Gång- och cykelbroar

Gång- och cykelbroar som går under namnet GC-broar belastas i huvudsak av cyklister och fotgängare men även av ett renhållningsfordon. Vid dimensionering räknas dock med att lasten från renhållningsfordonet inte verkar samtidigt som trafiklasten.

5.1. Laster

En GC-bro angrips av en rad olika laster. Förutom egentyngden ska bron dimensioneras efter en trafiklast från fotgängare som enligt Bro 2004 uppgår till $4,0 \text{ kN/m}^2$ och verkar vertikalt nedåt.

Utöver trafiklasten ska bron bärformåga klara punktlaster från ett renhållningsfordon. Fordonet antas ha två hjulpar med en effektiv kontaktyta $200 \times 200 \text{ mm}$ /hjul och axelavståndet 3 m. Bakre hjulparet verkar vertikalt nedåt med en kraft på 20 kN/hjul medan det främre hjulparet verkar med en kraft på 40 kN/hjul . Vid inbromsning av fordonet uppkommer laster i både bron längsled och sidled.

I sidled belastas bron även av vindlast på $1,8 \text{ kN/m}^2$. Angreppshöjden för vinden blir effektiv höjd på brokonstruktionen samt höjden på trafiken som uppskattas till 1,5 m längs hela bron.

Räcket och infästningar för räcket på en GC-bro ska dimensioneras efter en horisontell kraft på $1,0 \text{ kN/m}$ som angriper vinkelrätt räckets överkant.

Bron egenfrekvens ska vara större än 3,5 Hz.

Alla broar går under Säkerhetsklass 3 och Klimatklass 3, dvs. de striktaste klasserna vad gäller säkerhet och klimat.

Partialkoefficienten ($\psi \cdot \gamma$) är 1,5 i brottstadium och 1,0 i bruksstadium, för variabel last enligt Bro -04.

6. Beräkningsförfarande av en bågbro

I de kapitel som följer kommer först brons dimensioner redovisas. I de nästföljande kapitlen redovisas text, bilder och formler, som förklarar bakgrunden till det Excel-underlag som finns som inklipp i texten samt som en bilaga längst bak. I Excel-bladet finns det färgmarkeringar, dessa är:

- Grön
Fyll i variabel
- Orange
Dimensioneringsvillkor
- Blå
Beräknat värde

6.1. Ingångsvärden

Vår bro är en så kallad bågbro med ingångsvärden enligt nedan. Några av värdena var givna från vår handledare Roberto Crocetti redan innan start, men resten har tillkommit under arbetets gång. Bro -04 är den handbok med normer som vi har använt oss av.

Tabell 1

Laster (Bro 2004)					
Brottgänstillstånd Variabel					
last($\psi \cdot \gamma$)		1,500			
Utbredd trafiklast	p	4,000	kN/m ²		
Utbreddtrafiklast	$p \cdot (\psi \cdot \gamma)$	6,00	kN/m ²		
Punktlaster	P1	40,00	kN	P2	80 kN
Punktlaster (brott)	$P_1 \cdot (\psi \cdot \gamma)$	60,00	kN	$P_2 \cdot (\psi \cdot \gamma)$	120,00 kN
Bromskraft längs bron	B	60,00	kN		
Sidokraft av tex. Inbromsning	S	15,00	kN		
Egentyngd trä	g(trä)	6,000	kN/m ³		
Egentyngd stål	g(stål)	77,000	kN/m ³		
Brobredd	b	4,000	m		
Brolängd	l	50,000	m		
Pilhöjd	f	9,000	m		
Spännvidd mellan hängare		1,923	m		

6.1.1. Bestämning av bågförm

För att bågen ska ta upp så lite moment som möjligt krävs att trycklinjen bestäms och att bågförmerna följer trycklinjen så nära som möjligt.

Bågförmerna kan bestämmas med randvillkor:

Exempel (spännvidd $L=50$ m och pilhöjden $f=9$ m):

$$y = Ax^2 + Bx + C$$

$$y(0) = 0 \rightarrow C = 0$$

$$y(50) = 0 \rightarrow 0 = A \cdot 50^2 + B \cdot 50$$

$$B = -50A$$

$$y(50/2) = 9 \rightarrow 9 = A \cdot 25^2 - 50 \cdot A \cdot 25$$

$$A = \frac{9}{25^2 - 50 \cdot 25} = -0,0144$$

$$B = 0,72$$

$$y = -0,0144x^2 + 0,72x$$

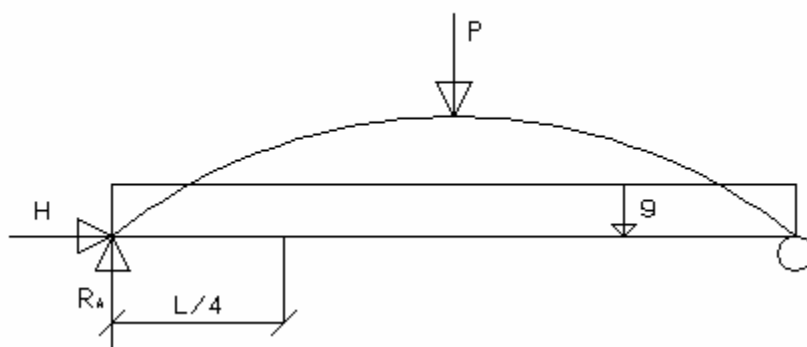
6.1.2. Uppskattning av egentyngd och volym för de olika brodelarna

För att få reda på egentyngd och volym av de olika delarna som bron innehåller har vi gjort rimliga uppskattningar, efter att ha undersökt liknande broar och räknat med de ingångsvärden som vi hade.

6.2. Brottgränstillstånd

6.2.1. Beräkning av krafter och moment i bågen

Vi räknade på en rad olika krafter och moment, nedan har vi spaltat upp dem och försökt förklara hur vi kom fram till resultatet och vilka formler vi använt.



Figur 2

Maximal horisontalkraft, alltså den kraft som verkar från landfästet och in mot bågen. Denna kraft fick vi fram med hjälp av formeln:

$$H_{\max} = 0,13 * (g_0 + p) * \frac{L^2}{f} + 0,25 * P * \frac{L}{f}$$

Formel 1

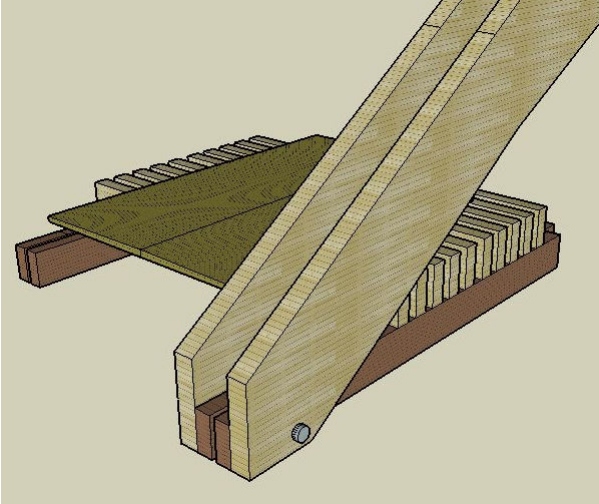
Formeln härleds från den ursprungliga momentekvationen runt hjässan av bågen.

Maximalt moment, alltså det moment som verkar i fjärdedelspunkten. Detta moment fick vi fram med hjälp av formeln:

$$M_{\max} = 0,019 pL^2 + 0,10PL$$

Formel 2

6.2.2. Dimensionering av bågen (med avseende på knäckning)



Figur 3

Beräkningsgången är följande:

1. Bestäm normalkraften (N) i 1/4-delspunkten.
2. Bestäm R_{md}
3. Bestäm teoretisk knäcklängd
4. Bestäm R_{cd} som är beroende av knäcklängden
5. Dimensioneringsvillkoret med avseende på bågens knäckning:

$$\frac{M_{\max}}{R_{md}} + \frac{N}{R_{cd}} \leq 1$$

Formel 3

Om resultatet blir högre än 1 måste större dimension på bågen väljas.

6.2.3. Knäckning vinkelrätt bågplanet

Bågen kan komma att knäcka ut vinkelrätt bågplanet om den kritiska normalkraften överskrids. Bågens kritiska last räknas ut enligt följande formel.

$$N_{0,cr} = 117 * \frac{EI_w}{L^2}$$

Formel 4 (Lateral stability of arch bridges braced with transverse bars, (1954), Lars Östlund)

$N_{0,cr}$ = kritisk normalkraft

E = elasticitetsmodulen limträ

I_w = tröghetsmoment veka leden

L = bronns spännvidd

Tabell 2

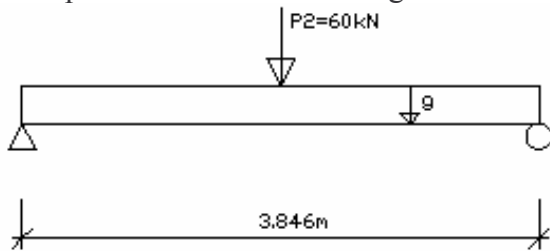
E	10400	Mpa	
I_w	0,00865	m ⁴	
L	50,000	m	
c	117		
$N_{0,cr}$	4208,369	kN	
	$N_{0,cr} > H_{\max}$		OK

6.2.4. Dimensionering av farbanebalkar

Vi räknar med den uppskattade egentyngheden och dimensionerna från kapitel 1. Egentyngden från de delar som belastar farbanebalken adderas. Balken kan tänkas ligga fritt upplagd mellan två hängstag och detta medför att spännvidden (L) blir densamma som avståndet mellan tre hängstag (i vårt fall 3,846 m). Detta kan förklaras med att ett hängstag kan gå av och därför räknar vi med dubbla längden, enligt Bro -04. Vi räknar på tre olika fall och får fram var det dimensionerande momentet respektive den dimensionerande tvärkraften uppstår.

FALL 1

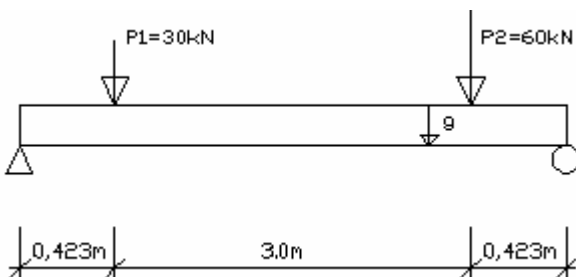
Största punktlasten av renhållningsfordonet är i mitten, Den punktlasten adderas med egentyngden.



Figur 4

FALL 2

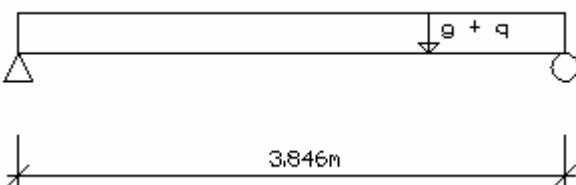
Båda punktlasterna tros befinna sig inom området mellan två hängstag. Dessa punktlaster tillsammans med egentyngden ger belastningen.



Figur 5

FALL 3

Endast utbredd trafiklast + egentyngden:



Figur 6

För de tre fallen fås moment och tvärkraft fram, de största av dessa blir dimensionerande och jämförs med de värden som finns i tabell 2. Om de värden vi har räknat ut blir större än balkens gränsvärden måste större dimension väljas.

Så här ser det ut i Excel-bladet

Tabell 4

Brokonstruktionshöjd	h	0,921	m	
Dim. vindlast på bron	$q_{vind, bro}$	0,995	kN/m	
Dim. vindlast på trafik	$q_{vind, trafik}$	0,972	kN/m	
Total vindlast	$q_{vind, tot}$	1,967	kN/m	
	$q_{vind, tot}$	0,983	kN/m balk	2 balkar!
Moment av vindlast	$S_{myd, vind}$	1,818	kNm	

6.2.6. Beräkning av bromskraft

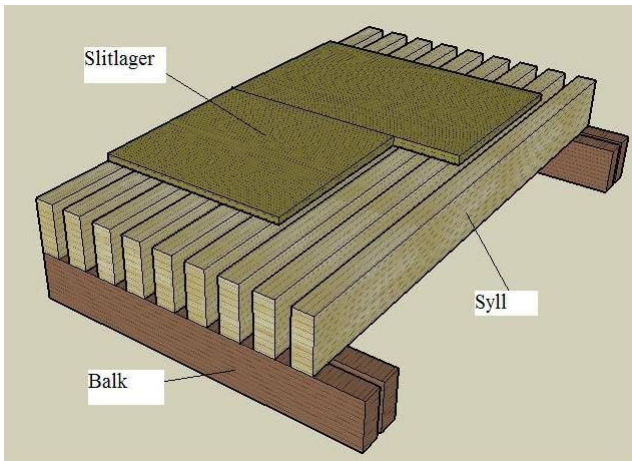
Först beräknas bromskraften, som är hälften av båda punktlasterna alltså $0,5 \cdot (40+80) = 60\text{kN}$. Bromskraften multipliceras sedan med 0,25 för att få sidokraften, denna kraft blir alltså $60 \cdot 0,25 = 15\text{kN}$. (enligt Bro -04)

Så här ser det ut i Excel-bladet

Tabell 5

Sidokraft av inbromsning	S_d	10,500	kN	
Moment av bromssidokraft	$S_{myd, broms}$	10,096	kNm	
	$S_{myd, broms}$	2,524	kNm balk	4 balkar!
Dim. lasteffekt pga inbromsning	S_{cd}	10,500	kN/balk	4 balkar!
Kontroll av böjning i 2 riktningar samt tryckkraft				
$(S_{mxd}/R_{mxd}) + k_m \cdot S_{myd}/R_{myd} + (S_{cd}/R_{cd}) < 1$				
f_{myd}	17,277	Mpa		i 0,117
R_{myd}	31,750	kNm		λ 32,896
f_{cd}	18,848	Mpa		λ_r 0,616
R_{cd}	1236,627	kN		k 0,696
k_m	0,700			Kc1 0,982
R_{mxd}	95,470		LTHandboken	Kc2 1,000
				Kc 0,982
$(S_{mxd}/R_{mxd}) + k_m \cdot S_{myd}/R_{myd} + (S_{cd}/R_{cd}) =$		0,75112		Dim OK!

6.2.7. Dimensionering av syllar



Figur 7 Balkar, syllar och slitlager

För att dimensionera syllarna behövde vi räkna på två olika fall. Beräkningarna går ut på att få fram maximalt moment och maximal tvärkraft i en syll och jämföra detta med det moment och den tvärkraft som syllan klarar enligt tabell i limträhandboken. Först redovisas förutsättningarna i Excel-bladet. Här finns uppgifter om vilka värden på böjmoment som är aktuella samt värden för bredd, höjd och de olika utbredda lasterna.

Tabell 6

Limträsort	L40	g (egentyngd syll)	0,178 kN/m
b	0,066 m	g (egentyngd plank)	0,119 kN/m
h	0,450 m	q (Brottgräns, Trafiklast)	1,800 kN/m
x	1 m	q (Brukgräns, Trafiklast)	1,200 kN/m
R_{md} (från tabell)	45,276 kNm		
R_{vd} (från tabell)	48,783 kN		

FALL 1

I detta fall blir den utbredda lasten q , belastningen från renhållningsfordonet samt egentyngden av syll och slitplank.

$$q_{total} = q_{syll} + q_{slitplank}$$

Formel 6

Vi räknar med två punktlaster, med avståndet L från mitten. Med hjälp av q och punktlasten kan R_A och R_B beräknas, dessa krafter är lika stora på grund av symmetri. Maximalt moment är det samma som momentet i mitten av syllan, detta också beroende av symmetri.

I Excel ser det ut enligt tabellen nedan, här räknas R_A , R_B samt M_{max} ut.

Dessa beräknas med följande formler:

Tvärkraft

$$\uparrow: R_A + R_B - \frac{P_1}{2} - \frac{P_2}{2} - q_{total} * \text{sylllängd} \quad (P_1 \text{ se tabell}_-, \text{ punktlast i brottgränstillstånd})$$

Formel 7

Moment

$$M_{\max} = R_A * \frac{\text{sylllängd}}{2} - \frac{P_1}{2} * L - q_{\text{total}} * \frac{\text{sylllängd}}{2} * \frac{\text{sylllängd}}{4}$$

Formel 8

(L = längden från mitten ut till punktlasten)

Tabell 7

q	0,297	kN/m	
R _a =R _b	30,594	kN	Dim. OK, för tvärkraft
M _{mitt} =M _{max}	30,594	kNm	Dim. OK, för momentet

Längst ut till höger räknar programmet ut om dimensionerna räcker med avseende på tvärkraft och på momentet.

FALL 2

I detta fall blir den utbredda lasten q, trafiklasten samt egentvynghden av syll och slitplank. För övrigt blir beräkningarna i princip likadana som i fall 1 då det fortfarande är symmetri.

Tabell 8

q	2,097	kN/m	
R _A =R _b	4,194	kN/m	Dim. OK, för tvärkraft
M _{mitt} =M _{max}	4,194	kNm	Dim. OK, för momentet

6.2.8. Dimensionering av slitlager

Blir två fall att räkna på för att få fram den utbredda last, ett för renhållningsfordon och egentvynghden från slitlagret, samt ett då trafiklasten kombineras med egentvynghden.

Vid beräkningen tog vi hänsyn till en nedslitning på 10 mm så att bärförmågan står sig tills de måste bytas ut.

Dessa formler använde vi oss av:

$$f_{md} = \frac{\kappa_r * f_{mk}}{\gamma_n * \gamma_m}$$

$$R_{md} = W * f_{md}$$

$$S_{md} = \frac{q * (cc_{\text{syll}})^2}{8}$$

$$q = g_{\text{plank}} + g_{\text{trafik}}$$

Formel 9

Så här ser det ut i Excel-bladet

Tabell 9

Syllar	cc-avstånd	0,300	m		
	bas	0,066	m		
	höjd	0,450	m	Volym	1,782 m ³
	längd	4,000	m	g	0,214 kN/m

Tabell 10

Böjning					
f_{mk}	33,000	Mpa		K_r	0,850
f_{md}	17,277	Mpa		Y_n	1,200
$R_{md}(=W*f_{md})$	9,030	kNm		Y_m	1,150
FALL 1 (ytlast+egentyngd)					
g_{plank}	0,416	kN/m			
g_{trafik}	6,000	kN/m			
S_{md}	0,072	kNm			
			$S_{md} < R_{md}$		OK
FALL 2 (punktlast+egentyngd)					
S_{md}	4,505	kNm			
			$S_{md} < R_{md}$		OK

Vi jämförde R_{md} (längst ner i tabellen ovan), alltså det moment som slitlagret klarar, med de uträknade S_{md} som vi fick i de två fallen. Om S_{md} är större än R_{md} måste dimensionen ökas. I Excel-underlaget kommer det upp "OK" eller "INTE OK" automatiskt.

6.2.9. Dimensionering av räcke

Räckesstolpar väljs, vi valde dimensionen 90x180 mm L40. Höjden över farbanan valde vi till 1,2 m. Stolparna placeras på var sjätte syll, alltså med ett cc-avstånd på 1,8 m. Stolparna fästs i syllarna. Diametern på skruvarna inkräktar på stolparnas höjd, i vårt fall valde vi två skruvar till varje stolpe med 18 mm diameter. Detta gjorde att stolpens höjd 144 mm istället för den ursprungliga 180 mm. När dessa värden har valts kan stolparna dimensioneras. Beräkningarna är följande:

$$P = cc_{avstånd} * (\psi * \gamma) * q_{räcke}$$

$$f_{yd} = \frac{F_s}{D^2 * \pi}$$

$$R_{md} = w * f_{md}$$

$$f_{md} = \frac{\kappa_r * f_{mk}}{\gamma_n * \gamma_m}$$

$$S_{md} = P * (h_{över.farbana} + h_{under.farbana})$$

Formel 10

Detta villkor testas:

$$S_{md} \leq R_{md}$$

Formel 11

$\psi * \gamma = 1,5$ (brottgränstillstånd)

$q_{räcke} = 1$ kN/m, kraft som angriper vinkelrätt mot räckets överkant

$h =$ höjd (m)

Tabell 11

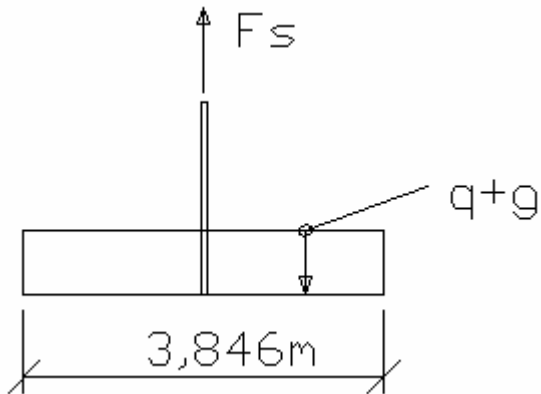
Höjd över farbanan	1,200	m	P	2,700	kN
Avstånd under farbana till infästning	0,400	m	h(stolpe)	0,180	m
D_{skruv} (inskränker på stolphöjd)	0,036	m	b(stolpe)	0,090	m
cc-avstånd(stolpar)	1,800	m			
κ_r	0,850	f_{mk}	33,000		
γ_n	1,200	f_{md}	17,277	Mpa	
γ_m	1,150				
R_{md}	5,374	kNm			
S_{md}	4,320	kNm			
		$S_{md} < R_{md}$	OK		

I Excel-underlaget kommer det upp ”OK” eller ”INTE OK” automatiskt, beroende om det uträknade momentet är större eller mindre i förhållande till det maximala moment som räckesstolparna klarar.

6.2.10. Dimensionering av hängstag

Vi gör beräkningar på två fall, dels då trafiklasten enbart belastar och dels då punktlaster enbart belastar. Då vi räknar med punktlaster tänker vi oss att den största punktlasten befinner sig rakt över ett hängstag och den andra punktlasten är 3m därifrån (avståndet mellan axlarna på renhållningsfordonet). Givetvis räknas egentyngden med i båda beräkningarna. Beräkningsgången för de två fallen redovisas nedan.

FALL 1 (trafiklast + egentyngd)



Figur 8

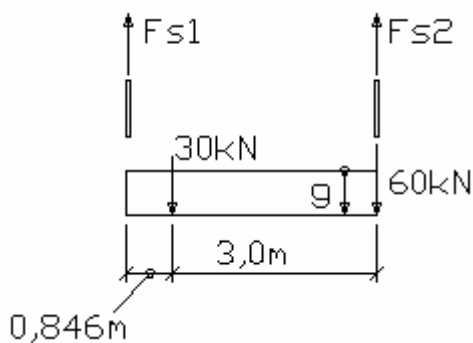
1. Bestäm kraften i hängstaget med hjälp av tvärkraftekvation.
2. Välj stål ur tabell och leta fram f_{yd} , detta värde kan senare behöva ändras.
3. Sätt in f_{yd} i formeln nedan och lös ut diametern på stålet.

$$f_{yd} = \frac{F_s}{D^2 \pi}$$

Formel 12

(Kolla sedan, i samma tabell som i punkt 2, om denna diameter räcker.)

FALL 2 (Punktlaster + egentyngd)



Figur 9

1. Bestäm krafterna i hängstagen med hjälp av tvärkraftekvation.
2. Gör en momentekvation runt det ena staget för att lösa ut en av stagens kraft.
3. Välj stål ur tabell och leta fram f_{yd} , detta värde kan senare behöva ändras.
4. Gör som i punkt 3 i förra fallet.

I Excel-bladet jämförs automatiskt vilket av de båda fallen som ger störst D_{erf} och skriver sedan ut detta värde. Värdet blir också avrundat till en diameter som finns. Så här ser det ut i Excel-bladet

Tabell 12

FALL 1 (trafiklast+egentyngd)			
F_s	58,462	kN	
Ståltyp	2132		
f_{yd}	265,000	Mpa	(Stål 2132 SK3)
D_{erf1}	16,760	mm	
FALL 2 (punktlast+egentyngd)			
$F_{s1}+F_{s2}$	98,464	kN	
F_{s2}	70,831	kN	
D_{erf2}	18,448	mm	
F_{max}	70,831	kN	
D_{erf}	18,448	mm	Avrundat Derf 20 mm

6.2.11. Kontroll om bron tippas över pga. vindlast

Är momentet utav vinden större än momentet utav egenvikten kommer bron tippa över. Teckna en momentekvation runt anfangets ena sida (B).

Utbredd last av egenvikt:

$$q_{et} = \text{syllar} + \text{plank} + \text{balkar}$$

Punktlast av båge:

$$P_{båge} = b_{båge} * h_{båge} * \rho_{trä} * (s_{båge} * 2)$$

Formel 13

Lasten av vinden räknas som en punktlast som angriper parabelbågens tyngdpunkt:

$$e_y = \frac{2}{5} * f$$

Formel 14

$$P_{vind} = 1,8 * h_{båge} * (s_{båge} * 2) * 2$$

Formel 15

$$M_{B,vind} = P_{vind} * e_y$$

Formel 16

$$M_{B,ev} = P_{båge} * l + q_{et} * \frac{l^2}{2}$$

Formel 17

Villkor:

$$M_{B,vind} < M_{B,ev}$$

Är momentet av vinden större bör bron fästas i anfangen för att förhindra att bron tippas över.

6.3. Brukgränstillstånd

6.3.1. Nedböjning av Balkar

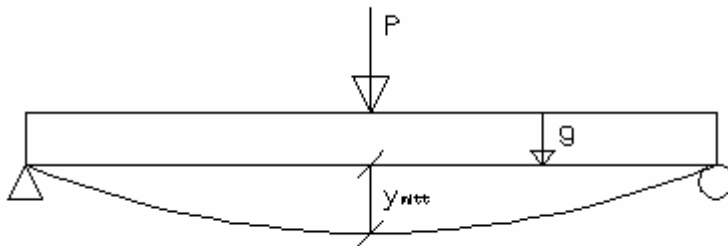
Enligt Bro -04 får inte nedböjningen överstiga längden dividerat på 400. Vår längd blir avståndet mellan två hängstag, då vi räknar på en bit av balken fritt upplagd mellan två hängstag.

$$\text{Nedböjning} = \frac{l}{400} \Rightarrow \frac{\text{mellan.hängstag}}{400}$$

Med detta som utgångspunkt kunde våra beräkningar ta form.

Två fall, ett med renhållningsfordon och egentyngd (balk + syll + plank) och ett fall där trafiklast och egentyngd utgör lasterna.

FALL 1



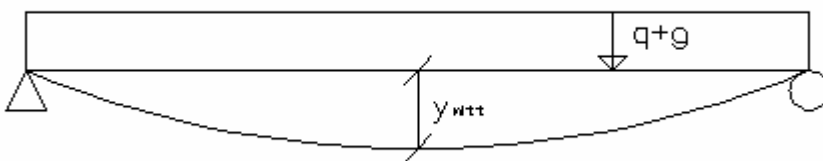
Figur 10

Nedböjningen för fall 1:

$$y_{\text{mitt}} = \frac{Pl^3}{48EI} + \frac{5ql^4}{384EI}$$

Formel 18

FALL 2



Figur 11

Nedböjningen för fall 2:

$$y_{\text{mitt}} = \frac{5ql^4}{384EI}$$

Formel 19

Jämför sedan och se om y_{mitt} är större än y_{max} . I Excel-underlaget kommer det upp ”OK” eller ”INTE OK” automatiskt som illustreras tabellen nedan.

(Nedböjning får ej överstiga L/400)		
y_{max}	9,615	mm
E	13000	N/mm ⁴
$I(b \cdot h^3/12)$	0,000913414	m ⁴
FALL 1 (punktlast + egentyngd)		
y_{mitt}	8,513	mm
	$y_{\text{mitt}} < y_{\text{max}}$	OK
FALL 2 (trafiklast + egentyngd)		
y_{mitt}	2,447	mm
	$y_{\text{mitt}} < y_{\text{max}}$	OK

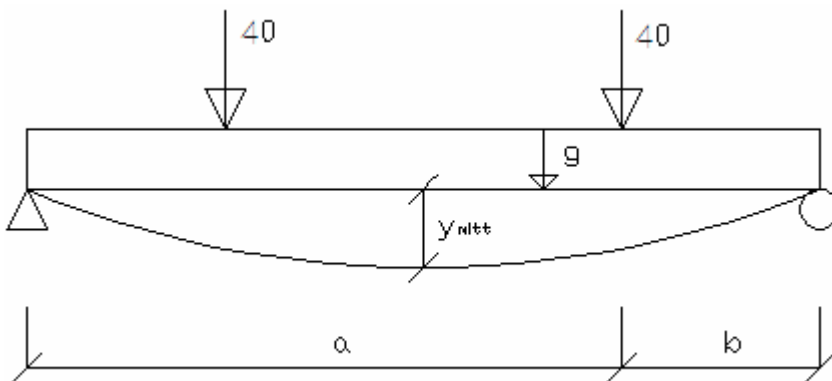
6.3.2. Nedböjning av Syllar

Enligt BRO 04 får inte nedböjningen överstiga längden delat på 400. Nedböjningen är i vårt fall är längden på en syll samma som bredden på bron, alltså 4m.

$$\text{Nedböjning} = \frac{l}{400} \Rightarrow \frac{\text{Sylllängd}}{400}$$

Blir sedan två fall, ett med renhållningsfordon och egentyngd (syll + plank) och ett fall där trafiklast och egentyngd utgör de enda lasterna. Beroende på tvärsnittshöjd och cc-avstånd sprider lasten ut sig på ett antal syllar, i vårt fall två st.

FALL 1



Figur 12

Nedböjningen för fall 1 räknades med formeln

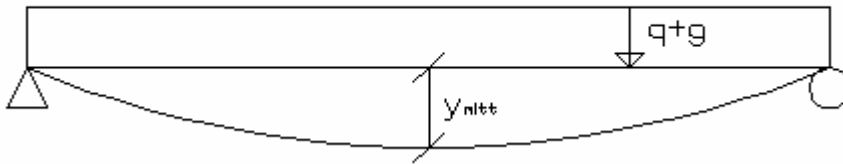
$$y_{\text{mitt}} = 2 \left(\frac{Pb(3l^2 - 4b^2)}{48EI} \right) + \frac{5ql^4}{384EI}$$

Formel 20

Pb = punktlaster

q = egentyngd av syll + slitplank

FALL 2



Figur 13

Nedböjningen för fall 2 räknades med formeln

$$y_{\text{mitt}} = \frac{5 (q_{\text{egentyngd}} + q_{\text{trafiklast}}) l^4}{384EI}$$

Formel 21

l = syllängd

Jämför sedan om y_{mitt} är större än y_{max} . Excel-programmeras för OK eller INTE OK automatiskt. Nedan redovisas Excel-bladet som behandlar detta kapitel

$y_{\text{max}} < L/400$	L/400	10
	I_{syll}	0,00050 m ⁴
	E	10400 Mpa
	P	20

FALL 1 (punktlast+egentyngd)

y_{mitt} 7,083 mm

OK

FALL 2 (trafik+egentyngd)

y_{mitt} 3,965 mm

OK

6.3.3. Egensvängningar i balk

Enligt Bro -04 ska egensvängningarna för en gång- och cykelbro vara minst 3, 5Hz. I Excel-underlaget kommer det upp OK eller INTE OK automatiskt beroende på om det blir tillräckligt med egensvängningar eller inte. För att räkna egensvängningen används formeln

$$f_n = \frac{\pi}{2 * L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

Formel 22

M = egentyngd (balk+syll+slitlager) (kg/m)

L = spännvidd mellan hängstag

E = E-modul (L40)

6.4. Dimensionering av detaljer

6.4.1. Limtråklossar som fäster hängstag i båge

Vi räknar på infästningen för hängstag mellan bågpåren. Dessa två bågar sätts ihop av bult och har en limtråkloss placerad emellan sig. Vi har valt 6 stycken bultar, detta tycker vi verkar rimligt efter att vi undersökt befintliga likartade broar. Först löses diametern på bultarna ut enligt nedanstående formel:

$$V_{rd} = 0,5 * A * f_{yd}$$

Formel 23

Tryckspänningen i klossen respektive bågen:

Kloss:

$$F_{Rcd} = f_{cd} * A$$

Formel 24

$$A = \text{antal bult} * \text{klossbredd} * \pi * r$$

Villkor:

$$F_{scd} \leq F_{Rcd}$$

Formel 25

Båge:

$$F_{Rcd} = f_{cd} * A$$

Formel 26

$$A = \text{antal bult} * (2 * \text{bågbredd}) * \pi * r$$

Villkor:

$$F_{scd} \leq F_{Rcd}$$

Formel 27

Hängstaget fästs med bricka och mutter i klossen. Dimensionering av bricka görs med avseende på trycket på klossen.

Innerdiameter väljs 2mm större än hängstagets diameter.

Addera area på hålet och lös ut yttre diameter ur formeln nedan:

$$F_s = f_{cd} * A_{erf}$$

Formel 28

6.4.2. Dragbandsinfästning

Är grundförhållandena bra kan fundamenten ta upp de stora horisontalkrafterna som uppstår i en treledsbåge. Är grundförhållandena däremot lite sämre måste krafterna tas upp av ett dragband som löper längs hela bron från anfang till anfang. Dragbandsinfästningen överför enbart horisontella krafter i balken. Dragbandet utgörs mestadels i stål men vid mindre horisontella krafter är dragband i trä också ett alternativ.

Nedan följer dimensioneringsprinciper för infästning av dragband av stål.
Diameter på dragbandet löses ut ur formeln:

$$f_{yd} = \frac{H_d}{A_{ef}}$$

Formel 29

f_{yd} = 273 MPA, Stål 2142,44, SK3, antagen godtjocklek 50-70 mm.

H_d = total dimensionerande dragkraft

A_{ef} = Erforderlig area på dragstaget (rundstång)

Dimensionering med avseende på kontakttryckt mellan ankarplåt och balkände (bågände)

$$H_d = f_{cad} * A_{ef}$$

Formel 30

H_d = total dimensionerande dragkraft

f_{cad} = dimensioneringsvärdet på limträbalkens tryckhållfasthet snett mot fiberriktningen

A_{ef} = den effektiva delen av kontaktytan mellan ankarplåt och ändträ

$f_{ck_{L40,0}}$ = 36 MPa

$f_{ck_{L40,90}}$ = 8 MPa

$$f_{cad} = \frac{f_{ck_0}}{\frac{f_{ck_0}}{f_{ck_{90}}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

Formel 31

Den effektiva delen av delen av kontaktytan begränsas av en cirkel med diametern $2c + D$

D = mutterns diameter

c bestäms av uttrycket:

$$c = t_p \sqrt[3]{\frac{E_k}{E_{ak}}}$$

Formel 32

E_k = karakteristiskt värde på ankarplåtens E-modul (210 000 MPa)

E_{ak} = karakteristiskt värde på limträbalkens E-modul vid tryck sned vinkel mot fiberriktningen

t_p = ankarplåtens tjocklek

E_{ak} är E-modulen snett mot fiberriktningen och bestäms med sambandet:

$$E_{\alpha k} = E_{k,0} - (E_{k,0} - E_{k,90}) \sin \alpha$$

Formel 33

Maximal böjspänning i ankarplåten beräknas med följande uttryck:

$$\sigma = \frac{3H_d}{2t_p^2}$$

Formel 34

Dimensioneringsvillkoret med avseende på genomstansning av muttern genom ankarplåten:

$$\tau = \frac{H_d}{\pi * D * t_p} \leq 0,6 f_{yd}$$

Formel 35

6.4.3. Dimensionering av ledad balkskarv i form av ett mellanlägg

Dimensioneringsvillkoret med avseende på kontakttryck mellan bågände och mellanlägg lyder:

$$\frac{H_d}{b(2h)} + \frac{V_d(l+t_2)}{bh(h+t_1)} \leq f_{cd,0}$$

Formel 36

V_d = dimensionerande tvärkraft i hjässan

H_d = tillhörande horisontell tryckkraft

b = mellanläggets längd \approx balkbredd (bågbredd)

h = mellanläggets höjd på en vertikal skänkel

Dimensioneringsvillkoret med avseende på plätens hållfasthet lyder:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq f_{yd}$$

Formel 37

σ = normalspänningen i en viss punkt på mellanlägget

τ = skjuvspänningen i samma punkt

Maximal böjspänning och skjuvspänning beräknas enligt följande formler:

$$\sigma_{\max} = \frac{\frac{V_d * l}{2}}{(b * t_1^2) / 6}$$

Formel 38

$$\tau_{\max} = 1,5 \frac{V_d}{b * t_1}$$

Formel 39

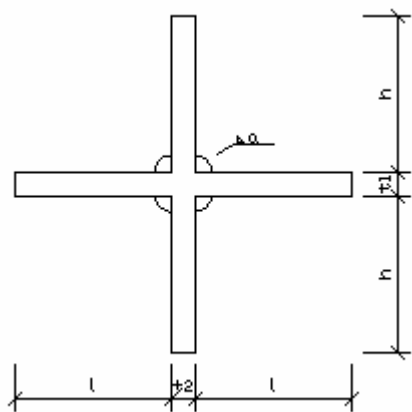
Mellanlägget utförs med kälsvetsar och skjuvspänningarna i svetsen beräknas med följande uttryck:

$$\sigma = \frac{\frac{V_d * l}{2}}{b * t_1 * a \sqrt{2}} + \frac{V_d}{b * a \sqrt{2}}$$

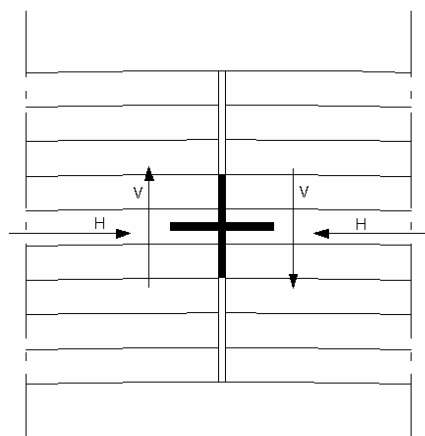
Formel 40

$$\tau = \frac{\frac{V_d * l}{2}}{b * t_1 * a \sqrt{2}} - \frac{V_d}{b * a \sqrt{2}}$$

Formel 41



Figur 14



7. Avslutning

Under vårt arbete har vi fått nya kunskaper inom brodimensionering och då särskilt inom bågbroar för gång och cykeltrafik. Arbetet har också givit oss inblick i limträindustrin och vilka konstruktioner som väl lämpar sig att byggas i limträ. Eftersom de allra flesta beräkningar har förts över till Excel har vi också fått bättre kunskaper i detta program.

Det svåraste i arbetet har varit utformningen av detaljer och dimensioneringen av dessa. Över lag tycker vi att dessa månader har varit mycket intressanta och lärorika. Vi har verkligen fått möjlighet att använda mycket av vår kunskap, som vi samlat på oss under våra tre år på Chalmers, i denna verklighetsbaserade uppgift.

8. Referenser

8.1. Litteratur

Savolainen, A och H Rautakorpi, Jutila (ÅR), *Arch Bridges for Pedestrian Traffic*, Helsinki

University of Technology, Helsinki

Johannesson, P och B Vretblad (2002), *Byggformler och tabeller*, Stockholm

Carling, Olle (2001), *Limträhandboken*, Stockholm

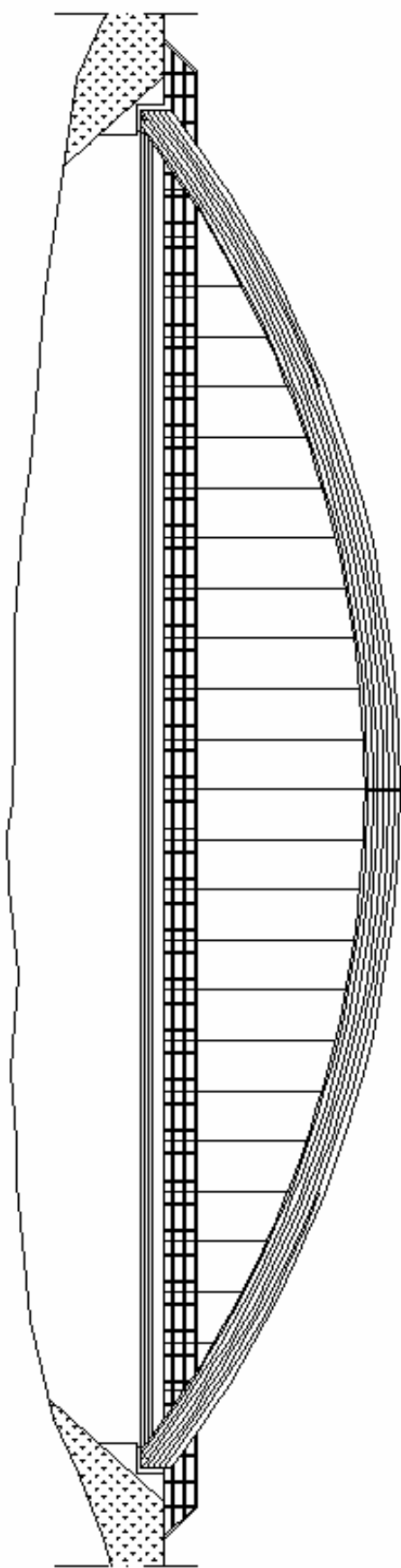
Lorentsen M, Sundquist H (1995), *Bågkonstruktioner*, Institutionen för byggkonstruktion, Stockholm

Rehnström, Börje (2001), *Formler och tabeller för byggkonstruktioner*, Karlstad

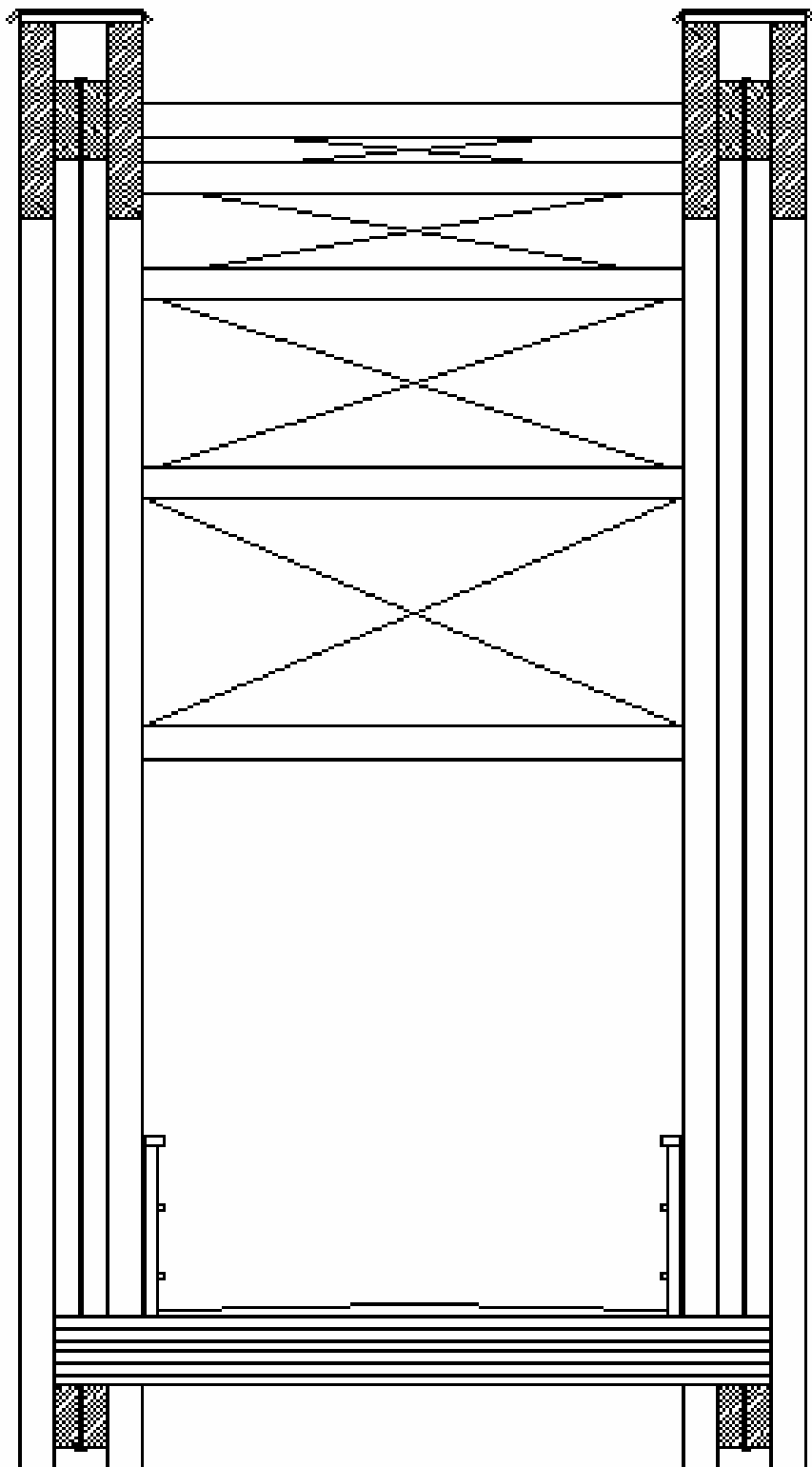
Östlund, Lars (1954), *Lateral stability of bridge arches braced with traverse bars*, Elanders boktryckeri, Göteborg.

8.2. Muntliga källor

Roberto Crocetti, Konstruktör, Moelven Töreboda, Studiebesök 22 februari 2005 på Moelvens limträfabrik i Töreboda



Bilaga 1 (vy av bron i längdled)



Bilaga 2 (vy av bron i sidled)

Dimensionering av GC-Bro med Limträbåge

- Fyll i variabel
- Dimensioneringsvillkor
- Beräknat värde

Laster (Bro 2004)

Brottgränstillstånd	Variabel last($\psi \cdot \gamma$)	1,500		
Utbreddtrafiklast	p	4,000 kN/m ²		
Utbreddtrafiklast	$p^*(\psi \cdot \gamma)$	6,00 kN/m ²		
Punktlaster	P1	40,00 kN	P2	80 kN
Punktlaster (brott)	$P_1^*(\psi \cdot \gamma)$	60,00 kN	$P_2^*(\psi \cdot \gamma)$	120,00 kN
Bromskraft längs bron	B	60,00 kN		
Sidokraft av tex. Inbromsning	S	15,00 kN		
Egentyngd trä	g(trä)	6,000 kN/m ³		
Egentyngd stål	g(stål)	77,000 kN/m ³		
Brobredd	b	4,000 m		
Brolängd	l	50,000 m		
Pilhöjd	f	9,000 m		
Spännvidd mellan hängare		1,923 m		

Uppskattning av egentyngd och Volym limträ

Båge	bas	0,215 m		
	höjd	1,305 m		
	s (båglängd/2)	27,017 m	Volym	60,642 m ³
	antal bågar	4,000	g	7,277 kN/m
Balk	bas	0,165 m		
	höjd	0,405 m		
	längd	50,000 m	Volym	13,365 m ³
	antal balkar	4,000	g	1,604 kN/m
Syllar	cc-avstånd	0,300 m		
	bas	0,066 m		
	höjd	0,450 m	Volym	1,782 m ³
	längd	4,000 m	g	0,214 kN/m
Slitlager	höjd	0,066 m	Volym	13,200 m ³
	bredd	4,000 m	g	1,584 kN/m
Trästag i båge	bredd	0,215 m		
	höjd	0,215 m		
	längd	4,000 m	Volym	1,849 m ³
	antal	10,000	g	0,222 kN/m
Räcke	Last (Bro -04)			
	h(räckestolpe)	0,18 m		
	b(räckestolpe)	0,09 m	g	1,000 kN/m
Hängare	Diameter	0,025 m	10mm<D<25mm	
	Antal	50 st	Volym	0,110 m ³
	Uppskattad längd	225,009 m	g	0,170 kN/m
Kryss (båge)	Antal	16,000 st		
	Diameter	0,036 m	Volym	0,184 m ³
	Längd	5,657 m	g	0,284 kN/m
			g_{tot}	12,354 kN/m
	Effektiv egentyngd B/2)		g_{tot}	6,177 kN/m

Beräkning av krafter och moment

P	180,000 kN	g_{tot}	6,177 kN/m
l	50,000 m	p	6,000 kN/m ²
f (pilhöjd)	9,000 m		

Maximal horisontalkraft

$$H_{max} = 0,13 \cdot (g_0 + p) \cdot (L^2/f) + 0,25 \cdot P \cdot L/f$$

$$H_{max} = 781,400 \text{ kN}$$

Maximalt moment

$$M_{max} = 0,019 \cdot p \cdot L^2 + 0,1 \cdot P \cdot L$$

$$M_{max} = 1020,000 \text{ kNm}$$

gäller i 1/4-delspunkten

Dimensionering (med avseende på knäckning)

Normalkraft i 1/4-delpunkten

q	18,177 kN/m	fck	36,000 MPa
RA	499,431 kN	Kr	0,850
N (1/4)	827,458 kN	γ_m	1,150
fmk	33,000 Mpa	γ_n	1,200
fmd	20,326		
W	0,061	Rmd	1,240 Mpa

Knäcklängd (teoretisk) l_{cr}

f/l	0,18		
l_{cr} om $(f/l) < 0,3$	31,694		
l_{cr} om $(f/l) > 0,3$	29,324	l_{cr}	31,694
i	2,654		
λ	11,940		
k	0,511	Kc1	1,030
λ_r	0,224	Kc2	1,000
Kc	1,000	fcd	22,174
		Rcd	6,221

Kontroll av tryck + böjning

Om $(M_{max}/R_{md} + N/R_{cd} < 1)$ så är det OK

$$(M_{max}/R_{md} + N/R_{cd}) = 0,955$$

Dim. OK!

Bestämning av bågform

$$y = -(1/2)(qx^2/H) + Ax + B$$

$(1/2)(q/H)$	-0,014		
A	0,710		
B	0,000		
pilhöjden $y(L/2) = f$	8,869 m	Ligger f nära antagen pilhöjd, OK	
$y'(0)$	0,710 rad		
$y'(0)$	40,654 grader		

Dimensionering av farbanebalkar

Antar dimension	bas	0,165 m	fvd	2,464
	höjd	0,405 m	Rvd	109,761 kN
			Rmxd	91,685 kN

Effektiv egentyngd av farbana (balk+syll+slitlager etc.)	gf	2,201 kN/m
spännvidd	L	3,846 m

Fall 1 (Punktlast i mitten av renhållningsfordon + egentyngd)

RA	34,232 kN
RB	34,232 kN
Smxd	61,759 kNm

Fall 2 (Båda punktlasterna medverkar av renhållningsfordon + egentygnd)

RA	37,532 kN	
RB	60,933 kN	
x0	3,422 m	från vänster stöd
z	0,423 m	avstånd mellan last och stöd
Smxd	25,578 kNm	

Fall 3 (ytlast + egentygnd)

RA	10,001
RB	10,001
Smxd	26,257 kNm

Dim. böjmomentS_{mx}d 61,759 kNm**Dim. tvärkraft**T_{max} 60,933 kN

Om Smxd < Rmx d OK!

Dim. OK!

Om Tmax < Rvd OK!

Dim. OK!

Beräkning av moment orsakat av vindlast

Brokonstruktionshöjd	h	0,921 m	
Dim. vindlast på bron	q _{vind, bro}	0,995 kN/m	
Dim. vindlast på trafik	q _{vind, trafik}	0,972 kN/m	
Total vindlast	q _{vind, tot}	1,967 kN/m	
	q _{vind, tot}	0,983 kN/m balk	2 balkar!
Moment av vindlast	S _{myd, vind}	1,818 kNm	

Beräkning av moment orsakat av bromsning

Sidokraft av inbromsning	S _d	10,500 kN	
Moment av bromssidokraft	S _{myd, broms}	10,096 kNm	
	S _{myd, broms}	2,524 kNm balk	4 balkar!
Dim. lasteffekt pga inbromsning	S _{cd}	10,500 kN/balk	4 balkar!

Kontroll av böjning i 2 riktningar samt tryckkraft

$$(S_{mx}d/R_{mx}d) + k_m \cdot S_{my}d/R_{my}d + (S_{cd}/R_{cd}) < 1$$

f _{myd}	17,277 Mpa	i	0,117
R _{myd}	31,750 kNm	λ	32,896
f _{cd}	18,848 Mpa	λ _r	0,616
R _{cd}	1236,627 kN	k	0,696
k _m	0,700	Kc1	0,982
R _{mx} d	95,470	Kc2	1,000
	LTHandboken	Kc	0,982

$$(S_{mx}d/R_{mx}d) + k_m \cdot S_{my}d/R_{my}d + (S_{cd}/R_{cd}) =$$

0,75112

Dim OK!

Dimensionering av Syllar.

Limträsort	L40	g _(egentyngd syll)	0,178 kN/m
b	0,066 m	g _(egentyngd plank)	0,119 kN/m
h	0,450 m	q _(Brottgräns, Trafiklast)	1,800 kN/m
x	1 m		
R _{md} (från tabell)	45,276 kNm	q _(Brukgräns, Trafiklast)	1,200 kN/m
R _{vd} (från tabell)	48,783 kN		

FALL 1 (renhållningsfordon + egentyngd)

$$q = 0,297 \text{ kN/m}$$

$$R_a=R_b = 30,594 \text{ kN}$$

$$M_{\text{mitt}}=M_{\text{max}} = 30,594 \text{ kNm}$$

Dim. OK, för tvärkraft
Dim. OK, för momentet

FALL 2 (trafiklast + egentyngd)

$$q = 2,097 \text{ kN/m}$$

$$R_A=R_b = 4,194 \text{ kN/m}$$

$$M_{\text{mitt}}=M_{\text{max}} = 4,194 \text{ kNm}$$

Dim. OK, för tvärkraft
Dim. OK, för momentet

Dimensionering av Slitlager, (tar hänsyn till 10mm nedslitning)**Böjning**

f_{mk}	33,000 Mpa	K_r	0,850
f_{md}	17,277 Mpa	Y_n	1,200
$R_{md}(=W \cdot f_{md})$	9,030 kNm	Y_m	1,150

FALL 1 (ytlast+egentyngd)

$$g_{\text{plank}} = 0,416 \text{ kN/m}$$

$$g_{\text{trafik}} = 6,000 \text{ kN/m}$$

$$S_{md} = 0,072 \text{ kNm}$$

$$S_{md} < R_{md}$$

OK

FALL 2 (punktlast+egentyngd)

$$S_{md} = 4,505 \text{ kNm}$$

$$S_{md} < R_{md}$$

OK

Dimensionering av Räcke, (stolpe på var sjätte syll)

Höjd över farbanan	1,200 m	P	2,700 kN
Avstånd under farbana till infästning	0,400 m	h(stolpe)	0,180 m
D_{skruv} (inskränker på stolphöjd)	0,036 m	b(stolpe)	0,090 m
cc-avstånd(stolpar)	1,800 m		

K_r	0,850	f_{mk}	33,000
Y_n	1,200	f_{md}	17,277 Mpa
Y_m	1,150		

$$R_{md} = 5,374 \text{ kNm}$$

$$S_{md} = 4,320 \text{ kNm}$$

$$S_{md} < R_{md}$$

OK

Nedböjning av Balkar. (Bruksgräns-tillstånd)**(Nedböjning får ej överstiga L/400)**

$$y_{\text{max}} = 9,615 \text{ mm}$$

$$E = 13000 \text{ N/mm}^2$$

$$I(b \cdot h^3 / 12) = 0,000913414 \text{ m}^4$$

FALL 1 (punktlast + egentyngd)

$$y_{\text{mitt}} = 8,513 \text{ mm}$$

$$y_{\text{mitt}} < y_{\text{max}}$$

OK

FALL 2 (trafiklast + egentyngd)

$$y_{\text{mitt}} = 2,447 \text{ mm}$$

$$y_{\text{mitt}} < y_{\text{max}}$$

OK

Nedböjning av Syllar (Bruksgräns-tillstånd)

$$y_{\text{max}} < L/400$$

$$L/400 = 10$$

$$I_{\text{syll}} = 0,00050 \text{ m}^4$$

$$E = 10400 \text{ Mpa}$$

$$P = 20$$

FALL 1 (punktlast+egentyngd)

$$y_{\text{mitt}} = 7,083 \text{ mm}$$

OK

FALL 2 (trafik+egentyngd)

$$y_{\text{mitt}} = 3,965 \text{ mm}$$

OK

Egensvängningar balk, (Mer än 3,5Hz enligt Bro 04)

$$E = 10400 \text{ Mpa}$$

$$I = 0,00091 \text{ m}^4$$

$$f_n = 21,862 \text{ Hz}$$

$$f_n > 3,5 \text{ Hz}$$

OK

Dimensionering av Hängstag, (två fall)**FALL 1 (trafiklast+egentyngd)**

$$F_s = 58,462 \text{ kN}$$

$$\text{Ståltyp} = 2132$$

$$f_{yd} = 265,000 \text{ Mpa}$$

(Stål 2132 SK3)

$$D_{\text{erf1}} = 16,760 \text{ mm}$$

FALL 2 (punktlast+egentyngd)

$$F_{s1} + F_{s2} = 98,464 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = 70,831 \text{ kN}$$

$$D_{\text{erf2}} = 18,448 \text{ mm}$$

$$F_{\text{max}} = 70,831 \text{ kN}$$

$$D_{\text{erf}} = 18,448 \text{ mm}$$

Avrundat Derf = 20 mm

Limtråklossar som fäster hängstag i båge

Antal skärningar per bult = 2 st

Antal bult

6 st

$$f_{yd} = 273 \text{ Mpa}$$

$$A_{\text{erf}} = 43 \text{ mm}^2$$

$$D = 7,420 \text{ mm}$$

Avrundat Derf = 8 mm

Tryckspänning i kloss från genomskärande bult

$$f_{cd} \text{ (parallellt fibre)} = 22,174 \text{ Mpa}$$

$$A = 27143 \text{ mm}^2$$

$$F_{Rcd} = 602 \text{ kN}$$

$$F_{Scd} = F_{\text{max}} \text{ för hängstag}$$

$$F_{Scd} < F_{Rcd}$$

OK

Tryckspänning i båge från genomskärande bult

f_{cd} (vinkelrät fibre)ma)	4,928 Mpa
A	60 mm ²
F_{Rcd}	296 kN

$F_{Rcd}=F_{max}$ för hängstag

$$F_{Scd} < F_{Rcd}$$

OK

Bricka

f_{cd}	22,174 Mpa
A_{erf}	3194,350 mm ²
D_{ytter}	67,463 mm
D_{inner}	22,000 mm

Kontroll om hela bron tippar över på grund av vindlast

g	1,190475 kN/m
P	91,964 kN
Pvind	253,852 kN
MB,vind	913,868 kNm
MB,båge,g	-844,045 kNm

$$MB, \text{vind} + MB, \text{båge} < 0$$

Bron måste fästas vid anfang

Knäckning vinkelrätt bågplanet

E	10400 Mpa
low	0,00865 m ⁴
L	50,000 m
c	117
No,cr	4208,369 kN

$$No,cr > H_{max}$$

OK

Dragband

H_{max}	781,400 kN
f_{yd}	258,000 Mpa
D_{erf}	43,910 mm
D_{mutter}	66 mm

Avrundat D_{erf} 44 mm

Ankarplåt

$f_{ck_{L40,0}}$	36,000 Mpa
$f_{ck_{L40,90}}$	8,000 Mpa
$f_{ca_{k_{L40}}}$	14,484 Mpa
$f_{cd_{L40}}$	8,921 Mpa
A_{erf}	87587,95 mm ²
D_{erf}	333,418 mm

Avrundat D_{erf} 334 mm

Effektiv kontaktyta=2c+D

$E_{k, \text{stål}}$	210000 Mpa
$E_{k_{L40}}$	13000 Mpa
$E_{k_{L40(90)}}$	450 Mpa
E_{ak}	4824 Mpa
c	133,709
t_{p1erf}	38,009 mm

Dim map genomstansning av mutter

f_{yd}	273,000 Mpa
0,6 f_{yd}	163,800 Mpa
t_{p2erf}	23,008 mm

Dim map böjning i plåten

f_{yd} 273,000 Mpa
t_{p3erf} 2,363 mm

t_{perf} 38,009 mm

Avrundat t_p 39 mm

Mellanlägg i nock

Effektiv utbredd trafiklast

q 12,000 kN/m
RA+RB 300,000 kN
RA 75,000 kN
RB 225,000 kN
V_{d1} 75,000 kN

Punklaster från renhållningsfordon.

RA+RB 90,000 kN
RA 39,739 kN
RB 50,261 kN
V_{d2} 39,739 kN

V_d 75,000 kN

Dimensionering map kontaktryck

f_{cd} 22,174 Mpa
H_d 781,400 kN
b(~bågbredden) 215,000 mm
h(båghöjd/6) 217,500 mm
l 217,500
t₁ 30,000 mm
t₂ 30,000 mm
F_{scd} 9,959 Mpa
F_{Scd} < F_{cd}

OK

Dimensionering map plåtens hållfasthet

σ_{max} 252,907 Mpa
T_{max} 17,442 Mpa
Stål 2142,44 f_{yd} 288 Mpa
 $\sigma_{\max}^2 + 3T_{\max}^2 < f_{yd}^2$

OK

Dimensionering map svetsar

a 8,000 mm
b 215,000
t₁ 30,000
σ 142,603
τ 80,937
 $\sigma_{\max}^2 + 3T_{\max}^2 < f_{yd}^2$

OK