



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Porten till Söderköping

Konceptuell design och preliminär dimensionering

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

ERIK DEBORG

JAKOB ENGSTRÖM

MARKUS JOHANSSON

SEBASTIAN KNUTSSON

VENDELA LÖNKVIST

HANNA SEGERHOLM

Porten till Söderköping

Konceptuell design och preliminär dimensionering

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik

ERIK DEBORG

JAKOB ENGSTRÖM

MARKUS JOHANSSON

SEBASTIAN KNUTSSON

VENDELA LÖNKVIST

HANNA SEGERHOLM

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Sammanfattning

I denna rapport har ett förslag till en bro som korsar E22 utanför Söderköping tagits fram. Syftet med den färdiga bron var att erbjuda en lämplig överfart över motorvägen då denna dras om runt staden och samtidigt skulle fungera som en port till Söderköping. Detta gör att inte bara bronns funktion var viktig utan också att den gav ett tilltalande estetiskt intryck.

För att ta fram ett lämpligt broförslag bedömdes flera olika typer av broar samt byggmaterial i två urval. Bron granskades utifrån tre specialistgruppers perspektiv – beställare, produktion och underhåll. Det första urvalet var en grov utsortering som syftade till att eliminera olämpliga brotyper för platsen och skapa ett varierat slutligt urval. Slutkandidaterna granskades sedan mer noggrant och värderades enligt viktade kriterier som stämmer överens med vad specialistgrupperna bedömde som viktigast.

Efter de två valen ansågs den mest lämpliga typen av bro för platsen vara en asymmetrisk snedkabelbro med halv-solfjäderform. Pylonerna och brodäcket kommer att konstrueras i armerad betong med längs- och tvärgående stålbalkar runt och under brodäcket. Ett kabelsystem med fem bärande kablar på vardera sida av huvudpylonerna överför sedan lasterna från brodäcket till var och en av pylonerna. Bron har en huvudspännvidd på 36 meter och ett sidospänn på 12 meter. Den fria höjden under bron blev 5,8 meter och höjden på pylonerna blev 14 meter från ovansidan av brodäcket.

Den slutliga bron uppfyller alla de krav som ställts gällande hållfasthet och deformation. Designen ger ett behagligt estetiskt intryck och ger ett tillfredsställande resultat på det givna problemet. Det skulle kunna hävdas att valet av en snedkabelbro är för dyrt att bygga när det kommer till ett verkligt projekt. Detta då en snedkabelbro har en mer komplex och kostsam konstruktion, men det har förbisetts då budgeten har spelat mindre roll än bronns estetik, en aspekt som genomsyrat projektets gång.

Nyckelord: Snedkabelbro, brokonstruktion, betong, stål.

Omslag: Illustration av snedkabelbro över väg E22 (Deborg. E)

The gate to Söderköping
Conceptual and preliminary design
Bachelor's thesis
Building and Civil Engineering

ERIK DEBORG
JAKOB ENGSTRÖM
MARKUS JOHANSSON
SEBASTIAN KNUTSSON
VENDELA LÖNKVIST
HANNA SEGERHOLM

Department of Architecture and Civil Engineering
Chalmers University of Technology

Abstract

In this report a proposal for a bridge crossing the motorway E22 outside of Söderköping has been developed. The purpose of the completed bridge is to offer a convenient crossing over the motorway as this is redirected around the town and act as a gate to Söderköping. This gives that not only the function of the bridge is important but also that it brings a pleasant aesthetic impression.

To develop a suitable bridge proposal several different types of bridges as well as building materials was assessed in two selections. The bridge was examined out of the perspectives of three specialist groups – project planning, production, and maintenance. The first selection was of a coarse type which aimed to eliminate unsuitable types and create a diverse number of choices for the final selection. The final candidates were examined more thoroughly and assessed according to weighted criteria that match what the specialist groups deemed the most important.

Post the two selections the most suitable type of bridge for the location was deemed to be an asymmetric half fan-like cable stayed bridge. The pylons and bridge deck would be constructed in reinforced concrete with support of lengthwise running steel beams. A cable system with five loadbearing cables on each side of the main pylons would then transfer the loads from the bridge deck to the each of the pylons. The bridge has a main span of 36 meters and a sub span of 12 meters. The free height under the bridge was set to 5.8 meters and the height of the pylons resulted in 14 meters from the top of the bridge.

The final bridge met all the requirements set beforehand in strength as well as deformations and the design offered a pleasant aesthetic impression. The conclusion could be drawn that this is a satisfactory proposal to the given problem. It could be argued that the choice of a cable stayed bridge is too expensive when it comes to a real-life project. This since it comes with a complex and costly construction. However, the choice of the cable stayed bridge outweighed the other candidates in other criteria especially in aesthetics. This resulted in it being the most suitable concept in this project where the budget could be disregarded.

Key words: Cable stayed bridge, bridge construction, concrete, steel.

Cover: Illustration of cable stayed bridge over motorway E22 (Deborg. E)

Förord

Denna rapport är utförd av sex civilingenjörstudenter som studerar tredje året på programmet Samhällsbyggnadsteknik (TKSAM) på Chalmers tekniska högskola. Arbetet är det avslutande examinationsmomentet på kandidatprogrammet. Rapporten innefattar en litteraturstudie av olika brokoncept som utvecklas till ett slutgiltigt brokoncept. Det utförs preliminära beräkningar utifrån angivna förutsättningar och vidare en lämplig utformning av bron.

De kunskaper som vi inhämtat under grundutbildningen har tillämpats på rapporten. För att komplettera våra kunskaper har vi fått stor hjälp från utomstående personer som brokonstruktörer på företaget COWI och broföreläsare. Vi har genom detta arbete fördjupat våra kunskaper inom brokonstruktioner och förstärkt förmågan till att arbeta i större projekt.

Vi vill rikta ett stort tack till Mozdeh Amani för handledning genom projektet. Tack också till brokonstruktörer Staffan Lindén, Marcus Davidsson och Sabiha Fasth på COWI som hjälpt till mycket med urval och dimensionering. Tack till alla passionerade föreläsare som under projektets gång bidragit med mycket kunskap och inspiration. Tack Mats Ander och Mohammad Al-Emrani för tillgänglig expertis inom specifika områden. Slutligen tack till A-verkstadens personal som hjälpt oss med modellbygge.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	II
Abstract	IV
Förord	V
1. Inledning	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte	2
1.3 Målbild.....	2
1.4 Avgränsningar.....	2
1.5 Metod	2
1.6 Samhälleliga och etiska aspekter	3
2. Grundläggande förutsättningar	4
2.1 Geometriska förutsättningar	4
2.2 Geotekniska förutsättningar	4
2.3 Aktuell belastning.....	4
2.4 Platsförutsättningar	4
3. Förutsättningar och krav från aktörer	5
3.1 Beställare och konstruktion.....	5
3.2 Produktion.....	5
3.3 Förvaltning och underhåll.....	6
4. Brotyper	7
4.1 Hängbro	7
4.2 Snedkabelbro.....	7
4.3 Fackverksbro.....	7
4.4 Bågbro.....	8
4.5 Plattbro	8
4.6 Balkbroar	9
4.6.1 Betongbalkbro.....	9
4.6.2 Samverkansbro.....	9
4.7 Rambroar	9
4.7.1 Plattrambro.....	10
4.7.2 Balkrambro	10
5. Urval 1	11
5.1 Val av brotyper.....	11
5.2 Utveckling av brokoncept.....	12
5.2.1 Snedkabelbro	12
5.2.2 Bågbro med överliggande båge.....	13
5.2.3 Balkbro.....	13
5.2.4 Rambro.....	14
6. Urval 2	15

6.1	Bedömningskriterier.....	15
6.2	Viktning av bedömningskriterier.....	15
6.3	Slutlig bedömning av brokoncept.....	16
7.	Slutligt brokoncept	17
7.1	Konstruktion.....	17
7.1.1	Brodäck, pyloner och kablar	17
7.1.2	Underbyggnad.....	18
7.2	Produktion.....	18
7.3	Förvaltning och underhåll.....	19
7.3.1	Stålbalkar, anslutningar och stålkablar	19
7.3.2	Betongelement	19
7.3.2	Vägbana	19
8.	Beräkningsmodell	20
8.1	Systemmodell.....	20
8.2	Dimensionerande laster	20
8.2.1	Egenvikt	20
8.2.2	Vindlast.....	20
8.2.3	Trafiklast.....	20
8.2.4	Olyckslast.....	21
8.2.5	Lastkombinationer	21
9.	Preliminär dimensionering	22
9.1	Farbanan.....	22
9.2	Tvärbalkar.....	22
9.2.1	Brottgräns.....	22
9.2.2	Bruksgräns	23
9.3	Längsgående balkar	23
9.3.1	Brottgräns.....	23
9.3.2	Bruksgräns	23
9.4	Kablar	24
9.5	Infästningar.....	24
9.5.1	Infästning på längsgående balkar	24
9.5.2	Infästning på pylon	24
9.5.3	Infästning betongankare.....	25
9.6	Pyloner.....	25
9.7	Skarvning av längsgående balkar	26
9.8	Översiktlig utformning	27
10.	Diskussion.....	28
10.1	Urvalsprocess.....	28
10.2	Dimensioneringsprocess	28
10.3	Användning av litteratur	29
11.	Slutsats.....	30
	Litteraturförteckning	31
	Bilagor	34

<i>Bilaga 1 – Konstruktionsmaterial</i>	34
1.1 Betong.....	34
1.2 Stål.....	34
1.3 Trä.....	35
<i>Bilaga 2 – Underlagsritning</i>	36
<i>Bilaga 3 – Bild av modell</i>	37
<i>Bilaga 4 – Lastberäkningar</i>	38
<i>Bilaga 5 – Dimensionering av betongplatta</i>	41
<i>Bilaga 6 – Modellering Tvärbalk (ULS)</i>	46
<i>Bilaga 7 – Kontroll kapacitet för I-balkar & Svets-anslutningar</i>	51
<i>Bilaga 8 – Modellering Tvärbalk (SLS)</i>	58
<i>Bilaga 9 – Modellering Längsgående balk & Kablar (ULS)</i>	58
<i>Bilaga 10 – Modellering Längsgående balk & Kablar (SLS)</i>	58
<i>Bilaga 11 – Dimensionering av svets-anslutning för öra</i>	63
<i>Bilaga 12 – Dimensionering av pylontvärbalk</i>	65
<i>Bilaga 13 – Dimensionering av pyloner</i>	69
<i>Bilaga 14 – Förbandsdimensionering</i>	74

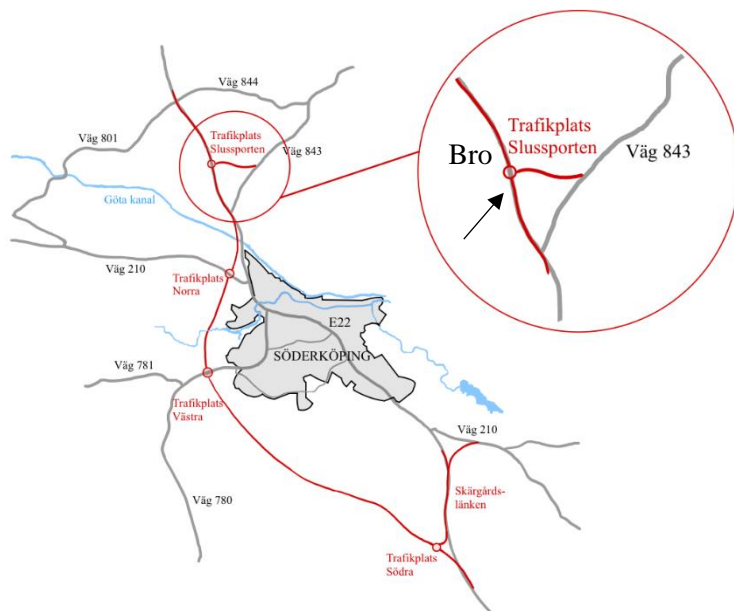
1. Inledning

Sverige genomgår en ständig urbanisering då fler människor flyttar från landsbygden in till tätorter. Detta medför att lite större vägar belastas med mer trafik som medför att vägnätet behöver förbättras för att människor och gods ska komma fram smidigt, säkert och tryggt (Trafikverket, 2017). Det är även viktigt att bygga vägar i förhoppningen att förhindra olyckor, minska buller och förseningar. I Sverige finns det cirka 17 000 vägbroar som Trafikverket har ansvar att förvalta (Trafikverket, 2023). Detta leder till att det är viktigt att bygga broar som är samhällsekonomiskt lönsamma och som kan göras genom att exempelvis bygga broar med lång livslängd och som är enkla att underhålla.

1.1 Bakgrund

Trafikverket har anlitat företaget COWI i uppdrag att konstruera och anlägga en vägbro utanför Söderköping. I sin tur har COWI bett vår kandidatgrupp att genomföra en förstudie av området och utforma ett lämpligt brokoncept.

Det har länge funnits intresse för att leda om E22 runt Söderköping eftersom det på grund av åtskilda trafiksituationer skapas en flaskhals in till staden, främst under sommarhalvåret (Trafikverket, 2019a). Strax norr om Söderköping skapar väg 843 en länk ut till Östra Husby och vidare mot Vikbolandet. Vidare ansluter väg 843 i nuläget till E22 genom trafikplats Klevbrinken, men detta kommer att ändras då denna trafikplats ska dras in. I stället sker en omdragning av väg 843 och den kommer att ansluta till E22 vid en ny trafikplats, Slussporten, se Figur 1 nedan. I samband med detta kommer en bro byggas då vägkorsningen är planskild. Den färdiga bron kommer i sig inte att förändra trafiksituationen vid trafikplatsen, men den bidrar till genomförandet av omdragningen. Fördelen med omdragningen av E22 och därmed väg 843 är att Europavägen i stället kommer att gå strax söder om Söderköping i stället för att passera rakt igenom staden. Detta kommer dels att leda till minskat buller och avgaser från hård trafik i staden, dels till ökad säkerhet för de gång- och cykeltrafikanter som rör sig i staden (Trafikverket, 2019a).



Figur 1: Illustration av området runt Söderköping. Röd linje visar den planerade omdragningen av E22.

1.2 Syfte

Syftet med detta kandidatarbete är att genomföra en förstudie och föreslå ett lämpligt brokoncept av vägbron som kommer att gå över E22. Efter studier och jämförelser landade detta i ett preliminärt brokoncept, där den slutgiltiga bron har funktionen att möjliggöra avlastning av trafiken genom Söderköping och öka framkomligheten.

1.3 Målbild

Med avstamp i givna förutsättningar och projektets syfte togs ett antal lämpliga brokoncept fram som alla beaktade de olika randvillkor ställda av regelverk och platsspecifika förhållanden. Av de olika brokoncepten valdes sedan ett slutligt koncept som uppfyllde kriterierna och dimensionerades i arbetets avslutande del. Bedömningskriterierna för respektive brokoncept är uppdelade utefter tre specialistgrupper – beställare/konstruktion, produktion och förvaltning/underhåll. När ett slutligt brokoncept sedan valdes utefter bedömningskriterierna gjordes en preliminär dimensionering av givet koncept där beräkningar för bruks- och brottstadie gjordes med en ekvivalent beräkningsmodell. Ett bärande system valdes och brokonceptet illustreras både i en digital och fysisk modell.

1.4 Avgränsningar

Målet med arbetet var att komma fram till ett lämpligt broförslag utifrån de givna förutsättningarna. Arbetet begränsades och var relativt övergripande vilket återspeglades i breda analyser där olika aspekter beaktades. Till att börja med är ekonomi en komplex faktor och den beaktades i denna rapport som att ju mer avancerad konstruktion desto högre kostnad. Ekonomin analyserades därför inte i större detalj utan i stället via enklare bedömningar och begränsades inte. Vidare låg fokus i den slutgiltiga designen av valt brokoncept på utformningen av dess bärande delar och därav togs inte detaljerna på konstruktionen i lika stor beaktning. Design av grundläggningen omfattades inte av några större beräkningar utan endast av ett typ-förslag för utformning enligt geotekniska förutsättningar. Detta skedde i enlighet med uppgiftsbeskrivningen.

Bygg och anläggning står för stor del av världens koldioxidutsläpp och påverkar den biologiska mångfalden på byggsplatsen. För att avgränsa arbetet togs miljön i översiktlig beaktning exempelvis genom val av konstruktionsmaterial. Materialet beaktades enbart i tillverkningsprocessen i form av koldioxidutsläpp då återvinning och återanvändning av materialet ansågs vara en komplex process eftersom broar har en lång livslängd och det är svårt att veta hur mycket av materialet som är lämpligt att återvinna och återanvända med tanke på dess hållfasthet. Inga djupgående analyser hur brokonceptet påverkar omkringliggande område genomfördes.

Vid produktion av broar är säkerheten en viktig aspekt, men också mycket komplex. Utifrån detta togs beslutet att inte ta med en säkerhetsaspekt vid val av brotyp. Detta då det inte gick att avgöra vilken brotyp som är säkrast eftersom god säkerhet uppnås genom god planering, gedigen arbetsberedning och främjande av god säkerhetskultur (M. Davidsson, personlig kommunikation, 29 mars, 2023). Enkla broar som plattrambroar, se Figur 8, och balkbroar, se Figur 7, har historiskt varit mest säkra att producera. Detta beror på att man gjort det flera gånger förut vilket medför att produktionen återupprepas och blir en vana. Olyckor kan ske genom att exempelvis en formställning rasar vid gjutskedet. Allvarligare olyckor sker främst vid arbete på hög höjd och vid lanseringar.

1.5 Metod

Projektet började med att genomföra två delar där den första innefattar val av brokoncept och den andra handlar om att utveckla det valda brokonceptet. Vidare togs en preliminär dimensionering av konceptet fram genom beräkningar.

I den första delen skedde det mesta av informationsinhämtningen genom en förstudie som innefattar de förutsättningar och krav som togs i beaktande. Till en början fastställdes de platsspecifika förutsättningar som bron utformning dimensionerades enligt. Sedan togs krav utifrån tre

specialistgruppers perspektiv i beaktning för dess utformning där medlemmarna i kandidatgruppen fick i uppgift att fördjupa sig i respektive specialistgrupps område. Dessa tre grupper tog fram krav utifrån: beställare och konstruktion, produktion samt förvaltning och underhåll. Inverkan av materialval togs också i beaktning. Utefter de ställda kraven valdes först åtta lämpliga brotyper ut. Av dessa valdes sedan fyra ut i ett första urval och presenterades mer detaljrikt. Detta låg till grund för det slutgiltiga urvalet av brotyp där samtliga koncept betygsattes med åtta viktningsskriterier som specialistgrupperna tagit fram, se kapitel 6.1 *Bedömningskriterier*. Efter detta stog ett vinnande koncept kvar som utvecklades i del två.

Den andra delen vidareutvecklades det valda brokonceptet till en preliminär dimensionering. Denna process startade med att ta fram relevanta beräkningsmodeller för såväl bron i sin helhet som specifika delar av den. Dessa beräkningsmodeller användes sedan tillsammans med de laster och randvillkor som tagits fram genom beräkningar och krav och resulterade till slut i en preliminär dimensionering av det slutgiltiga brokonceptet.

1.6 Samhälleliga och etiska aspekter

Vid processen för utformning av lämpligt brokoncept bör social, ekonomisk och ekologisk hållbarhet tas hänsyn till. För att skapa social hållbarhet behövs en trygg arbetsmiljö och god säkerhet vid produktion, inspektion och förvaltning. För att skapa ekonomisk och ekologisk hållbarhet behövs att en naturlig balansgång skapas sinsemellan. Brolösningen bör beakta omkringliggande miljö, passa in estetiskt i området samtidigt som bron är ekonomiskt fördelaktig i så stor utsträckning som möjligt.

Rapporten bygger på information om anläggningsområdet som hämtats från granskningshandlingar från Trafikverket och underlag från COWI. Rapporten behandlar inga etiska aspekter som berör dataskyddsförordningen (GDPR) då inga personliga referenser av sådant slag inhämtats.

2. Grundläggande förutsättningar

De allmänna förutsättningarna var styrande för projektet. Det finns många olika brotyper och genom att sammanfatta förutsättningarna fås en god överblick över vilka brotyper som faktiskt är möjliga.

2.1 Geometriska förutsättningar

De geometriska förutsättningarna för bron avgjorde i hög grad vilken brotyp som var lämplig eftersom olika brotyper är rekommenderade för olika spännvidder. Enligt ritning kommer E22:an att ha tre vägräckan, ett på vardera yttersidan och ett mellan vägbanorna, se Bilaga 2. Detta innebär att ett mittstöd för bron kunde uteslutas helt på grund av platsbrist. Brons körbanor samt gång- och cykelväg skulle tillsammans ha en bredd om 10,6 meter. Spännvidden styrdes i detta fall av E22:ans bredd samt av krav gällande konstruktioners lägsta avstånd från vägar. E22:an har två vägbanor med två körfält i vardera riktningar samt ett avgränsande mittparti. Vägen är även upphöjd med en viss släntlutning och därav mäter E22:an totalt 23,06 meter i bredd inklusive slänterna. De två yttre vägräckena ersätter säkerhetszonen som annars hade behövts intill vägen (Trafikverket, 2018) vilket möjliggör uppförandet av konstruktioner som närmast där E22:ans slänter slutar. Detta innebär en teoretiskt minsta spännvidd på 23,06 meter om brostöden placerades intill vägs slänten.

Likaså var konstruktionshöjden viktig då den begränsar hur hög den gemensamma höjden för bärverket och färdbanan fick vara. Den fria höjden har angivits till 4,7 meter mätt från E22:ans högsta punkt till brobanans underkant. Detta innebär en maximal konstruktionshöjd på ca 1,6 meter. Uppskattning av konstruktionshöjden skedde utefter ritningens höjdnivåer för E22:an samt brobanan, se Bilaga 2. Här gjordes dock valet att höja vägprofilen för den överliggande vägen med 0,5 meter och därmed få en fri höjd på 5,2 meter. Detta för att göra fler brotyper för trä- och stålkonstruktioner tillgängliga i lösningsrymden då dessa inte får byggas när den fria höjden understiger 5,2 meter (Trafikverket, 2019b).

2.2 Geotekniska förutsättningar

De geotekniska förutsättningarna är helt avgörande för vilken typ av grundläggning som är möjlig. På platsen där bron kommer ligga finns ett sättningsskänsligt lerlager väster om väg E22 och till öster finns ett lager med friktionsjord. Grundvattennivån i området ligger på nivån +30,85 meter. En annan aspekt som kan påverka längden av bron är största möjliga släntlutning intill stöd och vägbanor där den största godtagbara lutningen är 1:1,7 (J. Sandberg, personlig kommunikation, 23 februari 2023).

2.3 Aktuell belastning

Den aktuella bron dimensionerades utifrån ett antal variabla och permanenta laster. De permanenta lasterna är brons egenvikt och vikt av beläggningsyta. De variabla lasterna är trafiklast orsakad av väg-, gång- och cykeltrafik, dynamiska laster orsakade av inbromsning av fordon och vindlast. Väg 843 passerar bron och dess trafikmängd är ca 1300 fordon per årsmedeldygn med en andel av 9% tunga fordon. Gång- och cykeltrafiken bedömdes vara liten, men en separat avgränsad fil ska finnas för gång och cykeltrafik. Hastigheten längs väg 843 är skyltad med 80 km/h (Trafikverket, 2019a). För väg E22 är trafikmängden mellan 11 000–16 000 fordon per årsmedeldygn med ca 7–10 % andel tung trafik.

2.4 Platsförutsättningar

Platsen är täckt av ekhagar, äldre tallskogar, betesmarker och småbrutna odlingslandskap. Det finns inga naturreservat i direkt anslutning. Bron passerar en redan befintlig väg som innebär att platsen är bebyggd sedan tidigare. Den nya bron kommer inte påverka det närliggande området ytterligare och kommer inte ha direkt påverkan på naturen runtomkring (Trafikverket, 2019a). E22 kommer att passera under bron vilket medför att bron kommer fungera som en välkomnande port till Söderköping. Detta medför att brons estetik och utformning kommer att spela en stor roll i slutresultatet.

3. Förutsättningar och krav från aktörer

Vid projektering av brokonstruktioner ställs det ett flertal krav från flera aktörer: beställare, konstruktion, produktion samt förvaltning och underhåll. I följande avsnitt presenteras respektive aktörs förutsättningar och krav för projektet.

3.1 Beställare och konstruktion

De begränsade faktorerna från beställaren är platsens utformning vilket påverkade spännvidden samt markförhållanden som påverkade framför allt grundläggningsmetoden. De nämnda aspekterna styrde i sin tur valet av brodesign. Dessutom behövde bron dimensioneras efter de laster som den förväntas kunna klara av. Ekonomin har i detta projekt att beaktas då det vanligtvis är avgörande i beslutet om slutgiltigt koncept, men inte begränsats.

Även konstruktionen på bron har förutsättningar som den behövde anpassas efter, så som teknisk livslängd, gestaltning samt olycksrisker. Den tekniska livslängden är direkt kopplad till val av byggnadsmaterial då broar i trä har en livslängd på 40 år, ibland upp mot 80 år, men då endast för gång- och cykelbroar. Samtidigt kan stål- och betongbroar stå upp till 80–120 år vilket anses mer gynnsamt (Trafikverket, 2019b).

Som nämnts tidigare hade även den estetiska aspekten påverkan på konstruktionen. Den möttes inte nödvändigtvis med krav, men den förväntades sammanfalla med omgivande miljö vilket kan omfatta både natur och närliggande konstruktioner. Brons geografiska placering innebar att bron skulle fungera som en port in till Söderköping vilket bidrog till vikten av estetiken. Därav förväntades brons utformning ha ett inbjudande intryck. Utöver detta ställdes det också krav på säkerheten med avseende på olycksrisk och hantering.

3.2 Produktion

Bron ska passera över befintlig väg E22 vilket måste tas hänsyn till vid produktion för att inte stoppa upp trafiken under en längre period. I första hand vill man kunna bygga bron utan att den har någon inverkan på trafiken på väg E22. Väljer man ett produktionsätt som kräver att man stänger av trafiken vill man skapa en tidseffektiv produktion och bygga bron under en tidsperiod med låg trafikbelastning på väg E22 (Brosamverkan, 2022). Bron har en placering som möjliggör att leda om trafiken på omkringliggande vägar. Väljer man att stänga av trafiken eller leda om väg E22 behöver man ta hänsyn till de konsekvenser som samhället kan få då framkomligheten begränsas och restider förlängs (Broo, 2023).

Det finns två olika produktionsmetoder, prefabricering respektive platsbyggda konstruktioner. Kort sagt tillverkas prefabricerade element i fabrik och fraktas till byggplatsen medan platsbyggda konstruktioner byggs direkt på plats. Väljer man prefabricering som produktionsmetod tillverkas de olika komponenterna i fabrik och anländer till arbetsplatsen färdiga för montage. Montaget sker sedan antingen med hjälp av lastkranar eller lansering där man skjuter delarna på plats. Detta påverkar inte trafiken nämnvärt då det är en relativt tidseffektiv process och avstängning av trafiken kan regleras till tidpunkter med låg trafikbelastning. Platsbyggda konstruktioner är en produktionsmetod som endast är tillämpbar på betongkonstruktioner då betong är det enda konstruktionsmaterialet som går att gjuta på plats. Denna produktionsmetod möter svårigheter då den kräver en gjutform som sträcker sig över vägen. Dessutom är det en längre produktionsprocess då betongen behöver tid att härda innan den kan belastas. Gjutformen behöver byggas på ett sådant sätt att den inte begränsar framkomligheten på väg E22 vilket kan bli en utmaning konstruktionsmässigt. Vid dimensionering av gjutformen behöver man beakta den fria höjden över väg E22 som alltid behöver vara minst 5,2 meter.

En annan aspekt vid val av produktionsmetod är byggplatsens geografiska position. Prefabelement har en krävande transport på grund av dess tyngd och långa längder därmed undviker man att frakta

prefabelement långa sträckor (Broo, 2023). Det är enklare att frakta otympliga prefabelement med fartyg än lastbilar. Söderköping ligger med fördel nära kusten.

Produktionsmetoden blir olika beroende på vilket material man väljer att tillverka bron i. Betong kan både prefabriceras och platsgjutas men på grund av dess stora egenvikt ställs större krav på kranar och transportmedel vid prefabricerade element. I Sverige är det därför vanligast med platsgjuten betong då prefabricerade betongelement har stor egentyngd samt inte går att dela i mindre delar vilket försvårar transporten (M. Karlsson, personlig kommunikation, 17 februari, 2023). Därmed kan en platsgjuten konstruktion i betong vara bättre lämpad om platsen tillåter att en form kan byggas.

Vid användning av stål som konstruktionsmaterial prefabriceras balkarna i fabrik (Hirt, 2013). De maximala dimensionerna begränsas av fabriken storlek, transportmedel, åtkomst till byggarbetsplatsen, metod samt den utrustning som krävs vid montering. I många fall behöver balken kapas och monteras på plats. I största möjliga mån vill man svetsa fogarna i fabrik i stället för på arbetsplats då det är lättare att uppnå bra kvalitet (Hirt, 2013). Då man exempelvis inte störs av väder och kan använda automatiska svetsrobotar. Träkonstruktioner liknar stål produktionsmässigt då man använder sig av prefabricerade element. De maximala dimensionerna begränsas av fabriken storlek, transportmedel, åtkomst till byggarbetsplatsen, metod samt den utrustning som krävs vid montering. I många fall behöver balken kapas och monteras på plats. I största möjliga mån vill man svetsa fogarna i fabrik i stället för på arbetsplats då det är lättare att uppnå bra kvalitet (Hirt, 2013). Då man exempelvis inte störs av väder och kan använda automatiska svetsrobotar. Träkonstruktioner liknar stål produktionsmässigt då man använder sig av prefabricerade element.

3.3 Förvaltning och underhåll

En vägbro utsätts konstant för slitage och påverkan i olika former, där hög trafikering av tunga fordon, dubbdäcksslitage, vägsalt och vatten är några exempel. För att upprätthålla trafiksäkerhet och beständighet är de följaktligen i behov av upprepade inspektioner och underhållsarbeten under hela dess livslängd (Trafikverket, 2022a). I samband med detta är det viktigt att broar utformas så att sådana arbeten möjliggörs på bästa möjliga sätt.

Typiska åtgärder som broar genomgår i form av underhåll kan vara byte av övergångskonstruktioner, kantbalkar eller räcken, ommålningar och betongåtgärder (Brosamverkan, 2022). Broar ska därför projekteras så att drift och underhåll av alla dess delar ska kunna ske ordentligt och så att välfungerande inspekterbarhet och goda möjligheter till underhåll är ett faktum. I samband med detta ska också hög säkerhet för både trafikanter och arbetare upprätthållas vid detta arbete, något som exempelvis kan göra att brobredden måste ökas provisoriskt.

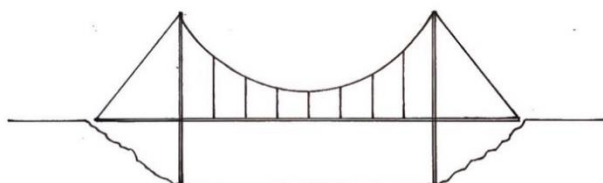
Vidare kan drift och underhåll förekomma i både förebyggande och avhjälpande syfte, och kan vara både planerade och oplanerade (M. Davidsson, personlig kommunikation, 20 februari, 2023). De planerade underhållsarbetena syftar till åtgärder av konstruktionsdelar som förväntas slitas ut, så som övergångskonstruktioner, lager och räcken. De oplanerade underhållen är de åtgärder som krävs på grund av oförutsägbara händelser, exempelvis påkörning eller spjälkskador på betongen. Vid inspektion görs en bedömning huruvida åtgärder behöver göras direkt, eller om det är möjligt att vänta utan att påverka bronns bärighet eller säkerhet. I de fall det går att vänta görs en kalkyl för att bedöma när det är som mest samhällsekonomiskt lönsamt att göra dessa åtgärder. Utifrån ett perspektiv av underhåll är broar med så få detaljer som möjligt att föredra (J. Sandberg, personlig kommunikation, 23 februari, 2023). Detta i och med att dessa medför fler konstruktionsdelar att inspektera och fler typer av områden för exempelvis väta och därmed korrosion att uppstå.

4. Brotyper

I detta kapitel beskrivs olika brotyper för att ge en bild av när brotypen vanligtvis används, vilket senare används som underlag för urval 1.

4.1 Hängbro

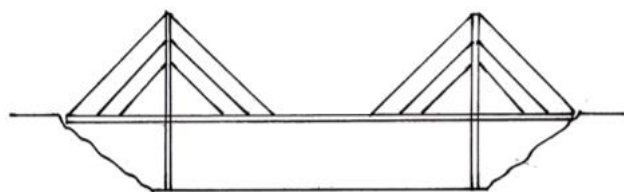
En hängbros bärverk består av fyra huvudkomponenter – kablar, pyloner, brodäck samt en fästningsmekanism för kablarna vid ändstöden, se Figur 2 (Brosamverkan, 2022). Körbanan bärs upp genom att de vertikala krafterna fördelas från kabelsystemet ner till ändstödet och pylonerna. Detta skapar i princip enbart vertikala krafter i pylonerna vilket medför att dessa kan konstrueras väldigt slanka. Idag används hängbroar främst då spännvidden är väldigt stor på grund av att dess höga produktionskostnad och komplexitet oftast inte är lönsam för mindre spann (J. Sandberg, personlig kommunikation, 23 februari 2023). Kabelsystemet utformas uteslutande i stål medan pylonerna varierar. Beroende på spännvidd kan viss frihet i materialval av brodäcket finnas.



Figur 2: Hängbro.

4.2 Snedkabelbro

Snedkabelbroar kännetecknas av att brobanan är direkt förbunden med brons pyloner genom stag eller sneda kablar, se Figur 3. De spända bärkablarna ger upphov till ett reducerat moment i brospannet, vilket i sin tur också ger mindre nedböjning och slankare konstruktion. Snedkabelbroar används mestadels då spännvidden är större än 100 meter (Brosamverkan, 2022). En fördel är att vid byggnation behövs ingen ställning och bron är stabil både vid byggskedet och under färdigställandet då konstruktionen medför att stöd inte påverkas av horisontella sidokrafter (Brosamverkan, 2022). Snedkabelbron kan utföras i flera olika material men är mest lämpad att bygga i stål och betong och dess kablar utförs enbart i stål.

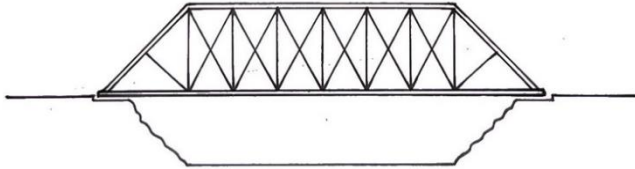


Figur 3: Snedkabelbro.

4.3 Fackverksbro

Fackverksbroar bygger på sidokomponenter av fackverk i stål eller trä som för över laster från brobanan till stöden, se Figur 4. Detta medför ett lämpligt brokoncept på spännvidder över 50 meter (Brosamverkan, 2022) och en därmed förhållandevis väldigt låg egenvikt (Vägverket, 1996). En stor fördel med fackverksbroar är att de kan byggas utan att störa potentiell trafik under den. Detta kan exempelvis göras under en natt på redan byggda sidostöd, vars produktion inte heller behöver påverka trafiken (Vägverket, 1996).

Fackverksbroar är vanliga lösningar för järnväg samt gång- och cykeltrafik, däremot mindre vanliga för vägbroar (Vägverket, 1996). I och med dess fackverkskonstruktion medför den ofta även höga produktionskostnader, något som bidrar till dess ovanlighet för större broar (Brosamverkan, 2022). Fackverkskonstruktioner är, i och med dess många anslutningar och detaljer, i stort behov av underhåll vilket är väldigt ekonomiskt krävande (J. Sandberg, personlig kommunikation, 23 februari 2023).



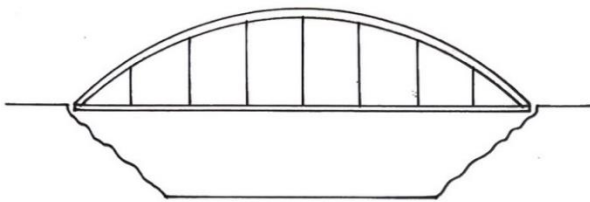
Figur 4: Fackverksbro.

4.4 Bågbro

Bågbroar används vanligtvis endast vid spännvidder över 60 meter och upp till 260 meter då bågen är utförd i ett spann. Den har dessutom konkurrerats ut av andra brotyper och används främst idag av estetiska skäl (Brosamverkan, 2022). Bärverket kan delas upp i ett primärbärverk och ett sekundärbärverk (Trafikverket, 2008). Primärbärverket är uppbyggt av bågen som kan placeras antingen över, under eller mellan sekundärbärverket, se Figur 5 nedan. Bågen kan utföras i antingen trä, stål eller betong. Sekundärbärverket i sin tur är uppbyggt av ett balksystem eller en kontinuerlig platta (Trafikverket, 2008).

Konstruktionen innebär att stag eller linor i stål för lasten från brobanan via tryck eller drag vidare till bågen ned till stöden (Trafikverket, 2008). Bågen för vidare lasten i tryck ifall bågen är placerad över körbanan och i drag ifall den är placerad under körbanan.

När bågen belastas trycks dess ändar utåt. Om den är grundlagd med pålning kommer dessa att ge vika för de horisontella krafterna, därför måste bågens ändar trycka mot till exempel berg. Ett alternativ är att ha ett dragband mellan bågens ändar som tar upp de horisontella krafterna och då kan en enklare grundläggning accepteras, se Figur 5.

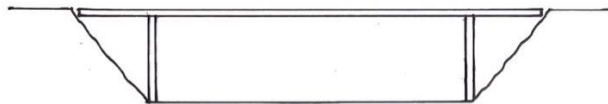


Figur 5: Bågbro.

4.5 Plattbro

Plattbroar består av en överbyggnad i form av en betongplatta placerad på skivor eller pelare som stöd, se Figur 6. För slakarmerade plattbroar är lämpliga spännvidder mellan 20 och 25 meter, men närmare den övre gränsen börjar rambroar bli mer aktuella (Brosamverkan, 2022). Gällande förspända plattbroar går det att erhålla spännvidder upp mot 35 meter, dessa är dock ovanliga. (Vägverket, 1996) Fördelen med plattbro är att konstruktionshöjden kan hållas låg.

På grund av den massiva konstruktionen får plattbroar av längre spännvidd så pass hög egenvikt att deformationerna blir för stora för att vara praktiskt användbara. Dessutom är inte plattbroar speciellt vanliga i och med att balkbroar uppnår samma spännvidder men med betydlig lägre produktionskostnad (Vägverket, 1996).



Figur 6: Plattbro.

4.6 Balkbroar

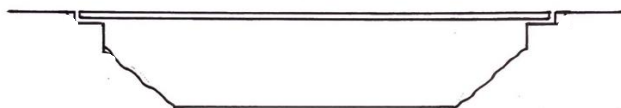
Balkbroar verkar som fritt upplagda eller kontinuerliga balkar (Brosamverkan, 2022). Då balken är fritt upplagd verkar den oftast som en enspannsbro som ligger direkt på ändstöden medan den kontinuerliga konstruktionen i stället består av en eller flera balkar och involverar ett mittstöd. Huvudbalkarna tillverkas i trä, armerad betong eller stål och bär last via balkverkan vidare ner i stöden. Antal balkar som används regleras av hur hårt trafikerad bron förväntas vara, men bör minimeras med avseende på brons egentyngd. Se Figur 7 för exempelutformning.

4.6.1 Betongbalkbro

Spännvidden för betongbalkbroar varierar stort beroende på armeringen. För balk med rektangulärt tvärsnitt med slakarmerad betong kan spännvidder upp till 25 meter uppnås och om betongen i stället är spännarmerad kan cirka 30 meter spännvidd uppnås (Vägverket, 1996). Konstruktionshöjden för balkbroar beror av spännvidden som för en slakarmerad bro varierar mellan 7–10% av spännvidden och mellan 4–7% av spännvidden för en spännarmerad bro. Vid stora spännvidder eller då bron är utsatt för stora vridande moment kan ett lådtvärsnitt väljas då detta ger större vridstyvhet.

4.6.2 Samverkansbro

Samverkansbron utgörs av balkar i stål medan brobanaplattan är gjord av betong. För stålbroar gäller spännvidder vanligen från 20 meter upp till 60–70 meter (Brosamverkan, 2022). Den fria höjden krävs vara högre för stålbroar än för betongbroar då det lättare stålet kan leda till förflyttning av bron vid påkörning och är därför mer känslig för påkörningsolyckor (Vägverket, 1996). Konstruktionshöjden varierar mellan 3,5–6% av brons spännvidd. Montering av stålbroar är generellt fördelaktiga då de enkelt kan lyftas eller lanseras på plats.



Figur 7: Balkbro.

4.7 Rambroar

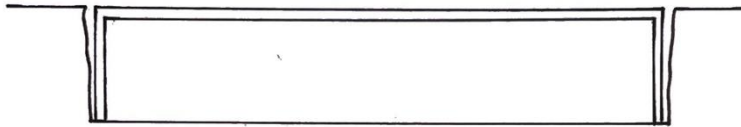
Rambroar är den mest förekommande brotypen i Sverige (Trafikverket, 2008). Dessa broar utförs i betong och består av en brobana som gjuts ihop med ändstöden, se Figur 8. Bron blir då styv och står emot förskjutningar bra på grund av ramverkan. Det finns två olika varianter av denna brotyp, plattrambro eller balkrambro, där brobanan antingen är en platta eller balkar.

4.7.1 Plattrambro

Plattrambro har ett bärverk i form av en platta, hopgjuten med stöden. Stöden är i direktkontakt med jorden på utsidan bron vilket hjälper till att stabilisera bron ytterligare i horisontalplanet. Den utförs främst som spännarmerad och kan då uppnå spännvidder på 35 meter (Vägverket, 1996). Vid dessa spännvidder kan bottenplattan vid stöden direkt stå på mark eller pålas som grundläggning. Då brobanan är en platta medför detta även att en lägre konstruktionshöjd kan uppnås.

4.7.2 Balkrambro

Balkrambron är identisk med plattrambro men har i stället för platta längsgående balkar. Den utförs också med spännarmerad betong och kan då användas för större spännvidder om ca 50 meter. Konstruktionshöjden blir dock högre än för plattrambro.



Figur 8: Plattrambro

5. Urval 1

I detta kapitel redovisas det första urvalet av de broar som presenterades i kapitel 4 genom ett överskådligt urval. De broar som gick vidare till det slutliga urvalet presenteras sedan i djupare detalj utifrån de kriterier som ställs av specialistgrupperna.

5.1 Val av brotyper

Informationen i kapitel 4 ligger till grund för det första urvalet. Här jämfördes för- och nackdelar av respektive brotyp för att eliminera kandidater som ej var lämpliga att ta vidare till det slutliga urvalet. Samtidigt önskades att det slutliga urvalet skulle innehålla en viss diversitet mellan kandidaterna vilket gjorde att om till exempel utformning och verkningssätt hos två kandidater anses för lika valdes endast en av dessa. Det första kriteriet var att bron skulle agera som en port in till Söderköping vilket ger att vikt lades vid att urvalet skulle innehålla brotyper med en estetiskt tilltalande utformning. Det andra kriteriet var att det slutliga urvalet skulle innehålla brotyper vars utformning och produktionssätt var enkla. I Tabell 1 nedan sammanfattas vilka brotyper som gick vidare till det slutliga urvalet med tillhörande anledning.

Tabell 1: Motivering till urval 1, Val av brotyper.

Brotyp	Kommentar	Vidare urval 2
Hängbro	En hängbro är framför allt väldigt estetiskt tilltalande, men den är ekonomiskt lönsam först vid väldigt stora spännvidder och har en komplex utformning vilket medför att denna brotyp ej ansågs relevant för brons korta spännvidd. Dess verkningssätt och produktionsmetod är dessutom relativt likt en snedkabelbro som är mer lämplig för korta spännvidder.	✗
Snedkabelbro	En snedkabelbro är likt en hängbro estetiskt tilltalande och är egentligen ekonomiskt lönsam främst vid större spännvidder, men den förekommer även vid kortare spann i Sverige. Då en snedkabelbro är mer förekommande vid kortare spännvidder valdes denna framför en hängbro som ett av de estetiskt tilltalande alternativen.	✓
Fackverksbro	En fackverksbro används främst vid järnvägsbroar samtidigt som denna typ kräver mycket underhåll. Ur detta perspektiv ansågs därför detta alternativ inte lämpligt.	✗
Bågbro	Bågbroar byggs främst vid spännvidder över 60 meter för att vara ekonomiskt lönsamma men brotypen ger stor valfrihet i materialval samtidigt som den ansågs estetiskt tilltalande. Därför ansågs denna vara ett lämpligt andra val utifrån de estetiska kriterierna.	✓
Plattbro	En plattbro erhåller en enkel konstruktion samtidigt som konstruktionshöjden kan hållas låg. Då dess verkningssätt är likt en rambro men har en mer komplex produktionsmetod ansågs denna brotyp olämplig.	✗
Balkbro	En balkbro har den enklaste konstruktionen men är inte särskilt estetiskt tilltalande. På grund av dess enkelhet erbjuder den dock många valmöjligheter i både material och produktionsmetod. Denna brotyp ansågs då lämplig utifrån kriteriet att utformning och produktionsmetod ska vara enkla.	✓
Rambro	En rambro erhåller en enkel konstruktion samtidigt som konstruktionshöjden kan hållas låg. Som tidigare nämnt är dess verkningssätt likt en plattbro men erhåller en enklare produktionsmetod. Den ansågs vara lämplig utifrån kriteriet att utformning och produktionsmetod ska vara enkla.	✓

5.2 Utveckling av brokoncept

Nedan beskrivs de utvalda brokoncepten för platsen mer ingående. De är indelade i fyra underkategorier, materialval, beställare och konstruktion, produktion samt underhåll och förvaltning. Beställaren har fokuserat på konstruktionens utformning och estetiska profil, produktion har fokuserat på produktionstid och metod och förvaltning har fokuserat på underhåll och inspekterbarhet.

5.2.1 Snedkabelbro

Materialval

I en snedkabelbro är de kraftöverförande kablarna gjorda i stål och pylonerna i armerad betong eller stål (Brosamverkan, 2022). Brodäcket kan utformas i olika material men vanligast används enbart betong, samverkan mellan betong och stål eller enbart stål, men trä kan även användas.

Om en snedkabelbro skulle väljas är materialvalet för pylonen, tvärbalkar mellan pylonerna och farbanan armerad betong. Valet av armerad betong i pylonen motiveras genom att de huvudsakliga krafterna i denna kommer att vara tryck där betong är väldigt starkt (Brosamverkan, 2022). De relativt små dragkrafterna kommer i sin tur tas upp av armeringen. I brodäcket kommer de huvudsakliga krafterna tas upp av ett system av längs- och tvärgående stålbalkar. Dess moment reduceras sedan med hjälp av kablarna.

Beställare och konstruktion

I detta koncept kommer bron vara asymmetrisk med en pylon på ena sidan av vägen och kablar som sträcker sig i ett kortare spann mot avslutet av bron samt i ett längre spann ut mot huvudspannet. Kablarna kommer fästas i pylonerna enligt halv-solfjäderform, vilket innebär att kablarna förankras spritt över den övre delen av pylonen. Vid broändan på sidan utan pylonen kommer ett stöd upprättas för att bron ska klara den dimensionerade lasten.

Rent estetiskt är bron tilltalande samtidigt som den fyller funktionen av att vara en inbjudande port in till Söderköping. Pylonerna i betong tillsammans med stålkablarna och stålbalkarna under körbanan samverkar bra rent visuellt då de går i samma färgskala.

Produktion

Snedkabelbrons pyloner byggs i betong medan balkarna byggs i stål. Bygget startar med att man gjuter pylonerna och dess tvärbalkar på plats. Stålbalkarna är prefabricerade och dess möjliga längd styrs av fraktmedel. Därför kan det krävas att man svetsar eller skruvar ihop balkarna på plats. Balkarna kommer antingen kraga ut som en konsol innan de sammansvetsas och succesivt sammanförs med hjälp av kablarna till pylonerna (Brosamverkan, 2022). Alternativt att den lanseras beroende på hur lång spännvidden blir. Fördelen med denna brotyp är att det är mycket prefabricerade element och därmed en relativt effektiv arbetsgång. I byggskedet kan temporära vägar krävas för att kunna få fram arbetsfordon och material till platsen.

Underhåll och förvaltning

Vid snedkabelbroar är det viktigaste ur underhållssynpunkt att kabelbyte kan utföras på ett smidigt sätt (Brosamverkan, 2022). I detta fall kommer kabelförankringar i mitten av körbanan anses olämpliga både ur plats- och säkerhetssynpunkt. Detta ger att kabelförankringar bör sitta på varsin utsida av bron vilket vid utbyte av skadade kablar eller inspektion fortfarande möjliggör att ena körfältet kan brukas för trafik.

För en snedkabelbro blir kablarnas infästningspunkter problematiska. Där kan väta lätt samlas och leda till korrosion (Al-Emrani, 2023). Gällande infästningarna på brobanan har dessa god inspekterbarhet tack vare att de är placerade på farbanans ovansida men för infästningarna i pylonerna kommer någon form av upphöjningsanordning att krävas för inspektion. Kablarna kan förses med ett plasthölje för att motstå påverkan från väder och liknande (Nordén & Nyberg, 2023).

5.2.2 Bågbro med överliggande båge

Materialval

I en bågbro erhålls stor frihet i materialval i nästintill hela konstruktionen (Brosamverkan, 2022). Bågarna kan utformas i betong, trä eller stål och detsamma gäller brodäcket där även möjlighet till samverkan mellan två av dessa material är möjligt. Stagen eller linorna mellan brodäcket och bågarna konstrueras i stål.

Om en bågbro skulle väljas konstrueras bågen i limträ och även brodäcket i limträ. Detta eftersom det var önskvärt att ett av koncepten skulle konstrueras i ett mer miljövänligt material samtidigt som limträ är enkelt att forma utefter bågen jämfört med de andra materialen. I bågen placeras limträet så att det belastas i tryck parallellt fibrerna för att erhålla en god hållfasthet och en slank konstruktion (Al-Emrani M. m., 2019).

Beställare och konstruktion

Eftersom marken består av lera på en av sidorna om bron kommer bågarna behöva spännas samman med dragband så att endast de vertikala krafterna förs ned i marken vid stöden. Det kommer att vara två parallella bågar, en på varje sida av bron. Dessa sammankopplas genom att de vertikala stagen fortsätter under farbanan och kopplas ihop med de vertikala stagen för den andra bågen. Detta gör att farbanan vilar på dessa stag. Denna bågbro är främst ett alternativ på grund av dess estetik eftersom denna typ av bro inte används ofta för denna spännvidd.

Produktion

Bågarna prefabriceras i limträ och lyfts på plats med hjälp av en kran. De monteras ihop med stålbalkarna med hjälp av stag i stål. Under hela produktionsfasen krävs att bågarna stabiliseras med hjälp av stödkonstruktioner som kan komma att stoppa upp vägen E22 som går under bron. Nackdelen med denna brotyp är att bågen kräver specialtransport till platsen då den har spännvidd över 25 meter, förmodligen behöver man stänga av vägen nattetid. Produktionsprocessen är en komplex process som kräver mycket stödkonstruktioner och kranar.

Underhåll och förvaltning

Vid bågbroar med överliggande båge är det viktigaste ur underhållssynpunkt att de kraftöverförande stagen mellan brodäcket och bågen är lättillgängliga vid utbyte (Brosamverkan, 2022). Likt vid snedkabelbron är det ej möjligt att placera en båge i mitten av körbanan vilket gör att två bågar på utsidan av bron kommer väljas om denna utformning blir aktuell. Detta möjliggör att ena körfältet kan stängas av vid underhåll av stagen och inspektion vilket ej påverkar trafiken över bron nämnvärt.

5.2.3 Balkbro

Materialval

Balkbron kommer att dimensioneras som en samverkansbro mellan betong och stål. Detta koncept valdes för att optimera materialanvändandet. Stålet tar upp dragkrafterna i undersidan och betongen tar huvudsakligen upp tryckkrafterna i ovasidan vilket medför en lättare konstruktion (Brosamverkan, 2022).

Beställare och konstruktion

Balkbron fungerar som en fritt upplagd balk och för alltså krafterna på samma sätt ut till ändarna och ner genom stöden. Tack vare brons enkla design är den ekonomiskt gynnsam då den minimerar materialåtgången. Däremot är den generellt sett inte tilltalade rent estetiskt och anses inte samspela med kringliggande område.

Produktion

Stålbalkarna kommer att kunna tillverkas i prefab och sedan lyftas på plats, eventuellt lanseras beroende på spännvidd. Detta kan ske under ett kort stopp i trafiken och därpå kan arbetet med att gjuta farbanan ske ostört och trafiken flyta på som vanligt. Produktionen kräver att det finns plats för

arbetsfordon såsom kranar och att det finns vägar för att nå fram med material. Processen anses vara relativt enkel och tidseffektiv och få stödkonstruktioner behövs.

Underhåll och förvaltning

Vid en balkbro ligger bärverket under brodäcket vilket ur en underhållssynpunkt medför att god åtkomlighet under bron måste tillgodoses (Brosamverkan, 2022). Under bron löper väg E22 vilken är mycket trafikerad och att stänga av körfält på denna för underhåll påverkar trafiken i större utsträckning än om underhåll skulle kunna göras ovanpå bron.

5.2.4 Rambro

Materialval

Som nämnt i avsnitt 5.7 byggs rambroar endast i betong och därmed utesluts andra materialval.

Beställare och konstruktion

Rambroar kan utföras antingen med balkar eller plattor som gjutet bärverk. I denna alternativa brouformning kommer en plattrambro att föreslås eftersom det annars anses för likt en balkbro samt att plattrambro är bra vid begränsade konstruktionshöjder som i detta fall. En viss estetisk utformning kan också uppnås i och med votning av plattan eller design på vingmur.

Produktion

Denna konstruktion kommer att kräva ett intensivt formbyggande då den gjuts på plats. Först kommer eventuella stöd behöva gjutas och sedan kommer brobanan att gjutas ihop med stöden. Det problematiska för denna bro är att formen inte kan ta stöd på E22:an enligt tidigare resonemang och därmed måste formen balanseras på en tillfällig konstruktion. Denna konstruktion kan exempelvis bestå av stålbalkar på någon form av stöd (J. Leppänen, personlig kommunikation, 4 mars 2023) som tillsammans med formen inte får inkräkta för mycket på konstruktionshöjden. Detta anses dock klaras då konstruktionshöjden för plattrambroar omkring 25 meter kräver en konstruktionshöjd om ca 1 meter (Vägverket, 1996). En ingenjörsmässig bedömning har gjorts att stålbalkar bör klara egenvikten av betongen under gjutprocessen. Spännvidden avgör huruvida betongen utförs som slakarmerad eller spännarmerad (Brosamverkan, 2022).

Underhåll och förvaltning

Underhåll och förvaltning är samma som för en balkbro, se ovan.

6. Urval 2

I urval 2 har kvarvarande brokoncept jämförts med varandra. Detta har skett genom att övergripande bedömningskriterier kategoriserades inom de tre specialistgrupperna *beställare/konstruktion*, *produktion* och *förvaltning* och sedan viktades i en diskussion mellan specialistgrupperna. Slutligen betygsattes brokoncepten utefter hur väl de uppfyllde kriterierna där det vinnande brokonceptet är det med högst poäng. Detta har skett enligt metoden som beskrivs i broprojekteringshandboken (Brosamverkan, 2022).

6.1 Bedömningskriterier

Bedömningskriterierna användes för att jämföra de olika koncepten och hitta den bäst anpassade lösningen. För att möjliggöra detta kan inte allt för generella kriterier användas och därmed har de kategoriserats under *beställare/konstruktion*, *produktion* och *förvaltning* för att hitta specifika aspekter under bronns livscykel. Val av kriterier kommer från de mest framträdande aspekterna i kapitel tre – *förutsättningar aktörer*. Nedan listas bedömningskriterierna:

Beställare/Konstruktion

1. *Ekonomi* – Ekonomin är en viktig faktor men en uppskattning av bronns kostnad är komplex och svår att göra. Däremot kan en mer avancerad konstruktion anses mer kostsam.
2. *Estetik* – Bronns estetiska utformning anses viktig i och med den geografiska positionen för bron.
3. *Miljöpåverkan* – Miljöpåverkan är viktig och behandlas här översiktligt i form av materialets miljöpåverkan.

Produktion

4. *Produktionstid* – En kortare produktionstid leder till mindre kostnader och stoppar inte upp trafiken lika länge.
5. *Produktionsmetod* – Bron bedöms utifrån hur väl anpassad produktionsmetoden är utefter förutsättningarna.

Förvaltning och underhåll

6. *Underhåll* – Ju fler detaljer en bro har desto mer underhåll kommer att krävas. Mer underhåll anses därför negativt.
7. *Inspekterbarhet* – För att inspektion av bron skall kunna ske regelbundet och smidigt bör det vara enkelt att fysiskt nå alla dess delar.
8. *Beständighet* – En bronns beständighet styrs främst av materialval och är en avgörande faktor i hur mycket underhåll som behövs och hur länge den kommer att kunna vara i bruk.

6.2 Viktning av bedömningskriterier

Här viktas bedömningskriterierna mot varandra, se Tabell 2. Genom att systematiskt jämföra ett kriterium mot ett annat erhålls en poängsumma. Denna poängsumma motsvarar sedan den procentuella viktningen som tilldelas kriteriet. Poäng erhålles genom att systematiskt jämföra varje bedömningskriterium mot alla de andra kriterierna. Om till exempel kriterium A jämförs mot kriterium B tilldelas kriterium A poäng enligt följande:

- + 1p om A anses svagare än B ($A < B$)
- + 2p om A är lika viktigt som B ($A = B$)
- + 3p om A anses viktigare än B ($A > B$)

Tabell 2: Viktning av kriterier.

Kriterium Nr		1	2	3	4	5	6	7	8	Total poäng	Vikt
Ekonomi	1		1	2	1	1	1	1	1	8	7,1%
Estetik	2	3		3	3	3	2	3	1	18	16,1%
Miljöpåverkan	3	2	1		3	2	3	3	1	15	13,4%
Produktionstid	4	3	1	1		2	2	2	1	12	10,7%
Produktionsmetod	5	3	1	2	2		1	3	2	14	12,5%
Underhåll	6	3	2	1	2	3		3	1	15	13,4%
Inspekterbarhet	7	3	1	1	2	1	1		1	10	8,9%
Beständighet	8	3	3	3	3	2	3	3		20	17,9%

6.3 Slutlig bedömning av brokoncept

Brokoncepten betygsattes på en skala 0–4 utefter hur väl de uppfyller bedömningskriterierna, dessa poäng är värderade enligt följande.

0 = otillfredsställande, 1 = Acceptabel, med tvekan, 2 = Tillräckligt bra, 3 = Bra, 4 = Mycket bra

Betyget multiplicerades med viktningfaktorn för kriteriet och summerades för alla kriterier vilket gav ett viktat typvärde. Konceptet med högst typvärde valdes som slutgiltigt koncept, se Tabell 3.

Tabell 3: Slutlig urvalsmatris.

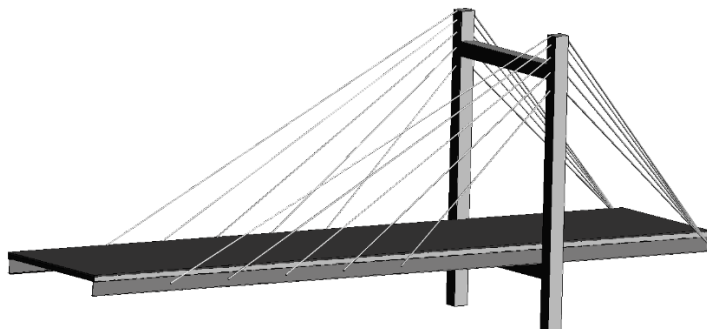
Kriterium Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	Slutbetyg
Snedkabelbro	1	4	2	2	2	3	4	3	2,74
Bågbro	1	4	3	2	2	1	4	2	2,43
Rambro	3	1	2	2	2	3	3	4	2,49
Balkbro, samverkan	3	1	2	2	3	3	3	3	2,44
Viktning	7,1%	16,1%	13,4%	10,7%	12,5%	13,4%	8,9%	17,9%	

Tre av broarna som har blivit viktade har fått snarlika slutbetyg medan snedkabelbron sticker ut med högst slutbetyg och blev därmed det vinnande konceptet. Motivering för varje kriterium finnes nedan.

1. *Ekonomi* – Bron är inte ekonomiskt försvarbar då en snedkabelbro har en mer komplex konstruktion i jämförelse med exempelvis en balkbro.
2. *Estetik* – Snedkabelbron har en estetiskt försvarbar utformning. Bron är placerad över väg E22 som leder till Söderköping och därmed kan bron ses som en välkomnande port och vara ansiktet utåt för Söderköping.
3. *Miljöpåverkan* – Miljömässigt är bron tillverkad i betong och stål som har stor inverkan på klimatet, dock väger brons materialsnåla konstruktion delvis upp för detta.
4. *Produktionstid* – Produktionstiden har spelat relativt stor roll i viktningprocessen då man vill påverka trafikflödet i minsta möjliga mån på väg E22 som går under bron.
5. *Produktionsmetod* – En snedkabelbro produceras relativt snabbt och enkelt. Då balkarna är prefabricerade är det endast farbanan och pylonen som behöver gjutas på plats.
6. *Underhåll* – Underhållsmässigt kräver bron att kablarna byts ut när det behövs, något som spelat relativt stor roll i viktningprocessen och som inte har varit till någon fördel för bron.
7. *Inspekterbarhet* – Bron är lätt att inspektera då infästningar är placerade på farbanans ovansida.
8. *Beständighet* – Livslängden på bron anses lång då beständigheten materialmässigt är god.

7. Slutligt brokoncept

Snedkabelbron valdes till det slutliga brokonceptet, och visualiseras i Figur 9. Den utgörs av en pylon och två spann där huvudspannet är 36 meter och sidospannet är 12 meter. I följande avsnitt presenteras en mer detaljerad beskrivning av bronns utformning.



Figur 9: Principmodell

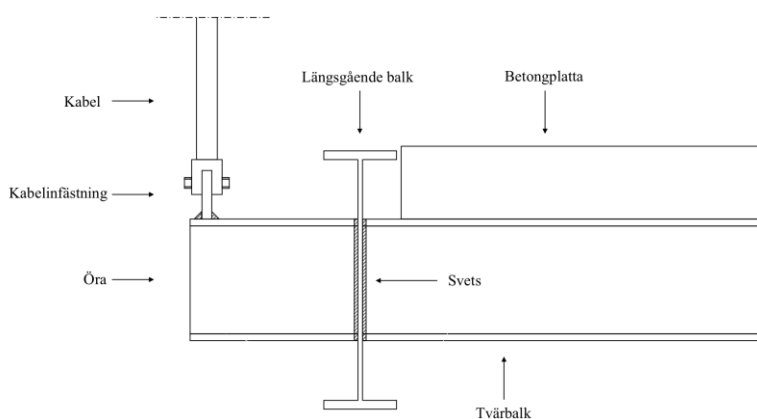
7.1 Konstruktion

I detta kapitel beskrivs konstruktionens tänkta utformning mer i detalj. Överbyggnaden omfattar de delar som befinner sig ovanför stöd medan underbyggnaden avser stöden och grundläggning. Rent funktionsmässigt överför överbyggnaden laster till underbyggnaden som i sin tur för över lasten till grundläggningen där lasten omfördelas i marken (Brosamverkan, 2022).

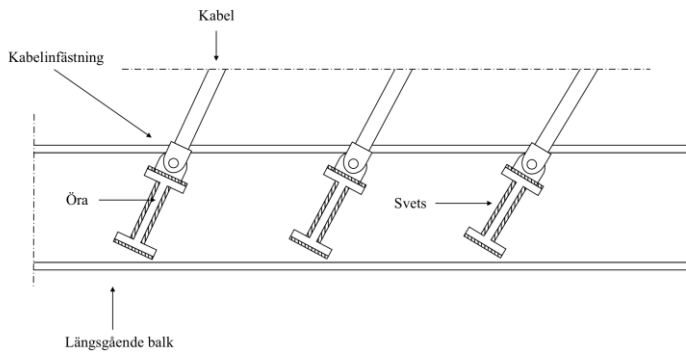
7.1.1 Brodeck, pyloner och kablar

Brodeckets utformades och erhåller sin bärförmåga genom en typ av balkramverk i stål, med två längsgående balkar med tvärbalkar mellan. Denna konstruktion valdes för att en låg egenvikt var önskvärd då en slank konstruktion kan uppnås vilket är estetiskt tilltalande och kräver mindre materialåtgång. Ovanpå tvärbalkarna gjuts sedan en armerad betongplatta för vägbanan.

Brodeckets bär last genom betongplattan som fördelar lasten jämnt över tvärbalkarna som sedan för lasten vidare till de längsgående balkarna. I dessa fästs kablar som överför kraften till pylonen som i sin tur för vidare lasten via tryck ner i marken. För skisser av brodeckets, se Figur 10 och 11.



Figur 10. Brodeckets tvärsnitt vinkelrätt färdriktningen. Observera ej skalenlig.

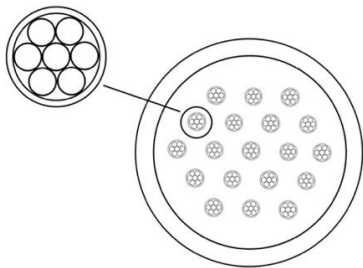


Figur 11. Detaljutformning parallellt färdriktningen. Observera ej skalenlig.

Pylonerna placerades på varsin sida av brobanan och stabiliserades av två tvärbalkar varav en verkar som ett tredje stöd för brodäcket. Idealt ska pylonernas höjd vara 20–25% av bronns spännvidd och därför uppskattades preliminärt pylonernas höjd till 10 meter över bärverket. Exakt höjd och tvärsnittsmått bestämdes under dimensioneringsprocessen.

Kablarna till bron fästs längs med pylonerna enligt halv-solfjäderform vilket innebär att kablarna förankras spridda över den övre delen av pylonen. Kablarna består av linor som omges av skyddsror av plast varpå linorna består av varmförzinkade trådar. Trådarna omsluts i sin tur av ett skyddshölje i plast där vax används för att fylla ut tomrummet mellan trådarna, se Figur 12. Dessutom fungerar vaxet som en förtätning vilket minimerar risken av korrosion på grund av vatteninträngning.

Kablarna förankrades i de längsgående stål balkarna utanför farbanan. Här är det viktigt att vägräckets arbetsbredd tillgodoses för att undvika kollision mellan räcke och kablar samt pyloner vid påkörning vilket ses över i den slutgiltiga designen.



Figur 12: Tvärsnittsskäring av kabel

7.1.2 Underbyggnad

Brons ändar ansluter till den västra sidan av vägen och pylonen via rullager samt ett stöd som endast tillåter rotation vid den östra änden, se systemmodellen i figur 13. När det gäller pylonerna placerades dessa på den östra sidan vid friktionsjorden eftersom den inte bedömdes vara lika känslig för långtidsättningar som leran (Sällfors, 2013). Däremot kommer även plattan troligtvis behöva grundläggas med pålar för att kunna ta upp moment från eventuella sidolaster som till exempel vind.

7.2 Produktion

Förslagsvis bör produktionen inledas med grundläggning och gjutning av pyloner och ändstöd, troligtvis kommer pyloner kunna gutas direkt i en etapp. Eftersom hela området är under byggnation kommer platsbrist inte vara begränsande under bygget, det enda som behövs ta i beaktning är som sagt trafiken på E22:an.

De längsgående balkarna kommer behöva skarvas ihop på plats. När det gäller tvärbalkarna är det upp till entreprenören om de ska svetsas ihop i fabrik eller på plats. Däremot kommer transport av hela

ramstrukturen bli komplicerad. För att få brodäcket på plats är lansering lämpligt. Vid lansering kommer E22:an behöva stängas av en kortare tid då det annars utgör en trafikfara för trafikanterna. Avstängningen bör ske på natten eller under tider med lite trafik. Kablarna bör monteras i samband med lanseringen varpå betongfarbanan kan gjetas obehindrat ovanpå tvärbalkarna utan att störa trafiken under. Brobanan asfalteras och räcken installeras samt andra detaljer slutförs.

7.3 Förvaltning och underhåll

Det slutgiltiga konceptet resulterade i konstruktionselementen stålkablar, stålbalkar, betongpyloner och betongfarbana. Underhållsplanen för ovan beskrivna konstruktionsdelar beskrivs nedan.

7.3.1 Stålbalkar, anslutningar och stålkablar

Gällande stålbalkarna består det primära underhållsarbetet av att skyddsmåla de exponerade ytorna. Stålet bör målas i fem lager för att uppnå tillräcklig effekt (Jan Sandberg, personlig kommunikation, 23 februari 2023). För stålbalkarna är det fördelaktigt att under brons livslängd också utföra lokala åtgärder som till exempel ommålning på enstaka rostfläckar eller rengöring med högtryckstvätt (Reuterswärd, 2010).

Vidare måste svetsar mellan stålbalkar och anslutningar inspekteras och skötas om. För att förhindra problematik kring anslutningar är det en god idé att utforma detaljer på ett sätt som gör att vatten lättare kan rinna av eller också skapa sammankopplingar med medvetna dräneringsutrymmen mellan dem. Ur underhållssynpunkt kan det vara en god idé att dimensionera bron för att kunna behålla sin bärförmåga med en kabel mindre än vad som faktiskt finns. Detta i och med att det finns risk för att en kabel nöts ut, utsätts för korrosion eller av annan anledning förlorat sin bärförmåga och med en kabel extra kan sådant arbete utföras utan bärighetsproblem.

7.3.2 Betongelement

Brodäcket och pylonerna kommer konstrueras i armerad betong. Av dessa delar är betongen i sig ett mycket beständigt material (Svensk betong, u.å.b). Det tål fukt, kan inte mögla, är obrännbart, klarar av temperaturförändringar bra, är brandtåligt vid ordinära bränder och har en lång livslängd. Det som påverkar betongens beständighet är i stor utsträckning avgörande av yttre faktorer.

Det viktigaste för elementen i armerad betong är att betongen skyddar armeringen som är betydligt mer korrosionskänslig. Vid ett korrekt utformat armerat betongelement är den kemiska miljön alkalisk och tät vilket medför att det bildas ett oxidskikt på armeringsytan och korrosionsprocessen kan ej fortgå (Al-Emrani et al, 2011). Vid ett bristfälligt utformat element finns det två primära faktorer till korrosion i armering – karbonatisering och kloridinträngning (se Bilaga 1.1 Betong). Det är därför mycket viktigt att dimensionera broelementen på ett sätt som förhindrar att nämnda faktorer uppstår. Betongens hållfasthetsklass är direkt korrelerande med betongens porositet. Ju högre hållfasthet desto tätare betong och ju tätare betong desto mindre fukt i konstruktionen. Ett tillräckligt tjockt täckskikt kommer även hindra att karbonatiseringen når armeringen samt minskar närvaron av fukt.

Betongen kommer även impregneras med vissa kemiska metoder för att skapa ett skyddande lager utanpå ytan eller stärka ytans struktur vilket minskar kloridinträngning och karbonatisering. I en undersökning gjord av SBUF påvisas att stora beständighetsförbättringar kan uppnås genom flera olika kemiska behandlingar (SBUF, u.å.). Dock visar undersökningen att impregneringarna fungerar bäst på betong med lågt vattencementtal vilken redan är bäst på att motstå korrosion.

7.3.2 Vägbanan

Enligt Trafikverket har vägbeläggningen på en lågt trafikerad bro en livslängd på upp till 25 år och en hårt trafikerad väg upp till 5–10 år (Trafikverket, 2022b). Detta innebär att vägbeläggningen kommer att behöva bytas ut flera gånger under brons livstid samtidigt som mindre underhåll kommer att behöva göras regelbundet. Detta kan möjliggöras genom att ena körfältet byts ut och det andra agerar körfält i båda riktningar med trafikljus. Detta beräknas inte ha stor effekt på trafiken runtomkring.

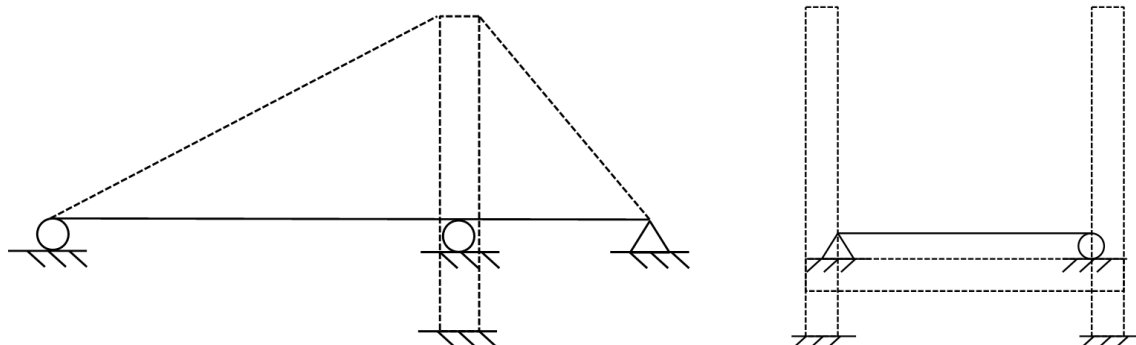
8. Beräkningsmodell

I detta kapitel tas en beräkningsmodell fram som ligger till grund för preliminärdimensioneringen.

8.1 Systemmodell

Beräkningar och dimensionering av bron skedde enligt beräkningsmodellen nedan, se Figur 13.

Farbanan och dess underliggande balkar betraktades som fritt upplagda på tvärbalken mellan pylonerna samt vid ändarna, både sett parallellt och vinkelrätt farbanans riktning.



Figur 13. Beräkningsmodell, längsled till vänster och tvärlid till höger.

8.2 Dimensionerande laster

De laster som bron dimensioneras för är uppdelade i permanenta och variabla laster. De permanenta lasterna är en förenklad egenvikt av bron utan till exempel vägräcken. De variabla lasterna är trafiklast, olyckslast och vindlast.

8.2.1 Egenvikt

De verkande egenvikterna på bron inkluderar tyngden på de längsgående balkarna, de tvärgående balkarna, betongplattan och asfaltsbeläggningen. Från KRAV bärlighetsberäkningar av broar (Trafikverket, 2020) hämtas egentygder för armerad betong (25 kN/m^3), stål (78 kN/m^3) och beläggning (23 kN/m^3).

8.2.2 Vindlast

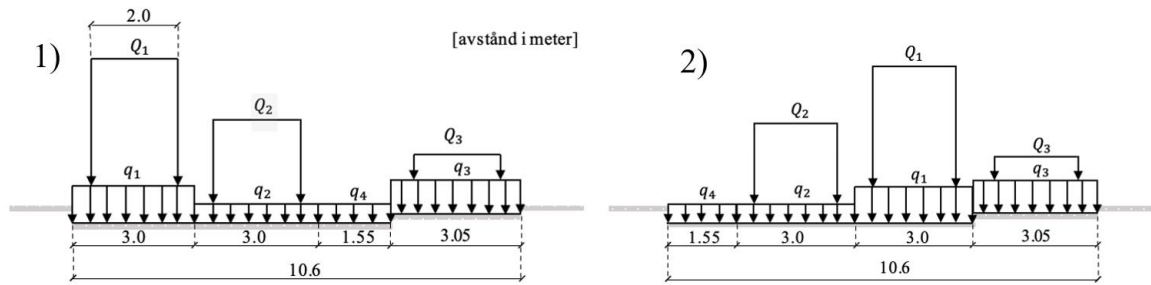
Dynamiska krafter kan orsaka tre typer av svängningsproblem: aerodynamisk instabilitet, störningar från vind och trafik samt olycksrisk vid jordbävningar (Pousette, 1998). Luftströmmarna bidrar till komplexa mekanismer som leder till instabilitet i bron. För en tillförlitlig dimensionering krävs vindtunnelttest som inte kommer beaktas i avsnitt 9. Vid dimensionering av pylonen beaktas vindlast som en statisk punktlast som verkar längst upp på pylonen enligt svensk standard SS-EN 1991-1-4:2005 (SiS, 2005). Dessutom har referensvindhastigheteten bestämts enligt Boverkets karta med vindlastzoner (Boverket, 2023).

8.2.3 Trafiklast

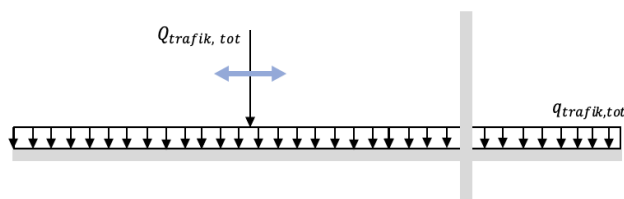
Trafiklasten på bron togs fram enligt svensk standard SS-EN 1991-2 (SiS, 2003) där olika lastmodeller beskrivs för dimensionering av broar i Sverige. Lastmodell 1 ansågs relevant i detta fall då spännvidden är mindre än 200 meter. Lastmodell 1 innebär att trafiklasten kan förenklas till punktlaster och utbredda laster som sedan placeras i tvärlid och längsled på sådant sätt att störst moment och tvärkraft uppkommer i respektive riktning. I detta fall kunde lasten för ett typfordon reduceras från två axlar till endast en axel som den totala lasten för typfordonet verkar i.

Eftersom bron har 2 körbanor användes ett typfordon per körfält. Varje lastgrupp placerades sedan bredvid varandra på tillgänglig köryta i respektive sektion varav på den icke belastade ytan placerades en utbedd last. På bron finns även en gång och cykelbana där en lastgrupp för ett servicefordon tillkommer. Se Figur 14 för möjlig placering av lasten i tvärlid. För placering i längsled fick

punktlasten placeras olika beroende på vilken del som dimensionerades, se kapitel 9 samt Figur 15. För värden på de olika lasterna se Bilaga 4.



Figur 14: Möjlig placering av trafiklast i tvärlid.



Figur 15: Placering av trafiklast i längsled.

8.2.4 Olyckslast

Olyckslaster har beaktats på så sätt att bron har dimensionerats för att bibehålla en erforderlig kapacitet utan en kabel. Detta då det ska vara möjligt att utföra underhåll av en kabel ifall detta skulle bli aktuellt under brons livslängd samt om en kabel skadas vid påkörning ska detta inte leda till kollaps.

8.2.5 Lastkombinationer

Dimensionering av konstruktioner ska enligt SS-EN 1990 (SiS, 2002) beakta både brottgränstillstånd (ULS) samt bruksgränstillstånd (SLS) vilket innebär att lasten provas i olika lastkombinationer som antingen reducerar eller intensifierar lasten. För dimensioneringen av de olika delarna användes ULS för att ta fram den största tänkbara belastningen och för laster som kan tänkas uppstå vid normal användning användes SLS.

Dimensionerande lastfall i brottgränstillstånd beräknas med ekvation 6.10.b från SS-EN 1990 (benämnd 1) och i bruksgränstillstånd användes ekvation 6.14 frekvent kombination, då endast nedböjning undersöktes i SLS (benämnd 2).

$$ULS = \Sigma 1,35 \cdot Q_k + 1,5 \cdot q_{k1} + \Sigma 1,5 \cdot \psi_1 \cdot q_{kn} \quad (1)$$

$$SLS = \Sigma Q_k + \psi_2 \cdot q_{k1} + \Sigma \psi_2 \cdot q_{kn} \quad (2)$$

I samtliga beräkningar benämns egentyngd som huvudlast Q_k medan trafiklasterna från de två typfordonen index 1 och 2, benämns som variabel huvudlast q_{k1} och servicefordonet med index 3 benämns som variabel sekundär last q_{kn} . Reduceringsfaktorerna ψ beror om det är en utbredd last eller punktlast, se Bilaga 4 för beräkning av de olika lastkombinationerna.

9. Preliminär dimensionering

Eftersom de olika konstruktionsdelarna samverkar har designprocessen till stor del skett iterativt. Beräkningar har utförts i MATLAB, delvis i kombination med finita element-tillägget CALFEM. Samtlig MATLAB-kod finnes i bilagor och refereras löpande till i avsnitten nedan.

Farbanan och tvärbalkar samverkar initialt och en separat modell har gjorts för att få fram dimensioner där tvärbalkarna modellerats som fast inspända i båda ändar då de är svetsade mellan de längsgående balkarna. Dessa två konstruktionsdelar agerar sedan som en del av lasten på de längsgående balkarna. De längsgående balkarna samverkar med kablarna och pyloner. Därför har balkar och kablar modellerats i en egen modell där moment och tvärkraft i balk samt normalkraft i kablar kan erhållas. Kablarnas frihetsgrader vid infästningen i pylonen samt den vertikala frihetsgraden där balken vilar på pylonen har antagits till noll för att kunna dimensionera pylonen enskilt. Normalkrafter från kablarna har alltså erhållits ur CALFEM-modellen för balk och kablar och sedan placerats på pylonmodellen. Pylonen har sedan dimensionerats utifrån dessa krafter så att den inte ska röra sig i vertikal- eller horisontalled och på så sätt kan ovan nämnda frihetsgrader föreskrivas till noll.

9.1 Farbanan

Farbanan beaktades som fritt upplagd i varje spann mellan tvärbalkarna vilket gjorde att betongplattan i varje spann kan beaktas som enskilda element. Aktuella laster är egentygnd från betong och beläggning samt trafiklast verkande i mitten av spannet för att ge maximalt moment. Varje spann har satts till 3 meter och den totala bredden till 11,4 meter, där 0,4 meter är tillagt på respektive sida för utrymme för sidoräcken. Detta har gett en total höjd för betongplattan på 0,3 meter med en 0,1 meter tjock beläggning. Detta gav i slutänden en utnyttjandegrad för momentkapaciteten på 89,5 %. Till slut bestämdes att betongplattan kan ta upp tvärkraften utan att tvärkraftsarmering behövde läggas in genom kontroll för skjuvglidbrott. För beräkningar se Bilaga 5.

9.2 Tvärbalkar

Nedan presenteras resultatet av den preliminära dimensioneringen av tvärbalkarnas i bruks- och brottgränstillstånd.

9.2.1 Brottgräns

På balken verkar trafiklasten i tvärled enligt Figur 14 samt egentygnd från farbana och tvärbalkar. Eftersom trafiken endast kan placeras på två sätt enligt Figur 14 plottades båda fallen och den mest ogynnsamma storleken på moment och tvärkraft valdes med hjälp av CALFEM-modellen för tvärbalken, se Bilaga 6. Tvärbalkarna samt svetsarnas kapaciteter kontrollerades mot värdena erhålla från CALFEM, se Bilaga 7. Se Figur 16 för slutliga tvärsnittet för balkarna samt utnyttjandegrad enligt tabell 4 nedan.

Tabell 4: Kapaciteter och verklig belastning samt utnyttjandegrad för moment och tvärkraft.

	Belastning [kNm, kN]	Kapacitet [kNm, kN]	Utnyttjandegrad [-]
Moment	2 684,0	3 231,4	0,83
Tvärfkraft	1 424,7	2 344,6	0,61

För svetsarna erhöles största ändmoment samt tvärkraft från samma modell och lastfall som ovan. Tvärbalken svetsas på den längsgående balken med horisontella svetsar ovanför och under flänsarna samt vertikala svetsar längs livet. Det gjordes ett antagande att de vertikala svetsarna tar all vertikal belastning och de horisontella svetsarna tar upp kraftparet som momentet ger upphov till. Det slutliga a-måttet blev 4 millimeter för de vertikala svetsarna samt 14 millimeter för de horisontella, där a-måttet är det kortaste avståndet i svetsen.

9.2.2 Bruksgräns

I bruksgränstillstånd placerades lasten på samma sätt som för brottgränstillstånd. Den momentana nedböjningen beräknades med CALFEM-modellen där kravet om största nedböjning är $L/400$ (Banverket & Vägverket, 2009), där L är balkens längd, se Bilaga 8. Se tabell 5 nedan för storlek på nedböjning och nedböjningskrav.

Tabell 5: Nedböjningen samt max nedböjning för tvärbalken.

Nedböjning [mm]	Krav [mm]	Utnyttjandegrad [-]
6,00	29,75	0,20

9.3 Längsgående balkar

Nedan presenteras resultatet av den preliminära dimensioneringen av de längsgående balkarna i bruks- och brottgränstillstånd.

9.3.1 Brottgräns

Lasten som verkar på balken är trafiklasten samt egentygden från farbana, tvärbalkar och de längsgående balkarna. Punktlaster från trafiken är i tvärlängd placerade på olika avstånd och verkar således som flera punktlaster. För längsled ser man lasterna från sidan och därav slås alla punktlaster från trafiken ihop till en och samma punktlast på farbanan, se Figur 15. Placeringen av den totala punktlasten itererades fram i CALFEM-modellen för balk och kablar för att erhålla störst moment och tvärkraft i de längsgående balkarna, se Bilaga 9. Moment och tvärkraftskapacitet kontrollerades för för lasterna erhållna från CALFEM, se Bilaga 7. Se Figur 16 för slutliga tvärsnittet för balkarna samt utnyttjandegrad enligt Tabell 6 nedan.

Tabell 6: Kapaciteter och verklig belastning samt utnyttjandegrad för moment och tvärkraft.

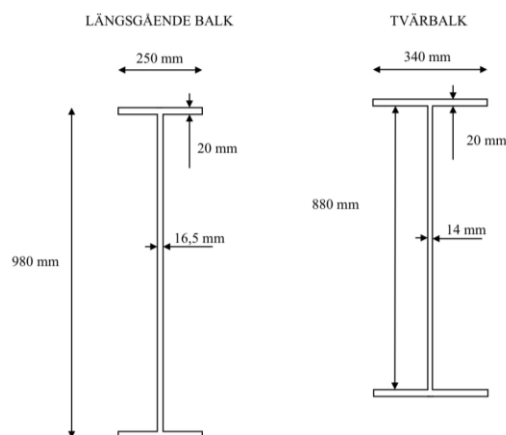
	Belastning [kNm, kN]	Kapacitet [kNm, kN]	Utnyttjandegrad [-]
Moment	2 999,8	3 068,9	0,98
Tvärcraft	1 462,2	3 256,7	0,45

9.3.2 Bruksgräns

I bruksgränstillstånd itererades återigen placeringen av punktlasten i CALFEM-modellen för att få den största nedböjningen, se Bilaga 10. Ekvation 2 användes för att beakta lasten i bruksgränstillstånd, se Tabell 7 nedan för storlek på nedböjning och nedböjningskrav.

Tabell 7: Nedböjningen samt max nedböjning för längsgående balkar

Nedböjning [mm]	Krav [mm]	Utnyttjandegrad [-]
65,13	90,0	0,72



Figur 16. Balktvärsnitt.

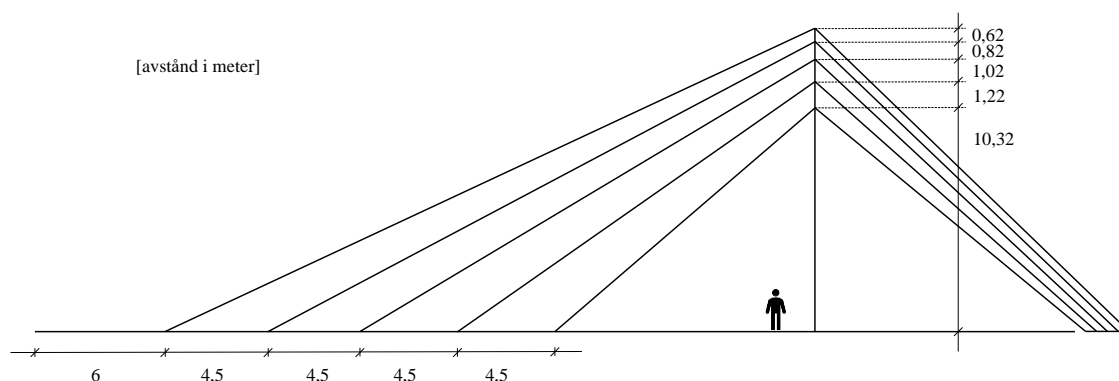
9.4 Kablar

Genom att variera infästningspunkter på pylon och längsgående balkar kunde kabelutformningen itereras fram. Den slutliga utformningen innebär att samtliga kablar endast bär last i drag vid samtliga lastpositioner samt tillgodoser nedböjningskravet för farbanan

För dimensioneringen av kablarna togs den största normalkraften som uppkommer i en av kablarna fram med CALFEM-modellen för längsgående balk och kablar. För fallet med alla fem kablar intakta användes lasten i brottgränstillstånd. Kabelbrott eller kabelbyte är däremot en exceptionell dimensioneringssituation enligt SS-EN 1990 och därmed används lastfallet enligt bruksgränstillstånd.

Det dimensionerande fallet blev då samtliga kablar är intakta, där största normalkraft beräknades till 2 077,6 kN. Detta jämfördes med tillgängliga kapaciteter på kablar från tillverkaren BBR från systemet BBR HiAm CONA (BBR, 2021). Den variant som stämde bäst överens hade en kapacitet på 3 348 kN och diameter vid infästning på 121 millimeter. Kablarnas placering visas i Figur 17.

För kablarna över det mindre spannet kommer normalkrafterna att bli något större på grund av den mindre vinkeln mot pylonen. Beräkningar visade dock att dessa inte överskrider 3 348 kN och därmed kan samma kabeldimensioner användas även för dessa kablar. Se Bilaga 9 för beräkning och CALFEM-modell.



Figur 17. Placering av kablar.

9.5 Infästningar

Infästningar avser kablarnas koppling till pylon samt längsgående balkar och betongfundament. Här har endast enkla kontroller av svetsar samt designförslag tagits fram.

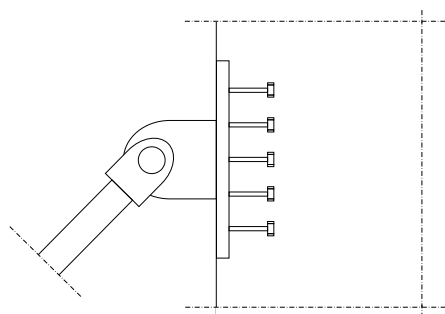
9.5.1 Infästning på längsgående balkar

Vid infästningen av kablarna kunde dessa inte fästas på den längsgående balkens överfläns eftersom pylonen ligger på utsidan av balken. Kablarna hade då blivit sneda och resulterat i sneda krafter på pylonen vilket skulle försvåra beräkningarna. Därför togs ett alternativ fram där man svetsar utstickande öron från livet där kablarna fäster och på så sätt hamnar i linje med pylonerna, se Figur 11. Genom att svetsa dem i samma vinkel som kabeln ansluter blir det ingen vridning i infästningen. De svetsar som är parallellt kraftriktningen kan antas ta dragkraften medan de vinkelräta svetsarna tar kraftparet från momentet som uppkommer från excentricitet. De slutliga a-måtten blev 6 millimeter för vertikala svetsarna samt 9 millimeter för de horisontella, se Bilaga 11. Inga beräkningar för plåtarna utfördes.

9.5.2 Infästning på pylon

För anslutning mellan kabel och pylon har ingen dimensionering gjorts utan beskrivs endast. Vid varje kabelinfästning bör en platta av stål gjutas in i betongpylonen för att tillhandahålla en

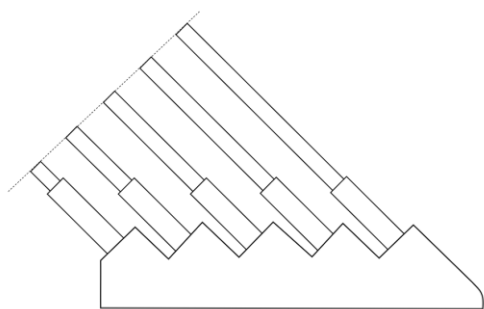
anslutningspunkt mellan kabel och pylon genom svetsning. Denna platta ska var försedd med stålförankringar för att kunna överföra kabelns dragkraft till tryckkraft i pylonen, se Figur 18.



Figur 18. Exempelutformning av kabeln infästning i pylonerna. Observera ej skalenlig.

9.5.3 Infästning ankare

Kablarna över det kortare spannet kommer att behöva fästas i ett fundament för att kompensera för brons asymmetri. I en fullt symmetrisk snedkabelbro balanseras krafterna så att pylonen utsätts för rent tryck. På grund av asymmetrin måste i stället dessa kablar fästas på ett sådant sätt att de balanserar krafterna från kablarna som lyfter upp det längre spannet. Fundamentet bör pålas för att motverka upptryckning. Se figur 19 för exempelutformning.



Figur 19. Exempelutformning av kabelinfästning i ankare. Observera ej skalenlig.

9.6 Pyloner

Pylonerna har dimensionerats utifrån de normalkrafter som verkar från kablarna och den nedre tvärgående betongbalken. Det har antagits att den dimensionerande delen av pylonen är den delen som från marken upp till där nedersta kabeln fästs in i pylonen i farbanans riktning. Vid varje infästningspunkt antas att denna punkt kan modelleras som en led i den längsgående riktningen eftersom kablarna motverkar rörelse i denna riktning. Detta medför en kort knäcklängd mellan varje infästningspunkt och har därmed antagits ha tillräcklig kapacitet ifall den dimensionerande delen har tillräcklig kapacitet. Därmed har pylonen modellerats som fast inspänd i marken och ledad i den nedersta kabelinfästningspunkten där samtliga normalkrafter från kablarna verkar vid 17,12 meter räknat från marken. Övriga normalkrafter som verkar på pylonen kommer från den tvärgående betongbalken mellan pylonerna som de längsgående stål balkarna vilar på. Denna betongbalk har dimensionerats som fast inspänd i respektive pylon samt med punktlaster från varje stål balk. Initialt antogs tvärsnittsmåtten 1x1 meter, vilket sedan kontrollerades i beräkningarna i Bilaga 12. Både krafterna från kablarna och från punktlaster och egentyngd från den tvärgående balken har därmed antagits verka i pylonens tyngdpunkt i den längsgående riktningen.

I pylonens tvärgående riktning så har pylonen antagits stagad av de båda tvärbalkarna och har därmed antagits vara den styva riktningen. Därmed har pylonens tvärriktning inte kontrollerats.

Pylonernas tvärsnitt har därmed beräknats till 1,5x1,5 meter vilket gav utnyttjandegrader för moment och knäckning enligt Tabell 8. Pylonernas totala höjd har beräknats till 20,8 meter.

Armeringsstängerna som är placerade i pylonen har behövts skarvas eftersom höjden på pylonen är större än standardlängder för armeringsjärn. Här har dock inga beräkningar gjorts, endast ett konstaterande att skarvningen bör läggas in någonstans nedanför den nedersta kabelinfästningen. För beräkningar av pylonerna se Bilaga 13.

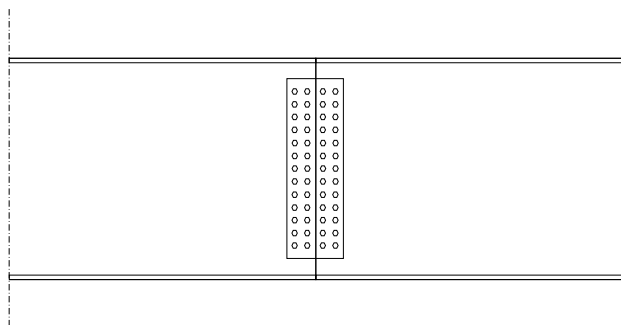
Tabell 8: Kapaciteter och verklig belastning samt utnyttjandegrad för moment och knäckning för pylonerna.

	Belastning [kNm, kN]	Kapacitet [kNm, kN]	Utnyttjandegrad [-]
Moment	2 717,0	8 565,1	0,32
Knäckning	11 222,4	32 266,5	0,35

9.7 Skarvning av längsgående balkar

I och med att balkelement tillverkas med en längd på maximalt 18 meter och brons farbana resulterade i en längd på 48 meter krävs att de längsgående balkarna skarvas. Detta bör göras på två ställen där momentet är så litet som möjligt, vid 16,3 och 31,8 meter, se Bilaga 9 för momentdiagram för de längsgående balkarna. För att skarva balkar är det möjligt att utforma förband med antingen svetsade eller skruvade plåtar på varsin sida om livet. I detta fall valdes skruvförband i och med att det är ett bättre alternativ sett till arbetsmiljö och kostnad. Skruvförbanden dimensionerades med kapacitet för båda skarvarna med motiveringen att underlätta produktionsmässigt samtidigt som en så liten plåt som möjligt bör eftersträvas för att minimera materialåtgång.

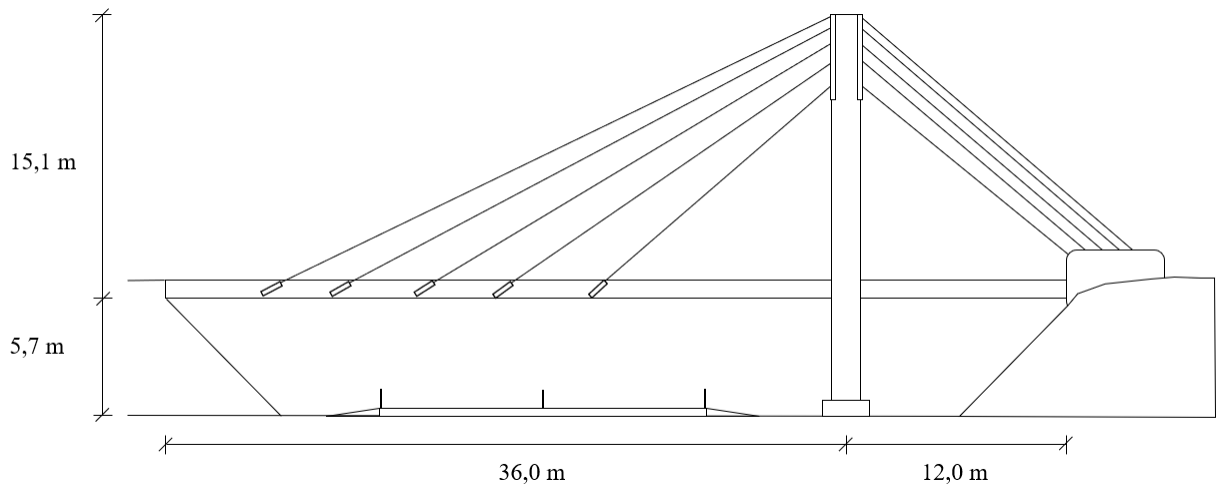
Dimensioneringen bestod av itererande beräkningar för olika stora skruvförband med olika antal skruvar fram till att ett fungerande förband uppnåddes, enligt Eurocodes beräkningsmetod för hålkantbrott och skjuvbrott i skruvarna (Al-Emrani et al, 2011). Skruvförbandet utgjordes slutligen av två plåtar på varsin sida livet av den längsgående balken med 26 skruvar av typen M24, det vill säga 24 millimeter i diameter, för varje balkdel. Se Figur 20 för bild av förbandet. Förbandsplåten hade en bredd på 250 millimeter och en höjd på 796 millimeter. För dimensionering av det slutgiltiga skruvförbandet se Bilaga 14.



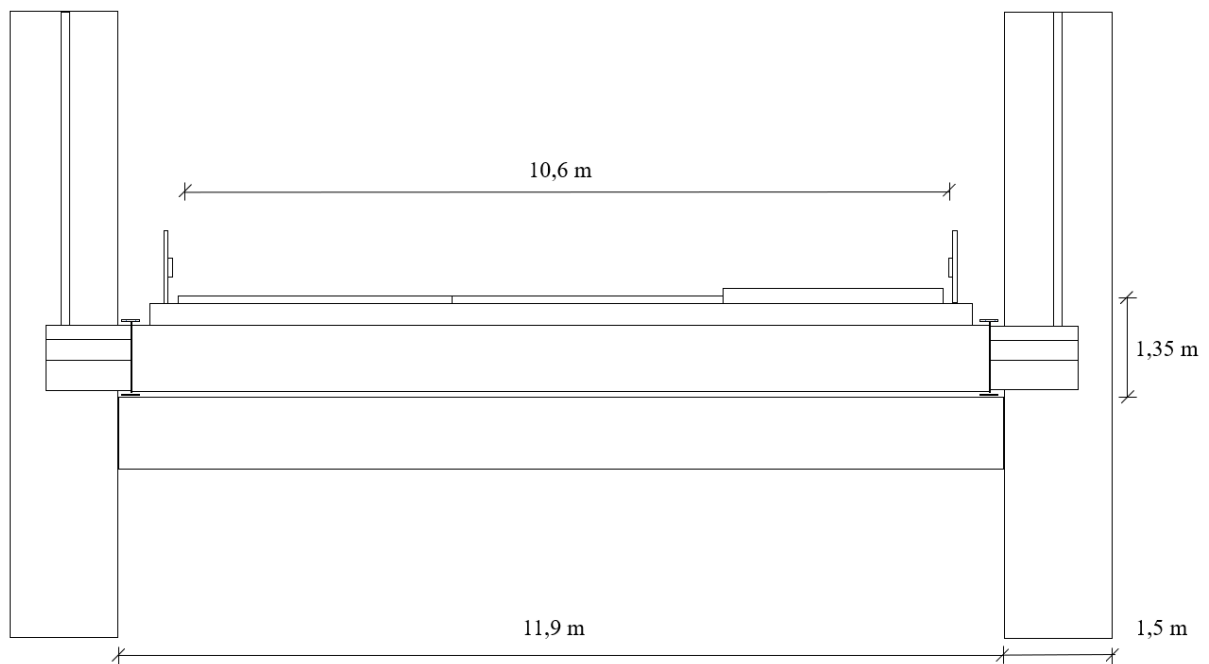
Figur 20: Skruvförband, placerade vid 16,3 och 31,8 meter på de längsgående balkarna.

9.8 Översiktlig utformning

Nedan presenteras brons utformning i längs- och tvärled, se figur 21 och 22.



Figur 21: Brons detaljutformning i längsled.



Figur 22: Brons detaljutformning i tvärled.

10. Diskussion

I detta kapitel diskuteras de val som har gjorts i urvalsprocessen, dimensioneringsprocessen och användning av referenser för att komma fram till ett slutgiltigt brokoncept.

10.1 Urvalsprocess

Processen började med granskning av de underlag som hämtades in om platsen från COWI samt granskningshandlingar från Trafikverket. De geotekniska förutsättningarna visade att ena brostödet kommer att grundläggas på sättningkänslig lera och det andra på en stabil friktionsjord. Detta medförde att det skulle bli svårt att bygga en bågbro utan dragband då den sättningkänsliga leran inte skulle kunna bära upp krafterna.

I urvalet har bron estetiska utformning vägt tungt för vilka brotyper som varit aktuella. Detta för att möta målet att den slutgiltiga bron ska agera som en port till Söderköping. Att de estetiska incitamenten vägt så tungt som de gjort i detta arbete är inte särskilt vanligt i broprojekt där budgeten till största sannolikhet är den styrande faktorn. Det valda synsättet har möjliggjort ett mycket mer varierat och kreativt urval än vad som hade tillåtits om de ekonomiska aspekterna varit viktigare. Samtidigt kan bedömningsprocessen av den estetiska utformningen innehålla en viss bias då det i högsta grad är en subjektiv fråga.

Vidare har ekonomiska och miljömässiga aspekter av bron förenklats men inte helt förbisett i urvalet då kompletta budget- och miljöpåverkansberäkningar inte var möjliga. De har beaktats på så sätt att brotypen ska vara lämplig för det valda brospannet för att inte erhålla en onödigt dyr eller komplex bro samt att vald brotyp ska kunna materialoptimeras till den grad att miljöpåverkan i urvalet ska vara snarlikt mellan de olika brotyperna. Detta möjliggjorde ett urval som innehöll fler brotyper som mötte de estetiska förväntningar på bron utan att eliminera de enklare brotyperna som inte var lika estetiskt tilltalande. Det går att argumentera för att detta är ett verklighetsfrånvänt sätt att välja brokoncept då de ekonomiska aspekterna i ett broprojekt oftast är de som väger tyngst och ponerat detta är det troligt att en snedkabelbro inte hade valts i ett reellt projekt.

10.2 Dimensioneringsprocess

En viktig del i dimensioneringsprocessen var att designa för en så hög utnyttjandegrad som möjligt i brottgräns för att nyttja materialet till fullo. De långsgående balkarna har fått en hög utnyttjandegrad och kan därför anses godtagbara. Vad gäller tvärbalkarna blev utnyttjandet inte lika högt vilket berodde på att a-måtten för svetsarna behövde vara relativt stora och för stora a-mått är inte ekonomiskt lönsamt. För att minimera a-måttet fick tvärbalken gå upp i dimensioner för att öka svetslängderna vilket ökade kapaciteten för balken och gav således en lägre utnyttjandegrad av materialet. Detta kan visa på att den valda designen på farbanan kanske inte är den mest optimala utan andra varianter kan ge ett annat resultat.

Vid dimensionering av pylonerna har ett antagande gjorts att samtliga normalkrafter verkar i pylonens tyngdpunkt i längsled för att förenkla beräkningarna. Detta kan leda till att det dimensionerande momentet i pylonen blir något lägre än vad det egentligen är. Dessutom så har det antagits att kablarna från respektive sidor av pylonen samverkar för att skapa en horisontell jämvikt med hjälp av betongankaret. Detta innebär att inga horisontella krafter utöver vindlast har beräknats vilket annars hade kunnat bidra till ett större moment i pylonen. Däremot är utnyttjandegraden för både knäckning och moment låga i jämförelse med andra konstruktionsdelar och mycket lägre än vad som egentligen är eftersträfvansvärt. Så även om de laster som använts i dessa beräkningar är för låga så finns god möjlighet till att pylonerna har tillräcklig kapacitet.

I denna rapport har det inte gjorts några beräkningar på infästningarna av kablarna utan endast presenterats i form av exempelutformningar som har antagits klara de krafter de utsätts för. Detta är något som i vidare dimensionering hade behövts studeras mer i detalj gällande exakt hur dessa

utformningar ska se ut, exempelvis hur betongen i pylonerna ska klara av de dragkrafter som den utsätts för i infästningspunkten.

Vad gäller pylonernas höjd blev de högre än de tidigare nämnda 25% av spannet (ca 29%). Detta beror på att nedböjningen initialt blev dimensionerande framför kapaciteten på de längsgående balkarna. Genom att öka pylonhöjden blev vinkeln på kablarna större vilket resulterade i en större dragkraft i kablarna och mindre nedböjning. Troligtvis beror detta på att bron ej är symmetrisk och på grund av det mindre spannet ger 25% en för liten pylonhöjd.

Ingen kontroll av dynamiska laster har gjorts vilket innebär att bron har undermålig kapacitet i den aspekten och bör undersökas noggrannare vid beslut om fortsatt konstruktionsarbete. Påkörningslast som olyckslast på pylonerna har inte dimensionerats för då det finns tillräckligt utrymme mellan vägräckena och pylonerna för att utnyttja vägräckenas arbetsbredd. Vidare har inte krympning och krypning beaktats för konstruktionsdelarna i betong vilket i verkligheten leder till större inre spänningar i betongen som kan minska dess kapacitet. Ytterligare fenomen som inte har dimensionerats för är vippning och buckling som hade kunnat bidra till instabilitetsproblem.

10.3 Användning av litteratur

Vid informationshämtning till detta arbete har källor med direkt eller indirekt anknytning till brobyggande uteslutande använts. Trafikverket är den mest använda källan i arbetet då det är den beslutande myndigheten kring regelverket av bro- och vägbygge och anses därför som den mest pålitliga källan. Vid beräkningar har kurslitteraturen Bärande konstruktioner del 1 och del 2 använts som baseras på Eurocode 2 vilken är den europeiska standard som används vid design av strukturer. Utöver dessa har informationshämtning skett från källor som har gott anseende inom branschen och kan även dessa anses pålitliga till den information de gett. Det har även lagts stor vikt vid att använda källor som anger uppdaterad information och nya regelverk.

11. Slutsats

Det slutgiltiga konceptet utifrån urvalsprocessen var en asymmetrisk snedkabelbro med farbana och pyloner i betong. Brokonceptet anses vara väl anpassat utifrån de platsspecifika krav som anses viktiga enligt förstudien. Bron uppfyller kraven som ställdes på specialistgrupperna konstruktion, produktion och förvaltning samt önskemålet om ett estetiskt tilltalande koncept.

Den preliminära dimensioneringen av brokonstruktionen visar att alla element uppfyller tillräcklig kapacitet i bruks- och brottgränstillstånd av hållfasthet och deformation enligt Eurocode 2. De tvärgående och längsgående balkarna uppnår moment- och tvärkraftskapacitet, pylonerna uppnår tillräcklig tryckkraftskapacitet, svetsar klarar de spänningar som uppstår, skruvförband uppfyller kapacitet för skjuv- och hålkantsbrott samt kabelsystemet uppnår tillräcklig dragkraftskapacitet.

Sammanfattningsvis är denna rapport ett gott exempel på ett genomförbart och välanpassat brokoncept på det uppställda problemet. Bron kommer förbättra trafiksituationen i och omkring Söderköping samtidigt som ett estetiskt tilltalande landmärke tillkommer.

Litteraturförteckning

- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2019). *Bärande konstruktioner del 1*. Göteborg: Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, Avdelningen för konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola.
- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2011). *Bärande konstruktioner del 2*. Göteborg: Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, Avdelningen för konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola.
- Al-Emrani, M. (24 januari 2023). *Stål- och samverkansbroar*. [PowerPoint-Presentation]. Chalmers Tekniska Högskola.
- Banverket, & Vägverket. (2009). *TK Bro*. Vägverket.
- BBR (2021). *Elegance and Strength. The extended HiAm CONA family*. BBR VT International. Hämtat från <https://www.bbrnetwork.com/fileadmin/userdaten/Broschueren/Schraegkabel/BBR-HiAm-CONA-EN-Rev4-0421.pdf> den 5 maj 2023
- Boverket (2023). *Karta med vindlastzoner*. Hämtad från <https://www.boverket.se/sv/byggande/regler-for-byggande/om-boverkets-konstruktionsregler-eks/sa-har-anvander-du-eks/karta-med-vindlastzoner/>
- Broo, H. (2023). *Brokonstruktion Produktionsmetoder*. Skanska Sverige AB.
- Brosamverkan. (2022). *Broprojekteringshanboken Utgåva 1*. Brosamverkan.
- Burström, P. G. (2010). *Byggnadsmaterial*. Studentlitteratur.
- Cementa. (u.å.). *Karbonatisering – vad är det?* Hämtat från [cementa.se: https://www.cementa.se/sv/karbonatisering-vad-ar-det](https://www.cementa.se/sv/karbonatisering-vad-ar-det) den 7 mars 2023
- Fossilfritt Sverige. (2018). *Stålindustrin*. Hämtat från [fossilfritt sverige.se: https://fossilfritt sverige.se/roadmap/stalindustrin/](https://fossilfritt sverige.se/roadmap/stalindustrin/) den 22 februari 2023
- Hirt, L. (2013). *Steel bridges*. EPFL Press.
- Jernkontoret. (4 april 2022). *Processernas miljöpåverkan*. Hämtat från [jernkontoret.se: https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/processernas-miljopaverkan/](https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/processernas-miljopaverkan/) den 23 februari 2023
- Nationalencyklopedin. (u.å.). *Utmattning*. Hämtat från [ne.se: https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/1%20C3%A5ng/utmattning](https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/1%20C3%A5ng/utmattning) den 22 februari 2023
- Nordén, M – L & Nyberg, F. (30 januari 2023). *Kabelbyte Strömsundsbron*. [PowerPoint-Presentation]. Svevia.
- Pousette A. (1998). *Snedstags och hängbroar. Litteraturstudie med inriktning mot trä*. Hämtat från <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1079828/FULLTEXT01.pdf>
- Reuterswärd, P. (2010). *Optimal skötsel av stålbroar* (Rapport KIMAB-2010-130 rev). Swerea KIMAB, https://introteknik.se/wp-content/uploads/rapporter%20och%20tester%20docs/Optimal%20sk%C3%B6tsel%20av%20st%C3%A5lbroar_KIMAB%202010-130rev.pdf
- SBUF. (u.å.). *Kemiska metoder för ökad beständighet*. Hämtat från [sbuf.se: https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/InfoSheets/PublishedInfoSheet/c315c832-fbfb-4a44-8e95-fcd592171c6f/15-](https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/InfoSheets/PublishedInfoSheet/c315c832-fbfb-4a44-8e95-fcd592171c6f/15-)

[30% 20Kemiska% 20metoder% 20f% C3% B6r% 20% C3% B6kad% 20best% C3% A4ndighet% 20av% 20betongskonstruktioner.pdf](#) den 7 mars 2023

SiS (2003) *Svensk standard SS-EN 1991-2*. Hämtad från <https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsindustrin/tekniska-aspekter/ssen199122/>

SiS (2002) *Svensk standard SS-EN 1990* Hämtad från <https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsindustrin/tekniska-aspekter/ssen1990/>

SiS (2005) *Svensk standard SS-EN 1991-1-4:2005*. Hämtad från <https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsindustrin/tekniska-aspekter/ssen1991142005/>

Skogsstyrelsen. (2021). *Skogen ger klimatvänligt byggnadsmaterial*. Hämtad från <https://www.skogsstyrelsen.se/miljo-och-klimat/skog-och-klimat/klimatvanligt-byggnadsmaterial/>

SSAB. (2023). *SSAB Weathering*. <https://www.ssab.com/sv-se/varumarken-och-produkter/ssab-weathering/artiklar/hashalom>

Statistiska centralbyrån. (17 februari 2023). *Utsläpp av växthusgaser*. Hämtat från scb.se: <https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/miljo/utslapp-av-vaxthusgaser/> den 9 mars 2023.

Svensk Betong. (u.å.a). *Beständighet och livslängd*. Hämtat från svenskbetong.se: <https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-platsgjutet/hallbart-byggande/bestandighet-och-livslangd> den 8 mars 2023.

Svensk Betong. (u.å.b). *Koldioxidutsläpp*. Hämtat från <https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-prefab/miljo-och-hallbarhet/koldioxidutslapp> den 15 februari 2023

Svevia. (u.å.). *En bro behöver lite extra omvårdnad*. (Svevia) Hämtat från <https://www.svevia.se/vart-erbjudande/bygga-vag-och-bro/brounderhall> den 14 februari 2023

Sällfors, G. (2013). *Geoteknik*. Göteborg: Cremona Förlag.

Trafikverket. (2008). *BaTMan - Kodförteckning och beskrivning av brotyper*.

Trafikverket. (2017). *Från planering till byggande*. Hämtat från <https://bransch.trafikverket.se/om-oss/var-verksamhet/sa-har-jobbar-vi-med/Fran-planering-till-byggande/>

Trafikverket. (2018). *Säkerhetsavstånd vid byggande intill väg*. Hämtat från <https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/Planera-och-utreda/samhallsplanering/Sakerhet-och-konflikter/Sakerhetsavstand-mellan-infrastruktur-ny-bebyggelse-samt-ovriga-anordningar/sakerhetsavstand-vid-byggande-intill-vag/>

Trafikverket. (2019a). *GRANSKNINGSHANDLING E22 Förbi Söderköping inkl. väg 210 Skärgårdslänken*. Trafikverket. Hämtat från https://bransch.trafikverket.se/contentassets/3b057432dc644f6e9c3bc47cd7e5134b/e22_forbi_soderkopring_vagplan_granskningshandling_02_planbeskrivning.pdf.

Trafikverket. (2019b). *KRAV Krav brobyggande*. Brosamverkan.

Trafikverket (Regissör). (2022a). *Drift och underhåll av broar och tunnlar* [Film]. Sverige.

Trafikverket. (2022b). *Underhåll av belagda vägar*. Hämtat från trafikverket.se: <https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/underhall/sa-skotervi-vagar/underhall-av-belagda-vagar/> den 8 mars 2023

Trafikverket. (2023). *Så sköter vi broar och tunnlar*. Hämtat från <https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/underhall/sa-skoter-vi-broar-och-tunnlar/>

Trafikverket (2020) *Krav bärighetsberäkningar av broar*. Trafikverket

TräGuiden. (u.å.). Hämtat från Träbroar:

<https://www.traguiden.se/konstruktion/konstruktionsexempel/trabroar/>

Vägverket. (1996). *BROPROJEKTERING - en handbok*. Borlänge: Vägverket.

https://bransch.trafikverket.se/contentassets/3b057432dc644f6e9c3bc47cd7e5134b/e22_forbi_soderkoping_vagplan_granskningshandling_02_planbeskrivning.pdf

Bilagor

Bilaga 1 – Konstruktionsmaterial

De främsta konstruktionsmaterialen för brokonstruktioner är stål, trä och betong. Val av material påverkar bland annat konstruktionens bärförmåga, deformation över tid samt behov av underhåll. I detta avsnitt presenteras respektive materials för- och nackdelar vid brobyggande.

1.1 Betong

Betong består av sten och grus som är blandat med vatten och cement (Al-Emrani M. m., 2019).

Cement kommer från förbränning av kalksten och har en sammanbindande funktion.

Konstruktionsmaterialet är ett av de mest använda då betong har lång livslängd, hög beständighet och litet behov av underhåll. Betong kännetecknas av att den har hög tryckhållfasthet och låg draghållfasthet, där draghållfastheten är cirka 10% av tryckhållfastheten. Detta medför att betongen lätt spricker där den är utsatt för dragkrafter, därför armerar man i dragzonen för att öka draghållfastheten.

Betong har några långtidsrisker som måste tas hänsyn till vid dimensionering (Burström, 2010). Under lång tid uppstår deformationer såsom krypning och krympning. Betong som står utomhus påverkas av omkringliggande klimat och kommer långsiktigt att drabbas av armeringskorrosion. Att armeringen rostar vill man undvika då armeringen tappar sin funktionalitet samt att betongen kan spjälkas sönder då rosten trycker inifrån. Korrosion uppstår antingen av karbonatisering eller kloridinträngning (Burström, 2010). Karbonatisering sker då kalciumhydroxiden i betongen reagerar med luftens koldioxid som i sin tur leder till att pH-värdet i betongen sänks vilket betyder att betongen förlorar sin skyddande förmåga av armeringen. Om det i sin tur är fuktigt i luften kommer armeringsjärnen att börja korrodera. Kloridinträngning sker genom att klorider tränger sig in i det täckande betongskiktet och blir koncentrationen för hög kommer armeringskorrosion uppstå. Klorider kan exempelvis komma från tösalt eller havsvatten. Kloridinträngning är särskilt hotfullt då det accelererar korrosionsprocessen.

För att hindra armeringen från att korrodera är begräsning av sprickor i bruksstadiet viktigt då koldioxid, syret i vatten samt klorider lättare kan tränga in i betongen (Burström, 2010). Detta görs med förspänning (M. Karlsson, personlig kommunikation, 17 februari, 2023) och noggrann armeringsutformning.

Närvaron av fukt i betongens porösa struktur kan under lägre temperaturer innebära att fukten i betongen fryser (Dahlbom, 2000). När vatten fryser expanderar det och om tillräckligt mycket blir fast inuti betongen kan det ge upphov till frostsprängning då spänningar byggs upp inifrån.

Tillverkning av cement är en energikrävande process som släpper ut stora mängder koldioxid, cirka 3–4 % av världens koldioxidutsläpp kommer från tillverkningen av cement (Svensk Betong, u.å.a). Utgår man från ett livscykelperspektiv kan betong ses som mer hållbart då materialet binder koldioxid när den karbonatiserar. Betong har även lång livslängd och vid slutskedet går betong att återvinna vilket både är positivt för miljön och ekonomin (Svensk Betong, u.å.b).

1.2 Stål

Stål är en legering bestående till största del av järn och andra legeringsämnen vilka avgör dess önskade egenskaper (Al-Emrani M. m., 2019). Konstruktionsstål karakteriseras av dess höga hållfasthet i både tryck- och dragspänning samt dess höga elasticitetsmodul. Detta gör att konstruktionselement som byggs i stål kan göras väldigt slanka och fortfarande erhålla en god prestanda.

Stålelement prefabriceras och monteras sedan ihop i fabrik eller på byggarbetsplatsen genom antingen svetsning eller bultning (Al-Emrani M. m., 2019). På grund av att det finns många valmöjligheter i elementens utformning och förband mellan elementen erhålls många olika valmöjligheter. Detta gör

att stålkonstruktioner till hög grad kan optimeras för att erhålla en låg materialåtgång samtidigt som den uppfyller alla funktionskrav.

På grund av stålkonstruktioners slankhet är det viktigt att kontroll av tryckta elementdelar görs för att förhindra knäckning eller vippning och erhålla god stabilitet i konstruktionen (Al-Emrani M. m., 2019). Om stabilitetsproblem kan uppstå förhindras dessa oftast genom till exempel vertikala eller diagonala avstyvningar mellan olika element och lokala lösningar som avstyvningsplåtar.

Metaller utsätts efter upprepade av- och pålastningar av ett fenomen som kallas utmattning (Nationalencyklopedin, u.å.). Utmattning innebär att en liten förskjutning uppstår i kristallkornens struktur på grund av de upprepade av- och pålastningarna och dessa växer succesivt efter hand. Detta kan leda till att en spricka uppstår och i värsta fall kan även ett brott uppstå. Detta trots att de växelverkande lasterna är betydligt mindre än vad stålets dimensionerande hållfasthet är. Detta gör att för stålelement som utsätts för dessa typer av laster är utmattningsgränsen i stället dimensionerande.

Framställning av stål är en energikrävande process som genererar stora utsläpp av koldioxid och i Sverige står stålindustrin för utsläpp av cirka 5,5 miljoner ton koldioxidekvivalenter årligen (Fossilfritt Sverige, 2018) vilket står för 10,6 % av Sveriges totala utsläpp (Statistiska centralbyrån, 2023). Den mest energikrävande processen är järnmalmsreduktionen där kol används som reduktionsmedel och utgör runt 90 % av hela stålindustrins utsläpp (Jernkontoret, 2022). Men framsteg görs inom stålindustrin och konverteringen till en helt fossilfri sektor är planerad till 2045.

1.3 Trä

Historiskt sett är trä det material som människan har använt under längst tid (Al-Emrani M. m., 2019). En av materialets stora fördelar är dess låga vikt i förhållande till dess höga hållfasthet. På grund av dess låga vikt är det ett enkelt material att transportera samt att bränsleåtgången minimeras. Under senare år har kunskaperna om trä som konstruktionsmaterial blivit större, men materialet har fortfarande ett antal nackdelar. Framst är det fukt känslighet som kan leda till ytterligare problem så som röta. Dessutom är insektsangrepp ett problem och i vissa fall kan även brännbarheten hos materialet orsaka stora hinder. Detta leder till att konstruktioner så som broar har en begränsad livslängd på 40 år (Trafikverket, 2019b).

Trä är ett anisotrop material vilket gör att det beter sig olika beroende på i vilken riktning det belastas samt i tryck och drag eftersom trä är uppbyggt av rör som är sammanlimmade med lignin vilket gör att det är starkare i tryck parallellt med rören eller fibrerna (Al-Emrani M. m., 2019).

Eftersom trä är ett naturligt material, till skillnad från stål och betong, kommer egenskaperna variera beroende på hur trädet växer (Al-Emrani M. m., 2019). Då trä ska användas som byggmaterial i bärande konstruktioner måste det sorteras baserat på dess egenskaper. För att kunna sortera är det viktigt att kunna mäta hållfasthetsegenskaperna hos virke utan att förstöra materialet och detta kan göras genom ett flertal samband mellan materialets egenskaper. Ett exempel är att det generellt sett går att bestämma mellan 50–70% av variationen i böjhållfastheten med hjälp av träets elasticitetsmodul. På samma sätt kan densiteten bestämma 10–40% av variationen i böjhållfastheten. För trä krävs dessutom större volym av materialet för att bära samma last som för till exempel stål och betong.

Trä är ett material som ingår i kolets kretslopp som medför att trädet tar upp koldioxid när det växer och lagrar koldioxiden under dess livslängd. Detta medför att trä är ett mycket klimatvänligt alternativ i jämförelse med stål och betong (Skogsstyrelsen, 2021).

Bilaga 3 – Bild av modell



Bilaga 4 – Lastberäkningar

```
% ----- Källor -----
% Värden på trafiklaster & Reduceringsfaktorer enligt SS-EN 1991-2 (SiS,2003)
% Lastkombinationer enligt SS-EN 1990 (SiS,2002)
% ULS:
% Utbredda laster:
%  $\Sigma \gamma_G \cdot Q_k + \gamma_U \cdot q_{k1} + \Sigma \gamma_U \cdot \psi_{0U} \cdot q_{kn}$  (Ekv 1)
% Punktlaster:
%  $\gamma_U \cdot p_{k1} + \Sigma \gamma_U \cdot \psi_{0P} \cdot p_{kn}$  (Ekv 1)

% Faktorer:
%  $\gamma_G = 1.35$ , Egentyngd
%  $\gamma_U = 1.50$ , Laster (utbredd/punkt)
%  $\psi_{0U} = 0.4$ , Utbredd last
%  $\psi_{0P} = 0.75$ , Punktlast (boggie-system)

% SLS:
% Utbredda laster:
%  $\Sigma Q_k + \psi_{1U} \cdot q_{k1} + \Sigma \psi_{2U} \cdot q_{kn}$  (Ekv 2)
% Punktlaster:
%  $p_{k1} + \Sigma \psi_{2P} \cdot p_{kn}$  (Ekv 2)

% Faktorer:
%  $\psi_{1U} = 0.4$ , Utbredd last
%  $\psi_{1P} = 0.75$ , Punktlast (boggie-system)
%  $\psi_{2U} = 0$ , Utbredd last
%  $\psi_{2P} = 0$ , Punktlast (boggie-system)

% Värden på faktorer & laster enligt SS-EN 1990
% bf = bredd fläns, tf = tjocklek fläns
% hw = höjd flensar + liv, tw = tjocklek liv

%% ----- Tvärbalkar ULS -----
hb = 0.3; % Höjd betongplattan
ha = 0.1; % Höjd beläggning
l = 3; % Längd mellan tvärbalkar (längd av farbana som en tvärbalk bär)

% Mått tvärbalk
tf =20e-3; bf =340e-3; tw =14e-3; hw = 920e-3;
A = (hw - 2* tf)*tw + 2*(bf * tf); % Tvärsnittsarea

% Utbredda laster [N/m i sidled]:
% Egentyngder
G0 = -2.5e3 * 10 * hb * 1; % Egentyngd Betong
G1 = -7.8e3 * 10 * A; % Egentyngd Stål (Tvärbalk)
G2 = -23e3 * ha * 1; % Egentyngd Beläggning
Gtot = (G0 + G1 + G2) * 1.35; % Qk = Total egentyngd

% Trafik
q1 = -6.3e3 * l * 1.5; % qk1 = Primär variabel last
q2 = -2.5e3 * l * 1.5; % qk1 = Primär variabel last
q3 = -5.0e3 * l * 1.5 * 0.4; % qkn = Sekundär variabel last

% Punktlaster [N]:
Q1 = -540e3/2 * 1.5; % pk1 = Primär variabel last
Q2 = -360e3/2 * 1.5; % pk1 = Primär variabel last
Q3 = -120e3/2 * 1.5 * 0.75; % pkn = Sekundär variabel last

%% ----- Tvärbalkar SLS -----
hb = 0.3; % Höjd betongplattan
ha = 0.1; % Höjd beläggning
l = 3; % Längd mellan tvärbalkar (längd av farbana som en tvärbalk bär)

% Mått tvärbalk
tf =20e-3; bf =340e-3; tw =14e-3; hw = 920e-3;
A = (hw - 2* tf)*tw + 2*(bf * tf); % Tvärsnittsarea
```

```

% Utbredda laster [N/m i sidled]:
% Egentyngder
G0 = -2.5e3 * 10 * hb * 1; % Egentyngd Betong
G1 = -7.8e3 * 10 * A; % Egentyngd Stål (Tvärbalk)
G2 = -23e3 * ha * 1; % Egentyngd Beläggning
Gtot = (G0 + G1 + G2); % Qk = Total egentyngd

% Trafik
q1 = -6.3e3 * 1 * 0.75; % qk1 = Primär variabel last
q2 = -2.5e3 * 1 * 0.75; % qk1 = Primär variabel last
q3 = -5.0e3 * 1 * 0; % qkn = Sekundär variabel last

% Punktlaster [N]:
Q1 = -540e3/2 * 0.4; % pk1 = Primär variabel last
Q2 = -360e3/2 * 0.4; % pk1 = Primär variabel last
Q3 = -120e3/2 * 0; % pkn = Sekundär variabel last

%% ----- Längsgående balkar ULS -----
hb = 0.3; % Höjd betongplattan
ha = 0.1; % Höjd beläggning

% Mått Tvärbalk & Tvärsnittsarea (AT)
tf = 11e-3; bf = 200e-3; tw = 9e-3; hw = 650e-3;
AT = (hw - 2 * tf) * tw + 2 * (bf * tf); % Tvärsnittsarea

% Mått Längsgående balk & Tvärsnittsarea (AL)
tf = 20e-3; bf = 250e-3; tw = 16.5e-3; hw = 980e-3;
AL = (hw - 2 * tf) * tw + 2 * (bf * tf); % Tvärsnittsarea

% Utbredda laster [N/m i längsled]:
% Egentyngder
% Antar att tvärbalkarna verkar som jämnt utbredd last (G1) istället för
% punktlaster
G0 = 2.5e3 * 10 * hb * 11.4; % Egentyngd Betong
G1 = (7.8e3 * 10 * AT * 11.9 * 16) / 48; % Egentyngd Stål-tvärbalkar
G2 = 23e3 * ha * 11.4; % Egentyngd Beläggning
G3 = 7.8e3 * 10 * AL * 2; % Egentyngd Stål-längsgående balkar
Gtot = (G0 + G1 + G2 + G3) * 1.35; % Qk = Total egentyngd

% Trafik
q1 = 6.3e3 * 1.5 * 3; % qk1 = Primär variabel last
q2 = 2.5e3 * 1.5 * 4.55; % qk1 = Primär variabel last
q3 = 5.0e3 * 1.5 * 3 * 0.4; % qkn = Sekundär variabel last

% Punktlaster [N]:
Q1 = 540e3 * 1.5; % pk1 = Primär variabel last
Q2 = 360e3 * 1.5; % pk1 = Primär variabel last
Q3 = 120e3 * 1.5 * 0.75; % pkn = Sekundär variabel last

utbredd_tot = (Gtot + q1 + q2 + q3) / 2; % /2 då förenklat antar varje balk tar upp
häften var
boogie_punkt = (Q1 + Q2 + Q3) / 2;

%% ----- Längsgående balkar SLS -----
hb = 0.3; % Höjd betongplattan
ha = 0.1; % Höjd beläggning

% Mått Tvärbalk & Tvärsnittsarea (AT)
tf = 11e-3; bf = 200e-3; tw = 9e-3; hw = 650e-3;
AT = (hw - 2 * tf) * tw + 2 * (bf * tf); % Tvärsnittsarea

% Mått Längsgående balk & Tvärsnittsarea (AL)
tf = 20e-3; bf = 250e-3; tw = 16.5e-3; hw = 980e-3;
AL = (hw - 2 * tf) * tw + 2 * (bf * tf); % Tvärsnittsarea

% Utbredda laster [N/m i längsled]:
% Egentyngder
% Antar att tvärbalkarna verkar som jämnt utbredd last (G1) istället för

```

```

% punktlaster
G0 = 2.5e3 * 10 * hb * 11.4; % Egentyngd Betong
G1 = (7.8e3 * 10 * AT * 11.9 * 16)/48; % Egentyngd Stål-tvärbalkar
G2 = 23e3 * ha * 11.4 ; % Egentyngd Beläggning
G3 = 7.8e3 * 10 * AL * 2 ; % Egentyngd Stål-längsgående balkar
Gtot = (G0 + G1 + G2 + G3); % Qk = Total egentyngd

% Trafik
q1 = 6.3e3 * 3 * 0.75; % qk1 = Primär variabel last
q2 = 2.5e3 * 4.55 * 0.75; % qk1 = Primär variabel last
q3 = 5.0e3 * 3 * 0; % qkn = Sekundär variabel last

% Punktlaster [N]:
Q1 = 540e3 * 0.4; % [N] % pk1 = Primär variabel last
Q2 = 360e3 * 0.4; % pk1 = Primär variabel last
Q3 = 120e3 * 0; % pkn = Sekundär variabel last

utbredd_tot = (Gtot + q1 + q2 + q3)/2; % /2 då förenklat antar varje balk tar upp
häften var
boogie_punkt = (Q1 + Q2 + Q3)/2;

```

Bilaga 5 – Dimensionering av betongplatta

```
%-----Referenser-----
% (1) - Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2019).
%       Bärande konstruktioner del 1. Göteborg: Institutionen för
%       Bygg- och miljöteknik Chalmers tekniska högskola.
%-----

clear
clc

h=0.3; % [m]
h_belaggnig=0.1; % [m]
b_bana=10.6; % Total bredd för körbanor inklusive gång- och cykelbana
b_racke=0.4;
b=b_bana+2*b_racke;
L=3; % [m] Längd för varje spann

% Utbredda laster
G0 = 25e3*h*b+23e3*h_belaggnig*b; % [N/m] i längsled, betong och beläggning
q1 = 6.3e3 * 3; % [N/m] Trafiklast, bearbetad data från Bilaga 4
q2 = 2.5e3 * 3; % [N/m] Trafiklast, bearbetad data från Bilaga 4
q3 = 5.0e3 * 3.05; % [N/m] Trafiklast, bearbetad data från Bilaga 4
q4 = 2.5e3 * 1.55; % [N/m] Trafiklast, bearbetad data från Bilaga 4

% Punktlaster, bearbetad data från Bilaga 4
Q1 = 540e3; % [N] Trafiklast
Q2 = 360e3; % [N] Trafiklast
Q3 = 120e3; % [N] Trafiklast

% Lastkombinationer enligt tabell K1.5 (1)
Last_utbredd = 1.35*G0 + 1.5*(q1+q2) + 1.5*0.4*(q3 + q4); % [N/m]
Last_punkt = 1.5*(Q1+Q2) + 1.5*0.75*Q3; % [N]

% Antar att betongen är fritt upplagd mellan varje tvärbalk
M_utbredd=(Last_utbredd*L^2)/8; % [Nm]

M_punkt=(Last_punkt*L)/4; % [Nm]

M_tot=M_utbredd+M_punkt; % [Nm]

% Dimensionerande moment
M_Ed=M_tot; % [Nm]

% Minsta fria avstånd mellan parallella armeringsstänger
fi=20e-3; % [m] Armeringsdiameter
A_s_fi=(fi/2)^2*pi; % [m^2] Armeringsarea
k1=1;
k2=5e-3;
d_g=25e-3; % [m] Största stenstorlek
d_fritt=max([k1*fi d_g+k2 20e-3]); % [m] [Ekvation B4-27 (1)]

% Erforderlig armeringsmängd
delta_c_dev=10e-3; % [m] [Ekvation B4-26 (1)]
c_min_dur=20e-3; % [m]
c_min_b=fi;
c_min=min([c_min_dur c_min_b]);
c_nom=c_min+delta_c_dev; % [Ekvation B4-24 (1)]
d=h-c_nom-(fi/2); % [m] Avstånd till dragarmering
d_prim=c_nom+(fi/2); % [m] Avstånd till tryckarmering
z=0.9*d;
f_yk=500e6; % [Pa] [Tabell B2.11 (1)] För stänger B500B
gamma_s=1.15;
f_yd=f_yk/gamma_s; % [Pa] [Ekvation B2-25 (1)]
A_s=M_Ed/(f_yd*z); % [m^2] [Ekvation B4-16 (1)]

%Antal armeringsstänger
n=A_s/A_s_fi;
n=ceil(n)
```

```

A_s=n*A_s_fi;

%Kontroll av armeringsavstånd
avs=(b-2*(c_nom)-n*fi)/(n-1); %Avstånd mellan armeringsstänger
if avs>d_fritt
    disp('Armeringsavstånd ok!')
else
    disp('Armeringsavstånd ej ok')
end

% Kontroll av armeringsmängd:
f_ctm=4.1e6; % [Pa] [Tabell B2.2, (1)]
b_t=b; % [m] Medelbredd hos dragzon
A_s_min=0.26*f_ctm/f_yk*b_t*d; % [m^2] [Ekvation B4-21 (1)]
if A_s_min<0.0013*b_t*d
    A_s_min=0.0013*b_t*d;
    disp('A_s_min understiger gränsvärde')
else
    disp('A_s_min ok!')
end
A_c=b*h; % [m^2]
A_s_max=0.04*A_c; % [m^2] [Ekvation B4-22 (1)]

if (A_s > A_s_min) && (A_s < A_s_max)
    disp('Armeringsmängd ok!')
else
    A_s=A_s_min;
    disp('Armeringsmängd ej ok')
end

% Antag tryckarmering minsta möjliga enligt krav:
n_tryck=A_s_min/A_s_fi;
n_tryck=ceil(n_tryck)
A_s_prim=pi*(fi/2)^2*n_tryck;

%-----Tvärsnittsanalys i brottgränstillstånd-----

%Börja med att anta att all armering flyter
sigma_s=f_yd; % [sid B130 (1)]
sigma_s_prim=f_yd; % [sid B130 (1)]

alpha=0.810; % [Tabell B5.1 (1)] för klass C50/60
beta=0.416; % [Tabell B5.1 (1)] för klass C50/60
alpha_cc=1.0;
f_ck=50e6; % [Pa] [Tabell B2.1 (1)] För klass C50/60
gamma_c=1.5;
f_cd=alpha_cc*f_ck/gamma_c; % [Pa] [Ekvation B2-3 (1)]
x=(sigma_s*A_s-sigma_s_prim*A_s_prim)/(alpha*f_cd*b); % [m] [Ekvation B5-23 (1)]
if x>0 && x<h
    disp('x inom tvärsnittet')
else
    disp('x ej inom tvärsnittet')
end

epsilon_cu=3.5e-3; % [sid B126 (1)]
epsilon_s=((d-x)/x)*epsilon_cu; % [Ekvation B5-26 (1)]
epsilon_s_prim=((x-d_prim)/x)*epsilon_cu; % [Ekvation B5-25 (1)]

E_s=200e9; % [Pa]
epsilon_syd=f_yd/E_s; % [Ekvation B2-29a (1)]

if epsilon_s>=epsilon_syd %Antagande att dragarmeringen flyter
    disp('Antagande att dragarmering flyter ok!')
else
    disp('Antagande att dragarmering flyter ej ok')
end
if epsilon_s_prim>=epsilon_syd %Antagande att tryckarmeringen flyter
    disp('Antagande att tryckarmering flyter ok!')
end

```

```

else
    disp('Antagande att tryckarmering flyter ej ok')
end

% Antagande att tryckarmeringen flyter inte ok så får göra ett nytt antagande
% Antar då att dragarmeringen flyter men inte tryckarmeringen. Använder
% ekvation B5-23 fast sätter istället sigma_s_prim=E_s*epsilon_s_prim
myfun=@(x)alpha*f_cd*b*x+E_s*((x-d_prim)/x)*epsilon_cu*A_s_prim-sigma_s*A_s;
fun=@(x)myfun(x);
x=fzero(fun,0.25);
if x>0 && x<h
    disp('x inom tvärsnittet')
else
    disp('x ej inom tvärsnittet')
end

epsilon_s=((d-x)/x)*epsilon_cu;
epsilon_s_prim=((x-d_prim)/x)*epsilon_cu;
sigma_s_prim=E_s*epsilon_s_prim;

if epsilon_s>=epsilon_syd %Antagande att dragarmeringen flyter
    disp('Antagande att dragarmering flyter ok!')
else
    disp('Antagande att dragarmering flyter ej ok')
end
if epsilon_s_prim<=epsilon_syd %Antagande att tryckarmeringen inte flyter
    disp('Antagande att tryckarmering inte flyter ok!')
else
    disp('Antagande att tryckarmering inte flyter ej ok')
end

%Så dragarmeringen flyter och tryckarmeringen flyter inte

%Kontroll av segt verkningsätt
seghet=0.25*d; % [Ekvation B5-22 (1)]
if x<=seghet
    disp('Seghet ok!')
else
    disp('Seghet ej ok')
end

M_Rd=alpha*f_cd*b*x*(d-beta*x)+sigma_s_prim*A_s_prim*(d-d_prim); %[Ekvation B5-24
(1)]
if M_Ed<M_Rd
    disp('Momentkapacitet ok!')
    Momentkapacitet=M_Rd
    Utnyttjandegrad=M_Ed/M_Rd
else
    disp('Momentkapacitet ej ok!')
    Utnyttjandegrad=M_Ed/M_Rd
end

%-----Kontroll ifall tvärkraftsarmering behövs-----
% Kontrollera skjuvglidbrott, ifall den är okej behövs ingen
% tvärkraftsarmering enligt B6.3.1
% Villkor enligt ekv B6-6 (1)

C_Rd_c=0.18/gamma_c;
k=1+sqrt(200/(d*1000)); %d i [mm]
if k>2.0
    k=2.0;
    disp('k överstiger gränsvärde')
end
b_w=b;
rho_l=A_s/(b_w*d);
if rho_l>0.02
    rho_l=0.02;
    disp('rho_l överskrider gränsvärde')

```

```

end
V_Rd_c=(C_Rd_c*k*(100*rho_l*(f_ck*10^(-6)))^(1/3))*10^6*b_w*d; % [Ekvation B6-14
(1)]

v_min=0.035*k^(3/2)*sqrt(f_ck*10^(-6))*10^6; % f_ck ges i [MPa]
kontroll=v_min*b_w*d;

if V_Rd_c<kontroll
    V_Rd_c=kontroll;
    disp('V_Rd_c underskrider gränsvärde')
else
    V_Rd_c
end

% Reducering av tvärkraften V_Ed
Q=Last_utbredd;
P=Last_punkt;
a=0;
for i=1:101
    x=linspace(0,L);
    V=Q*(x-(L/2))+P*(a/L);
    M(i,1)=max(V);
    M(i,2)=a;
    a=a+(L/100);
end
V_Ed=max(M(:,1)); % [N]
position=find(M(:,1)==V_Ed);
a_Ed=M(position,2);

l_s=0.17; % [m] Upplagslängd
x=(l_s/2)+z*cot(pi/4);
V_Ed_red=V_Ed-((2*d-x)^2/(4*d))*Q; % [N]

if V_Ed_red<V_Rd_c
    disp('Tvärkraftsarmering behövs ej')
    Utnyttjandegrad=V_Ed_red/V_Rd_c
else
    disp('Tvärkraftsarmering krävs')
    Utnyttjandegrad=V_Ed_red/V_Rd_c
end

```

n =

42

Armeringsavstånd ok!

A_s_min ok!

Armeringsmängd ok!

n_tryck =

21

x inom tvärsnittet

Antagande att dragarmering flyter ok!

Antagande att tryckarmering flyter ej ok

x inom tvärsnittet

Antagande att dragarmering flyter ok!

Antagande att tryckarmering inte flyter ok!

Seghet ok!

Momentkapacitet ok!

Momentkapacitet =

1.497797936573897e+06

Utnyttjandegrad =

0.895236995764044

V_Rd_c underskrider gränsvärde

Tvärkraftsarmering behövs ej

Utnyttjandegrad =

0.943567107350130

Bilaga 6 – Modellering Tvärbalk (ULS)

```
% ----- Referenser -----
% Austrell, P-E., Dahlblom, O., Lindemann, J., Olsson, A., Olsson, K-G.,
% Persson, K., Pettersson, H., Ristinmaa, M., Sandberg, G., Wernberg, P-A.
% CALFEM - A FINITE ELEMENT TOOLBOX, Version 3.4 (2004).
% Lund: Institutionen för Strukturmekanik Lunds universitet.
%
% Metoden som används i denna bilaga kommer från boken "CALFEM - a finite
% Element toolbox". Metodiken beskrivs inte i denna rapport.
% För att köra koden behöver man ladda ner toolboxen med tillhörande funktioner.

% Hur man kör filen:
% Kör först Fall 1 --> Modellering, ingen clc
% Sedan Fall 2 --> Modellering igen

% Indata & Last (ULS)
hb = 0.3;      % Höjd betongplattan
ha = 0.1;      % Höjd beläggning
l = 3;         % Längd mellan tvärbalkar (längd av farbana som en tvärbalk bär)

% Mått Tvärbalk, Tvärsnittsarea (A) & Yttröghetsmoment (I)
tf = 20e-3; bf = 340e-3; tw = 14e-3; hw = 920e-3;
I = (tw * (hw-2*tf)^3)/12 + 2*((bf*tf^3)/12 + bf * tf * ((hw-2*tf) + tf)/2)^2);
A = (hw - 2* tf)*tw + 2*(bf * tf);

% Utbredda laster [N/m i sidled]:
% Egentyngder
G0 = -2.5e3 * 10 * hb * l;      % Egentyngd Betong
G1 = -7.8e3 * 10 * A;          % Egentyngd Stål (Tvärbalk)
G2 = -23e3 * ha * l;          % Egentyngd Beläggning
Gtot = (G0 + G1 + G2) * 1.35; % Qk = Total egentyngd

% Trafik
q1 = -6.3e3 * l * 1.5;         % qk1 = Primär variabel last
q2 = -2.5e3 * l * 1.5;         % qk1 = Primär variabel last
q3 = -5.0e3 * l * 1.5 * 0.4;   % qkn = Sekundär variabel last

% Punktlaster [N]:
Q1 = -540e3/2 * 1.5;          % pk1 = Primär variabel last
Q2 = -360e3/2 * 1.5;          % pk1 = Primär variabel last
Q3 = -120e3/2 * 1.5 * 0.75;   % pkn = Sekundär variabel last

%% Fall 1 (Röd):
% ----- System-matriser -----
K=zeros(39,39);
f=zeros(39,1);

color='r';

eq = [0 G1; 0 q1+Gtot; 0 q1+Gtot; 0 q1+Gtot; 0 q2+Gtot; 0 q2+Gtot; 0 q2+Gtot; 0
q2+Gtot; 0 q3+Gtot; 0 q3+Gtot; 0 q3+Gtot; 0 G1];

% Koordinater för noder
Coord1=[0.35 0; 0.6 0; 1.5 0; 3.5 0; 4 0; 4.5 0; 6.5 0; 7 0; 8.55 0; 9.05 0; 11.05
0; 12 0; 12.25 0];

f(8)=Q1; f(11)=Q1; f(17)=Q2; f(20)=Q2; f(29)=Q3; f(32)=Q3;
Fall = 1;

%% Fall 2 (Blå):
% ----- System-matriser -----
K=zeros(39,39);
f=zeros(39,1);

color='b';
```

```

eq = [0 G1; 0 q2+Gtot; 0 q2+Gtot; 0 q2+Gtot; 0 q2; 0 q1+Gtot; 0 q1+Gtot; 0
q1+Gtot; 0 q3+Gtot; 0 q3+Gtot; 0 q3+Gtot; 0 G1];

% Koordinater för noder
Coord1=[0.35 0; 0.6 0; 2.55 0; 3.05 0; 5.05 0; 5.55 0; 6.05 0; 8.05 0; 8.55 0; 9.05
0; 11.05 0; 12 0; 12.25 0];

f(11)=Q2; f(14)=Q2; f(20)=Q1; f(23)=Q1; f(29)=Q3; f(32)=Q3;
Fall = 2;

%% Modellering
% ----- Element - Topologi & Koordinater -----
% -- Balkar
% Frihetsgrader i respektive nod
Dof1=[1 2 3;
4 5 6;
7 8 9;
10 11 12;
13 14 15;
16 17 18;
19 20 21;
22 23 24;
25 26 27;
28 29 30;
31 32 33;
34 35 36;
37 38 39];

E = 210 * 10^9; %s.138 [1]
ep1=[E A I];

% Element och kopplade noder/frihetsgrader
Edof1=[1 1 2 3 4 5 6;
2 4 5 6 7 8 9;
3 7 8 9 10 11 12;
4 10 11 12 13 14 15;
5 13 14 15 16 17 18;
6 16 17 18 19 20 21;
7 19 20 21 22 23 24;
8 22 23 24 25 26 27;
9 25 26 27 28 29 30;
10 28 29 30 31 32 33;
11 31 32 33 34 35 36;
12 34 35 36 37 38 39];

[Ex1,Ey1]=coordxtr(Edof1,Coord1,Dof1,2);

% ----- Rita modellen -----
figure(1)
eldraw2(Ex1,Ey1,[1 3 1]);
title('Systemmodell - Tvärbalk - ULS')
xlabel('Position [m]')
ylabel('Höjd [m]')
xlim([-1 13])
hold on

% ----- Assemblering av element-matriser -----

for i=1:12
dofs = Edof1(i,2:7);
[Ke, fe] = beam2e(Ex1(i,:),Ey1(i,:),ep1,eq(i,:));
[K f]=assem(Edof1(i,:),K,Ke,f,fe);
end

% ----- Lös ekvationsystem -----

bc= [1 0; 2 0; 3 0; 37 0; 38 0; 39 0];

```

```

[a,r]=solveq(K,f,bc);

% ----- Extrahera förskjutningar och plotta deformationer -----

Ed1=extract(Edof1,a);

[sfac]=scalfact2(Ex1,Ey1,Ed1,0.1);
eldisp2(Ex1,Ey1,Ed1,[2 1 1],sfac);

% ----- Plotta moment and tvärkraft -----

n = 100;
mMax = zeros(1,12)';

figure(2)
for i = 1:12
    M = beam2s(Ex1(i,:),Ey1(i,:),ep1,Ed1(i,:),eq(i,:),n);
    mMax(i) = max(abs(M(:,3)));
    plot(linspace(Coord1(i,1),Coord1(i+1,1),n),-M(:,3),color)
        hold on
end
hold on
yline(0)
xlabel('Position [m]')
ylabel('Moment [Nm]')
title('Momentdiagram tvärled - ULS')
xlim([-1 13])

dim = [.6 .6 .3 .3];
str = {'Röd = Fall 1', 'Blå = Fall 2'};
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');

figure(3)
vMax = zeros(1,12)';
for i = 1:12
    V = beam2s(Ex1(i,:),Ey1(i,:),ep1,Ed1(i,:),eq(i,:),n);
    vMax(i) = max(abs(V(:,2)));
    plot(linspace(Coord1(i,1),Coord1(i+1,1),n),-V(:,2),color)
        hold on
end
hold on
yline(0)
xlabel('Position [m]')
ylabel('Tvärkraft [N]')
title('Tvärkraftsdiagram tvärled - ULS')
xlim([-1 13])

dim = [.7 .6 .3 .3];
str = {'Röd = Fall 1', 'Blå = Fall 2'};
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');

if Fall == 1
    disp('Fall 1:')
else
    disp('Fall 2:')
end

disp('Max moment:')
disp(max(mMax))
disp('Max tvärkraft:')
disp(max(vMax))

```

Fall 1:

Max moment:

2684036.28208465

Max tvärkraft:

1424711.80158359

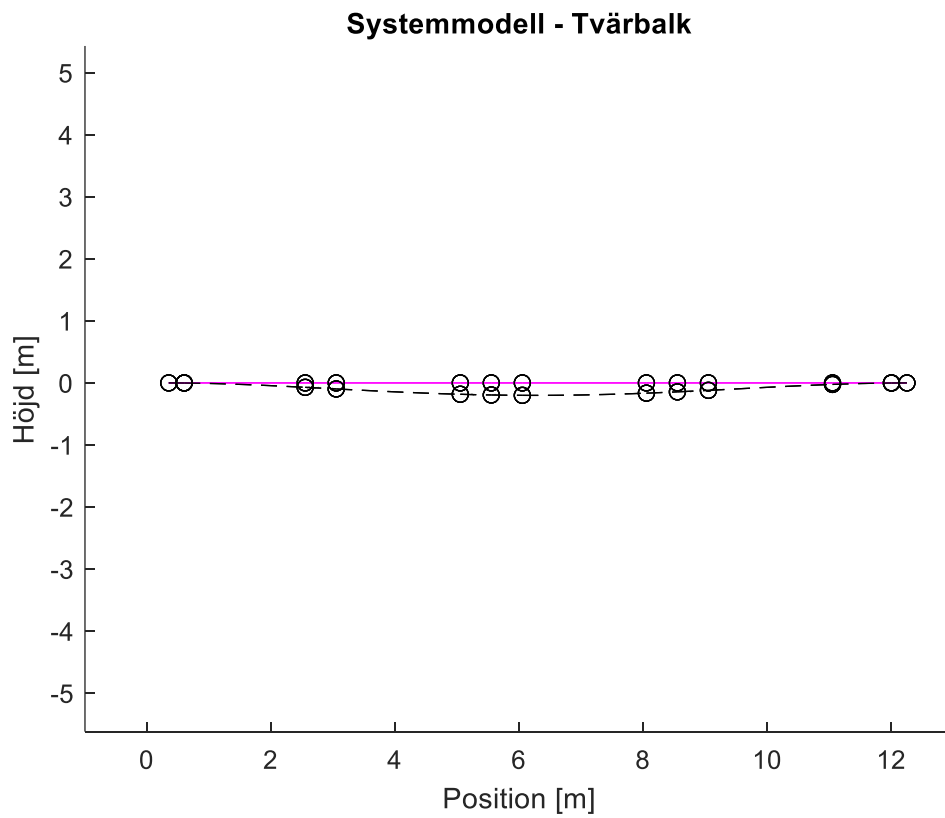
Fall 2:

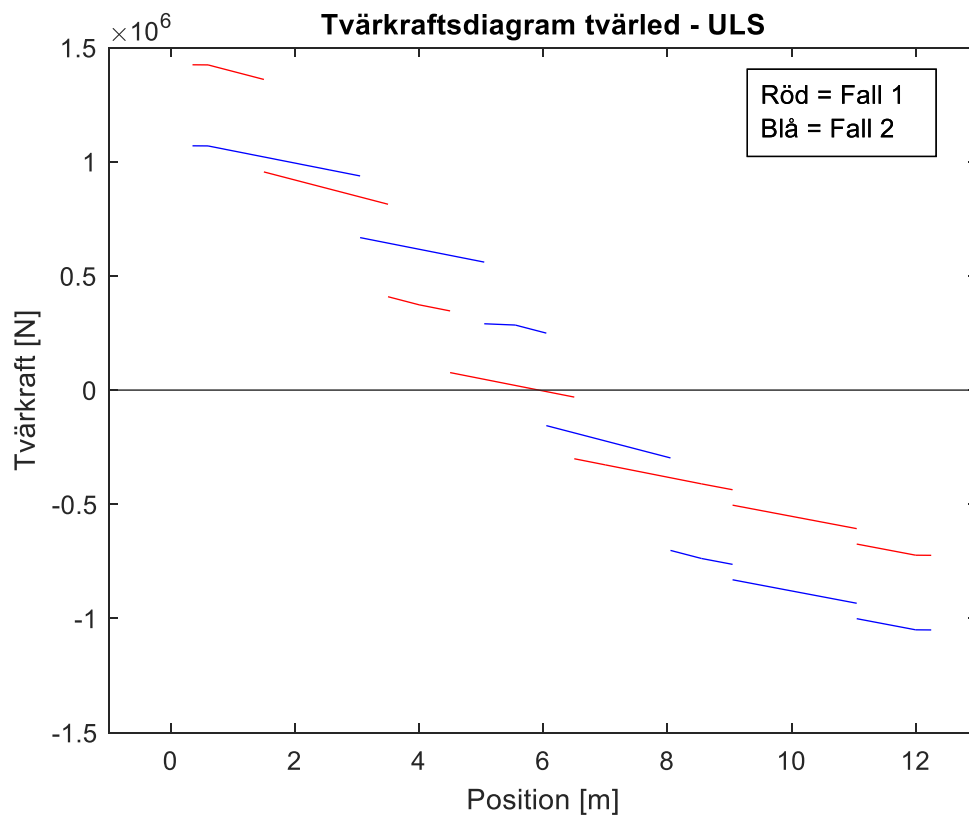
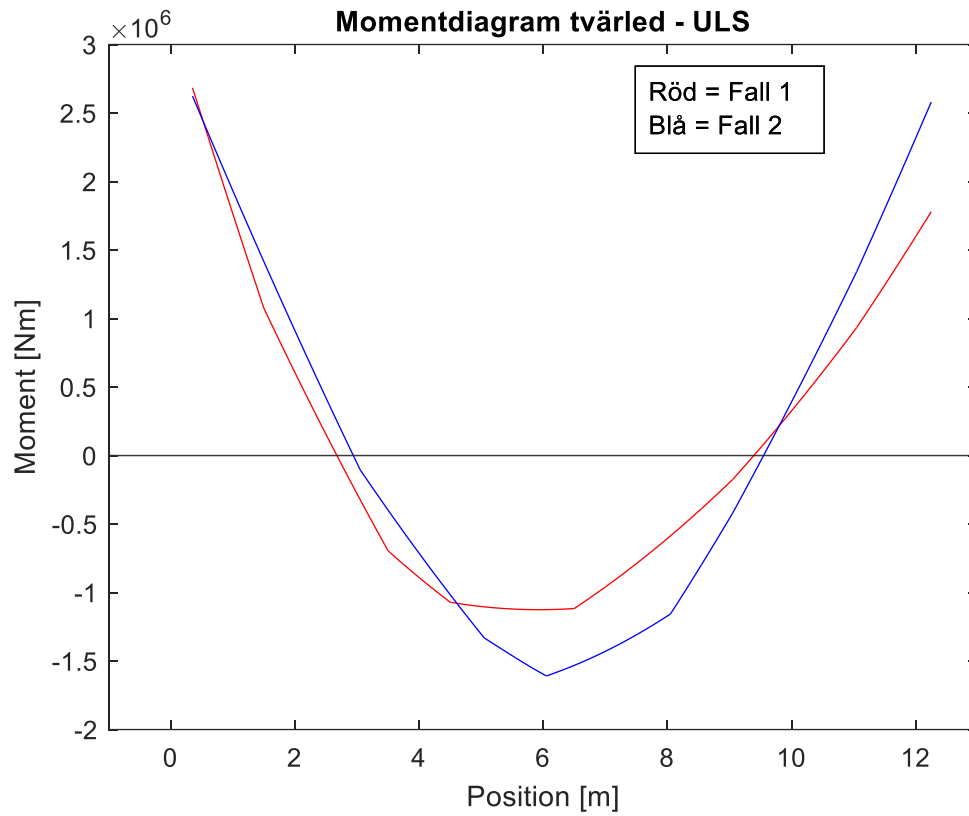
Max moment:

2623333.75687602

Max tvärkraft:

1069875.24715185





Bilaga 7 – Kontroll kapacitet för I-balkar & Svets-anlutningar

```
% ----- Referenser -----
% (1) - Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2019).
%       Bärande konstruktioner del 1. Göteborg: Institutionen för
%       Bygg- och miljöteknik Chalmers tekniska högskola.
%
% (2) - Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2011).
%       Bärande konstruktioner del 2. Göteborg: Institutionen för
%       Bygg- och miljöteknik Chalmers tekniska högskola.

% bf = bredd fläns, tf = tjocklek fläns
% hw = höjd flensar + liv, tw = tjocklek liv
clc
format long g
for j = 1:2

if j == 2
    % ----- Indata Tvärbalk -----
    % Mått tvärbalk
    tf = 20e-3; bf = 340e-3; tw = 14e-3; hw = 920e-3;

    a = [4e-3 14e-3 14e-3]; % a-mått på svets

    % Dimensionerande Moment & Tvärkraft, från Bilaga 6
    MEd = 2684036.28208465; % [Nm]
    VEd = 1424711.80158359; % [N]

    % Yttröghetsmoment
    I = (tw * (hw-2*tf)^3)/12 + 2*(bf*tf^3)/12 + bf * tf * (((hw-2*tf) +
tf)/2)^2); %IL

    disp('-----')
    disp('                Kapacitet Tvärbalk')
end

if j == 1
    % ----- Indata Längsgående balk -----
    % Mått längsgående balk
    tf = 20e-3; bf = 250e-3; tw = 16.5e-3; hw = 980e-3;

    % Dimensionerande Moment & Tvärkraft, från Bilaga 9
    MEd = 2999897; % [Nm]
    VEd = 1462205.5; % [N]

    % Yttröghetsmoment
    I = (tw * (hw-2*tf)^3)/12 + 2*(bf*tf^3)/12 + bf * tf * (((hw-2*tf) +
tf)/2)^2);

    disp('-----')
    disp('                Kapacitet Längsgående balk')
end

% ----- Kontroll I-BALK -----

% Stålets flytspänning
fy = 355e6; % [Tabell S2.1 (1)]

% ----- Kontroll tvärsnittsklass -----
% Mått för krav tvärsnittsklass [sida S68 & S69 (1)]
r = 5e-3; % antaget a-mått för svets mellan liv & fläns
d = hw - 2*tw - 2*r;
c = bf/2 - tw/2 - r;
n = 1.2;
eps = sqrt(235/(fy/10^6));

%Kontroll livplåt [Tabell S4.2 (1)]
```

```

if d/tw<72*eps
    disp('Livet är i tvärsnittsklass 1')
    TK = 1;
elseif d/tw<83*eps
    disp('Livet är i tvärsnittsklass 2')
    TK = 2;
elseif d/tw<124*eps
    disp('Livet är i tvärsnittsklass 3')
    TK = 3;
else
    disp('Livet är i tvärsnittsklass 4??')
    TK = 4;
end

%Kontroll av yttre flänsar [Tabell S4.3 (1)]
if c/tf<9*eps
    disp('Flänsen är i tvärsnittsklass 1')
    TK = 1;
elseif c/tf<10*eps
    disp('Flänsen är i tvärsnittsklass 2')
    TK = 2;
elseif c/tf<14*eps
    disp('Flänsen är i tvärsnittsklass 3')
    TK = 3;
else
    disp('Flänsen är i tvärsnittsklass 4??')
    TK = 4;
end

% ----- Momentkapacitet - MRd -----

% Tvärsnittsklass bestämmer om plastiskt/elastiskt böjmotstånd
if TK == 1
    W = tf*bf*(tf + hw) + (tw*(hw-2*tf)^2)/4; % [Ekv S4-30 (1)] Plastiska
    böjmotståndet
elseif TK == 2
    W = tf*bf*(tf + hw) + (tw*(hw-2*tf)^2)/4; % [Ekv S4-30 (1)] Plastiska
    böjmotståndet
elseif TK == 3
    W = I/(hw/2); % [Ekv S4-23 (1)] Elastiska
    böjmotståndet
end

% Faktorer [Sida S71 (1)]
xlt = 1; % Om ingen risk för vippning
ym1 = 1; % partialkoefficient map hållfastheten

% Momentkapacitet
MRd = W*xlt*fy/ym1; % [Ekv S4-41 (1)]

% ----- Tvärkraftskapacitet - VRd -----

% Beroende på om balken är slank eller ej används olika ekvationer för
tvärkraftskapaciteten.
% Antagande: Livplåten är oavstyvad.

if hw/tw < 72*eps/n % [Ekv S5-19 (1)]
    disp('Balken ej slank')
    type = 1;
else
    disp('Balken är Slank')
    type = 2;
end
disp((hw/tw)/(72*eps/n))

n = 1.2; % om stålqualität <= S460, annars == 1
Av = n*(hw-2*tf)*tw;
ym0 = 1;

```

```

if type == 1 % Om Ej slank
    VRd = Av*(fy/sqrt(3))/ym0; % [Ekv S5-18 (1)]
elseif type == 2 % om slank
    kt = 5.34;
    lambda = ((hw-2*tf)/tw)/(37.4*eps*sqrt(kt)); % [Ekv S5-21 (1)]
    if lambda < 0.8/n
        xw = n;
    elseif lambda < 1.08
        xw = 0.83/lambda;
    elseif lambda > 1.08
        xw = 1.37/(0.7+lambda);
    end
    VRd = (xw*(hw-2*tf)*tw*fy)/(sqrt(3)*ym1); % [Ekv S5-20 (1)]
end

% ----- Kapacitetskontroll & Interaktion -----

% Kapacitet
check = [0 0];
if VEd >= VRd
    disp('Otillräcklig tvärkraftskapacitet!')
    check(1) = 0;
else
    disp('Tillräcklig tvärkraftskapacitet!')
    check(1) = 1;
end
disp('VEd:')
disp(VEd)
disp('VRd:')
disp(VRd)
disp('Tvärkraftsutnyttjande:')
disp(VEd/VRd)

if MEd >= MRd
    disp('Otillräcklig momentkapacitet!')
    check(2) = 0;
else
    disp('Tillräcklig momentkapacitet!')
    check(2) = 1;
end
disp('MEd:')
disp(MEd)
disp('MRd:')
disp(MRd)
disp('Momentutnyttjande:')
disp(MEd/MRd)

% Interaktion [Sida S86 (1)]
% Flänsarnas bidrag till tvärsnittets momentkapacitet
MfRd = 2*bf*tf*((hw-2*tf)/2 + tf/2)*xlt*fy/ym1;
if check(1) == 1
    if check(2) == 1
        if VEd < 0.5*VRd
            disp('[VEd < 0.5*VbwRd] Interaktion behöver ej kontrolleras!')
        elseif VEd < VRd
            if MEd < MfRd
                disp('[MEd < MfRd] Interaktion behöver ej kontrolleras!')
            else
                disp('Interaktion behöver kontrolleras!')
                MplRd = MRd;
                if MEd < MfRd + (MplRd - MfRd)*(1-(2*VEd/VRd-1)^2)
                    disp('Interaktion ok!')
                else
                    disp('Interaktion ej ok!')
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

end
end

if j == 2
% ----- Svets Tvärbalk -----
disp('-----')
disp('          Svets mellan Tvärbalk & Längsgående balk')

% Indatan krav
f_u=510e6; % [Tabell S2.1 (1)]
beta_w=0.9; % [Tabell s9.1 (2)]
gamma_M2=1.25;% [Sida S134 (2)]

% Indata svetsar
svets=[1 2 3]; % Svets [vertikal horisontell]
svetslangder=[hw-2*tf bf (bf-tw)]; % svetslängder

% Spänningar
% tau parallell = [Ekv s9-1 (2)]
% sigma/tau vinkelrat = [Ekv s9-3 (2)]
% Samtliga krafter i svetsen / 2 eftersom två svetsar på varje sida

for i=svets
if i==1 % vertikal
disp('Vertikal svets:')
tau_parallell(i) = VEd/(2*a(i)*svetslangder(i));
sigma_vinkelrat(i)= 0;
tau_vinkelrat(i) = sigma_vinkelrat(i);
end

if i==2 % horisontell övre
disp('Horisontell svets, övre:')
tau_parallell(i) = 0;
V = MEd/hw;
sigma_vinkelrat(i) = V/(2*sqrt(2)*a(i)*svetslangder(i));
tau_vinkelrat(i) = sigma_vinkelrat(i);
end

if i==3 % horisontell undre
disp('Horisontell svets, undre:')
tau_parallell(i) = 0;
V = MEd/hw;
sigma_vinkelrat(i) = V/(2*sqrt(2)*a(i)*svetslangder(i));
tau_vinkelrat(i) = sigma_vinkelrat(i);
end

% Krav 1: [Ekv S9-12 (2)]
if sqrt(sigma_vinkelrat(i).^2 + 3*(tau_vinkelrat(i).^2 + tau_parallell(i).^2))
<= f_u/(beta_w*gamma_M2)
disp('Krav 1 ok!')
disp(sqrt(sigma_vinkelrat(i).^2 + 3*(tau_vinkelrat(i).^2 +
tau_parallell(i).^2))/(f_u/(beta_w*gamma_M2)))
else
disp('Krav 1 ej ok!')
disp(sqrt(sigma_vinkelrat(i).^2 + 3*(tau_vinkelrat(i).^2 +
tau_parallell(i).^2))/(f_u/(beta_w*gamma_M2)))
end
% Krav 2: [Ekv s9-13 (2)]
if sigma_vinkelrat(i) <= 0.9*f_u/gamma_M2
disp('Krav 2 ok!')
disp(sigma_vinkelrat(i)/(0.9*f_u/gamma_M2))
else
disp('Krav 2 ej ok!')
disp(sigma_vinkelrat(i)/(0.9*f_u/gamma_M2))
end

if i < 3
disp('-----')

```

```
end
end
end
end
```

Kapacitet Längsgående balk

Livet är i tvärsnittsklass 1

Flänsen är i tvärsnittsklass 1

Balken är Slank

1.21666531285239

Tillräcklig tvärkraftskapacitet!

VEd:

1462205.5

VRd:

3256684.53491559

Tvärkraftsutnyttjande:

0.448985919367808

Tillräcklig momentkapacitet!

MEd:

2999897

MRd:

3068921.75

Momentutnyttjande:

0.977508468568806

[VEd < 0.5*VbwRd] Interaktion behöver ej kontrolleras!

Kapacitet Tvärbalk

Livet är i tvärsnittsklass 2

Flänsen är i tvärsnittsklass 2

Balken är Slank

1.34613552836001

Tillräcklig tvärkraftskapacitet!

VEd:

1424711.80158359

VRd:

2344573.62293281

Tvärkraftsutnyttjande:

0.607663494824032

Tillräcklig momentkapacitet!

MEd:

2684036.28208465

MRd:

3231352

Momentutnyttjande:

0.830623306307901

Interaktion behöver kontrolleras!

Interaktion ok!

Svets mellan Tvärbalk & Längsgående balk

Vertikal svets:

Krav 1 ok!

0.773209776012836

Krav 2 ok!

0

Horisontell svets, övre:

Krav 1 ok!

0.956006732366903

Krav 2 ok!

0.590127612572162

Horisontell svets, undre:

Krav 1 ok!

0.997062236210881

Krav 2 ok!

0.615470516179556

Bilaga 8 – Modellering Tvärbalk (SLS)

Bilaga 9 – Modellering Längsgående balk & Kablar (ULS)

Bilaga 10 – Modellering Längsgående balk & Kablar (SLS)

```
% ----- Referenser -----
% Austrell, P-E., Dahlblom, O., Lindemann, J., Olsson, A., Olsson, K-G.,
% Persson, K., Pettersson, H., Ristinmaa, M., Sandberg, G., Wernberg, P-A.
% CALFEM - A FINITE ELEMENT TOOLBOX, Version 3.4 (2004).
% Lund: Institutionen för Strukturmekanik Lunds universitet.
%
% Metoden som används i denna bilaga kommer från boken "CALFEM - a finite
% Element toolbox". Metodiken beskrivs inte i denna rapport.
% För att köra koden behöver man ladda ner toolboxen med tillhörande funktioner.

% ----- Laster SLS -----
clc
hb = 0.3;      % Höjd betongplattan
ha = 0.1;      % Höjd beläggning

% Mått Tvärbalk & Tvärsnittsarea (AT)
tf = 20e-3; bf = 340e-3; tw = 14e-3; hw = 920e-3;
AT = (hw - 2* tf)*tw + 2*(bf * tf); % Tvärsnittsarea

% Mått längsgåendebalk,, Tvärsnittsarea (AL) & Yttröghetsmoment (IL)
tf = 20e-3; bf = 250e-3; tw = 16.5e-3; hw = 980e-3;
IL = (tw * (hw-2*tf)^3)/12 + 2*(bf*tf^3)/12 + bf * tf * ((hw-2*tf) + tf)/2)^2);
AL = (hw - 2* tf)*tw + 2*(bf * tf);

% Utbredda laster [N/m i längsled]:
% Egentyngder
% Antar att tvärbalkarna verkar som jämnt utbredd last (G1) istället för
% punktlaster
G0 = 2.5e3 * 10 * hb * 11.4;          % Egentyngd Betong
G1 = (7.8e3 * 10 * AT * 11.9 * 16)/48; % Egentyngd Stål-tvärbalkar
G2 = 23e3 * ha * 11.4 ;              % Egentyngd Beläggning
G3 = 7.8e3 * 10 * AL * 2 ;           % Egentyngd Stål-längsgående balkar
Gtot = (G0 + G1 + G2 + G3);          % Qk = Total egentyngd

% Trafik
q1 = 6.3e3 * 3 * 0.75;               % qk1 = Primär variabel last
q2 = 2.5e3 * 4.55 * 0.75;           % qk1 = Primär variabel last
q3 = 5.0e3 * 3 * 0;                  % qkn = Sekundär variabel last

% Punktlaster [N]:
Q1 = 540e3 * 0.4; % [N]              % pk1 = Primär variabel last
Q2 = 360e3 * 0.4;                    % pk1 = Primär variabel last
Q3 = 120e3 * 0;                       % pkn = Sekundär variabel last

utbredd_tot = (Gtot + q1 + q2 + q3)/2; % /2 då förenklat antar varje balk tar upp
häften var
boogie_punkt = (Q1 + Q2 + Q3)/2;

% ----- Indata -----
% Materialparametrar, längsgående balk
E1 = 210e9; % Elasticitetsmodul stål [Sida S32 (1)]
ep1=[E1 AL IL];

% Utbredd last
q = utbredd_tot;

% ----- System-matriser -----
antal_balk=18; % antal balkelement
fg=67; % antal frihetsgrader
K=zeros(fg,fg);
f=zeros(fg,1);
```

```

% ----- Element - Topologi & Koordinater -----
% -- Balkar
% Koordinater för noder
Coord1=[0      0
        3      0
        6      0
        8.25    0
        10.50   0
        12.75   0
        15      0
        17.25   0
        19.50   0
        21.75   0
        24      0
        27      0
        30      0
        33      0
        36      0
        39      0
        42      0
        45      0
        48      0];

% Frihetsgrader i respektive nod
Dof1=[1      2      3
       4      5      6
       7      8      9
      10     11     12
      13     14     15
      16     17     18
      19     20     21
      22     23     24
      25     26     27
      28     29     30
      31     32     33
      34     35     36
      37     38     39
      40     41     42
      43     44     45
      46     47     48
      49     50     51
      52     53     54
      55     56     57];

% Element och kopplade noder/frihetsgrader
Edof1=[1      1      2      3      4      5      6
        2      4      5      6      7      8      9
        3      7      8      9     10     11     12
        4     10     11     12     13     14     15
        5     13     14     15     16     17     18
        6     16     17     18     19     20     21
        7     19     20     21     22     23     24
        8     22     23     24     25     26     27
        9     25     26     27     28     29     30
       10     28     29     30     31     32     33
       11     31     32     33     34     35     36
       12     34     35     36     37     38     39
       13     37     38     39     40     41     42
       14     40     41     42     43     44     45
       15     43     44     45     46     47     48
       16     46     47     48     49     50     51
       17     49     50     51     52     53     54
       18     52     53     54     55     56     57];

[Ex1,Ey1]=coordxtr(Edof1,Coord1,Dof1,2);

% -- Kablar
% Koordinater för noder

```

```

Coord2=[6 0
        10.5 0
        15 0
        19.5 0
        24 0
        36 10.32
        36 11.54
        36 12.56
        36 13.38
        36 14];

% Frihetsgrader i respektive nod
Dof2=[7 8
      13 14
      19 20
      25 26
      31 32
      58 59
      60 61
      62 63
      64 65
      66 67];

% Element och kopplade noder/frihetsgrader
% Här tas ett element bort för att göra kontrollen med färre kablar!
Edof2=[1 66 67 7 8
       2 64 65 13 14
       3 62 63 19 20
       4 60 61 25 26
       5 58 59 31 32];

[Ex2,Ey2]=coordxtr(Edof2,Coord2,Dof2,2);

% ----- Rita modellen -----
figure(1)
eldraw2(Ex1,Ey1,[1 3 1]);
eldraw2(Ex2,Ey2,[1 2 1]);
title('Systemmodell - Kablar & Längsgående balk')
xlabel('Position [m]')
ylabel('Höjd [m]')
xlim([-2 50])
hold on

% ----- Assemblering av element-matriser -----
eq = [0 -q];
for i=1:length(Edof1)
    dofs = Edof1(i,2:7);
    [Ke, fe] = beam2e(Ex1(i,:),Ey1(i,:),ep1,eq);
    [K f]=assem(Edof1(i,:),K,Ke,f,fe);
end

ep2=[210e9 0.05^2*pi];
for i=1:size(Edof2,1)
    Ke=bar2e(Ex2(i,:),Ey2(i,:),ep2);
    K=assem(Edof2(i,:),K,Ke);
end

% ----- Lös ekvationsystem -----
% Föreskrivna frihetsgrader
% 2,44 = vertikal riktning vid rullstöd = 0
% 55,56 = vertikal & horisontell riktning vid triangelstöd = 0
% 58-67 = vertikal & horisontell riktning vid kabelinfäsning i pylon
bc= [2 0
     44 0
     55 0
     56 0
     58 0
     59 0

```

```

60 0
61 0
62 0
63 0
64 0
65 0
66 0
67 0];

color='r'

aMax = zeros(17,2);
nMax = zeros(17,2);

% I loopen nedan plottas momentdiagram för alla, enligt modellen
% möjliga, positioner för trafik-punktlasten. Maxvärden beräknas och printas.
p=2; % Initiell placering av punktlast
for j = 1:19
f(p) = f(p) - boogie_punkt;
[a,r]=solveq(K,f,bc);

% ----- Extrahera förskjutningar och plotta deformationer -----
figure(1)
Ed1=extract(Edof1,a);
hold on
Ed2=extract(Edof2,a);

[sfac]=scalfact2(Ex1,Ey1,Ed1,0.1);
eldisp2(Ex1,Ey1,Ed1,[2 1 1],sfac);
eldisp2(Ex2,Ey2,Ed2,[2 1 1],sfac);

% ----- Plotta moment and tvärkraft + maxvärden -----
figure(2)
n=100;

% -- Moment
mmax=zeros(n,1);
for i =1:antal_balk
    eq = [0 -q];
    M = beam2s(Ex1(i,:),Ey1(i,:),ep1,Ed1(i,:),eq,n);
    plot(linspace(Coord1(i,1),Coord1(i+1,1),n),-M(:,3),color)
        hold on
        mmax(i) = max(abs(M(:,3))); % Extrahera maxvärden
end
MMax(j,:) = [max(mmax) j];

hold on

yline(0)
xlabel('Position [m]')
ylabel('Moment [Nm]')
title('Momentdiagram längsled - SLS')

% -- Tvärkraft
figure(3)
vmax=zeros(n,1);
for i = 1:antal_balk
    eq = [0 -q];
    V = beam2s(Ex1(i,:),Ey1(i,:),ep1,Ed1(i,:),eq,n);
    plot(linspace(Coord1(i,1),Coord1(i+1,1),n),-V(:,2),color)
        hold on
        vmax(i) = max(abs(V(:,2))); % Extrahera maxvärden
end
VMax(j,:) = [max(vmax) j];

hold on
yline(0)
xlabel('Position [m]')

```

```

ylabel('Tvärkraft [N]')
title('Tvärkraftsdiagram längsled - SLS')

f(p) = f(p) + boogie_punkt;
p = p + 3;

% ----- Extrahera övriga maxvärden -----
% -- Största förskjutning (nedböjning) (Endast relevant i SLS)
neWa = zeros(length(a),1);
s=2;
for k = 1:17
neWa(k) = a(s);
s=s+3;
end
aMax(j,:) = [max(abs(neWa))*1000 j];

% -- Största normalkraft i någon kabel
N = zeros(length(Ed2),1);
for i = 1:5 % Här ändras till 1:4 när tar bort en kabel
N(i) = bar2s(Ex2(i,:),Ey2(i,:),ep2,Ed2(i,:));
end
nMax(j,:) = [max(N) j];

end
clc
format long g
disp('Max Nedböjning:')
max(aMax(:,1))
disp('Max Normalkraft i en kabel:')
max(nMax(:,1))

```

Max Nedböjning:

ans =

65.1287592534855

Max Normalkraft i en kabel:

ans =

1020734.54923255

Bilaga 11 – Dimensionering av svets-anslutning för öra

```
% ----- Referenser -----
% (1) - Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2019).
%       Bärande konstruktioner del 1. Göteborg: Institutionen för
%       Bygg- och miljöteknik Chalmers tekniska högskola.
%
% (2) - Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2011).
%       Bärande konstruktioner del 2. Göteborg: Institutionen för
%       Bygg- och miljöteknik Chalmers tekniska högskola.

clc

% Mått öra
tf =20e-3; bf =400e-3; tw = 16.5e-3; hw = 800e-3;
t_pelare = 1.5; % bredd pelare
h_arm = (t_pelare + 0.25)/2;

P = 2077.6e3; %dragkraft i kabel = dragande kraft i örat, från Bilaga 9
M = P*h_arm; % Moment i infästning liv

% Indatan krav
f_u=510e6; % [Tabell S2.1 (1)]
beta_w=0.9;% [Tabell S9.1 (2)]
gamma_M2=1.2;% [Sida S134 (2)]

% Indata svetsar
svets=[1 2 3]; % Svets [vertikal horisontell]
a=[6e-3 9e-3 9e-3]; % a-mått på svets
svetslangder=[hw-2*tf bf (bf-tw)]; % svetslängder

% Spänningar
% tau_parallell = [Ekv s9-1 (2)]
% sigma/tau_vinkelrat = [Ekv s9-3 (2)]
% Samtliga krafter i svetsen / 2 eftersom två svetsar på varje sida

for i=svets
    if i==1 % vertikal
        disp('Vertikal svets:')
        tau_parallell(i) = P/(2*a(i)*svetslangder(i));
        sigma_vinkelrat(i)= 0;
        tau_vinkelrat(i) = sigma_vinkelrat(i);
    end

    if i==2 % horisontell övre
        disp('Horisontell svets, övre:')
        tau_parallell(i) = 0;
        V = M/hw;
        sigma_vinkelrat(i) = V/(2*sqrt(2)*a(i)*svetslangder(i));
        tau_vinkelrat(i) = sigma_vinkelrat(i);
    end

    if i==3 % horisontell undre
        disp('Horisontell svets, undre:')
        tau_parallell(i) = 0;
        V = M/hw;
        sigma_vinkelrat(i) = V/(2*sqrt(2)*a(i)*svetslangder(i));
        tau_vinkelrat(i) = sigma_vinkelrat(i);
    end

    % Krav 1: [Ekv S9-12 (2)]
    if sqrt(sigma_vinkelrat(i).^2 + 3*(tau_vinkelrat(i).^2 + tau_parallell(i).^2))
    <= f_u/(beta_w*gamma_M2)
        disp('Krav 1 ok!')
        disp(sqrt(sigma_vinkelrat(i).^2 + 3*(tau_vinkelrat(i).^2 +
tau_parallell(i).^2))/(f_u/(beta_w*gamma_M2)))
    else
        disp('Krav 1 ej ok!')
```

```

        disp(sqrt(sigma_vinkelrat(i).^2 + 3*(tau_vinkelrat(i).^2 +
tau_parallell(i).^2))/(f_u/(beta_w*gamma_M2)))
    end

    % Krav 2: [Ekv s9-13 (2)]
    if sigma_vinkelrat(i) <= 0.9*f_u/gamma_M2
        disp('Krav 2 ok!')
        disp(sigma_vinkelrat(i)/(0.9*f_u/gamma_M2))
    else
        disp('Krav 2 ej ok!')
        disp(sigma_vinkelrat(i)/(0.9*f_u/gamma_M2))
    end

    if i < 3
        disp('-----')
    end
end

```

Vertikal svets:

Krav 1 ok!

0.835567049025952

Krav 2 ok!

0

Horisontell svets, övre:

Krav 1 ok!

0.945183395234577

Krav 2 ok!

0.583446540268257

Horisontell svets, undre:

Krav 1 ok!

0.985849695159924

Krav 2 ok!

0.608549194543163

Bilaga 12 – Dimensionering av pylontvärbalk

```
% Tvärbalken modelleras som fast inspänd i respektive pylon och med en
% punktlast från respektive längsgående balk
%-----Referenser-----
% (1) - Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2019).
%       Bärande konstruktioner del 1. Göteborg: Institutionen för
%       Bygg- och miljöteknik Chalmers tekniska högskola.
%-----
clear
clc

b=1; % [m]
h=1; % [m]

L=12.2; % [m]
a=0.15; % [m] Avstånd från kant till punktlast

x_1=linspace(0,a);
x_2=linspace(a,L-a);
x_3=linspace(L-a,L);

rho_btg=25e3; % [N/m^3] Densitet för armerad betong
P=2.3781e6; % [N] Upplagskraft från respektive längsgående balk från
%       Bilaga 9 som fungerar som punktlast på tvärbalken
Q=b*h*rho_btg*1.5 % [N/m] Balkens egentyngd med säkerhetsfaktor
V_A=P+Q*L/2; % [N]
M_A=P*((a*(L-a)^2)/(L^2))+P*((L-a)*a^2)/(L^2)+Q*(L^2/12); % [Nm]

M1=@(x1)M_A-V_A.*x_1+Q.*(x_1.^2./2); % [Nm]
M2=@(x2)M_A-V_A.*x_2+Q.*(x_2.^2./2)+P.*(x_2-a);
M3=@(x3)M_A-V_A.*x_3+Q.*(x_3.^2./2)+P.*(x_3-a)+P.*(x_3-a-(L-2*a));

M_Ed=max([M1(x_1) M2(x_2) M3(x_3)]); % [Nm]

% Minsta fria avstånd mellan parallella armeringsstänger
fi=20e-3; % [m] Armeringsdiameter
A_s_fi=(fi/2)^2*pi; % [m^2] Armeringsarea
k1=1;
k2=5e-3;
d_g=25e-3; % [m] Största stenstorlek
d_fritt=max([k1*fi d_g+k2 20e-3]); % [m] [Ekvation B4-27 (1)]

% Erforderlig armeringsmängd
delta_c_dev=10e-3; % [m] [Ekvation B4-26 (1)]
c_min_dur=20e-3; % [m]
c_min_b=fi;
c_min=min([c_min_dur c_min_b]);
c_nom=c_min+delta_c_dev; % [Ekvation B4-24 (1)]
d=h-c_nom-(fi/2); % [m] Avstånd till dragarmering
d_prim=c_nom+(fi/2); % [m] Avstånd till tryckarmering
z=0.9*d;
f_yk=500e6; % [Pa] [Tabell B2.11 (1)] För stänger B500B
gamma_s=1.15;
f_yd=f_yk/gamma_s; % [Pa] [Ekvation B2-25 (1)]
A_s=M_Ed/(f_yd*z); % [m^2] [Ekvation B4-16 (1)]

%Antal armeringsstänger
n=A_s/A_s_fi;
n=ceil(n)
A_s=n*A_s_fi;

%Kontroll av armeringsavstånd
avs=(b-2*(c_nom)-n*fi)/(n-1); %Avstånd mellan armeringsstänger
if avs>d_fritt
    disp('Armeringsavstånd ok!')
else
    disp('Armeringsavstånd ej ok')
```

```

end

% Kontroll av armeringsmängd:
f_ctm=4.1e6; % [Pa] [Tabell B2.2, (1)]
b_t=b; % [m] Medelbredd hos dragzon
A_s_min=0.26*f_ctm/f_yk*b_t*d; % [m^2] [Ekvation B4-21 (1)]
if A_s_min<0.0013*b_t*d
    A_s_min=0.0013*b_t*d;
    disp('A_s_min understiger gränsvärde')
else
    disp('A_s_min ok!')
end
A_c=b*h; % [m^2]
A_s_max=0.04*A_c; % [m^2] [Ekvation B4-22 (1)]

if (A_s > A_s_min) && (A_s < A_s_max)
    disp('Armeringsmängd ok!')
else
    A_s=A_s_min;
    n=ceil(A_s/A_s_fi)
    A_s=pi*(fi/2)^2*n;
    disp('Armeringsmängd ej ok')
end

% Antag tryckarmering minsta möjliga enligt krav:
n_tryck=A_s_min/A_s_fi;
n_tryck=ceil(n_tryck)
A_s_prim=pi*(fi/2)^2*n_tryck;

%-----Tvärsnittsanalys i brottgränstillstånd-----

%Börja med att anta att all armering flyter
sigma_s=f_yd; % [sid B130 (1)]
sigma_s_prim=f_yd; % [sid B130 (1)]

alpha=0.810; % [Tabell B5.1 (1)] för klass C50/60
beta=0.416; % [Tabell B5.1 (1)] för klass C50/60
alpha_cc=1.0;
f_ck=50e6; % [Pa] [Tabell B2.1 (1)] För klass C50/60
gamma_c=1.5;
f_cd=alpha_cc*f_ck/gamma_c; % [Pa] [Ekvation B2-3 (1)]
x=(sigma_s*A_s-sigma_s_prim*A_s_prim)/(alpha*f_cd*b); % [m] [Ekvation B5-23 (1)]
if x>0 && x<h
    disp('x inom tvärsnittet')
else
    disp('x ej inom tvärsnittet')
end

epsilon_cu=3.5e-3; % [sid B126 (1)]
epsilon_s=((d-x)/x)*epsilon_cu; % [Ekvation B5-26 (1)]
epsilon_s_prim=((x-d_prim)/x)*epsilon_cu; % [Ekvation B5-25 (1)]

E_s=200e9; % [Pa]
epsilon_syd=f_yd/E_s; % [Ekvation B2-29a (1)]

if epsilon_s>=epsilon_syd %Antagande att dragarmeringen flyter
    disp('Antagande att dragarmering flyter ok!')
else
    disp('Antagande att dragarmering flyter ej ok!')
end
if epsilon_s_prim>=epsilon_syd %Antagande att tryckarmeringen flyter
    disp('Antagande att tryckarmering flyter ok!')
else
    disp('Antagande att tryckarmering flyter ej ok!')
end

% Tryckarmeringen flyter ej så gör ett nytt antagande där dragarmeringen
% flyter men inte tryckarmeringen

```

```

myfun=@(x) alpha*f_cd*b*x+E_s*((x-d_prim)/x)*epsilon_cu*A_s_prim-sigma_s*A_s;
fun=@(x)myfun(x);
x=fzero(fun,0.25);
if x>0 && x<h
    disp('x inom tvärsnittet')
else
    disp('x ej inom tvärsnittet')
end

epsilon_s=((d-x)/x)*epsilon_cu;
epsilon_s_prim=((x-d_prim)/x)*epsilon_cu;
sigma_s_prim=E_s*epsilon_s_prim;

if epsilon_s>=epsilon_syd %Antagande att dragarmeringen flyter
    disp('Antagande att dragarmering flyter ok!')
else
    disp('Antagande att dragarmering flyter ej ok')
end
if epsilon_s_prim<=epsilon_syd %Antagande att tryckarmeringen inte flyter
    disp('Antagande att tryckarmering inte flyter ok!')
else
    disp('Antagande att tryckarmering inte flyter ej ok')
end

%Så dragarmeringen flyter och tryckarmeringen flyter inte

%Kontroll av segt verkningssätt
segghet=0.25*d; % [Ekvation B5-22 (1)]
if x<=segghet
    disp('Segghet ok!')
else
    disp('Segghet ej ok')
end

M_Rd=alpha*f_cd*b*x*(d-beta*x)+sigma_s_prim*A_s_prim*(d-d_prim); %[Ekvation B5-24
(1)]
if M_Ed<M_Rd
    disp('Momentkapacitet ok!')
    Momentkapacitet=M_Rd
    Utnyttjandegrad=M_Ed/M_Rd
else
    disp('Momentkapacitet ej ok!')
    Utnyttjandegrad=M_Ed/M_Rd
end

```

Q =

37500

n =

7

Armeringsavstånd ok!

A_s_min ok!

Armeringsmängd ok!

n_tryck =

7

x ej inom tvärsnittet

Antagande att dragarmering flyter ok!

Antagande att tryckarmering flyter ej ok

x inom tvärsnittet

Antagande att dragarmering flyter ok!

Antagande att tryckarmering inte flyter ok!

Seghet ok!

Momentkapacitet ok!

Momentkapacitet =

9.045030039065570e+05

Utnyttjandegrad =

0.903760580457415

Bilaga 13 – Dimensionering av pyloner

```
%-----Referenser-----
% (1) - Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2019).
%   Bärande konstruktioner del 1. Göteborg: Institutionen för
%   Bygg- och miljöteknik Chalmers tekniska högskola.
% (2) - Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2011).
%   Bärande konstruktioner del 2. Göteborg: Institutionen för
%   Bygg- och miljöteknik Chalmers tekniska högskola.
% (3) - SiS (2005) Svensk standard SS-EN 1991-1-4:2005.
%   Allmänna laster - Vindlast
% (4) - Boverket (2023). Karta med vindlastzoner
%-----

clear
clc

%-----Konstanter-----
b=1.5; % [m]
L=1.5; % [m] Längsgående riktning
H=6.8+10.32; % [m] Höjd upp till första kabeln
H_pylon=6.8+14; % [m] Total höjd av pylonen

f_ck=50e6; % [Pa] [Tabell B2.1 (1)]
f_yk=500e6; % [Pa] [Tabell B2.11 (1)]
E_cm=37e6; % [Pa] [Tabell B2.3 (1)]
gamma_cE=1.2;
alpha_cc=1.0;
gamma_c=1.5;
gamma_s=1.15;

fi=25e-3; % [m] Armeringsdiameter

% Krafter och vinklar från Bilaga 9
N_1=0.2363e6; % [N]
N_1_bak=0.5908e6;

N_2=0.7190e6;
N_2_bak=1.5280e6;

N_3=0.8855e6;
N_3_bak=1.5496e6;

N_4=0.7306e6;
N_4_bak=1.0046e6;

N_5=0.7812e6;
N_5_bak=0.7812e6;

N_Ed_kablar=N_1+N_1_bak+N_2+N_2_bak+N_3+N_3_bak+N_4+N_4_bak+N_5+N_5_bak;
N_Ed_upplag=2.3781e6+37500; %Normalkraft från stålbalkar och betongbalkens
egentyngd
% Excentriciteten från upplagskrafterna verkar i tvärled så antar att för
längsgående
% led verkar dessa normalkrafter i tyngdpunkten. Från Bilaga 12
N_Ed=N_Ed_upplag+N_Ed_kablar;

n_drag=15;
n_tryck=15;

k1=1;
k2=5e-3;
d_g=25e-3; % [m] Största stenstorlek
d_fritt=max([k1*fi d_g+k2 20e-3]); % [m] [Ekvation B4-27 (1)]
d=L-d_fritt-fi/2;
d_prim=d_fritt+fi/2;

x_tp=L/2;
```

```

A_s=n_drag*(fi/2)^2;
A_s_prim=n_tryck*(fi/2)^2;

avs=(b-2*d_fritt-fi*n_drag)/(n_drag-1);
if avs>d_fritt
    disp('Armeringsavstånd ok!')
else
    disp('Armeringsavstånd ej ok')
end

%-----Vindlast-----

c_sc_d=1; % [sid 28 (3)]
c_f0=2; % [Figur 7.23 (3)]
psi_r=1; % [Figur 7.24 (3)]
psi_lambda=0.78; % [Figur 7.36 (3)]
c_f=c_f0*psi_r*psi_lambda; % [Ekvation 7.9 (3)]
c_e=2.8; % [Figur 4.2 (3)] Terräng II
rho=1.25; % [sid 23 (3)]
v_b=24; % [(4)] Vindhastighet för området
q_b=(rho*v_b^2)/2; % [Ekvation 4.10 (3)]
q_p=c_e*q_b; % [Ekvation 4.8 (3)]
A_ref=b*H_pylon;

F_w=c_sc_d*c_f*q_p*A_ref; % [Ekvation 5.3 (3)]
F_w_lastkombination=1.5*F_w; % [Tabell K1.5 (1)]
M_vind=F_w_lastkombination*H_pylon;

%-----Krökningsfördelningsfaktor-----

beta=1.0; % [Figur B11.13 (2)] Sinusformat belastningsfall

%-----Knäcklast-----

A_c=b*L;
rho=(A_s+A_s_prim)/A_c; % Armeringsinnehåll
if rho>=0.002
    disp('Ekvation B11-15 kan användas!')
else
    disp('Ekvation B11-15 kan ej användas')
end
k_1=sqrt((f_ck/(10^6))/20); % f_ck i [MPa]
f_cd=alpha_cc*(f_ck/gamma_c); % [Ekvation B2-3 (1)]
l_0=0.7*H; % [Figur K2.16 (2)] Knäcklängd, dvs "knäckhöjd"
I_c=(b*L^3)/12;
i=sqrt(I_c/A_c);
lambda=l_0/i; % [Ekvation B11-10 (2)]
k_2=(N_Ed/(f_cd*A_c))*(lambda/170);
phi_ef=1;
E_cd=E_cm/gamma_cE; % [Ekvation B11-14 (2)]
E_s=200e9;
I_s=(A_s+A_s_prim)*(d-x_tp)^2;
EI=(k_1*k_2)/(1+phi_ef)*E_cd*I_c+E_s*I_s; % [Ekvation B11-15 (2)]

N_B=(pi^2*EI)/(l_0^2); % [Ekvation K2-17 (2)]

if N_B>N_Ed
    disp('Knäckning ok!')
    Utnyttjandegrad=N_Ed/N_B
else
    disp('Knäckning ej ok')
    Utnyttjandegrad=N_Ed/N_B
end

%-----Första ordningens moment-----

theta_0=0.005;
alpha_h_kablar=2/sqrt(H); % [Ekvation B11-4 (2)]

```

```

if alpha_h_kablar>=2/3 && alpha_h_kablar<=1
    disp('alpha_h_kablar ok!')
end
if alpha_h_kablar<2/3
    alpha_h_kablar=2/3;
    disp('alpha_h_kablar<2/3')
end
if alpha_h_kablar>1
    alpha_h_kablar=1;
    disp('alpha_h_kablar>1')
end
m=1;
alpha_m=sqrt(0.5*(1+(1/m))); % [Ekvation B11-5 (2)]
theta_i_kablar=theta_0*alpha_h_kablar*alpha_m; % [Ekvation B11-3 (2)]
e_i_kablar=theta_i_kablar*(l_0/2); % [Ekvation B11-6 (2)]

H_upplag=4.9; % [m] Höjd där normalkraft från tvärbalk verkar
alpha_h_upplag=2/sqrt(H_upplag); % [Ekvation B11-4 (2)]
if alpha_h_upplag>=2/3 && alpha_h_upplag<=1
    disp('alpha_h_upplag ok!')
end
if alpha_h_upplag<2/3
    alpha_h_upplag=2/3;
    disp('alpha_h_upplag<2/3')
end
if alpha_h_upplag>1
    alpha_h_upplag=1;
    disp('alpha_h_upplag>1')
end
theta_i_upplag=theta_0*alpha_h_upplag*alpha_m; % [Ekvation B11-3 (2)]
e_i_upplag=theta_i_upplag*(l_0/2); % [Ekvation B11-6 (2)]

M_0_Ed=M_vind+N_Ed_kablar*e_i_kablar+N_Ed_upplag*e_i_upplag; % [Ekvation B11-8 (2)]

% -----Dimensionerande moment-----

M_Ed=(1+beta/((N_B/N_Ed)-1))*M_0_Ed; % [Ekvation B11-16 (2)]

%-----Tvärsnittets momentkapacitet-----
alpha=0.810; % [Tabell B5.1 (1)] för klass C50/60
beta=0.416; % [Tabell B5.1 (1)] för klass C50/60

%Börja med att anta att all armering flyter

f_yk=500e6; % [Pa] [Tabell B2.11 (1)] För stänger B500B
gamma_s=1.15;
f_yd=f_yk/gamma_s; % [Pa] [Ekvation B2-25 (1)]

sigma_s=f_yd; % [sid B130 (1)]
sigma_s_prim=f_yd; % [sid B130 (1)]
x=N_Ed/(alpha*f_cd*b); % [Ekvation B5-35 (1)]

epsilon_cu=3.5e-3; % [sid B126 (1)]
epsilon_s_prim=((x-d_prim)/x)*epsilon_cu; % [Ekvation B5-25 (1)]
epsilon_s=((d-x)/x)*epsilon_cu; % [Ekvation B5-26 (1)]

epsilon_syd=f_yd/E_s; % [Ekvation B2-29a (1)]

if epsilon_s_prim>=epsilon_syd
    disp('Antagande att tryckarmering flyter ok!')
else
    disp('Antagande att tryckarmering flyter ej ok!')
end
if epsilon_s>=epsilon_syd
    disp('Antagande att dragarmering flyter ok!')
else
    disp('Antagande att dragarmering flyter ej ok!')
end

```

```

M_Rd=alpha*f_cd*b*x*(d-beta*x)+sigma_s_prim*A_s_prim*(d-d_prim)-N_Ed*(d-(L/2)); %
[Ekvation B5-36 (1)]

%-----Kontroll av momentkapacitet-----
if M_Rd>=abs(M_Ed)
    disp('Momentkapacitet ok!')
    Utnyttjandegrad=abs(M_Ed/M_Rd)
else
    disp('Momentkapacitet ej ok!')
    Utnyttjandegrad=abs(M_Ed/M_Rd)
end

e_min=L/30; % [Ekvation B11-7 (2)]
if e_min<0.02
    e_min=0.02;
    disp('e_min understiger gränsvärde')
end

if M_Rd>=N_Ed*e_min % [Ekvation B11-13 (2)]
    disp('Momentkapacitet klarar dimensioneringsvillkor om minsta excentricitet!')
else
    disp('Momentkapacitet klarar ej dimensioneringsvillkor om minsta
excentricitet')
end

%-----Kontroll av betongtryckspänning-----

sigma_cc=N_Ed/A_c;
kontroll=0.45*f_ck;

if sigma_cc<kontroll
    disp('Betongtryckspänning ok!')
else
    disp('Betongtryckspänning ej ok!')
end

```

Armeringsavstånd ok!

Ekvation B11-15 kan användas!

Knäckning ok!

Utnyttjandegrad =

0.347803269662998

alpha_h_kablar<2/3

alpha_h_upplag ok!

Antagande att tryckarmering flyter ok!

Antagande att dragarmering flyter ok!

Momentkapacitet ok!

Utnyttjandegrad =

0.317215477765754

Momentkapacitet klarar dimensioneringsvillkor om minsta excentricitet!

Betongtryckspänning ok!

Bilaga 14 – Förbandsdimensionering

```
% Dimensionering av skruvförband på längsgående balkar
% ----- Referenser -----
% (1) - Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2019).
%       Bärande konstruktioner del 1. Göteborg: Institutionen för
%       Bygg- och miljöteknik Chalmers tekniska högskola.
%
% (2) - Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2011).
%       Bärande konstruktioner del 2. Göteborg: Institutionen för
%       Bygg- och miljöteknik Chalmers tekniska högskola.
clear
close all
clc

% Indatan och förutsättningar

% Geometri längsgående balk [m] (se Bilaga 9):
h=980e-3;
b=250e-3;
t=20.0e-3;
d=16.5e-3;

% Skarven bör placeras där momentet är så litet som möjligt
% Från CALFEM-modell (se Bilaga 9):
% M_langder=[16.3 31.8]; % Position där momentet är litet ...
% Välj att skarva längsgående balkar vid 16.3 och 31.8 m
% Detta skapar tre balkelement på 16.3, 15.5, 16.2 m

Md=[0.747744 1.113640]*1e6; % [Nm] Momentet vid position ...
... 16.3 och 31.8 m (från Bilaga 9)
Vd=[336.2800 717.903]*1e3; % [N] Tvärkraften vid samma positioner ...
... som ovan

f_yk=355e6; % [Pa] Karaktäristisk hållfasthet
fi=[12 16 20 22 24]*1e-3; % [m] Möjliga skruvdimensioner
fi=fi(5); % Välj grövsta för att minska materialåtgång

% Skruvhållfasthetsklass:
% [4.6 5.6 6.8 8.8 10.9]
fyb=[240 300 480 640 900]*1e6; % [N/mm^2] [S8.1 (2)]
fub=[400 500 600 800 1000]*1e6; % [N/mm^2] [S8.1 (2)]
% Välj:
fyb=fyb(5);
fub=fub(5); % Välj högsta klassen för minskad materialåtgång

% Skruvdiameter:
d_skruv=fi; % [m]
d0=d_skruv+2e-3; % [m] [S8.2.5]

% Plåttjocklek (testa iterativt):
tp=d; % Antag

% Avståndskrav [S8.2.6 (2)]
% Kantavstånd kraftriktning [m]:
e1_min=1.2*d0;
e1_max=40e-3+4*tp;

% Kantavstånd vinkelrätt kraftriktning [m]:
e2_min=1.2*d0;
e2_max=40e-3+4*tp;

% Centrumavstånd kraftriktning [m]:
p1_min=2.2*d0;
p1_max=min([14*tp 200e-3]);

% Centrumavstånd vinkelrätt kraftriktning [m]:
p2_min=2.4*d0;
```

```

p2_max=min([14*tp 200e-3]);

% ----- Förbandsdimensionering -----
% Testa iterativt tills ok!
% Sträva efter så liten plåt som möjligt.
e1=e1_max-51e-3;
e2=e2_min;
p1=p1_min;
p2=p2_min;

% Sätt rätt x- och y-koordinat för varje skruv:
rows=13;
cols=2;
n=rows*cols;

% Skruvarnas koordinater med origo i mitten av plåten:
x=zeros(1,n); % Skapa vektorer med koordinater ...
y=zeros(1,n); % ... där skruv 1 finns på position 1 osv.

a1=1; a2=cols;
for i=1:rows
    x(a1:a2)=[-p2/2 p2/2];
    ykoord=[6*p1 5*p1 4*p1 3*p1 2*p1 p1 0 -p1 -2*p1 ...
            -3*p1 -4*p1 -5*p1 -6*p1];
    y(a1:a2)=ykoord(i);
    a1=a1+cols;
    a2=a2+cols;
end

% Plåtdimensioner:
hp=(rows-1)*p1+e1*2; % m
bp=(cols-1)*p2+e2*2; % m

% Kontroll om plåthöjd:
h_max=h-2*t; % [m] Livets höjd (=förbandsplåtens maximala höjd)
if hp>h_max
    disp('Plåthöjd ej ok!')
else
    disp('Plåthöjd ok!')
end
disp(' ')
disp('-----')

% Kontroll av dimensioner på skruvar och förband (båda skarvarna):
for j=1:2 % j=1 representerar förband 1 och j=2 representerar förband 2
    disp('Förband nummer:')
    disp(j) % Skapar tydlighet i Command Window

    Ip=sum(x.^2+y.^2); % [S8-36/36 (2)]
    Mv=Vd(j)*bp/2; % Moment i mitten på plåtens ena halva ...
    ... skapat av tvärkraften
    Nix=(Mv.*y+Md(j).*y)/Ip; % [S8-35 (2)]
    Niy=-(Vd(j)/n+(Mv.*x+Md(j).*x)/Ip); % [S8-36 (2)]

    Ntot=sqrt(Nix.^2+Niy.^2); % [S8-37 (2)]
    [Nmax, skruv_nr]=max(Ntot); % Ger största skruvkraft med position

    % Maximal kraft i skruv
    % Skjuvbrott
    alfa_v=0.6;
    gamma_M2=1.25; % [S8-2 (2)]
    A=(fi/2)^2*pi; % Stammens tvärsnittsarea [m^2]
    FvRd=alfa_v*fub*A/gamma_M2; % [S8-20 (2)]

    % Hålkantbrott
    fu=fyb(1); % [S2.1 (1)]
    alfa_d=e1/(3*d0); % [S8-22 (2)]
    alfa_b=min([alfa_d fub/fu 1]); % [S8-22 (2)]

```

```

k1=min([2.8*e2/d0-1.7 2.5]); % [S8-22 (2)]
FbRd=k1*alfa_b*fu*fi*tp/gamma_M2; % [S8-21 (2)]

if Nmax < 2*FvRd % Två skär
    disp('Skjuvbrott ok!')
else
    disp('Skjuvbrott ej ok!')
end
if Nmax < FbRd
    disp('Hålkantbrott ok!')
else
    disp('Hålkantbrott ej ok!')
end

disp(' ')

% Utnyttjandegrad skruvar och plåtar:
eta_skjuvkapacitet=Nmax/(2*FvRd); % [%]
eta_halkantsbrott=Nmax/FbRd; % [%]
disp('Utnyttjandegrad skjuvkapacitet:')
disp(eta_skjuvkapacitet)
disp('Utnyttjandegrad hålkantsbrott:')
disp(eta_halkantsbrott)

disp('-----')

% Visualisera förbandet:
figure(j)
plot(x,y,'ko','LineWidth',3) % Skruvpositioner
hold on
xline(-p2/2-e2,'k','LineWidth',3) % Plåtens kant
hold on
xline(p2/2+e2,':','LineWidth',3) % Skarv
hold on
scalfac=1e6; % Gör krafterna mer proportionerliga
% Plotta krafterna i varje skruv:
for k=1:length(x)
    quiver(x(k),y(k),Nix(k)/scalfac,Niy(k)/scalfac,'r')
    hold on
end
grid on

if j==1
    figure(j)
    title('Förband 1')
else
    figure(j)
    title('Förband 2')
end

figure(j)
xlim([-0.4,0.4])
ylim([-0.4,0.4])

end

```

Plåthöjd ok!

Förband nummer:

1

Skjuvbrott ok!

Hålkantbrott ok!

Utnyttjandegrad skjuvkapacitet:

0.5051

Utnyttjandegrad hålkantsbrott:

0.6573

Förband nummer:

2

Skjuvbrott ok!

Hålkantbrott ok!

Utnyttjandegrad skjuvkapacitet:

0.7642

Utnyttjandegrad hålkantsbrott:

0.9944

