



CHALMERS



Järnvägsbro över Backavägen: Val av utformning och preliminär dimensionering av trågbalkbro i stål på Bohusbanan

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

Leo Adolfsson
Anton Dimming
Ofelia Fredriksson
Siri Salander
Oskar Vestin
Samuel Wiik

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

KANDIDATARBETE

Järnvägsbro över Backavägen: Val av utformning och preliminär dimensionering av trågbalkbro i stål på Bohusbanan

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

Leo Adolfsson
Anton Dimming
Ofelia Fredriksson
Siri Salander
Oskar Vestin
Samuel Wiik

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2020

Järnvägsbro över Backavägen: Val av utformning och preliminär dimensionering av trågbalkbro i stål på Bohusbanan

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

Leo Adolfsson
Anton Dimming
Ofelia Fredriksson
Siri Salander
Oskar Vestin
Samuel Wiik

© Anton Dimming, Leo Adolfsson, Ofelia Fredriksson, Oskar Vestin, Samuel Wiik, Siri Salander, 2020

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola, 2020

Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Illustration av valt brokoncept.
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2020

Järnvägsbro över Backavägen: Val av utformning och preliminär dimensionering av trågbalkbro i stål på Bohusbanan

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

Leo Adolfsson
Anton Dimming
Ofelia Fredriksson
Siri Salander
Oskar Vestin
Samuel Wiik

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Regeringen har beslutat att utveckla infrastrukturen genom delfinansiering av flera projekt och ett av dessa är utbyggnad av Bohusbanan. Vid delsträckan Brunnsbo i Göteborg ska järnvägen utvidgas från enkelspårig till dubbelspårig, vilket medför ett behov av en ny järnvägsbro över Backavägen. Syftet med denna rapport är att utforma olika järnvägsbrokoncept som uppfyller ställda krav och förutsättningar samt en utvärdering av dessa. Denna rapport åsyftar även en preliminär dimensionering av det mest lämpliga brokonceptet. Rapporten omfattar därmed två olika etapper; en utformningsdel och en dimensioneringsdel. Den första delen är en litteraturstudie av krav från beställare och svenska standarder samt av platsspecifika förutsättningar. Den andra delen är en iterativ process för att bestämma tvärsnittsdimensioner på överbyggnaden som bygger på beräkningar av dess bärförmåga. Resultatet redovisas genom en illustration och tvärsnittsektion av valt brokoncept, trågbalkbro i stål. Sammanfattningsvis så är designen bara preliminär och flera aspekter kommer att påverka detaljer i den fortsatta utformningen.

Nyckelord: Bro, brobyggnad, konstruktion, järnvägsbro, trågbalkbro, utformning, stål, preliminär dimensionering.

Railway bridge over Backavägen: Conceptual design and preliminary design of a trough bridge in structural steel on Bohusbanan

Bachelor's thesis in Civil Engineering

Leo Adolfsson
Anton Dimming
Ofelia Fredriksson
Siri Salander
Oskar Vestin
Samuel Wiik

Department of Architecture and Civil Engineering
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The Swedish government is investing in the infrastructure and planning to expand the number of tracks on the railway line Bohusbanan near the area Brunnsbo in Gothenburg. Consequently, there is a need for a new railway bridge along this line which is passing over the road Backavägen. The aim of this report is a conceptual design of appropriate railway bridge concepts that meet the requirements and assumptions. Furthermore, after an evaluation of the concepts this report includes a preliminary design of the most suitable model. The report contains of two different phases; a conceptual design phase and a preliminary design phase. The methodology for the first phase is mainly literature studies of the requirements given by Swedish standards and client, as well as, studies on the assumptions which are based on the given place. The methodology for the second phase is an iterative process between designing of the cross section of the superstructure and calculations of its capacity. The result is an illustration of the chosen bridge concept, a trough bridge in structural steel, and a cross section of its superstructure. In conclusion, the design of the trough bridge is only preliminary and other aspects will affect details of the design.

Key words: Bridge, building bridges, construction, railway bridge, trough bridge, conceptual design, steel, preliminary dimensioning.

Innehåll

SAMMANFATTNING	II
ABSTRACT	III
INNEHÅLL	IV
FÖRORD	VII
NOMENKLATUR	VIII
BETECKNINGAR	IX
1 INLEDNING	1
1.1 Syfte	1
1.2 Problem	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Metod	2
1.5 Samhälleliga och etiska aspekter	2
2 FÖRUTSÄTTNINGAR	3
2.1 Geotekniska förutsättningar	3
2.2 Krav	3
2.3 Målsättning	4
2.3.1 Mål med gestaltningen och utformning	4
2.3.2 Mål med ekologisk hållbarhet	4
2.3.3 Mål med produktionen	4
2.3.4 Mål med förvaltning och underhåll	4
3 UNDERLAG FÖR URVALSPROCESS	5
3.1 Byggnadsmaterial	5
3.1.1 Armerad betong	5
3.1.2 Stål	5
3.2 Produktionsmetoder	6
3.2.1 Gjutning av betong på plats och i fabrik	6
3.2.2 Transporter av element i stål och i betong	6
3.2.3 Byggande vid befintligt spår	6
3.3 Grundläggningsmetoder	6
3.4 Förvaltning och underhåll	7
3.5 Ekonomi	8
4 URVALSPROCESS	9
4.1 Urval 1	9
4.2 Brokoncept	9

4.2.1	Fackverksbro i stål	9
4.2.2	Bågbro i stål	11
4.2.3	Trågbalkbro i betong	12
4.2.4	Trågbalkbro i stål	13
4.3	Urval 2	14
4.3.1	Utvärderingskriterier	14
4.3.2	Viktningsmatris	15
4.3.3	Urvalsmatris	16
5	VALT BROKONCEPT	17
5.1	Överbyggnad	17
5.2	Underbyggnad	18
5.2.1	Lager och övergångskonstruktioner	18
5.3	Produktionsplan	19
5.3.1	Förarbete	19
5.3.2	Grundläggning	19
5.3.3	Bygghfas	20
5.3.4	Efterarbete	20
5.4	Förvaltningsplan	20
6	DIMENSIONERINGSFÖRUTSÄTTNINGAR	21
6.1	Beräkningsmodell för trågbalkar	21
6.1.1	Dimensionerande laster	21
6.1.2	Dimensionerande moment och tvärkraft	22
6.2	Beräkningsmodell för tvärbalkar	23
6.2.1	Dimensionerande laster	23
6.2.2	Dimensionerande moment och tvärkraft	24
6.3	Beräkningsmodell för brobaneplattan	25
6.3.1	Dimensionerande laster	25
6.3.2	Dimensionerande moment och tvärkraft	26
6.4	Beräkningsmodell för svetsar	26
7	PRELIMINÄR DIMENSIONERING AV BRON	27
7.1	Dimensionering av trågbalkar	27
7.2	Dimensionering av tvärbalkar	27
7.3	Dimensionering av brobaneplatta	28
7.4	Dimensionering av svetsar	28
8	DISKUSSION OCH SLUTSATS	29
8.1	Diskussion kring urvalsprocessen	29
8.2	Diskussion kring dimensioneringsprocessen	29
8.3	Slutsats	30

REFERENSER	31
BILAGOR	33
Bilaga A – Plankarta	33
Bilaga B – Sektionsvy	34
Bilaga C – Tabell över brotyper och dess spännvidder	35
Bilaga D – Material- och produktionskostnader	36
Bilaga E – Illustration normalsektion för fritt utrymme	37
Bilaga F – Temperaturbetingade rörelser	38
Bilaga G – Beräkningsgång lastkombinering	39
Bilaga H – Dimensionering av trågbalk	44
Bilaga I – Lastspridning	49
Bilaga J – Dimensionering av tvärbalk	50
Bilaga K – Dimensionering av brobaneplatta	54
Bilaga L – Dimensionering av svetsar	59
Bilaga M – Kapacitet för trågbalk och tvärbalk	62

Förord

Den här rapporten är slutprodukten av det kandidatarbete som avslutar våra tre första år på civilingenjörsprogrammet i samhällsbyggnadsteknik på Chalmers. Projektet har bestått i att preliminärdimensionera en järnvägsbro utmed Bohusbanan i Göteborg. Det har gett oss ökad kunskap om brobyggnation och tillåtit oss att fördjupa oss i dimensioneringsprocessen av en järnvägsbro i stål. Vi har också lärt oss mycket av att jobba i en grupp på sex personer och fördjupa oss i ett problem tillsammans, speciellt eftersom andra halvan av processen genomfördes helt på distans.

Vi skulle vilja tack Mario Plos, avdelningschef och docent vid Konstruktionsteknik/Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, som handlett oss under detta arbete och planerat föreläsningar som underlättat arbetsprocessen för oss. Vi vill också rikta ett stort tack till våra handledare på COWI: Staffan Lindén, Anna Egefalk samt Jonas Zachrisson. Slutligen har vi också fått råd och mycket hjälp från Ignasi Fernandez, Joosef Leppänen och Mohammad al-Emrani när vi kommit med frågor till dem och det är vi ytterst tacksamma för.

Göteborg, maj 2020

Leo Adolfsson, Anton Dimming, Ofelia Fredriksson, Siri Salander, Oskar Vestin,
Samuel Wiik

Nomenklatur

<i>Brottgräns</i>	Den maximala spänning som uppstår i en konstruktion innan bärförmågan helt förloras
<i>Bruksgräns</i>	Den maximala spänning som uppstår i en konstruktion innan funktionen under normal användning samt god upplevelse inte längre uppfylls
<i>Buckling</i>	Instabilitetsfenomen
<i>Detaljplan</i>	En handling framtagen av kommunen som säger hur mark får användas och vad som får byggas på den
<i>Koldioxidekvivalenter</i>	Begrepp för att jämföra växthusgaser och uttrycks som motsvarande mängd koldioxid med samma effekt
<i>Korrosion</i>	Fuktbetingad process som bryter ned metall och orsakas av den omgivande miljön
<i>Lager</i>	Enhet som överför laster från överbyggnaden av en bro till underbyggnaden (stöden)
<i>Plankarta</i>	En planhandling som krävs vid planläggning
<i>Plankorsning</i>	En trafik Korsning där vägar eller räls korsar varandra i samma plan så att trafikanter måste ta hänsyn till varandra
<i>Prefabricering</i>	Förproduktion av element eller delar i fabrik
<i>RÖK - rälsöverkant</i>	Referenspunkt som syftar på överkanten av järnvägrälen
<i>Spontning</i>	Metod där korroderad plåt slås ner i jord för att förhindra vatteninträning samt stabilisera vid grundläggning
<i>Sättning</i>	När markytan sjunker till följd av packning av jordmaterial orsakad av belastning
<i>Underbyggnad</i>	Del av bron som överför lasten från huvudbärverket till undergrunden
<i>Utmattning</i>	Fenomen hos stål som orsakas av lastvariation och medför försämrad hållfasthet
<i>Utnyttjandegrad</i>	Anger kvoten mellan dimensionerande förutsättningar och teoretisk kapacitet
<i>Överbyggnad</i>	Brons huvudbärverk, vilket bärs upp av stöd

Beteckningar

Grekiska gemener

α	Korrektionsfaktor	[-]
ψ_0	Lastkombinationsvärde	[-]
ψ_1	Lastkombinationsvärde	[-]

Grekiska versaler

ΔT	Temperaturändring	[°C]
Φ	Dynamikfaktor	[-]

Latinska gemener

f_{yk}	Karaktäristisk flytgräns för stål	[Pa]
q_{k1}	Variabel utbredd last av tåg efter lastkombinering	[N/m]
q_{vk}	Variabel utbredd last av tåg enligt Lastmodell 71	[N/m]

Latinska versaler

A	Tvärsnittsarea	[m ²]
E	Elasticitetsmodul	[Pa]
G	Permanent last av egenvikt	[N/m]
I	Ytttröghetsmoment	[m ⁴]
Q_{k1}	Variabel punktlast av tåg efter lastkombinering	[N]
Q_{sk}	Horisontell punktlast	[N]
Q_{vk}	Variabel punktlast av tåg enligt Lastmodell 71	[N]

1 Inledning

I samband med att regeringen utlyste lokal och regional delfinansiering vid utvecklandet av ny infrastruktur uppkom grunden för det så kallade Västsvenska paketet, med utgångspunkt i Göteborgsregionen (Trafikverket, u.å). I enighet med det Västsvenska paketet bygger Trafikverket om Lundbyleden, som är en av Göteborgs mest trafikerade leder (Trafikverket, 2017). Det beslutades att Lundbyledsprojektet skulle utvidgas till att även innefatta en utökning från enkel- till dubbelspårig järnväg på Bohusbanan vid Brunnsbo. Beslutet möjliggör att i framtiden anlägga en pendeltågstation som förbättrar kollektivtrafikkopplingen till Hisingen (Trafikverket, 2019b).

Till följd av utvidgningen av projektet påbörjade Trafikverket utvecklandet av en kombinerad väg- och järnvägsplan och den vann laga kraft 2019 (Trafikverket, 2019a). I väg- och järnvägsplanens fastställelsehandling framkommer att i samband med spårutvidgningen av Bohusbanan skall den nuvarande plankorsningen vid Backavägen planskiljas genom en nedsänkning av vägen (Trafikverket, 2017). Dessutom ska vägen breddas till två körfält i respektive riktning, med möjlighet till framtida utbyggnad av spårvägsnätet, samt gång- och cykelbana på vardera sida. Utformningen av den dubbelspåriga järnvägsbron som skall gå över Backavägen ligger till grund för denna rapport som omfattar en möjlig projektering och konstruktion av bron.

1.1 Syfte

Syftet med projektet är att utvärdera olika brokoncept för en järnvägsbro över Backavägen på Hisingen i Göteborg. Vidare ska en preliminär dimensionering på det mest lämpade förslaget utföras och presenteras som en rapport.

1.2 Problem

I uppgiften ingår att i en första fas ta fram olika förslag till järnvägsbro över Backavägen och därefter välja ett av alternativen som ska dimensioneras och utvärderas i projektets andra fas. Problemet kan delas upp i olika delproblem enligt:

- Vilka förutsättningar finns för platsen och i detaljplanen för området?
- Vad finns det för möjliga brokoncept att utvärdera?
- Hur och efter vilka mått ska koncepten utvärderas och den mest lämpade väljas?
- Hur ska en preliminär dimensionering genomföras och presenteras?

1.3 Avgränsningar

En plats och ett syfte för bron är redan givet i uppgiften och det medför tydliga avgränsningar för vad som tas upp i rapporten. Svenska standarder ska användas och det finns en detaljplan som definierar för vilka syften området ska utvecklas (Göteborgs stad, 2018). Därtill finns även en väg- och järnvägsplan för sträckningen Lundbyleden (Trafikverket, 2017). En anpassad plankarta för bron har tillhandahållits av COWI, se bilaga A, och denna förtydligar avgränsningar för den specifika platsen.

Eftersom projektet inte har en budget att följa behöver nödvändigtvis inte den ekonomiska aspekten beaktas. I detta projekt kommer dock viss hänsyn till

investeringskostnader för förslagen tas, men inte alls i samma utsträckning som för ett verkligt projekt. Detta ska göras för att ha den kostnadsmässiga rimlighetsaspekten hos förslagen i åtanke utan att begränsa kreativitet. Geotekniskt finns det också en avgränsning och fenomen såsom sättningar kommer inte att undersökas ingående eller utgöra stora delar av rapporten. Projektet är begränsat till en preliminär dimensionering av överbyggnad utifrån de dimensionerande lasterna. För detaljer samt underbyggnad kommer endast mindre beräkningar göras.

1.4 Metod

Projektet genomförs i två olika etapper; första delen består av val av brokoncept och andra delen av utförande av en preliminär dimensionering av det valda brokonceptet. Den första etappen inleds av ett intuitivt skede med skapande av olika broalternativ. Detta kräver definierade förutsättningar för platsen och krav för konstruktionen samt målbild med projektet. Platsen definieras genom fältarbete i form av platsbesök och litteraturstudie av detaljplaner för området. Aktuella krav definieras genom litteraturarbete av standarder och riktlinjer. Målbilden med projektet utgår från de tre ansvarsområdena; Beställare/konstruktion, Produktion samt Förvaltning och underhåll. Etappen avslutas med ett utvärderingsskede där val av brokoncept ska utföras. Broalternativen jämförs och rankas mot tidigare bestämda utvärderingskriterier, vilka relaterar till förutsättningarna och målbilden. Den andra etappen består av en dimensionering av valt brokoncept från del ett. I en iterativ process kommer det valda brokonceptets dimensioner att bestämmas utifrån dimensionerande laster och beräknad kapacitet. Resultatet redovisas som illustration av valda brokonceptet och tvärsnittssektioner.

1.5 Samhälleliga och etiska aspekter

Uppförandet av bron är del av ett större planområde vars syfte är att utveckla Backaplan enligt Göteborgs stads vision om en hållbar blandstad (Göteborgs stad, 2018). Slutmålet i projektet anses vara att underlätta resande och passage genom området för alla påverkade trafikslag. En del av de etiska aspekterna i detta projekt blir därför att jämföra om belastningen under och efter byggtiden med avseende på miljöpåverkan, ekonomi samt samhällspåverkan väger upp mot den nytta som det färdiga projektet kommer att bidra med.

Projektets genomförande berör boende och verksamma i området, trafikanter, resande på Bohusbanan och fauna (Göteborgs stad, 2018). Trafikanter och boende berörs främst genom störningar under produktion medan vissa verksamheter kommer få flytta på sig permanent för att göra plats för den nya järnvägen. Däremot anses uppförandet av en ny bro helhetsmässigt förbättra den befintliga industrimarken ur ett hållbarhetsperspektiv. Enligt Park- och naturförvaltningen finns inga speciella naturintressen i området. Sammanvägt bedöms därmed inte några djupare etiska aspekter behöva analyseras för projektets utförande.

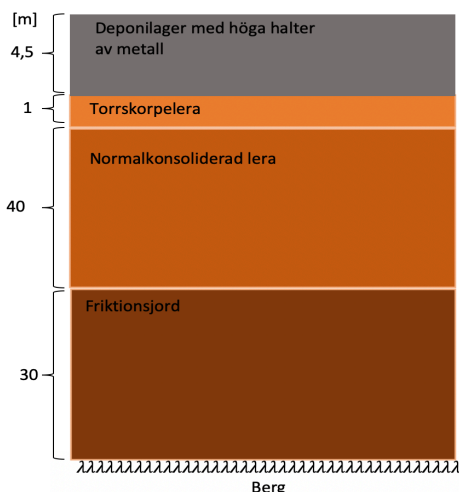
Stadsbyggnadskontoret har uttryckt en angelägenhet om att skapa en bra koppling mellan Backaplan och Brunnsbo, vilket kan hämmas av den barriäreffekt som bron eventuellt formar (Göteborgs stad, 2018). Däremot skulle den nya planskilda korsningen kunna utformas på ett sådant sätt att den istället bygger samman Backaplan och Brunnsbo. Därför kan utformningen av bron komma att bli betydelsefull för den framtida utvecklingen av områdena.

2 Förutsättningar

Järnvägsbron ska uppföras över Backavägen, lokaliserad ca 25 meter från Lillhagsvägen. Detta är en väl trafikerad huvudled och på andra sidan huvudleden är bostäder i form av flerfamiljshus och villor belägna, vilka är avskilda med bullerskydd. Järnvägen kommer byggas mellan detta bostadsområde och ett industriområde på en plats som är ganska öppen och glest bebyggd i dagsläget.

2.1 Geotekniska förutsättningar

Järnvägsbron ska bebyggas mellan km 5+440 till 5+540 på Bohusbanan, vilket är ett relativt platt område med en marklutning på 0,75 %, se bilaga A. Jorddjupet vid området är uppskattningsvis runt 70 meter och dess profil enligt figur 1. Hållfastheten på den normalkonsoliderade leran varierar stort och är klassad som extremt låg till medelhög (Trafikverket, 2019c). Inget ytvatten finns vid planområdet utan endast markvatten såsom avrinning förekommer i jordprofilens övre lager. Grundvattennivån vid planområdet är 1,0–2,0 meter under markytan (Göteborgs stad, 2014). Under produktion kommer grundvattennivån att behöva sänkas, då Backavägen ska nedsänkas och gå under den nya bron.



Figur 1: Ungefärlig jordprofil för området. Notera att profilen ej är skalenlig.

2.2 Krav

Järnvägsbron ska ha en brolängd på 90 meter, vilket är mätt utifrån plankartan, se bilaga A. Under järnvägsbron kommer vägtrafik, gång- och cykeltrafik att passera, samt eventuellt spårvagnstrafik i framtiden. Detta ställer krav på det fria rummet i passagen under bron. Den fria höjden under bron ska vara $\geq 5,7$ meter över körfält enligt plankartan och $\geq 2,5$ meter över gång- och cykelbanan (Trafikverket, 2020). Vägens nivå till RÖK är mätt i plankartan och ger en tillgänglig konstruktionshöjd på 1,9 meter.

Den fria brobredden bestäms enligt normalsektionen för långa objekt (Trafikverket, 2015a). Det fria avståndet mellan spårmittpunkt och brokonstruktion enligt denna sektion måste utvidgas då järnvägsbron är krökt. Horisontalradien är mätt från plankarta till 500 meter för nedspår och 480 meter för uppspår. Detta ger ett fritt avstånd mellan spårmittpunkt och brokonstruktion på $\geq 3,6$ meter vid en höjd på $\geq 0,810$ meter över RÖK (Trafikverket, 2015a).

2.3 Målsättning

De generella målsättningarna för projektet specificeras nedan för de olika intresseområdena inom projektet. Att kunna samverka mellan olika intressenter är en förutsättning för att uppnå målen och viktigt ur hållbarhetssynpunkt.

2.3.1 Mål med gestaltningen och utformning

Gestaltning av bron är av vikt ur ett socialt hållbart perspektiv och ett mål som knyter till detta är att passagen under järnvägsbron ska upplevas som trygg. Det kan ges av ett rymligt fritt rum samt belysning kvällstid. Gestaltning påverkar miljön främst genom estetik, vilket till stor del är en subjektiv aspekt och därmed svår att konkretisera. För att järnvägsbron ska gå i linje med Göteborgs Stads vision bör målsättningen vara att den ska smälta in i en framtida blandstad (Göteborgs stad, 2018).

Mål med utformningen innefattar säkerställande av god trafiksäkerhet. Trafikanter ska kunna röra sig säkert i området, vilket kan säkerställas då järnvägstrafiken separeras från övrig trafik med den planerade bron. Dessutom ska järnvägsbron vara beständig och klara hela dess tekniska livslängd med möjlighet till anpassning vid exempelvis en framtida ökning av trafiklasten.

2.3.2 Mål med ekologisk hållbarhet

Ur ett ekologiskt hållbarhetsperspektiv ska projektet ge minimal påverkan på omgivningsmiljön och fokusera på hela livscykeln. Miljöpåverkan från vanliga byggnadsmaterial beskrivs i avsnitt 3.1 *Byggnadsmaterial*. Hållbara transporter av material och element ska eftersträvas, detta genom samordnad logistik och mindre svinn av byggnadsmaterial. En miljöeffektiv bro innebär en optimering av materialåtgången genom att exempelvis inte använda onödigt stora tvärsnitt eller för många stöd. Därtill kan möjlighet om att använda återvunnet material undersökas. Under byggskedet bör miljöpåverkan uppmärksammas genom att inkludera eventuella skyddsåtgärder för att minimera påverkan av mark och vattendrag. Markens översta lager består av fyllnadsmaterial från deponi, vilket är förorenat sedan tidigare. Detta medför att speciella åtgärder behöver vidtas vid bortschaktning av massa.

2.3.3 Mål med produktionen

En bra produktionsmetod ses som säker att utföra, har en förutsägbar och kort byggtid och är hållbar ur ett ekologiskt, ekonomiskt och socialt perspektiv (föreläsning, M. Karlsson, 27 februari 2020). Förutom de målsättningar om produktion som presenterats i avsnitt 2.3.3 *Ekologisk hållbarhet* tillkommer särskilt att god arbetssäkerhet ska gälla i alla stadier av produktionen. En fungerande tågtrafik med minsta möjliga avstängning av befintligt spår prioriteras och därtill även låg trafikstörning och säkra omledningar för omkringliggande vägar. En kort och förutsägbar byggtid möjliggörs genom noga utvalda produktionsmetoder och logistiklösningar.

2.3.4 Mål med förvaltning och underhåll

Ur ett underhåll- och förvaltningsperspektiv bör bron konstrueras på ett sådant sätt att inspektion möjliggörs samt att underhåll kan utföras med minimal trafikpåverkan. Bron skall också konstrueras och dimensioneras på ett sådant sätt att service- och arbetsfordon kan arbeta obehindrat och ha åtkomst till de olika brodelarna. För att minimera omfattningen av underhåll är det viktigt att underhåll- och förvaltningsaspekter tas i beaktning redan i projekteringskedet (Trafikverket, 2018b).

3 Underlag för urvalsprocess

För att kunna göra ett urval bland de olika brotyperna är det viktigt att ha kunskap om byggnadsmaterial, produktionsmetoder, vilka upplagsmöjligheter som finns, hur valet påverkar underhållsaspekter, ekonomi, samt olika grundläggningsmetoder. Nedan följer de underlag som den senare delen av urvalsprocessen bygger på.

3.1 Byggnadsmaterial

De vanligaste byggnadsmaterialen är trä, armerad betong och stål. I Trafikverkets kravdokument för brobyggande står att en konstruktion som påverkar järnväg måste utformas för en avsedd teknisk livslängd på 120 år om inte delar av eller hela konstruktionen kan bytas utan påverkan på järnvägstrafiken (Trafikverket, 2016). Detta är en längre livslängd än träkonstruktioner klarar även med materialbehandling och därför kommer inte broar i trä att undersökas vidare i denna rapport (Trafikverket, 2018b).

3.1.1 Armerad betong

Betong består till största delen av cement, ballast, vatten och tillsatsmedel, där mängdvariationer av ingredienserna ger olika önskvärda egenskaper (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2013). Karakteristiskt för betong är att dess dragkapacitet är betydligt lägre än dess tryckkapacitet, vilket är anledningen till att vid praktiska tillämpningar armeras betongtvärsnittet i den dragna zonen med armeringsstänger av stål. Betong påverkas av de tidsberoende deformationerna krypning och krympning. Trots det är betong ett beständigt byggnadsmaterial med lång livslängd (Trafikverket, 2018b). Det är främst armeringsstålets korrosionsrisk som begränsar byggnadsmaterialets beständighet och ställer krav på täckande betongskikt för att skydda armeringen.

Tillverkningen av cement samt mängden armeringsstål i betongtvärsnittet ger stora utsläpp av koldioxidekvivalenter (Zabalza Bribián, Valero Capilla, & Aranda Usón, 2011). Däremot, är energiinnehållet i förhållande till bärförmåga lägre för konstruktioner i betong än i stål (Al-Emrani et al., 2013). Utifrån ett livscykelperspektiv kan armeringsstängerna återvinnas efter demontering av konstruktionen samt betongen återanvändas som fyllnadsmaterial (Trafikverket, 2018b).

3.1.2 Stål

Stål är ett linjärelastiskt-plastiskt material som uppvisar liknande beteende i tryck som i drag och påverkas inte av krypning. En nackdel med stål är att det med tiden uppvisar utmattningsymptom, vilket kan minska dess hållfasthet markant. Fenomenet är extra vanligt för järnvägsbroar på grund av stora spänningsvariationer (Lebet & Hirt, 2013).

Stål har en lång livslängd och är lätt att återvinna och återanvända, vilket minskar dess miljöpåverkan. Stål är också ett flexibelt material med hög hållfasthet, vilket tillåter förenklade utformningar och ger materialeffektiva strukturer. Dock behöver stål korrosionsskyddas flera gånger under livstiden, vilket både innebär ökad arbetskraft och större miljöpåverkan (Trafikverket, 2018b). Det krävs också stora resurser vid brytning och transport av malm, vilket är synonymt med stora utsläpp.

3.2 Produktionsmetoder

Nedan redogörs för ett antal aspekter inom produktion som blir aktuella för urvalsprocessen.

3.2.1 Gjutning av betong på plats och i fabrik

Vid produktion av betongelement för broar kan antingen prefabricering eller platsgjutning nyttjas. Enheter som gjuts helt och hållet på plats får bra strukturell integrering och kan på så vis tillverkas och gjutas i mer anpassade, fria varianter och former.

Gjutningen kräver mycket ställningar och tillverkning av formkonstruktioner blir en tidskrävande produktion på plats (Lin & Yoda, 2017). Med prefabricering är fördelen att betongelementen kan tillverkas i fabrik på ett industrialiserat och mer effektivt sätt och produktionstakten blir därmed snabbare. Vid tillverkningen behöver man inte heller anpassa produktionen efter säsong och väder i lika stor utsträckning och dessutom ges ofta bättre möjligheter för kvalitetskontroller vid fabriksproduktion (Lin & Yoda, 2017). Det är även enklare att skapa en god arbetsmiljö och bättre säkerhet.

3.2.2 Transporter av element i stål och i betong

Tillverkningen av stora stålstrukturer måste ske utanför Sverige då inga industrier här tillverkar i den skalan, detta kan medföra långa miljökrävande transporter (personlig kommunikation, M. Karlsson, 24 januari 2020). Dessa stålelement, såväl som prefabricerade betongelement, bör transporteras i så stora och närmast färdiga delar som möjligt för att få en snabb montering på plats. För stål vill man också minimera svetsarbete på byggplatsen eftersom det är svårare att utföra där än i fabrik (föreläsning, M. Al-Emrani, 30 januari 2020). Elementens storlekar styrs främst av byggplatsen, dess tillgänglighet och vilka transportmedel som går att bruka. Dessutom kan storleken och vikten begränsas av kapaciteten av de kranar och maskiner som ska användas för att lansera eller lyfta elementen på plats (Lebet & Hirt, 2013). Större delen av transporten för stålet kan i detta fall ske sjövägen och stora enheter tas då upp genom Göta älv så långt som möjligt för att sedan köras med specialtransport på väg den sista biten.

3.2.3 Byggande vid befintligt spår

Det är möjligt att hitta lösningar för att låta tågtrafiken gå i stort sett som vanligt under byggtiden eftersom den nya sträckningen ska gå ca 5–10 meter sydväst om den befintliga banan, se bilaga B. En sådan lösning kan vara att låta bygga in det befintliga spåret i en tillfällig tunnel. Denna kläs i trä på utsidan och fungerar dels som säkerhetsskydd för arbetarna och dels som skydd för rälsen och tågen ifall byggandet skulle störa eller saker tappas på spåret (personlig kommunikation, M. Karlsson, 27 februari 2020). Avstängning av spåret kan eventuellt krävas i korta perioder beroende på slutligt valt brokoncept och ifall temporära konstruktioner eller kranar kommer att behöva utnyttja den platsen under exempelvis lansering eller lyft. Backavägen kommer att behöva stängas av under majoriteten av byggnationsprocessen, vilket också är nödvändigt eftersom hela vägen ska sänkas ner.

3.3 Grundläggningsmetoder

På järnvägsbron verkar ett flertal laster, vilka ska föras ner till den underliggande marken. Detta ställer krav på grundläggningen för att säkerställa låg omgivningspåverkan såsom sättningar. Val av lämplig grundläggningsmetod beror på flera plats specifika parametrar (Trafikverket, 2018b). Dels på jordprofilen vid planområdet, alltså

mäktigheten på olika lager samt dess egenskaper, men även av grundvattenytans nivå och det tjälsäkra djupet. Dessutom beror valet på vilken brotyp som ska byggas. Materialval gör att egenvikten varierar och olika antal stöd kan behövas för att uppnå kraven för brolängden.

Vanliga grundläggningsmetoder för broar är plattgrundläggning och pågrundläggning (föreläsning, J. Leppänen, 18 februari 2020). Utifrån de geotekniska förutsättningarna ska järnvägsbron grundläggas på kohesionsjord med mäktighet på 40 meter samt 70 meter jorddjup till berg. Detta medför att plattgrundläggning med bottenplatta på berg eller på jord inte är lämpliga metoder eftersom det förutsätter god jordkvalité även vid större djup. Plattgrundläggning kan även ske på packad fyllning, där grus- eller sprängstensfyllning ersätter lager av mindre stabilt jordmaterial (Trafikverket, 2018b). Planområdet har ett lerlager med mäktighet på 40 meter ovanpå friktionsjord, vilket är på ett djup där det inte anses ekonomiskt lönsamt att schakta bort leran och ersätta med fyllning. Den mest lämpliga grundläggningsmetoden utifrån dessa antaganden är därmed pålning.

Pålgrundläggning kan utföras med mantelbärande eller spetsbärande pålar (Olsson & Holm, 1993). Spetsbärande pålar överför huvudsakligen lasten till bärkraftigare jordmaterial eller berg genom pålspetsen, medan mantelbärande pålar överför lasten genom kohesion längsmed mantelytan. En slagen prefabricerad betongpåle kan vara upp till 100 meter och är en ekonomiskt fördelaktig pålningsmetod (Olsson & Holm, 1993). Jorddjupet vid planområdet är 70 meter, varvid betongpålarna kan vara spetsbärande och överföra lasten från järnvägsbron till berg. Lasten kan också överföras till friktionsjorden ovan berg ifall dess hållfasthet är bärkraftig nog, vilket inte framgår av de geotekniska undersökningar som hittills gjorts (Trafikverket, 2019c).

3.4 Förvaltning och underhåll

För de flesta brotyper kommer lager samt övergångskonstruktioner behöva konstrueras vid upplagspunkter samt i anslutning med omgivande mark. Utformningen på dessa hänger samman då olika lageranordningar ställer varierade krav på övergångskonstruktionerna (Trafikverket, 2018b). Eftersom övergångskonstruktioner är känsliga och dyra utformas broar med minimalt antal övergångsanordningar (Lebet & Hirt, 2013). Detta gäller även för lager, men dessa kan vara svårare att undvika.

Generellt för lager gäller att livslängden understiger den som bron projekteras för, vilket utöver inspektioner innebär behov av underhåll och byte (Lebet & Hirt, 2013). Lager kan utformas på två principiella sätt, som rörliga eller fasta. För fasta lager gäller att ta hänsyn till stödets kapacitet att ta horisontella laster medan det för rörliga är viktigt att anpassa övergångskonstruktionen så att förskjutningen görs möjlig utan skador på konstruktionen (Trafikverket, 2018b). En fördel med fasta lager är att de kan ha en längre förväntad livslängd än de rörliga (Lebet & Hirt, 2013). Oavsett lagertyp så måste upplagen utformas på ett sådant sätt att inspektion samt underhållsarbete kan ske från samtliga sidor runt lageranordningen. Därtill så skall över- och underbyggnaden konstrueras så att överbyggnaden kan höjas upp från stödet då lagret behöver bytas (Trafikverket, 2018b).

En annan förvaltningsaspekt att väga in är anläggandet av mittstöd. Fördelar med mittstöd är att det minskar spännvidden. Däremot är det under bron livslängd en

utsatt konstruktion med salt, smuts och annat slitage från de intilliggande vägbanorna (föreläsning, J. Sandberg 21 februari 2020). Detta innebär att regelbundna inspektioner, och vid behov underhållsarbeten, av mittstöden behöver utföras, helst med minimal påverkan på omkringliggande körfält under tiden. Att ha lager på mittstödet gör det ännu mer underhållskrävande.

Vid utformning av samtliga broar är det viktigt att ha i åtanke att det är detaljer som bryter ner en bro (föreläsning, J. Sandberg 21 februari 2020). Med fler kritiska punkter i en konstruktion ökar risken för stora underhållskostnader. Exempel på sådana detaljer är förband, infästningar, svetsar, lager, övergångskonstruktioner, utformningsavvikelser, felaktig montering med mera. Därför är det av stor betydelse att i projekteringskedet identifiera dessa och förebygga de problem som kan uppstå.

3.5 Ekonomi

Kostnaden för projektet ska vara inom rimliga ramar med ett fokus på ekonomisk hållbarhet. Detta innebär lönsamhet ur ett livscykelperspektiv; allt från projektering till demontering. Kostnaden för ett infrastrukturprojekt består av investeringskostnad samt drift- och underhållskostnad.

Investeringen omfattar kostnader för uppförandet och projekteringen av järnvägsbron, vilket är associerat med ekonomiska osäkerheter som bör identifieras i ett tidigt skede (Trafikverket, 2018a). Dessa ekonomiska osäkerheter är bland annat kostnader för leveransförseningar och eventuella arbetsplatsolyckor. Investeringskostnader som är enklare att förutse under projekteringsfasen är material- och produktionskostnader, se tabell 1. Utöver de material- och produktionskostnader som redovisas i tabell 1 tillkommer även kostnader för bland annat ballast, slipers, räl och kontaktledning. Dessa kostnader är liknande för alla brokoncept och kommer därför inte att redovisas vid jämförelser.

Tabell 1: Uppskattning av enhetspris för stål- och betongkonstruktioner samt armeringsstänger. Avser material- och produktionskostnader inklusive arbetstimmar. (personlig kommunikation, S. Lindén, 3 mars 2020).

Stålkonstruktion [SEK/ton]	Betongkonstruktion [SEK/ton]	Armeringsstänger [SEK/ton]
35 000	900	13 000

Drift- och underhållskostnader är kostnader som tillkommer efter att järnvägsbron står färdig. Exempel på detta är kostnader för reparation av bron och inspektionskostnader men det omfattar även rivning. Kostnaden av demonteringen jämförs med värdet av brons delar vid slutet av dess livslängd (Trafikverket, 2018b). Vissa framtida förändringar som medför kostnader ur ett livscykelperspektiv är svårare att kalkylera i tidigt skede. Detta inkluderar till exempel ökad trafikmängd, vilket ger en ökad last på bron samt nya krav och regelverk.

4 Urvalsprocess

Att komma fram till vilket brokoncept som lämpar sig bäst för just detta projekt är en komplex uppgift och för att underlätta detta genomförs denna process i två steg. I det första steget undersöks vilka brokoncept som är lämpliga för platsen utifrån förutsättningarna och kraven. I det andra steget tas utvärderingskriterier fram som tydliggör vilka aspekter som anses vara mer viktiga så att för- och nackdelar hos koncepten kan vägas mot varandra.

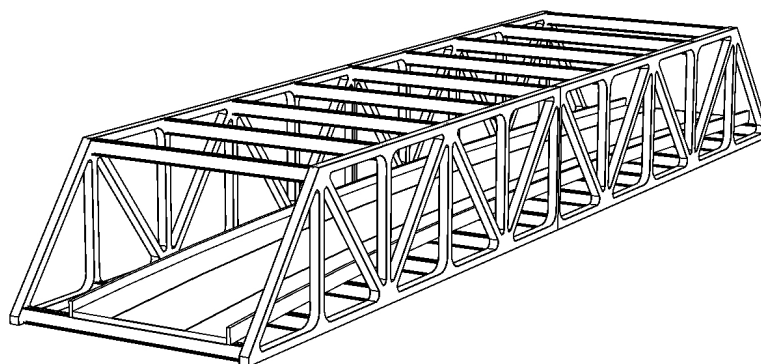
4.1 Urval 1

Den mest avgörande förutsättningen för vilka brotyper som är aktuella för platsen är att de uppfyller krav på tillräcklig fri höjd under brobanan och att de klarar spännvidd och total brolängd, se bilaga C. Brotyper med underliggande huvudbärverk väljs bort på grund av att de ger för stor konstruktionshöjd och därmed inskränker på den fria höjden under bron. En järnvägsbro måste ha tillräcklig böjstyvhet för att vara lämpade för tågtrafik och därför väljs hängbro och snedkabelbro bort (Lebet & Hirt, 2013). Dessa brotyper är dessutom mer lämpliga för större spännvidder än vad som är aktuellt för detta fall.

4.2 Brokoncept

Utvärderingen i det första urvalet resulterade i fyra brotyper att jobba vidare med. Dessa fyra är fackverksbro i stål, bågbro i stål, trågbalkbro i betong samt trågbalkbro i stål. Utifrån dem har fyra olika koncept för hur järnvägsbron över Backavägen skulle kunna utformas tagits fram och dessa beskrivs översiktligt för att göra andra delen av urvalsprocessen möjlig.

4.2.1 Fackverksbro i stål



Figur 2: Illustration dubbelspårig fackverksbro i stål.

Huvudbärverket för detta koncept är fackverket i stål som kommer att vara överliggande för att klara den fria höjden under bron, se figur 2 för illustration. I stängerna som utgör fackverket verkar endast tryck- och dragkrafter och strukturen är därför stel med avseende på böjning, något som är fördelaktigt hos en järnvägsbro som ska kunna ta stora laster och spänningar (Lebet & Hirt, 2013). Brobanan kommer att fyllas med ballast i ett ståltråg. Bron behöver vara bredare än minsta fria brobredd beskriven i avsnitt 2.2 *Krav*, eftersom spåren svänger över brospannet medan fackverket är rakt.

Beställare

Fackverksbrons gestaltning är en estetisk tilltalande lösning som ger en känsla av lätthet genom dess slankhet (Lebet & Hirt, 2013). Att enbart behöva ändstöd verkar för ett rymligt fritt rum som skapar god sikt och har en positiv inverkan på trygghetskänslan. Ytterligare trafiksäkerhet ges i och med att risken för påkörning av stöd minskar med enbart ändstöd. Enligt avsnitt 3.1 *Byggnadsmaterial* har en stålkonstruktion ett högt energiinnehåll, vilket bidrar till dess klimatpåverkan. En möjlighet för att minska klimatpåverkan är att använda återvunnet stål, vilket dock är en kostsam lösning. Material- och produktionskostnader uppgår uppskattningsvis till 40 MSEK för ett fackverk i konstruktionsstål utifrån enhetspriser i avsnitt 3.6 *Ekonomi*, se bilaga D för beräkningar.

Produktion

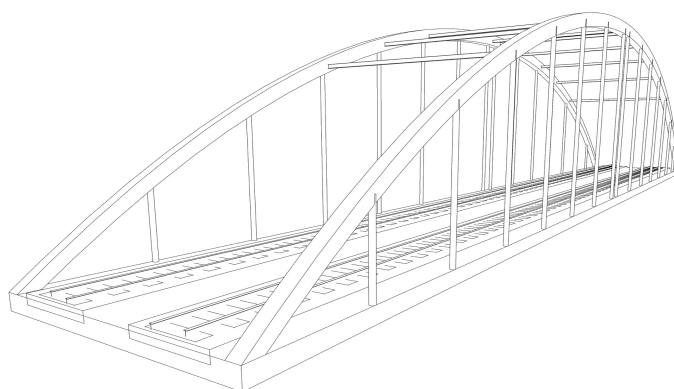
Fackverksbroar är optimerade och lätta konstruktioner som utnyttjar materialet effektivt, speciellt eftersom rörprofiler används och för att de ofta svetsas ihop. Detta resulterar i lätta konstruktioner som kan vara fördelaktigt vid produktionen, dels ur materialåtgångssynpunkt och dels ur transport- och monteringsynpunkt (föreläsning, M. Al-Emrani, 30 januari 2020).

I avsnitt 3.2.3 *Transporter av element i stål och i betong* framgår det att delarna till fackverket produceras utanför Sverige och transporteras hit, antagligen via sjövägen och med specialtransport på väg. Om större delen av svetsningsarbetet sker i förhand blir monteringsförloppet relativt smidigt eftersom hela eller större delar av fackverket lyfts och monteras i sitt läge med hjälp av en kran eller lanseras ut (Lebet & Hirt, 2013). Byggplatsen avgör hur stora prefabricerade fackverkselement som kan transporteras dit i ett stycke. Om inte hela fackverksbalkarna kan fraktas till platsen behöver man svetsa ihop dem i segment på plats och en sådan montering kan kräva tillfälliga byggställningar (personlig kommunikation, M. Plos, 20 februari 2020). Svetsning kan bli ett komplicerat och tidskrävande moment på byggarbetsplatsen om det är många fogar och avancerade geometrier och detaljer. Det är en process som kräver specialistkompetens för att fogarna ska få rätt kvalitet och kan bli mycket dyrt (föreläsning, M. Al-Emrani, 30 januari 2020).

Förvaltning och underhåll

I en fackverkskonstruktion finns en hel del utsatta detaljer, framförallt vid infästningar såsom svetsförband. Därför är detaljutformningen av stor betydelse för att skapa en hållbar konstruktion. För att undvika korrosion gäller det att konstruera bron på ett sådant sätt att vatten undviks att bli stående samt att utrymme görs för att kunna rostskyddsmåla på ett tillfredsställande sätt. Utöver det måste alla typer av svetsar och andra detaljer vara inspekterbara och lättåtkomliga (föreläsning, M. Al-Emrani, 30 januari 2020). Exempel på mer omfattande underhållsarbete som behövs för fackverksbron är ytbehandlingen av stålet som med största sannolikhet kommer behöva appliceras flera gånger under brons livslängd och underhållskostnaderna kan därmed bli markanta (Trafikverket, 2018b).

4.2.2 Bågbro i stål



Figur 3: Illustration bågbro i stål.

Bågbron är utformad med båge som huvudbärverk och brobanepatta som sekundärbärverk. För att möjliggöra tillräcklig fri höjd under bron bör den utformas med överliggande båge, se figur 3 för illustration. Infästningen mellan dessa bärverk görs med draghängare, vilka är vertikala stänger (Trafikverket, 2014). När huvudbärverket ligger över sekundärbärverket är stål det vanligaste materialet att använda. Betong kan tyckas fungera bättre i en båge som utsätts för tryck, men är vanligare att använda sig av för underliggande huvudbärverk (Lebet & Hirt, 2013).

Beställare

Bågbroar var förr i tiden väldigt vanliga, men är idag utkonkurrerade av spännbetong- och stålbalkbroar. Anledningen till att man bygger bågbroar idag är därav mestadels av estetiska skäl (Trafikverket, 2018b). En bågbro är generellt sett mer tilltalande för allmänheten. Liksom för fackverksbron medför utformandet av en bro utan mittstöd mindre barriäreffekt och högre trafiksäkerhet. Stål har högre energiinnehåll än betong och i kombination med en hög materialåtgång innebär detta en miljöpåverkan. Materialåtgången ger också stora investeringskostnader. Överslagsberäkning för material- och produktionskostnaden uppgår till ungefär 30 MSEK, se bilaga D.

Produktion

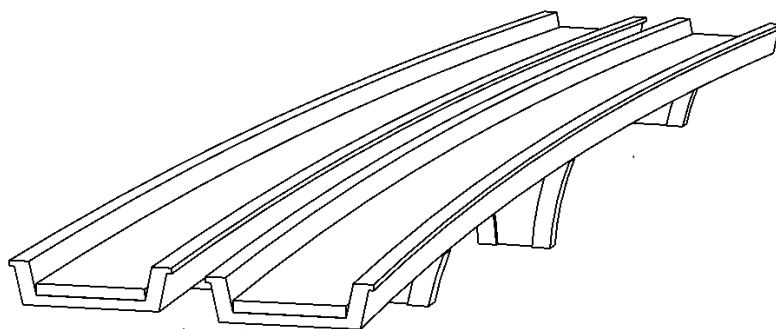
Stålbågar skulle likt fackverken förtillverkas i fabrik och sättas ihop på plats av så stora element som transporten tillåter. Montering av bågarna kan ske på flera sätt. Eftersom inget vattendrag finns under den planerade bron och Backavägen kommer att vara avstängd så förblir marken under bron tillgänglig under produktionen och byggskedet förenklas. Ett alternativ är då att bygga upp tillfälliga stödkonstruktioner under brospannet och montera en halv båge åt gången på stöden. På ändstöden byggs tillfälliga torn som förankras med snedkablar. Båghalvorna lyfts sedan till sin rätta position med hjälp av torn och vajervinchar. En förutsättning för denna typ av montering är att bågen är ledad vid ändstöden för att tillåta att den lyftas likt ett gångjärn (Jean-Paul Lebet, 2013).

Förvaltning och underhåll

Liksom för fackverksbron har bågbron en del utsatta konstruktionsdelar, till exempel i knutpunkterna där stålstängerna kopplas samman med båge respektive brobana. En fördel jämfört med fackverket är dock att bågbron generellt har färre infästningspunkter som riskerar att få vatten stående. En nackdel däremot är att den höga konstruktionshöjden gör inspektioner svårare att genomföra.

Under ett livstidsperspektiv är sannolikheten hög att bågen måste underhållas med mer eller mindre omfattande åtgärder som exempelvis ommålning av stålet. För att göra detta måste hela eller delar av bron temporärt stängas av. I det fall att en av stålstångerna skulle behövas bytas ut kräver även detta ett avbrott i trafiken. Liksom för fackverksbron riskeras höga kostnader över tid (personlig kommunikation, J. Sandberg, 21 februari 2020).

4.2.3 Trågbalkbro i betong



Figur 4: Illustration trågbalkbro i betong.

I en trågbalkbro vilar rälsen på en platta som i sig bärs upp av balkar på utsidorna (Trafikverket, 2018b). Strukturen bär laster genom att moment och tvärkraft fördelas över balkarna och lasterna leds ner i stöd (föreläsning, M. Plos, 20 januari 2020). En trågbalkbro i betong kan konstrueras med samma spännvidder som betongbalkbroar i allmänhet, vilket är ungefär 10 – 30 meter. För spann över 25 meter konstrueras balkarna med spännarmering (Trafikverket, 2018b). I detta fall behöver en balkbro byggas med mittstöd samt två extra stöd ut mot upplagen för att uppnå tillräcklig broslängd i kombination med låg överbyggnadshöjd, se figur 4 för illustration. Balkarna byggs då kontinuerliga över mittstödet och de två andra stöden eftersom det är underhållsmässigt och ekonomiskt fördelaktigt (föreläsning, M. Plos, 31 januari 2020).

Beställare

Konceptet utformas med flera stöd, vilket minskar det fria rummet under bron och trafiksäkerheten. Däremot höjs trafiksäkerheten av att två broar utformas eftersom eventuella urspårningar stoppas av trågbalken. Trågbalken utformas i förspänd betong, vilket innebär många beräkningar (föreläsning, M. Karlsson, 14 februari 2020). Dessa beräkningar är inte nödvändigtvis svåra, men den tekniska komplexiteten ökar i och med det tidskrävande beräkningsarbetet. Detta brokoncept har ett relativt lågt energiinnehåll jämfört med övriga broalternativ eftersom alla element är tillverkade i armerad betong. I en järnvägsöverbyggnad behövs mycket armering för att klara lasterna, vilket ökar förslaget klimatpåverkan. Brokonceptet är ett ekonomiskt gynnsamt förslag med en uppskattad material- och produktionskostnad på 5 MSEK, se bilaga D.

Produktion

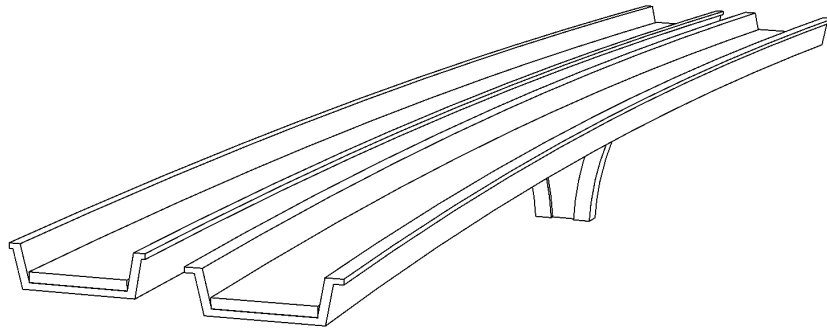
Betongbalkbroar kan gutas helt på plats, prefabriceras eller tillverkas i en kombination av platsgjutet och prefabricerat. För- och nackdelar med de olika metoderna beskrivs i avsnitt 2.2.2 *Gjutning av betong på plats och i fabrik*. När det gäller trågbalkarna för detta koncept så gjuts de på plats för att få bättre samverkan (personlig kommunikation, M. Plos, 5 mars 2020). Ett omfattande arbete med att bygga gjutformar

tillkommer i så fall (Lin & Yoda, 2017). Även betongplattan mellan trågbalkarna kommer platsgutas eftersom prefabricerade element inte anses förenkla utförandet och passformen (personlig kommunikation, M. Plos 5 mars 2020).

Förvaltning och underhåll

Underhållsarbetet för två separerade trågbalkbroar underlättas genom att trafiken kan stängas av på den ena bron och ledas om till spåret på intilliggande brokonstruktion (Trafikverket, 2018b). För broar med mittstöd måste dessa göras tillgängliga för inspektion och vid behov skall eventuella lagerkonstruktioner kunna bytas ut (personlig kommunikation, J. Sandberg, 21 februari 2020). Detta måste tas i beaktning vid konstruktion av mittstöd och kommer eventuellt innebära att delar av de under bron liggande körfälten temporärt stängs av. För betongtrågbalkar kan detta problem elimineras genom att mellanstöden sammangjuts med brobanepattan så att lagerkonstruktioner vid mittstöd undviks (Trafikverket, 2018b).

4.2.4 Trågbalkbro i stål



Figur 5: Illustration trågbalkbro i stål.

Trågbalkbroar kan byggas av antingen stål eller betong och verknings sättet är det samma, se avsnitt 3.2.3 *Trågbalkbro i betong*. Trågbalkbroar i stål är lämpliga att bygga när krav på låg egenvikt finns samt för en begränsad överbyggnadshöjd (Trafikverket, 2018b). Brobanepattan utgörs av en stålplåt som vilar på I-balkar uppspända mellan trågbalkarna, se figur 5 för illustration av brokonceptet. Trågbalkarna kan konstrueras med lådtvärsnitt, vilket är en vanlig lösning (personlig kommunikation, S. Lindén, 3 mars 2020). Överbyggnadshöjden i en trågbalkbro styrs främst av avståndet mellan trågbalkarna. Är avståndet längre behöver de mellanliggande balkarna vara högre och då ökar överbyggnadshöjden (personlig kommunikation, S. Lindén, 3 mars 2020). Om bron ska vara dubbelspårig och låg överbyggnadshöjd eftersträvas är därför två separata broar ett lämpligt alternativ. En trågbalkbro i stål klarar längre spännvidder än betongalternativet, varpå antalet spann kan minskas till två med ett mittstöd.

Beställare

Eftersom trågbalkbron i stål behöver färre stöd ökar det trygghetskänslan gentemot trågbalkbron i betong. Ur trafiksäkerhetssynpunkt har de samma för- och nackdelar med avseende på påkörningsrisk och urspårningar. Energiinnehållet är generellt lägre i betong än i stål, vilket gör trågbalkbron i betong fördelaktig ur miljösynpunkt kontra detta koncept. Dessutom tillkommer även miljöpåverkan genom transport för stålkonstruktioner. Jämfört med de två andra stålbroarna är materialåtgången och följaktligen miljöpåverkan lägre för detta brokoncept. Den uppskattade material- och produktionskostnaden uppgår till ungefär 23 MSEK, se bilaga D.

Produktion

Produktion och transport av en trågbalkbro i stål utförs enligt avsnitt 2.2.2 *Transporter av element i stål och i betong*. Hela broarna byggs parallellt ca 90 meter långa men transporten begränsar balklängden som kan prefabriceras i fabrik. Detta innebär att segment av balkarna behöver svetsas ihop på plats. Delarna av bron länkas vanligtvis samman med svetsning eller bultar och i detta fall gör geometrin att svetsning är lämpligast. Kvalitén på fogar blir vanligtvis sämre ute i fält än i fabriksmiljö och detta medför att man dimensionerar för att kunna utföra så mycket sådant arbete som möjligt i fabrik. Det kan bli nödvändigt att bygga tillfälliga skyddande konstruktioner mot väder omkring områden där sammansvetsning av bärande balkar utförs. Fogar som görs på plats ska vara placerade i områden där momenten i bron är relativt låga (Lebet & Hirt, 2013).

Förvaltning och underhåll

Som för betongtrågbalkbron genomförs underhållet lättare genom att uppföra två separata konstruktioner (Trafikverket, 2018b). En nackdel kontra betongalternativet är att mittstödet ej kan gjutas samman med de bärande trågen, vilket innebär att ett lager måste placeras vid mittstödet.

För trågbalkbroar i stål är det viktigt att bottenplattan utformas med avlopp mellan varje tvärbalk för att vattnet som strilar ner genom ballasten inte stannar kvar i konstruktionen och påskyndar nedbrytningen av stålet (Trafikverket, 2018b). På den inre sektionen av tvärsnittet, som är i kontakt med ballasten, appliceras ett lager som tål påverkan från ballasten samt agerar korrosionsskydd. En nackdel med ståltrågbalkbron är inspektionssvårigheten, vilket medför att för att kunna inspektera bottenplattan och insidorna av livplåten måste spåret stängas av och ballasten tas bort (Trafikverket, 2018b). För att underlätta inspektionen bör konstruktionen uppföras med så få dolda svetsar som möjligt.

4.3 Urval 2

Det andra och slutgiltiga urvalet görs enligt Broprojekteringshandbokens mall för val av brouformning (Trafikverket, 2018b). Där tas först de utvärderingskriterier som brokoncepten skall bedömas utifrån fram. Eftersom samtliga kriterier inte anses lika viktiga görs en viktningsskalamatris där de jämförs. Slutligen så bedöms respektive brokoncept utifrån de viktade utvärderingskriterierna. Viktigt att ha i beaktning är att det förslag som får högst poäng vid utvärderingen inte nödvändigtvis är det bästa förslaget. Urvalsprocessen är en iterativ process vilket innebär att förslagen utvecklas allteftersom mer information uppkommer, vilket kan göra att viktningen ändras med tiden.

4.3.1 Utvärderingskriterier

Utifrån de projektspecifika målen inom respektive specialistområde togs totalt 11 olika utvärderingsaspekter fram. Observera att inga utav de ställda kraven för projektet kommer utvärderas då detta är något som samtliga koncept måste uppfylla. De olika kriterierna i respektive delområde förklaras nedan.

Projektering

- Miljöpåverkan: Miljöpåverkan ur ett livscykelperspektiv för uppförandet av konstruktionen samt under hela den tekniska livslängden.

- Teknisk komplexitet: Hur komplex konstruktionen blir, hur tidskrävande samt hur avancerade beräkningar som krävs för att projektera/konstruera bron.
- Gestaltning: Konstruktionens plats i det befintliga landskapet och medverkan till god trygghetskänsla samt skapandet av en estetisk tilltalande utformning.
- Utformning: Konstruktionens funktion som inkluderar trafiksäkerhet, tillgänglighet, beständighet, möjlighet till anpassning med mera.
- Ekonomi: Uppskattade kostnader under projektering, produktion samt förvaltning/underhåll.

Produktion

- Metod: Värdering av produktionsmetod med avseende på enkelt utförande och god kvalitet.
- Byggtid: Uppförandetid för det valda konceptet.
- Arbetsmiljö och säkerhet: Beaktar arbetsmiljön och möjligheten att bygga på ett säkert sätt.

Förvaltning

- Inspekterbarhet: Möjligheterna till kontroll utan att göra stora trafikstörande åtgärder.
- Underhåll: Om konstruktionen kräver omfattande underhåll vilket påverkar dess funktion och omkringliggande förbindelser.

Risikanaly

- Risker: Eventuella risker som kan uppkomma under projektets gång, sett över samtliga utvärderingskriterier och faser.

För risikanalysen sammanställdes först vilka risker som kan uppstå under ett projekt. Dessa involverar exempelvis produktionsrelaterade risker så som kostsamma förseningar under byggtiden till följd av sena leveranser eller tidskrävande byggnation. I förvaltningsskedet kan risker innebära underhållskrävande material och konstruktioner. Slutligen utvärderades för var och en av broarna hur sannolika riskerna var baserat på informationen presenterad i de olika underrubrikerna för respektive koncept.

4.3.2 Viktningsmatris

I viktningsmatrisen jämförs de olika kriterierna med varandra för att få fram en viktningsprocent, se tabell 2. De horisontella kriterierna ges ett poängvärde mellan 1–3 i förhållande till det vertikala kriteriet. Poäng 1 innebär att kriteriet är mindre värt än det vertikala kriteriet, 2 att kriterierna är lika viktiga och 3 innebär att kriteriet är mer värt. Varje kriteriums poäng summeras och utifrån detta tas två procentfaktorer fram som tar hänsyn till kriteriernas storlek i delområdet samt delområdets storlek i helheten. Slutligen multipliceras de två faktorerna med varandra för att få en slutgiltig viktningsprocent.

Tabell 2: Viktningsmatrix där utvärdering av kriterier samt slutliga viktningprocent framkommer.

Område	Utvärderingskriterier	Utvärderingskriterie vs Utvärderingskriterie											Poäng	Rankning	α	β	Viktning
		1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)	8)	9)	10)	11)	$\Sigma(1-11)$				
Projektering	1) Miljöpåverkan			3	2	3	3	2	1	3	2	2	24	3	25,3%		10,9%
	2) Teknisk komplexitet	1			1	1	2	2	1	1	1	1	12	11	12,6%		5,5%
	3) Gestaltning	1	3			1	1	2	2	1	1	1	14	9	14,7%		6,4%
	4) Utformning	2	3	3			2	3	3	2	3	2	25	2	26,3%		11,4%
	5) Ekonomi	1	2	3	2			3	2	1	2	2	20	7	21,1%	43%	9,1%
Produktion	6) Metod	1	2	2	1			1	1	2	1	13	10	21,3%		5,9%	
	7) Byggtid	2	3	2	1			2	3	1	3	22	6	34,4%		9,5%	
	8) Arbetsmiljö och säkerhet	3	3	3	2			3	3	3	2	27	1	44,3%	28%	12,3%	
Förvaltning	9) Inspekterbarhet	1	3	3	1			2	2	1	1	17	8	42,5%		7,7%	
	10) Underhåll	2	3	3	2			2	3	2	2	23	5	57,5%	18%	10,5%	
Risikanalys	11) Risker	2	3	3	2			2	3	2	2	24	4	100,0%	11%	10,9%	
												Summa:	220			100%	100%

4.3.3 Urvalsmatrix

Det slutliga urvalet görs i en urvalsmatrix, se tabell 3. I denna poängsätts alla fyra koncept för varje viktningsskriterium utifrån en skala på 0 till 4. Det poäng som ett koncept får på ett kriterium multipliceras med kriteriets viktningprocent och alla dessa viktade poäng summeras ihop för varje koncept. På så sätt fås ett viktat genomsnitt för var och ett av broalternativen som därefter kan jämföras mot varandra. Högst viktat genomsnitt motsvarar det brokoncept som matchar de definierade kriterierna bäst och väljs lämpligen som slutligt koncept. I urvalsmatrisen framkommer det att trågbalkbron i stål har fått högst viktat genomsnitt och därför rankas som nummer ett, se tabell 3. Intuitionen innan utvärderingsmatrisen var att brokoncept med trågbalkbro är mest lämplig för förutsättningarna. Eftersom denna bekräftas genom urvalsmatrisen och för att det inte förekommer anledning till att välja något annat än det högst rankade konceptet väljs trågbalkbro i stål som slutligt koncept för fortsatt dimensionering.

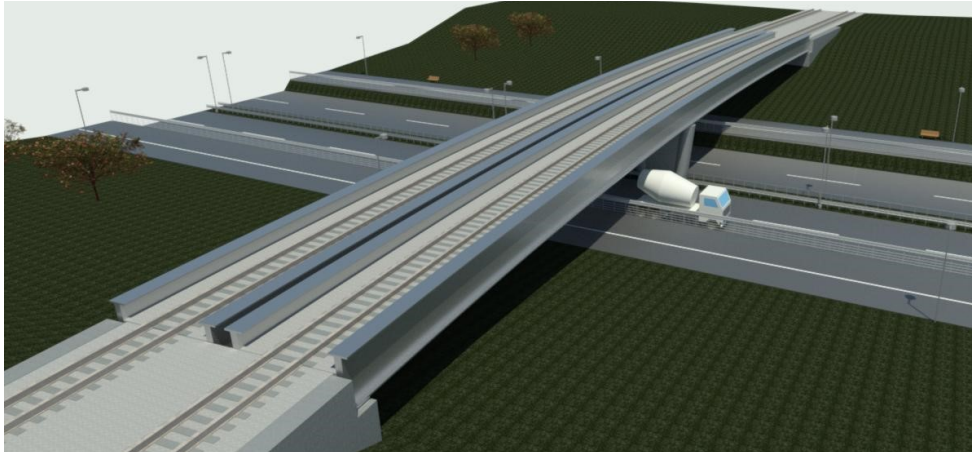
Tabell 3: Urvalsmatrix. Poängen representerar följande: 0 – otillfredsställande, 1 – acceptabelt med tvekan, 2 – tillräckligt bra, 3 – bra, 4 – mycket bra.

	Utvärderingskriterier	1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)	8)	9)	10)	11)	Viktat genomsnitt	Rankordning
		Miljöpåverkan	Teknisk komplexitet	Gestaltning	Utformning	Ekonomi	Metod	Byggtid	Arbetsmiljö och säkerhet	Inspekterbarhet	Underhåll	Risikanalys		
	Viktfaktor	10,9%	5,5%	6,4%	11,4%	9,1%	5,9%	9,5%	12,3%	7,7%	10,5%	10,9%		
Alternativ	Fackverksbro	2	4	3	2	1	3	3	3	2	1	1	2,15	4
	Bågbro	2	3	4	3	1	2	2	2	3	2	1	2,17	3
	Trågbalksbro i stål	2	2	2	2	3	4	3	3	2	3	3	2,64	1
	Trågbalksbro i betong	3	2	1	2	4	2	2	2	4	4	2	2,59	2

Poängen för en bro på varje utvärderingskriterium grundar sig i det tidigare framtagna underlaget för urval och presentationen av respektive koncept. Miljöpåverkan och ekonomi utgår från överslagsberäkningar för materialåtgången. Teknisk komplexitet värderas efter hur omfattande beräkningar och komplicerade modeller som förmodas behöva utföras. Gestaltning bedöms efter vad som antas uppfattas som tillfredsställande av allmänheten medan poängen på utformning utgår från det mer ingenjör- och funktionsmässiga avseendet. I utvärdering av metod, byggtid samt arbetsmiljö och säkerhet vägs exempelvis behov av tillfälliga konstruktioner, arbete på plats, kvalitets-säkring, tunga lyft med mera in. Poängen för inspekterbarhet samt underhåll sätts bland annat med avseende på tillgänglighet för kritiska detaljer och inspektionsarbete respektive hur ofta och hur omfattande underhållsarbete kan antas behöva utföras. Riskanalysen finns beskriven ingående under avsnitt 4.3.1 Utvärderingskriterier.

5 Valt brokoncept

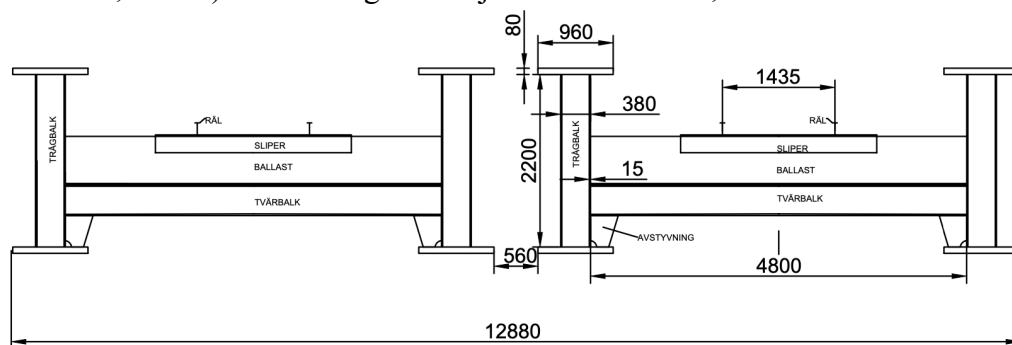
Det valda brokonceptet, trågbalkbro i stål, medför att två parallella enkelspåriga broar kommer uppföras, se figur 6 för illustration av järnvägsbron. I följande kapitel beskrivs över- och underbyggnaden för detta koncept mer ingående.



Figur 6: Illustration av valt brokoncept.

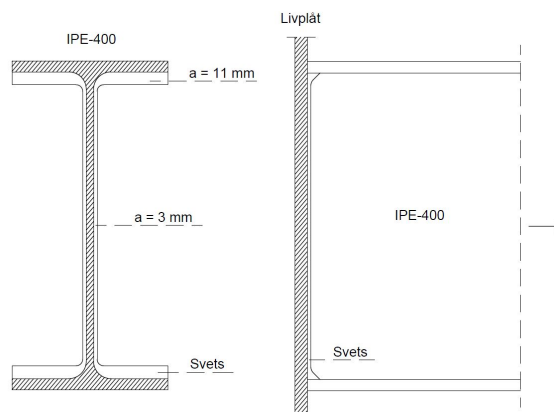
5.1 Överbyggnad

Överbyggnaden består av trågbalkar, tvärbalkar, brobaneplatta och ballast, se figur 7 för sektion. Trågbalkarna är utformade med ett lådtvärsnitt och tvärbalkarna är standardprofiler IPE400, som placeras med ett centrumavstånd på 0,65 meter. För att motverka att trågbalkarna böjer in mot spåren när tvärbalkarna belastas av en axiell last behövs avstyvningar. Dessa placeras där tvärbalkarna möter de längsgående trågbalkarna. Insidan måste vara slät mot ballasten och därför placeras avstyvningarna under tvärbalkarna (Trafikverket, 2018b). För att undvika vattensamling vid avstyvningarna konstrueras dessa med dräneringshål. Ballastens funktion är att dämpa ljudutstrålning och vibrationer från passerande tåg, därtill så underlättar det spårjustering (Trafikverket, 2018b). Erforderlig ballasttjocklek är minst 0,6 meter.



Figur 7: Tvärsnitt av överbyggnaden med mått i [mm] och förklarande text.

Lådtvärsnitten tillverkas genom att stålplåtar sammanfogas med längsgående stumsvetsar mellan flänsar och liv. Detta görs i fabrik och stumsvetsen resulterar i en fog som är starkare än det ursprungliga materialet (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2011). Beräkningar behöver därför ej göras i en preliminär dimensionering. En annan kritisk svets är den som fäster tvärbalken i trågbalken. Dessa utförs som kälsvetsar eftersom den svetstypen är enklare och billigare än stumsvetsar att utföra på byggsplatsen. Dimensioner och utformning görs enligt figur 8.

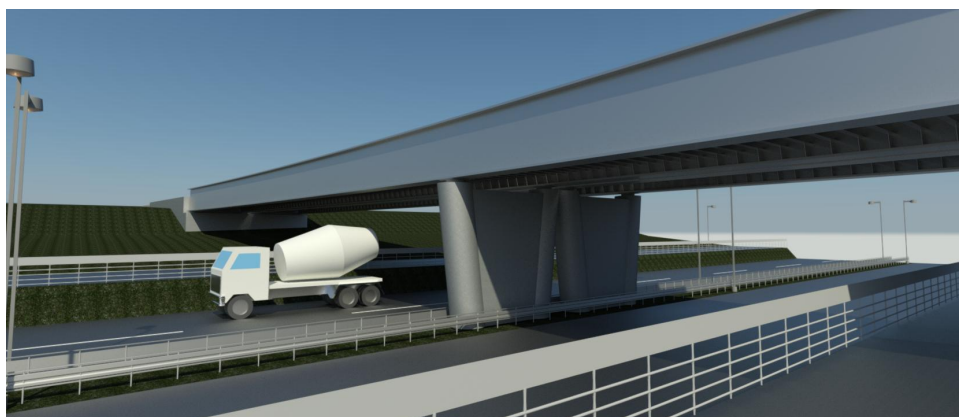


Figur 8: Tvärbalk med svets och a-mått.

Överbyggnadens tvärsnittsdimensioner och svetsarnas mått är definierade utifrån beräkningar utförda i kapitel 6. *Dimensioneringsförutsättningar* och kapitel 7. *Preliminär dimensionering av bron*. De geometriska kraven som begränsar konstruktionen är krav på fritt utrymme vid en höjd på $\geq 0,810$ meter över RÖK, se bilaga E för illustration av uppfyllda krav. Dessutom är brobredden begränsad då avståndet mellan spåren måste vara 6,7 meter och inspektionsutrymme mellan spåren måste tillgodoses.

5.2 Underbyggnad

Underbyggnaden består huvudsakligen av stöden, se figur 9. Mittstödet kommer gjutas i armerad betong och kan konstrueras antingen som cirkulära pelare eller som sammangjutna skivor. Under järnvägsbron planeras att upprätta spårvagnstrafik i framtiden och stöden måste dimensioneras för eventuell påkörning. Skivstöd är därmed ett mer lämpligt alternativ, eftersom det kan uppföras med ett största tvärsnittsmått placerat parallellt med spåret om minst 3 meter, vilket är dimensioneringskrav vid påkörning av järnvägstrafik (Trafikverket, 2016). Däremot ger dessa stöd ett mindre öppet helhetsintryck. Ändstöden utformas som fristående landfäste. Dessa skall klara av att bära ned lasterna från överbyggnaden samt klara de horisontella lasterna från jordtryck (Trafikverket, 2018b). Lasterna från överbyggnaden överförs genom lager på lagerpallen vidare ned till underliggande mark.



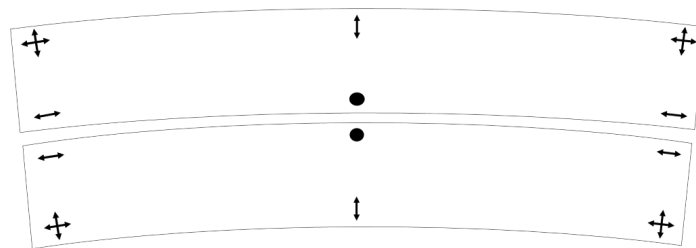
Figur 9: Visualisering av preliminära mittstöd.

5.2.1 Lager och övergångskonstruktioner

Det som kopplar samman de bärande trågbalkarna med stöden är lagren, vilket förklaras i avsnitt 3.4 *Förvaltning och underhåll*. För att inte bygga in några oönskade

spänningar i konstruktionen, vilket skulle ställa större krav på stöd och grundläggning, sätts enbart ett fast lager ut, medan resterande görs rörliga i antingen en eller flera leder.

Eftersom fasta lager generellt kräver mindre underhåll, samt för att få en symmetrisk längdutvidgning, sätts det fasta lagret i mitten, i tvärhöjd med ett ensidigt rörligt lager för att kunna ta upp eventuella rörelser vinkelrät längsriktningen, se figur 10. För att de båda broarna inte skall utvidgas mot varandra, placeras det fasta lagret i det inre upplaget för båda broarna. En symmetrisk längdutvidgning är bra då rörelserna i lagerna vid ändupplag blir mindre än om all utvidgning skulle ske åt samma håll. En nackdel är att övergångskonstruktioner behöver uppföras i båda ändar av konstruktionen. Vid upplagen kan de bärande trågbalkarna behöva breddas för att hela lagret skall hamna i kontakt med konstruktionen, detta görs i sådana fall vanligtvis genom att bredda utsidan av balken (Trafikverket, 2018b).



Figur 10: Lagerutformning sett ovanifrån. • Fast lager, ↔ Rörligt lager i ett led, + Rörligt lager i flera led.

För järnvägsbroar gäller att om bron rörelser inte överstiger 80 mm kan övergångarna konstrueras med genomgående ballast och rörelserna tas upp genom en omstrukturering av ballasten, med låg inverkan på spåret (Trafikverket, 2018b). Enligt beräkning i bilaga F förväntas brorrörelsen inte överstiga denna gräns.

5.3 Produktionsplan

Produktionen av bron delas upp i de fyra faserna förarbete, grundläggning, byggfas och efterarbete.

5.3.1 Förarbete

Förarbetet handlar till stor del om att skapa goda förutsättningar för att logistiken ska fungera väl under fortsatta byggskeden. Transportermöjligheter in och ut från arbetsplatsen säkras genom att både Lillhagsvägen och Backavägen ligger nära intill byggarbetsplatsen och kan därför utnyttjas för detta ändamål. Den del av Backavägen som bron kommer att gå över ska stängas av så att arbetet kan utföras och trafiken där kommer ledas om. Vidare ska arbetsbodar samt upplagsytor för material och maskiner inrättas i anslutning till byggplatsen för att säkerställa logistiken. Förarbetet innebär också en del förberedande markarbete såsom schaktning av jordmassor och spontning.

5.3.2 Grundläggning

Grundläggningen görs enligt avsnitt 3.3 *Grundläggningsmetoder* med spetsbärande pålar. Pålningen kommer ske i tre huvudsakliga områden, där stöden kommer vara. Om det under pålningens gång skulle upptäckas att omkringliggande mark påverkas påtagligt, till exempel intilliggande befintligt järnvägsspår, kan åtgärder tas i form av att schakta ut hålen medan pålarna slås. Som en del av grundläggningen gjuts sedan grundplattor ihop med pålarna.

5.3.3 Bygghfas

Som första steg i bygghfasen gjuts mittstöd samt ändstöd på grundplattorna. Därefter installeras övergångskonstruktioner och lager, följt av montage av stödställningar för balkarna att vila på vid svetsarbetet. Trågbalkar lyfts upp på stödställningarna och svetsas ihop vid skarvar. En huvudbalk skulle vara möjlig att transportera som fyra element, men längderna blir då sådana att skarvar måste utföras kring maxmomentnsnitten. Om en huvudbalk tillverkas i fem element kan detta undvikas för stödmomentet. Skarvningen utförs med stumsvetsar där hela tvärsnittsjockleken sammanfogas med svetsen, enligt rådande krav för bärverkselement (Trafikverket, 2016). I nästa steg lyfts tvärbalkarna på plats och svetsas ihop med trågbalkarna enligt figur 8. I samband med monteringen svetsas även de underliggande avstyvningarna fast i tvärbalk och tråg. Därefter kan brobaneplattan läggas på plats och svetsas längs anslutningen till trågbalkarna. Skarvarna i brobaneplattan utförs som stumsvetsar och placeras över tvärbalkarnas flänsar, där momentet är lägst. Till sist målas bron där svetsar och andra exponerade stålytor finns men merparten av broelementen levereras ytbehandlade och färdigmålade till byggplatsen.

5.3.4 Efterarbete

Efter att bron har färdigställts ska de sista komponenterna installeras. Det handlar om dräneringssystem, kontaktledning, ballast, räls, räckan och belysning. Som ett sista steg ska därefter bodar, maskiner och material tas bort och platsen återställas.

5.4 Förvaltningsplan

Efter färdigställningen av bron påbörjas förvaltningsskedet, som är den längsta perioden i brons livslängd (Trafikverket, 2015b). Under förvaltningen skall regelbundna inspektioner och vid behov underhåll utföras. Trafikverket har delat upp inspektionstyperna i fyra grupper, översiktlig, allmän, huvud- och särskild inspektion. Huvudinspektion skall utföras minst var sjätte år för att granska samtliga konstruktionselement med avsikt att finna och utvärdera de brister som kan komma att påverka brons funktion inom de kommande tio åren. Särskild eller allmän inspektion kan utföras som komplettering för huvudinspektionen för att göra en noggrannare kontroll av en specifik konstruktionsdel, exempelvis svetsförband, respektive för att följa upp eventuella skador tidigare än nästa huvudinspektion. Den översiktliga inspektionen görs årligen av upphandlad underhållsentreprenör.

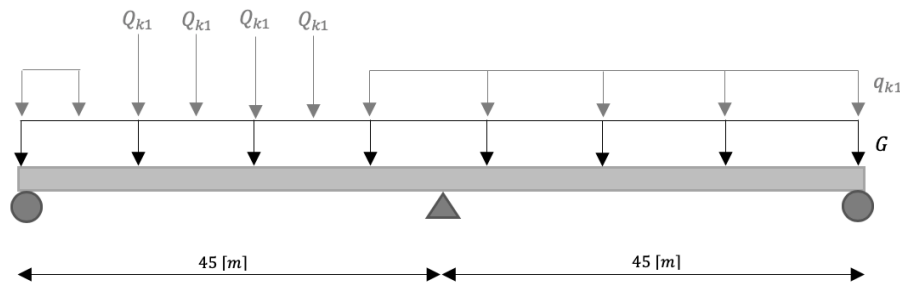
En översiktlig beskrivning av ståltrågbrons förvaltningsmässiga förutsättningar presenteras i avsnitt 4.2.4 *Trågbalkbro i stål* samt generellt för broar i avsnitt 3.4 *Förvaltning och underhåll*. En viktig del av förvaltningen är utmattningskontroll, eftersom stål är känsligt för detta fenomen. Enligt Svensk standard ska utmattningsverifiering för valt brokoncept göras bland annat i brobaneplåten, de längsgående avstyvningarna samt tvärbalkarna (Swedish Standards Institute, 2017). Eftersom utmattningsberäkningar är något som tillhör masterstudierna kommer detta endast behandlas översiktligt i beräkningsdelen. Det är dock av yttersta vikt att ha med i åtanke under förvaltningsskedet då just järnvägsbroar utsätts för stora lastvariationer, vilket är en huvudsaklig orsak till utmattning.

6 Dimensioneringsförutsättningar

Den preliminära dimensioneringen av överbyggnaden, vilken inkluderar trågbalkarna, tvärbalkarna och brobanepattan, utgår från de dimensionerande förutsättningarna; moment, tvärkraft och nedböjning. Dessa bestäms genom att ställa upp en beräkningsmodell för varje del av överbyggnaden. Beräkningsmodellerna analyseras sedan numeriskt i Matlab med hjälp av CALFEM-manualen (Lunds universitet, u.å.). En preliminär dimensionering av överbyggnaden görs för de vertikala lasterna, då dessa ger upphov till större påkänningar än de horisontella lasterna som försummas i detta tidiga skede. I beräkningarna bortses effekterna av brobanans krökning då detta anses tillhöra den noggranna utformning som följer preliminärdimensioneringen.

6.1 Beräkningsmodell för trågbalkar

En global beräkningsmodell i längdled ställs upp för att dimensionera den mest belastade trågbalken, se figur 11. Lasterna delas upp i permanenta och variabla laster, där de variabla punktlaster kan förflyttas längsmed bron för att bestämma de dimensionerande lastfallen.



Figur 11. Illustration av beräkningsmodellen för en trågbalk. Notera att modellen inte är skalenlig.

6.1.1 Dimensionerande laster

Den permanenta lasten som verkar på en trågbalk är halva överbyggnadens egenvikt, vilket inkluderar tyngd från trågbalk, tvärbalkar, brobanan, ballast och räls, se bilaga G. Denna last är en jämnt utbredd last i vertikalled. Den variabla lasten innefattar trafiklast, sidokraft, vindlast, temperaturlast, centrifugalkraft, accelerations- och bromskraft. Utav dessa är trafiklasten den enda vertikala lasten i längdled och beräknas antingen genom lastmodell 71 eller SW/0 (Swedish Standards Institute, 2003). I en preliminär dimensionering är LM71 den dimensionerande lastmodellen (personlig kommunikation, J. Leppänen, 5 maj 2020). Tågloket modelleras som fyra punktlaster och tågagnarna som en jämnt utbredd last verkande med obegränsad utvidgning åt båda hållen, sett från punktlaster. Trafiklasten multipliceras med korrektionsfaktorn α satt till 1,33 för vanlig tågtrafik, samt med en dynamikfaktor som tar hänsyn till dynamiska effekter och beräknas till 1,04, se bilaga G (Swedish Standards Institute, 2003). Dessutom måste beräkningsmodellen ta hänsyn till en viss excentricitet på rälsen, vilket innebär en ojämn lastfördelning mellan de två trågbalkarna. Denna excentricitetsfaktor beror på spårvidden och avståndet mellan trågbalkarna.

De permanenta och variabla lasterna kombineras i olika lastfall för att hitta det dimensionerande fallet, se bilaga G och tabell 4. I brottgränstillstånd är den dimensionerande lastkombineringen då den variabla lasten är huvudlasten enligt lastkombination 6.10 b). I bruksgränstillstånd är den frekventa lastkombinationen dimensionerande för nedböjning (Trafikverket, 2016).

Tabell 4: Lastkombinering i brottgränstillstånd för en trågbalk (Trafikverket, 2011). Lastkombinering i bruksgränstillstånd (Swedish Standards Institute, 2010).

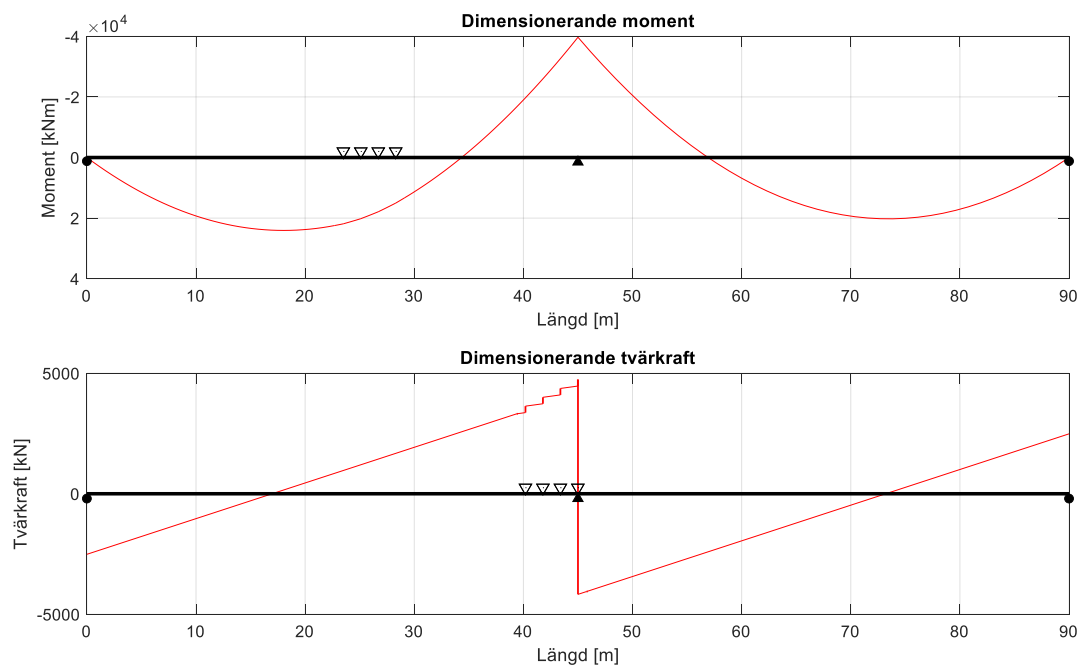
	Permanent last	Variabel last	ψ_0	ψ_1	G [kN/m]	Q_{k1} [kN]	q_{k1} [kN/m]
Brottgräns 6.10 a)	1,35	1,5	0,8	-	69	215	69
Brottgräns 6.10 b)	1,2	1,5	-	-	62	268	86
Frekvent kombination	1,0	1,0	-	0,8	51	143	46

6.1.2 Dimensionerande moment och tvärkraft

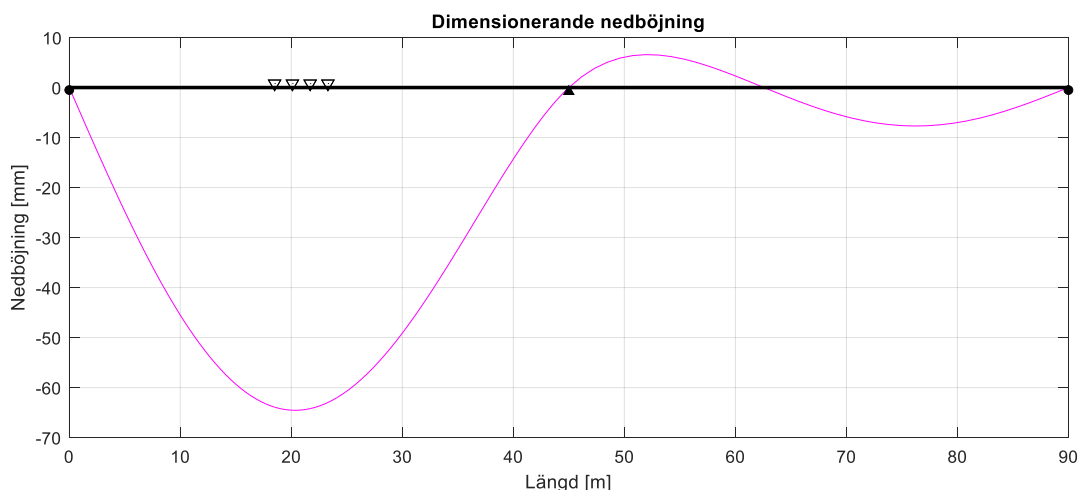
Dimensionerande moment och tvärkraft beräknas för den dimensionerande lastkombineringen i brottgränstillstånd. Det dimensionerande momentet uppkommer då loket är placerat i fält och tågagnarna är utbredda över båda spannen, se figur 12. Den lastposition som ger dimensionerande tvärkraft är då loket placeras precis bredvid mittstödet och tågagnarna är i båda spannen, se figur 12. Den största nedböjningen beräknas i bruksgräns och uppkommer då loket befinner sig i fält, och tågagnarna enbart sträcker sig i samma spann, se figur 13. I bilaga H finns beräkning av dimensionerande moment, tvärkraft samt nedböjning, vilka redovisas i tabell 5.

Tabell 5: Dimensionerande moment och tvärkraft samt störst nedböjning för en trågbalk.

Dimensionerande moment [kNm]	Dimensionerande tvärkraft [kN]	Nedböjning [mm]
39 710	4740	65



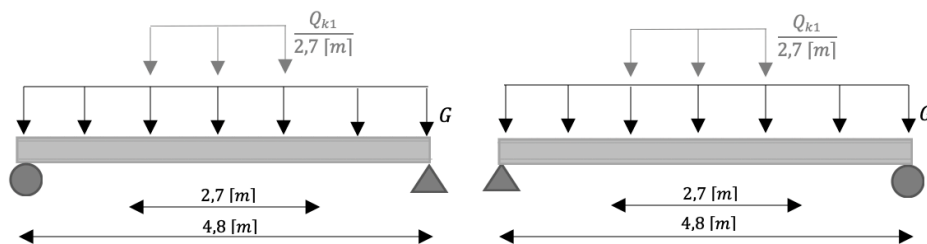
Figur 12: Moment och tvärkraftskurva för dess respektive dimensionerande lastfall för trågbalkarna. "•" och "▲" Brostöd. "▽" punktlasternas placering. Utbredda tåglasten över båda brospannen.



Figur 13: Nedböjning av trågbalk för dimensionerande lastfall. "•" och "▲" Brostöd. "∇" Punktlasternas placering. Utbredda tåglasten över samma spann som punktlasterna verkar i.

6.2 Beräkningsmodell för tvärbalkar

Tvärbalkarna dimensioneras utifrån en beräkningsmodell i tvärled, se figur 14. Denna modell innefattar permanenta samt variabla laster. Vid beräkning av dimensionerande moment och nedböjning modelleras balken som fritt upplagd eftersom det är det mest kritiska fallet. I verkligheten är balken ett mellanting mellan fast inspänd och fritt upplagd.



Figur 14. Illustration av beräkningsmodellen för en tvärbalk. Notera att modellen inte är skalenlig.

6.2.1 Dimensionerande laster

De dimensionerande lasterna som verkar på en tvärbalk beror på lastspridningen från slipers genom ballasten, se bilaga I (Swedish Standards Institute, 2003). Avståndet mellan tvärbalkarna är 0,65 meter baserat på denna lastspridning och egenvikten som verkar inom detta avstånd är den permanenta lasten. Den variabla lasten i vertikalled är trafiklasten, där en av punktlasterna enligt LM71 är dimensionerande. Denna punktlast kan antas fördelas till hälften på underliggande sliper, med andra hälften jämnt fördelad på intilliggande slipers (Swedish Standards Institute, 2003). Det innebär att varje tvärbalk dimensioneras efter att bära upp hälften av punktlasten enligt LM 71. Lastspridning medför att denna punktlast verkar som en jämnt utbredd last på 2,7 meter av tvärbalken. Trafiklasten multipliceras med korrektionsfaktorn α satt till 1,33 och dynamikfaktorn beräknad till 1,04, se bilaga G. De permanenta och variabla lasterna kombineras i olika lastfall där det dimensionerande fallet i brottgränstillstånd är då den variabla lasten är huvudlasten, se tabell 6. I bruksgränstillstånd användes den frekventa lastkombinationen för att kontrollera nedböjningskrav (Trafikverket, 2016).

Tabell 6: Lastkombinering i brottgränstillstånd för en tvärbalk (Trafikverket, 2011). Lastkombinering i bruksgränstillstånd (Swedish Standards Institute, 2010).

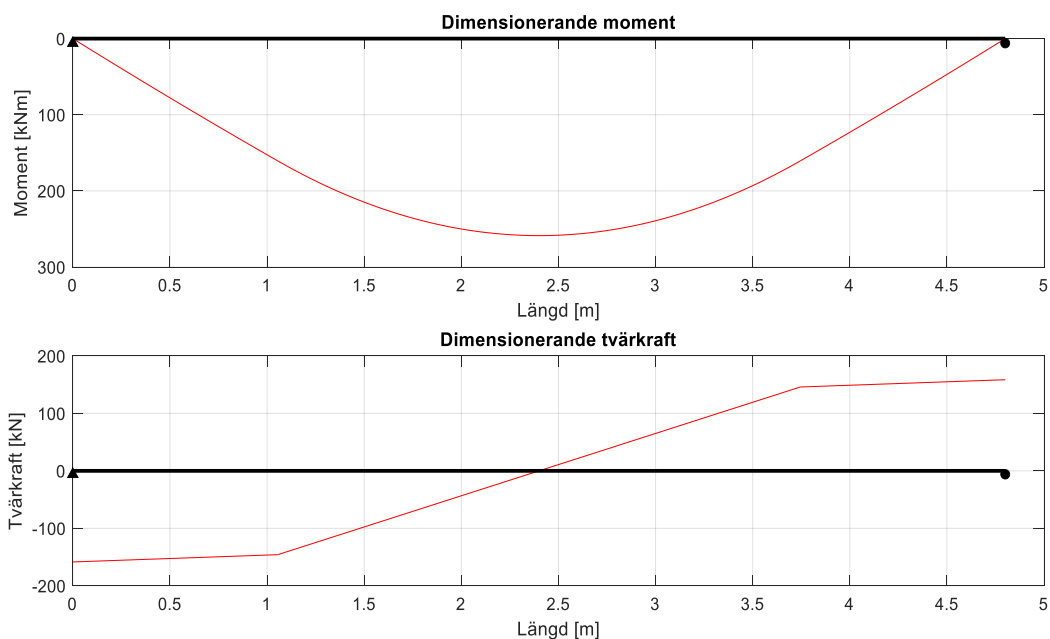
	Permanent last	Variabel last	ψ_0	ψ_1	G [kN/m]	Q_{k1} [kN]
Brottgräns 6.10 a)	1,35	1,5	0,8	-	13	415
Brottgräns 6.10 b)	1,2	1,5	-	-	12	519
Frekvent kombination	1,0	1,0	-	0,8	10	277

6.2.2 Dimensionerande moment och tvärkraft

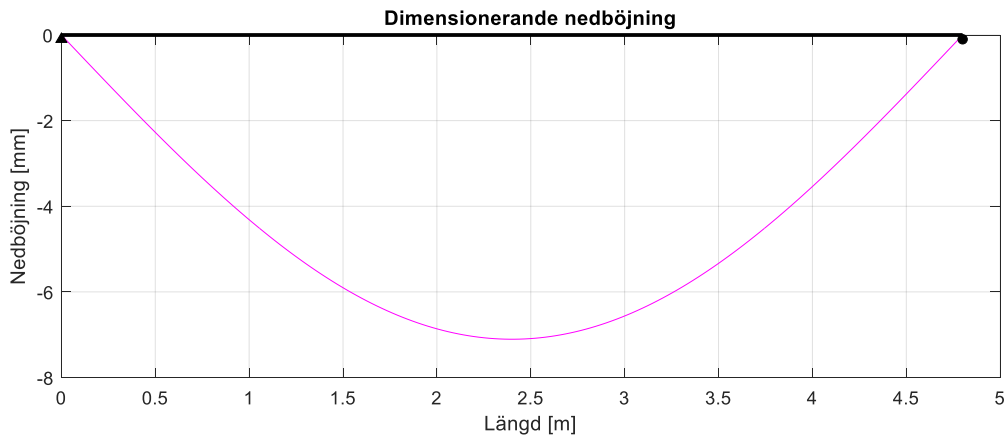
För dimensionerande lastfall hos tvärbalkar försummas den marginellt osymmetriska lastfördelningen till följd av den lastexcentricitet som behandlades för trågbalkarna. I bilaga J redovisas beräkningen av dimensionerande moment och tvärkraft samt största möjliga nedböjning för en tvärbalk, se tabell 7 samt figur 15 och 16.

Tabell 7: Dimensionerande moment och tvärkraft samt störst nedböjning för en tvärbalk.

Dimensionerande moment [kNm]	Dimensionerande tvärkraft [kN]	Nedböjning [mm]
259	159	7



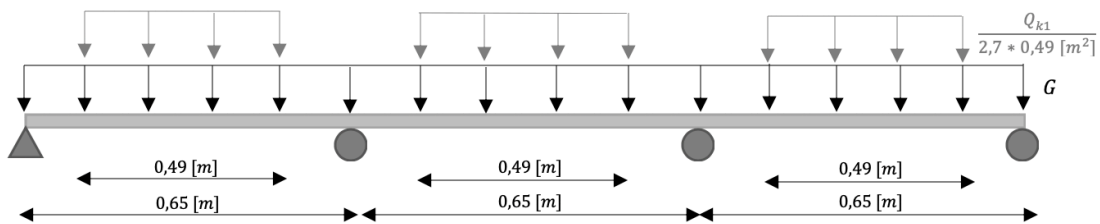
Figur 15: Moment och tvärkraftskurva för dess respektive dimensionerande lastfall för tvärbalkarna. "•" och "▲" Brostöd.



Figur 16: Nedböjning av tvärbalk för dimensionerande lastfall. "•" och "▲" Brostöd.

6.3 Beräkningsmodell för brobaneplattan

En brobaneplatta har ett tredimensionellt verkningssätt, men i denna preliminära dimensionering approximeras plattans dimensioner genom en balkmodell i längdled. I beräkningsmodellen är brobaneplattan en meter bred och fritt upplagd mellan tvärbalkarnas liv enligt figur 17. Detta förutsätter att tvärbalkarnas flänsar är veika och inte bidrar till att bära upp lasten, vilket är ett konservativt antagande för att inte överskatta flänsarnas styvhet och göra plattan för tunn. Som för trågbalken kan de variabla lasterna förflyttas längs balken för att hitta de dimensionerande fallen.



Figur 17. Illustration av beräkningsmodellen för brobaneplattan. Notera att modellen inte är skalenlig.

6.3.1 Dimensionerande laster

Den permanenta lasten är egentygden från brobaneplattan, ballast och räls, se bilaga G. Den variabla dimensionerande lasten är punktlasten enligt LM71, vilken multipliceras med korrektionsfaktorn och dynamikfaktorn likt beräkningsmodellerna för tråg- och tvärbalkarna. Lasten sprids rektangulärt genom ballasten och verkar på en yta av brobaneplattan som är 2,7 meter i tvärlängd och 0,49 meter i längdled, se bilaga I för illustration av lastspredning. De permanenta och variabla lasterna kombineras i olika lastfall där det dimensionerande fallet i brottgränstillstånd är då den variabla lasten är huvudlast, se tabell 8. I bruksgränstillstånd används den frekventa lastkombinationen för att kontrollera nedböjningskrav (Trafikverket, 2016).

Tabell 8: Lastkombinering i brottgränstillstånd för brobaneplattan (Trafikverket, 2011). Lastkombinering i bruksgränstillstånd (Swedish Standards Institute, 2010).

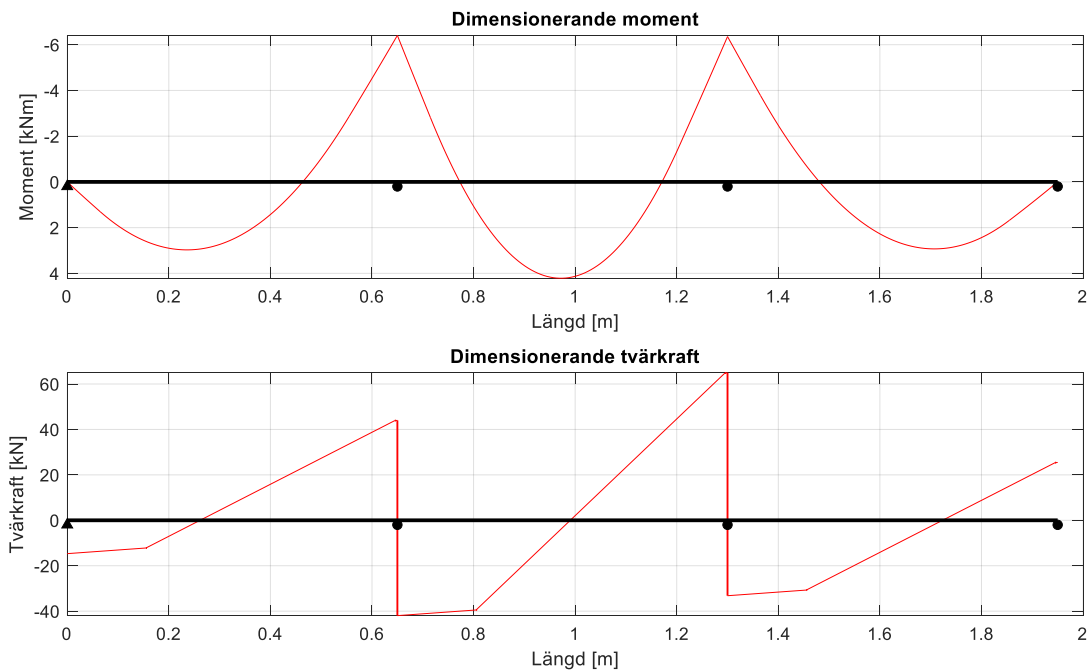
	Permanent last	Variabel last	ψ_0	ψ_1	G [kN/m]	Q_{k1} [kN]
Brottgräns 6.10 a)	1,35	1,5	0,8	-	87	415
Brottgräns 6.10 b)	1,2	1,5	-	-	77	519
Frekvent kombination	1,0	1,0	-	0,8	64	277

6.3.2 Dimensionerande moment och tvärkraft

Eftersom det vid dimensionering av brobaneplattan är omöjligt att veta slipersplaceringen i längdled för den färdiga bron beräknas respektive värsta fall. För momentet och nedböjningen är det om punktlasterna sprids mitt emellan tvärbalkarna och för tvärkraften om lasten sprids precis bredvid tvärbalkslivet. Dimensionerande moment och tvärkraft samt nedböjning beräknas i bilaga K samt redovisas i tabell 9 och figur 18.

Tabell 9: Dimensionerande moment och tvärkraft samt störst nedböjning för brobaneplattan

Dimensionerande moment [kNm]	Dimensionerande tvärkraft [kN]	Nedböjning [mm]
6	65	≈0



Figur 18: Moment och tvärkraftskurva för dess respektive dimensionerande lastfall för brobaneplatta. "•" och "▲" Brostöd.

6.4 Beräkningsmodell för svetsar

Kälsvetsarna som fäster tvärbalkarna i huvudbalkarnas inre liv utförs längs tvärbalkarnas liv och insidan av flänsarna. I beräkningsmodellen antas tvärbalkarna vara fast inspända för att räkna på största möjliga ändmomentet, till skillnad från vid dimensioneringen av tvärbalkarna då den modellerades som fritt upplagd. Tvärkraften antas bäras fullt ut av livsvetsarna och spänningarna från momentet antas bäras av flänssvetsarna.

7 Preliminär dimensionering av bron

Processen för att ta fram dimensionerna av järnvägsbron är iterativ och de dimensionerande lasterna påverkas av de ändringar som görs av tvärsnitten för att kapaciteten ska kunna uppnås. I detta kapitel redogörs för projektets slutliga kapaciteter och utnyttjandegrader för den mest belastade trågbalken och tvärbalken samt för brobanepattan. Även svetsarnas kapaciteter redovisas. Resultaten av dimensioneringen, överbyggnadens slutliga dimensioner och svetsarnas a-mått, hittas i avsnitt 5.1 *Överbyggnad*.

Det strängaste nedböjningskravet för vertikal deformation är spännvidden dividerat med 600 (Swedish Standards Institute, 2010). Detta medför att järnvägsbron får ha en maximal nedböjning på 75 mm. Trågbalken har en nedböjning på 65 mm, tvärbalken på 7 mm och brobanepattan en försumbar nedböjning. Detta medför att nedböjningskravet uppfylls för överbyggnaden.

7.1 Dimensionering av trågbalkar

Trågbalken har ett specifikt tvärsnitt som inte är standardiserat, varvid vissa antaganden utförts vid beräkning av dess kapacitet. Balken tillverkas i konstruktionsstål med hållfasthet S355, där karakteristiska flythållfastheten reduceras till 335 MPa för godstjocklek mellan 40 och 80 mm (Al-Emrani et al., 2013). Momentet antas främst bäras upp av flänsarna, vilka har reducerad hållfasthet på grund av stor godstjocklek. All tvärkraft antas bäras av liven. Stålkonstruktioner påverkas av utmattning och vid den preliminära dimensioneringen är enbart trågbalkens elastiska momentkapacitet beräknad, vilket är ett konservativt antagande. Eftersom nedböjningen är det utformningsmässiga mest kritiska kravet, har trågtvärsnittet utformats för att ha så högt yttröghetsmoment som möjligt i förhållande till den totala tvärsnittsarean. Detta har medfört en maximering av livhöjden, flänsbredden och flänstjockleken. Livhöjden och flänsbredden är begränsad med avseende till kraven på fritt utrymme runt spår och över underliggande körfält medan flänstjockleken inte kan ökas mer utan att kraftigt försvåra tillverkningsprocessen

Tabell 10: Kapacitet och utnyttjandegrad med avseende på moment och tvärkraft för en trågbalk.

	Moment	Tvärkraft
Kapacitet	67 580 kNm	10 770 kN
Utnyttjandegrad	59 %	44 %

Eftersom momentkapaciteten är direkt kopplad till yttröghetsmomentet innebär det att trågbalken får en hög kapacitet och förhållandevis låg utnyttjandegrad, se tabell 11, och för beräkningar se bilaga M. För tvärkraften bidrar de dubbla liven till en låg utnyttjandegrad. Utnyttjandegraden är under 50 % för tvärkraftskapaciteten och därmed behövs inte interaktion mellan moment och tvärkraft kontrolleras (Al-Emrani et al., 2013).

7.2 Dimensionering av tvärbalkar

Tvärbalkarna är IPE400, vilket är balkar med standardiserade tvärsnitt. Tvärsnittet är fördelaktigt då den höga livhöjden ger ett högt yttröghetsmoment i förhållande till dess tvärsnittsarea. Eftersom nedböjningen är det mest kritiska kravet är yttröghetsmomentet av stor vikt. Dessutom behövs mindre kostsamt svetsarbete utföras då

standardiserade tvärsnitt används. Balken tillverkas med samma stålsort S355 som trågbalkarna, men denna balk har godstjocklekar <40 mm och en karakteristisk flythållfasthet på 355 MPa för hela balken. Antagande om enbart elastisk momentkapacitet används även för tvärbalkarna, eftersom utmattning inte beräknas inom denna preliminära dimensionering. Likt trågbalken behöver inte heller tvärbalken kontrolleras med avseende på interaktion mellan moment och tvärkraft, se tabell 12 för kapaciteter och utnyttjandegrad samt bilaga M för beräkning.

Tabell 11: Kapacitet och utnyttjandegrad med avseende på moment och tvärkraft för en tvärbalk.

	Moment	Tvärkraft
Kapacitet	412 kNm	700 kN
Utnyttjandegrad	63 %	23 %

7.3 Dimensionering av brobaneplatta

Brobaneplattan är utformad som en plåtplatta av stål, S355, och har därmed en karakteristisk flythållfasthet på 355 MPa. Vid dimensioneringen har extra säkerhetsmarginal lagts på för att ta hänsyn till osäkerheten i beräkningen då plattan modellerats som en balk. Därtill så sänks momentkapaciteten snabbt vid minskning av plattjockleken och därför är extra marginal att föredra vid eventuella utformningsavvikelser, se tabell 13 för kapaciteter och utnyttjandegrad samt bilaga K för beräkning. Med en beräkningsmodell i tre dimensioner är det troligt att plattan skulle kunna göras tunnare.

Tabell 12: Kapacitet och utnyttjandegrad med avseende på moment och tvärkraft för brobaneplattan.

	Moment	Tvärkraft
Kapacitet	24 kNm	4900 kN
Utnyttjandegrad	27 %	1 %

7.4 Dimensionering av svetsar

Svetsmåttet beräknades i en iterativ process där von-Mises spänningarna och de vinkelräta spänningarna jämfördes med brottspänningarna, se bilaga L för beräkningar och tabell 14 för resultat. För livsvetsen, som enligt modellen enbart är belastad av spänningar parallellt med svetsen saknas vinkelräta spänningar och dess kapacitet tillåter det minsta möjliga a-måttet på 3 mm. För flänssvetsarna är det von-Mises spänningarna som blir dimensionerande och för att klara kraven krävs ett a-mått på 11 mm.

Exponerade och öppna springor mellan tvärbalkarnas ände och huvudbalkarnas liv, till exempel underkanten av tvärbalkarnas fläns, kan behöva fogas igen med svetssträng för att öka beständigheten. Dessa svetsar har inte dimensionerats för att bära någon last.

Tabell 13: Maximal spänningar och utnyttjandegrad med avseende på moment och tvärkraft för svetsar mellan tvärbalk och huvudbalk enligt figur 8.

	Von-Mises spänning	Utnyttjandegrad	Vinkelrät spänning	Utnyttjandegrad
Livsvets	139 MPa	31 %	-	-
Flänssvets	432 MPa	95 %	216 MPa	59 %

8 Diskussion och slutsats

För att få en helhetsbild av rapporten förs ett resonemang kring resultatet kopplat till inledande frågeställning och syfte.

8.1 Diskussion kring urvalsprocessen

Utvärderingen under urvalsprocessen är baserad på projektets målsättningar. Det valda brokonceptet möter dessa till stor grad, men kan förbättras genom ytterligare utformning av vissa detaljer. Detta inkluderar exempelvis en gångbana med räcken längsmed trågbalkarna för att bättre möta målet om utformning. Denna anläggs för att möjliggöra en eventuell evakuering, eftersom utrymmet är begränsat när ett tåg är på spåret.

Det är möjligt att urvalsprocessen hade gett ett annat resultat om denna gjorts i ett senare skede av projektet. Byggbranschen är baserad på praktisk erfarenhet eftersom varje projekt är unikt och följderna av detta blir en begränsad litteraturstudie som kan ha påverkat utfallet av urvalsprocessen. I verkliga projekt är en av de större aspekterna ekonomin, vilken viktats lågt i detta urval. De sammanlagda poängen i urvalsmatrisen är väldigt jämna för de båda trågbalkkoncepten och exempelvis hade poängen för den tekniska komplexiteten och för utformningen kunnat bli annorlunda. Detta med bakgrund i det omfattande beräkningsarbetet som stålkonstruktioner innebär i praktiken med avseende på kritiska detaljer samt den inverkan utmattning har på stålkonstruktioners beständighet.

8.2 Diskussion kring dimensioneringsprocessen

Sammanfattningsvis innebär den preliminära dimensioneringen ett säkerställande av erforderlig bärförmåga med avseende på moment, tvärkraft och nedböjning, vilket är en grund att utgå från för den fortsatta dimensioneringen. De modeller som tagits fram för dimensioneringen är en förenkling av brons verkningsätt. Beräkningarna görs för balkelement i två dimensioner eftersom detta är den kunskap som besitts sedan tidigare kurser. För en komplett analys behöver detta kompletteras med en tredimensionell analys, speciellt för den underliggande brobanepattan. Därtill ska även de effekter som brobanans krökning har på beräkningsmodellen tas i beaktning. Andra förenklingar som gjorts är för upplagsförhållanden. Vid beräkning av de dimensionerande lastfallen har elementen antingen modellerats som fast inspända eller fritt upplagda; verkliga infästningar är vanligtvis ett mellanting. Dessutom är bredden på stöden inte inräknade, vilket bland annat innebär att de beräknade momentet över stöd är större än det verkliga fallet.

Vid en fortsatt dimensionering av konceptet behöver utmattning kontrolleras. Detta fenomen har till viss del tagits hänsyn till i antaganden vid kapacitetsberäkningar, men ur en utmattningssynpunkt kan vissa detaljer i tvärsnittet vara kritiska. Detta gäller ställen där stora spänningsvariationer fås, till exempel vid svetsarna. En annan nödvändig detaljberäkning är lådbalktvärsnittets kapacitet att klara belastningen från tvärbalkarna och deras spänningsspridning till lådliv och flänsar. Belastningen från tvärbalkarna sker inte i trågbalkens systemlinje och detta kan medföra ytterligare moment och osymmetrisk fördelning av spänningar.

En annan aspekt som återstår att beakta i den fortsatta dimensioneringsprocessen är de horisontella lasterna som ger upphov till påkänningar i konstruktionen. En annan

faktor att väga in är att den nedböjning som uppstår till följd av egentytngens vikt vid praktisk tillämpning motverkas genom en initial upphöjning av konstruktionen så att den utan yttre last innehar ett nollpunktsläge. Detta innebär en lägre nedböjning än beräknat och medför en möjlighet till minskning av tvärsnittsdimensionerna. Detta skulle kunna höja utnyttjandegraden och i större utsträckning möta projektets målsättning om en materialeffektiv konstruktion, vilket både är ekonomiskt och miljömässigt fördelaktigt. Utnyttjandegraden kan även höjas genom att använda en lägre och billigare stålqualität som utnyttjar tvärsnittet mer effektivt. En lägre materialåtgång kan eventuellt också åstadkommas genom att välja ett I-tvärsnitt istället för lådprofil för trågbalkarna. I-tvärsnittet har en lägre styvhet eftersom det bara har ett liv, vilket behöver ersättas med flera avstyvningar på utsidan av trågbalkarna. Dessutom ökar spänningarna i svetsarna mellan liv och fläns jämfört med i svetsarna för ett lådtvärsnitt.

Tvärsnittets avstyvningar på undersidan av tvärbalkarna är inte dimensionerade utan enbart placerade där avstyvningar kan komma att behövas. Denna detalj bör kontrolleras i fortsatt utformning med hänsyn främst till livplåtens stabilitet, motstånd mot buckling och kapacitet att bära tvärbalkarna. Konstruktionsmässigt hade avstyvningar även på ovansidan av tvärbalkarna varit fördelaktigt för att förhindra buckling av trågbalkens liv, men är inte en möjlighet eftersom insida trågbalk ska vara slät mot ballast enligt gällande regelverk. En intressant fortsatt analys att göra för konstruktionen är huruvida ett ballastfritt spår hade varit ett alternativ. Fördelarna inkluderar lägre egentygnd samt färre dolda svetsar som dessutom inte är lika utsatta för påverkan utan ballasten. Skillnaderna är betydande och skulle kunna utgöra ett attraktivt alternativ. Där emot ger ett fixerat spår högre ljudutstrålning och vibrationer vilket kan uppfattas obehagligt för övriga trafikanter och boende.

Järnvägsbron ska vara möjlig att anpassas för att klara en framtida ökning av trafiklast. Exempelvis kan kapaciteten av järnvägsbron ökas genom att ändra trågbalkarnas tvärsnitt, förslagsvis genom att förlänga flänsarna med hjälp av svetsning och förstärka kritiska snitt. Tidigare beskrivna förslag om att minska kapaciteten för att höja utnyttjandegraden skulle också kunna bortses ifrån för att ta höjd för en framtida trafikökning.

8.3 Slutsats

Studien resulterar i ett broförslag för byggandet av en planskild korsning på Bohusbanan vid Backavägen. Första delen av projektet är en utformningsdel där alternativ på brokoncept tas fram och utvärderas för att hitta den mest lämpliga. Andra delen är en preliminär dimensionering av det valda konceptet. Det framtagna konceptet är en ståltrågbalkbro som enligt den preliminära dimensioneringen uppfyller de krav som ställts utifrån platsens förutsättningar samt projektets intressenter, vilket inkluderar myndigheter såväl som privatpersoner. Även målsättningarna som fastställts för projektet tillgodoses av vald utformning. Som helhet anses förslaget genomförbart med den framtagna utformningen, men ytterligare dimensionering krävs innan färdiga planhandlingar tas fram.

Referenser

- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2011). *Bärande konstruktioner Del 2*: Institutionen för Bygg- och miljöteknik.
- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2013). *Bärande konstruktioner Del 1*: Institutionen för Bygg- och miljöteknik.
- Göteborgs stad. (2014). *Geoteknisk utredning - Detaljplan för Gator inom Backaplansområdet i Göteborg*. Hämtad från [https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFile/Backaplan%20-%20detaljplan%200%3A%20Gator%20inom%20Backaplan-Plan%20-%20granskning-Geoteknisk%20utredning/\\$File/08.%20Geoteknisk%20utredning.pdf?OpenElement](https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFile/Backaplan%20-%20detaljplan%200%3A%20Gator%20inom%20Backaplan-Plan%20-%20granskning-Geoteknisk%20utredning/$File/08.%20Geoteknisk%20utredning.pdf?OpenElement)
- Göteborgs stad. (2018). *Detaljplan för gator vid Backaplan inom stadsdelen Backa i Göteborg*. Hämtad från https://goteborg.se/wps/proxy/http/62.88.129.68/sbk_plandokument_v1/1480K-2-5350.pdf
- Lebet, J.-P., & Hirt, M. A. (2013). *Steel bridges-conceptual and structural design of steel and steel-concrete composite bridges*.
- Lin, W., & Yoda, T. (2017). Chapter Six - Reinforced and Prestressed Concrete Bridges. In W. Lin & T. Yoda (Eds.), *Bridge Engineering* (pp. 97-110): Butterworth-Heinemann.
- Lunds universitet. (u.å.). *CALFEM*. Hämtad från <http://www.byggmek.lth.se/resurser/programvara/calfem/>
- Olsson, C., & Holm, G. (1993). *Pålgrundläggning*. Solna: AB Svensk Byggtjänst & Statens geotekniska institut.
- Swedish Standards Institute. (2003). *SS-EN 1991-2 - Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 2: Trafiklaster på broar*. Stockholm: SIS Förlag AB
- Swedish Standards Institute. (2010). *SS-EN 1990 - Eurokod Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk*. Stockholm: SIS Förlag AB
- Swedish Standards Institute. (2017). *SS-EN 1993-2 - Eurokod Dimensionering av stålkonstruktioner - Del 2: broar*. Stockholm: SIS Förlag AB
- Trafikverket. (2011). *Trafikverkets författningssamling*. Borlänge: Charlotta Lindmark
- Trafikverket. (2014). *Batman - Kodförteckning och beskrivning av kodtyper*. Hämtad från <https://batman.trafikverket.se/externportal>
- Trafikverket. (2015a). *BVS 1586.20 - Banöverbyggnad - Infrastrukturprofiler "Krav på fritt utrymme utmed banan"*. Hämtad från

<http://trvdokument.trafikverket.se/Versioner.aspx?spid=639&dokumentId=TDOK%202014%3A0555>

Trafikverket. (2015b). *Handbok för inspektion av byggnadsverk*. Hämtad från https://batman.trafikverket.se/batinfo/Batman/biblioteket/Dokument/Handbok%20foer%20inspektion%20av%20byggnadsverk.pdf?fbclid=IwAR3WstY1gTlEHdyeIOOECaBpDshsAT-pw4hjOrNeH7_3LwMWU-OIre7vNs

Trafikverket. (2016). *Krav Brobyggande*. Hämtad från <https://www.trafikverket.se/contentassets/5e3d8c0eb4e94efd9738cca74b912bf5/krav-brobyggande.pdf>

Trafikverket. (2017). *Granskningshandling, E6.21 Lundbyleden, delen Brantingsmotet – Ringömotet*. Hämtad från https://www.trafikverket.se/contentassets/6e09cdddd92c4b7c84bbe584ff72b18d/1_plan_och_milljobeskrivning.pdf

Trafikverket. (2018a). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.1*. Hämtad från https://www.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/asek-6.1/06_underhall_o_investering_a61.pdf

Trafikverket. (2018b). *Broprojekteringshandbok förhandsutgåva*.

Trafikverket. (2019a). *Planläggningsbeskrivning: Bohusbanan, delen Brunnsbo station*. Hämtad från https://www.trafikverket.se/contentassets/e7ef78efca6a40bd82a3b7cf37988afb/planlaggningsbeskrivning_191021.pdf

Trafikverket. (2019b). *Planläggningsbeskrivning: E6.21 Lundbyleden, delen Brantingsmotet – Ringömotet*. Hämtad från <https://www.trafikverket.se/contentassets/6e09cdddd92c4b7c84bbe584ff72b18d/planlaggningsbeskrivning.pdf>

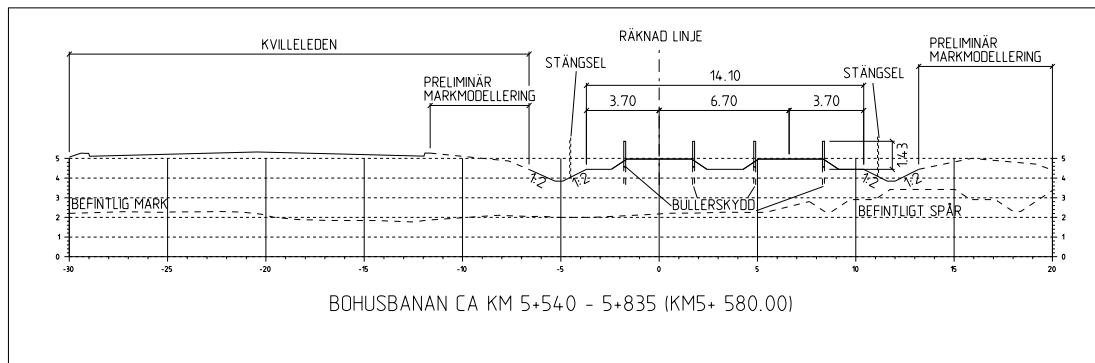
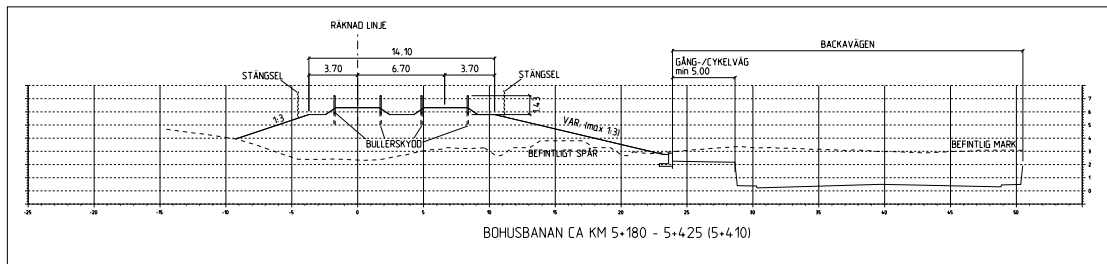
Trafikverket. (2019c). *Tekniskt PM-Geoteknik Bohusbanan, delen Brunnsbo station*. Hämtad från <https://www.trafikverket.se/contentassets/6e09cdddd92c4b7c84bbe584ff72b18d/samradshandling-brunnsbo-station/teknisktpm-geoteknik.pdf>

Trafikverket. (2020). *Krav - VGU, Vägar och gators utformning*. Hämtad från https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/71830/Ineko.Product.RelatedFiles/2020_029_vagar_och_gators_utformning_krav.pdf

Trafikverket. (u.å). *Beslut - Västsvenska paketet*. Hämtad från <https://www.vastsvenskapaketet.se/info/beslut/>

Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133-1140. Hämtad från <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132310003549>

Bilaga B – Sektionsvy



Bilaga C – Tabell över brotyper och dess spännvidder

Brotyp	Material	Spännvidd Från [m]	Spännvidd Till [m]
Balkbro	Stål	15	30
Kontinuerlig balk	Stål	20	100
Fackverk	Stål	20	100
Kontinuerligt fackverk	Stål	30	150
Konsolfackverk med inhängt spann	Stål	200	500
Båge med hel sektion	Stål	50	200
Fackverksbåge	Stål	100	300
Hängbro	Stål	100	2000
Snedkabelbro	Stål	100	400
Balkbro, slakarmerad	Betong	15	20
Balkbro, slakarmerad	Betong	15	30
Balkbro, spännarmerad	Betong	20	30
Balkbro, spännarmerad	Betong	25	35
Lådbalksbro (konstant höjd),spännarmerad	Betong	40	65
Plattbro, slakarmerad	Betong	10	17
Plattbro, slakarmerad	Betong	10	25
Balkbro, slakarmerad	Betong	15	20
Balkbro, slakarmerad	Betong	15	30
Ändskärmsbro, kontinuerlig	Betong	0	60
Lådbalksbro (varierande höjd) Freviourbau bro	Betong	40	300
Sammverkansbro med I-balkar	Betong och stål	20	70
Sammverkansbro med lådbalkar	Betong och stål	50	80
Plattrambro med liten vot, slakarmerad	Betong	0	12
Plattbro med lång vot alt. Parabelvot slakarmerad	Betong	12	25
Plattbro med lång vot alt. Parabelvot spännarmerad	Betong	25	35
Balkrambro (votad)	Betong	25	45
Bågbro	Betong	60	300

Bilaga D – Material- och produktionskostnader

Överslagsberäkning av material- och produktionskostnader för varje brokoncept, se tabell 15, 16, 17 och 18. Volymen är bestämd utifrån en uppskattning av det preliminära tvärsnittet för varje koncept. Densiteten för konstruktionsstål är satt till 7850 kg/m³ och densiteten för betong är satt till 2300 kg/m³ i dessa beräkningar. Enhetspriser för stål- och betongkonstruktioner samt armeringsstänger redovisas i avsnitt 3.5 *Ekonomi*.

För betongkonstruktioner gäller uppskattningsvis 100 kg armering/m³ betong för en underbyggnad och 250 kg armering/m³ betong för en järnvägsöverbyggnad (personlig kommunikation, S. Lindén, 3 mars 2020). I tabellerna nedan redovisas dessa överslagsberäkningar för respektive brokoncept.

Tabell 14: Överslagsberäkning av material- och produktionskostnader för fackverksbron.

Byggnadsdel	Volym [m ³]	Kostnad [SEK]
Vertikala stänger	30	8 miljoner
Horisontella stänger	45	12 miljoner
Diagonala stänger	50	14 miljoner
Tvärbalkar	20	6 miljoner
UNGEFÄRLIG TOTALKOSTNAD		40 miljoner

Tabell 15: Överslagsberäkning av material- och produktionskostnader för bågbron.

Byggnadsdel	Volym [m ³]	Kostnad [SEK]
Båge	45	12 miljoner
Dragband	35	10 miljoner
Draghängare	5	2 miljon
Tvärbalkar	20	6 miljoner
UNGEFÄRLIG TOTALKOSTNAD		30 miljoner

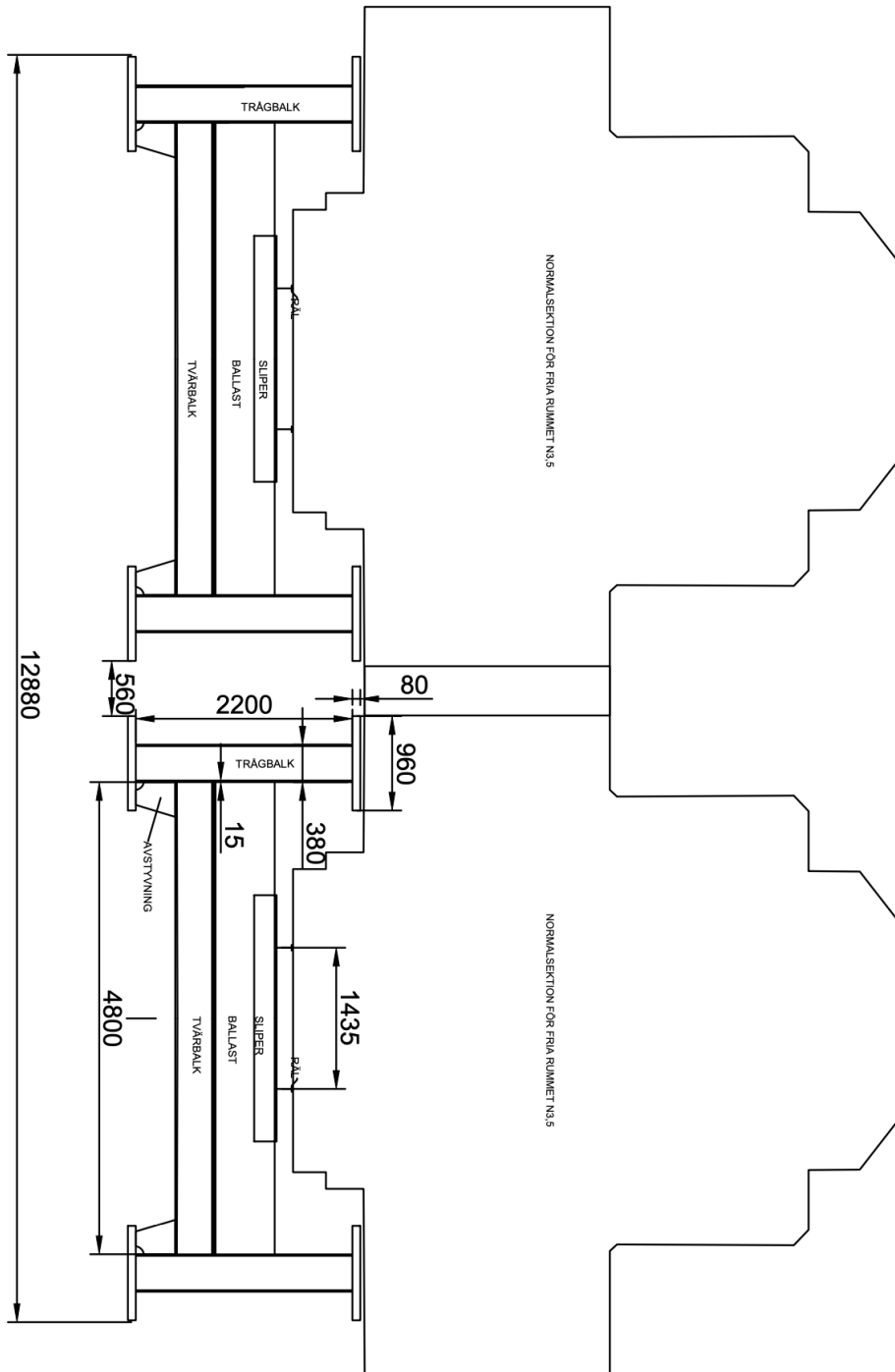
Tabell 16: Överslagsberäkning av material- och produktionskostnader för trågbalkbro i betong.

Byggnadsdel	Volym [m ³]	Massa [ton]	Kostnad [SEK]
Brobanepatta	460		1 miljon
Trågbalkar	420		800 tusen
Mittstöd	140		200 tusen
Armering		240	3 miljoner
UNGEFÄRLIG TOTALKOSTNAD			5 miljoner

Tabell 17: Överslagsberäkning av material- och produktionskostnader för trågbalkbro i stål.

Byggnadsdel	Volym [m ³]	Massa [ton]	Kostnad [SEK]
Tvärbalk	5	38	1.3 miljoner
Trågbalk	66	518	18 miljoner
Plåtplatta	13	99	3.5 miljoner
Mittstöd	25		50 tusen
Armering		2	30 tusen
UNGEFÄRLIG TOTALKOSTNAD			23 miljoner

Bilaga E – Illustration normalsektion för fritt utrymme



Bilaga F – Temperaturbetingade rörelser

För järnvägsbroar gäller att om bron rörelser inte överstiger 80 mm kan övergångarna konstrueras med kontinuerlig ballast och rörelserna tas upp genom en omstrukturering av ballasten, med låg inverkan på spåret (Trafikverket, 2018b). En approximativ uträkning om största möjliga rörelse för aktuellt brokoncept kan göras genom att modellera bron enligt lagerplaceringen i avsnitt 5.2.1 *Lager och övergångskonstruktioner*. Detta innebär att rörelsen kommer ske i riktning mot respektive ändstöd, vilka kommer behöva utformas med övergångskonstruktioner. Med en antagen temperaturutvidgningskoefficient på $1,2 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ för stål (Al-Emrani et al., 2013). Samt en spännvidd på 45 m, kan den maximala temperaturskillnaden för att inte överstiga 80 mm rörelse i konstruktionen ände lösas ut ur formeln för temperaturbetingade rörelser: $\Delta T = \frac{\Delta L}{L \cdot \alpha} = \frac{0,08}{45 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5}} \approx 148^\circ C$. Trots att stålbroars temperatur kan bli väldigt höga vid solinstrålning antas att temperaturskillnaden inte blir tillräckligt stor för att detta skall behöva övervägas vid en preliminärdimensionering.

Bilaga G – Beräkningsgång lastkombinering

Modell

Vid den preliminära dimensioneringen dimensioneras balkarna för de vertikala lasterna från egenvikten och tåglasten enligt LM71. För trågbalkarna samt brobanan görs lastberäkningen per meter i längdled medan den för tvärbalkarna görs per breddmeter (tvärs brobanan). Vid lastkombinering beräknas för brottgräns två fall, ett med egenvikten som huvudlast och ett med tåglasten. För bruksgräns beräknas enbart den frekventa lastkombinationen då det är denna som används vid beräkningar av nedböjning.

Indata

- Geometri för trågbalkarna, tvärbalkarna samt brobaneplattan
- Trafiklaster $Q_{vk} = 250$ kN och $q_{vk} = 80$ kN/m enligt LM71 i SS-EN 1991–2 (Swedish Standards Institute, 2003)
- Korrektionsfaktor $\alpha = 1,33$
- Spårvidd $r = 1,435$ meter
- Tyngdaccelerationen $g = 9,81$ m/s²
- Densitet för ballast 2000 kg/m³ och för konstruktionnsstål 7800 kg/m³ enligt Bärande konstruktioner Del 1 (Al-Emrani et al., 2013)

Beräknas

Följande beräknas för varje beräkningsmodell för trågbalk, tvärbalk och brobaneplatta:

- Dynamikfaktor ϕ
- Dimensionerande laster Q_{k1} [N] och q_{k1} [N/m] i vertikalled
- Egenvikt G [N/m]
- Lastkombinering i brottgränstillstånd enligt TRVFS (Trafikverket, 2011) och bruksgränstillstånd enligt SS-EN 1990 (Swedish Standards Institute, 2010)

Beräkning i MATLAB och resultat

Indata

```
% Geometri
L = 45;           % [m] spännvidd
B = 4.8;         % [m] brobredd

% Trågbalk
hw_trag = 2.20;  % [m] livhöjd
tw_trag = 0.015; % [m] livtjocklek
bf_trag = 0.96;  % [m] flänsbredd
tf_trag = 0.08;  % [m] flänstjocklek

A_trag = 2*hw_trag*tw_trag + 2*bf_trag*tf_trag; % [m^2]

% Tvärbalk - IPE400
A_tvar = 8446e-06; % [m^2]

% Broplatta
t = 0.02;        % [m]

% Lastmodell LM71:
Q_vk = 250e03;   % [N]
```

```

q_vk = 80e03;          % [N/m]

% Övrig indata
r = 1.435;            % [m] spårvidd
g = 9.81;             % [m/s^2] tyngdacceleration
rho_stal = 7800;      % [kg/m^3] densitet konstruktionsstål
rho_ballast = 2000;   % [kg/m^3] densitet ballast
c = 0.65;            % [m] avstånd mellan tvärbalkar
alpha = 1.33;        % [-]

```

Laster i längdled

```

% Beräkningsmetod samt ingående värden enligt Svensk Standard SS-EN 1991-2

% Egenvikt:
G_trag_langs = g*rho_stal*A_trag;          % [N/m]
G_tvar_langs = (g*A_tvar*rho_stal*B)/c;    % [N/m]
G_platta_langs = g*t*B*rho_stal;          % [N/m]
G_ballast_langs = g*rho_ballast*B*0.6;     % [N/m]
G_ra1_langs = 0.5e03;                      % [N/m]

G_tot_langs = 2*G_trag_langs + G_tvar_langs + G_platta_langs + G_ballast_langs +
G_ra1_langs ; % [N/m]

% Dynamisk last:
L_fi = L;                                  % [m] Bestämmande längd tab.6.2
fi = (1.44/(sqrt(L_fi)-0.2))+0.82;         % Dynamikfaktor för omsorgsfullt
underhållet spår

% Tåglast
e = r/18;                                  % [m]
Q_k_langs = alpha*q_vk*(1/2+e/B)*fi;       % [N] Tåglast för den mest belastade
trågbalken
q_k_langs = alpha*q_vk*(1/2+e/B)*fi;       % [N/m] Tåglast för den mest belastade
trågbalken

```

Laster i tvärlid

```

% Egenvikt:
G_tvar_tvar = g*A_tvar*rho_stal;          % [N/m]
G_platta_tvar = g*t*c*rho_stal;          % [N/m]
G_ballast_tvar = g*rho_ballast*c*0.6;     % [N/m]
G_ra1_tvar = 0.5e03*c;                    % [N/m]

G_tot_tvar = G_tvar_tvar + G_platta_tvar + G_ballast_tvar + G_ra1_tvar; % [N/m]
verkar på hela tvärbalkarna

% Trafiklast:
Q_vk_tvar = alpha*fi*q_vk; % [N]

```

Laster i längdled (platta)

```

% Egenvikt:
G_platta_platta = g*t*B*rho_stal;        % [N/m]

```

```

G_ballast_platta = g*rho_ballast*B*0.6;      % [N/m]
G_ral_platta = 0.5e03;                      % [N/m]

G_tot_platta = G_platta_platta + G_ballast_platta + G_ral_platta; % [N/m] verkar i
längsled på plattan

% Trafiklast:
Q_vk_platta = alpha*fi*Q_vk; % [N]

```

Brottgränstillstånd Längdled

```

% Lastkombinering i brottgränstillstånd enligt TRVFS 2011-12

% Lastfall 1 enligt uttryck 6.10 a):
psi_0 = 0.8;
G_brott1_trag = 1.0*1.35*G_tot_langs/2;      % [N/m]
Q_brott1_trag = 1.0*1.5*psi_0*Q_k_langs;     % [N]
q_brott1_trag = 1.0*1.5*psi_0*q_k_langs;     % [N/m]

disp( ['Brottgräns Längdled (tråg) - Lastfall 1: G = ', int2str(G_brott1_trag*10^-3),
' [kN/m]', ', Q1 = ', int2str(Q_brott1_trag*10^-3), ' [kN]', ', q1 = ',
int2str(q_brott1_trag*10^-3), ' [kN/m]'])

% Lastfall 2 enligt uttryck 6.10 b):
G_brott2_trag = 1.0*0.89*1.35*G_tot_langs/2; % [N/m]
Q_brott2_trag = 1.0*1.5*Q_k_langs;           % [N]
q_brott2_trag = 1.0*1.5*q_k_langs;           % [N/m]

disp( ['Brottgräns Längdled (tråg) - Lastfall 2: G = ', int2str(G_brott2_trag*10^-3),
' [kN/m]', ', Q1 = ', int2str(Q_brott2_trag*10^-3), ' [kN]', ', q1 = ',
int2str(q_brott2_trag*10^-3), ' [kN/m]'])

```

Brottgräns Längdled (tråg) - Lastfall 1: G = 69 [kN/m], Q1 = 215 [kN], q1 = 69 [kN/m]
 Brottgräns Längdled (tråg) - Lastfall 2: G = 62 [kN/m], Q1 = 268 [kN], q1 = 86 [kN/m]

Bruksgränstillstånd Längdled

```

% Frekvent kombination enligt SS-EN 1990 uttryck 6.15:
psi_1 = 0.8; % Ett spår belastat
G_frek_trag = G_tot_langs/2; % [N/m]
Q_frek_trag = psi_1*Q_k_langs; % [N]
q_frek_trag = psi_1*q_k_langs; % [N/m]

disp( ['Bruksgräns Längdled (tråg) - Frekvent: G = ', int2str(G_frek_trag*10^-3),
' [kN/m]', ', Q1 = ', int2str(Q_frek_trag*10^-3), ' [kN]', ', q1 = ',
int2str(q_frek_trag*10^-3), ' [kN/m]'])

disp('-----')

```

Bruksgräns Längdled (tråg) - Frekvent: G = 51 [kN/m], Q1 = 143 [kN], q1 = 46 [kN/m]

Brottgränstillstånd Tvärlid

```

% Lastkombinering i brottgränstillstånd enligt TRVFS 2011-12

% Lastfall 1 enligt uttryck 6.10 a):
psi_0 = 0.8;
G_brott1_tvar = 1.0*1.35*G_tot_tvar;           % [N/m]
Q_brott1_tvar = 1.0*1.5*psi_0*Q_vk_tvar;      % [N]

disp( ['Brottgräns Tvärled - Lastfall 1: G = ', int2str(G_brott1_tvar*10^3), '
[kN/m]', ', Q1 = ', int2str(Q_brott1_tvar*10^3), ' [kN]'])

% Lastfall 2 enligt uttryck 6.10 b):
G_brott2_tvar = 1.0*0.89*1.35*G_tot_tvar;    % [N/m]
Q_brott2_tvar = 1.0*1.5*Q_vk_tvar;           % [N]

disp( ['Brottgräns Tvärled - Lastfall 2: G = ', int2str(G_brott2_tvar*10^3), '
[kN/m]', ', Q1 = ', int2str(Q_brott2_tvar*10^3), ' [kN]'])

```

Brottgräns Tvärled - Lastfall 1: G = 13 [kN/m], Q1 = 415 [kN]
 Brottgräns Tvärled - Lastfall 2: G = 12 [kN/m], Q1 = 519 [kN]

Bruksgränstillstånd Tvärled

```

% Frekvent kombination enligt SS-EN 1990 uttryck 6.15:
psi_1 = 0.8; % Ett spår belastat
G_frek_tvar = G_tot_tvar;           % [N/m]
Q_frek_tvar = psi_1*Q_vk_tvar;      % [N]

disp( ['Bruksgräns Tvärled - Frekvent: G = ', int2str(G_frek_tvar*10^3), ' [kN/m]',
', Q1 = ', int2str(Q_frek_tvar*10^3), ' [kN]'])

disp('-----')

```

Bruksgräns Tvärled - Frekvent: G = 10 [kN/m], Q1 = 277 [kN]

Brottgränstillstånd Längdled (platta)

```

% Lastkombinering i brottgränstillstånd enligt TRVFS 2011-12

% Lastfall 1 enligt uttryck 6.10 a):
psi_0 = 0.8;
G_brott1_platta = 1.0*1.35*G_tot_platta;     % [N/m]
Q_brott1_platta = 1.0*1.5*psi_0*Q_vk_platta; % [N]

disp( ['Brottgräns Längdled (platta) - Lastfall 1: G = ', int2str(G_brott1_platta*10^3),
' [kN/m]', ', Q1 = ', int2str(Q_brott1_platta*10^3), ' [kN]'])

% Lastfall 2 enligt uttryck 6.10 b):
G_brott2_platta = 1.0*0.89*1.35*G_tot_platta; % [N/m]
Q_brott2_platta = 1.0*1.5*Q_vk_platta;       % [N]

disp( ['Brottgräns Längdled (platta) - Lastfall 2: G = ', int2str(G_brott2_platta*10^3),
' [kN/m]', ', Q1 = ', int2str(Q_brott2_platta*10^3), ' [kN]'])

```

Brottgräns Längdled (platta) - Lastfall 1: $G = 87$ [kN/m], $Q1 = 415$ [kN]
Brottgräns Längdled (platta) - Lastfall 2: $G = 77$ [kN/m], $Q1 = 519$ [kN]

Bruksgränstillstånd Längdled (platta)

```
% Frekvent kombination enligt SS-EN 1990 uttryck 6.15:  
psi_1 = 0.8; % Ett spår belastat  
G_frek_platta = G_tot_platta;           % [N/m]  
Q_frek_platta = psi_1*Q_vk_platta;      % [N]  
  
disp( ['Bruksgräns Längdled (platta) - Frekvent: G = ', int2str(G_frek_platta*10^-3),  
      ' [kN/m]', ', Q1 = ', int2str(Q_frek_platta*10^-3), ' [kN]'])
```

Bruksgräns Längdled (platta) - Frekvent: $G = 64$ [kN/m], $Q1 = 277$ [kN]

Published with MATLAB® R2020a

Bilaga H – Dimensionering av trågbalk

Modell

I scriptet modelleras trågbalkbron med en utbredd last från egenvikten utspridd jämnt längs hela bro längden. Punktlaster från loket flyttas från ändstöd till mittstöd med 0,1m åt gången, för att kunna hitta den värsta positionen för respektive dimensioneringsförutsättning. Den utbredda tåglasten kan antingen placeras enbart i samma spann som punktlaster eller över hela balken (bortsett från där punktlaster verkar).

Indata

- Geometri för trågbalktvärsnitt
- Elasticitetsmodul för stål
- Dimensionerande lastfall i brottnöjningsgränstillstånd och bruksgränstillstånd enligt Bilaga G – Beräkningsgång lastkombinering

Beräknas

- Dimensionerande momentfördelning, tvärkraftsfördelning och nedböjning för en trågbalk längs brobanan.

Beräkning i MATLAB och resultat

Indata

```
% Geometri för en trågbalk
hw_trag = 2.20;      % [m] livhöjd
tw_trag = 0.015;    % [m] livtjocklek
bf_trag = 0.96;     % [m] flänsbredd
tf_trag = 0.08;     % [m] flänstjocklek
L_spann = 45;       % [m]

% Elementegenskaper
A = hw_trag*tw_trag*2 + 2*tf_trag*bf_trag; % [m^2]
I = ((tw_trag*hw_trag^3)/12)*2 + 2*((tf_trag*bf_trag^3)/12 +
((hw_trag+tf_trag)/2)^2*tf_trag*bf_trag); % [m^4]
E = 210e09;         % [Pa]

% Dimensionerade laster
lastfall = 1;      % 1 = brottnöjningsgränstillstånd 2
                  % 2 = bruksgränstillstånd: frekvent

if lastfall == 1
    G_trag = 62e3;  % [N/m]
    Q_punkt = 268e3; % [N]
    q_utbredd = 86e3; % [N/m]
elseif lastfall == 2
    G_trag = 51e3;  % [N/m]
    Q_punkt = 143e3; % [N]
    q_utbredd = 46e3; % [N/m]
end

% Utbredd last
utbredd = 2;      % 1 = Utbredd tåglast i ett spann (dim. nedböjning)
                % 2 = Utbredd tåglast över hela bron (dim. moment och tvärkraft)
```

Balkmodellering enligt Calfem

```
% Indelning i antal element
nel = 8;
ndof = (nel+1)*3;

L_mellan_Q = 1.6;      % Definerar avståndet mellan punktlaster
iteration = 0;
for j = 0.1:0.1:(L_spann - 3.5*L_mellan_Q) % Loop för att beräkna flera olika
lastpositioner för lokets punktlaster
    Utbredd_slut = j;

    iteration = iteration + 1;

% Vektorer med utvärderingspunkter (element start/stopp)
if j < (L_spann - 4*L_mellan_Q)
    x_vektor(:,iteration) = [0,          % Ändupplag
    Utbredd_slut,                    % Utbredd tåglast slutar
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*0.5,    % Punktlast 1
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*1.5,    % Punktlast 2
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*2.5,    % Punktlast 3
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*3.5,    % Punktlast 4
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*4,      % Utbredd tåglast börjar
    L_spann,                          % Mittstöd
    L_spann*2];
elseif j == (L_spann - 4*L_mellan_Q)
    korr=0.01;                        % Korrektionsfaktor för att inte 7e och 8e
    koordinaten skall sammanfalla
    x_vektor(:,iteration) = [0,        % Ändupplag
    Utbredd_slut-korr,                % Utbredd tåglast slutar
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*0.5-korr, % Punktlast 1
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*1.5-korr, % Punktlast 2
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*2.5-korr, % Punktlast 3
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*3.5-korr, % Punktlast 4
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*4-korr,   % Utbredd tåglast börjar
    L_spann,                            % Mittstöd
    L_spann*2];
elseif j > (L_spann - 4*L_mellan_Q)
    korr=0.01;                        % Korrektionsfaktor för att inte 6e och 7e
    koordinaten skall sammanfalla
    x_vektor(:,iteration) = [0,        % Ändupplag
    Utbredd_slut-korr,                % Utbredd tåglast slutar
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*0.5-korr, % Punktlast 1
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*1.5-korr, % Punktlast 2
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*2.5-korr, % Punktlast 3
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*3.5-korr, % Punktlast 4
    L_spann,                            % Mittstöd
    Utbredd_slut + L_mellan_Q*4-korr,   % Utbredd tåglast börjar
    L_spann*2];
end

% Definerar element och topologi
Edof = zeros(nel,7);
ex = zeros(nel,2);
ey = zeros(nel,2);
eq = zeros(nel,2);
k=0;
for i = 1:nel
```

```

ex(i,:) = [x_vektor(i,iteration) x_vektor(i+1,iteration)];
Edof(i,:) = [i, 1+k 2+k 3+k 4+k 5+k 6+k];
k = k+3;
end

% Placerar ut de utbredda lasterna
for i = 1:nel
    eq(i,2) = eq(i,2) - G_trag;
end

if Utbredd == 1
    eq(1,2) = eq(1,2) - q_utbredd;
    eq(nel-1,2) = eq(nel-1,2) - q_utbredd;
elseif Utbredd == 2
    eq(1,2) = eq(1,2) - q_utbredd;
    eq(nel-1,2) = eq(nel-1,2) - q_utbredd;
    eq(nel,2) = eq(nel,2) - q_utbredd;
end

% Tar fram styvhetsmatrisen och lastvektorn
K = zeros(ndof); f = zeros(ndof,1);
for i = 1:nel
    [Ke,fe] = beam2e(ex(i,:),ey(i,:),[E A I],eq(i,:));
    [K,f] = assem(Edof(i,:),K,Ke,f,fe);
end

% Placerar ut punktlasterna
Q_pos = [3:6];
for i = Q_pos
    f(2+3*(i-1)) = f(2+3*(i-1)) - Q_punkt;
end

% Definerar randvillkor
if j <= (L_spann - 4*L_mellan_Q)
    bc = [2 0
          ndof-5 0
          ndof-4 0
          ndof-1 0];
elseif j > (L_spann - 4*L_mellan_Q)
    bc = [2 0
          ndof-8 0
          ndof-7 0
          ndof-1 0];
end

% Beräkning av förskjutning och reaktionskrafter
[a,R] = solveq(K,f,bc);

% Beräkning av förskjutning och snittmoment/-kraft vid "nog" antal punkter
% längs respektive modellerat element
ed = extract(Edof,a);
nog = 40;
tvarkraft = zeros (nog,nel);
moment = zeros (nog,nel);
forskjutning_y = zeros (nog,nel);
x_koord = zeros (nog,nel);

for i = 1:nel

```

```

[es,edi,eci] = beam2s(ex(i,:),ey(i,:),[E A I],ed(i,:),eq(i,:),nog);
tvarkraft(:,i) = es(:,2);
moment(:,i) = es(:,3);
forskjutning_y(:,i) = edi(:,2);
x_koord(:,i) = eci + ex(i,1);
end

% Lagring av uträkningar i cellvektorer
momentcell(iteration,1) = {moment};
tvarkraftcell(iteration,1) = {tvarkraft};
nedbojningcell(iteration,1) = {forskjutning_y};
x_koordcell(iteration,1) = {x_koord};

% Lagring av maxvärden för aktuell lastposition
nedbojning(iteration,1) = max(max(abs(forskjutning_y)));
VbEd(iteration,1) = max(max(abs(tvarkraft)));
MbEd(iteration,1) = max(max(abs(moment)));
end

% Dimensionerande värden utvärderat från samtliga lastpositioner
[MbEd_dim,m_pos] = max(MbEd);
[VbEd_dim,v_pos] = max(VbEd);
[nedbojning_dim,n_pos] = max(nedbojning);

disp('-----')
disp('Dimensionerande värden')
disp(['Dimensionerande moment M= ', int2str((MbEd_dim)*10^3), ' [kNm]'])
disp(['Dimensionerande tvärkraft v= ', int2str((VbEd_dim)*10^3), ' [kN]'])
disp(['Maximal nedböjning a= ', int2str((nedbojning_dim)*10^3), ' [mm]'])

% Momentplot
subplot(2,1,1)
plot(x_koordcell{m_pos},momentcell{m_pos}*10^3,'r')
set(gca,'YDir','reverse')
title('Dimensionerande moment')
ylabel('Moment [kNm]')
xlabel('Längd [m]')
grid on
hold on

% Plottar balk
line([0 L_spann*2],[0 0],'Linewidth',2,'color','k')
plot([0 L_spann*2],[1.2e3 1.2e3],'o','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)
plot(L_spann,1.5e3,'^','color','black','MarkerFaceColor','black','MarkerSize',5)

% Plottar punktlaster position
for k = Q_pos
    line([x_vektor(k,m_pos) x_vektor(k,m_pos)],[-2e3 -2e3],'color','k','Marker','v')
end

%Tvärkraftsplot
subplot(2,1,2)
plot(x_koordcell{v_pos},tvarkraftcell{v_pos}*10^3,'r')
title('Dimensionerande tvärkraft')
ylabel('Tvärkraft [kN]')
xlabel('Längd [m]')
grid on
hold on

```

```

% Plottar "kompletteringslinjer"
for k = 1:nel-1
line([x_koordcell{v_pos}(nog,k)
x_koordcell{v_pos}(1,k+1)], [tvarkraftcell{v_pos}(nog,k)*10^-3
tvarkraftcell{v_pos}(1,k+1)*10^-3], 'Linewidth',1, 'color', 'r')
end

% Plottar balk
line([0 L_spann*2], [0 0], 'Linewidth',2, 'color', 'k')
plot([0 L_spann*2], [-0.2e3 -
0.2e3], 'o', 'color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 5)
plot(L_spann, -0.2e3, '^', 'color', 'black', 'MarkerFaceColor', 'black', 'MarkerSize', 5)

% Plottar punktlasternas position
for k = Q_pos
line([x_vektor(k,v_pos) x_vektor(k,v_pos)], [2.5e2 2.5e2], 'color', 'k', 'Marker', 'v')
end

% Nedböjningsplot
figure
plot(x_koordcell{n_pos}, nedbojningcell{n_pos}*10^3, 'm')
title('Dimensionerande nedböjning')
ylabel('Nedböjning [mm]')
xlabel('Längd [m]')
grid on
hold on

% Plottar balk
line([0 L_spann*2], [0 0], 'Linewidth',2, 'color', 'k')
plot([0 L_spann*2], [-0.5 -0.5], 'o', 'color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 5)
plot(L_spann, -0.8, '^', 'color', 'black', 'MarkerFaceColor', 'black', 'MarkerSize', 5)

% Plottar punktlasternas position
for k = Q_pos
line([x_vektor(k,n_pos) x_vektor(k,n_pos)], [0.8 0.8], 'color', 'k', 'Marker', 'v')
end

```

```

-----
Dimensionerande värden
Dimensionerande moment M= 39706 [kNm]
Dimensionerande tvärkraft V= 4737 [kN]
Maximal nedböjning a= 80[mm]

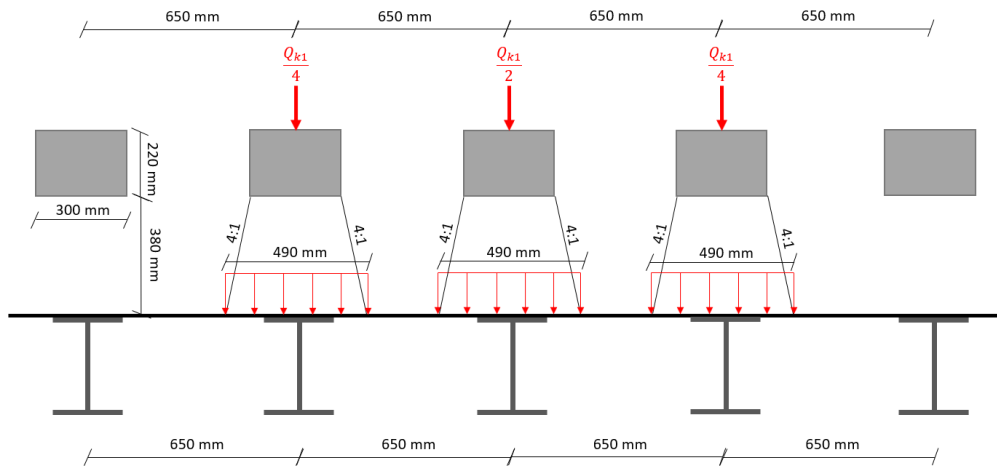
```

Published with MATLAB® R2020a

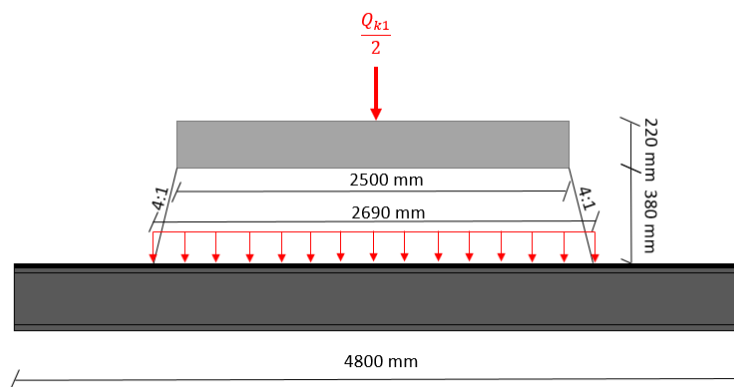
Bilaga I – Lastspridning

För att kunna dimensionera brobaneplattan och tvärbalkar måste hänsyn tas till lastspridningen i ballast (Swedish Standards Institute, 2003).

Dimensionerande lastfallet för tvärbalkarna, se figur 19 och 20:

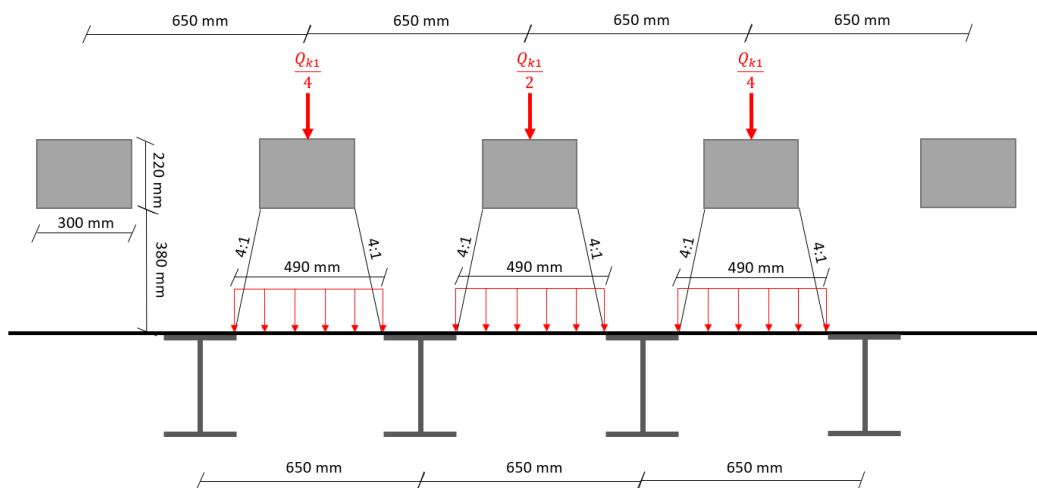


Figur 19: Vy tvärs spåret på det dimensionerande lastfallet för tvärbalkarna



Figur 20: Vy längs spåret på det dimensionerande lastfallet för tvärbalkarna

Dimensionerande lastfallet för brobaneplattan, se figur 21:



Figur 21: Vy tvärs spåret på det dimensionerande lastfallet för brobaneplattan

Bilaga J – Dimensionering av tvärbalk

Modell

Tvärbalkarna modelleras med en jämnt utbredd egenvikt över hela balken och med en utbredd tåglast, som härstammar från en utav punktlaster från locket. Lastspridningen från punktlasten finns redovisad under bilaga I – Lastspridning. Tvärbalkarna dimensioneras för att klara av hälften av belastningen från en punktlast, då resterande hälft kan förväntas spridas till de intilliggande slipers, och därmed belasta tvärbalkarna närmast under dom istället. Vid beräkningen antas slipers ligga mitt emellan trågbalkarna och eventuell lastexcentricitet längs spåret försummas. Dimensioneringen av tvärbalkarna görs enligt modell med fritt upplagd balk i båda ändarna för att skapa maximalt fältmoment och nedböjning. Vid senare dimensionering av svetsar antas balken istället vara fast inspänd för att få maximala reaktionskrafter.

Indata

- Geometri för tvärbalkarna
- Elasticitetsmodul för stål
- Dimensionerande lastfall i brottgränstillstånd och bruksgränstillstånd enligt Bilaga G – Beräkningsgång lastkombinering

Beräknas

- Dimensionerande momentfördelning, tvärkraftsfördelning och nedböjning för en tvärbalk tvärs brobanan.

Beräkning i MATLAB och resultat

Indata

```
B = 4.8;           % [m] Brobredd
c = 0.65;         % [m] Centrumavstånd mellan tvärbalkar
s = 2.69;        % [m] Lastspridning från slipers (tvärs brobanan)

% Tvärbalk - IPE400
A = 8446e-6;     % [m^2]
I = 23130e-8;   % [m^4]
E = 210e9;      % [Pa]

% Dimensionerade laster
lastfall = 1;   % 1 = brottgräns: lastfall 2
               % 2 = bruksgräns: frekvent

if lastfall == 1
    G_tvar = 12e3;           % [N/m] verkar på hela tvärbalkarna
    Q_punkt = (519e3/s)/2;  % [N] Last som verkar på s-avståndet
elseif lastfall == 2
    G_tvar = 10e3;          % [N/m] verkar på hela tvärbalkarna
    Q_punkt = (277e3/s)/2;  % [N] Last som verkar på s-avståndet
end

% Inspänning
Inspanning = 2; % 1 = Fast inspänd (dim. svetsar)
              % 2 = Fritt upplagd (dim. tvärbalk)
```

Balkmodellering enligt Calfem

```
% Indelning i antal element
nel=3;
ndof=(nel+1)*3;

% Definerar element och topologi samt placerar ut utbredda laster
Edof = zeros(nel,7);
ex = zeros(nel,2);
ey = zeros(nel,2);
eq = zeros(nel,2);

k=0;
for i = 1:nel
    Edof(i,:) = [i, 1+k 2+k 3+k 4+k 5+k 6+k];
    if i == 1 || i == 3
        eq(i,2) = -G_tvar;
    elseif i == 2
        eq(i,2) = -(G_tvar + Q_punkt);
    end
    k = k + 3;
end

ex = [0 (B-s)/2;          % Element mellan svets och tåglastens början
      (B-s)/2 B-(B-s)/2; % Element under utbredd tåglast
      B-(B-s)/2 B];      % Element mellan tåglastens slut och svets

% Tar fram styvhetsmatrisen och lastvektorn
K = zeros(ndof); f1 = zeros(ndof,1);
for i = 1:nel
    [Ke,fe] = beam2e(ex(i,:),ey(i,:),[E A I],eq(i,:));
    [K,f1] = assem(Edof(i,:),K,Ke,f1,fe);
end

% Definerar randvillkor
if Inspanning == 1
    bc=[1 0
        2 0
        3 0
        ndof-2 0
        ndof-1 0
        ndof 0];
elseif Inspanning == 2
    bc=[1 0
        2 0
        ndof-1 0];
end

% Beräkning av förskjutning och reaktionskrafter
[a, fb] = solveq(K, f1, bc);

% Beräkning av förskjutning och snittmoment/-kraft vid "nog" antal punkter
% längs respektive modellerat element
ed=extract(Edof,a);
nog = 100;
tvarkraft = zeros (nog,nel);
moment = zeros (nog,nel);
forskjutning_y = zeros (nog,nel);
```

```

x_koord = zeros (nog,nel);

for i = 1:nel
    [es,edi,eci] = beam2s(ex(i,:),ey(i,:),[E A I],ed(i,:),eq(i,:),nog);
    tvarkraft(:,i) = es(:,2);
    moment(:,i) = es(:,3);
    forskjutning_y(:,i) = edi(:,2);
    x_koord(:,i) = eci + ex(i,1);
end

% Dimensionerande värden
nedbojning = max(max(abs(forskjutning_y)));
VbEd = max(max(abs(tvarkraft)));
MbEd = max(max(abs(moment)));

disp('-----')
disp(['Dimensionerande moment M= ', int2str((MbEd)*10^-3), ' [kNm]'])
disp(['Dimensionerande tvärkraft V= ', int2str((VbEd)*10^-3), ' [kN]'])
disp(['Maximal nedböjning a= ', int2str((nedbojning)*10^3), ' [mm]'])

% Momentplot
subplot(2,1,1)
plot(x_koord,moment*10^-3,'r')
set(gca,'YDir','reverse')
title('Dimensionerande moment')
ylabel('Moment [kNm]')
xlabel('Längd [m]')
grid on
hold on

% Plottar balk
line([0 B],[0 0],'Linewidth',2,'color','k')
plot(0,6,'^','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)
plot(B,6,'o','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)

%Tvärkraftsplot
subplot(2,1,2)
plot(x_koord,tvarkraft*10^-3,'r')
title('Dimensionerande tvärkraft')
ylabel('Tvärkraft [kN]')
xlabel('Längd [m]')
grid on
hold on

% Plottar balk
line([0 B],[0 0],'Linewidth',2,'color','k')
plot(0,-6,'^','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)
plot(B,-6,'o','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)

% Nedböjningsplot
figure
plot(x_koord,forskjutning_y*10^3,'m')
title('Dimensionerande nedböjning')
ylabel('Nedböjning [mm]')
xlabel('Längd [m]')
grid on
hold on

```

```
% Plottar balk  
line([0 B],[0 0],'Linewidth',2,'color','k')  
plot(0,-0.1,'^','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)  
plot(B,-0.1,'o','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)
```

```
-----  
Dimensionerande moment M= 259 [kNm]  
Dimensionerande tvärkraft v= 159 [kN]  
Maximal nedböjning a= 12[mm]
```

Published with MATLAB® R2020a

Bilaga K – Dimensionering av brobaneplatta

Modell

För brobaneplåten antas lastspridningen liknande som för tvärbalkarna, men eftersom plattan är upplagd kontinuerlig över flera tvärbalkar modelleras den i 3 spann, enligt bilaga I – Lastspridning. Plattan modelleras som en balk liggandes i den mest belastade delen av brobanan (där både tåglasten och egenvikten verkar). Eftersom slipersplacementen ej är känd görs en modell för att kunna flytta den utbredda punktlasten från ena sidan spannet till det andra, för att kunna hitta den värsta positionen. För dimensioneringen har tvärbalkarnas flänsar antagits veka för att inte överskatta dess avlastande effekt från brobaneplattan. Därmed är spannen mellan upplagen i modellen lika med avståndet mellan tvärbalkarnas liv. Kapacitetberäkningarna gjordes enligt kapitel S4.3 och S5.3 i Bärande konstruktioner del 1 (Al-Emrani et al., 2013).

Indata

- Geometri för en brobaneplatta
- Elasticitetsmodul för stål
- Dimensionerande lastfall i brottgränstillstånd och bruksgränstillstånd enligt Bilaga G – Beräkningsgång lastkombinering

Beräknas

- Dimensionerande momentfördelning, tvärkraftsfördelning och nedböjning för en del av brobaneplattan längs brobanan.
- Moment- och tvärkraftskapacitet för en del av brobaneplattan längs brobanan.
- Utnyttjandegrad av kapaciteten för det kritiska snittet i brobaneplattan.

Beräkning i MATLAB och resultat

Indata

```
% Geometri
B = 4.8;           % [m] Brobredd
c = 0.65;         % [m] Avstånd mellan tvärbalkar
c_eff = c;        % [m] Räknar med att plåten är fritt upplagd över liven, veka
                  % flänsar på tvärbalken

% Plåtplatta
t_platta = 0.02;  % [m] Tjocklek brobaneplatta
B_m = 1;          % OBS: Utnyttjandegraden skall vara samma oavsett bredden på
                  % den modellerade balken

% Plattan modelleras som en "B_m" meter bred balk. För att modellera det värsta
% fallet, där både egenvikten och tåglasten verkar på plattan, görs
% beräkningarna på ett snitt i mitten av plattan

A = t_platta*B_m; % [m] Tvärsnittsarea platta per breddmeter modellerad balk
I = B_m*t_platta^3/12; % [m4] Yttröghetsmoment per breddmeter modellerad balk
E = 210e9;         % [Pa]
fy = 355e6;        % [Pa]

% Dimensionerande lastfall
lastfall = 1;      % 1 = brottgräns: lastfall 2
```

```

                                % 2 = bruksgräns: frekvent
if lastfall == 1
    Q_punkt = (519e3)/2;    % [N] Punktlast från tåg
    G_platta = 77e3*(B_m/B); % [N/m] Utbredd egenvikt per breddmeter
elseif lastfall == 2
    Q_punkt = (277e3)/2;    % [N] Punktlast från tåg
    G_platta = 64e3*(B_m/B); % [N/m] Utbredd egenvikt per breddmeter
end

% Lastspridning
ls_bredd = 2.69;          % [m] Lastspridning från tåglast (tvärs brobanan)
ls_langd = 0.49;          % [m] Lastspridning från tåglast (längs brobanan)
q_punkt = (Q_punkt/ls_langd*(B_m/ls_bredd)); % [N/m] Utbredd egenvikt per breddmeter
modellerad balk

L_gq = 0.49;              % [m] Längd där egenvikt och tåglast verkar

```

Balkmodellering enligt Calfem

```

% Indelning i antal element
nel = 9;
ndof = (nel+1)*3;

iteration = 0;
for j = 0.005:0.005:(c_eff - L_gq)-0.005 % Loop för att beräkna flera olika
lastpositioner för den utbredda loklasten
iteration = iteration + 1;

Utbredd_borjar=j;

% Vektor med utvärderingspunkter (element start/stopp)
x_vektor(:,iteration) = [0,                % Tvärbalksliv
    Utbredd_borjar,                        % Utbredd tåglast (P/4) börjar
    Utbredd_borjar + L_gq,                 % Utbredd tåglast (P/4) slutar
    c_eff,                                  % Tvärbalksliv
    c_eff + Utbredd_borjar,                % Utbredd tåglast (P/2) börjar
    c_eff + Utbredd_borjar + L_gq,         % Utbredd tåglast (P/2) slutar
    2*c_eff,                                % Tvärbalksliv
    2*c_eff + Utbredd_borjar,              % Utbredd tåglast (P/4) börjar
    2*c_eff + Utbredd_borjar + L_gq,       % Utbredd tåglast (P/4) slutar
    3*c_eff];

% Definerar element och topologi
Edof = zeros(nel,7);
ex = zeros(nel,2);
ey = zeros(nel,2);
eq = zeros(nel,2);
k=0;
for i = 1:nel
    ex(i,:) = [x_vektor(i,iteration) x_vektor(i+1,iteration)];
    Edof(i,:) = [i, 1+k 2+k 3+k 4+k 5+k 6+k];
    k = k+3;
end

% Placerar ut de utbredda lasterna
for i = 1:nel
    eq(i,2) = eq(i,2) - G_platta;

```

```

end

eq(2,2) = eq(2,2) - q_punkt/2;
eq(5,2) = eq(5,2) - q_punkt;
eq(8,2) = eq(8,2) - q_punkt/2;

% Tar fram styvhetsmatrisen och lastvektorn
K = zeros(ndof); f = zeros(ndof,1);
for i = 1:nel
    [Ke,fe] = beam2e(ex(i,:),ey(i,:),[E A I],eq(i,:));
    [K,f] = assem(Edof(i,:),K,Ke,f,fe);
end

% Definerar randvillkor
bc = [1 0
      2 0
      11 0
      20 0
      ndof-1 0];

% Beräkning av förskjutning och reaktionskrafter
[a,R] = solveq(K,f,bc);

% Beräkning av förskjutning och snittmoment/-kraft vid "nog" antal punkter
% längs respektive modellerat element
ed=extract(Edof,a);
nog = 80;
tvarkraft = zeros (nog,nel);
moment = zeros (nog,nel);
forskjutning_y = zeros (nog,nel);
x_koord = zeros (nog,nel);

for i = 1:nel
    [es,edi,eci] = beam2s(ex(i,:),ey(i,:),[E A I],ed(i,:),eq(i,:),nog);
    tvarkraft(:,i) = es(:,2);
    moment(:,i) = es(:,3);
    forskjutning_y(:,i) = edi(:,2);
    x_koord(:,i) = eci + ex(i,1);
end

% Lagring av uträkningar i cellvektorer
momentcell(iteration,1) = {moment};
tvarkraftcell(iteration,1) = {tvarkraft};
nedbojningcell(iteration,1) = {forskjutning_y};
x_koordcell(iteration,1) = {x_koord};

% Lagring av maxvärden för aktuell lastposition
nedbojning(iteration,1) = max(max(abs(forskjutning_y)));
VbEd(iteration,1) = max(max(abs(tvarkraft)));
MbEd(iteration,1) = max(max(abs(moment)));
end

% Dimensionerande värden utvärderat från samtliga lastpositioner
[MbEd_dim,m_pos] = max(MbEd);
[VbEd_dim,v_pos] = max(VbEd);
[nedbojning_dim,n_pos] = max(nedbojning);

disp('-----')

```

```

disp('Dimensionerande värden')
disp(['Dimensionerande moment M= ', int2str((MbEd_dim)*10^-3), ' [kNm]'])
disp(['Dimensionerande tvärkraft V= ', int2str((VbEd_dim)*10^-3), ' [kN]'])
disp(['Maximal nedböjning a= ', int2str((nedbojning_dim)*10^3), ' [mm]'])

% Momentplot
subplot(2,1,1)
plot(x_koordcell{m_pos},momentcell{m_pos}*10^-3,'r')
set(gca,'YDir','reverse')
title('Dimensionerande moment')
ylabel('Moment [kNm]')
xlabel('Längd [m]')
grid on
hold on

% Plottar balk
line([0 c*3],[0 0],'Linewidth',2,'color','k')
plot(0,0.2,'^','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)
plot([c c*2 c*3],[0.2 0.2 0.2],'o','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)

%Tvärkraftsplot
subplot(2,1,2)
plot(x_koordcell{v_pos},tvarkraftcell{v_pos}*10^-3,'r')
title('Dimensionerande tvärkraft')
ylabel('Tvärkraft [kN]')
xlabel('Längd [m]')
grid on
hold on

% Plottar "kompletteringslinjer"
for k = 1:nel-1
line([x_koordcell{v_pos}(nog,k)
x_koordcell{v_pos}(1,k+1)],[tvarkraftcell{v_pos}(nog,k)*10^-3
tvarkraftcell{v_pos}(1,k+1)*10^-3],'Linewidth',1,'color','r')
end

% Plottar balk
line([0 c*3],[0 0],'Linewidth',2,'color','k')
plot(0,-2,'^','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)
plot([c c*2 c*3],[-2 -2 -2],'o','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)

% Nedböjningsplot
figure
plot(x_koordcell{n_pos},nedbojningcell{n_pos}*10^3,'m')
title('Dimensionerande nedböjning')
ylabel('Nedböjning [mm]')
xlabel('Längd [m]')
grid on
hold on

% Plottar balk
line([0 c*3],[0 0],'Linewidth',2,'color','k')
plot(0,-0.01,'^','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)
plot([c c*2 c*3],[-0.01 -0.01 -
0.01],'o','color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)

disp('-----')

```

```

-----
Dimensionerande värden
Dimensionerande moment M= 6 [kNm]
Dimensionerande tvärkraft v= 65 [kN]
Maximal nedböjning a= 1[mm]
-----

```

Kapacitet

```

% Tvärkraftskapacitet
eta = 1.2;
Av = eta*t_platta*B_m;
gamma_M0 = 1.0;

% Tvärkraftskapacitet utan risk för skjuvbuckling BK1 ekv. S5-18
vp1Rd = Av*fy/(sqrt(3)*gamma_M0); % Antar att skjuvbuckling ej inträffar

% Momentkapacitet
w_e1 = I/(t_platta/2);
chi_LT = 1.0;
gamma_M1 = 1.0;

% Bärande Konstruktioner del 1 (BK1) ekv. S4-41
MbRd = chi_LT*w_e1*fy/gamma_M1;

disp(['Momentkapacitet M= ', int2str((MbRd)*10^3), ' [kNm]'])
disp(['Tvärkraftskapacitet v= ', int2str((vp1Rd)*10^3), ' [kN]'])

disp('-----')

```

```

Momentkapacitet M= 24 [kNm]
Tvärkraftskapacitet v= 4919 [kN]
-----

```

Utnyttjandegrad

```

U_grad_v = vbEd_dim/vp1Rd;
U_grad_M = MbEd_dim/MbRd;

disp(['Utnyttjandegrad momentkapacitet, n = ', int2str(U_grad_M*10^2), ' [%]'])
disp(['Utnyttjandegrad tvärkraftskapacitet, n = ', int2str(U_grad_v*10^2), ' [%]'])

```

```

Utnyttjandegrad momentkapacitet, n = 27 [%]
Utnyttjandegrad tvärkraftskapacitet, n = 1 [%]

```

Published with MATLAB® R2020a

Bilaga L – Dimensionering av svetsar

Modell

Vid dimensionering av svetsarna som kopplar samman tvärbalkarna med trågbalkarna beräknas reaktionskrafterna för en fast inspänd tvärbalk enligt bilaga J – Dimensionering av tvärbalk. Svetsarna placeras på båda sidor liv samt på insidan av flänsen, uppe och nere. Flänssvetsarna modelleras för att kunna ta hela kraften från momentet medan livsvetsarna tar tvärkraften. Kraften från momentet delas jämnt mellan över och underfläns och beräknas genom att dela reaktionsmomentet med avståndet mellan insidorna fläns (längden på livet). Längden på respektive svets är bortsett från det utrymme den valsade krökningen tar upp i tvärsnittet vid övergång mellan liv och fläns, eftersom dessa antas svåra att svetsa vid. Scriptet är utformat så att vid en noggrannare analys, då horisontella krafter kan uppkomma i tvärbalken, är dessa beräkningar färdigmodellerade och reaktionskraften är bara att skriva in. Dessa krafter har dock marginell påverkan på svetsarna och försummas därför i den preliminära utformningen. Beräkningsgången följer kapitel S9.8 i Bärande konstruktioner del 2 (Al-Emrani et al., 2011).

Indata

- Geometri för tvärbalkarna
- Reaktionskrafter och -moment vid fast inspänd tvärbalk
- Brottgräns för stålqualität S355, $f_u = 510$ MPa

Beräknas

- Erforderligt a-mått för svets längs liv samt insida fläns för anslutning mellan tvär- och trågbalk
- Utnyttjandegrad för svetsarna med avseende på vinkelräta spänningar samt von-Mises flytvillkor.

Beräkning i MATLAB och resultat

Indata

```
% Geometri för en IPE400-balk
h_tvar = 0.4;           % [m]
b_tvar = 0.18;         % [m]
tf_tvar = 0.0135;     % [m]
tw_tvar = 0.0086;     % [m]
R_tvar = 0.021;       % [m]

% Krafter i ände vid fast inspänning (brottgräns)
N_tvarb = 0e5;         % [N] Normalkraft ändupplag
V_tvarb = 1.59e5;     % [N] Tvärkraft ändupplag
M_tvarb = 1.62e5;     % [Nm] Moment ändupplag

% Antagande att all tvärkraft tas av livet
% Antagande att allt moment tas av fläns
% Normalkraft fördelat över både liv och fläns
```

Svets tvärbalk-trågbalk (liv och insida fläns)

```
% Svetsmått som itereras fram genom att testa fram lägsta tillåtna värde
a_liv = 0.003;        % [mm] a-mått livsvets
```

```

a_flans = 0.011; % [mm] a-mått flänssvets
fu=510e6; % [Pa] Brottspänning svets stålqualität S355

L_liv = h_tvar - 2*(tf_tvar + R_tvar); % [m] Längd en sida svets på liv
L_flans = b_tvar - tw_tvar - 2*R_tvar; % [m] Längd svets på insida fläns

% Vid långa svetsar i överlappsskarvar kan i vissa fall inte hela
% svetslängden tillgodoräknas. Därför beräknas den nyttiga svetslängden
% enligt (S9-2) BK2
Beta_L_w1 = 1.2 - 0.2*L_liv/(150*a_liv);
if L_liv <= 150*a_liv
    L_liv_nyttig = L_liv;
elseif L_liv > 150*a_liv
    L_liv_nyttig = L_liv*Beta_L_w1;
end

% Spänningar från normalkraft (S9-3) BK2
sigma_vinkel_N = N_tvarb/(sqrt(2)*2*(L_liv*a_liv + L_flans*a_flans));
tau_vinkel_N = sigma_vinkel_N;

% Spänningar från tvärkraft (S9-1) BK2
tau_parallell_V = V_tvarb/(2*L_liv_nyttig*a_liv); % En svets på vardera sida liv

% Spänningar från moment (S9-3) BK2
M_kraft = M_tvarb/(h_tvar-2*tf_tvar); % [N] Kraft i fläns som uppstår
till följd av moment
sigma_vinkel_M = M_kraft/(sqrt(2)*L_flans*a_flans); % Ena flänsen (under eller över)
tau_vinkel_M = sigma_vinkel_M;

```

Spänning i liv

```

disp(['Svetstjocklek liv, a = ', int2str(a_liv*10^3), ' [mm]'])

% Belastande spänningar
sigma_vinkel_liv = sigma_vinkel_N;
tau_vinkel_liv = tau_vinkel_N;
tau_parallell_liv = tau_parallell_V;

% von-Mises effektivspänning
sigma_vm_liv=sqrt(sigma_vinkel_liv^2 + 3*(tau_vinkel_liv^2+tau_parallell_liv^2));

% Kapacitetskontroll liv
beta_w = 0.9; % Korrelationsfaktor för grundmaterial
gamma_M2 = 1.25; % Partialkoefficient
kapacitet_vm_liv = fu/(beta_w*gamma_M2);
if sigma_vm_liv <= kapacitet_vm_liv
    disp('Livsvetsar OK von-Mises')
else disp('Brott i livsvets pga von-Mises')
end
Ugrad_vm_liv = sigma_vm_liv/kapacitet_vm_liv;
disp( ['Utnyttjandegrad liv von-Mises: n = ', int2str(Ugrad_vm_liv*10^2), ' [%]'])

kapacitet_vinkel_liv = 0.9*fu/gamma_M2;
if sigma_vinkel_liv <= kapacitet_vinkel_liv
    disp('Livsvetsar OK vinkelrätt')
else disp('Brott i livsvets pga vinkelrätt')
end

```

```
Ugrad_vinkel_liv = sigma_vinkel_liv/kapacitet_vinkel_liv;
disp( ['Utnyttjandegrad liv vinkelrätt: n = ', int2str(Ugrad_vinkel_liv*10^2), '
[%]'])
```

```
Svetstjocklek liv, a = 3 [mm]
Livsvetsar OK von-Mises
Utnyttjandegrad liv von-Mises: n = 31 [%]
Livsvetsar OK vinkelrätt
Utnyttjandegrad liv vinkelrätt: n = 0 [%]
```

Kapacitetskontroll mest belastad fläns

```
disp(['svetstjocklek fläns, a = ', int2str(a_flans*10^3), ' [mm]'])

% Belastande spänningar
sigma_vinkel_flans = sigma_vinkel_M + sigma_vinkel_N;
tau_vinkel_flans = tau_vinkel_M + tau_vinkel_N;

% von-Mises effektivspänning
sigma_vm_flans=sqrt(sigma_vinkel_flans^2 + 3*(tau_vinkel_flans^2));

% Kapacitetskontroll fläns
beta_w = 0.9;           % Korrelationsfaktor för grundmaterial
gamma_M2 = 1.25;       % Partialkoefficient
kapacitet_vm_flans = fu/(beta_w*gamma_M2);
if sigma_vm_flans <= kapacitet_vm_flans
    disp('Flänssvetsar OK von-Mises')
else disp('Brott i flänssvets pga von-Mises')
end
Ugrad_vm_flans = sigma_vm_flans/kapacitet_vm_flans;
disp( ['Utnyttjandegrad fläns von-Mises: n = ', int2str(Ugrad_vm_flans*10^2), ' [%]'])

kapacitet_vinkel_flans = 0.9*fu/gamma_M2;
if sigma_vinkel_flans <= kapacitet_vinkel_flans
    disp('Flänssvetsar OK vinkelrätt')
else disp('Brott i flänssvets pga vinkelrätt')
end
Ugrad_vinkel_flans = sigma_vinkel_flans/kapacitet_vinkel_flans;
disp( ['Utnyttjandegrad fläns vinkelrätt: n = ', int2str(Ugrad_vinkel_flans*10^2), '
[%]'])
```

```
Svetstjocklek fläns, a = 11 [mm]
Flänssvetsar OK von-Mises
Utnyttjandegrad fläns von-Mises: n = 95 [%]
Flänssvetsar OK vinkelrätt
Utnyttjandegrad fläns vinkelrätt: n = 59 [%]
```

Published with MATLAB® R2020a

Bilaga M – Kapacitet för trågbalk och tvärbalk

Modell

I den preliminära dimensioneringen antas elastiskt böjmotstånd vid beräkning av momentkapaciteten, vilket medför en analys på säkra sidan då ingen flytkapacitet tillgodoräknas. Eftersom nedböjningen är det som huvudsakligen dimensionerar konstruktions-elementen kommer detta inte ha någon större effekt vid val av tvärsnittsutformningen. Vid beräkning av momentkapacitet för trågbalkarna används en reducerad hållfastighet eftersom flänstjockleken överstiger 40 mm. Den reducerade hållfastigheten används av beräkningstekniska skäl för hela tvärsnittet, vilket anses vara en godkänd förenkling eftersom flänsarna ger det största bidraget till yttröghetsmomentet. momentkapaciteten beräknades enligt kapitel S4.3 i Bärande konstruktioner del 1 (Al-Emrani et al., 2013).

Trågbalkarna förses med vertikala ändavstyvningar vid ändupplag och även tvärbalkarna anses försedda med vertikala ändavstyvningar i och med att de är fastsvetsade i trågbalkens liv. För trågbalkarna räknas livtjocklekarna samman vid beräkning av tvärkraftskapacitet samt vid analys om balken riskerar skjuvbuckling. Tvärkraftskapaciteten beräknades enligt kapitel S5.3 i Bärande konstruktioner del 1 (Al-Emrani et al., 2013).

Indata

- Geometri för tråg- och tvärbalkarna
- Flytgräns för stålqualität S355, $f_y = 355$ MPa, samt reducerad hållfastighet om godstjockleken överstiger 40 mm, $f_y = 335$ MPa.

Beräknas

- Moment- samt tvärkraftskapacitet för trågbalkar och tvärbalkar.
- Analys ifall skjuvbuckling inträffar för trågbalk eller tvärbalk.

Beräkning i MATLAB och resultat

Indata

```
% Stålkvalitet trågbalk S355
f_y_trag = 355e06;           % [Pa] Flytgräns
f_y_reducerad_trag = 335e06; % [Pa] Reducerad flytgräns då godstjockleken
överstiger 40mm

% Geometri för en trågbalk
hw_trag = 2.20;             % [m] Livhöjd
tw_trag = 0.015;           % [m] Livtjocklek
bf_trag = 0.96;            % [m] Flänsbredd
tf_trag = 0.08;            % [m] Flänstjocklek

I_trag = ((tw_trag*hw_trag^3)/12)*2 + 2*((tf_trag*bf_trag^3)/12 +
((hw_trag+tf_trag)/2)^2*tf_trag*bf_trag); % [m^4] Yttröghetsmoment
z = hw_trag/2+tf_trag;     % [m] Avstånd mellan tyngdpunkt och utsida fläns
w_trag = I_trag/z;         % [m^3] Elastiskt böjmotstånd

% Stålkvalitet tvärbalk S355
f_y_tvar = 355e06;         % [Pa] Flytgräns
```

```

f_y_reducerad_tvar = 335e06;          % [Pa] Reducerad flytgräns då godstjockleken
överstiger 40mm

% Geometri för IPE400
h_tvar = 0.4;          % [m]
tw_tvar = 8.6e-03;    % [m] Livtjocklek
tf_tvar = 13.5e-03;   % [m] Flänstjocklek
R_tvar = 21e-3;       % [m] Radie valsad plåt
hw_tvar = h_tvar-2*(tf_tvar+R_tvar);% [m] Livhöjd
w_tvar = 1160e-06;    % [m^3] Elastiskt böjmotstånd

% Konstanter
chi_LT = 1.0;
gamma_M1 = 1.0;
gamma_M0 = 1.0;

```

Momentkapacitet Tvärbalkar

```

% Bärande konstruktioner del 1 (BK1) ekv. S4-41
M_bRd_tvar = chi_LT*w_tvar*(f_y_tvar/gamma_M1);
disp(['Momentkapacitet Tvärbalk: M = ', int2str(M_bRd_tvar*10^3), ' [kNm]'])

```

Momentkapacitet Tvärbalk: M = 412 [kNm]

Tvärkraftkapacitet Tvärbalk

```

kappa_T_tvar = 5.34;          % Ändavstyvningar
epsilon_tvar = sqrt(235e06/f_y_tvar);
eta = 1.2;                    % För stål till och med S460

% Tvärkraftskapacitet utan risk för skjuvbuckling BK1 ekv. S5-18
A_v_tvar = eta*hw_tvar*tw_tvar;
V_p1Rd_tvar = (A_v_tvar*f_y_tvar)/(sqrt(3)*gamma_M0);

% Beräkning av tvärkraftskapacitet vid risk för skjuvbuckling BK1 ekv. S5-20
lambda_tvar = (hw_tvar/tw_tvar)/(37.4*epsilon_tvar*sqrt(kappa_T_tvar));

if lambda_tvar < 0.8/eta
    chi_w_tvar = eta;
elseif 0.8/eta <= lambda_tvar && lambda_tvar < 1.08
    chi_w_tvar = 0.83/lambda_tvar;
elseif 1.08 <= lambda_tvar
    chi_w_tvar = 1.37/(0.7+lambda_tvar);
end

% Tvärkraftskapacitet vid risk för skjuvbuckling BK1 ekv. S5-20
V_bwRd_tvar = (chi_w_tvar*hw_tvar*tw_tvar*f_y_tvar)/(sqrt(3)*gamma_M1);

% Kontrollerar om tvärbalken riskerar skjuvbuckling eller ej
if hw_tvar/tw_tvar <= 31*(epsilon_tvar/eta)*sqrt(kappa_T_tvar)
    disp(['Skjuvbuckling inträffar ej för tvärbalk'])
    V_tvar = V_p1Rd_tvar;
    disp(['Tvärfkraftskapacitet Tvärbalk: V = ', int2str(V_p1Rd_tvar*10^3), ' [kN]'])
else
    disp(['Skjuvbuckling inträffar för tvärbalk'])
    V_tvar = V_bwRd_tvar;
    disp(['Tvärfkraftskapacitet Tvärbalk: V = ', int2str(V_bwRd_tvar*10^3), ' [kN]'])

```

```
end
```

```
disp('-----')
```

Skjuvbuckling inträffar ej för tvärbalk
Tvärkraftskapacitet Tvärbalk: v = 700 [kN]

Momentkapacitet Trågbalkar

```
% Bärande Konstruktioner del 1 (BK1) ekv. S4-41  
M_bRd_trag = chi_LT*w_trag*(f_y_reducerad_trag/gamma_M1); % BK1 ekv. S4-41  
disp( ['Momentkapacitet Trågbalk: M = ', int2str(M_bRd_trag*10^-3), ' [kNm]'])
```

Momentkapacitet Trågbalk: M = 67578 [kNm]

Tvärkraftskapacitet Trågbalk

```
kappa_T_trag = 5.34; % Ändavstyvningar  
epsilon_trag = sqrt(235e06/f_y_trag);  
eta = 1.2; % För stål till och med S460  
  
% Tvärkraftskapacitet utan risk för skjuvbuckling ekv. S5-18  
A_v_trag = eta*2*hw_trag*tw_trag;  
V_p1Rd_trag = (A_v_trag*f_y_trag)/(sqrt(3)*gamma_M0);  
  
% Beräkning av tvärkraftskapacitet vid risk för skjuvbuckling BK1 ekv. S5-20  
lambda_trag = (hw_trag/(2*tw_trag))/(37.4*epsilon_trag*sqrt(kappa_T_trag));  
  
if lambda_trag < 0.8/eta  
    chi_w_trag = eta;  
elseif 0.8/eta <= lambda_trag && lambda_trag < 1.08  
    chi_w_trag = 0.83/lambda_trag;  
elseif 1.08 <= lambda_trag  
    chi_w_trag = 1.37/(0.7+lambda_trag);  
end  
  
% Tvärkraftskapacitet vid risk för skjuvbuckling BK1 ekv. S5-20  
V_bwRd_trag = (chi_w_trag*hw_trag*2*tw_trag*f_y_trag)/(sqrt(3)*gamma_M1);  
  
% Kontrollerar om trågbalken riskerar skjuvbuckling eller ej  
if hw_trag/tw_trag <= 31*(epsilon_trag/eta)*sqrt(kappa_T_trag)  
    disp(['Skjuvbuckling inträffar ej för trågbalk'])  
    V_trag = V_p1Rd_trag;  
    disp(['Tvärkraftskapacitet Trågbalk: v = ', int2str(V_p1Rd_trag*10^-3), ' [kN]'])  
else  
    disp(['Skjuvbuckling inträffar för trågbalk'])  
    V_trag = V_bwRd_trag;  
    disp(['Tvärkraftskapacitet Trågbalk: v = ', int2str(V_bwRd_trag*10^-3), ' [kN]'])  
end
```

Skjuvbuckling inträffar för trågbalk
Tvärkraftskapacitet Trågbalk: v = 10766 [kN]

Published with MATLAB® R2020a



CHALMERS