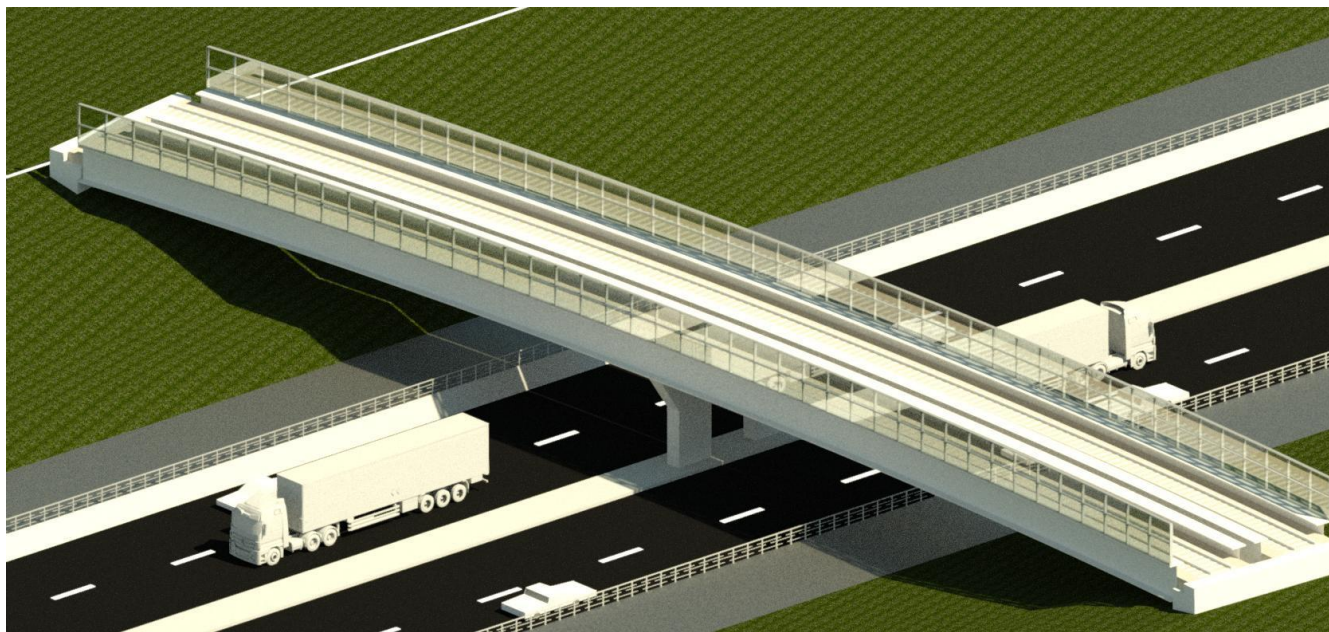




Brokoncept för dubbelspårig järnvägsbro över Backavägen

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

Leonid Burtcev
Albin Karlsson
Gustav Kullander
Jack Niemi-Impola
Alexander Sandström
Christer Trinh

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

Brokoncept för dubbelspårig järnvägsbro över Backavägen

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

Leonid Burtcev
Albin Karlsson
Gustav Kullander
Jack Niemi-Impola
Alexander Sandström
Chris Trinh

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2021

Brokoncept för dubbelspårig järnvägsbro över Backavägen

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

Leonid Burtcev

Albin Karlsson

Gustav Kullander

Jack Niemi-Impola

Alexander Sandström

Christer Trinh

© Leonid Burtcev, Albin Karlsson, Gustav Kullander, Jack Niemi-Impola, Alexander Sandström, Christer Trinh, 2021

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola, 2021

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

Omslag:
Visualisering av valt brokoncept.
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2021

Brokoncept för dubbelspårig järnvägsbro över Backavägen

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

Leonid Burtcev

Albin Karlsson

Gustav Kullander

Jack Niemi-Impola

Alexander Sandström

Christer Trinh

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Utifrån Göteborgs vision har beslut tagits gällande järnvägsspåret Bohusbanan som ska utvecklas vidare för att förbättra förbindelsen mellan Hisingen och centrala Göteborg. Beslutet är att utveckla vidare den enkelspåriga järnvägen som finns där idag till en dubbelspårig järnväg. Syftet med rapporten är att ta fram olika koncept för järnvägsbroar utifrån givna förutsättningar och krav. Arbetet inleddes med en litteraturstudie tillsammans med en förstudie av både området och olika brokoncept. För att få en mer utförlig undersökning skapades specialistgrupper inom kandidatgruppen i tre huvudområden: beställare/konstruktion, produktion samt förvaltning/underhåll.

Vid nästa skede skapades ett utvärderingsunderlag för att jämföra och vikta brokoncept mot varandra. Detta underlag delades upp i olika urvalsprocesser, där första urvalsprocessen fokuserade på krav gällande: spännvidd, fri höjd, geografiska förutsättningar och tekniska krav. De brokoncept som inte uppfyllde de nämnda kraven uteslöts och resterande broar jämfördes i den andra urvalsprocessen. Där skapades urvalskriterier utifrån specialistgruppernas huvudområden, dessa kriterier viktades mot varandra i en matris för att ge ett underlag för valet av slutgiltigt brokonceptet.

Det slutgiltiga brokonceptet är en trågbalkbro i stål med två ändstöd och ett mittstöd. Vidare utformning utfördes av brokonceptet vilket innefattar: överbyggnad, underbyggnad, lager och övergångskonstruktion, produktions- och förvaltningsplan. En preliminär dimensionering utfördes där bron beaktades i brott- och bruksgränstillstånd för kontroll av nedböjning, moment- och tvärkraftkapacitet.

Detta brokoncept är framtaget utifrån en begränsad analys och bör utvecklas vidare med mer ingående beräkningar och modeller för att få en fullständig analys.

Nyckelord: Bro, järnvägsbro, trågbalkbro, stålbro, preliminär dimensionering.

Bridge concept for double track railway bridge over Backavägen

Bachelor's thesis in Civil Engineering

Leonid Burtcev

Albin Karlsson

Gustav Kullander

Jack Niemi-Impola

Alexander Sandström

Christer Trinh

Department of Architecture and Civil Engineering
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

A decision has been made based on Gothenburg's vision to further develop the railway track Bohusbanan in order to improve the connection between Hisingen and the central parts of Gothenburg. The plan is to develop the existing single-track railway into a double-track railway. The purpose of this thesis is to present different railway bridge concepts based on given conditions and requirements. The study was initiated with a literature review in the field of bridges and construction requirements related to railway bridges. In order to obtain a more thorough understanding, specialized groups were created within the areas of client/ structural engineering, construction, management and inspection.

Furthermore, an evaluation basis was created to assess and compare bridges against each other. This evaluation was divided into two different stages. The focus of the first stage was on the bridge span, vertical clearance, geographical conditions, and technical requirements. The bridges that did not fulfil the requirements were excluded and the remaining bridges went to the next stage for further evaluation. In the second stage of evaluation, several criteria were created based on the specialization groups. These criteria were compared to each other in a matrix and were used to obtain the final railway bridge concept.

The final railway bridge concept was a trough bridge in steel with two end supports and one center support. The remaining design of the bridge included: superstructure, substructure, bridge bearing, transition structure, construction and management. A preliminary design was conducted where the railway bridge was studied in the ultimate limit state and in the serviceability limited state for controlling deflection, moment capacity and shear capacity.

This bridge concept is designed from a limited analysis and should be further developed with more advanced calculations and models for a more thorough analysis.

Key words: Bridge, railway bridge, trough bridge, steel bridge, preliminary dimensioning

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
FÖRORD	VII
BETECKNINGAR	VIII
1 INLEDNING	1
1.1 Syfte	1
1.2 Problembeskrivning	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Metod	2
1.5 Samhälleliga och etiska aspekter	2
2 FÖRUTSÄTTNINGAR	3
3 GRUNDASPEKTER FÖR URVAL	4
3.1 Beställare och konstruktion	4
3.1.1 Miljö och Hållbar utveckling	4
3.1.2 Ekonomi	4
3.1.3 Trafikanter uppfattning av miljön	5
3.1.4 Arbetsrisker och risker inom produktionen	5
3.1.5 Val av byggnadsmaterial från beställare/ konstruktörs synpunkt	5
3.2 Produktion	6
3.2.1 Produktionsmetoder	6
3.2.2 Produktionstiden	6
3.2.3 Transport av prefabricerade byggnadselement	7
3.3 Förvaltning och underhåll	7
3.3.1 Betong	7
3.3.2 Stål	7
3.3.3 Ballast	7
3.3.4 Inspektion	7
4 URVAL 1	9
5 URVAL 2	10
5.1 Fackverksbro i stål	10
5.1.1 Beställare och konstruktion	10
5.1.2 Produktion	10
5.1.3 Förvaltning och underhåll	11
5.2 Bågbro i stål	11
5.2.1 Beställare och konstruktion	12
5.2.2 Produktion	12

5.2.3	Förvaltning och underhåll	12
5.3	Trågbalkbro i armerad betong	12
5.3.1	Beställare och konstruktion	13
5.3.2	Produktion	13
5.3.3	Förvaltning och underhåll	13
5.4	Trågbalkbro i stål	14
5.4.1	Beställare och konstruktion	14
5.4.2	Produktion	14
5.4.3	Förvaltning och underhåll	14
5.5	Urvalskriterier	15
5.5.1	Valda urvalskriterier	15
5.5.2	Viktning av urvalskriterier	16
5.5.3	Utvärderingsmatris	16
5.5.4	Resultat från urval 2	16
6	FRAMTAGET BROKONCEPT	18
6.1	Överbyggnad	18
6.2	Underbyggnad	18
6.3	Lager och övergångskonstruktioner	19
6.4	Produktionsplan	19
6.5	Förvaltning	20
6.5.1	Tätskikt för ballast	20
6.5.2	Korrosionsskydd	20
7	PRELIMINÄR DIMENSIONERING	21
7.1	Dimensionering av trågbalkarna	21
7.1.1	Beräkningsmodell för trågbalkarna	21
7.1.2	Dimensionerande laster för trågbalkarna	22
7.1.3	Dimensionerande moment, tvärkraft och maximal tillåten nedböjning för trågbalkarna	22
7.1.4	Trågbalkarnas kapacitet	23
7.2	Dimensionering av tvärbalkarna	24
7.2.1	Beräkningsmodell för tvärbalkarna	24
7.2.2	Dimensionerande laster för tvärbalkarna	24
7.2.3	Dimensionerande moment, tvärkraft och maximal tillåten nedböjning för tvärbalkarna	24
7.2.4	Tvärbalkarnas kapacitet	25
7.3	Dimensionering av brobaneplattan	26
7.3.1	Beräkningsmodell för brobaneplattan	26
7.3.2	Dimensionerande laster för brobaneplattan	26
7.3.3	Dimensionerande moment, tvärkraft och maximal tillåten nedböjning för brobaneplattan	27
7.3.4	Brobaneplattans kapacitet	27
7.4	Dimensionering av svetsarna	28

8	DISKUSSION OCH SLUTSATS	29
8.1	Avgränsningar	29
8.2	Urval	29
8.3	Dimensionering	29
8.4	Slutsats	30
9	REFERENSER	31
	BILAGOR	34
	Bilaga A – Planritning för nya bron	34
	Bilaga B – Karta över platsen	35
	Bilaga C – Sektion för underliggande väg	36
	Bilaga D – Plankarta för området	37
	Bilaga E – Geotekniska förutsättningar (GEO PM)	38
	Bilaga F – Utformning av lager	41
	Bilaga G – Temperaturförlängning	42
	Bilaga H – karta med möjliga förbindelser till arbetsplatsen	43
	Bilaga I – Svets mellan trågbalk och tvärbalkar	44
	Bilaga J – Krav på fritt utrymme längs räls	45
	Bilaga K – Vertikala lasters excentricitet för Lastmodell 71	46
	Bilaga L – Modell för lastutbredning av punktlaster	47
	Bilaga M – Lastspridning i ballast för tvärbalkarna	48
	Bilaga N – Lastspridning i ballasten för brobaneplattan	49
	Bilaga O – Framtagande av dimensionerade laster	50
	Bilaga P – Dimensionering av trågbalkarna	55
	Bilaga Q – Dimensionering av tvärbalkarna	62
	Bilaga R – Dimensionering av brobaneplattan	66
	Bilaga S – Dimensionering av svetsar	70
	Bilaga T – Värden på permanenta laster	72
	Bilaga U – Bromodell	73

Förord

Rapporten är ett moment som sammankopplar gruppmedlemmarnas tre år på civilingenjörsutbildningen Samhällsbyggnadsteknik på Chalmers Tekniska Högskola. Rapportens syfte är att utbilda inom projektering och konstruktion av koncept för järnvägsbroar. Detta gav oss en större inblick inom ingenjörsmetodik och problemlösning inom samhällsbyggnad.

Vi vill tillägna ett stort tack till vår handledare Mario Plos, avdelningschef inom arkitektur och samhällsbyggnadsteknik och biträdande professor som har gett oss råd och vägledning. Vi vill även tacka universitetslektorn Josef Leppänen och brokonstruktören Anna Egefalk från företaget COWI för deras hjälp och stöd. Vi vill även passa på att tacka alla våra gästföreläsare.

Göteborg 2021

Leonid Burtcev, Albin Karlsson, Gustav Kullander, Jack Niemi-Impola, Alexander Sandström, Christer Trinh

Beteckningar

Grekiska versaler

α	Korrektionsfaktor	$[-]$
α_T	Längdutvidgningskoefficient	$[^{\circ}\text{C}^{-1}]$
ψ_0	Lastreduktionstal	$[-]$
ψ_1	Lastreduktionstal	$[-]$

Grekiska gemener

ΔT	Temperaturförändring	$[^{\circ}\text{C}]$
ΔL	Längdförändring	$[m]$

Latinska versaler

f_{yk}	Karakteristiskt flytvärde för stål	$[Pa]$
f_{uk}	Karakteristisk brottgräns för stål	$[Pa]$
q_{v1}	Utbredd last från tåg efter korrigering	$[N/m]$
q_{vk}	Utbredd last från tåg enligt Lastmodell 71	$[N/m]$

Latinska gemener

G	Egenlast	$[N/m]$
L	Längd	$[m]$
Q_{vk}	Punktlast enligt lastmodell 71	$[N]$
Q_{v1}	Punktlast efter korrigering	$[N]$

1 Inledning

Lundbyleden utgör en av de mer trafikerade lederna inom Göteborg där den anknyter landsvägarna E6, E20, E45 till väg 155 samt fungerar som en knutpunkt till Backaplan och Brunnsbo. Området utvecklas ständigt och med införandet av Marieholmstunneln behövs nya anpassningar av Lundbyleden inklusive dess närliggande vägar (Trafikverket, 2020a). Ett ökande antal människor i området har bidragit till mer aktivitet runt Backavägen vilket ökar behovet av en trafiksäker miljö. Trafikverket föreslår ett antal åtgärder för att underlätta för trafikanter, där ett av förslagen innefattar en ombyggnad av Lundbyleden (Trafikverket, 2017).

Järnvägen Bohusbanan, som sträcker sig mellan Göteborg och Strömstad, planeras få dubbla spår vid Brunnsbo. Detta för att minska störningskänsligheten och göra det enklare att röra sig mellan centrala Göteborg och olika delar av Hisingen, se bilaga A och B. Införandet av dubbelspår skapar även möjligheten för en framtida pendeltågsstation vilket medför en mer utbredd integrering av stadstrafiken på Hisingen (Trafikverket, 2020b).

1.1 Syfte

Projektet syftar till att ta fram ett brokoncept för en dubbelspårig järnvägsbro över Backavägen vilket dimensioneras med framtagna beräkningsmodeller. Konceptet tas fram som en del i arbetet för att förbättra förbindelserna mellan Hisingen och innerstaden.

1.2 Problembeskrivning

Uppgiften är att analysera förutsättningarna för platsen och ta fram en preliminär dimensionering av ett brokoncept. För att genomföra detta delades arbetet upp i delproblem enligt följande:

- Vilka brokoncept är rimliga för platsen och dess givna förutsättningar?
- Vilka urvalskriterier är relevanta för val av brokoncept?
- Vilket brokoncept är bästa alternativet?
- Hur ska brokonceptets dimensioner utformas?

1.3 Avgränsningar

I arbetet utfördes endast beräkningar och preliminär dimensionering för ett av de framtagna koncepten. Vidare togs geotekniska förutsättningar samt grundläggning i beaktning genom överskådlig analys istället för beräkningar. Vid beaktning av ekonomiska aspekter inom projekteringen togs inga ekonomiska kalkyler fram utan analyserades endast överskådligt. Rapportens fokus ligger främst på dimensionering av bron utifrån dimensionerande laster och lastfall, där dynamiska aspekter utesluts. Dessa avgränsningar gjordes för att minska omfattningen på arbetet.

1.4 Metod

Projektet sker i följande tre skeden: förstudie, val av brokoncept och dimensionering. Förstudien och val av brokoncept utförs i specialistgrupper vars områden är: beställare/konstruktion, produktion och förvaltning/underhåll.

- Förstudien omfattar undersökning av förutsättningar, krav, riktlinjer och centrala aspekter som tas till hänsyn under urvalsprocessen.
- Urvalsprocessen innefattar sammanställning av insamlat underlag för urvalsprocessen, framtagande av flera brokoncept och val av ett slutgiltigt brokoncept. I urvalsprocessen viktas förslagen mot varandra inom respektive kriterier framtagna av specialistgrupperna.
- I dimensioneringsdelen tas beräkningsmodeller fram utifrån det valda brokonceptet som används med framtagna laster och krav för att utföra den preliminära dimensioneringen. Resultaten redovisas i form av visualiseringar, skisser och grafer samt beräknade värden.

1.5 Samhälleliga och etiska aspekter

Göteborgs Stads vision är att förbättra närhet mellan områden för att skapa en sammanhängande stad. Målet är att skapa ett effektivare transportsystem mellan stadsområden som gör det möjligt för nybyggnation och genererar attraktiva stråk (Göteborgstad, 2016). I denna rapport beaktas Göteborgs stads vision om optimering av resande för olika trafikslag på och kring Backavägen. Undersökningar behöver genomföras för att kontrollera hur produktionsstadiet påverkar reseupplevelsen och miljön i området.

Vid beaktning av samhälleliga och etiska aspekter påverkas befolkningen inom området under både produktion och förvaltning av järnvägsbron. Under produktionens gång skapas obehag för boende och passerande i form av ljud och vibrationer från bygget. Inom vissa delar av produktionen stängs både bil- och järnväg vilket skapar trafikstörningar. På motsvarande sätt kommer liknande moment under förvaltningen att medföra liknande effekt.

Den färdigställda bron påverkar allmänheten genom dess utformningen, estetik och sammansmältning med området. Därmed behöver dessa samhälleliga aspekter vägas mot kostnad och övriga faktorer vid planering av bron.

Utförandet av kandidatarbetet kommer inte ha någon anmärkningsvärd påverkan med hänsyn till samhälleliga eller etiska aspekter. Detta eftersom fysiska tester eller intervjuer inte kommer genomföras, utan rapporten enbart behandlar teori och dimensionering.

2 Förutsättningar

Järnvägsbron ska sträcka sig över Backavägen där vägen anknyter till Lillhagsvägen, se bilaga B. I dagsläget finns redan en enkelspårig järnväg som går längs marken på platsen, den planeras att ersättas med en dubbelspårig järnvägsbro över vägbanan med en spännvidd på 90 meter. Själva vägbanan ska ha två filer åt båda håll inklusive gång och cykelbana. Erforderlig byggnadshöjd baseras på topologin i området samt förhållandet mellan räls och väg, se bilaga A och C. Den fria höjden under bron ska enligt planritning vara minst 5,7 meter över körfältet och minst 2,5 meter över gång- och cykelbanan. Spåren utformas med 6,7 meters avstånd mellan dess mittpunkter och ska ha ett avstånd på minst 3,5 meter från mittpunkten till broräcket, se bilaga A.

Rälsen utformas som en kurva med ungefär 2,5 meter förskjutning i sidled över det 90 meter långa brospannet. Krökningen är fast och påverkar valet av brokonstruktion. Rälsen ska placeras på slipers med 0,6 m tjockt lager ballast under rälsen för att minska vibrationer och säkerställa en stabil gång för de genomgående tågen (Trafikverket, 2018).

Lermäktighet i området varierar upp till 60m där järnvägen korsar Backavägen, se bilaga E. Av den orsaken bör upplag och pelare grundläggas med påldäck och stödpålar. Grundvattennivån i området ligger en meter under markytan, se bilaga E.

3 Grundaspekter för urval

Inför urvalsprocessen presenteras de aspekter som viktas från varje specialistgrupp: beställare/konstruktion, produktion och förvaltning/underhåll.

3.1 Beställare och konstruktion

Beställare har uppgiften att ta tillvara på företagets och samhällets intressen vid val av brokoncept. I rapporten behandlas ekonomi, trafikanter, risker samt miljö och hållbarhet.

3.1.1 Miljö och Hållbar utveckling

Utformningen av bron påverkar den sociala hållbarheten, hur folk uppfattar bron och dess påverkan på boendemiljön. Bron bör ge en känsla av trygghet och öppenhet i stället för att skapa barriärer (M. Plos, personlig kommunikation, 3 mars, 2021). Vid projekteringen av en bro tas påverkan av byggnationen på miljö under brons livslängd i åtanke.

Under broprojektering ligger fokuset främst på buller och produktion eftersom bron planeras att byggas i närheten av ett tätortsområde nära en högt trafikerad väg. Dimensioneringen av bron planeras utifrån hållbarhetsaspekter med vikt på rationell användning av material. I tidigare skeden av broprojekteringen analyseras arbetsrelaterade risker som kan uppkomma vid byggnationen, som förebyggs för att säkerhetsställa en säker arbetsmiljö (Trafikverket, 2018).

3.1.2 Ekonomi

Den ekonomiska aspekten är en av de mest väsentliga aspekterna i urvalsprocessen, kostnader för projektet ska vara väl anpassat efter behov och långsiktig ekonomisk lönsamhet. Ekonomin för ett broprojekt beräknas främst utifrån tre delar: investeringskostnad, drift- och underhållskostnad samt livscykelkostnad (Trafikverket, 2018).

Enligt Trafikverket (2018) innefattar investeringskostnaden material- och produktionskostnad vilket påverkas mest i tidiga skeden av broplaneringen vid val av brotyp, material och produktionsmetod. I investeringskostnaden ingår leverans och produktionsförseningar samt eventuella arbetsolyckor. Drift- och underhållskostnaden för en järnvägsbro innefattar alla kostnaderna som uppkommer efter att en bro är färdigbyggd, exempelvis kostnaderna för inspektion, reparation och rivning (Trafikverket, 2018). Livscykelkostnad (LCC) är en metod där kostnader mellan olika broar jämförs över en specifik period. LCC består av tre kostnadstyper: beställarkostnader, användarkostnader och samhällskostnader. Beställarkostnader efterliknar investeringskostnader samt innefattar drift och underhåll av bron under dess livstid. Användarkostnader är platsberoende och innefattar förseningskostnader, vägomläggning på grund av brobygge samt skador på människor eller fordon som passerar arbetsplatsen. Samhällskostnader är däremot riktade mot olyckor förknippade med anläggning, vilka är svåra att förutse och beräkna i förväg (Trafikverket, 2018).

Broar delas även in i grupper av komplexitet. Där grupp A är komplicerad komplexitet, grupp B är normal komplexitet, grupp C är enkel komplexitet och grupp D är mycket enkel komplexitet. En ökad komplexitet innebär en dyrare bro (Trafikverket, 2019).

3.1.3 Trafikanterers uppfattning av miljön

Säkerheten för både bilister och gångtrafikanter är en av de mest väsentliga aspekterna vid broprojekteringen. Bron projekteras genom att tillse en säker passage för alla trafikanter både under byggnationen och vid användningen av bron (Trafikverket, 2018). Utrymmet under bron bör eftersträva klar sikt med öppna ytor för att skapa en trygg känsla hos trafikanter (M. Plos, personlig kommunikation, 3 mars, 2021). Känslan förstärks genom användning av separata körfält samt planskild lösning mellan bilister och oskyddade trafikanter vilket skapar goda säkerhetsförmågor.

3.1.4 Arbetsrisker och risker inom produktionen

Enligt broprojekteringshandboken (Trafikverket, 2018) finns risker under produktionen för arbetsrelaterade skador, risker för förseningar vilket ökar lagerkostnader samt ökar produktionstiden. Det finns även risker för felkonstruktion vilket kan leda till en minskad bärförmåga och ökad kostnad. Under förvaltning och underhåll av konstruktionen finns risker för att underhållet inte är tillräckligt och kan leda till en avkortad livslängd för bron. Dessutom finns risker att material för underhåll kan vara dyrare än tidigare beräknat vilket leder till en ökad total kostnad (M. Plos, personlig kommunikation, 3 mars, 2021).

3.1.5 Val av byggnadsmaterial från beställare/ konstruktörs synpunkt

Vid beaktning av materialval utifrån en beställares behov bör man välja de material som är mest ekonomiskt lönsamma och skonsamma för miljön.

Stål

Stål används ofta av miljöskäl på grund av dess långa livslängd och enkelhet att återanvända (Trafikverket, 2018). Minimering av miljöpåverkan kan åstadkommas genom användning av återvunnet stål, eftersom stor del av koldioxidutsläppen sker vid resursuttaget av stål.

Armerad betong

Betong används ofta på grund av dess beständighet och långa livslängd, där livslängden oftast avgörs av armeringens korrosion. Betongen kan dessutom produceras i en mängd hållfasthetsklasser vilket påverkar materialåtgång.

Vid framställning av betong och armeringsstål krävs mycket energi. I fallet av betong sker energiåtgången främst vid tillverkningen av cement samt vid transporter, detta leder till utsläpp av koldioxidekvivalenter (Trafikverket, 2018). Däremot har betong mindre energiåtgång per bärförmåga än stålkonstruktioner (Al-Emrani et al., 2019). Mängden utsläpp kan minskas genom att exempelvis använda alternativa bindemedel, mindre cement eller genom att använda transporter med klimatneutralt utsläpp. Vid rivandet av konstruktionen kan betongen användas som fyllnadsmaterial och armeringen återanvändas (Trafikverket, 2018).

3.2 Produktion

Vid val av produktionsmetod är det viktigt att ta hänsyn till flera olika aspekter under brobyggandet: säker arbetsmiljö, hållbar produktionsmetod, förutsägbar tidsåtgång och låg tillverkningskostnad (M. Karlsson, Föreläsning: Produktionsmetoder, 23 februari, 2021).

3.2.1 Produktionsmetoder

Järnvägsbroar dimensioneras med en teknisk livslängd på 120 år därav diskuteras endast produktionsmetoder för stål och betong, då träkonstruktioner inte uppnår den livslängden (Trafikverket, 2018).

Platsgjutna betongelement

Tillverkning av platsgjutna betongelement utförs genom att formar konstrueras på produktionsplatsen som därefter gjuts och rivs när betongen hårdnat tillräckligt. Produktionsmetoden medför att gjutningen blir anpassningsbar eftersom gjutformarna kan formas efter konstruktionens behov (M. Karlsson, Föreläsning: Produktionsmetoder, 23 februari, 2021). Metoden är däremot tids- och platskrävande samt väderberoende vilket medför att oönskade förseningar kan förekomma. Konstruktioner kan behövas täckas över vilket möjligtvis resulterar i en högre totalkostnad än beräknat för byggnationen.

Prefabricerade betongelement

Prefabricerade betongelement är fabriksstillverkade och transporteras till arbetsplatsen. Betongelementen monteras samman med den övriga konstruktionen med en lämplig metod (Abetong, u.å.). Tillverkningen av betongelement i fabrik ger möjlighet att säkerställa bättre kvalitet jämfört med platsgjuten betong. Detta eftersom gjutningen genomförs i en kontrollerad inomhusmiljö och blir inte väderberoende vilket medför mindre risk för förseningar i produktionen (Khan, 2014). Med prefabricering kan betongelementen produceras i ett tidigt skede och därefter transporteras till arbetsplatsen. Detta medför en mer tidseffektiv montering vilket kan innebära kortare produktionstid. Däremot blir prefabricering av betongelement mindre anpassningsbart jämfört med platsgjutna betongelement (M. Karlsson, Föreläsning: Produktionsmetoder, 23 februari, 2021).

Stål

Stål är ett material som ofta används vid konstruktion av broar på grund av sin höga hållfasthet och seghet (Chen & Duan, 2014). Olika typer av konstruktionsstål används under produktionsstadiet beroende på förutsättningar och regleringar. Stål är relativt enkel vid användning inom produktion, demontering och återanvändning av materialet. En stålbro utgör däremot större risk för utmattning jämfört med en samverkansbro på grund av ökande spänningar vid varierande trafiklast som orsakas av stålbrons lägre egenvikt (Pipinato, 2016).

3.2.2 Produktionstiden

Produktionstiden påverkas främst av vald produktionsmetod. Platsgjuten betong bidrar till en längre produktionstid än prefabricerad betong. Vilket i sin tur leder till störningar för omgivningen under en längre tid samt en högre produktionskostnad.

3.2.3 Transport av prefabricerade byggnadselement

Vid tillverkning av prefabricerade byggnadselement i fabrik transporteras elementen ut till arbetsplatsen. De prefabricerade elementens storlek och vikt begränsas ofta av transportmöjligheter.

3.3 Förvaltning och underhåll

Ett grundläggande krav vid utformningen av en bro är att den konstrueras på ett sätt som inte skapar alltför stora förhinder för drift och underhåll. Målet är att upprätta en bro där inspektioner enkelt kan genomföras med en garanti för säkerhet för de som genomför arbetet samt för trafikanterna som passerar under underhållsarbetets gång (Trafikverket, 2018).

3.3.1 Betong

För konstruktioner med armerad betong erfordras främst reparationer av sprickor, avskalning eller korrosion av armeringen. Större sprickor medför en risk av fuktinsläpp vilket ökar risken för korrosion av armeringen. För att underhålla detta kan betongblandning injiceras i sprickan för att göra konstruktionen tät mot inträngning av klorider. Om själva armeringen har utsatts för större korrosionspåfrestningar kan det krävas att delar av betongen tas bort för att restaurera armeringen inom det utsatta området, där ny betong gjuts på i efterhand (Duan, 2019).

3.3.2 Stål

Stålkonstruktioner behöver korrosionsskydd som ska förnyas flera gånger under dess livstid (Trafikverket, 2018). För stålkonstruktioner där olika typer av förband används är det viktigt att dessa kontrolleras för att se till att de behåller sin funktion. De vanligaste kontrollerna för stålkonstruktioner är kontroll av sprickor i svetsar samt förekomst av lösa skruvar eller nitar i tvärsnitt och förband (Maxstadh, 2018). Då stål är ett relativt lättböjligt material är det även viktigt att kontrollera nedböjning av stålkonstruktioner för kontroll av konstruktionens funktion. Speciellt för järnvägsbroar där små nedböjningar kan leda till stora påverkningar på rälsens funktion (A. Egefalk, personlig kommunikation, 3 mars, 2021).

3.3.3 Ballast

Ballasten under rälsen agerar som ett ”mekaniserat” spårunderhåll eftersom ballasten består av ett rörligt material. Vid underhåll av bron medför ballast en förenklad förflyttning av spårbanan (Trafikverket, 2018).

3.3.4 Inspektion

Inspektioner utförs olika utförligt vid olika tillfällen under brons livslängd. Den mest utförliga typen är huvudinspektioner, dessa ska utföras innan bron tas i bruk och sedan med maximalt sex års mellanrum. Under en huvudinspektion inspekteras brons samtliga åtkomliga ytor. Syftet är att hitta och bedöma alla brister som kan höja underhållskostnaderna för bron inom en tioårsperiod. Samtliga inspektioner ska utföras handnära om inte visuella inspektioner kan utföras med samma noggrannhet (Trafikverket, 2015b).

Enligt Trafikverket (2015b) planeras nästa inspektionsskede och utförligheten på inspektionen baserat på huvudinspektionen. Under inspektionen tilldelas olika delar i

konstruktionen olika tillståndsklasser (0–3). Om en del i bron bedöms till tillståndsklass 2 ska delen kontrolleras maximalt tre år efter inspektionen är utförd. Delar som bedöms till tillståndsklass 3 måste utredas inom tre månader, dessa brister kontrolleras i en särskild inspektion som omfattar endast de berörda delarna. Delar som tilldelats tillståndsklass 0 och 1 under huvudinspektionen kan allmänna inspektioner göras inom sexårsperioden till nästa huvudinspektion. Allmän inspektion är en visuell inspektion av konstruktionens samtliga delar, vars syfte är att upptäcka brister som kan höja förvaltningskostnader om de inte upptäckts innan nästa planerade huvudinspektion (Trafikverket, 2015b).

4 Urval 1

De mest grundläggande krav som behövs uppfyllas vid val av järnvägsbro är spännviddskrav och den fria höjden under brobanan. Brokonstruktionsförslag som inte uppnår spännviddskraven eller kräver ett underliggande huvudbärverk som inskrider på den fria höjden valdes bort. Brotyper som inte är lämpliga eller kräver komplexa lösningar vid utformning av en krökt brobana valdes även bort. Slutligen granskades brotypernas potential gällande estetik samt teknisk komplexitet för att få fram ett urval av de mest passande brokoncepten för platsen.

Utifrån dessa grundläggande krav har fyra preliminära broförslag för Backavägen tagits fram för vidare utvärdering i nästa urvalsprocess:

- Fackverksbro i stål som sträcker sig över hela spännvidden
- Bågbro i stål som sträcker sig över hela spännvidden
- Trågbalkbro i betong med tre stöd, två på var sin sida av vägen och ett i mitten av vägbanan
- Trågbalkbro i stål med ett stöd i mitten av vägbanan

Notera att flera brokoncept var passande för de givna förutsättningarna men endast fyra valdes ut till urval 2, se tabell 1.

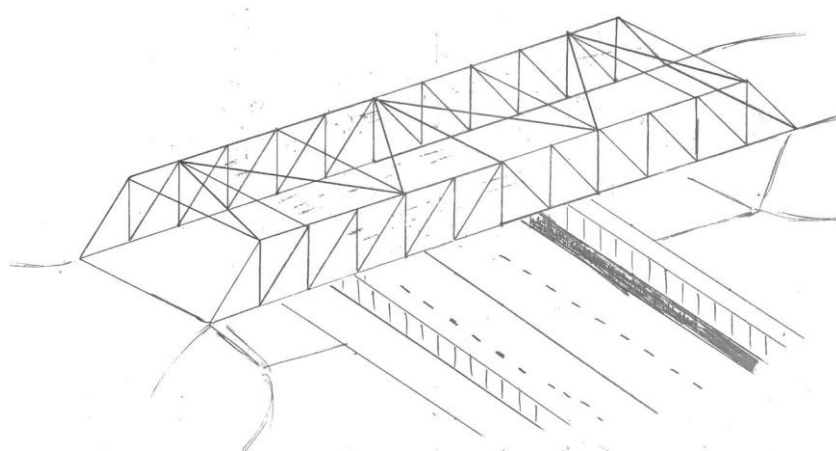
Tabell 1: Tabellen visar alla brokoncept som var med i urval 1 och de valda brokoncepten

Brotyp	Material	Normal spännvidd	Uppfyller given spännvidd	Uppfyller given bygghöjd	Övriga kommentarer	Valda brokoncept
Balkbro	Betong, slakarmerad	10 - 25 m		X		
Balkbro	Betong, Spännarmerad	25 - 200 m	X	X		
Balkbro	Stål	0 - 80 m	X			
Trågbalkbro	Betong, slakarmerad	10 - 25 m		X	Vanlig för järnvägsbroar	
Trågbalkbro	Betong, Spännarmerad	25 - 200 m	X	X	Vanlig för järnvägsbroar	X
Hängbro	Stål	100 - 1200 m		X		
Bågbro i stål	Stål	50 - 200 m	X	X		X
Bågbro i betong	Betong	60 - 300 m	X	X		
Snedkabelbro	Stål	100 - 400 m		X		
Trågbalkbro	Stål	0 - 80 m	X	X	Vanlig för järnvägsbroar	X
Fackverksbro	Stål	20 - 100 m	X	X		X
Lådbalkbro	Betong	40 - 65 m	X			
Lådbalkbro	Stål	0 - 80 m	X			
Trågbro med låda	Betong	40 - 65 m	X			
Trågbro med låda	Stål	0 - 80 m	X			
Trågbro med stålalkar (Samverkans bro)	Betong och stål	20 - 70 m	X			

5 Urval 2

Urval 2 motsvarar det slutgiltiga valet där en brokonstruktion valdes ut för att sedan genomgå preliminär dimensionering. Urvalsprocessen baserades på mallen som förekommer i Broprojekteringshandboken (Trafikverket, 2018), där värdet av olika kriterier övervägdes och därefter utfördes en analys för att besluta om den mest lämpliga lösningen. Kriterierna är uppdelade inom tre huvudområden efter specialistgrupperna: beställare/konstruktion, produktion och förvaltning/underhåll. Varje specialistgrupp tog upp ett antal kriterier för respektive broförslag som sedan summerades i en tabell. Därefter viktades broförslagen mot varandra för att se förslagets styrkor respektive svagheter.

5.1 Fackverksbro i stål



Figur 1: Preliminär skiss av fackverksbron i stål

Fackverksbron består av stänger i olika profiler som huvudsakligen tar upp laster i drag och tryck. I detta koncept konstrueras fackverket med en underliggande brobana för att kravet på den fria höjden under bron ska uppnås. Fackverksbron är utformad likt en rektangulär box som huvudbärverk. Bron har en krökt brobana vilket medför att fackverksbrons utformning måste vara bredare än minimikravet på brobredden.

5.1.1 Beställare och konstruktion

Fackverksbron kräver inte ett mittstöd vilket ger ett fritt utrymme under bron och bidrar till en trygghetskänsla. Avsaknaden av mittstöd medför dessutom att trafiksäkerheten ökar eftersom fordon inte kan kollidera med stödet. Fackverksbroar kräver stora mängder material i form av stål och har en grupp A komplexitet vilket bidrar till en högre kostnad (Trafikverket, 2019). Dessutom kräver stål mycket energi vilket bidrar till klimatpåverkan med varierande grad beroende på vald produktionsteknik och framställning av material. Underhållet medför även stora kostnader samt har en negativ miljöpåverkan (Trafikverket, 2018).

5.1.2 Produktion

Vid produktionen av fackverksbron sker tillverkningen på förhand i fabrik vilket effektiviserar produktionstiden, då det befintliga spåret måste stängas av under byggtiden. Beställaren gör ett urval av stålmaterial och en blandning av

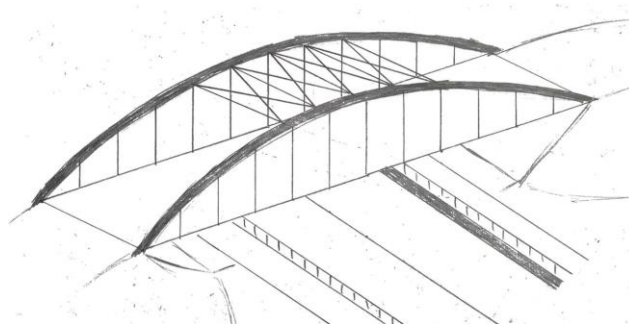
specialbeställda material med standardiserade komponenter används. Det kan ta veckor för stålkomponenter att komma i produktion och detta beror bland annat på tjocklek av materialet, kvalitet och marknadsförhållandet. Efter beslut fattats i förarbetet påbörjas avskärning och sammanslagning av material med hjälp av svetsning eller bultning (Chen & Duan, 2014). De geografiska förhållandena samt vägförbindelser avgör hur stålkomponenterna kan transporteras, se bilaga H. Om byggarbetsplatsen inte ger möjligheten till att transportera stålkomponenterna ihopsatta, behövs svetsning ske på plats. Detta leder till användning av temporära byggställningar.

5.1.3 Förvaltning och underhåll

Fackverksbron utmärks av det stora antalet sammansatta element i fackverksstrukturen vilket kräver infästningar av exempelvis svetsförband eller skruvförband. Dessa infästningar skapar många kritiska punkter som ur en underhållssynpunkt måste vara lättåtkomliga och kunna granskas under inspektion (A. Egefalk, personlig kommunikation, 3 Mars, 2021). Eftersom bron är en stålkonstruktion krävs korrosionsskydd som behöver målas på flera gånger under fackverksbrons livslängd.

Om bron under sin livstid belastas med större laster än den konstruerats för kan det lösas med olika metoder. För större ökningar av pålagda laster kan kapaciteten hos konstruktionen ökas genom att byta ut delar eller komplettera med påläggsplåtar. Instabilitet eller bucklingsfenomen kan motverkas genom att förstärka konstruktionen med avstyvningar eller genom installation av extra stag för att minska effektiva längder (Trafikverket, 2011b). Broar dimensioneras idag för större laster än vad som faktiskt verkar på dem, detta tillåter att lasterna kan ökas något utan att några strukturella åtgärder måste utföras (Trafikverket, 2020c).

5.2 Bågbro i stål



Figur 2: Preliminär skiss av bågbro i stål

För att klara den fria höjden är bågbro utformad med överliggande bågar vid sidorna med en brobaneplatta i mitten. Bågarna tar upp horisontella reaktionskrafter som förs över i tryck och brobaneplattan är sammankopplad med bågarna som genom linor tar upp laster i dragspänning (Chen & Duan, 2000). Både bågarna och brobaneplattan är tillverkade i stål och beroende på brons styvhet möjliggörs upptagning av de dimensionerande lasterna. En styv brobaneplatta möjliggör slanka bågar och analogt krävs tjocka bågar för en mindre styv brobaneplatta. På grund av att bågen och brobaneplattan samverkar bör utformning optimeras för att uppfylla kraven på beständighet och kostnadskrav.

5.2.1 Beställare och konstruktion

Bågbroar byggs generellt med en spännvidd över 60 meter och tar bort behovet av ett mittstöd. Därmed blir bågbron en estetiskt tilltalande lösning vilket är en av de främsta anledningarna som bågbroar används (Trafikverket, 2018). Utan mittstöd ökar även trafiksäkerheten och trygghänsen för trafikanter. En bågbro är dyr i produktionen, i materialkostnader och har enligt Trafikverket (2018) en grupp A komplexitet vilket ytterligare ökar kostnaderna. Utifrån ett miljöperspektiv är bågbron ett sämre alternativ på grund av dess höga koldioxidutsläpp från stålproduktionen. Däremot är stål fördelaktigt i ett hållbarhetsperspektiv eftersom möjlighet finns att återanvända stålet. Underhållet kommer också att öka kostnader och påverkar miljön negativt.

5.2.2 Produktion

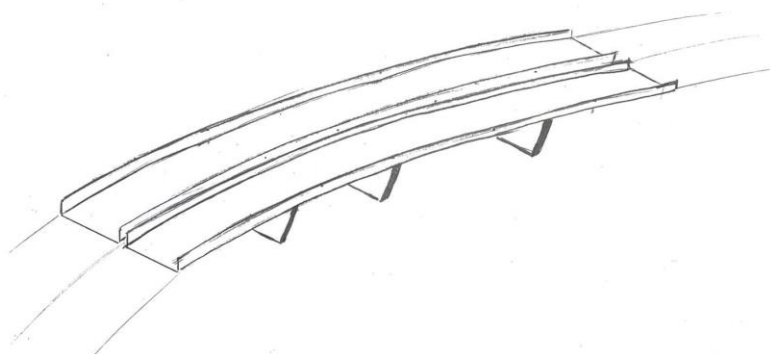
Under produktionen ställs krav på effektivitet vid montering för att minimera tiden spåret är avstängt. Delar för bågen och däckets tillverkas därför i fabrik och monteras ihop på byggarbetsplatsen. Valt däck antas vara tillräckligt stabilt och att den kan klara av böjmoment separat, något som möjliggör placering av däckets på tillfälliga stöd (Lebet & Hirt, 2013). När däckets är på plats monteras stålågarna och linorna på sidorna.

5.2.3 Förvaltning och underhåll

Likt fackverksbron krävs inspektion vid infästningarna mellan stålelementen. Den höga höjden på konstruktionen medför även att mer resurser krävs för att kunna genomföra inspektioner på de övre delarna på bron. Detta medför en ökad risk inom arbetsmiljön för underhållsarbetet (A. Egefalk, personlig kommunikation, 3 Mars, 2021).

För bågbron gäller samma åtgärder som för fackverksbron vid önskad ökning av last på bron i framtiden. Det vill säga byta ut eller tillföra påläggsplåtar för att öka kapaciteten och sätta in avstyvningar, alternativt staga upp konstruktionen för att motverka instabilitet och buckling (Trafikverket, 2011b). Stålet i konstruktionen kräver korrosionsskydd som behöver målas på flera gånger under brons livslängd (Trafikverket, 2018).

5.3 Trågbalkbro i armerad betong



Figur 3: Preliminär skiss av trågbalkbron i armerad betong

Trågbalkbron i betong konstrueras med två olika tråg, ett för varje spår och med förspänd armerad betong. Bron konstrueras i en kontinuerlig balk över hela

spännvidden med stöd placerade i mitten mellan de underliggande vägarna. Bron har även ett stöd på vardera sida om gång- och cykelbanorna för att hålla spännvidderna till en normalnivå för denna typ av brokonstruktion. Valet av tre stöd uppkommer från begränsningar av spännvidd för betongelement kombinerat med utbredningen av underliggande väg.

5.3.1 Beställare och konstruktion

Trågbalkbro i betong har tre stöd vilket medför ett mer instängt område som kan framhäva en känsla av otrygghet, samtidigt som risken för trafikolyckor och olyckslaster ökar. De separata trågen medför större säkerhet samt underlättar för underhåll och reparation med minimala tågtrafikstörningar. Trågbalkbron kommer att konstrueras med förspänd armering vilket ökar komplexiteten. Framtagning av armerad betong kräver mindre energi än stålkonstruktioner. Vid rivning av bron finns möjlighet att återvinna stålarmeringen och krossa delar av betongkonstruktionen till ballast. Konstruktionen av bron är förhållandevis kostnadseffektiv på grund av dess relativt låga materialkostnad och att bron ingår i grupp B komplexitet (Trafikverket, 2019).

5.3.2 Produktion

Trågbalkbro i betong produceras som en platsgjuten konstruktion då formen kan byggas efter krökningen på rälsen för att minska den totala bredden på bron och materialåtgången. Bron tillverkas i två separata tråg med ett tråg per spårbana. Trågbalkarna och brobanan platsgjuts i ett stycke över fyra spann för att skapa en kontinuerlig bro. Armeringen efterspanns därefter för att klara spännvidderna i mittspannen, som blir ca 30 meter långa (Trafikverket, 2018).

Vid produktion av bron krävs omfattande formbyggnation och temporära konstruktioner för att stödja bron tills betongen hårdnat tillräckligt (Mats Karlsson, Föreläsning; Produktionsmetoder, 23 februari, 2021). I samband med platsgjutningen av bron sker mycket transporter av material till arbetsplatsen vilket medför trafikstörningar.

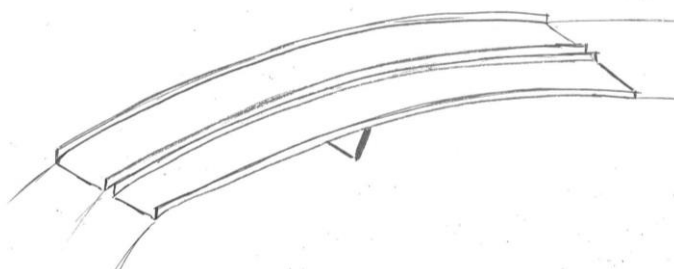
5.3.3 Förvaltning och underhåll

Bron är uppdelad i fyra spann vilket medför att det finns tre pelare som även behöver underhållas. Betongpelare nära vägar måste impregneras på grund av att vägmiljön medför en risk för vattenstänk på närliggande konstruktionsdelar (Trafikverket, 2006). Ytterligare ett problem som kan förekomma är yttre skador orsakat av kollisioner från trafiken där delar av betongen lossnar (A. Egefalk, personlig kommunikation, 3 Mars, 2021). Beroende på omfattningen av skadan måste betong gjutas på de skadade delarna och hållfastheten måste kontrolleras.

Inspektionen av trågbalksbroar med järnväg medför svåra underhållsmoment för att undersöka materialet under ballasten. Vid en noggrann inspektion måste järnvägstrafiken stängas av och ballasten föras bort för att inspektera önskat område. För en dubbelspårig järnväg blir därmed två separata tråg att föredra eftersom en av banorna kan vara i funktion medan den andra inspekteras, vilket innebär att tågtrafiken inte stängs av fullständigt (Trafikverket, 2018).

Vid behov av ökad moment- eller tvärkraftskapacitet i balken kan man komplettera med: pågjutning av armering, vertikala byglar, tilläggning av utanpåliggande spännarmering alternativt pålimmande av kolfiberprodukter (Trafikverket, 2011b).

5.4 Trågbalkbro i stål



Figur 4: Preliminär skiss av trågbalkbron i stål

Trågbalkbron i stål utformas likt trågbalkbron i betong i två olika tråg. För att få normala spännvidder placeras ett stöd i området mellan de två underliggande vägarna.

5.4.1 Beställare och konstruktion

Trågbalkbrons mittstöd kommer skapa ett mer slutet område vilket minskar trygghetskänslan hos trafikanter, ökar risken för biltrafikolyckor samt utsätter bron för olyckslaster. De separata trågen medför större säkerhet och minimerar tid där järnvägen är avstängd för underhåll. Hållbarhets aspekter är likt övriga broar i stål men trågbalkbron är mer resurseffektiv och har en grupp B komplexitet (Trafikverket, 2019).

5.4.2 Produktion

Trågbalkbron tillverkas i två tråg med prefabricerade balkelement. De prefabricerade balkelementen transporteras till arbetsplatsen, där de svetsas ihop till broelement. Broelementen lyfts på plats med kran över de färdiga och temporära stöden innan de sammanfogas till en kontinuerlig bro. Svetsningarna som sker på plats har ofta sämre kvalité än de i fabrik. Elementen tillverkas i fabrik för att minimera antalet svetsningar som utförs på byggarbetsplats (Lebet & Hirt, 2013). Tillfälliga konstruktioner som skyddar mot väder behövs för att säkerställa en god kvalité vid sammansvetsningen av balkelement.

5.4.3 Förvaltning och underhåll

Underhållskomplikationer som uppkommer för stål centrerar sig kring inspektionen av stålet under ballasten likt trågbalkbron i betong. Stålblåten förses invändigt med ett skikt som skyddar både mot ballast och korrosion, medan de yttre delarna målas med korrosionsskydd. Inspektionen av trågets insida blir komplicerat eftersom järnvägen stängs av och ballasten plockas bort för att genomföra en noggrann inspektion. Med ett överliggande skikt ballast blir det viktigt att bron har en liten lutning samt ytavlopp för att vattnet ska rinna ut och inte ligga kvar under ballasten vilket bidrar till korrosion (Trafikverket, 2018).

För trågbalkbron i stål kan samma åtgärder göras som för de övriga konstruktionerna i stål för att öka dess moment- och tvärkraftskapacitet efter behov (Trafikverket, 2011b).

5.5 Urvalskriterier

Urval 2 är det slutgiltiga urvalet där en utvärderingsmall användes för att bedöma broförslagen. Utvärderingen utfördes enligt Broprojekteringshandbokens mall (Trafikverket, 2018) och kompletterades med valda urvalskriterier som viktades mot varandra. Urvalsprocessen blev en iterativ process där bedömningen anpassades utifrån uppdaterad kunskap och förutsättningar för projektet. Det är viktigt att ta hänsyn till att poängen som ges från viktningsmatrisen är ett verktyg för bedömning av lämpligt brokoncept och att bron med högst antal poäng inte nödvändigtvis blir slutgiltigt broförslag.

5.5.1 Valda urvalskriterier

Totalt används elva urvalskriterier som står till grund för bedömningen av broförslagen. Varje specialistgrupp tog fram de kriterier inom respektive huvudområde som ansågs vara mest relevanta och berörde de viktigaste faktorerna angående uppförandet av en bro.

Beställare och konstruktion

- **Ekonomi:** Kostnaderna av hela konstruktionen vid projektering, produktion och förvaltning.
- **Miljö och hållbarhet:** Miljöpåverkan som bron medför vid byggskedet och resten av dess livslängd.
- **Säkerhet:** Säkerheten av produktionen och driften av bron, gällande krockrisk samt arbetsrelaterade skador.
- **Eстетik:** Hur konstruktionen ser ut samt anpassar sig till område och landskap.
- **Teknisk komplexitet:** Hur svår bron är att projektera och beräkna.

Produktion

- **Produktionsteknik:** Val av metod för att optimera produktionsutförande och kostnad.
- **Arbetsmiljö:** Produktionen sker på ett säkert sätt och bidrar inte till negativa effekter på arbetsmiljön.
- **Byggnadstid:** Produktionstiden ska optimeras och sker enligt tidsplan.

Förvaltning och underhåll

- **Inspektion:** Hur komplicerad och avancerad inspektionsarbetet av bron är.
- **Underhåll:** Hur mycket underhåll som förväntas för brokonceptet.

Risikanalys

- **Risker:** Samtliga risker som uppstår under brokonceptets livslängd, från projektering till underhåll och rivning.

Kriterierna täcker inte alla möjliga faktorer utan dem är utvalda utifrån det som presenterats i rapporten och anses vara mest väsentliga.

5.5.2 Viktning av urvalskriterier

Vid utförandet av urvalet enligt Broprojekteringshandboken (Trafikverket, 2018) vägdes de olika utvärderingskriterierna först mot varandra för att avgöra de viktigaste kriterierna i form av en viktningsfaktor. Viktningsfaktorn användes sedan vid valet av brokoncept.

Tabell 2: Viktningsmatris där 1 = mindre viktig, 2 = lika viktig, 3 = mer viktig,

$$\alpha = \frac{\text{poäng}}{\text{områdets poäng}}, \beta = \frac{\text{områdets poäng}}{\text{alla poäng}}$$

Område	Utvärderingskriterie	Kriterie vs kriterie											Poäng	α	β	Viktfaktor
		1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)	8)	9)	10)	11)	SUM(1-11)			
Beställare/konstruktion	1) Ekonomi		3	2	3	3	3	2	1	3	3	1	24	26%		10,9%
	2) Miljö och hållbarhet	1		1	3	3	2	1	1	3	2	1	18	19%		8,2%
	3) Säkerhet	2	3		3	3	3	2	2	3	3	2	26	28%		11,8%
	4) Estetik	1	1	1		2	1	1	1	2	1	1	12	13%		5,5%
	5) Teknisk komplexitet	1	1	1	2		2	1	1	2	2	1	14	15%	43%	6,4%
Produktion	6) Produktions teknik	1	2	1	3	2		1	2	3	3	1	19	27%		8,6%
	7) Arbetsmiljö	2	3	2	3	3	3		3	3	3	2	27	39%		12,3%
	8) Byggnadstid	3	3	2	3	3	2	1		3	2	2	24	34%	32%	10,9%
Förvaltning och underhåll	9) Inspektion	1	1	1	2	2	1	1	1		2	1	13	45%		5,9%
	10) Undehåll	1	2	1	3	2	1	1	2	2		1	16	55%	13%	7,3%
Risikanalys	11) Risker	3	3	2	3	3	3	2	2	3	3		27	100%	12%	12,3%

5.5.3 Utvärderingsmatris

För att isolera ett av broalternativen bedömdes brokoncepten utifrån hur väl de uppfyller respektive urvalskriterium. Detta kombinerat med de procentuella värdena från viktningen av urvalskriterierna skapar en poäng för varje brokoncept som motsvarar hur bra alternativ de är, högre poängssumma motsvarar ett bättre broalternativ.

Tabell 3: Utvärderingsmatris med betyg från 0 – 4 där 0 = otillfredsställande, 1 = acceptabelt med tvekan, 2 = tillräckligt bra, 3 = bra och 4 = Mycket bra.

Utvärderingskriterie	Viktfaktor	Fackverksbro		Bågbro		Trågbalkbro i armerad betong		Trågbalkbro i stål	
		Betyg	Viktat värde	Betyg	Viktat värde	Betyg	Viktat värde	Betyg	Viktat värde
1) Ekonomi	10,9%	1	0,109	1	0,109	4	0,436	3	0,327
2) Miljö och hållbarhet	8,2%	2	0,164	2	0,164	3	0,245	3	0,245
3) Säkerhet	11,8%	4	0,473	3	0,355	1	0,118	3	0,355
4) Estetik	5,5%	2	0,109	4	0,218	1	0,055	1	0,055
5) Teknisk komplexitet	6,4%	3	0,191	2	0,127	1	0,064	3	0,191
6) Produktionsteknik	8,6%	2	0,173	1	0,086	3	0,259	2	0,173
7) Arbetsmiljö	12,3%	2	0,245	1	0,123	2	0,245	3	0,368
8) Byggnadstid	10,9%	2	0,218	1	0,109	1	0,109	2	0,218
9) Inspektion	5,9%	1	0,059	2	0,118	3	0,177	2	0,118
10) Underhåll	7,3%	2	0,145	2	0,145	4	0,291	2	0,145
11) Risker	12,3%	3	0,368	3	0,368	2	0,245	3	0,368
	Summa		2,255		1,923		2,245		2,564
	Ranking		2		4		3		1

5.5.4 Resultat från urval 2

En slutgiltig rankning av de fyra brokoncept togs fram utifrån viktningsskriterier för utvärderingskriterierna i kombination med en analys över förhållandet av brokoncept till kriterierna.

1. Trågbalkbro i stål
2. Fackverksbro
3. Trågbalkbro i armerad betong
4. Bågbro

Trågbalkbro i stål är enligt processen det bästa alternativet eftersom den generellt sett har bra genomgående värden i alla urvalskriterier. Framför allt har den bra värden i de

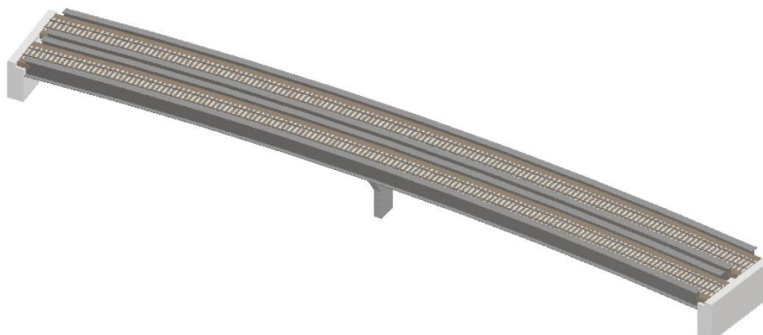
fem urvalskriterierna som värderades högst: ekonomi, säkerhet, arbetsmiljö, byggnadstid och risker.

Konceptets styrkor kommer fram i att den är enkel att tillverka med färdiga balkelement som är förproducerade samt att bron utformas utan strukturdelar ovanpå bron. Detta underlättar produktionsfasen genom att minska byggnadstiden samtidigt som den ger bra arbetsförhållanden. Konceptet är även ett bra ekonomiskt alternativ, med överkomliga kostnader i samtliga faser. Trågstrukturen är optimerad för järnväg eftersom den ger ett färdigt utrymme för ballasten. Uppdelningen i två tråg löser även eventuella trafikförhinder under inspektion och underhåll på grund av möjligheten att nyttja en bana när den andra är stängd.

Avslutningsvis med hänsyn till vad som tidigare nämnts rapporten valdes trågbalkbron i stål som slutgiltigt konceptet och togs vidare till dimensioneringsfasen.

6 Framtaget brokoncept

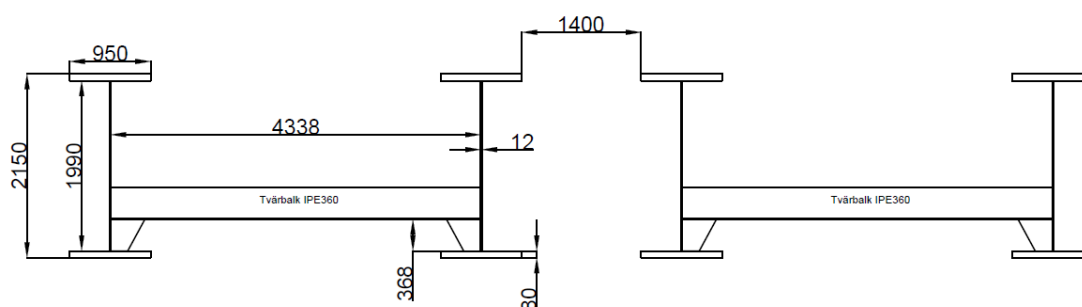
Valt brokoncept blir två separata trågbalksbroar som kommer att byggas parallellt med varsitt mittstöd. Spännvidden på spannen kommer att vara ca 45 m på var sida om stöden, där båda broarna förankras i gemensamma ändstöd på varje sida.



Figur 5: Bilden visar modellen över det framtagna brokonceptet

6.1 Överbyggnad

Överbyggnaden av trågbalkbron består av längsgående trågbalkar och tvärgående balkar med avstyvningar som bär upp brobanan. Brobanan under ballasten består av stålplåtar som svetsas samman med varandra och de längsgående trågbalkarna. Balkelementen till överbyggnaden prefabriceras för att sedan transporteras till byggnationsplatsen. Där svetsas elementen ihop till tre färdiga broelement som sedan lyfts på plats och svetsas ihop till en kontinuerlig brokonstruktion. Avvattning av tråget sker genom ytavlopp placerade mellan varje tvärbalk enligt rådande krav (Trafikverket, 2019). Anslutningarna mellan tvär- och trågbalkarna svetsas ihop enligt figur 6 och svetsarnas dimensioner är framtagna enligt kapitel 7.4 *Dimensionering av svetsarna*. Dimensioner på slippers som förekommer på tågbanan är 225x225x3000 (Rundvike Poles, u.å.). Ballasten under den är fylld till 0,6 m ovanpå brobaneplattan och rälsen har en spårvidd på 1,435 m enligt SS-EN 1990 (Svenska institutet för standarder, 2014). Både avståndet mellan slippers och avståndet mellan tvärbalkar är 0,6 m.



Figur 6: Tvärsnitt av bärande överbyggnad

6.2 Underbyggnad

Trågbalkbrons underbyggnad kommer främst bestå av stöd. Ändstöden utformas sådana att brofästena kan ta upp lasterna från överbyggnad samt de horisontella lasterna från marken. Mittstöden består av en pelare i betong under vardera tråg som

gjuts på plats. Stödets uppgift är att överföra trafiklasten från överbyggnad till underbyggnad och sedan ner till grundläggningen (Trafikverket, 2018).

6.3 Lager och övergångskonstruktioner

Lager används i brobyggnationer för kraftöverföring från överbyggnad till underbyggnad. De lagren som används är fasta och rörliga lager, där fasta lager överför vertikala samt horisontella krafter och rörliga lager överför enbart vertikala krafter (Trafikverket, 2018). Konstruktionens lager utformas enligt bilaga F för att förhindra spänningar i konstruktionen och för att upprätthålla avstånd mellan brobanorna.

Övergångskonstruktionens främsta syfte vid järnvägsbroar är att minimera inverkan av brons rörelser på spåret (Trafikverket, 2018). Eftersom båda ändarna har rörliga lager kommer en övergångskonstruktion per ände att behövas. Vid användning av övergångskonstruktion med genomgående ballast är det enbart tillåtet att ha en maximal rörelselängd på $(\Delta L) = 80 \text{ mm}$ (Trafikverket, 2018). För beräkning av rörelselängd per sida användes följande formel:

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{L \cdot \alpha_T} \quad (1)$$

I bilaga G framgår det att maximal rörelselängd inte kommer uppnås och därmed kan övergångskonstruktionen med genomgående ballast användas.

6.4 Produktionsplan

Produktionsplanen består av huvudfaserna: förarbete, grundläggning, byggfas och efterarbete. Förarbetet börjar med logistik där goda förutsättningar för respektive produktionsmetod skapas. Transportförbindelser för produktionen kan ske genom Lillhagsvägen och eventuellt genom Östra Magårdsvägen som är i god anslutning med byggarbetsplatsen och Lundbyleden, se bilaga H. Det kommer placeras arbetsmaskiner, byggnadsmaterial och arbetsbodar på ytan mellan befintlig järnväg och Östra Magårdsvägen. Vid planering av mark beaktas markförstärkande metoder såsom pålning, spontning och schaktning av jord.

Transport av brodelar som tillverkas i fabrik ska ske kontinuerligt för att effektivisera montering av bron då den ska svetsas ihop på plats. Totala längden på bron innebär att den produceras i tre olika delar för att undvika sammanfogning av i de snitten där stora moment uppstår. Längden på trågbalkarna medför att de måste transporteras med specialtransport medan längden på tvärbalkarna möjliggör transporter till arbetsplatsen med vanlig lastbilstransport. Även brobaneplattan i stål och avstyvningar prefabriceras och transporteras ut till arbetsplatsen med vanlig transport.

Grundläggning sker med spetsbärande betongpålar med stålspets som installeras genom användning av pålmaskin. Lerpropp eller augerborrning utförs innan installation av pålar för att minimera jordens rörelser i sidled samt minskad påverkan kring närliggande byggnader (J. Leppänen, Föreläsning: Grundläggning, landfasten, 16 februari 2021). Pålning sker i områden där stöden placeras och slås till stopp för att sedan kapas.

Byggskedet av bron börjar med att mittstöden och ändstöden gjuts på plats samt att lager och övergångskonstruktioner monteras. Först svetsas trågbalkarna och tvärbalkarna ihop, se bilaga I för utformning av svetsarna. Sedan läggs brobanan ovanpå tvärbalkarna och svetsas samman med både trågbalkarna och tvärbalkarna. Brodelarna lyfts på plats med kran över de tillfälliga stöden, därefter svetsas broelementen samman till en kontinuerlig bro. Svetsarna som uppstår i skarvarna mellan trågbalkarna sker med stumsvetsar enligt kraven för brobyggande (Trafikverket, 2019). Svetsarnas dimensioner antas större än livets godstjocklek med starkare material, därmed dimensioneras dessa inte ytterligare.

Efter byggskedet tas resterande maskiner och material bort för att återställa platsen. Slutligen installeras tekniska delar i form av ledningar och belysning samt bullerskydd på bron.

6.5 Förvaltning

Förvaltning av bron har tidigare presenterats i avsnitt 3.3 och avsnitt 5.4.3 där genomgång av underhåll av betong, stål, ballast och inspektion har tagits upp.

6.5.1 Tätskikt för ballast

Inuti trågbalkbron kommer ballasten att ge upphov till mekanisk nötning. För att undvika denna nötning appliceras ett flytande tätskikt av polyuretan som skyddar insidan av tråget. Tätskiktets tjocklek ska vara minst 5mm tjockt och fungerar även som korrosionsskydd för ståltråget. Tätskiktsunderhåll hamnar under särskild inspektion vilket innebär att det utförs i kombination med huvudinspektionen som sker var sjätte år (Trafikverket, 2011a). Det kan även inspekteras med tätare intervall utifrån upphandlingar mellan aktörer.

6.5.2 Korrosionsskydd

För att förebygga korrosionsskador på bron målas tre skyddslager på de yttre brodelarna. Första lagret består av en grund av zink som har vidhäftande effekt samt skyddar mot korrosion. Andra lagrets uppgift är att skapa ett tjockare lager för att göra korrosionsskyddet mer resistent. Sista lagret appliceras för att skydda de underliggande lagren mot utemiljön samt UV-strålning, detta lager kan innehålla järnoxid eller flagor av aluminium. Även andra ämnen tillsätts i yttersta lagret för att ge lagret en specifik färg eller struktur (J Lebet & M Hirt, 2013). Korrosionsskydd faller in på särskildinspektion.

7 Preliminär Dimensionering

Vid den preliminära dimensioneringen beaktades endast överbyggnadens delar. Delarna består av: trågbalkar, tvärbalkbalkar, brobaneplatta samt svetsade anslutningarna mellan tvär- och trågbalkarna. En lämplig beräkningsmodell togs fram för varje element och undersöktes i tre olika lastfall: två i brottgräns och ett i bruksgräns. Brottgränsfallen användes för att ta fram moment- samt tvärkraftdiagram och bruksgränsfallet används för att anpassa balken efter nedböjningskrav. Nedböjningskravet för överbyggnadens delar är enligt SS-EN-1990 (Svenska institutet för standarder, 2014) satt till delens längd dividerat med 600. Dynamiska krafter som berör bron togs inte med i den preliminära dimensioneringen. Beräkningen utfördes i MATLAB med hjälp av CALFEM-manualen (Lund universitet, 2004). Samtliga beräkningar och kommenterade MATLAB-koder är bifogade i bilaga O – S.

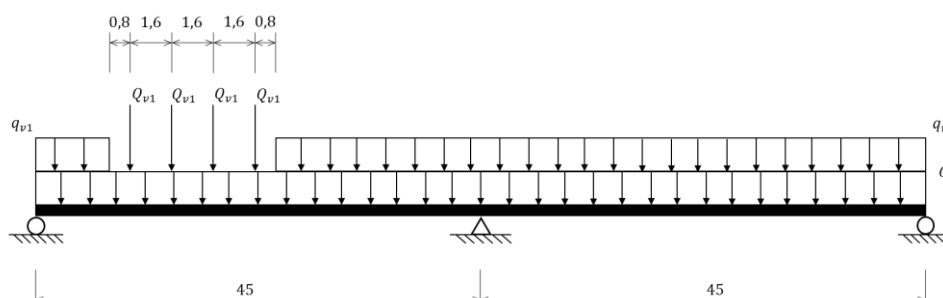
Utöver att brons samtliga delar skulle stå emot de laster som den belastats med, finns även krav på fri höjd under bron samt fritt utrymme längs spåret. Kravet för fritt utrymme längs spåret utgick ifrån mått enligt Trafikverkets standard, se bilaga J.

7.1 Dimensionering av trågbalkarna

Trågbalkarnas dimensionering innefattar framtagning av beräkningsmodell och laster som stod till grund för dimensionerande värden av moment, tvärkraft och nedböjning. Balkarnas kapaciteter beräknades och i en jämförelse med de dimensionerande värdena togs utnyttjandegrader fram.

7.1.1 Beräkningsmodell för trågbalkarna

Beräkningsmodellen för vald brokonstruktion är framtagen utifrån Lastmodell 71 enligt SS-EN 1991-2 (Svenska instituten för standarder, 2011) vilket är anpassat för järnvägsbroar vid störst belastning enligt figur 6 nedan. Punktlaster (Q_{vk}) motsvarar tillsammans loket och kan placeras på alla delar av balken beroende på vilket lastfall som undersöks. Den utbredda variabla lasten (q_{vk}) motsvarar övriga vagnar som befinner sig i anknytning till loket. Den utbredda permanenta lasten (G) motsvarar brokonstruktionens egenvikt vilket inkluderar själva trågbalken, tvärbalken, brobaneplattan, ballasten och rälsen med slipers. Bron är kontinuerlig med rullstöd i båda ändar och ett mittstöd som hindrar rörelse i horisontalled. Enligt Lastmodell 71 används $Q_{vk} = 250 \text{ kN}$ och $q_{vk} = 80 \text{ kN/m}$ som grundvärden för de pålagda lasterna.



Figur 6: Globala beräkningsmodellen för en trågbalk i stål. Notera att den ej är skalenlig.

7.1.2 Dimensionerande laster för trågbalkarna

Beräkningsmodellen för de dimensionerande lastfallen delas upp i permanent- och variabelast. Permanentlasten motsvarar egentygden vilket innefattar egentygnd från: trågbalk, tvärbalk, brobaneplatta, ballast samt slipers med räls. Variabellasten motsvarar trafiklasten (Q_{vk}, q_{vk}) som förekommer enligt lastmodell 71 och multipliceras med en korrektionsfaktor $\alpha = 1,33$ som är anpassat för vanlig tågtrafik (Svenska instituten för standarder, 2011). En excentricitet uppstår vid järnvägen som orsakar att lasten påfrestar en av trågbalkarna mer än den andra, se bilaga K. För att hitta dimensionerande lastfallet kombineras permanent- och variabelast enligt bilaga O och dess storheter redovisas i tabell 4 nedan.

Tabell 4: Dimensionerande laster för trågbalkarna

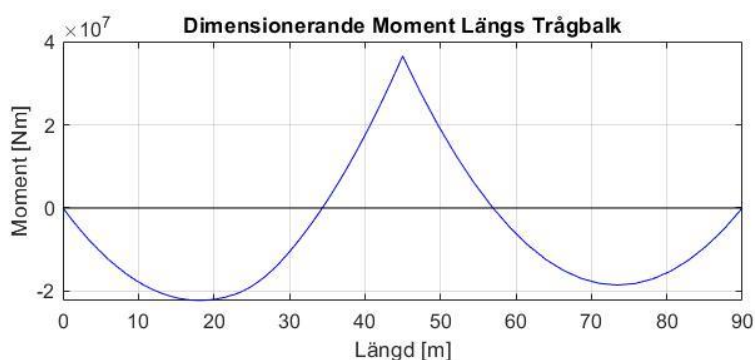
	Permanentlast	Variabellast	Ψ_0	Ψ_1	G [kN/m]	Q_{v1} [kN]	q_{v1} [kN/m]
Brottgräns 6.10 a)	1,35	1,5	0,8	-	59,655	206,81	66,180
Brottgräns 6.10 b)	0,89*1,35	1,5	-	-	53,093	258,52	82,725
Frekvent kombination (Bruksgräns)	1,0	1,0	-	0,8	44,189	137,87	44,120

7.1.3 Dimensionerande moment, tvärkraft och maximal tillåten nedböjning för trågbalkarna

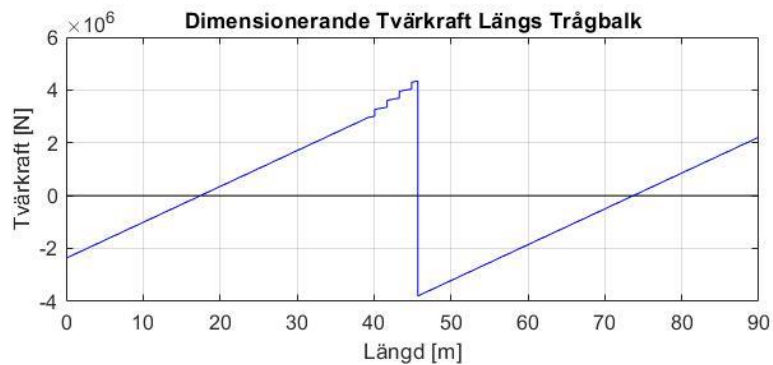
Lastfallet 6.10 b) gav upphov till störst momentet och tvärkraft i brottgräns, dessa värden redovisas i tabell 5 tillsammans med den maximalt tillåtna nedböjningen. Momentfördelningen för fallet med maximalt moment redovisas enligt figur 7 och sker när loket befinner sig mellan ett av ytterstöden och mittstödet. Dimensionerande tvärkraft fås när loket befinner sig precis bredvid mittstödet och ger upphov till tvärkraftsfördelning enligt figur 8. Beräkningsgång för de dimensionerande värdena återfinns i bilaga P.

Tabell 5: Dimensionerande moment, tvärkraft och maximal tillåten nedböjning för trågbalkarna

Dimensionerande moment [kNm]	Dimensionerande tvärkraft [kN]	Maximal tillåten nedböjning [mm]
36 550	4 341,1	75



Figur 7: Momentkurva baserad på dimensionerande lastfall för trågbalkarna



Figur 8: Tvärkraftkurva baserat på dimensionerande lastfall för trågbalkarna

7.1.4 Trågbalkarnas kapacitet

Trågbalkarna sträcker sig över en spännvidd på 90 meter vilket medför att balkens tvärsnitt inte standardiserats utan behövdes anpassas specifikt för situationen.

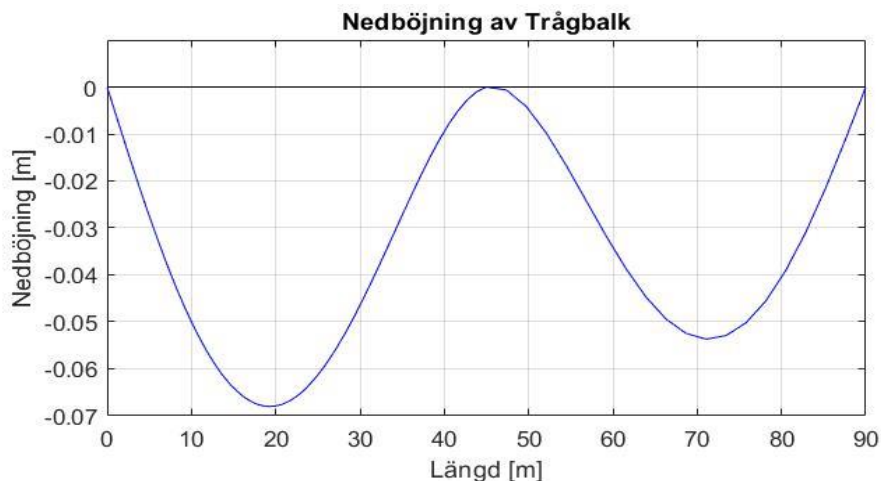
Slutgiltiga dimensioner för trågbalkarna redovisas i kapitel 6.1. Stålets hållfasthetsklass är S355, hållfastheten reduceras till

$f_{yk} = 335 \text{ MPa}$ på grund av att flänsens godstjocklek överstiger 40mm (Al-Emrani et al., 2019). Trågbalkarnas moment och tvärkraftskapacitet beräknades enligt bilaga P.

Nedböjning dimensioneras i bruksgräns medan moment och tvärkraft dimensionerades i brottgräns. Slutgiltiga värden för trågbalkarnas kapacitet samt utnyttjande grad redovisas i tabell 6 och nedböjningen i figur 9.

Tabell 6: Trågbalkarnas kapacitet och utnyttjandegrad

	Moment [kNm]	Tvärkraft [kN]	Nedböjning [mm]
Kapacitet	53 222	5 542,4	75
Dimensionerande	36 550	4 341,1	68
Utnyttjandegrad	68,67 %	78,32 %	90,72 %



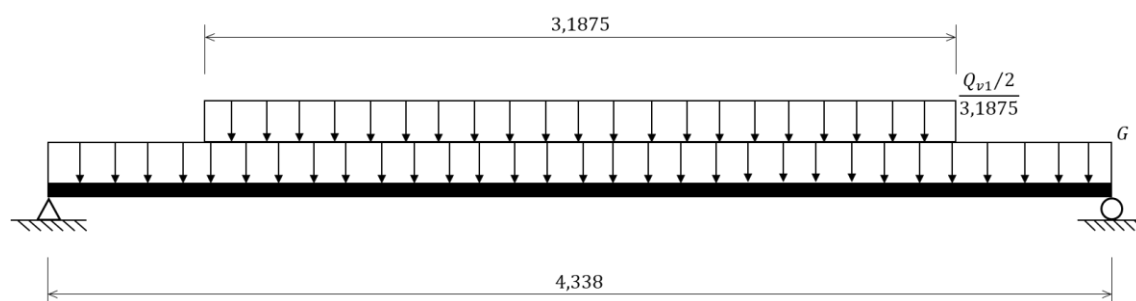
Figur 9: Trågbalkens nedböjning i längdled

7.2 Dimensionering av tvärbalkarna

Vid dimensionering av tvärbalkarna framtogs beräkningsmodell och laster på samma vis som för trågbalkarna. Dimensionerande värden för moment, tvärkraft, nedböjning samt tvärbalkarnas kapaciteter beräknades för att få fram utnyttjandegrader.

7.2.1 Beräkningsmodell för tvärbalkarna

Vid dimensioneringen av tvärbalkar användes modellen för lastfördelning i spårets riktning för lastmodell 71, samt modellen för lastspredning genom sliprar och ballast som beskrivs i SS-EN-1991-2 (Svenska institutet för standarder, 2011), se bilaga L. Tvärbalkarna som är svetsade kan beräknas både som fast inspända och fritt upplagda då svetsinfästningen resulterar i en inspanning någonstans mellan dessa upplag. För dimensioneringen av tvärbalkarna beräknades de som fritt upplagda, se figur 10, då detta resulterar i den största tvärkraften, momentet och nedböjningen i balkarna.



Figur 10: Beräkningsmodell för dimensionering av trågbalkarna

7.2.2 Dimensionerande laster för tvärbalkarna

Avståndet mellan tvärbalkarna är 0,6 m och permanentlasten hos en tvärbalk motsvarar egentyngden som verkar inom detta avstånd. Egentyngden innefattar tvärbalk, brobaneplatta, ballast samt slipers med räls. Trafiklasten som verkar på tvärbalken motsvarar en halv punktlast ($Q_{v1}/2$) enligt bilaga L. Trafiklasten sprider sig ner genom ballasten enligt bilaga M och medför en utbredd last på tvärbalken med längd 3,1875 m. Trafiklasten multiplicerades med korrektionsfaktorn $\alpha = 1,33$ och de dimensionerande lastfallen räknades ut enligt bilaga O och redovisas i tabell 7.

Tabell 7: Dimensionerande laster för tvärbalkarna

	Permanentlast	Variabellast	Ψ_0	Ψ_1	G [kN/m]	Q_{v1} [kN]
Brottgräns 6.10 a)	1,35	1,5	0,8	-	11,707	399
Brottgräns 6.10 b)	0,89*1,35	1,5	-	-	10,419	498,750
Frekvent kombination (Bruksgräns)	1,0	1,0	-	0,8	8,6719	266

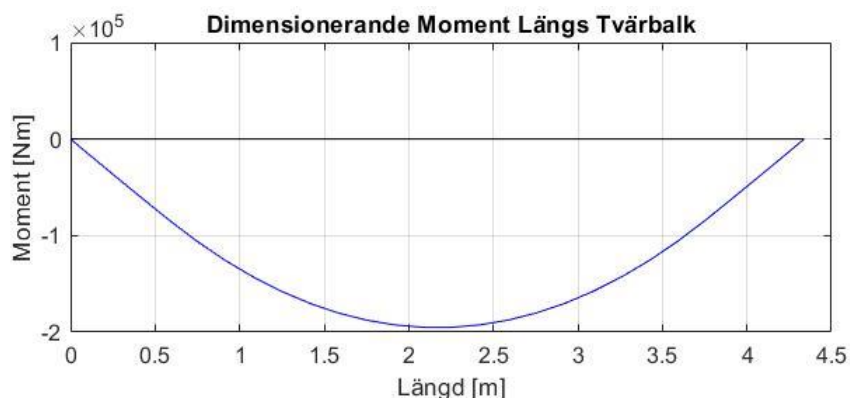
7.2.3 Dimensionerande moment, tvärkraft och maximal tillåten nedböjning för tvärbalkarna

För att få fram den dimensionerande kraften och momentet i tvärbalken som beräknades i bilaga Q användes lastfallet 6.10 b). Det dimensionerande momentet och

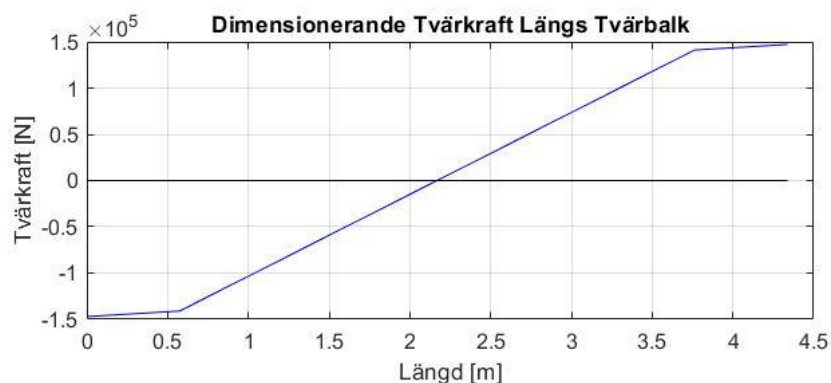
den dimensionerande tvärkraften samt den maximalt tillåtna nedböjningen redovisas i tabell 8. Moment- och tvärkraftsfördelning redovisas i figur 11 och 12.

Tabell 8: Dimensionerande moment, tvärkraft och maximal tillåten nedböjning för trågbalkarna

Dimensionerande moment [kNm]	Dimensionerande tvärkraft [kN]	Maximal tillåten nedböjning [mm]
195,28	147,29	7,23



Figur 11: Momentkurva baserad på dimensionerande lastfall för tvärbalkarna



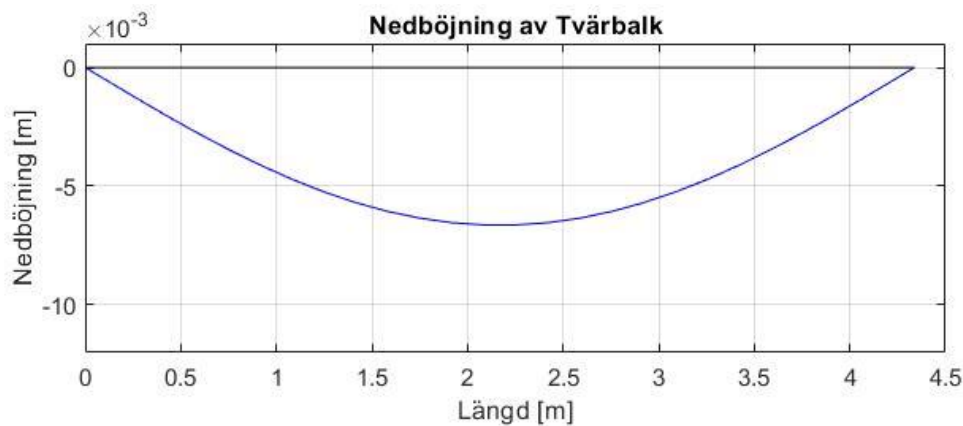
Figur 12: Tvärkraftkurva baserad på dimensionerande lastfall för tvärbalkarna

7.2.4 Tvärbalkarnas kapacitet

För tvärbalkarna användes valsade tvärsnitt med samma stålqualität som för trågbalkarna. Tvärbalkarnas kapacitet redovisas i tabell 9, beräknades enligt bilaga Q och nedböjningen redovisas i figur 13. Dimensioneringen resulterade i att valsade tvärbalkar i klassen IPE 360 valdes.

Tabell 9: Tvärbalkarnas kapacitet och utnyttjandegrad

	Moment [kNm]	Tvärkraft [kN]	Nedböjning [mm]
Kapacitet	320,88	658,36	7,23
Dimensionerande	195,28	147,29	6,6
Utnyttjandegrad	60,86 %	22,37 %	91,79 %



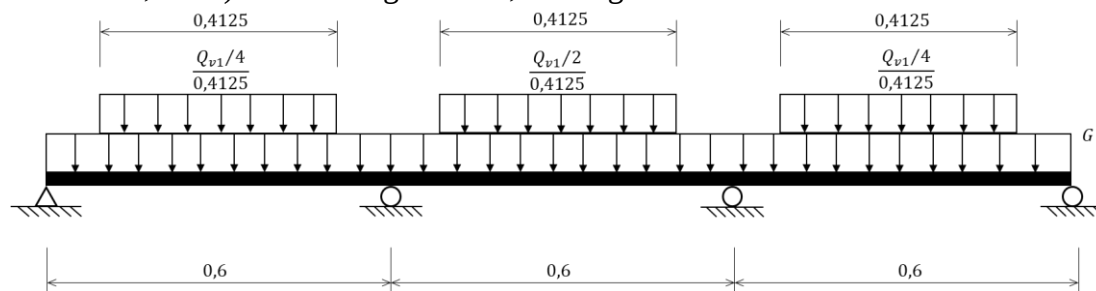
Figur 13: Tvärbalkens nedböjning i tvärled

7.3 Dimensionering av brobaneplattan

Brobaneplattans dimensionering inkluderar framtagandet av beräkningsmodell och laster. Dimensionerande värden för moment, tvärkraft och nedböjning togs fram samt att tvärbalkarnas kapaciteter och utnyttjandegrader beräknades.

7.3.1 Beräkningsmodell för brobaneplattan

Brobaneplattan som ligger ovanpå tvärbalkarna dimensionerades som fritt upplagd över tre tvärbalkar, se figur 14. En lastmodell som tar hänsyn till lastspridningen i ballasten användes enligt samma modell från SS-EN-1991-2 (Svenska institutet för standarder, 2011) som för trågbalkarna, se bilaga L.



Figur 14: Beräkningsmodell för dimensionering av brobaneplattan

7.3.2 Dimensionerande laster för brobaneplattan

Den permanenta lasten utgörs av egentyngden för: brobaneplattan, ballast samt slipers med räls. Trafiklasten Q_{v1} som verkar på brobaneplattan baseras på punktlaster (Q_{vk}) från lastfall 71, som sprider sig ner i ballasten enligt bilaga L. Detta medför en variabelast som sträcker sig 0,4125 m över brobaneplattan mellan varje tvärbalk enligt bilaga N. Trafiklasten multiplicerades med korrektionsfaktorn $\alpha = 1,33$ och de dimensionerande lastfallen beräknades enligt bilaga O och redovisas i tabell 10.

Tabell 10: Dimensionerande laster för brobaneplattan

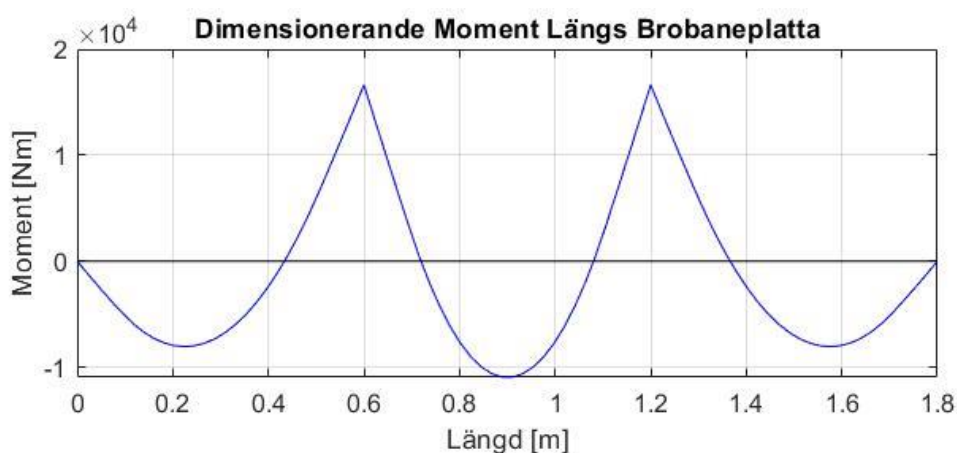
	Permanentlast	Variabelast	Ψ_0	Ψ_1	G [kN/m]	Q_{v1} [kN]
Brottgräns 6.10 a)	1,35	1,5	0,8	-	76,870	399
Brottgräns 6.10 b)	0,89*1,35	1,5	-	-	68,414	498,750
Frekvent kombination (Bruksgräns)	1,0	1,0	-	0,8	56,941	266

7.3.3 Dimensionerande moment, tvärkraft och maximal tillåten nedböjning för brobaneplattan

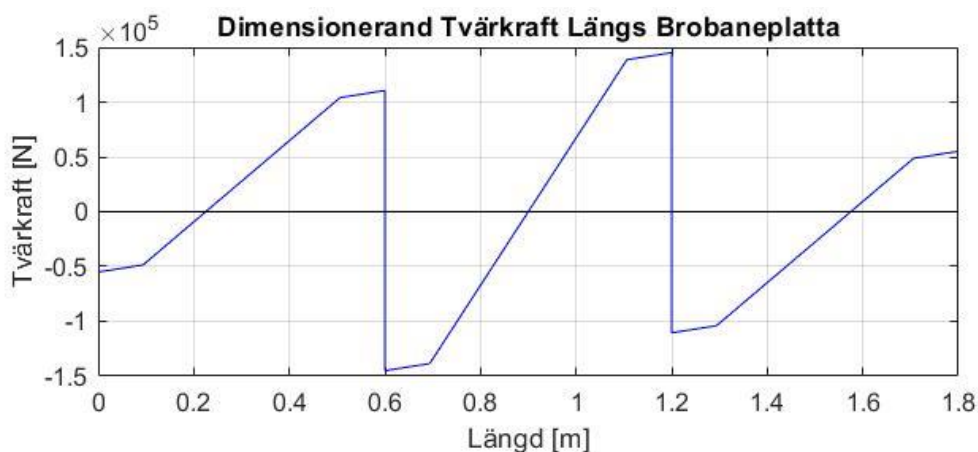
I bilaga R användes lastfallet 6.10 b) för att beräkna det dimensionerande momentet och den dimensionerande tvärkraften. Detta redovisas i tabell 11, figur 14, 15 och maximal tillåten nedböjning redovisas i tabell 11.

Tabell 11: Dimensionerande moment, tvärkraft och maximal tillåten nedböjning för brobaneplattan

Dimensionerande moment [kNm]	Dimensionerande tvärkraft [kN]	Maximal tillåten nedböjning [mm]
16,644	145,21	1,0



Figur 15: Momentkurva baserad på dimensionerande lastfall för brobaneplattan



Figur 16: Tvärkraftkurva baserad på dimensionerande lastfall för brobaneplattan

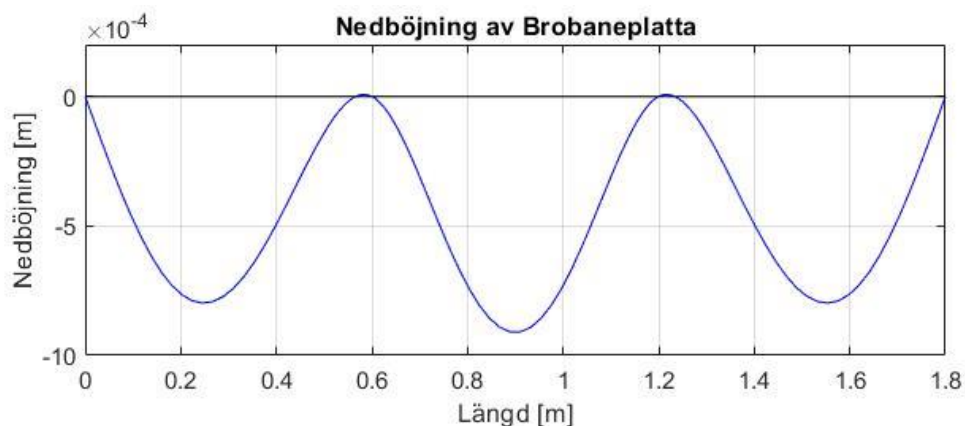
7.3.4 Brobaneplattans kapacitet

Brobaneplattan dimensionerades på samma sätt som de övriga delarna, beräkningarna redovisas i bilaga R och gav slutgiltig tjocklek på plattan till 1,3 mm samt stålqualitén S355 likt de övriga delarna. Brobaneplattans kapacitet och utnyttjande grad redovisas i tabell 12 och dess nedböjning i figur 16.

Tabell 12: Borbaneplattans kapacitet och utnyttjandegrad

	Moment [kNm]	Tvärkraft [kN]	Nedböjning [mm]
Kapacitet	43,376	1 155,8	1

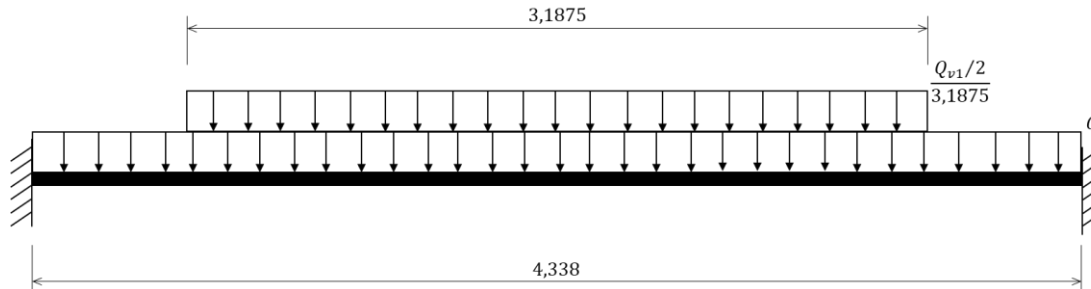
Dimensionerande	16,644	145,21	0,91
Utnyttjandegrad	38,37 %	1,26 %	90,98 %



Figur 17: Brobaneplattans nedböjning i längdled.

7.4 Dimensionering av svetsarna

För dimensionering av svetsarna användes samma lastmodell som för dimensionering av tvärbalken i brottsgränstillstånd, men som fast inspänd för att få dimensionerande krafter i svetsarna, se figur 18. Svetsarna utformades enligt bilaga I och dimensionerades enligt bilaga S. Svetsarna längs livet dimensionerades till ett a-mått på 3 mm och svetsarna längs flänsarna till ett a-mått på 7 mm. Svetsarnas kapacitet och utnyttjandegrad redovisas i tabell 13 och 14. Svetsarna dimensionerades med samma stålqualité som de övriga delarna, S355, med en karakteristiskbrottgräns på 510 MPa (Al-Emrani et al., 2019).



Figur 18: Beräkningsmodell för dimensionering av svetsarna

Tabell 13: Svetsarnas längs livets dimensionerade värden, kapacitet och utnyttjandegrad

	Dimensionerande spänningar [MPa]	Spänningskapacitet [MPa]	Utnyttjandegrad [%]
$\sigma_{\perp}$	0	367,2	0
σ_{tot}	142,39	453,33	31,41

Tabell 14: Svetsarnas längs flänsarna dimensionerade värden, kapacitet och utnyttjandegrad

	Dimensionerande spänningar [MPa]	Spänningskapacitet [MPa]	Utnyttjandegrad [%]
$\sigma_{\perp}$	210	367,2	57,19
σ_{tot}	420	453,33	92,65

8 Diskussion och slutsats

Under arbetets gång har flera beslut tagits som har påverkat slutligt resultat. Dessa beslut har tagits främst under följande delar: avgränsningar, urval samt dimensionering.

8.1 Avgränsningar

I kapitel 1.3 begränsades arbetet endast till dimensionering av bron utifrån dimensionerande laster och lastfall. Aspekter som valdes att bortses ifrån är: dynamiska aspekter, geologiska aspekter, utformning samt dimensionering av stödkonstruktioner och ekonomiska kalkyler. Vid inkludering av dessa aspekter är det osannolikt att resultatet hade varit annorlunda i urvalsprocessen. Eventuellt om ekonomin skulle viktats högre hade en mer noggrann kostnadskalkyl kunnat påverka valet av brokoncept. Avgränsningarna medförde störst påverkan inom dimensioneringen. De bortvalda aspekterna togs inte med eftersom detta enbart är en preliminär dimensionering, vilket medför att resultatet kan variera från en fullständig dimensionering som tar hänsyn till samtliga parametrar.

8.2 Urval

Att arbetet är uppdelat i tre specialistgrupper medför att varje brokoncept undersöks och utvärderas utifrån samma kriterier vilket skapar en bra grund för att enkelt jämföra brokoncepten med varandra. Specialistgrupperna skapar också en tydlig röd tråd mellan litteraturstudie och urvalsprocessen vilket ger en mer specialiserad fördjupning som efterliknar tillvägagångssättet inom branschen.

Under urvalet valdes att brokoncepten ska utvärderas utifrån elva utvärderingskriterier. En stor mängd urvalskriterier medför en viss begränsning av hur djupgående varje kriterium kan analyseras, det ger samtidigt en mer nyanserad utvärdering. De elva valda urvalskriterierna omfattar de viktigaste faktorerna som bör tas hänsyn till även om fler möjliga kriterier kan användas.

Urvalsprocessen är baserad på ett poängsystem där urvalskriterier och brokoncept vägs mot varandra för att få fram ett slutgiltigt brokoncept. Detta innebär att framtagna brokonceptet till stor del baserats på de kriterier som värderats högst vilket innebär att resultatet kan variera beroende på projektets intressen. I detta fall värderades ekonomi, säkerhet, risker, arbetsmiljö och byggnadstid högt. Med andra intressen skulle exempelvis estetik, underhåll samt miljö och hållbarhet vara högt värderade. Därmed finns inte ett brokoncept som garanterat är bästa alternativet för platsen, men med just detta projekts intressen är en trågbalkbro i stål det som passar situationen bäst.

8.3 Dimensionering

Den preliminära dimensioneringen är omfattande i hänsyn till vilka lastfall som kan förekomma eftersom den skrivna koden genererar 418 möjliga placeringar av loket

enligt lastmodell 71. Detta medför att locket med precision kan placeras där de dimensionerande värdena för moment, tvärkraft och nedböjning uppkommer på bron.

Vid preliminär dimensionering beaktas endast de bärande delarna i brokonstruktionens överbyggnad i moment, tvärkraft och nedböjning. Därmed återstår dimensionering av betydande delar för den färdigställda bron samt faktorer som påverkar svängningar, vibrationer, utmattning samt accelerationer och retardationer som förekommer på bron. Detta kan i ett senare skede komma att ändra på brons uppbyggnad och dimensioner.

Beräkningsmodellerna som arbetet baseras på är förenklingar av den verkliga situationen. Där brons delar antagits vara fast inspända eller fritt upplagda när de i verkligheten kan verka som något mellanting. Bron är analyserad i två dimensioner vilket medför att brons verkliga krökning i sidled inte tas hänsyn till utan analyseras som en rak struktur. Eftersom alla beräkningsmodeller utgår från detta existerar liknande förenklingar i samtliga konstruktionsdelar. För att få en fullständig dimensionering bör därmed en analys i tre dimensioner utföras.

Dimensionerna på brons delar är anpassade efter samtliga krav där nedböjningskraven blev begränsande för samtliga konstruktionsdelar.

Detta beror på att nedböjningen är baserad på bruksgränstillstånd medan dimensionerande moment och tvärkraft är baserade på brottgränstillstånd. I praktiken kan därmed bron belastas betydligt mycket mer innan brott vilket framgår enligt utnyttjandegraderna i tabell 6, 9, 13 och 14.

8.4 Slutsats

Syftet med rapporten var att komma fram till ett brokoncept för en dubbelspårigjärnvägsbro över Backavägen och att göra en preliminär dimensionering för valt brokoncept. Resultatet av arbetet blev en trägbalkbro i stål som dimensionerades efter givna krav och förutsättningar. Resultatet för valt brokoncept är framtaget utifrån utvärderingsmaterial och våra erfarenheter som studenter. Detta medför en begränsad analys som kan variera från en fullständig projektering som utförs i arbetslivet vilket innebär att andra brokoncept kan vara lämpliga och vidare dimensionering krävs.

9 Referenser

Abetong. (u.å.). *Prefabricerade broar och tunnlar*.

https://www.abetong.se/sv/prefabricerade_broar_tunnlar

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2011). *Bärande konstruktioner Del 2* (2011:1). Institutonen för Bygg-och miljöteknik.

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2019). *Bärande konstruktioner Del 1* (ACE 2019:2). Institutonen för Bygg-och miljöteknik.

Chen, W. Duan, L. (2014). *Bridge engineering handbook*. CrC Press

Duan, L. (2019). *Bridge Maintenance*. Access Science.

<https://doi.org/10.1036/1097-8542.095730>

Göteborgs Stad. (2016). *Stadsbyggnadsstudie BACKAPLAN/BRUNNSBO*.

[https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/Backaplan%20-%20Program%20f%C3%B6r%20Backaplan-Program%20-%20inf%C3%B6r%20godk%C3%A4nnande-Stadsbyggnadsstudie%20Backaplan-Brunnsbo/\\$File/06%20Stadsbyggnadsstudie%20Backaplan%20Brunnsbo%20\(2016\).pdf?OpenElement](https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/Backaplan%20-%20Program%20f%C3%B6r%20Backaplan-Program%20-%20inf%C3%B6r%20godk%C3%A4nnande-Stadsbyggnadsstudie%20Backaplan-Brunnsbo/$File/06%20Stadsbyggnadsstudie%20Backaplan%20Brunnsbo%20(2016).pdf?OpenElement)

Khan, M. A. (2014). *Accelerated bridge construction: Best practices and techniques*. Butterworth-Heinemann.

<https://ebookcentral.proquest.com/lib/chalmers/detail.action?docID=1766345>

Lebet, J., Hirt, M. (2013). *Steel Bridges: Conceptual and Structural Design of Steel and Steel-Concrete Composite Bridges*. EPFL Press

Lunds universitet. (2004). *Calfem a finite element toolbox* (version 3.4). Avdelningen för byggnadsmekanik.

https://www.solid.lth.se/fileadmin/hallfasthetslara/utbildning/kurser/FHL064_FEM/cal fem34.pdf

Maxstadh, P. (2018). *Inspektion: En handledning inom broförvaltning*. Skogsfors.

https://www.skogforsk.se/cd_20190114162826/contentassets/0cd28162a7aa4da8855ca8ac06b5b989/inspektion---handledning-om-broar.pdf

Pipinato, A. (2016). *Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance*. Butterwoth- Heinemann.

Rundvike Poles. (u.å.). *Furuslipers*. <https://www.poles.se/produkter/slipers/>

Svenska institutet för standarder. (2011). *Eurokod 1: Laster på bärverk – Del 2: Trafiklast på broar* (SS-EN-1991-2). <https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsindustrin/tekniska-aspekter/ssen19912/>

Svenska institutet för standarder. (2014). *Eurokod - Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk* (SS-EN 1990).

<https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsindustrin/tekniska-aspekter/ssen1990/>

Trafikverket. (2011a). *TRVKB 10 Tåtskikt på broar: Trafikverkets Krav Beskrivningstexter för Tåtskikt på broar* (TRV 2011:089, TDOK 2011:319).

https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10841/RelatedFiles/2011_089_TRVKB_10_tatskikt_pa_broar.pdf

Trafikverket. (2011b). *TRVR Bro 11: Trafikverket tekniska råd Bro* (TRV publ, 2011:086).

https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10752/RelatedFiles/2011_086_trvr_bro_11.pdf

Trafikverket. (2015a). *Banöverbyggnad – Infraskstrukturprofiler* (TDOK 2014:0555).

<https://puben.trafikverket.se/dpub/visa-dokument/04dca2c0-57db-4fc5-bfb6-f899ef6708cc>

Trafikverket. (2015b). *Handbok för inspektion av byggnadsverk: Syfte, omfattning och krav.*

<https://batman.trafikverket.se/batinfo/Batman/biblioteket/Dokument/Handbok%20for%20inspektion%20av%20byggnadsverk.pdf>

Trafikverket. (2017). *E6.21 Lundbyleden, delen Brantingsmotet - Ringömotet.*

https://www.trafikverket.se/contentassets/6e09cddddd92c4b7c84bbe584ff72b18d/1_plan_och_milljobeskrivning.pdf

Trafikverket. (2018). *Broprojekteringshandbok förhandsutgåva.*

Trafikverket. (2019). *Krav brobyggande (3.0).*

<https://www.trafikverket.se/contentassets/5e3d8c0eb4e94efd9738cca74b912bf5/krav-brobyggande.pdf>

Trafikverket. (2020a). *Bohusbanan – Vi bygger dubbelspår och en ny pendeltågsstation vid Brunnsbo.*

<https://www.trafikverket.se/nara-dig/Vastra-gotaland/vi-bygger-och-forbattrar/E621-Lundbyleden/bohusbanan--vi-bygger-dubbelspar-och-en-ny-pendeltagsstation/>

Trafikverket. (2020b). *E6.21 Lundbyleden, Gator vid Backaplan samt Bohusbanan och Brunnsbo station.*

<https://www.trafikverket.se/nara-dig/Vastra-gotaland/vi-bygger-och-forbattrar/E621-Lundbyleden/>

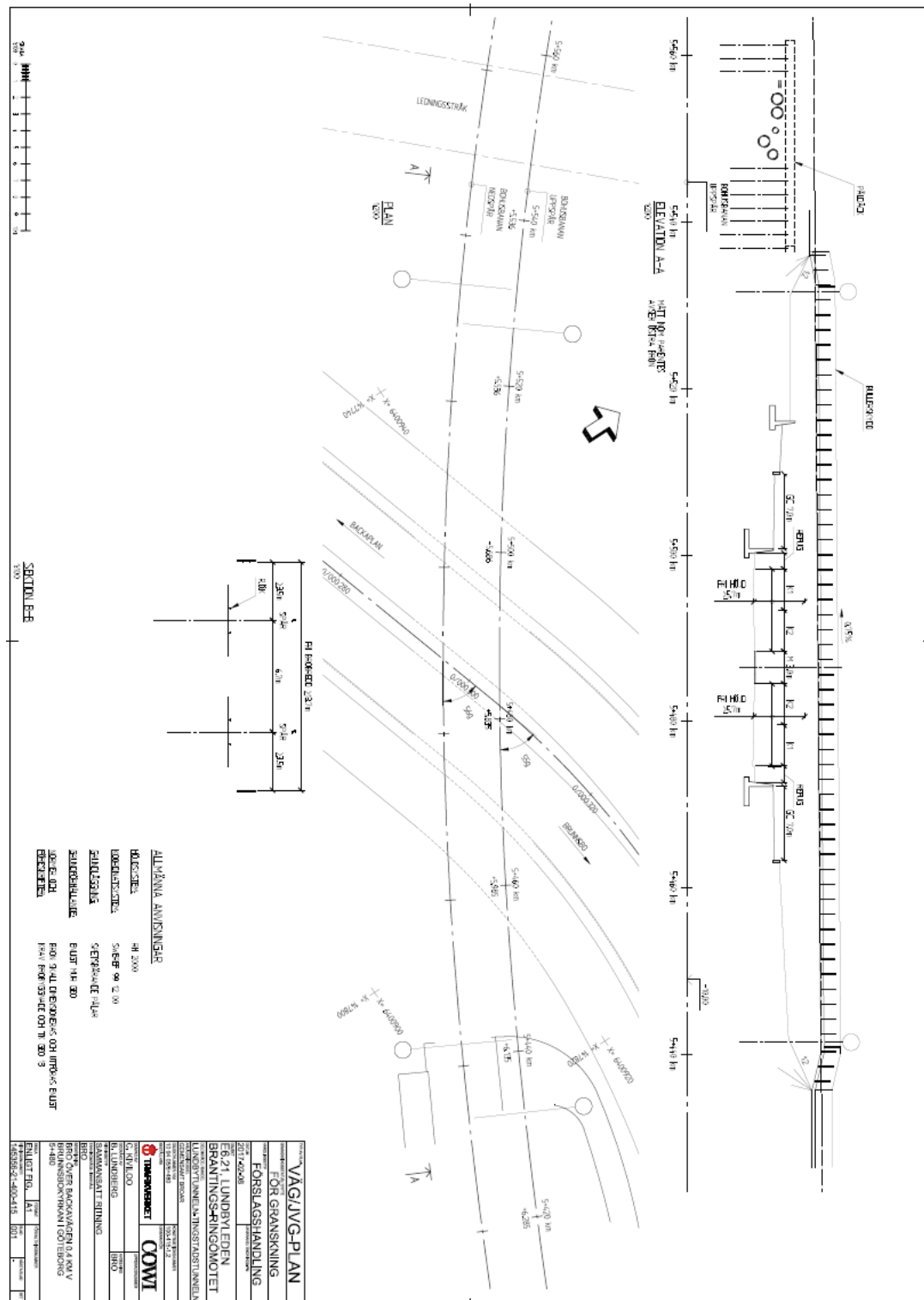
Trafikverket. (2020c). *Skötsel av broar.*

<https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/underhall-av-vag-och-jarnvag/Sa-skoter-vi-broar-och-tunnlar/Skotsel-av-broar/>

Vägverket. (2006). *Brounderhåll: Allmän teknisk beskrivning för underhåll av broar.* Trafikverket.

https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10283/RelatedFiles/2006_146_brounderhall_2006.pdf

Bilaga A – Planritning för nya bron

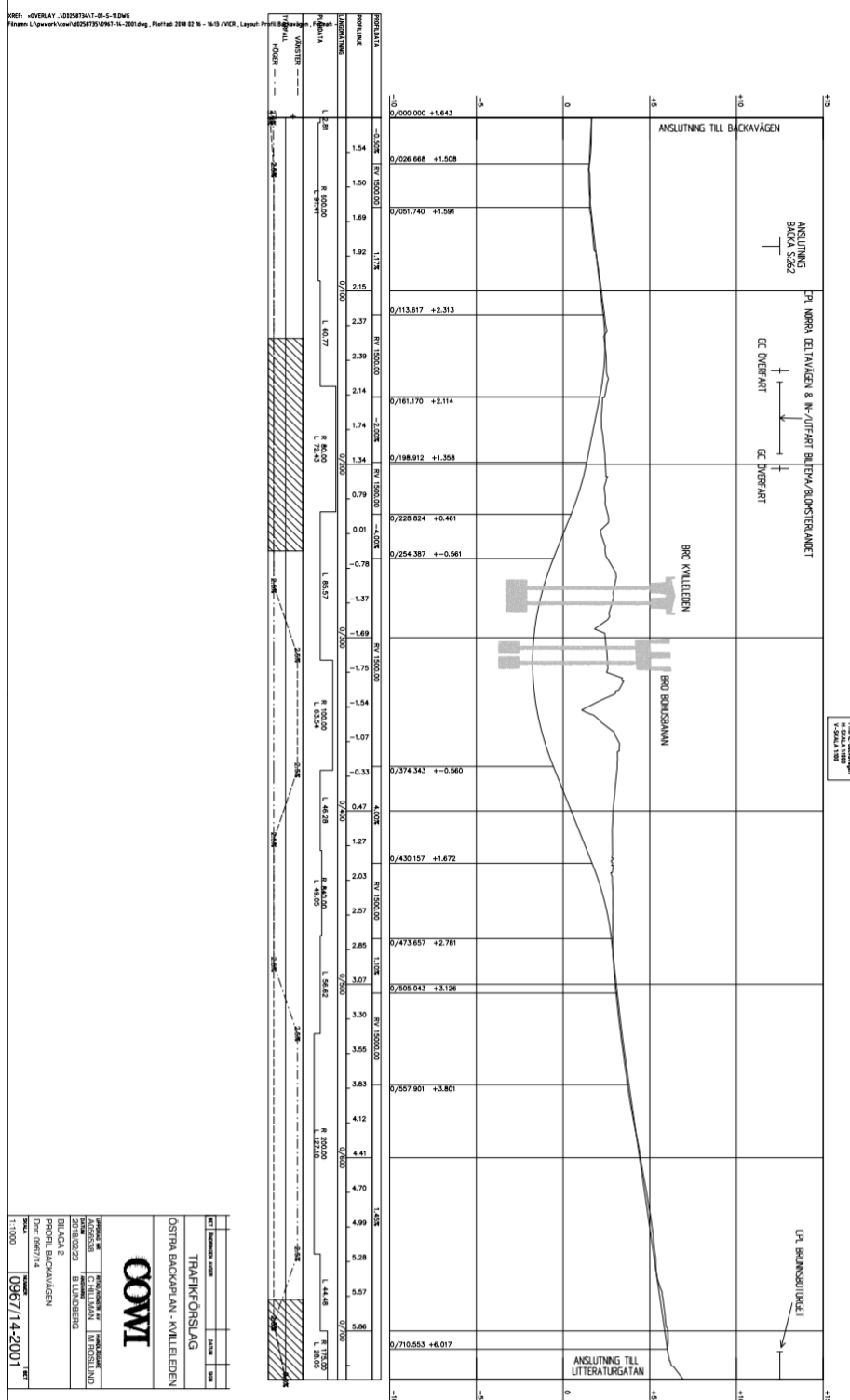


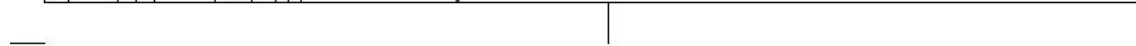
Bilaga B – Karta över platsen



Google. (u.å.). [Goggle maps karta över området]. Hämtad 27 april, 2021, från <https://www.google.se/maps>

Bilaga C – Sektion för underliggande väg



[illegible]

Bilaga E – Geotekniska förutsättningar (GEO PM)

5.1.5. Geotekniska förhållanden

Jordlagren i delområdet består överst av fyllning. Under fyllningen utgörs jordlagren av lera. Leran är avsatt på friktionsjord på berg alternativt direkt på berg. Enligt utförda jord-bergsonderingar varierar djup till berg mellan ca 4 och 71 m. De största jorddjupen har uppmätts i delområdets södra del. Jorddjupet minskar mot fastmarkspartiet i norr.

Fyllnadsmaterialet har påträffats med en varierande sammansättning av mulljord, sten, grus, sand, silt och lera men även trä- och tegelrester har påträffats. Fyllningens tjocklek har vid skruvprovtagning uppmätts till 0,5-4,5 m.

Leran förekommer med innehåll av skal, silt, grus och sand. Lokalt i undersökningspunkt CW228 har leran påträffats med innehåll av gytta. Ställvis har leran påträffats med utbildad torrskorpa i det övre skiktet. Torrskorpelerans tjocklek har uppmätts till 0,3-1,5 m. Lerans mäktighet, tolkad utifrån utförda tryck- CPT- respektive jord-bergsonderingar, varierar inom aktuellt delområde från ca 1 m i anslutning till fastmarken i norr, till ca 60 m i söder. Lokalt i nordväst, i sonderingspunkt CW217, har ingen lera påträffats i samband med utförd trycksondering.

Lerans densitet varierar i allmänhet mellan ca 1,45 och 1,65 ton/m³ i lerprofilens övre del och ner till nivå -7. Densiteten ökar mot djupet till ca 1,65-1,75 t/m³ på nivå -25 till -40. Den naturliga vattenkvoten har bestämts till 60-100 % ner till ca nivå -15. Under denna nivå har vattenkvoten uppmätts till ca 55-65 %. Konflytgränsen är i allmänhet ca 0-30 procentenheter lägre än vattenkvoten i de övre lerlagren. Mot djupet är konflytgränsen i allmänhet ca ±10 procentenheter i förhållande till den naturliga vattenkvoten.

Lerans skjuvhållfasthet har bestämts utifrån direkta skjuvförsök, konförsök, vingförsök och utvärderade CPT-sonderingar. Den korrigerade odränerade skjuvhållfastheten, c_u , varierar i huvudsak från ca 7-20 kPa i lerprofilens övre del, till ca 35-60 kPa på nivå -30 till -40. Lerans hållfasthet klassificeras som extremt låg till medelhög. Lerans sensitivitet dvs känslighet för störning, varierar mellan ca 5 och 35 vilket innebär att leran är låg- till högsensitiv.

CRS-försök har utförts på ostörda lerprover från 5 provtagningspunkter, CW210, CW212, CW228, CW230 och CW243. I punkt CW228 har även stegvisa ödometerförsök utförts på tre nivåer. Resultaten visar att överkonsolideringsgraden, OCR, varierar inom delområdet i huvudsak mellan 1,1-1,7. Vid spänningsanalyserna har antagits en portrycksfördelning motsvande en grundvattenyta som ligger ca 1,0 m under markytan samt att en hydrostatisk portrycksfördelning (10 kPa/m) råder ner till 7 m djup. Portrycksfördelningen från 7 m ner till 15 m djup har antagits vara 11,6 kPa/m och från 15 m djup och ner till 24 m under markytan har portrycksökningen antagits vara 10,5 kPa/m. Från 24 m djup ökar portrycket med 9,2 kPa/m.

I punkt CW210 och CW228 visar CRS-resultaten att överkonsolideringsgraden i flera av försöken ligger under eller omkring 1,0, framförallt i lerprofilens övre del. Detta bedöms bero på att tidigare utförd uppfyllnad av delområdet skapat effektivspänningsförändringar och gett upphov till pågående sättningar. Dessutom kan lerprovernans innehåll av skal respektive silt ha försämrat försökens kvalitet.

Friktionsjordens ovankant har påträffats mellan ca 1 m under markytan, i anslutning till fastmarken i norr, och 63 m under markytan i den södra delen av området. I samband med jord-bergsonderingar utförda i delområdets centrala delar har ingen eller enbart tunnare skikt av friktionsjord påträffats underlagrande leran. Vid övergången från lera till friktionsjord, återfinns i delområdets centrala och västra delar, ställvis växellagrade skikt av friktionsjord och lera. Friktionsjordens mäktighet har uppmätts till ca 0,2-2,2 m utifrån tolkningar av genomförda jord-bergsonderingar. Den största mäktigheten har påträffats i delområdets södra del. Friktionsjordens hållfasthetsegenskaper har ej undersökts.

5.1.6. Hydrogeologiska förhållanden

Inom aktuellt delområde har geohydrologiska undersökningar utförts i två undersökningspunkter, CW210 och CW215.

I punkt CW210 har porttrycksspetsar installerats på två nivåer i lerlagret, på 7 m och 16 m djup under omgivande markyta samt på en nivå i friktionsjorden under leran på 38 m djup. Porttrycksspetsarna på 7 och 16 m djup har loggat värden en gång per dygn och stabiliserade värden har uppmätts under en period mellan december år 2014 och september år 2016. Porttrycksspetsen på 38 m djup har avlästs 11 gånger under en period mellan februari år 2015 och september år 2016. Mätningar på 7 m djup visar på en porttrycksnivå i leran motsvarande en fri grundvattenyta ca 0,5-1,3 m under befintlig markyta. Mätningar på 16 m djup visar på en porttrycksnivå i leran motsvarande en fri grundvattenyta ca 0,4-1,4 m över markytan och mätningar på 38 m djup visar på en trycknivå i friktionsjorden motsvarande en fri grundvattenyta ca 0,1-0,5 m under markytan.

I punkt CW215 har porttrycksspets installerats på en nivå i friktionsjorden under leran på ca 16 m djup under markytan. Porttrycksspetsen har avlästs 11 gånger under en period mellan februari år 2015 och september år 2016. Mätningarna visar på en trycknivå i friktionsjorden motsvarande en fri grundvattenyta ca 1,0-1,5 m under markytan.

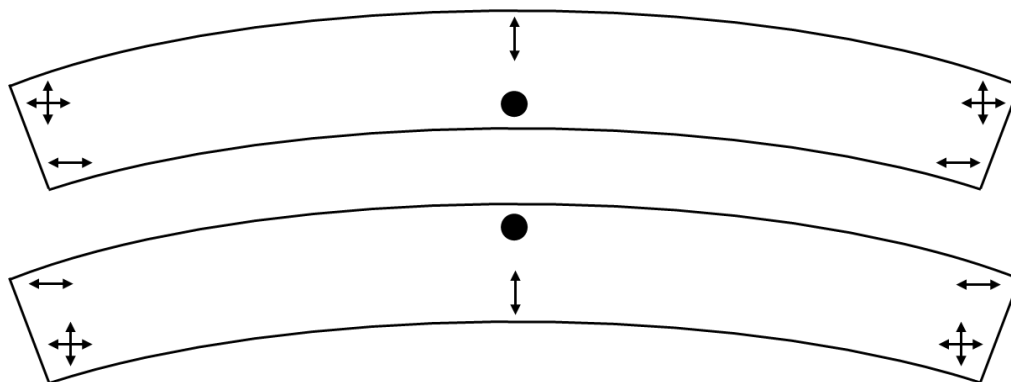
5.1.8.2. Sättningsanalys

Beräkningsresultaten visar att pågående sättningar i anslutning till planerad dubbelspårsjärnväg ger upphov till en sättning på ca 40-60 cm under 40 år. Detta motsvarar en genomsnittlig sättningshastighet på ca 10-15 mm/år. I aktuell beräkningssektions förlängning mot söder, i läget för den planerade Kvilleleden, bedöms sättningar av liknande storleksordning pågå. Resultaten från sättningsberäkningarna redovisas även i diagramform, se bilageförteckning.

Då planerad dubbelspårsjärnväg ska ansluta till den stödpålade järnvägsbron över Backavägen medför storleken av pågående sättningar i området att järnvägsbanken måste grundläggas på påldäck, med stödpålar, från delområdets sydöstra gräns och fram till bron över Backavägen för att uppfylla sättningskrav enligt TK Geo 13.

Vägbanken för Kvilleleden kommer att lastkompenseras med lättklinker för att uppfylla sättningskrav enligt TK Geo 13. Planerade geotekniska förstärkningsåtgärder tillsammans med erforderliga avschaktningar utformas på ett sådant sätt att en mjuk sättningsövergång erhålls.

Bilaga F – Utformning av lager



Lagren är utformad likt ovanstående bild.

↔ : Ensidigt rörligt lager

↕ : Allsidigt rörligt lager

● : Fast lager

Bilaga G – Temperaturförlängning

Kravet för förlängningen vid anslutningen är 80 mm. För beräkning av temperaturändringen som krävs för att uppnå längdändringen använder vi följande formel: $\Delta T = \frac{\Delta L}{L \cdot \alpha_T}$ (Al-Emrani et al., 2019). För den här beräkningen används den maximala längdändringen som får uppstå $\Delta L = 0,08m$, Brons halva längd $L = 45m$ då bron är fri att utvidgas åt båda håll, samt längdutvidgningskoefficienten för stål $\alpha_T = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Al-Emrani et al., 2019).

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{L \cdot \alpha_T} = \frac{0,08}{45 \cdot 12 \cdot 10^{-6}} = 148,15^\circ\text{C} \quad (2)$$

För att balken ska förlängas 80 mm krävs temperaturändring på cirka 148 °C. Vilket visar att en övergångskonstruktion med genomgående ballast kan användas.

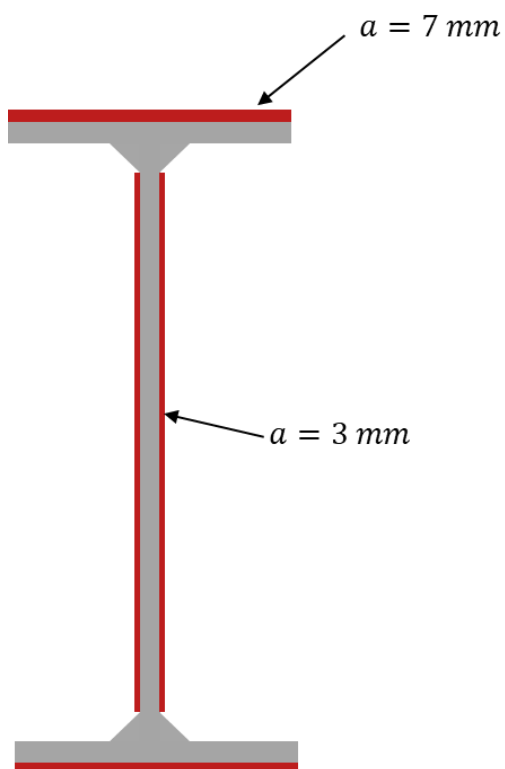
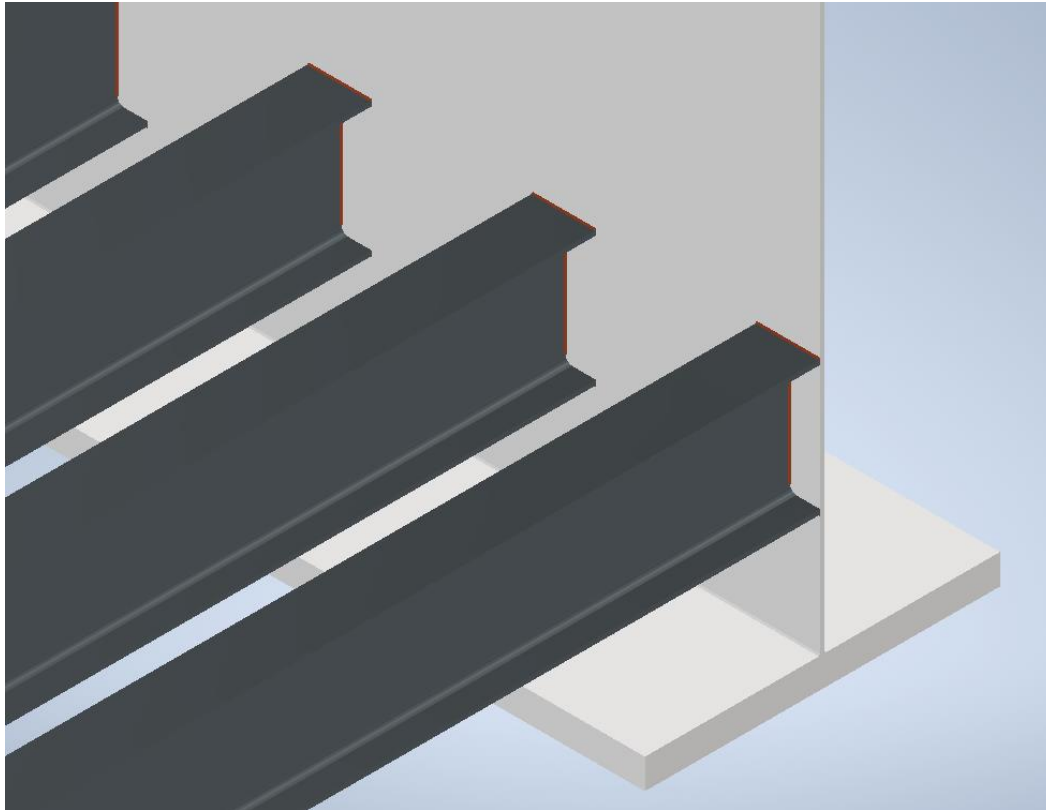
Bilaga H – karta med möjliga förbindelser till arbetsplatsen



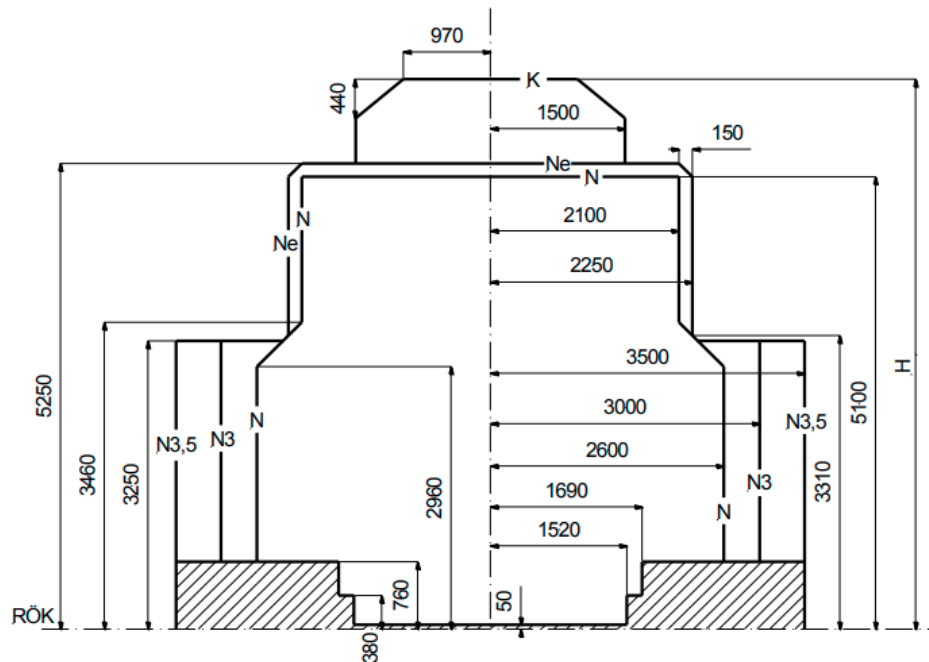
Google. (u.å.). [Goggle maps karta över området]. Hämtad 27 april, 2021, från <https://www.google.se/maps>

Bilaga I – Svets mellan trågbalk och tvärbalkar

Anslutningen mellan tråg och tvärbalkarna görs med svetsar längs med livet och med svetsar på utsidan av flänsarna.



Bilaga J – Krav på fritt utrymme längs räls



Figur 3. Normalsektion för fria rummet [mm]

Sektion N Gäller för konstruktioner i allmänhet.

Sektion Ne Gäller för spänningsförande konstruktioner.

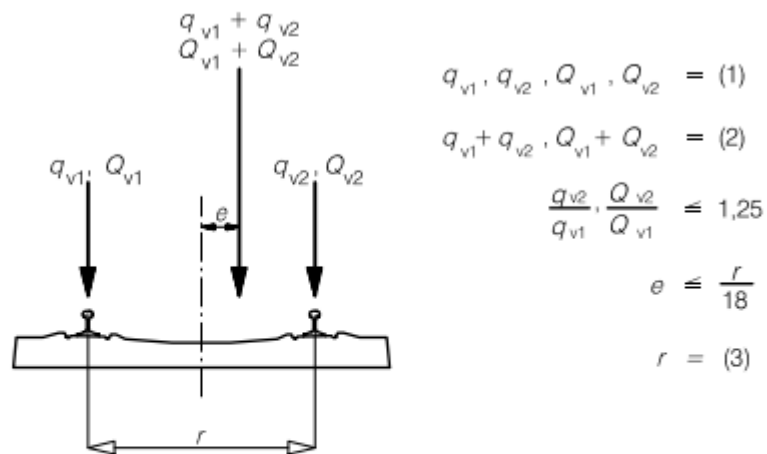
Sektion N3 Gäller för medellånga objekt.

Sektion N3,5 Gäller för långa objekt.

Sektion K Utrymme för strömavtagare på elektrifierade linjer.

(Trafikverket, 2015a)

Bilaga K – Vertikala lasters excentricitet för Lastmodell 71



Förklaring

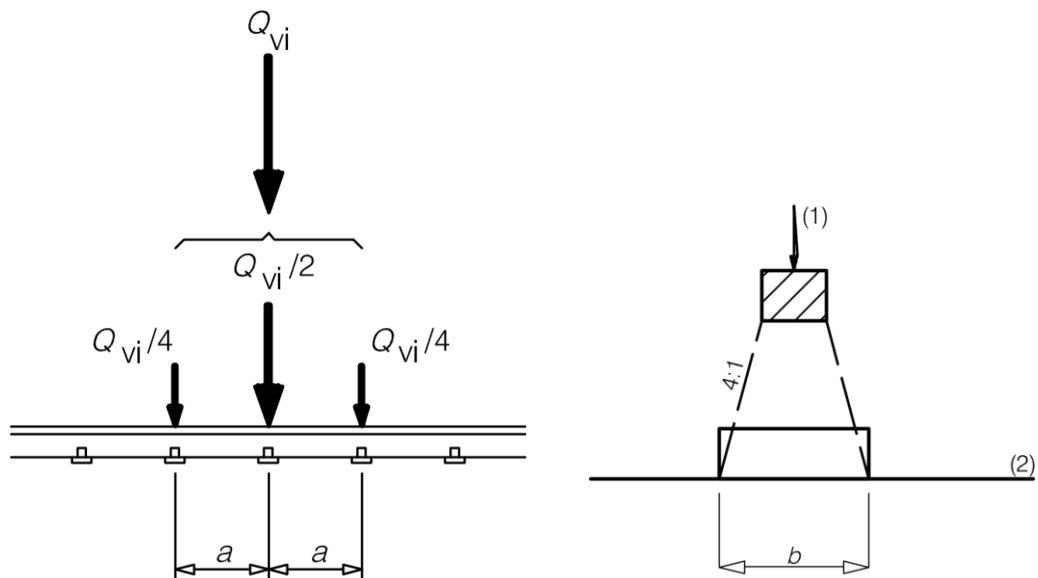
- (1) Jämnt utbredd last och koncentrerad last för vardera rälen
- (2) Lastmodell LM 71 (och SW/0 där så krävs)
- (3) Avstånd i tvärled mellan hjullasterna

Figur 6.3 – Vertikala lasters excentricitet

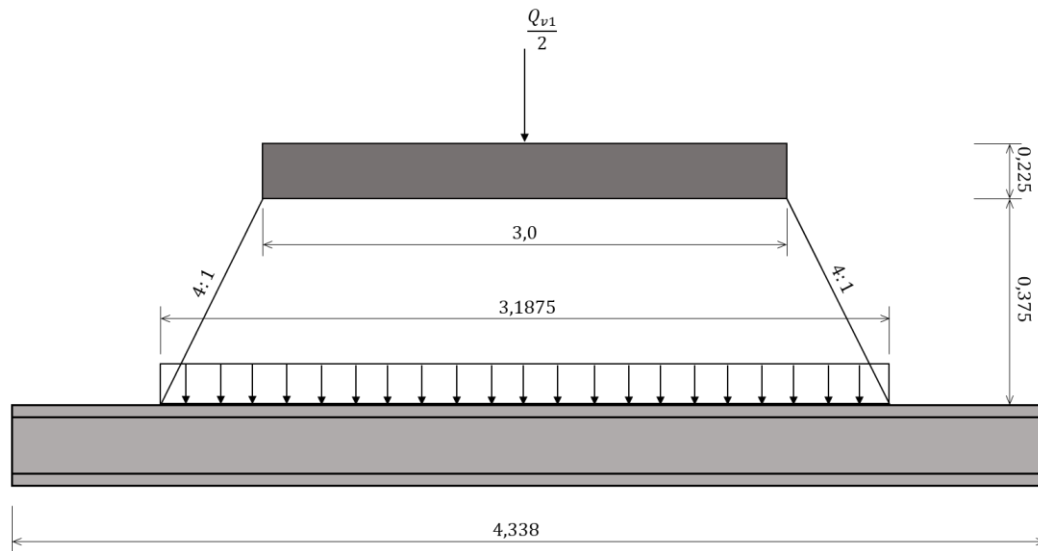
(Svenska institutet för standarder, 2011)

Bilaga L – Modell för lastutbredning av punktlaster

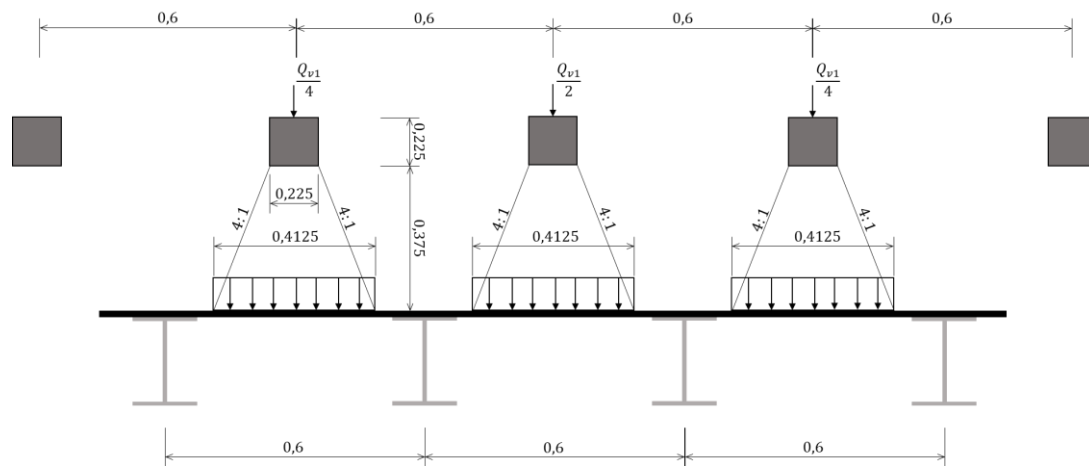
Modell för lastspridning till och under slippers (Svenska institutet för standarder, 2011)



Bilaga M – Lastspridning i ballast för tvärbalkarna



Bilaga N – Lastspridning i ballasten för brobaneplattan



Bilaga O – Framtagande av dimensionerade laster

Dimensionerande laster som verkar på bron baseras utifrån lastmodell 71 och korrigeras utifrån Trafikverkets författarsamling, enligt tabell 4. Egenlast och trafiklast beräknas separat för respektive del, där trågbalkarna samt brobaneplattan beräknas i längdled medan tvärbalkarna beräknas i breddled. Lastfallen blev uppdelade i 6.10 a), 6.10 b) och frekvent kombination för respektive byggnadsdel, där det mest påfrestande lastfallet av 6.10 a) och 6.10 b) motsvarar brottgränstillståndet i beräkningarna.

Indata

- Geometri på samtliga delar i brons överbyggnad
- Trafiklast enligt lastmodell 71: Punklast $Q_{vk} = 250 \text{ kN}$ och utbredd last $q_{vk} = 80 \text{ kN/m}$
- Spårvidd $r = 1,435$ enligt SS-EN 1991-2 (Svenska institutet för standarder, 2011)
- Korrektionsfaktor $\alpha = 1.33$ enligt SS-EN 1991-2 (Svenska institutet för standarder, 2011)
- Tyngd ballast = 20 kN/m^3 enligt bilaga T
- Tyngd stål = 77.75 kN/m^3 enligt bilaga T
- Last räls med slipers = 0.5 kN enligt bilaga T

Beräknat

Beräknat för samtliga beräkningsmodeller för tråg-, tvärbalk och brobaneplattan

- Permanent egentynngd G [N/m]
- Dimensionerade laster Q_{v1} [N] och q_{v1} [N]

Resultat från beräkningar

Dimensionerande laster för trågbalkarna

	Permanentlast	Variabellast	Ψ_0	Ψ_1	G [kN/m]	Q_{v1} [kN]	q_{v1} [kN/m]
Brottgräns 6.10 a)	1,35	1,5	0,8	-	59,655	206,81	66,180
Brottgräns 6.10 b)	0,89*1,35	1,5	-	-	53,093	258,52	82,725
Frekvent kombination (Bruksgräns)	1,0	1,0	-	0,8	44,189	137,87	44,120

Dimensionerande laster för tvärbalkarna

	Permanentlast	Variabellast	Ψ_0	Ψ_1	G [kN/m]	Q_{v1} [kN]
Brottgräns 6.10 a)	1,35	1,5	0,8	-	11,707	399
Brottgräns 6.10 b)	0,89*1,35	1,5	-	-	10,419	498,750
Frekvent kombination (Bruksgräns)	1,0	1,0	-	0,8	8,6719	266

Dimensionerande laster för brobaneplattan

	Permanentlast	Variabellast	Ψ_0	Ψ_1	G [kN/m]	Q_{v1} [kN]
Brottgräns 6.10 a)	1,35	1,5	0,8	-	76,870	399
Brottgräns 6.10 b)	0,89*1,35	1,5	-	-	68,414	498,750
Frekvent kombination (Bruksgräns)	1,0	1,0	-	0,8	56,941	266

Beräkande MATLAB-kod:

Indata

```
clear

clc

close all

E=200e9; %Elastisitetsmodul: Både för Trågbalk, tvärbalk och
bottenplatta.
B=5.3; %Totala bredden på bron

%Tvärsnitt Trågbalk
h=2.15; %Höjd [m]
b=0.95; %Bredd [m]

tf=0.08; %Tjocklek fläns [m]
tw=0.012; %Tjocklek liv [m]
hw=h-2*tf; %Höjd liv [m]

I=((tw*hw^3)/12)+2*((b*tf^3)/12)+((hw+tf)/2)^2*(tf*b)); %Yttröghet [m^4]
z=h/2; % [m]
W=I/z; %Böjmotstånd [m^3]
A=hw*tw+2*b*tf; %tvärsnittsarea [m^2]
L=45; %Längd [m]
Ep=[E A I]; %Sammansatt för Calfem-beräkningar

%Tvärsnitt (IPE 360) Tvärbalk
B_tvar=B-b-tw; %Bredd [m]
h_tvar=0.36000; b_tvar=0.170; %Höjd [m]
B_krav=B-2*b; %krav för fritt utrymme vid räls
[m]

tf_tvar=0.0127; %Tjocklek fläns [m]
tw_tvar=0.008; %Tjocklek liv [m]
R_tvar=0.018; %Radie på valsningsfog [m]
hw_tvar=h_tvar-2*tf_tvar; %Höjd liv [m]
I_tvar=1.6270e-04; E_tvar=200e9; %Yttröghet [m^4]
A_tvar=7.273*10^-3; %tvärsnittsarea [m^2]
Ep_tvar=[E A_tvar I_tvar]; %sammansatt för Calfem-beräkningar
z_tvar=h_tvar/2; % [m]
W_tvar=I_tvar/z_tvar; %Böjmotstånd [m^3]
```

```

%Slipers dimensioner
c=0.60; %avstånd mellan tvärbalkar och slipers [m]
h_sliper=0.225; %Höjd [m]
b_sliper=0.225; %Bredd [m]
L_sliper=3; %Längd [m]
h_ballast=0.6; %Höjd ballast [m]
s = L_sliper+2*(h_ballast-h_sliper)/4; %kraftutbredning under sliper
[m]

%Broplatta
t=0.013; %tjocklek [m]
A_platta=B_tvar*t; %tvärsnittsarea [m^2]
I_platta=(B_tvar*t^3)/12; %Yttröghet [m^4]
z_platta=t/2; % [m]
W_platta=I_platta/z_platta; %Böjmotstånd [m]
Ep_platta=[E A_platta I_platta]; %sammansatt för Calfem-beräkningar

A_ballast=0.6*B_tvar; %Tvärsnittsarea för ballast [m^2]

```

Lastfall i längdled

```

alfa=1.33; %korrektionsfaktor [-]
Q=250e3; %Punktlast enligt lastfall 71 [N]
q=80e3; %Utbredd last enligt lastfall 71 [N/m]

T_stal=77.75e3; %Stålets tyngd [N/m^3]
T_ballast=20e3; %Ballastens Tyngd [N/m^3]
G_platta=t*B_tvar*T_stal; %Last från bottenplatta [N/m]
G_trag=T_stal*A; %Last från trågbalk [N/m]
G_tvar=(B_tvar*T_stal*A_tvar)/c; %Last från trågbalk [N/m]
G_ballast=T_ballast*A_ballast; %Last från ballast [N/m]
G_rals=0.5e3; %Last från Räls med slipers [N/m]

G_tot=G_platta+2*G_trag+G_tvar+G_ballast+G_rals; %total utbreddlast pga
egenvikt [N/m]

%last på en av trågbalkarna
r=1.435; %Avstånd mellan rälsen [m]
e=r/18; %Excentricitet [m]
C=B_tvar+tw; %avståndet mellan trågbalkarnas mittpunkt [m]
Qd=alfa*Q*(1/2+e/C); %korrigerad punktlast [N]
qd=alfa*q*(1/2+e/C); %korrigerad utbredd last [N]

```

Lastfall i tvärled

```

G_platta_tvar=t*c*T_stal; %Last från bottenplatta [N/m]
G_tvar_tvar=T_stal*A_tvar; %Last från tvärbalk [N/m]
G_ballast_tvar=T_ballast*0.6*c; %Last från ballast [N/m]
G_rals_tvar=0.5e3*c; %Last från räls med slipers [N/m]

G_tot_tvar=G_platta_tvar+G_tvar_tvar+G_ballast_tvar+G_rals_tvar; %total
utbreddlast pga egenvikt [N/m]

%Lastfall
Qd_tvar=Q*alfa; %Korrigerad Punktlast [N]

```

Lastfall brobaneplattan

```
G_platta_platta=t*B_tvar*T_stal;           %Last från bottenplatta [N/m]
G_ballast_platta=T_ballast*A_ballast;       %Last från ballast [N/m]
G_rals_platta=0.5e3;                        %Last från räls med slipers [N/m]

G_tot_platta=G_platta_platta+G_ballast_platta+G_rals_platta; %total
utbreddlast pga egenvikt [N/m]

%Lastfall
Qd_platta=Q*alfa; %korrigerad punktlast [N]
```

Brott- och brukgränstillstånd för Trågbalk i längdled

```
%Lastfall a
psi_0=0.8; psi_1=0.8; %Lastreduktionstal [-]

G_brott_a=1.35*G_tot/2;    % [N/m]
Q_brott_a=1.5*psi_0*Qd;    % [N]
q_brott_a=1.5*psi_0*qd;    % [N/m]

%Lastfall b
G_brott_b=0.89*1.35*G_tot/2;% [N/m]
Q_brott_b=1.5*Qd;          % [N]
q_brott_b=1.5*qd;          % [N/m]

%Brukgränstillstånd i längdled
G_bruk=G_tot/2;           % [N/m]
Q_bruk=psi_1*Qd;          % [N]
q_bruk=psi_1*qd;          % [N/m]
```

Brott- och brukgränstillstånd för tvärbalk i tvärled

```
%Lastfall a
G_brott_a_tvar=1.35*G_tot_tvar;    % [N/m]
Q_brott_a_tvar=1.5*psi_0*Qd_tvar;  % [N]

%Lastfall b
G_brott_b_tvar=0.89*1.35*G_tot_tvar; % [N/m]
Q_brott_b_tvar=1.5*Qd_tvar;        % [N]

%Brukgränstillstånd i tvärled
G_bruk_tvar=G_tot_tvar;            % [N/m]
Q_bruk_tvar=psi_1*Qd_tvar;         % [N]
```

Brott- och brukgränstillstånd för brobaneplatta i längdled

```
%Lastfall a
G_brott_a_platta=1.35*G_tot_platta;    % [N/m]
Q_brott_a_platta=1.5*psi_0*Qd_platta;  % [N]

%Lastfall b
G_brott_b_platta=0.89*1.35*G_tot_platta; % [N/m]
Q_brott_b_platta=1.5*Qd_platta;        % [N]
```

```
%Brukgränstillstånd i platta  
%  
G_bruk_platta=G_tot_platta;           % [N/m]  
Q_bruk_platta=psi_1*Qd_platta;        % [N]
```

Published with MATLAB® R2020b

Bilaga P – Dimensionering av trågbalkarna

Trågbalkarna dimensioneras enligt beräkningsmodellen i figur 6, där lokets punktlaster flyttas från att hela loket står på brons vänstra ände tills när loket står med två hjul på vardera sida av mittstödet. Loket flyttades i steg om 0,1 m mellan dessa positioner för att nå de dimensionerade lastfallen.

Moment- och tvärkraftsfördelning samt maximala värden togs fram i brottgränstillstånd med hjälp av MATLAB och CALFEM-manualen (Lunds universitet, 2004). Trågbalkarnas kapacitet beräknas enligt kapitel S2.8, S4.3 och S5.5 från Bärande konstruktioner – Del 1 (Al-Emrani et al., 2019). Vid kapacitetsberäkningarna antas styva ändavstyvningar.

Indata

- Trågbalkens geometri
- Placering av loket enligt Lastfall 71
- Stålets elasticitetsmodul och hållfasthet
- Dimensionerande laster för trågbalken enligt bilaga O – Framtagande av dimensionerande laster

Beräknat

- Trågbalkarnas dimensionerade tvärkraft, moment och maximal nedböjning
- Trågbalkarnas moment- och tvärkraftskapacitet
- Utnyttjandegrad av trågbalkarnas samtliga dimensionerande värden

Resultat

Trågbalkarnas dimensionerade värden, kapacitet och utnyttjandegrad

	Moment [kNm]	Tvärkraft [kN]	Nedböjning [mm]
Kapacitet	53 222	5 542,4	75
Dimensionerande	36 550	4 341,1	68
Utnyttjandegrad	68,67 %	78,32 %	90,72 %

Beräknande MATLAB-kod:

Dimensionering Trågbalk

```
nel=8; %Antal element
ndof=(nel+1)*3; %Antal frihetsgrader, 3 per nod

L_Q=1.6; %Avståndet mellan punktlasterna [m]
i=0;

%Lastfall
lastfall=2; % 1 = Lastfall a
           % 2 = Lastfall b
           % 3 = Brukgränstillstånd

if lastfall==1
    G=G_brott_a;
    Q=Q_brott_a;
    q=q_brott_a;

elseif lastfall==2
    G=G_brott_b;
    Q=Q_brott_b;
```

```

q=q_brott_b;

elseif lastfall==3

    G=G_bruk;
    Q=Q_bruk;
    q=q_bruk;
end

%Inom for-loopen placeras loket på alla möjligt förekommande platser på
%trågbalken för att få fram de dimensionerande värdena.

for j=0.1:0.1:(L-2.0*L_Q) %Placeringar som j testas på
    utbredd_last_slutar = j; %Där den utbredda lasten slutar (0.8m från att
    den första punktlasten placeras)
    i=i+1;

    %vektorer: placerat utifrån lastfall 71
    if j<(L-4*L_Q)
        x(:,i)=[0,
            utbredd_last_slutar,
            utbredd_last_slutar+0.5*L_Q,
            utbredd_last_slutar+1.5*L_Q,
            utbredd_last_slutar+2.5*L_Q,
            utbredd_last_slutar+3.5*L_Q,
            utbredd_last_slutar+4*L_Q,
            L,
            2*L];

    elseif j==(L-4*L_Q)
        k=0.001; %korregering så inte någon koordinat blir samma
        %(Flyttar loket 0.001 m)
        x(:,i)=[0,
            utbredd_last_slutar-k,
            utbredd_last_slutar+0.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+1.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+2.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+3.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+4*L_Q-k,
            L,
            2*L];

    elseif (j>(L-4*L_Q)) && (j<(L-3.5*L_Q))
        k=0.001; %korregering så inte någon koordinat blir samma
        %(Flyttar loket 0.001 m)
        x(:,i)=[0,
            utbredd_last_slutar-k,
            utbredd_last_slutar+0.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+1.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+2.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+3.5*L_Q-k,
            L,
            utbredd_last_slutar+4*L_Q-k,
            2*L];

    elseif j==(L-3.5*L_Q)
        k=0.001; %korregering så inte någon koordinat blir samma
        %(Flyttar loket 0.001 m)
        x(:,i)=[0,
            utbredd_last_slutar-k,
            utbredd_last_slutar+0.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+1.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+2.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+3.5*L_Q-k,
            L,
            2*L];
    end
end

```

```

        utbredd_last_slutar+4*L_Q-k,
        2*L]

elseif (j>(L-3.5*L_Q)) && (j<(L-2.5*L_Q))
    k=0.001; %korregering så inte någon koordinat blir samma
    %(Flyttar locket 0.001 m)
    x(:,i)=[0,
        utbredd_last_slutar-k,
        utbredd_last_slutar+0.5*L_Q-k,
        utbredd_last_slutar+1.5*L_Q-k,
        utbredd_last_slutar+2.5*L_Q-k,
        L,
        utbredd_last_slutar+3.5*L_Q-k,
        utbredd_last_slutar+4*L_Q-k,
        2*L];

    elseif j==(L-2.5*L_Q)
        k=0.001; %korregering så inte någon koordinat blir samma
        %(Flyttar locket 0.001 m)
        x(:,i)=[0,
            utbredd_last_slutar-k,
            utbredd_last_slutar+0.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+1.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+2.5*L_Q-k,
            L,
            utbredd_last_slutar+3.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+4*L_Q-k,
            2*L];

    elseif j>(L-2.5*L_Q)
        k=0.001; %korregering så inte någon koordinat blir samma
        %(Flyttar locket 0.001 m)
        x(:,i)=[0,
            utbredd_last_slutar-k,
            utbredd_last_slutar+0.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+1.5*L_Q-k,
            L,
            utbredd_last_slutar+2.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+3.5*L_Q-k,
            utbredd_last_slutar+4*L_Q-k,
            2*L];

end

%-----

Edof=[1 1 2 3 4 5 6
      2 4 5 6 7 8 9
      3 7 8 9 10 11 12
      4 10 11 12 13 14 15
      5 13 14 15 16 17 18
      6 16 17 18 19 20 21
      7 19 20 21 22 23 24
      8 22 23 24 25 26 27]; %Topologimatrix

%allokerar plats
ex=zeros(nel,2);
ey=zeros(nel,2);
eq=zeros(nel,2);

for i_el=1:nel
    ex(i_el,:)=x(i_el,i),x(i_el+1,i)];

    eq(i_el,2)=-G; %Last från egenvikt
end

```

```

%Trafiklast
eq(1,2)=eq(1,2)-q;
eq(nel,2)=eq(nel,2)-q;

if j<(L-4*L_Q)
eq(nel-1,2)=eq(nel-1,2)-q;

elseif j==(L-4*L_Q)
eq(nel-1,2)=eq(nel-1,2)-q;
end

%Allokerar plats
K=zeros(ndof,ndof); %K-matris
f=zeros(ndof,1); %Krafter

for m=1:nel
[Ke,fe]=beam2e(ex(m,:),ey(m,:),Ep,eq(m,:));
[K,f]=assem(Edof(m,:),K,Ke,f,fe);
end

%placering av punktlaster
if j<(L-3.5*L_Q)
f(8)=f(8)-Q;
f(11)=f(11)-Q;
f(14)=f(14)-Q;
f(17)=f(17)-Q;

elseif j==(L-3.5*L_Q)
f(8)=f(8)-Q;
f(11)=f(11)-Q;
f(14)=f(14)-Q;
f(17)=f(17)-Q;

elseif (j<(L-2.5*L_Q)) && (j>(L-3.5*L_Q))
f(8)=f(8)-Q;
f(11)=f(11)-Q;
f(14)=f(14)-Q;
f(20)=f(20)-Q;

elseif j==(L-2.5*L_Q)
f(8)=f(8)-Q;
f(11)=f(11)-Q;
f(14)=f(14)-Q;
f(20)=f(20)-Q;

elseif j>(L-2.5*L_Q)
f(8)=f(8)-Q;
f(11)=f(11)-Q;
f(17)=f(17)-Q;
f(20)=f(20)-Q;
end

%Randvilkor
if j<(L-4*L_Q)
bc=[2 0
22 0
23 0
26 0];

elseif j==(L-4*L_Q)
bc=[2 0
22 0
23 0
26 0];

elseif (j<(L-4*L_Q)) && (j>(L-3.5*L_Q))

```

```

        bc=[2 0
            19 0
            20 0
            26 0];

elseif j==(L-3.5*L_Q)
    bc=[2 0
        19 0
        20 0
        26 0];

elseif (j<(L-2.5*L_Q)) && (j>(L-3.5*L_Q))
    bc=[2 0
        16 0
        17 0
        26 0];

elseif j==(L-2.5*L_Q)

    bc=[2 0
        16 0
        17 0
        26 0];

elseif j>(L-2.5*L_Q)

    bc=[2 0
        13 0
        14 0
        26 0];

end

[a,fb]=solveq(K,f,bc);
Ed=extract(Edof,a);

for i_el=1:nel
    [es,edi,eci]=beam2s(ex(i_el,:),ey(i_el,:),Ep,Ed(i_el,:),eq(i_el,:),20);
    T(:,i_el)=es(:,2); %Tvärkraft
    M(:,i_el)=es(:,3); %Moment
    w(:,i_el)=edi(:,2); %Nedböjning
    X(:,i_el)=eci+ex(i_el,1); %x-koordinat
end

%Lagring av värden
moment(i,1)= {M};
tvarkraft(i,1)= {T};
nedbojning(i,1)={w};
x_kord(i,1)= {X};

%Maxvärden
w_max(i,1)=max(max(abs(w)));
T_max(i,1)=max(max(abs(T)));
M_max(i,1)=max(max(abs(M)));
end

%Dimensionerande värden
[M_dim,M_pos]=max(M_max);
[T_dim,T_pos]=max(T_max);
[w_dim,w_pos]=max(w_max);

```

```

%plottar figurer
figure(1)
plot(x_kord{M_pos}, -moment{M_pos}, 'b')
grid on
hold on
plot([0 90], [0 0], 'k')
title('Dimensionerande Moment Längs Trågbalk')
xlabel('Längd [m]')
ylabel('Moment [Nm]')

figure(2)
plot(x_kord{T_pos}, tvarkraft{T_pos}, 'b')
grid on
hold on
plot([0 90], [0 0], 'k')
title('Dimensionerande Tvärkraft Längs Trågbalk')
xlabel('Längd [m]')
ylabel('Tvärkraft [N]')

for u= 1:nel-1
    line([x_kord{T_pos}(20,u) x_kord{T_pos}(1,u+1)], [tvarkraft{T_pos}(20,u)
tvarkraft{T_pos}(1,u+1)], 'Color', 'b')
end

figure(3) %Används enbart för lastfall 3
plot(x_kord{w_pos}, nedbojning{w_pos}, 'b')
title('Nedböjning av Trågbalk')
xlabel('Längd [m]')
ylabel('Nedböjning [m]')
grid on
hold on
plot([0 90], [0 0], 'k')

```

Kapacitet trågbalk

```

%Hållfashetsklass
fy=355*10^6; %ej reducerad
fy_red=335*10^6; %reducerad

%konstanter
X_LT=1; y_M1=1; y_m0=1;
n=1.2; Xw=1;
kappa=5.34; %bucklingskoefficient
epsilon=sqrt(235/(fy_red*10^-6));

%Moment
Mb_rd=X_LT*W*fy_red/y_M1;

%Tvärkraft (om det inte risk för skjuvbuckling)
Av=n*hw*tw;
lambda_w=(hw/tw)/(37.4*epsilon*sqrt(kappa));

%antar styva ändavstyvningar
if lambda_w<0.8/n
    Xw=n;
elseif lambda_w>=0.8/n && lambda_w<1.08
    Xw=0.83/lambda_w;
elseif lambda_w>=1.08
    Xw=1.37/(0.7+lambda_w);
end

if hw/tw <= 31*epsilon/n*sqrt(kappa)

    V_Rd=Xw*hw*tw*(fy_red/(sqrt(3)*y_M1));

```

```

else
V_Rd= Av*((fy_red/sqrt(3))/y_m0); %

end

%Framtagna dimensionerande värden och kapaciteter för trågbalk
Mb_rd; M_dim; V_Rd; T_dim; w_dim; L/600;

if Mb_rd>M_dim && V_Rd>T_dim && L/600>w_dim
    UttnyttjandeMoment=M_dim/Mb_rd           %Undersöks för den mest
    påfrestande brottlasten
    Uttnyttjandetvarkraft=T_dim/V_Rd         %Undersöks för den mest
    påfrestande brottlasten
    Uttnyttjandenedbojning=w_dim/(L/600)      %Undersöks för
    Brukgränstillstånd
    disp('ok')
else
    UttnyttjandeMoment=M_dim/Mb_rd           %Undersöks för den mest
    påfrestande brottlasten
    Uttnyttjandetvarkraft=T_dim/V_Rd         %Undersöks för den mest
    påfrestande brottlasten
    Uttnyttjandenedbojning=w_dim/(L/600)      %Undersöks för
    Brukgränstillstånd
    disp('ej ok')
end

```

Published with MATLAB® R2020b

Bilaga Q – Dimensionering av tvärbalkarna

Dimensioneringen av tvärbalkarna utgick ifrån modellen i figur 10, där trafiklasten sprids ner genom ballasten från en sliper enligt bilaga M. Beräkningarna utgår från två olika randvillkor, fast inspänd eller fritt upplagd. Dimensionerande värden för tvärbalken fås när tvärbalken antas fritt upplagd, där det dimensionerande momentet och tvärkrafter beräknas under brottsgränstillstånd och nedböjningen under brukgränstillstånd. Tvärbalkarnas kapacitet beräknas enligt kapitel S2.8, S4.3 och S5.5 från Bärande konstruktioner – Del 1 (Al-Emrani et al., 2019). Vid kapacitetsberäkningarna antas styva ändavstyvningar.

För dimensionering av svetsarna i bilaga S erfordras de största krafterna som kan verka i anslutningen mellan tråg- och tvärbalkarna. För att uppnå detta antas tvärbalken fast inspänd mellan trågbalkarna enligt modellen i figur 18.

Indata

- Tvärbalkens geometri (IPE-360)
- Stålets elasticitetsmodul och hållfasthet
- Dimensionerande laster för tvärbalken enligt bilaga O – Framtagande av dimensionerande laster

Beräknat

- Tvärbalkarnas dimensionerade tvärkraft, moment och maximal nedböjning
- Tvärbalkarnas moment- och tvärkraftskapacitet
- Utnyttjandegrad av tvärbalkarnas samtliga dimensionerande värden

Resultat

Tvärbalkarnas dimensionerade värden, kapacitet och utnyttjandegrad

	Moment [kNm]	Tvärkraft [kN]	Nedböjning [mm]
Kapacitet	320,88	658,36	7,23
Dimensionerande	195,28	147,29	6,6
Utnyttjandegrad	60,86 %	22,37 %	91,79 %

Dimensionerade krafter för svetsarna

Normalkraft [kN]	Tvärkraft [kN]	Moment [kNm]
0	147,29	127,23

Beräkande MATLAB-kod:

Dimensionering Tvärbalk

```
%Lastfall
lastfall_tvar=2;

if lastfall_tvar==1
    G_tvar=G_brott_a_tvar;
    Q_tvar=Q_brott_a_tvar/2; %delas upp enligt svensk standard
elseif lastfall_tvar==2
    G_tvar=G_brott_b_tvar;
    Q_tvar=Q_brott_b_tvar/2;%delas upp enligt svensk standard
elseif lastfall_tvar==3
    G_tvar=G_bruk_tvar;
    Q_tvar=Q_bruk_tvar/2; %delas upp enligt svensk standard
```

```

end

%Randvilkor beroende på Inspänning
inspanning=1;

if inspanning==1 %Fast inspänd
    bc_tvar=[1 0
            2 0
            3 0
            10 1
            11 0
            12 0];

else %Fritt upplagd
    bc_tvar=[1 0
            2 0
            11 0];
end

%Element
nel_tvar=3; %antal element
ndof_tvar=(nel_tvar+1)*3; %Antal frihetsgrader

Edof_tvar=[1 1 2 3 4 5 6
           2 4 5 6 7 8 9
           3 7 8 9 10 11 12]; %topologimatrix

%allokerar plats
ey_tvar=zeros(nel,2);
eq_tvar=zeros(nel,2);

ex_tvar=[0 (B_tvar-s)/2
          (B_tvar-s)/2 (B_tvar-s)/2+s
          (B_tvar-s)/2+s B_tvar];

for i_el=1:nel_tvar

eq_tvar(i_el,2)=-G_tvar; %Last från egenvikt
end

%Trafiklast
eq_tvar(2,2)=eq_tvar(2,2)-Q_tvar/s;

K_tvar=zeros(ndof_tvar,ndof_tvar); f_tvar=zeros(ndof_tvar,1);

for m=1:nel_tvar
[Ke_tvar,fe_tvar]=beam2e(ex_tvar(m,:),ey_tvar(m,:),Ep_tvar,eq_tvar(m,:));
[K_tvar,f_tvar]=assem(Edof_tvar(m,:),K_tvar,Ke_tvar,f_tvar,fe_tvar);
end

[a_tvar,fb_tvar]=solveq(K_tvar,f_tvar,bc_tvar);
Ed_tvar=extract(Edof_tvar,a_tvar);

for i_el=1:nel_tvar
[es_tvar,edi_tvar,eci_tvar]=beam2s(ex_tvar(i_el,:),ey_tvar(i_el,:),Ep_tvar,E
d_tvar(i_el,:),eq_tvar(i_el,:),20);
T_tvar(:,i_el)=es_tvar(:,2); %Tvärkraft
M_tvar(:,i_el)=es_tvar(:,3); %Moment
w_tvar(:,i_el)=edi_tvar(:,2); %Nedböjning
X_tvar(:,i_el)=eci_tvar+ex_tvar(i_el,1); %x-koordinat
end

%Maxvärden

```

```

w_max_tvar=max(max(abs(w_tvar)));
T_max_tvar=max(max(abs(T_tvar)));
M_max_tvar=max(max(abs(M_tvar)));

figure(4)
plot(X_tvar, -M_tvar, 'b')
grid on
hold on
plot([0 B_tvar], [0 0], 'k')
axis([0 4.5 -2*10^5 1*10^5])
title('Dimensionerande Moment Längs Tvärbalk')
xlabel('Längd [m]')
ylabel('Moment [Nm]')

figure(5)
plot(X_tvar, T_tvar, 'b')
grid on
hold on
plot([0 B_tvar], [0 0], 'k')
title('Dimensionerande Tvärkraft Längs Tvärbalk')
xlabel('Längd [m]')
ylabel('Tvärkraft [N]')

figure(6) %Används enbart för lastfall 3
plot(X_tvar, w_tvar, 'b')
axis([0 4.5 -1.2*10^-2 1*10^-3])
title('Nedböjning av Tvärbalk')
xlabel('Längd [m]')
ylabel('Nedböjning [m]')
grid on
hold on
plot([0 B_tvar], [0 0], 'k')

```

Kapacitet tvärbalk

```

%materialegenskaper samma som för trågbalk, utan det reducerade värdet
%konstanter samma som för trågbalk

%Moment
Mb_rd_tvar=X_LT*W_tvar*fy/y_M1; %se bärande konstruktioner del 1

%Tvärkraft (inte risek för skjuvbuckling)
Av_tvar=n*hw_tvar*tw_tvar;

lambda_w_tvar=(hw_tvar/tw_tvar)/(37.4*epsilon*sqrt(kappa));

%antar styva ändavstyvningar
if lambda_w_tvar<0.8/n
    Xw_tvar=n;
elseif lambda_w_tvar>=0.8/n && lambda_w_tvar<1.08
    Xw_tvar=0.83/lambda_w_tvar;
elseif lambda_w_tvar>=1.08
    Xw_tvar=1.37/(0.7+lambda_w_tvar);
end

if hw_tvar/tw_tvar <= 31*epsilon/n*sqrt(kappa)

    V_Rd_tvar=Xw_tvar*hw_tvar*tw_tvar*(fy/(sqrt(3)*y_M1));

else
V_Rd_tvar= Av_tvar*((fy/sqrt(3))/y_m0);

```

```

end

%Framtagna dimensionerande värden och kapaciteter för tvärbalk
Mb_rd_tvar; M_max_tvar; V_Rd_tvar; T_max_tvar; B_tvar/600; w_max_tvar;

if Mb_rd_tvar>M_max_tvar && V_Rd_tvar>T_max_tvar && (B_tvar/600)>w_max_tvar
    UttnyttjandeMoment_tvar=M_max_tvar/Mb_rd_tvar           %Undersöks för den
mest påfrestande brottlasten
    Uttnyttjandetvarkraft_tvar=T_max_tvar/V_Rd_tvar         %Undersöks för den
mest påfrestande brottlasten
    Uttnyttjandenedbojning=w_max_tvar/(B_tvar/600)           %Undersöks för
Brukgränstillstånd
    disp('ok')
else
    UttnyttjandeMoment_tvar=M_max_tvar/Mb_rd_tvar           %Undersöks för den
mest påfrestande brottlasten
    Uttnyttjandetvarkraft_tvar=T_max_tvar/V_Rd_tvar         %Undersöks för den
mest påfrestande brottlasten
    Uttnyttjandenedbojning_tvar=w_max_tvar/(B_tvar/600)     %Undersöks för
Brukgränstillstånd
    disp('ej ok')
end

```

Published with MATLAB® R2020b

Bilaga R – Dimensionering av brobaneplattan

Brobaneplattan dimensioneras utifrån beräkningsmodellen i figur 14, där plattan sträcker sig mellan fyra tvärbalkar. Trafiklasten är tre utbredda laster som spridits ner genom ballasten från slipers enligt bilaga N. Dimensionerande moment och tvärkraft beräknas i brottgränstillstånd och dimensionerande nedböjning i brukgränstillstånd. Brobaneplattans kapacitet beräknas enligt kapitel S2.8, S4.3 och S5.5 från Bärande konstruktioner – Del 1 (Al-Emrani et al., 2019).

Indata

- Brobaneplattans geometri
- Stålets elasticitetsmodul och hållfasthet
- Dimensionerande laster för brobaneplattan enligt bilaga O – Framtagande av dimensionerande laster

Beräknat

- Brobaneplattans dimensionerade tvärkraft, moment och maximal nedböjning
- Brobaneplattans moment- och tvärkraftskapacitet
- Utnyttjandegrad av brobaneplattans samtliga dimensionerande värden

Resultat

Brobaneplattans dimensionerade värden, kapacitet och utnyttjandegrad

	Moment [kNm]	Tvärkraft [kN]	Nedböjning [mm]
Kapacitet	43,376	1 155,8	1
Dimensionerande	16,644	145,21	0,91
Utnyttjandegrad	38,37 %	1,26 %	90,98 %

Beräknande MATLAB-kod:

Dimensionering Brobaneplatta

```
%Mått
s_platta=b_sliper+2*(0.6-h_sliper)/4; %Bredd på utbredd trafiklast som
verkar på brobaneplattan
B1=(c-s_platta)/2;

%Element
nel_platta=9; %Antal element
ndof_platta=(nel_platta+1)*3; %Antal frihetsgrader, 3 per nod

%Lastfall

lastfall_platta=2; % 1 = Lastfall a
                % 2 = Lastfall b
                % 3 = Brukgränstillstånd

if lastfall_platta==1
    G_platta=G_brott_a_platta;
    Q_platta=Q_brott_a_platta;

elseif lastfall_platta==2
    G_platta=G_brott_b_platta;
    Q_platta=Q_brott_b_platta;

elseif lastfall_platta==3
```

```

    G_platta=G_bruk_platta;
    Q_platta=Q_bruk_platta;
end

Edof_platta=[1 1 2 3 4 5 6
             2 4 5 6 7 8 9
             3 7 8 9 10 11 12
             4 10 11 12 13 14 15
             5 13 14 15 16 17 18
             6 16 17 18 19 20 21
             7 19 20 21 22 23 24
             8 22 23 24 25 26 27
             9 25 26 27 28 29 30]; %Topologimatrix

%Allokerar plats
ey_platta=zeros(nel_platta,2);
eq_platta=zeros(nel_platta,2);

ex_platta=[0 B1; B1 c-B1; c-B1 c; c c+B1; c+B1 2*c-B1; 2*c-B1 2*c; 2*c
2*c+B1; 2*c+B1 3*c-B1; 3*c-B1 3*c]; %Elementens positioner i x-led

for i_el=1:nel_platta

    eq_platta(i_el,2)=-G_platta;%Last från egenvikt
end

%Trafiklast
eq_platta(2,2)=eq_platta(2,2)-(Q_platta/4)/s_platta;
eq_platta(5,2)=eq_platta(5,2)-(Q_platta/2)/s_platta;
eq_platta(8,2)=eq_platta(8,2)-(Q_platta/4)/s_platta;

%Randvilkor
bc_platta=[1 0
           2 0
           11 0
           20 0
           29 0];

K_platta=zeros(ndof_platta,ndof_platta); f_platta=zeros(ndof_platta,1);

for m=1:nel_platta
    [Ke_platta,fe_platta]=beam2e(ex_platta(m,:),ey_platta(m,:),Ep_platta,eq_platta(m,:));
    [K_platta,f_platta]=assem(Edof_platta(m,:),K_platta,Ke_platta,f_platta,fe_platta);
end

[a_platta,fb_platta]=solveq(K_platta,f_platta,bc_platta);
Ed_platta=extract(Edof_platta,a_platta);

for i_el=1:nel_platta
    [es_platta,edi_platta,eci_platta]=beam2s(ex_platta(i_el,:),ey_platta(i_el,:),Ep_platta,Ed_platta(i_el,:),eq_platta(i_el,:),20);
    T_platta(:,i_el)=es_platta(:,2); %Tvärkraft
    M_platta(:,i_el)=es_platta(:,3); %Moment
    w_platta(:,i_el)=edi_platta(:,2); %Nedböjning
    X_platta(:,i_el)=eci_platta+ex_platta(i_el,1); %x-koordinat
end

%Maxvärden
w_max_platta=max(max(abs(w_platta)));
T_max_platta=max(max(abs(T_platta)));
M_max_platta=max(max(abs(M_platta)));

```

```

figure(7)
plot(X_platta, -M_platta, 'b')
grid on
hold on
plot([0 c*3], [0 0], 'k')
title('Dimensionerande Moment Längs Brobaneplatta')
xlabel('Längd [m]')
ylabel('Moment [Nm]')

figure(8)
plot(X_platta, T_platta, 'b')
grid on
hold on
plot([0 c*3], [0 0], 'k')
title('Dimensionerand Tvärkraft Längs Brobaneplatta')
xlabel('Längd [m]')
ylabel('Tvärkraft [N]')

line([ex_platta(3,2) ex_platta(4,1)], [T_platta(20,3)
T_platta(1,4)], 'Color', 'b');
line([ex_platta(6,2) ex_platta(7,1)], [T_platta(20,6)
T_platta(1,7)], 'Color', 'b');

figure(9) %Används enbart för lastfall 3
plot(X_platta, w_platta, 'b')
title('Nedböjning av Brobaneplatta')
xlabel('Längd [m]')
ylabel('Nedböjning [m]')
grid on
hold on
plot([0 c*3], [0 0], 'k')

```

Kapacitet brobaneplatta

```

%materialegenskaper samma som för trågbalk, utan det reducerade värdet
%konstanter samma som för trågbalk

%Moment
Mb_rd_platta=X_LT*W_platta*fy/y_M1; %se bärande konstruktioner del 1

%Tvärkraft (inte risk för skjувbuckling)
Av_platta=A_platta;

V_Rd_platta= Av_platta*((fy/sqrt(3))/y_m0);

%Framtagna dimensionerande värden och kapaciteter för Brobaneplatta
Mb_rd_platta; M_max_platta; V_Rd_platta; T_max_platta; c/600; w_max_platta;

if Mb_rd_platta>M_max_platta && V_Rd_platta>T_max_platta &&
(c/600)>w_max_platta
    UttnyttjandeMoment_platta=M_max_platta/Mb_rd_platta %Undersöks
    för den mest påfrestande brottlasten
    Uttnyttjandetvarkraft_platta=T_max_platta/V_Rd_platta %Undersöks
    för den mest påfrestande brottlasten
    Uttnyttjandenedbojning_platta=w_max_platta/(c/600) %Undersöks
    för Brukgränstillstånd
    disp('ok')
else
    UttnyttjandeMoment_platta=M_max_platta/Mb_rd_platta %Undersöks
    för den mest påfrestande brottlasten
    Uttnyttjandetvarkraft_platta=T_max_platta/V_Rd_platta %Undersöks
    för den mest påfrestande brottlasten

```

```
    Uttnyttjandenedbojning_platta=w_max_platta/(c/600)           %Undersöks  
för Brukgränstillstånd  
    disp('ej ok')  
end
```

Published with MATLAB® R2020b

Bilaga S – Dimensionering av svetsar

Tvårbalkarna svetsas ihop med trågbalkarna med svetsar längs båda sidorna av livet samt med svetsar på utkanterna av flänsarna enligt bilaga I. Dimensioneringen av svetsarna baseras utifrån det dimensionerande momentet och tvärkraften i ändupplagen för tvårbalkarna som beräknades i bilaga Q. I kapacitetsberäkningarna för svetsarna görs antagandet att tvårbalken är fast inspänd. Svetsarnas kapacitet beräknas enligt kapitel S9 från Bärande konstruktioner – Del 2 (Al-Emrani et al., 2011).

Indata

- Trågbalkens geometri
- Itererat a-mått för svetsarna längs liv och flänsar
- Stålets elasticitetsmodul och hållfasthet
- Dimensionerande moment och tvärkraft i ändupplagen för tvårbalken enligt bilaga Q – Dimensionering av tvårbalkarna

Beräknat

- Dimensionerande spänningen på svetsen
- Svetsen spänningskapacitet
- Utnyttjandegrad för svetsarna

Resultat

Svetsarnas längs livets dimensionerade värden, kapacitet och utnyttjandegrad

	Dimensionerande spänningar [MPa]	Spänningskapacitet [MPa]	Utnyttjandegrad [%]
$\sigma_{\perp}$	0	367,2	0
σ_{tot}	142,39	453,33	31,41

Svetsarnas längs flänsarna dimensionerade värden, kapacitet och utnyttjandegrad

	Dimensionerande spänningar [MPa]	Spänningskapacitet [MPa]	Utnyttjandegrad [%]
$\sigma_{\perp}$	210	367,2	57,19
σ_{tot}	420	453,33	92,65

Beräknande MATLAB-kod

Dimensionering svetsar mellan tvär- och trågbalk

```
%Då görs antagandet att tvårbalken är fast inspänd
%Svetsen finns längs livet och på flänsens ovankant

%Materialegenskaper
fu=510*10^6;

%krafter tas från lastfall med fast inspänd tvårbalk i brottgräns
T_forband=fb_tvar(2); %Tvärkraften i ändupplaget
M_forband=fb_tvar(3); %Momentet i ändupplaget

%Svets dimensioner
a_w=0.003; a_f=0.007; %Får inte vara mindre än 3 mm
Lj_w=hw_tvar-2*R_tvar; Lj_f=b_tvar; %Längd på svets
```

```

Beta_L_w=1.2-(0.2*Lj_w)/(150*a_w); Beta_L_f=1.2-(0.2*Lj_f)/(150*a_f);

%krav på längd
if Lj_w<=150*a_w
L_w=Lj_w;
else
L_w=Beta_L_w*Lj_w;
end

if Lj_f<=150*a_f
L_f=Lj_f;
else
L_f=Beta_L_f*Lj_f;
end

%Spänningar
Tau_II_w=T_forband/(2*a_w*L_w);
sigma_tot_w=sqrt(3*Tau_II_w^2);

Tau_v_f=(M_forband/(h_tvar))/(sqrt(2)*L_f*a_f);
sigma_v_f=Tau_v_f;
sigma_tot_f=sqrt(sigma_v_f^2+3*Tau_v_f^2);

Beta_w=0.9; y_M2=1.25;

%Krav på Spänning
KRAV_sigma_v_f=0.9*fu/y_M2;
KRAV=fu/(Beta_w*y_M2);

if sigma_tot_w<KRAV && sigma_tot_f<KRAV && sigma_v_f<KRAV_sigma_v_f
disp('svets ok')
else
disp('svets ej ok')
end

```

Published with MATLAB® R2020b

Bilaga T – Värden på permanenta laster

Föreläsningsbild från föreläsning av Joosef Leppänen *Brolaster* 2021-02-18

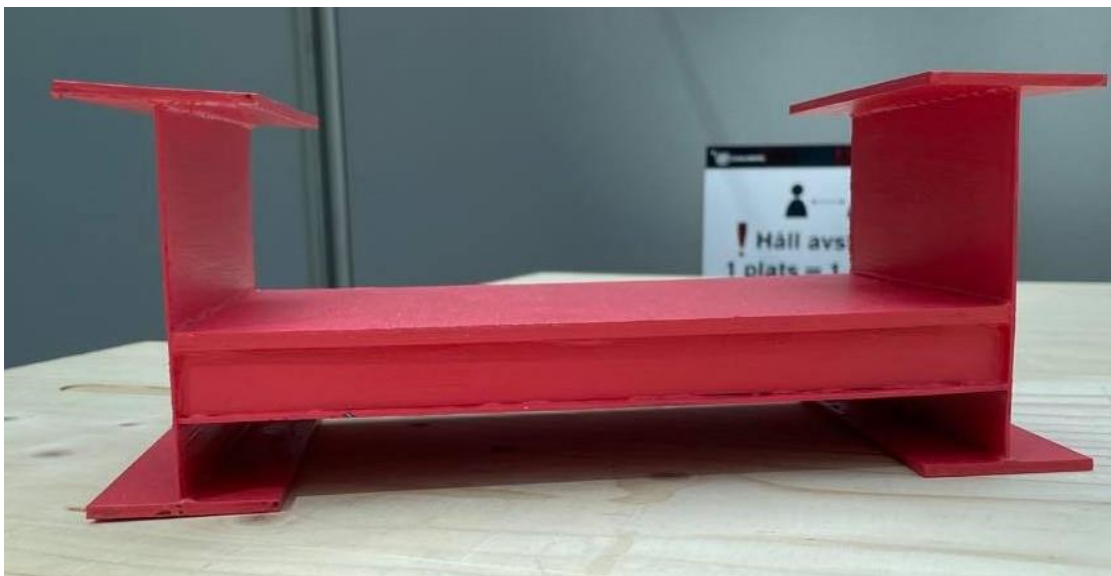
Permanenta laster

Egenvikt och beläggning

- Armerad betong 25 kN/m^3
- Trä, C14-C40, $3,5\text{-}5,0 \text{ kN/m}^3$
- Stål $77\text{-}78,5 \text{ kN/m}^3$
- Asfaltbeläggning 23 kN/m^3
- Gjutasfalt $24 - 25 \text{ kN/m}^3$
- Ballast 20 kN/m^3
- Broräcke, räl $0,5 \text{ kN/m}$

Bilaga U – Bromodell

Bromodell i trä utav slutgiltigt brokonceptet vid Backavägen i skala 1:100 följt av en sektion av brokonceptet i skala 1:20.





CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY