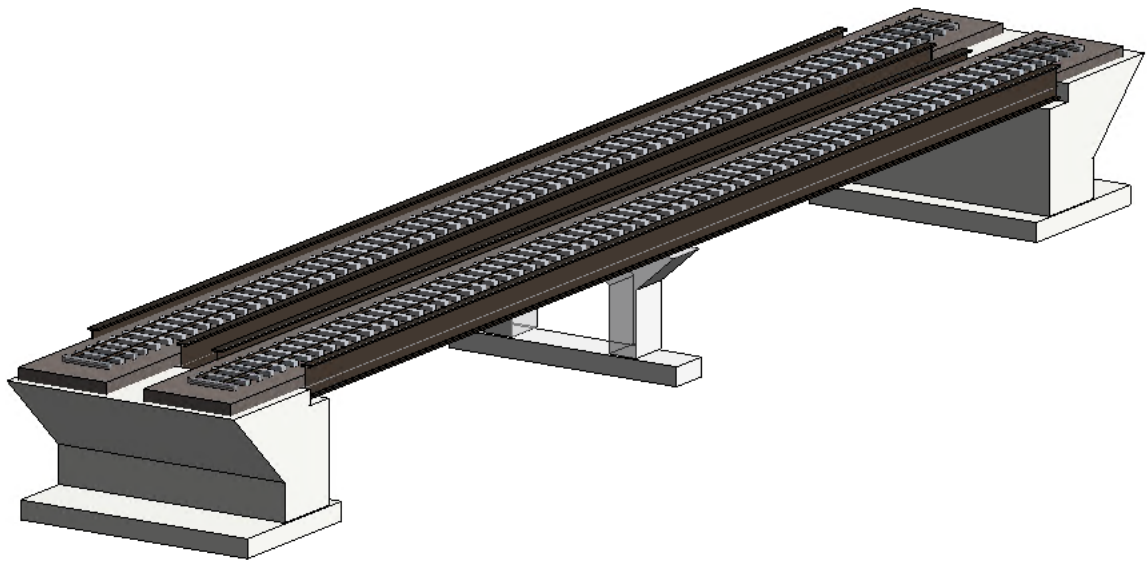




CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Järnvägsbro på Bohusbanan över Lillhagsvägen

Förstudie och utveckling av broförslag

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

EMELIE FALKENBERG, VILMA JOHANSSON,
CARL-JOHAN KÄLL, REBECCA PHILIPSSON FRANZÉN,
PAULINA SUNDELIUS, EMY WAHLQVIST

KANDIDATARBETE

Järnvägsbro på Bohusbanan över Lillhagsvägen Förstudie och utveckling av broförslag

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

EMELIE FALKENBERG, VILMA JOHANSSON,
CARL-JOHAN KÄLL, REBECKA PHILIPSSON FRANZÉN,
PAULINA SUNDELIUS, EMY WAHLQVIST



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2020

Järnvägsbro på Bohusbanan över Lillhagsvägen
Förstudie och utveckling av broförslag

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

© EMELIE FALKENBERG, VILMA JOHANSSON,
CARL-JOHAN KÄLL, REBECKA PHILIPSSON FRANZÉN,
PAULINA SUNDELIUS, EMY WAHLQVIST, 2020.

Handledare: Mario Plos, Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Examinator: Reza Haghani, Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag: Modell av slutgiltigt broförslag

Skriven i L^AT_EX
Göteborg 2020

JÄRNVÄGSBRO PÅ BOHUSBANAN ÖVER LILLHAGSVÄGEN

Förstudie och utveckling av broförslag

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

EMELIE FALKENBERG, VILMA JOHANSSON,
CARL-JOHAN KÄLL, REBECKA PHILIPSSON FRANZÉN,
PAULINA SUNDELIUS, EMY WAHLQVIST

SAMMANFATTNING

I enlighet med vision Älvstaden, ett stadsutvecklingsprojekt som innefattar de centrala delarna av Göteborg längs med Göta Älv, ska området Backaplan och järnvägen Bohusbanan utvecklas genom ombyggnad och utbyggnad. Här ingår den nuvarande bomförsedda korsningen mellan Bohusbanan och Lillhagsvägen som i framtiden ska utvecklas till en dubbelspårig, planskild korsning. Detta medför att en järnvägsbro med en total längd på 60 meter behöver byggas på platsen. Rapporten syftar därmed till att, utifrån krav och framtagna kriterier, välja lämpligt brokoncept för platsen samt göra en preliminär dimensionering för valt brokoncept. En omfattande litteraturstudie påbörjades och innefattade olika sorters brotyper och material som skulle kunna användas. Även eventuella produktionsmetoder samt underhåll och inspektioner undersöktes med hänsyn till de granskade brotyperna och materialen.

Vidare gjordes tre urvalsprocesser för att utesluta olika broalternativ som kommit fram som förslag vid litteraturstudien. I första urvalsprocessen uteslöts brotyper främst på grund av geografiska och tekniska krav såsom krav på fri höjd och spännvidd. I de två andra urvalsprocesserna användes ett antal kriterier för att bedöma vilket brokoncept som var mest lämpligt för platsen. Kriterierna utvecklades av tre specialistgrupper, *Beställare och konstruktion*, *Produktion* samt *Inspektion och underhåll* och viktades sedan mot varandra. I slutändan innebar det att ett slutgiltigt brokoncept återstod. Detta koncept ansågs vara mest lämplig för platsens förutsättningar samt andra aspekter och krav från specialistgrupper.

Det slutgiltiga brokonceptet bestod av en trågbalkbro i stål med ett mittstöd placerad i mitten av spannet. Ytterligare efterforskning gjordes för att fastställa utformningen av överbyggnad, underbyggnad, detaljer och grundläggning. Även övergångskonstruktioner, produktionsmetod och möjligheten att inspektera och genomföra underhåll på bron undersöktes och fastställdes. Vidare gjordes även en preliminär dimensionering med hänsyn till brott- och bruksgränstillstånd där moment- och tvärkraftskapacitet, nedböjning samt olika svetsars kapacitet kontrollerades.

Nyckelord: Bro, Järnvägsbro, Stålbalkbro, Trågbalkbro, Lillhagsvägen, Bohusbanan, Brokoncept, Preliminär dimensionering, Kandidatarbete, Samhällsbyggnadsteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg

RAILWAY BRIDGE AT BOHUSBANAN OVER LILLHAGSVÄGEN

A study to suggest type of bridge and the dimensions

Bachelor's thesis in Civil Engineering

EMELIE FALKENBERG, VILMA JOHANSSON,
CARL-JOHAN KÄLL, REBECKA PHILIPSSON FRANZÉN,
PAULINA SUNDELIUS, EMY WAHLQVIST

ABSTRACT

As a part of Vision Älvstaden, which is a project to develop the city center of Gothenburg on both sides of Göta Älv, Backaplan and the railway Bohusbanan will be rebuilt and developed. This includes the level crossing barrier between Lillhagsvägen and Bohusbanan where a bridge will be built with double railway track and total length of 60 meters. Thereby, the aim of the report is to propose a bridge concept that is suitable for the area regarding requirements and different criteria, and to perform a preliminary design of the chosen concept. A comprehensive research began, which included various types of bridges and materials which could be used. Different types of production methods, inspections and maintenance related to the bridge types and materials were also considered.

Furthermore, three selections were carried out to exclude different type of bridges which had been suggested during the research. The first selection was based on the geographical and technical requirements such as construction height and span. The second and third selection was based on different criteria to decide which concept was more suitable for the specific area. The criteria was developed by three groups, *Client and construction*, *Production* and *Inspection and maintenance* and made it possible to develop the most suitable bridge concept for the area's prerequisites and requirements from the specialist groups.

The remaining bridge concept was a through bridge of steel with a middle support located in the middle of the span. A study was conducted to determine the superstructure, substructure, detailing and the foundation, but also production method and possibility to inspect and maintain the bridge. Furthermore, a preliminary study and design of the superstructure in ultimate limit state and serviceability limit state was made where the bending resistance, shear capacity, capacity of the welds and deflection was controlled.

Key words: Bridge, Railway bridge, Steel bridge, Through bridge, Preliminary design, Chalmers University of Technology, Gothenburg

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Syfte	1
1.2	Problembeskrivning	2
1.3	Avgränsningar	2
1.4	Metod	2
1.5	Samhälleliga och etiska aspekter	3
2	Förutsättningar och krav	4
2.1	Geografiska förutsättningar	4
2.2	Tekniska krav från Trafikverket	4
2.3	Produktion	5
2.4	Arbetsmiljö	5
2.5	Förvaltning	5
3	Urval	6
3.1	Urvalsprocess 1	6
3.2	Urvalsprocess 2	6
3.2.1	Estetik och innovation	6
3.2.2	Trygghet	7
3.2.3	Miljöpåverkan	7
3.2.4	Ekonomi	7
3.2.5	Beräkningsbarhet	7
3.2.6	Produktionsmetod	8
3.2.7	Produktionstid	8
3.2.8	Inspektion	8
3.2.9	Beständighet	8
3.2.10	Arbetsmiljö	8
3.2.11	Viktning av urvalskriterier	9
3.2.12	Uteslutna alternativ	9
3.2.13	Resultat urval 2	10
3.3	Urvalsprocess 3	10
3.3.1	Brokoncept 1 - Trågbalkbro i stål med mittstöd	10
3.3.2	Brokoncept 2 - Fackverksbro i stål	11
3.3.3	Brokoncept 3 - Balkbro i förspänd betong med mittstöd	12
3.3.4	Brokoncept 4 - Bågbro med överliggande båge och dragband i stål	13
3.3.5	Resultat urval 3	14
3.4	Slutligt brokoncept - Trågbalkbro i stål	15
3.4.1	Överbyggnad	15
3.4.2	Underbyggnad och grundläggning	16
3.4.3	Brodetaljer	16
3.4.4	Produktion	17
3.4.5	Förvaltning	18
3.4.6	Identifiering av risker	18

4	Beräkningsförutsättningar	19
4.1	Dimensionerande laster	19
4.1.1	Variabla vertikala laster	20
4.1.2	Variabla horisontella laster	21
4.1.3	Permanent laster	21
4.2	Lastspridning	22
4.3	Lastkombinering	22
5	Beräkningar och resultat	23
5.1	Lasteffekt	23
5.1.1	Resultat längdled	23
5.1.2	Resultat tvärled	24
5.2	Kapacitetsberäkningar för balkelement	24
5.3	Nedböjning	24
5.4	Dimensionering av svetsar	25
5.5	Dimensionering av bottenplatta	26
5.6	Val av lager	26
5.7	Slutgiltiga tvärsnittsmått	27
6	Diskussion	28
6.1	Litteraturstudie och urvalsprocess	28
6.2	Slutligt brokoncept och dimensionering	29
6.3	Återstående beräkningar och dimensionering	30
7	Slutsats	31
8	Referenser	32
9	Bilagor	35

Förord

Rapporten är ett kandidatarbete på Chalmers tekniska högskola, skrivet av sex studenter. Det omfattar 15 högskolepoäng och avslutar de tre första åren på civilingenjörsprogrammet inom samhällsbyggnadsteknik. Syftet är att studenterna ska fördjupa sig i och utveckla sina kunskaper inom ett valt område samt få en inblick i ett ingenjörsmässigt och vetenskapligt arbetssätt.

Vi vill tacka alla gästföreläsare som har gett oss värdefulla och intressanta föreläsningar under våren. Det har bidragit till fördjupade kunskaper inom brobyggnad och har gett oss en inblick i branschen. Vi vill också tacka brokonstruktörerna Staffan Lindén och Anna Egefalk samt deras kollegor på COWI som under arbetets gång har bistått med sina erfarenheter.

Ett stort tack även till vår handledare Mario Plos, docent och avdelningschef på konstruktionsteknik på Chalmers, som genom hela arbetet har stöttat och gett oss vägledning. Slutligen vill vi tacka Joosef Leppänen, Ignasi Fernandez och Mohammad Al-Emrani från avdelningen för konstruktionsteknik på Chalmers, för att ni med stort engagemang har hjälpt oss med allt från utformning till beräkningar.

Göteborg, maj 2020

Emelie Falkenberg
Vilma Johansson
Carl-Johan Käll
Rebecka Philipsson Franzén
Paulina Sundelius
Emy Wahlqvist

Ordlista

Brokoncept - En specifik utformning av en bro med omfattande beskrivning av ingående delar och detaljer

Brospann - Del av en bro mellan två upplagspunkter

Brotyp - Broar med liknande karaktär kan kategorieras under ett representabelt namn.

Brottgränstillstånd - Tillstånd då en bärande konstruktion befinner sig på gränsen till kollaps

Bruksgränstillstånd - Funktionen hos en bärande konstruktion under normal användning

Byggarbetsmiljösamordnaren - Juridisk eller fysisk person som ansvarar för att driva arbetsmiljöarbete inom ett byggprojekt.

Byggherre - Den som genomför eller låter genomföra byggnads-, projekterings-, rivnings- eller markarbeten

Detaljplan - Juridiskt bindande dokument där kommunen reglerar användningen av mark- och vattenområde

Halssvets - Kälsvetsar i en balkprofil

Konstruktionshöjd - Den totala höjden hos bron överbyggnad

Kälsvets - Svets som är placerad i vinkeln mellan två vinkelräta eller på varandra placerade konstruktionsdelar

Landfästen - Konstruktionsdel i ändarna av bron som bär laster från överbyggnaden och anslutande vall

Lager - Överför laster från överbyggnaden ner till underbyggnaden

RÖK - Rälens överkant

Spetsbärande pålar-Pålar som bär direkt ner till berg

Spår - Spår innefattar räler och sliprar

Stumsvets - Svets som förbinder en plan anslutning

Teknisk livslängd - Den tid en konstruktion är funktionsduglig.

Teoretisk spännvidd- Avståndet mellan två fasta punkter, till exempel avståndet mellan två upplagspunkter eller stöd för en konstruktionsdel

Underbyggnad - Underbyggnaden överför lasterna från överbyggnaden ner till grundläggningen. Till underbyggnaden tillhör allt nedan pelaröverkant till bottenplattans underkant

Överbyggnad - Den del av bron som tar upp trafiklaster. Till överbyggnaden tillhör allt ovan pelare, inklusive lager

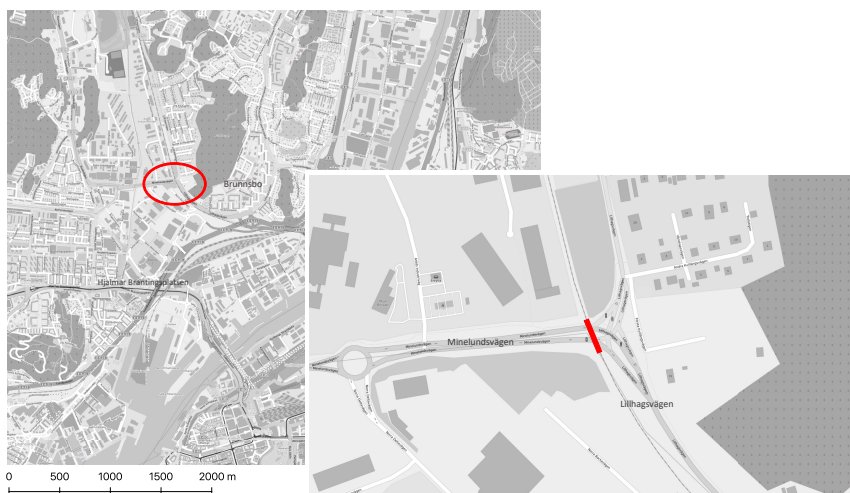
Överbyggnadshöjd - Avser avståndet mellan överbyggnadens underkant och RÖK

Översiktsplan - Dokument inom varje kommun som beskriver inriktningen för hur ett område långsiktigt ska utvecklas

1 Introduktion

Ombyggnationen av Lundbyleden del Brantings-Ringömotet i Göteborg är en av satsningarna i det Västsvenska paketet som har i uppgift att förbättra väg och järnväg som en del i att göra resandet mer hållbart och tillförlitligt (Göteborgs stad, 2018). Trafikverket (2018a) förklarar att för att minska störningskänsligheten på Bohusbanan och öka säkerheten för trafikanter kommer Bohusbanan vid sträckan Brunnsbo-Backaplan att byggas om till dubbelspårig järnväg och flera korsningar kommer att planskiljas. En av dessa korsningar är Minelundsvägen-Lillhagsvägen, vilket idag är en bomförsedd korsning som kommer planskiljas genom att en järnvägsbro byggs på platsen, se bilaga A.

Området domineras idag av småskalig villabebyggelse i nordost samt handels- och verksamhetsområde i väst, se figur 1. Det har tagits fram ett program för området som utgår från Vision Älvstaden (Göteborgs stad, 2012) samt gällande översiktsplan. Vision Älvstaden anger hur Göteborgs centrumbebyggelse intill Göta älv är tänkt att byggas, där även området kring Backaplan ingår. Därmed kommer stora förändringar ske i området med tät stadsbebyggelse och ett mer lättorienterat trafikstråk. För att göra Backaplan till en attraktiv del av Göteborg är utbyggnad och ombyggnad av järnvägen Bohusbanan en viktig aspekt. Byggnation av en järnvägsbro för aktuellt brolägg är därmed en del av detaljplanen (Göteborgs stad, 2018).



Figur 1: Karta över området och aktuell korsning, ©OpenStreetMaps bidragsgivare

1.1 Syfte

Projektets syfte är att ta fram ett lämpligt brokoncept utifrån krav och framtagna kriterier. En preliminär dimensionering av en järnvägsbro på Bohusbanan i korsningen Lillhagsvägen-Minelundsvägen ska genomföras för att planskilja järnväg från bilväg. Detta i enlighet med Trafikverkets mål för platsen, vilka är att minska störningskänsligheten på Bohusbanan, höja trafiksäkerheten och möjliggöra utvecklingen av området kring Backaplan och Brunnsbo (Trafikverket, 2018a).

1.2 Problembeskrivning

Arbetet omfattar framtagning samt preliminär dimensionering av ett brokonceptet för järnvägstrafik, som tillgodoser platsspecifika förutsättningar, tekniska krav samt krav från specialistgrupper. Specialistgrupperna utgörs av *Beställare och konstruktion*, *Produktion* samt *Förvaltning och underhåll*. Den preliminära dimensioneringen resulterar i dimensioner för brons överbyggnad, samt ett förslag på utformning av underbyggnad samt viktiga detaljer och knutpunkter i konstruktionen. Detta kräver en lämplig beräkningsmodell, där kraftfördelningen och responsen för de mest väsentliga lastfallen studeras. Projektets delproblem formuleras enligt nedan.

- Identifiering av risker i projektet
- Utvärdering av olika brokoncept
- Presentation av det mest lämpliga brokonceptet utifrån framtagna utvärderingskriterier
- Preliminär dimensionering av valt brokoncept
- Rimlighetsbedömning och utvärdering av preliminär dimensionering

1.3 Avgränsningar

Projektet tar i begränsad utsträckning hänsyn till geotekniska och hydrogeologiska aspekter och inga vidare undersökningar görs. Inga detaljerade utformningar av räl, signaltekniska eller eltekniska anläggningar redovisas. I projektet genomförs inga ekonomiska kalkyler. Tillfälliga konstruktioner, skyddsanordningar, fasta inspektionsanordningar eller andra brodetaljer omfattas inte heller av beräkningarna.

1.4 Metod

Genomförandet av arbetet sker i två delar. I del 1 tas möjliga brokoncept fram och utvärderas vartefter ett alternativ väljs. Arbetet startar med en omfattande litteraturstudie som ligger till grund för utvecklandet av olika brokoncept. Gruppens medlemmar delas in i tre specialistgrupper för att beakta följande områden: *Beställare och konstruktion*, *Produktion* samt *Förvaltning och underhåll*. Gruppen *Beställare och konstruktion* har som ansvar att ta hänsyn till samhällliga aspekter samt identifiera risker. Specifika förutsättningar för platsen tillhandahålls av teknikonsultföretaget COWI, gällande brospann och fria höjder. Gruppen *Produktion* har ansvar för att planera byggnationen av brokoncepten. Bland annat föreslås produktionsmetod, produktionsordning och temporära konstruktioner. Gruppen *Förvaltning och underhåll* ansvarar för frågeställningar som rör den färdigställda bron, exempelvis föreslås nödvändiga inspektioner och underhåll för de olika koncepten. I urvalsprocessen tas ett antal kriterier fram, dessa baseras på gruppernas olika områden. Under urvalsprocessen vägs brokoncepten mot de viktade urvalskriterierna, det brokoncept som övergripande tillgodoser kriterierna bäst väljs till slutligt koncept.

I del 2 genomförs en preliminär dimensionering av det valda brokonceptet. Del 2 startar med att bestämma variabla laster, en beräkningsmodell tas fram och preliminära tvärsnittsmått antas för att möjliggöra en uppskattning av de permanenta lasterna. Dimensionerande snittkrafter och konstruktionsberäkningar genomförs i datorprogrammet MatLab R2019b med hjälp av tillägget CALFEM med tillhörande CALFEM-manual (Austrell, Dahlblom, Lindemann, Olsson, Olsson, Persson, Petersson, Ristinmaa, Sandberg, Wernberg, 2004) samt Bärande konstruktioner del 1 och 2 (Al-Emrani, Engström, Johansson, Johansson, 2013 & 2011). Slutgiltig brolösning visualiseras med hjälp av programvaran Autodesk Revit.

Tidigare kunskaper ligger till grund för arbetet gällande grundläggande begrepp, teorier och beräkningsmodeller. Fördjupade kunskaper erhålls genom föreläsningar av handledare och gästföreläsare där information om olika brotyper, byggnadsmaterial och möjliga produktionsmetoder presenteras. Kompletterande information, om exempelvis brolaster och tekniska krav, fås genom litteratursökning av projekteringshandböcker, eurokoder, normer, kravdokument och annan referenslitteratur. Arbetet stöds av kontinuerligt handledning av erfarna brokonstruktörer från COWI samt handledare från Chalmers tekniska högskola.

1.5 Samhälleliga och etiska aspekter

Rapporten tar upp och reflekterar kring social, ekonomisk och ekologisk hållbarhet. Däribland diskuteras hur bron ska byggas så att skaderisken minimeras i linje med krav på arbetsmiljö och säkerhet. En viktig aspekt som tas i beaktning är hur bron ska kunna inspekteras och förvaltas på ett säkert och hållbart sätt. Broläget ligger relativt centralt och kommer knytas ihop med centrala Göteborg i enlighet med Vision Älvstaden. Brons estetiska utformning har i viss mån en betydelse för stadens uttryck och för de invånare som bor i närheten av bron eller regelbundet passerar korsningen. Samtidigt eftersträvas en praktisk och ekonomiskt fördelaktig lösning i valet av brokoncept.

2 Förutsättningar och krav

Grundläggande villkor för brokonceptets utformning utgörs av platsens geografiska förutsättningar och Trafikverkets tekniska krav för byggnation av bro och järnväg. Utöver de tekniska kraven är det även viktigt att ha med sig grunderna i vilka förutsättningar för produktion och förvaltning som finns.

2.1 Geografiska förutsättningar

Lillhagsvägen är projekterad för dubbla körbanor i två riktningar med avskiljande mittrefug samt en gång- och cykelbana. Därmed uppskattas en erfoderlig brolängd på ca 60 meter. Möjlighet för ett mittstöd finns där mittrefugen placeras. Skillnaden mellan rälsens överkant och vägens överkant utgör utrymmet där både överbyggnaden och kravet på fri höjd ska rymmas. Utifrån planritning är denna uppskattad till ca 6 meter och är en av de faktorer som begränsar val av brokoncept och konstruktionstekniska lösningar. Maximala bredden mellan spåren är angiven i planskissen till 6,7 meter. De geotekniska förutsättningarna för platsen beskrivs i Granskningshandling, E6.21 Lundbyleden, delen Brantingsmotet – Ringömotet (ÅF Infrastructure AB, 2017), och påvisar att marken kring platsen till stor del består av fyllning ovan lera föjt av friktionsjord ovan berg. Vid den aktuella korsningen är Bohusbanan förstärkt med bankpålar och lättfyllning. Grundvattenytan för det undre magasinet ligger i dagsläget ca 1-2 meter över markytan.

2.2 Tekniska krav från Trafikverket

De tekniska kraven utgörs av styrande dokument från Trafikverket som Krav Brobyggande 3.0, Vägar och gators utformning 2020:029 och Krav på fritt utrymme utmed järnväg BVS 1586.20. Ett sådant krav är den tekniska livslängden som varierar utifrån materialval och avsatt användningsområde. Kan konstruktionen inte reperaras eller bytas ut utan att järnvägstrafik påverkas gäller en teknisk livslängd på 120 år (Trafikverket, 2019). Järnväg har dessutom krav på tillåten nedböjning av trafiklast, i både tvärled och längdled. Den maximala tillåtna nedböjningen begränsas till $1/600$ av den teoretiska spännvidden och blir för en spännvidd på 60 meter 100 millimeter. Krav på fri höjd mellan vägens överkant och överbyggnadens underkant gäller även i nedböjt läge och är minst 4,7 meter (Trafikverket, 2020). Därutöver finns ytterligare krav på fri höjd beroende på överbyggnadens material. Utgörs exempelvis överbyggnaden av stål krävs istället en fri höjd på 5,2 meter.

För järnvägsbroar finns det även krav på fritt utrymme längs med spåren. Vid nybyggnation ska en normalsektion enligt BVS 1586.20 få plats vilken avser fritt utrymme för bredd och höjd med hänsyn till objektets längd och eventuell spänningsförande konstruktion (Trafikverket, 2015). I den utsträckning som är möjlig ska järnvägsbroar utformas med genomgående ballastbädd istället för att fästa spåren direkt i plattan. Detta för att ge tågtrafiken en så tyst och jämn gång som möjligt samt att möjliggöra spårunderhåll och justeringar vid exempelvis sättningar (Trafikverket, 2018b).

2.3 Produktion

Den aktuella bron kommer byggas i ett område där mycket arbete bedrivs samtidigt vilket ställer krav på hur produktionen på bästa sätt kan utföras. Enligt Mats Karlsson, Professor of the Practice vid avdelningen för konstruktionsteknik på Chalmers Tekniska Högskola, kännetecknas en bra produktionsmetod av att den har en förutsägbar tidsåtgång, en låg kostnad och är säker i arbetsmiljösynpunkt (personlig kommunikation, 27 februari 2020). För att hålla kostnaden och produktionstid nere eftersträvas högt materialutnyttjande, effektiv utformning, minimalt med temporära konstruktioner samt att undvika avstängning av spår (Trafikverket, 2018b). Produktion av konstruktionsdelar kan antingen ske på plats, platsbyggnation, eller i fabrik och sedan transporteras till arbetsplatsen, prefabricering. När så mycket som möjligt av konstruktionen är prefabricerad samt att man försöker implementera leanteorier i produktionen pratar man ofta om industriellt byggande samt tänkande, se bilaga B. Det är ett steg från det mer projektorienterade arbetssätt som dominerar idag.

2.4 Arbetsmiljö

Arbetsmiljön är aktuell i alla skeden under brons livslängd, först under projekteringsfasen, sedan under produktionen och till sist i samband med inspektioner. Det är dock redan under projekteringsfasen som det finns möjlighet att påverka och skapa goda förutsättningar (Trafikverket, 2018b). En dålig arbetsmiljö kan bland annat medföra en minskad effektivitet och på sikt en minskad kunskap om hur arbetet ska genomföras på korrekt sätt hos arbetarna. För att en bra arbetsmiljö ska kunna skapas krävs det en tidig riskidentifiering och riskhantering. Byggarbetsmiljösamordnaren och byggherren har därför i uppgift att upprätta en arbetsmiljöplan innan arbetet på byggplatsen startar (Trafikverket, 2018b).

2.5 Förvaltning

Medan projektering och produktion innefattar det förberedande arbetet samt uppförandet av bron representerar förvaltningsfasen en längre tidsperiod eftersom hela brons livslängd omfattas. Reparationer och byten av konstruktionsdelar kommer att påverka järnvägstrafiken, därför dimensioneras bron för en teknisk livslängd på 120 år. För att konstruktionen ska klara den avsedda tekniska livslängd bör inspektioner och underhåll utföras kontinuerligt. Förvaltningen av bron ska även säkerställa att brons bärighet och säkerhet upprätthålls. Materialvalet är avgörande för vilka typer av skador eller slitage som normalt kommer att påverka bron. Det avgör även vilka typer av kontroller och förebyggande arbete som behöver utföras. Mer detaljerad beskrivning av inspektioner och underhåll finns i bilaga B.

3 Urval

I urvalsprocessen utesluts olika brotyper och brokoncept i tre steg. Första urvalsprocessen styrs av de tekniska kraven och utesluter främst de brotyper som inte är lämpliga för den aktuella brolängden. Vid andra och tredje urvalet utesluts brokoncept med hjälp av kriterier från specialistgrupperna, vilket resulterar i ett slutgiltigt brokoncept.

3.1 Urvalsprocess 1

I urvalsprocess 1 utesluts broar som ej lämpar sig för platsen och urvalet baseras på geografiska och tekniska krav gällande spännvidd och konstruktionshöjd med hänsyn till fri höjd. För att läsa mer om olika brotyper se bilaga B. Alternativ som utesluts utgörs bland annat av linverkansbroar som hängbroar och snedkabelbroar, valv- och rörbroar samt platt- och balkrambro då de inte är lämpade för en spännvidd på 30 meter med stöd eller 60 meter utan stöd. Efter denna process finns nio brotyper kvar.

- Balkbro i förspänd betong med mittstöd
- Stålbalkbro
- Samverkansbro (stålbalkar med betongfarbana)
- Trågbalkbro i stål
- Trågbalkbro i spännarmerad betong
- Fackverksbro i stål
- Balkbro med båg-fackverk
- Bågbro med överliggande båge i trä
- Bågbro med överliggande båge i stål

3.2 Urvalsprocess 2

I urvalsprocess 2 utvecklas de nio brotyperna till övergripande brokoncept. Även urvalskriterier tas fram i de olika specialistgrupperna utefter deras specialistområde. Dessa beskrivs nedan och viktas mot varandra för att utvärdera vilka kriterium som anses vara viktigast. Viktning av urvalskriterier kan ses i tabell 1 i kapitel 3.2.11. De viktade urvalskriterierna används sedan för att jämföra de olika brokoncepten med varandra och på så sätt utesluta en del koncept.

3.2.1 Estetik och innovation

Intill den slutgiltiga bron finns det både flerbostadshus och villor. Därmed har den estetiska utformningen en relativt stor betydelse för både boende och övriga som passerar den. Trafikverket skriver i en samrådshandling från en järnvägsutredning för Sundsvall-Härnösand att ”Hög estetisk bearbetningsgrad bör gälla i tätortsnära lägen där järnvägen är exponerad för många människor” och ”där den är ett fysiskt närliggande objekt” (Trafikverket, 2012, s.89). Eftersom den tekniska livslängden är 120 år är det viktigt att bron är estetiskt tilltalande och fungerar väl in i landskapet.

Risken finns att bron ersätts i framtiden om estetik inte prioriteras vilket även påverkar de andra utvärderingskriterierna negativt. Därmed bedöms kriteriet estetik utifrån hur väl bron passar in i landskapet.

3.2.2 Trygghet

Eftersom passagen under bron består av både gång- och cykelbana samt bilväg är trygghet ett kriterium som beaktas vid urval. För att bron inte ska upplevas mörk och trång kan landfästen placeras en bit ifrån gång- och cykelvägen samt bilväg. Eventuella mittstöd kan ha en negativ inverkan på tryggheten då de minskar sikten genom bron för trafikanter. Kriteriet bedöms därmed utifrån hur öppen bron känns, vilket avgörs av placering av landfästen, mittstöd samt konstruktionshöjd.

3.2.3 Miljöpåverkan

Byggnation av broar ger upphov till stor miljöpåverkan. Ivarsson & Nilsson (2017) har gjort en kartläggning av miljöpåverkan från höghastighetsjärnväg för sträckorna Järn-Göteborg samt Jönköping-Lund, och det visade sig att byggnation av broar stod för största andelen av dess miljöpåverkan (30 %). Det framkom även att absolut största miljöpåverkan av brobyggnation handlar om materialvalet och därmed kommer utvärderingskriteriet framförallt att utvärdera de tre materialen betong, stål och trä samt kombinationer av dessa. Trots att det är svårt att väga de olika alternativen mot varandra, eftersom dess miljöpåverkan i stor utsträckning beror på detaljutformning och hur respektive material väljs, värderas betong lägre än stål. Detta på grund av att stål har goda möjligheter för återanvändning samt att det idag finns möjlighet att bygga av stål med mycket lägre utsläpp av vid konventionell ståltillverkning. Därutöver värderas trä högst då det anses ha minst miljöpåverkan. För ytterligare information kring miljöpåverkan av de olika byggnadsmaterialen se bilaga B.

3.2.4 Ekonomi

Ekonomi är vanligtvis en central och avgörande faktor inom ett projekt då det ofta finns krav från beställarsidan som reglerar projektets budget. Inom en bros livscykel ingår, förutom de kostnader som uppkommer vid projektering och produktion, även stora underhållskostnader vid förvaltning och eventuella reparationer av bron. Den ekonomiska aspekten av projektet kommer dock inte att behandlas ingående då det inte är den primära uppgiften i arbetet. Underlag för noggrannare ekonomiska kalkyler har inte heller studerats och därmed finns inte kunskapen för att göra en trovärdig bedömning. Därför värderas ekonomi i detta fall lägre än de övriga kriterierna.

3.2.5 Beräkningsbarhet

Inom utvärderingskriteriet beräkningsbarhet utvärderas hur väl bron kan modelleras och beräknas utan alltför hög komplexitet. Detta handlar exempelvis om komplexiteten hos materialval, mekaniska egenskaper, samspel mellan olika material samt kraftöverföring i bärande element.

3.2.6 Produktionsmetod

Inom kriteriet produktionsmetod kommer möjligheten till industriellt tänkande utvärderas. Ett industriellt tänkande innebär att en stor del av konstruktionsdelarna kan prefabriceras i fabrik (Trafikverket, 2018b) men också hur man kan effektivisera byggandet på plats. En enkel konstruktion med standardiserade lösningar förespråkas eftersom det skapar en ökad byggbarhet. Detta resulterar i en minskad olycksrisk, minskad omgivningspåverkan och är ergonomiskt fördelaktigt för arbetarna.

3.2.7 Produktionstid

Produktionstiden beror till stor del av vilken produktionsmetod som väljs. Till exempel kommer många prefabricerade delar vara fördelaktigt. En lång produktions-tid kommer resultera i större störningar för omgivning, högre produktionskostnader samt mer omfattande störningar av trafiken. Därav kommer en kort produktions-tid vara önskvärt.

3.2.8 Inspektion

Möjligheten att genomföra inspektioner på den färdigställda bron är en förutsättning för att kunna upprätthålla brons bärighet och övergripande säkerhet. Inspektioner behöver genomföras regelbundet under hela brons livslängd och är därmed en långvarig aspekt. Dess genomförbarhet bedöms utifrån om det finns tillräckligt utrymme för inspektören att utföra sitt jobb, vilket kan vara av betydelse för konstruktionens utformning. Även möjligheten att genomföra inspektioner utan att störa trafiken eller omgivningen är något som vägs in i kriteriet.

3.2.9 Beständighet

Kontinuerligt och förebyggande underhåll är grundläggande för att öka livslängden av bron och därmed senarelägga behovet av en ny bro eller omfattande reparationer. Löpande skötsel såsom tvätt och impregnering av betong och stål mot salt och korrosion är ett exempel på en åtgärd som genererar ökad livslängd. I vissa fall behövs förstärkningsarbete av exempelvis tvärbalkar som ett resultat av intensifierad trafik. En ökad livslängd är en stor del i hållbart byggande då miljöpåverkan från en ny bro är stor. För att minimera behovet av underhåll och förstärkning är en välplanerad utformning en god förebyggande åtgärd. Genom att begränsa eller utesluta underhållskrävande delar eller detaljer ökar brons beständighet. Mängden underhåll och reparation kan reduceras med noggrann detaljutformning och lämpliga materialval.

3.2.10 Arbetsmiljö

Arbetsmiljön och dess förutsättningar beror till viss del av valet av brotyp, material och detaljutformning. Anledningen till att arbetsmiljö viktas tungt i jämförelse med andra kriterier är för att det delvis handlar om människors hälsa och säkerhet och därför kan arbetsmiljön i många projekt ses som ett mått på hur framgångsrikt och effektivt ett projekt har varit (Trafikverket, 2018b).

3.2.11 Viktning av urvalskriterier

Kriteriet i den vänstra kolonnen har jämförts med vart och ett av de övriga kriterierna, vilka representeras av motsvarande siffror i den översta raden. Om kriteriet värderas högre i förhållande till det jämförda kriteriet får det en 3:a. Om kriterierna bedöms vara likvärdiga ges en 2:a och om kriteriet värderas lägre ges en 1:a.

Tabell 1: Viktning av urvalskriterier.

Urvalskriterier	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	Summa	Viktning	
1. Estetik och innovation		1	1	3	2	1	2	1	1	1	13	7,22%	
2. Trygghet	3		2	3	3	3	3	2	2	2	23	12,78%	
3. Miljöpåverkan	3	2		3	3	2	3	1	2	1	20	11,11%	
4. Ekonomi	1	1	1		1	1	1	1	1	1	9	5,00%	
5. Beräkningsbarhet	2	1	1	3		2	1	1	1	1	13	7,22%	
6. Produktionsmetod	3	1	2	3	2		2	2	1	1	17	9,44%	
7. Produktionstid	2	1	1	3	3	2		1	1	1	15	8,33%	
8. Inspektion	3	2	3	3	3	2	3		2	2	23	12,78%	
9. Beständighet	3	2	2	3	3	3	3	2		2	23	12,78%	
10. Arbetsmiljö	3	2	3	3	3	3	3	2	2		24	13,33%	
											Summa:	180	100,00%

Urvalskriterierna kan efter viktningen placeras i följande ordning, där den som nämns först anses viktigast och har störst betydelse vid val av brokoncept:

1. Arbetsmiljö
2. Trygghet, inspektion samt beständighet
3. Miljöpåverkan
4. Produktionsmetod
5. Produktionstid
6. Estetik och innovation samt beräkningsbarhet
7. Ekonomi

3.2.12 Uteslutna alternativ

Balkbro med bågackverk utesluts på grund av att de ej anses vara lika estetiskt tilltalande som exempelvis en bågbro eller en fackverksbro. Bron ska även användas för järnvägstrafik vilket innebar att brokoncept i trä uteslöts då det är ovanligt att dessa byggs i trä. Dessutom dimensioneras järnvägsbroar för 120 år medan träkonstruktioner dimensioneras för 80 år (Banverket/Vägverket, 2009). Därmed behöver träkonstruktionen bytas ut tidigare och konceptet är därför inte lönsamt. En trågbalkbro i betong behöver flera än två huvudbalkar och dessutom finns det en osäkerhet på om konceptet klarar spännvidden. Även samverkansbron med huvudbalkar i stål utesluts på grund av att balkarnas höjd troligtvis innebär en för hög överbyggnadshöjd.

3.2.13 Resultat urval 2

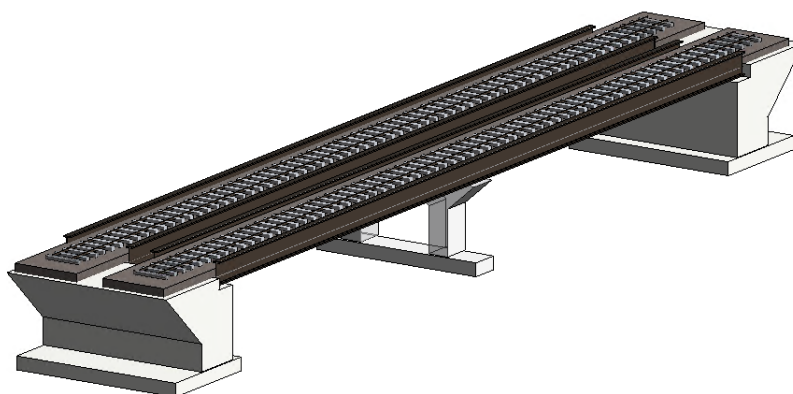
Efter urvalsprocess 2 återstår fyra brokoncept:

1. Trågbalkbro i stål med mittstöd
2. Fackverksbro i stål
3. Balkbro i förspänd betong med mittstöd
4. Bågbro med överliggande båge och dragband i stål

3.3 Urvalsprocess 3

Inför tredje urvalet genomförs ytterligare en litteraturstudie vilket resulterar i mer omfattande beskrivning av de fyra resterande brokoncepten. Varje brokoncept tilldelas sedan ett betyg mellan 1 och 3 för respektive urvalskriterium där betyg 1 innebär att den ej är fördelaktigt med hänsyn till det specifika urvalskriteriet medan betyg 3 innebär att den är fördelaktigt. Siffrorna multipliceras med procentsiffran från viktningen i tabell 2 och adderas med varandra. Det brokoncept med högst slutsiffra utgör det slutgiltiga konceptet och beskrivs mer i kapitel 3.4.

3.3.1 Brokoncept 1 - Trågbalkbro i stål med mittstöd



Figur 2: *Modell av trågbalkbro i stål med mittstöd*

Trågbalkbron i stål består av huvudbalkar samt tvärgående balkar som placeras under trågets bottenplatta. Bottenplattan utgörs av en stålplåt varpå ballast placeras. Tvärbalkarna överför lasten till de längsgående I-balkarna som utgör sidorna av tråget. Fördelen med brokonceptet är att konstruktionshöjden kan hållas nere då rälen placeras mellan huvudbalkarna istället för ovanpå balkarna som i en vanlig balkbro (Trafikverket, 2018c). För ytterligare information om trågbalkbroar, se bilaga B. Konceptet innefattar två separata broar med ett spår på vardera bro, gemensamma ändstöd och separata mittstöd, se figur 2 samt bilaga D. Två separata broar valdes då det rekommenderas för en järnvägsbro utformat som en trågbalkbro (Banverket, 2007). Mittstöd samt ändstöd utformas i betong. Alternativet med mittstöd valdes

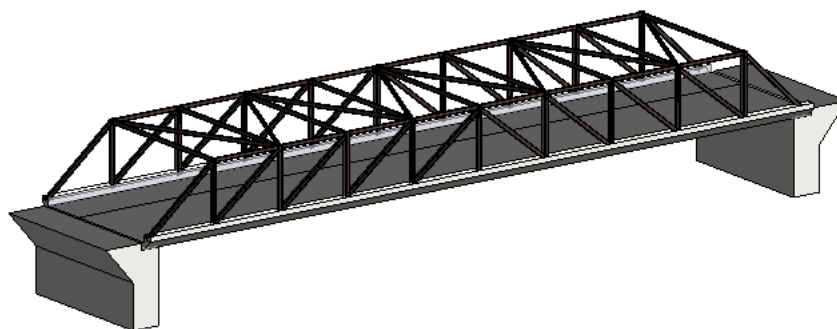
då tråget annars riskerar att få för stora dimensioner enligt Mats Karlsson (personlig kommunikation, 27 februari 2020).

Stålelementen tillverkas i fabrik och fraktas på lastbil till byggarbetsplatsen där de svetsas samman. Huvudbalkarna kan transporteras i tre till fyra delar. Enligt Mats Karlsson (personlig kommunikation, 27 februari 2020) kan de svetsas ihop vid sidan av broläget och lyftas på plats med hjälp av en kran. Därefter skarvas och svetsas tvärbalkarna och bottenplattan på plats. Det krävs tillfälliga konstruktioner som kan stötta upp huvudbalkarna samt ge tillgänglighet under svetsningen. Möjligheten till att prefabricera stora delar av konstruktionen minskar produktionstiden.

Inspektioner av svetsarna i konstruktionen genomförs regelbundet och omfattar i huvudsak svetsar i huvudbalkar samt balkplatta. Vid inspektion och reparation av ståltråg behöver ballast schaktas ur vilket bidrar till en större arbetsbelastning ur förvaltningssynpunkt. Däremot innehåller konceptet färre utmattningsskänsliga detaljer i förhållande till övriga brokoncept i stål. Gästföreläsare Jan Sandberg lyfter fram att för att förhindra korrosion i stålet och på så vis öka beständigheten krävs underhållsmålning varvid trafiken på den elektrifierande järnvägsbron behöver stängas av (personlig kommunikation, 25 februari 2020).

Vid byggnation av en trågbalkbro i stål föreligger en risk för dålig arbetsmiljö då många av svetsarna behöver göras på plats samt ett stort antal svetsar ska kontrolleras vid inspektion. Eftersom brokonceptet kräver ett mittstöd finns även en ökad påkörningsrisk. Rasrisk förekommer under produktionsfasen då tillfälliga stödkonstruktioner behövs och dessutom finns en olycksrisk vid lyft av stålelement.

3.3.2 Brokoncept 2 - Fackverksbro i stål



Figur 3: *Modell av fackverksbro i stål*

Brokoncept 2 består av en balkbro med tvärgående stålbalkar som för lasten vidare till två längsgående huvudbalkar i stål. Bron förses med ett ovanliggande fackverk som består av horisontella ramstänger samt vertikala och snedgående stänger, se figur 3 samt bilaga D. Fackverket gör att bron huvudsakligen tar laster i drag och

tryck, jämfört med en vanlig balkbro som tar upp ett större moment. Detta medför att de längsgående balkarnas dimensioner kan hållas nere. Enligt Trafikverket (2018c) är fackverk fördelaktigt vid relativt långa spännvidder. Därmed utformas brokonceptet utan mittstöd vilket ger bra ljusinsläpp och en känsla av öppenhet vid passage under bron. Materialåtgången för en fackverksbro är mindre än för en likvärdig balkbro utan mittstöd (Trafikverket, 2018c) och därför är konceptet mer miljövänligt ur det perspektivet. För mer information om balkbroar och fackverk, se bilaga B.

Delarna till fackverket kan tillverkas i fabrik och transporteras till byggarbetsplatsen där de svetsas samman och lyfts sedan på plats med hjälp av en kran, enligt Mats Karlsson (personlig kommunikation, 27 februari 2020). Sidorna av fackverket sammankopplas med tvärbalkar i ovan- och underkant för att stabilisera. Farbanan med genomgående ballast monteras sist. Vid produktion krävs tillfälliga konstruktioner för stöttning av fackverkets sidor men även konstruktioner som ger tillgänglighet vid svetsning av tvärbalkar i under- och överkant. Möjligheten till att prefabricera delarna till fackverket minskar produktionstiden men det stora antalet delar som ska svetsas samman kan förlänga produktionstiden.

Stålfackverket behöver underhåll i form av målning mot korrosion. Brokonceptet innefattar många skruvförband och svetsar i anslutningspunkterna mellan stålbalkarna som behöver inspekteras. Fackverket innebär även många detaljer som är känsliga för utmattning och därmed kräver noggranna kontroller och underhåll. Risker med en fackverksbro är rasrisk av de tillfälliga konstruktioner som krävs för att hålla fackverket på plats under monteringen. Produktion samt inspektion av en fackverksbro innefattar arbete på hög höjd vilket kan innebära fallrisk och vid lyft av ståldelarna förekommer risk för olyckor om exempelvis delarna inte fästs in på rätt sätt.

3.3.3 Brokoncept 3 - Balkbro i förspänd betong med mittstöd



Figur 4: *Modell av balkbro i förspänd betong med mittstöd*

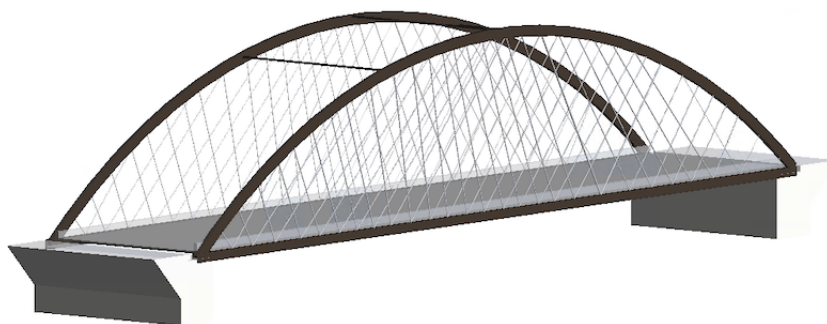
Brokonceptets huvudbärverk är uppbyggt av flera längsgående balkar med T-tvärsnitt i förspänd betong. Ovanpå balkarna gjuts en betongplatta som fördelar lasten från brobanan till huvudbärverket. Betongplattan har formen av ett tråg vilket möjliggör

att ballast kan placeras ovanpå, se figur 4 och bilaga D. För att klara den begränsade konstruktionshöjden krävs ett mittstöd för att balkbron ska vara fortsatt relevant. Materialet betong har en stor miljöpåverkan enligt Du och Karoumi (2013) men genom att använda sig av förspänd betong kan betongåtgången minskas något jämfört med en traditionell slakarmerad betongbalkbro.

De förspända betongbalkarna kan prefabriceras i fabrik och transporteras till platsen i två delar á 30 meter vardera med specialtransport, enligt Mats Karlsson (personlig kommunikation, 27 februari 2020). Därefter platsgjuts den överliggande plattan med kantbalkar vilket kräver tillfälliga konstruktioner med gjutformar ovanpå. Då betongen har en lång härdningstid förlängs produktionstiden. För betongkonstruktionen krävs sprickbildningskontroller. Inspektioner av korrosion i armeringsstål och täckande betongskikt bör också utföras. För att öka beständigheten tvättas bron och betongen impregneras. En del av ballastfyllningen kommer att behöva avlägsnas vid inspektion av överbyggnadens betongplatta.

Under produktionsfasen är framförallt platsgjutning kritisk då det finns risk för gjutformskollaps samt rasrisk för ställningarna. Även armeringsarbete innebär en risk för dålig arbetsmiljö. Vidare finns det risk för att salt från undergående väg påverkar betongen negativt. Med ett mittstöd förekommer dessutom en större påkörningsrisk.

3.3.4 Brokoncept 4 - Bågbro med överliggande båge och dragband i stål



Figur 5: Modell av bågbro med överliggande båge och dragband i stål

Brokonceptet utförs med två överliggande bågar i stål som förbinds med tvärbalkar samt ett underliggande dragband i stål, se figur 5 samt bilaga D. I dragbandet tas de horisontella krafterna upp vilket gör att bron inte behöver grundläggas på fast berg. Farbanan utförs i stål och utformas som ett tråg. Mellan bågen och farbanan placeras hängstag som har primärsyftet att föra över lasten från brobanan till bågen genom dragkrafter. Hängstagen utformas som ett nätverk av stålplattor vilket är fördelaktigt då de är mindre utmattningssärliga (Tveit, 2013). Tveit skriver även att en bågbro där hängstagen är utformade som ett nätverk, istället för vertikala stänger, är fördelaktigt då det bland annat reducerar mängden stål som behövs för hängstagen.

Bågarna tillverkas i mindre delar i fabrik, svetsas samman vid sidan om broläget och lyfts på plats. För att ge bågarna stabilitet sammanfogas de tvärgående i toppen. Under tiden balkarna monteras krävs tillfälliga stöd för att stabilisera bågarna, enligt Mats Karlsson (personlig kommunikation, 27 februari 2020). Därefter monteras dragbanden i stål, sedan de längsgående balkarna, tvärbalkarna och hängstagen. På farbanan skarvas och svetsas en platta av stål med kanter för att hålla ballasten på plats. En stålkonstruktion innebär att underhållsmålning mot korrosion krävs. Även här stängs trafiken på bron av under målning, vilket sker ungefär två till tre gånger under brons livslängd. Möjlighet och utrymme för inspektioner av infästningar mellan dragband och båge erfordras då de är utmattningsskänsliga detaljer.

En risk som förekommer under produktionsfasen är att en stor del av arbetet utförs på hög höjd vilket innebär risk för fallolyckor. Liksom i de andra brokoncepten med stål krävs vissa tillfälliga stödkonstruktioner och lyft vilket skapar risk för ställningsras samt olyckor i samband med lyft.

3.3.5 Resultat urval 3

En sammanställning av varje brokoncepts poäng kan ses i tabell 2 nedan. I tabellen framgår det viktade betyget och därmed det slutgiltiga brokonceptet, trågbalkbro i stål.

Tabell 2: *Utvärdering av de resterande brokoncepten.*

Urvalskriterier	Trågbalkbro i stål		Fackverksbro i stål		Balkbro i förspänd betong		Bågbro i stål	
	Betyg	Viktning	Betyg	Viktning	Betyg	Viktning	Betyg	Viktning
1. Estetik och innovation	2	0,144	2	0,144	2	0,144	3	0,217
2. Trygghet	2	0,256	3	0,383	2	0,256	3	0,383
3. Miljöpåverkan	2	0,222	2	0,222	1	0,111	1	0,111
4. Ekonomi	2	0,100	1	0,050	3	0,150	1	0,050
5. Beräkningsbarhet	3	0,217	2	0,144	1	0,072	1	0,072
6. Produktionsmetod	2	0,189	2	0,189	3	0,283	1	0,094
7. Produktionstid	3	0,250	2	0,167	1	0,083	2	0,167
8. Inspektion	2	0,256	1	0,128	3	0,383	1	0,128
9. Beständighet	1	0,128	1	0,128	2	0,256	1	0,128
10. Arbetsmiljö	2	0,267	1	0,133	2	0,267	1	0,133
Summa:		2,028		1,689		2,006		1,483

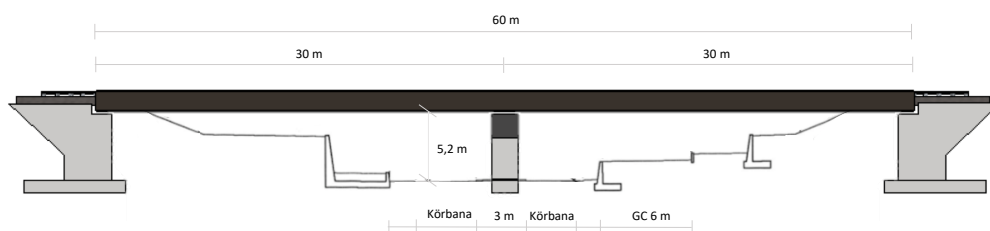
Trågbalkbron i stål anses ur ett estetiskt perspektiv passa bra in i landskapet utan att påverka det på ett negativt sätt. Däremot tillför bron inte något estetiskt värde till platsen. Samtidigt anses det ur miljösynpunkt vara bättre än betong men inte tillräckligt materialsnålt för att få betyg 3. Vidare har den en slank brobana som gör att den känns mer öppen att passera igenom även om ett mittstöd kan påverka sikten på ett negativt sätt.

Ur ett ekonomiskt perspektiv anses betong vara det billigare alternativet, både ur produktions- och underhållssynpunkt. Samtidigt har både fackverks- och bågbroar högre materialåtgång. Trågbalkbron anses dock vara fördelaktig vid beräkning, produktionsmetod och produktionstid då den kan prefabriceras i stor utsträckning samt att både båg- och fackverksbroar har fler komplicerade knytpunkter.

Vid inspektion anses balkbron vara mest lättillgänglig och därefter är de resterande broarna likvärdiga varandra. Däremot innebär en båge och fackverk höga höjder och därmed är dessa mindre tillgängliga vilket motiverar deras lägre poäng. När det kommer till beständighet anses stål vara mindre fördelaktigt då det behöver underhållsmålas för att inte risk för korrosion ska uppstå. Vidare innebär en trågbalkbro inget större arbete på höga höjder vilket anses vara fördelaktigt.

3.4 Slutligt brokoncept - Trågbalkbro i stål

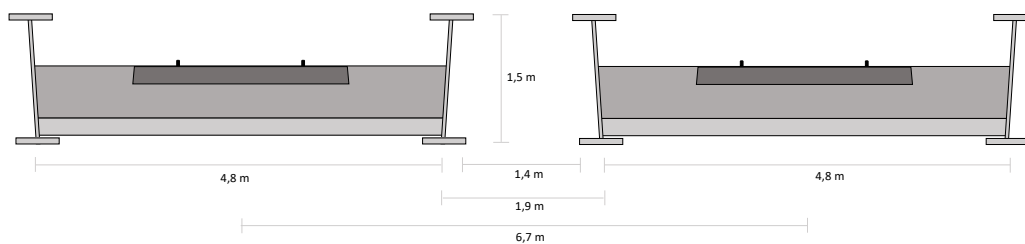
Det slutgiltiga brokonceptet projekteras som två separata broar med ett järnvägsspår på vardera bro. De två ståltrågbroarna har gemensamma ändstöd och separata mittstöd, vilket resulterar i en spännvidd på cirka 30 meter på var sida om mittstödet, se figur 6. Nedan följer en detaljerad beskrivning av det slutliga brokonceptet gällande överbyggnad, underbyggnad och grundläggning, brodetaljer, produktion, förvaltning samt eventuella risker med det föreslagna konceptet.



Figur 6: Skiss över brons placering i längdled, mått från plankarta

3.4.1 Överbyggnad

Broarnas överbyggnad utformas som ståltråg med slät insida, se figur 7. Överbyggnaden består av två huvudbalkar samt 120 tvärgående balkar. De tvärgående balkarna placeras under trågets bottenplatta med ett centrumavstånd på 0,5 meter. Bottenplattan tillverkas i stål och har en tjocklek på 20 millimeter. Tvärbalkarna bidrar till att överföra lasten från bottenplattan vidare till de längsgående huvudbalkarna. Huvudbalkarna utformas som I-tvärsnitt och förutom att fungera som huvudbärverk utgör de även sidorna på tråget. Huvudbalkarna har en höjd på 1,5 meter och med tanke på att tvärsnittet blir relativt slankt krävs vertikala livavstyvningar på de sidor av huvudbalkarna som utgör utsidan av tråget. Avstyvningarna placeras med samma avstånd som tvärbalkarna och bör utformas så att ansamling av fukt och smuts undviks. Vid upplag erfordras dubbla avstyvningar för att minimera risken för buckling av livet samt för att överföra tvärkrafter mellan flänsarna. Ovanpå trågets bottenplatta placeras ballastfyllning med 0,6 meters djup. Rålen har en höjd på 160 millimeter och fästs i slipers vilka placeras i ballastens ovankant.



Figur 7: Skiss över de båda trågen i tvärled

3.4.2 Underbyggnad och grundläggning

På grund av geotekniska förutsättningar utförs grundläggningen med pålning vilket används framförallt då jordmaterialet inte har tillräcklig bärighet. Spetsbärande pålar används för grundläggning av både ytterupplag och mittstöd. Vid pålning krävs en bottenplatta som placeras på tjälsäkert djup. I annat fall kan den isoleras (Trafikverket, 2018b). Ändstöden utformas som fristående landfästen och mittstödet som två separata skivstöd, en under vardera huvudbalk. De två mittstöden grundläggs med en gemensam bottenplatta för att möjliggöra en stadigare grundläggning då pålarna kan riktas ut i sidled.

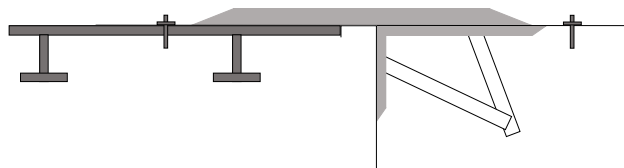
3.4.3 Brodetaljer

Stål är ett temperaturvarierande material vilket ställer krav på möjlighet till längdutvidgning, framförallt i längdled men även till viss del i tvärled. Trågbalkbroarna verkar som fritt upplagda kontinuerliga balkar med en fast infästning i mittstödet. Lagren utgörs av fasta, allsidigt rörliga eller ensidigt rörliga gummipottlager. Lagerordningarna för en bro placeras enligt figur 8 nedan. Den andra bron lager är spegelvända gentemot figuren så att de fasta lagren i tvärled förhindrar att broarna utvidgas mot varandra.



Figur 8: Placering av brolager

Då båda trågen har rörelsefogar mellan landfäste och broöverbyggnad krävs en övergångskonstruktion. Denna utformas så att spårslaget rör sig minimalt vid eventuella rörelser i bron. Övergångskonstruktionen utförs med genomgående ballast då rörelselängden är mindre än 80 millimeter (se bilaga C för beräkning) och utformas med en horisontell stålplåt som kan röra sig mellan ett fäste i trågets underkant och ett fäste i anslutande konstruktionsdel, se figur 9 (Trafikverket, 2018b).



Figur 9: Övergångskonstruktion med genomgående ballast

Längs med trågen fästs en evakueringsbana i huvudbalkarna för att möjliggöra utrymning av tågen. Dessa utformas i stål och har en gångbana av gallerdurk som är ca en meter bred, underliggande tvärstag och ett räcke utformat med skyddsnät (Banverket, 2007). Kabelränna placeras löst i ballasten eller längs med gångbanan. För att inte vatten ska ansamlas i bron ska ytavlopp placeras mellan varje tvärbalk och minst 100 millimeter under huvudbalkarnas underyta (Trafikverket, 2019). Då dessa är placerade över en trafikerad väg samt på vissa platser nära ett brostöd leds vattnet vidare till ett stuprör och föras bort från underliggande konstruktionsdelar. En ståltrågbro förses även med ett invändigt tätskikt för att stå emot påverkan från ballasten samt motverka korrosion. Detta utgörs av ett flytapplicerat elastiskt tätskikt (Trafikverket, 2011).

3.4.4 Produktion

Vägen som idag korsar Lillhagsvägen kommer att sänkas ned vilket medför att jordmaterial behöver schaktas bort från platsen. I samband med det kan schaktningen för att gjuta grundläggningen till ändstöden och mittstöden göras. När grundläggningen är klar ska ändstöden samt mittstöden gjas och för det krävs ställningskonstruktioner samt gjutformar. Mittstöden utformas på samma sätt så att gjutformen kan återanvändas. Därefter placeras armeringen ut och gjutningen av betongstöden kan påbörjas. På de färdiggjutna stöden monteras lagren.

Huvudbalkarna transporteras till platsen i tre delar och svetsas samman till en kontinuerlig balk intill broläget. Då balkarna inte överstiger 100 meter kan de lyftas på plats med hjälp av en kran. Under tiden balkarna fästs in i stöden behöver de stagas upp. Därefter svetsas tvärbalkarna fast mellan huvudbalkarna och stålplattorna svetsas samman ovanpå tvärbalkarna. För att tillgodose arbetarnas säkerhet måste tillfälliga konstruktioner upprättas under bron vilket minskar risken för fallolyckor. När trågen för de två broarna är på plats monteras evakueringsgångarna samt räcken på utsidan av respektive brobana, även detaljer som avlopp, kabelränna och belysning installeras. Till sist placeras ballast och slipers i trågen och på det läggs spåren.

Under produktionen av de två parallella järnvägsbroarna och sänkningen av Lillhagsvägen hålls korsningen stängd för trafik och järnvägstrafiken leds om på tillfälliga spår. Det betyder att det inte finns någon störande trafik som måste tas hänsyn till i direkt anslutning till byggplatsen.

3.4.5 Förvaltning

Då produktionen av bron kräver att många delar svetsas samman finns det många detaljer som bör inspekteras regelbundet under förvaltningsfasen. Inspektioner efterfordras huvudsakligen för halssvetsar i huvudbalkar, stumsvetsar i balkplatta samt skruv- och svetsförband i huvudbalkarnas skarvar. För att kunna inspektera svetsar i trågbotten samt utföra eventuellt underhåll måste ballasten i tråget schaktas ur och järnvägstrafiken stängas av, vilket både är tidskrävande och ofördelaktigt ur ekonomisk synpunkt. En annan förvaltningsaspekt är inspektion och underhåll av mittstödet med tillhörande lager. Vid lagerbyte krävs lyftning av bron och eventuellt avschaktning av fyllning mot ändskärmarn för att bron ska klara de lyftkrafter som uppstår (Banverket, 2007).

Konceptet att uppföra två separata broar skapar både för- och nackdelar ur förvaltningssynpunkt. Fördelarna med separata brobanor är att det ena järnvägsspåret kan hållas i bruk vid exempelvis reparation av det andra spåret. Detta medför mindre omfattande trafikstörningar och lägre underhållskostnader då man, i vissa fall, kan undvika att stänga av trafiken helt. En nackdel är dock att två separata brobanor medför fler komponenter i konstruktionen och därmed fler delar att inspektera och underhålla. Att placera broarna bredvid varandra kräver även att det finns tillräckligt med utrymme mellan trägen för att genomföra kontroller av huvudbalkarna.

För att öka brons beständighet och förebygga korrosionsskador ska stålet underhållsmålas. Under en gästföreläsning beskriver Jan Sandberg (personlig kommunikation, 25 februari 2020) att detta är en förhållandevis omfattande process då bland annat tvättning, blästring, grundfärgsmålning, vidhäftningsprov och ytterligare målning ingår. För en elektrifierad järnväg behöver även trafiken på bron stängas av helt. Målningsprocessen tar upp till ett par månader att genomföra och förläggs då förslagsvis under en lågtrafikerad tidsperiod.

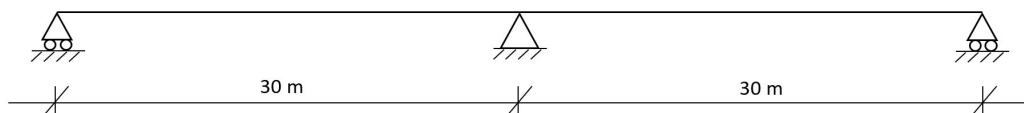
3.4.6 Identifiering av risker

Under produktionsfasen förekommer arbetsmiljörisker i och med att svetsningsarbete utförs på plats. För att minimera arbetsplatsolyckor och öka säkerheten finns guider och riktlinjer exempelvis från organisationen för Håll Nollan vilket entreprenörer och byggherrar bör förhålla sig till. Organisationen bakom Håll Nollan har som vision att inga personskador ska ske på arbetsplatsen vilket går att läsa mer om på deras hemsida (Håll Nollan, u.å.). Under produktion finns även risk för ras av stödkonstruktioner, samt olycksrisk i och med lyftning av olika element vilket bör förebyggas i största möjliga mån. Påkörningsrisk av mittstöd minimeras genom att placera räcken kring mittrefugen vilka bör anpassas efter vägfordon och fordonshastighet. Det finns även risk för påkörning av ändstöd vid sidan av vägen. Vid förvaltning av bron finns risker i och med inspektioner och underhåll av svetsar, skruvförband, lager och andra detaljer av konstruktionen. Vid de underhåll som inte kräver att trafiken stängs av helt finns olycksrisk då personer kan komma att arbeta i närheten av väg- eller järnvägstrafik.

4 Beräkningsförutsättningar

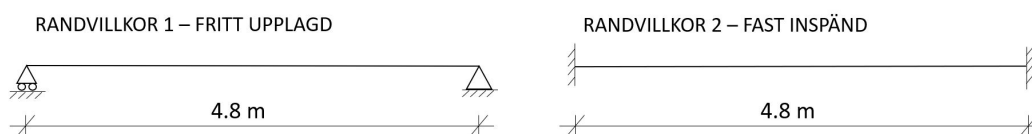
Dimensioneringsprocessen inleds genom att en förenklad beräkningsmodell av det valda brokonceptet ställs upp. Antaganden och förenklingar görs för att anpassa beräkningsbarheten av konceptet. Det bärande systemet delas upp i olika komponenter för att kunna utföra beräkningar för respektive bärverksdel. Ingående beräkningar omfattar endast överbyggnadens delar samt tillhörande lager. Det ursprungliga konceptet innefattar sneda huvudbalkar vars ovankant är riktade utåt från tråget för att minska materialåtgång och egentyngd av ballasten i tråget. I beräkningarna beaktas däremot huvudbalkarna som två raka I-balkar för att öka beräkningsbarheten.

Brokonceptet modelleras i längdled som en kontinuerlig balk i två spann med fast stöd i mitten och rullstöd på vardera sida, se figur 10. Här antas en 2D-modell av den huvudbalk som besitter ett fast lager i mitten och ensidiga lager i ändarna.



Figur 10: Beräkningsmodell i längdled

I tvärled studeras två olika beräkningsmodeller, se figur 11. Då tvärbalkarna svetsas fast i huvudbalkarna kommer upplagsvillkoren vara någonstans mittemellan fast inspända och fritt upplagda. Genom att studera tvärbalkarna utifrån de båda upplagsvillkoren bedöms beräkningarna vara på den konservativa sidan då tvärbalkarnas kapacitet kontrolleras.



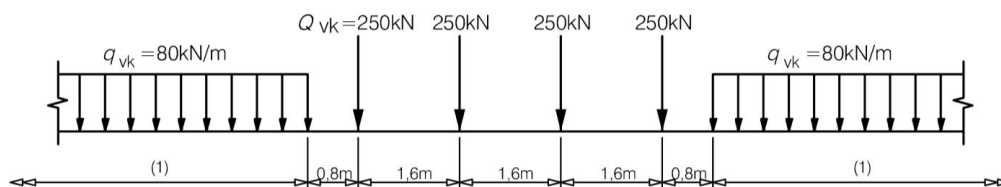
Figur 11: Beräkningsmodeller i tvärled för varierande upplagsvillkor

4.1 Dimensionerande laster

De dimensionerande lasterna delas upp i variabla respektive permanenta laster. Vertikala respektive horisontella laster studeras var för sig, men antas i kommande beräkningar endast påverka överbyggnaden och dess olika komponenter samt lagren. I avsnitten nedan redovisas de förutsättningar, förenklingar och antaganden som görs avseende lasterna.

4.1.1 Variabla vertikala laster

Den variabla vertikala lasten som beaktas är trafiklast. I enlighet med Eurokod 1 (Swedish standards institute, 2003) används lastmodell LM 71 för beräkning av trafiklast på järnvägsbroar. Lastmodellen presenteras i figur 12 nedan.

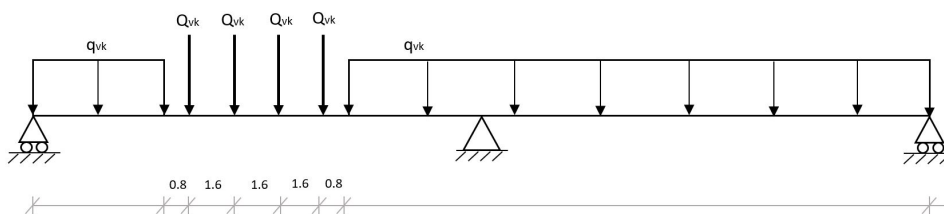


Förklaring

(1) Obegränsad utsträckning

Figur 12: Lastmodell LM 71 och karakteristiska värden på vertikala laster (Swedish Standard Institute. SS-EN 1991-2).

Vid beräkning i längdled studeras de minst gynnsamma lastfallen med hänsyn till tvärkraft, moment och nedböjning av huvudbalkarna. Detta resulterar i tre olika lastfall som bedöms vara mest kritiska utifrån grundläggande mekanikkunskaper. I figurer 21-23 i bilaga C redovisas hur lastmodell LM 71 appliceras på beräkningsmodellen för de olika lastfallen. Värden på karakteristiska laster i lastmodellen antas enligt SS-EN 1991-2. I figur 13 nedan visas exempel på beräkningsmodell enligt lastfall 1.



Figur 13: Lastfall 1 - Punktlaster mitt i fält med jämnt utbredd last i båda brospannen

Vid dimensionering av tvärbalkarna görs en noggrannare bedömning av punktlasternas spridning i längdled. Axellasten antas fördelas över tre sliprar, enligt SS-EN 1991-2 avsnitt 6.3.6.1. Fördelningen av axellasten redovisas i figur 26, bilaga C. Följaktligen blir den mittersta dellasten, $Q_{vk}/2$, dimensionerande eftersom två yttre dellaster från två olika axellaster, $Q_{vk}/4$, inte överlappar varandra fullständigt. Utifrån denna bedömning beräknas tvärbalkarnas dimensionerande lastfall vara då lasten $Q_{vk}/2$ placeras rakt ovanför en tvärbalk. Vid beräkningar i tvärlängd beaktas även en eventuell förskjutning av spåren. Spåren kan placeras med en viss excentricitet från brons centrum och på så sätt ge upphov till en större tvärkraft i något av stöden. Därför beräknas snittkrafter i tvärbalkarna både med och utan excentri-

citet för de båda beräkningsmodellerna vilket resulterar i fyra olika villkor utifrån randvillkor respektive excentricitet, se bilaga C figur 24.

4.1.2 Variabla horisontella laster

De horisontella laster som beaktas är acceleration- och bromskraft, sidokraft samt temperatur- och vindlast. Det dimensionerade horisontella lastfallet för acceleration- och bromskraft antas vara då tåget är utbredd över hela brons längd. Detta medför att influenslängden som acceleration- och bromskraften verkar på antas vara brons totala längd. Karakteristiska värden för horisontella krafter fås från SS-EN 1991-2 avsnitt 6.5 och redovisas i tabell 3 nedan.

Tabell 3: *Karakteristiska värden för horisontella krafter enligt SS-EN 1991-2 (Swedish standards institute, 2003)*

Accelerationskraft	$Q_{lak} = 33$ [kN/m] $L_{a,b}$ [m]
Bromskraft	$Q_{lak} = 20$ [kN/m] $L_{a,b}$ [m]
Sidokraft	$Q_{sk} = 100$ [kN]

4.1.3 Permanenta laster

Den permanenta lasten som beaktas är egenvikten av konstruktion, beläggning och detaljer. Eftersom en stålkonstruktion har valts, betraktas den som en lätt konstruktion. Beläggningen utgörs av ballast medan räcken, räl samt evakueringsgångar räknas till detaljer. Egentyngden av slipers antas vara likvärdig med egentyngd från ballasten. Med tanke på att sliprarna placeras i ballasten inkluderas dessa i ballastens egentyngd. Egentyngd för permanenta laster redovisas i tabell 4.

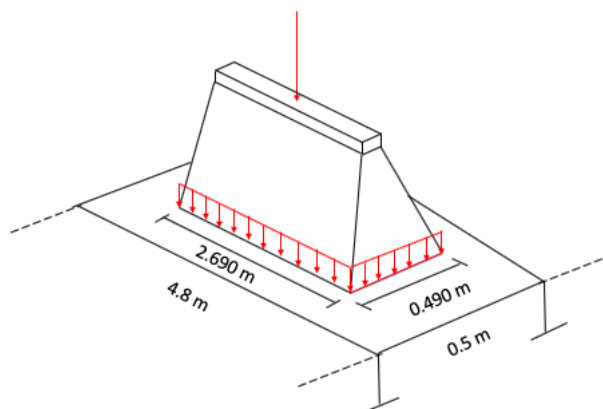
Tabell 4: *Tunghet för permanenta laster inklusive egenvikt och beläggning (J. Leppänen, personlig kommunikation, 20 februari, 2020.)*

Stål	77-78,5 kN/m ³
Ballast	20 kN/m ³
Broräcke, räl	0,5 kN/m

Egentyngden som beaktas i beräkningarna varierar emellertid beroende på vilken bärverksdel som kontrolleras. Huvudbalkarna antas bära upp egentyngden av hela överbyggnaden, inklusive de evakueringsgångar som placeras på yttersidorna av broarna, medan lasten som fördelas på tvärbalkarna endast består av egentyngd från ballast (inklusive sliprar), räl samt egentyngd från respektive tvärbalk. Den vridande kraften som evakueringsgångarna påverkar huvudbalkarna försummas. Evakueringsgångarnas egentyngd antas endast ge upphov till en jämnt utbredd vertikal last som verkar centralt på bron. Dessutom försummas vikten av passagerare som belastar evakueringsgångarna vid eventuell evakuering då lasten antas vara förhållandevis liten i jämförelse med övriga laster.

4.2 Lastspridning

Oberoende om lasten är variabel eller permanent behöver hänsyn tas till den lastspridning som sker i ballasten i träget. Detta är främst avgörande för lasteffekten från tågtrafiken som belastar sliprarna men implementeras även för egentyngden av sliprar samt räil. I figur 14 redovisas den spridning som sker från en belastad sliper ned till bottenplattan på träget.



Figur 14: Lastspridning från belastad sliper till bottenplatta

4.3 Lastkombinering

Lastkombinering utförs enligt SS-EN 1990. Se bilaga C för redovisning av använda ekvationer och detaljerade beskrivningar av de beräkningar som utförs. De olika ekvationerna behandlar brottgränstillstånd och bruksgränstillstånd varav bruksgränstillstånd innefattar karakteristisk, frekvent och kvasi-permanent kombination.

Vid val av lager utförs lastkombinering för att identifiera dimensionerande laster. Här utförs däremot endast kontroller i brottgränstillstånd då detta är dimensionerande för lagren (Spännteknik, 2011). En förenkling antas vid kombinerings av vertikala laster då utgångspunkten endast är maximal samt minimal reaktionskraft i respektive stöd till följd av trafiklast och egentyngd. Dessa laster kombineras därmed inte med exempelvis vindlast vilket i annat fall kan verka ogynnsamt samtidigt som trafiklasten. Maximala reaktionskraften kontrolleras för de lastfall som tidigare definierats. Nödvändig minimal vertikal last kontrolleras utifrån reaktionskrafter för respektive stöd då lasten endast utgörs av egentyngden. Vid korrekt dimensionering ska även de horisontella lasterna kombineras med de vertikala lasterna i olika grupper enligt i SS-EN 1990. Här görs förenklingen att endast beakta horisontella respektive vertikala laster var för sig och därmed görs ingen kombinerings av laster som verkar i olika riktningar.

5 Beräkningar och resultat

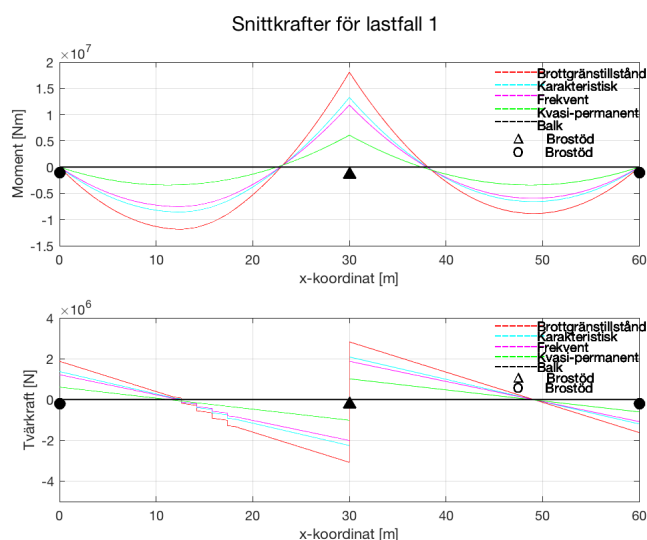
För att kunna föreslå en lämplig utformning med detaljerade dimensioner för trågbalkbron utförs systemberäkningar. Inledningsvis beräknas lasteffekten till följd av de beaktade lasterna som beskrivs i 4.1. Därefter utförs kapacitetsberäkningar för att kunna anpassa dimensionerna därefter. För att erhålla en tillräckligt hög kapacitet i förhållande till behovet krävs ett iterativt arbete där olika komponenters geometri justeras från första antagande till det slutgiltiga resultatet.

5.1 Lasteffekt

Beräkningar av snittkrafter utförs för de tre lastfall samt de fyra villkoren som beskrivs i 4.1.1 och i enlighet med SS-EN 1990 beaktas fyra olika lastkombinationer. Utifrån uppställda beräkningsmodeller och lastfall beräknas lasteffekten genom att ta fram snittkrafter för en huvudbalk respektive en tvärbalk. Snittkrafterna beräknas genom att ställa upp en global beräkningsmodell med tillhörande lastvektor som assembleras till en styvhetsmatris. Moment- och tvärkraftsdiagram beräknas fram och ritas upp för de olika lastfallen samt villkoren och dess tillhörande lastkombinationerna. Maximalt moment och tvärkraft blir dimensionerande och utgör därmed kraven för eftersträvd kapacitet vid dimensioneringen. Mer detaljerade beräkningar redovisas i bilaga C.

5.1.1 Resultat längdled

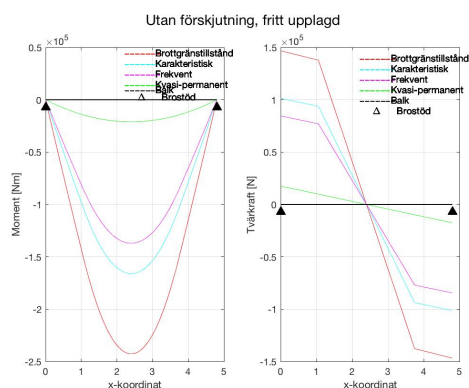
Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 1 redovisas i figur 15 och resterande i bilaga C. Lastfall 1 ger upphov till störst moment över stöd medan lastfall 2 ger störst moment i fält och lastfall 3 resulterar i största möjliga tvärkraft.



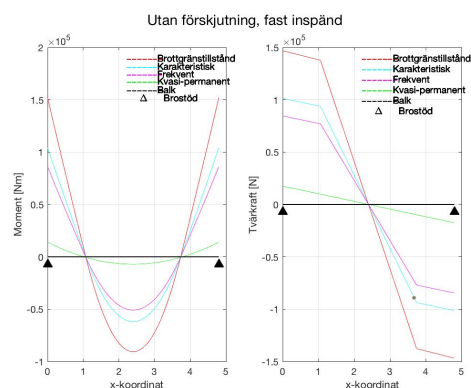
Figur 15: Moment och tvärkraftsdiagram för lastfall 1

5.1.2 Resultat tvärled

I tvärled resulterar villkor 1 i största maximala moment i fält och villkor 4 maximalt över stöd. Störst tvärkraft uppstår för villkor 4. Moment- och tvärkraftsdiagram för villkor 1 och 3 redovisas i figur 16 och 17, resterande figurer återfinns i bilaga C figur 30-33.



Figur 16: Moment och tvärkraftsdiagram för villkor 1



Figur 17: Moment och tvärkraftsdiagram för villkor 3

5.2 Kapacitetsberäkningar för balkelement

För att välja en utformning med tillräcklig bärförmåga utförs kapacitetsberäkningar av de ingående delarna i stålstrukturen. Eftersom den preliminära dimensionering främst beaktar vertikala krafter antas balkarna stagade mot vippning, då det främst är kritiskt vid stora horisontella krafter.

Momentkapacitet, tvärkraftskapacitet samt interaktion mellan dessa kontrolleras för huvud- och tvärbalkar. I momentkapacitetsberäkningarna ingår det att för respektive balk kontrollera ingående plåtars tvärsnittsklass och välja böjmotstånd därefter, dessa blev alla plastiska med tvärsnittsklass 1 eller 2. För tvärkraftskapaciteten behövde risken för skjuvbuckling hos balkarna inte kontrolleras. Då bottenplåten överför koncentrerade krafter och moment i huvudbalkens liv behövs avstyvningar för att huvudbalkens liv inte ska buckla. Dessa avstyvningar placeras med samma centrumavstånd som tvärbalkarna. Tvärbalkarna har ingen risk för skjuvbuckling och har därför inga mellanliggande avstyvningar.

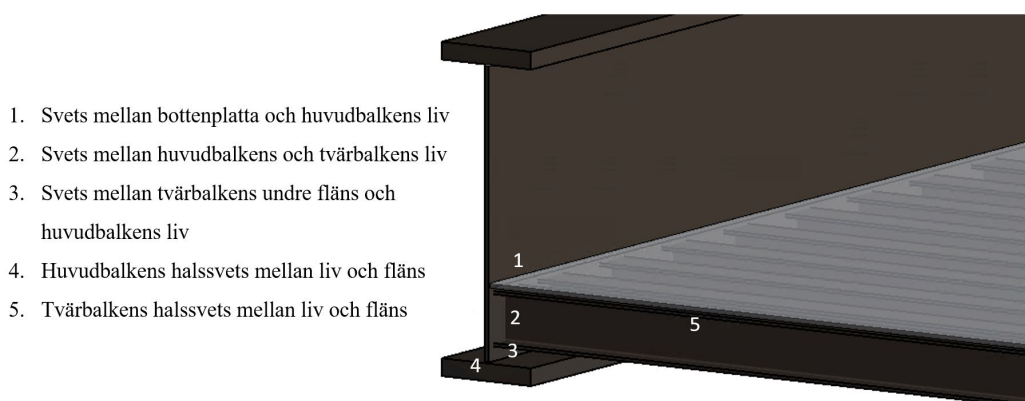
5.3 Nedböjning

Det mest kritiska lastfallet med avseende på nedböjning i längdled är när det enbart är trafiklast i ena spannet, samt att punktlaster är placerat mitt i det spannet, se lastfall 2 i bilaga C. Då konceptet innefattar två symmetriska spann har valet av spann ingen betydelse. Kravet för nedböjning av huvudbalkarna med ett spann på 30 meter blir maximalt 50 millimeter och gäller för frekvent lastkombinering enligt Trafikverket (2019). Den slutgiltiga mittnedböjningen beräknas till 46.4 millimeter. För tvärbalkarna med spannvidden 4,8 meter blir kravet på nedböjning maximalt 8

millimeter. Nedböjningen kontrolleras för lastfallet med störst fältmoment, vilket är villkor 1. Den slutgiltiga nedböjningen för en tvärbalk beräknas till 7,8 millimeter.

5.4 Dimensionering av svetsar

Svetsarnas bärförmåga kontrolleras för att se att dessa håller för de krafter svetsarna utsätts för. I figur 18 visualiseras de svetsar i utformningen som kontrolleras i rapporten. Svetsar mellan sektioner i bron som uppkommer på grund av begränsningar i produktionsprocessen kontrolleras inte då dessa utformas som stumsvetsar med full genomträngning och därmed kan antas ha minst lika stor kapacitet som de svetsade plåtarna.



Figur 18: *Kontrollerade svetsar*

För huvudbalkarna likväl tvärbalkarna kontrolleras halssvetsarna mellan liv och fläns, svets 1 respektive 2 i figur 18. Huvudbalkens halssvetsar belastas av vinkelräta normal- och skjuvspänningar i hela tvärsnittet samt parallella skjuvspänningar vid upplag. Därmed är svetsarna som mest belastade intill upplag, antingen vid ytterupplag eller mittenupplaget. Från beräkningar ges att halssvetsarna vid mittenupplaget blir dimensionerande vilket ger ett a-mått på 15 millimeter. Tvärbalkarnas övre halssvets belastas mer än undre halssvetsen ty den övre halssvetsen belastas med vertikala spänningar. Därmed fås att tvärbalkarnas övre halssvetsar utsätts för samma typ av spänningar som huvudbalkarnas halssvetsar. Tvärbalkarnas halssvetsar belastas mest där tvärbalkarna fäster i huvudbalkens liv, och ger ett a-mått på 3 millimeter.

Bottenplattan, som fungerar som tvärbalkens övre fläns, samt tvärbalkens undre fläns svetsas fast mot huvudbalkens liv, se svets 3 respektive 4. Dessa svetsar utsätts endast för vertikala spänningar, men i och med att plåtens svetslängd är betydligt större än underflänsens blir spänningarna på plåtens svetsar mindre. För svetsarna mellan huvudbalkens liv och bottenplatta samt underfläns fås a-måtten 5 millimeter respektive 11 millimeter. Det är även dessa svetsar som blir mest belastade. Svetsarna mellan tvärbalkens liv och huvudbalkens liv, svets 5, utsätts endast för parallella skjuvspänningar från tvärkraften i detta snitt. Dessa svetsar kräver ett a-mått på 3 millimeter. För utförligare beräkningar av svetsar se bilaga C.

5.5 Dimensionering av bottenplatta

Axellast från tåget samt egentyngd av räl och slipers ger upphov till en lastspridning genom ballasten som verkar på en yta på bottenplattan, se figur 14. Även egentyngd av ballasten belastar bottenplattan. Då centrumavståndet mellan tvärbalkarna är mindre än avståndet mellan huvudbalkarna i tvärsektionen är det dimensionerade fallet för bottenplattan i längdled mellan tvärbalkarna. Beräkningsmodellen utförs som en fast inspänd balk med en utbredd last som beräknas per breddmeter. Bottenplattan har tillräcklig kapacitet med en tjocklek på 20 millimeter och ett centrumavstånd mellan tvärbalkarna på 0.5 meter. Då momentkapaciteten är mest kritisk för plattan kontrolleras inte tvärkraftskapaciteten. Utöver att kontrollera momentkapaciteten för bottenplattan kontrollerades även nedböjningen på samma sätt som för de övriga balkarna, den är dock försumbart liten i detta fall.

5.6 Val av lager

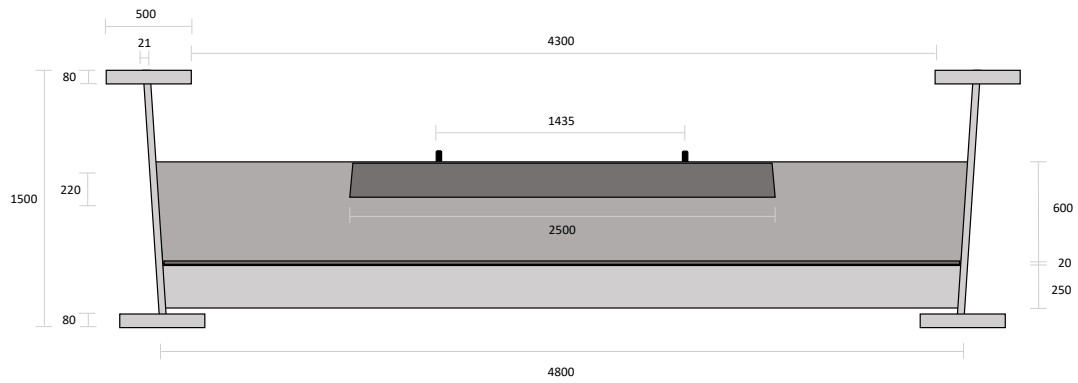
De horisontella laster som är avgörande vid val av lagertyp är accelerations- och bromskraft, sidokraft samt vindlast. Vindlast beräknas enligt SS-EN 1991-1-4 och tar förutom överbyggnadens geometri, även hänsyn till platsens geografiska förutsättningar, som referensvindhastighet och terrängtyp. De övriga lasterna beräknas utifrån karakteristiska värden i enlighet med SS-EN 1991-2. Accelerations- och bromskraft antas inte verka samtidigt då det endast är ett spår per bro. Däremot kan någon av dessa verka samtidigt som vindlast i riktning parallellt bronns längdriktning. Utav accelerations- och bromskraft blir bromskraften den dimensionerande. Därför kombineras bromskraft och vindlast för att hitta den maximala horisontella kraften i denna riktning. Här beräknas bromskraften som huvudlast och vindlasten som samhörande variabel last. Vidare antas sidokraft och vindlast kunna verka samtidigt i riktning vinkelrätt bronns längdriktning och därmed utförs en lastkombinering av dessa, varav vindlasten är huvudlast och sidokraften är en samhörande variabel last.

Vertikala laster som beaktas är trafiklast och beräknas genom att ta fram reaktionskraften i respektive stöd för de olika lastfallen. Maximal vertikal reaktionskraft erhålls från lastfall 1 och minimal vertikal reaktionskraft då lasten endast utgörs av bronns egentyngd.

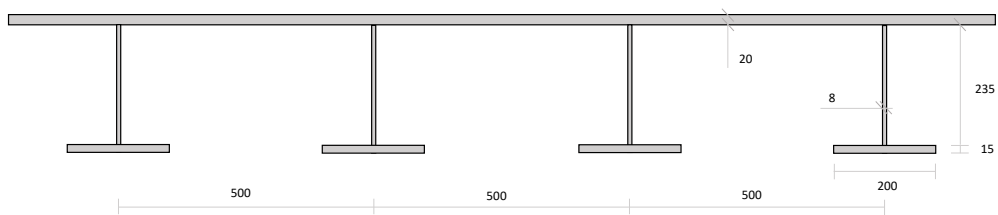
Slutligen fås de dimensionerande krafterna för lager över mittstöd respektive lager över ändstöd till de värden som redovisas i bilaga C, tabell 5. Utifrån dessa väljs lagertyp enligt TOBE-lager (Spännteknik, 2011). Vid val av lager efterstämvas samma lagertyp vid de bägge mittstöden och motsvarande vid samtliga ändstöd. Detta medför att lagertyp 70 väljs för mittstöd och lagertyp 30 väljs för ändstöd.

5.7 Slutgiltiga tvärsnittsmått

Dimensioneringen resulterar i nedanstående tvärsnitt för ett tråg, se figur 19 och 20. I och med framtagna tvärsnittsdimensioner som presenteras nedan slutförs den preliminära dimensioneringen. För slutgiltiga tvärsnittsdimensioner krävs ytterligare beräkningar.



Figur 19: Skiss på trågets tvärsnitt, mått i [mm]



Figur 20: Skiss på trågets bottenplatta och tvärbalkar, mått i [mm]

6 Diskussion

Studien har haft i syfte att efterlikna det inledande arbetet som ligger till grund för framtagandet av en ny bro. Resultatet påverkas markant av de avgränsningar, antaganden och förenklingar författarna gjort för att anpassa arbetet till rådande kunskapsnivå. Litteraturstudien och urvalsprocessen kommer nedan att analyseras med källkritik i åtanke. Även resonemang kring författarnas påverkan på urvalsprocessen såväl tidpunkten för denna. Vidare kommer det slutliga brokonceptet utvärderas samt en redogörelse för vilka beräkningar som återstår.

Hållbarhetsperspektivet har endast tagits hänsyn till i begränsad utstäckning, framför allt i utvärderingskriterierna. Ekonomisk hållbarhet beaktas till viss del i kriteriet ekonomi men eftersom inga kalkyler har genomförts kan det disputeras hur trovärdig och relevant kriteriet är. Social hållbarhet beaktas till viss del i estetik och innovation. Kriteriet utvärderar hur bra bron passar in i landskapet vilket kan påverka boende i området. Vidare beaktas ekologisk hållbarhet i miljöpåverkan samt indirekt i beständighet. Det sistnämnda Kriteriet betonar vikten av ett kontinuerligt underhåll och inspektioner för att minimera risken för framtida omfattande reparationer eller att bron behöver bytas ut helt i ett förtidigt skede.

6.1 Litteraturstudie och urvalsprocess

Litteraturstudien baseras på ett flertal källor, däribland europeiska och nationella standarder, handböcker samt yrkesaktivas handledning och föreläsningar. Övervägande del av källorna är normer och kravdokument från förvaltningsmyndigheten Trafikverket, vilka har en hög trovärdighet och inget bakomliggande egenintresse. Föreläsare med lång yrkeserfarenhet och bred ämneskunskap har bidragit med värdefull information som har varit svår att hitta eller tolka från standarder. Vissa källor har ansetts vara subjektiva gentemot olika byggnadsmaterial, exempelvis vid beskrivning av materialval och dess miljöpåverkan. Detta har tagits i beaktning vid utvärderingen av materialet.

Urvalskriterierna och urvalsprocessen bygger på litteraturstudien. Även författarnas åsikter och begränsningar av tidigare erfarenhet har påverkat antal kriterier samt valet av dessa. Meningsskiljaktigheter gällande viktningen av kriteriers prioritet har lösts genom att den mest insatta specialistgruppen har fått redogöra för bakgrunden till kriteriet och sedan har ett majoritetsbeslut tagits. Likaså har tidpunkten för urvalet haft en betydande påverkan på resultatet där viktiga beslut fattades förhållandevis tidigt i processen. Om urvalet hade skett vid ett senare tillfälle eller om arbetet gjorts igen skulle kriterierna sannolikt viktats annorlunda. Exempelvis kriteriet beräkningsbarhet då rapportens andra del till stor del baserades på tidigare kunskaper och beräkningarna bör därför inte bli alltför komplicerade oavsett materialval eller brotyp. För stålkonstruktioner kontrollerades därför inte utmattning då det inte omfattats av tidigare kurser. Vidare har projektets avgränsningar haft en inverkan på viktningen av kriterierna. Exempelvis skulle hänsyn ej tas till ekonomiska aspekter.

Det slutliga urvalet resulterade i två brokoncept med likartade betyg. Marginella skillnader i viktning av utvärderingskriterier samt betygsättning hade därmed kunnat generera ett annat slutgiltigt koncept. En preliminär dimensionering av båda koncepten hade gett en tydligare bild av vilket koncept som är lämpligast, där exempelvis materialåtgång gett ett kvantitativt underlag för miljöpåverkan och delvis ekonomiska skillnader. Modellen för urvalet kan kritiseras i frågan om författarnas erfarenhet och egna åsikter då urvalsprocessen inte tar hänsyn till aspekter som ofta är avgörande i verkligheten. Modellen anses dock vara rättvis och lämplig för denna typ av arbete. Olika brokoncept har systematiskt utvärderats utefter ett antal kriterier med bred omfattning.

6.2 Slutligt brokoncept och dimensionering

Det slutgiltiga brokonceptet resulterade i en trågbalkbro i stål, vilket till viss del ifrågasattes av handledare då de järnvägsbroar som byggs idag främst är av betong. Järnvägsbroar av stål var dock betydligt vanligare att bygga under 1900-talet när järnvägssystemet utvecklades och är anledningen till att majoriteten av de järnvägsbroar som finns idag är av stål. Undermedvetet kan det därför ha påverkat de första urvalet som resulterade i att tre av de fyra sista brokoncepten var stålbroar.

När det slutgiltiga bronkonceptet valdes var kunskapen kring detaljutformning knapphändig och det var lågt fokus på konceptet som helhet. Detta medförde att detaljutformningen tog mycket tid under dimensioneringsfasen. Utformningen ändrades flera gånger vilket i sin tur kan ha medfört att vissa andra beräkningar inte hanns med eller inte prioriterades eftersom detaljer i en stålkonstruktion ofta anses mest kritiska vid dimensioneringen. Diskussion som påverkat beslut om byte av utformning har handlat om att vissa detaljutformningar inte är ekonomiskt försvarbara och inte heller optimala, eller vägts mot andra funktioner.

Under urvalsprocesserna viktades inspekterbarhet högre eller lika med andra urvalskriterier och en trågbalkbro ansågs vara fördelaktig ur dess synpunkt. Den slutgiltiga utformningen är dock något mer svårinspekterad än vad som tidigare resonerats exempelvis då tvärbalkarnas centrumavstånd minskades under beräkningens gång. Detta medför att antalet tvärbalkar ökar och därmed även erforderligt svetsarbete vilket även kan försvåra svetsarbetet på plats.

Framtagandet av lastgrupper och lastkombinering av de inkluderade lasterna är en av de mest betydelsefulla förenklingarna i arbetet. Vertikala och horisontella krafter har inte kombinerats, vissa laster saknas och enbart ett fåtal fall har testas. Alternativt har i huvudsak de stora vertikala krafterna beaktats för överbyggnaden och kategoriserats som huvudlast och variabel last utifrån värsta tänkbara fall, även om värre kombinationer kan uppstå vid en komplett analys. Lastkombineringen för lagren inkluderade enbart horisontella laster även om reaktionskrafterna beaktades delvis i val av lager.

Ytterligare förenklingar innefattar att beräkningsmodellen är i 2D och ingen hänsyn togs till lastspridningen i längdled vid dimensionering av huvudbalkarna. Beräkningsmodellen för längdled togs fram innan kunskap om lastspridning fanns och därmed beaktas inte detta. I en avvägning mellan noggrannare resultat och tidsåtgång valde gruppen att låta punktlaster förbli punktlaster då skillnaden inte påverkar resultatet nämnvärt. Däremot hade det varit önskvärt med en konsekvent beräkningsprocess och gruppen tar med sig detta i framtida arbeten. Något som heller inte beaktades på grund av bristande kunskap är hur vridmoment från trafiklast samt en eventuell evakuering av tågpassagerare skulle belasta huvudbalkarna. Vid en mer noggrann dimensionering skulle även en effektiv bredd använts för tvärbalkarnas överfläns vilken utgörs av broplattan. Dessa förenklingar hade kunnat medföra att de slutgiltiga dimensionerna inte är tillräckliga.

6.3 Återstående beräkningar och dimensionering

Utöver fullständiga beräkningar utan författarnas antaganden och förenklingar kvarstår vissa beräkningar. Den preliminära dimensioneringen har inte inkluderat några långtidseffekter på konstruktionen. Det mest kritiska lastfallet för stålstrukturen och speciellt för järnvägsbroar är utmattning som försämrar materialets hållfasthet och därmed bärförmåga. Under rådande arbete saknas dock kunskap för att utföra noggrannare beräkningar där utmattning beaktas. Däremot skulle ett sätt att minska risken för utmattningsbrott vara att dimensionera ännu mer konservativt så att spänningarna i brons olika komponenter minskar.

Den preliminära dimensioneringen har fokuserat på överbyggnaden och inte tagit hänsyn till underbyggnaden. I underbyggnaden ska mittstöd, landfästen och grundläggning dimensioneras. Mittstödet ska förutom att dimensioneras för överförda belastningar i vertikal- och horisontalled, även utformas för att klara eventuella påkörningslaster från undergående fordonstrafik. Olyckslaster så som urspårning av tåg eller påkörning av andra bärverksdelar ska också beaktas. Även detaljer som evakueringsgång, övergångskonstruktioner och lager har bara delvis beaktas. Ytterligare detaljer inkluderar, men begränsas inte till, bro- och skyddsräcken, kabelränna, belysning och utformning för vattenavrinning.

7 Slutsats

Syftet med rapporten var att ta fram ett lämpligt bronkoncept samt göra en preliminär dimensionering av en järnvägsbro på Bohusbanan i korsningen Lillhagsvägen-Minelundsvägen, vilket kan anses genomfört. Arbetet resulterade i preliminära dimensioner för en trågbalkbro i stål som uppfyller de krav och kriterier som satts upp. Dock kan det ifrågasättas om det slutgiltiga konceptet är det mest lämpliga då arbetet till stor del begränsats av författarnas kunskaper och erfarenheter. Vidare beräkningar och kunskapsinhämtning krävs innan slutgiltiga dimensioner kan presenteras.

8 Referenser

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., Johansson, P. (2011). *Bärande konstruktioner Del 2*. Göteborg: Institution för Bygg- och miljöteknik, avdelningen för konstruktionsteknik.

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., Johansson, P. (2013). *Bärande konstruktioner Del 1*. Göteborg: Institution för Bygg- och miljöteknik, avdelningen för konstruktionsteknik.

Austrell, P.E., Dahlblom, O., Lindemann, J., Olsson, A., Olsson, K.G., Persson, K., Petersson, H., Ristinmaa, M., Sandberg, G., Wernberg, P.A. (2004). *CALFEM: A Finite Element Toolbox*. Lund: The Division of Structural Mechanics.

Banverket. (2007). *Broprojektering* (BVH 583.20). Hämtad från <https://chalmers.instructure.com/courses/9711/files/351210/download?wrap=1/>

Banverket/Vägverket. (2009). *TK Bro* (BVS 1583.10./VV 2009:27). Hämtad från https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10278/RelatedFiles/20090701_tk_bro.pdf

Du, G. & Karoumi, R. (2013). Environmental life cycle assessment comparison between two bridge types: reinforced concrete bridge and steel composite bridge. I *SCMT3, International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies*, 18-22 juli 2013, Kyoto, Japan.

Göteborgs stad. (2012). *Vision Älvstaden: Välkommen till Älvstaden*. Hämtad från (2020-02-07) http://alvstranden.com/wp-content/uploads/2020/02/vision_älvstaden_SV.pdf?fbclid=IwAR18su4G0vT1n78pG2e5V7BeGMJakkc-EYjhtNxW3m02SlnInytSo_efKrw

Göteborgs stad. (2018). *Detaljplan för Gator vid Backaplan inom stadsdelen Backa i Göteborg*. Hämtad från (2020-02-07) <http://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/Backaplan>

Håll Nollan. (u.å.). *Vad är Håll Nollan*. Hämtad från (2020-03-07) <https://www.hallnollan.se/om-oss/vad-aer-haall-nollan>

Ivarsson, E & Nilsson, C. (2017). *Klimatpåverkan från höghastighetsjärnväg Sträckorna Järna-Göteborg och Jönköping-Lund* (publikationsnummer: 2017:162). Borlänge: Trafikverket. Hämtad från https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/31397/Ineko.Product.RelatedFiles/2017_162_Klimatpaverkan_fran_hoghastighetsjarnvag_strackorna_Jarna_Goteborg_och_Jonkoping_Lund.pdf

Spännteknik. (2011). *TOBE FR4 potlager* [Produktblad]. Hämtad från <http://new.spennteknikk.no/wp-content/uploads/2018/05/TobeFR4-svensk-14042011>.

pdf

Swedish standards institute. (2002). SS-EN 1990. Eurokod - Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://www.sis.se>

Swedish standards institute. (2003). SS-EN 1991-2. Eurokod 1: Laster på bärverk – Del 2: Trafiklast på broar. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://www.sis.se>

Swedish standards institute. (2005). SS-EN 1991-1-4. Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 1-4: Allmänna laster - Vindlast. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://www.sis.se>

Trafikverket. (2011). *TRVK Bro 11: Trafikverkets tekniska krav Bro* (TRV publ nr 2011:085). Hämtad från https://www.trafikverket.se/contentassets/1ffad0ea826f43308e2c2f1e9/2011_085_trvk_bro_11.pdf

Trafikverket. (2012). *Järnvägsutredning Sundsvall-Härnösand*. Hämtad från https://www.trafikverket.se/contentassets/31849f6d486a493bb70ddefdb71491e9/arkiv/ju_svall_hsd_samradshandling_nov_2012.pdf

Trafikverket. (2015). BVS 1586.20 – Banöverbyggnad – Infrastrukturprofiler *Krav på fritt utrymme utmed banan* (Dok-ID: TDOK 2014:0555).

Trafikverket. (2018a). *Lundbyleden, delen Brantingmotet-Ringömotet*. Hämtad från <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Vastra-gotaland/vi-bygger-och-forbattrar/E621-Lundbyleden/Lundbyleden-delen-Brantingmotet--Ringömotet/>

Trafikverket. (2018b). *Broprojekteringshandbok Förhandsutgåva*. Opublicerat manuskript.

Trafikverket. (2018c). *BaTMan- Kodförteckning beskrivning av brotyper*. Hämtad från https://batmanhandbok.trafikverket.se/dokument/Bro_konstruktionstyper/

Trafikverket. (2019). *Krav Brobyggande* (Dok-ID: TDOK 2016:0204, Version 3.0).

Trafikverket. (2020). *Krav - VGU, Vägars och gators utformning* (TRV publ nr 2020:029). Borlänge: Trafikverket. Hämtad från https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/71830/Ineko.Product.RelatedFiles/2020_029_vagar_och_gators_utformning_krav.pdf

Tveit, P. (2013). *Systematic Thesis on Network Arches*. Hämtad från <https://home.uia.no/pert/data/Preliminary%20Version%20Systematic%20thesis%20on%20network%20arches.pdf>

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

9 Bilagor

Bilaga A - Plankarta

Bilaga B - Litteraturstudie

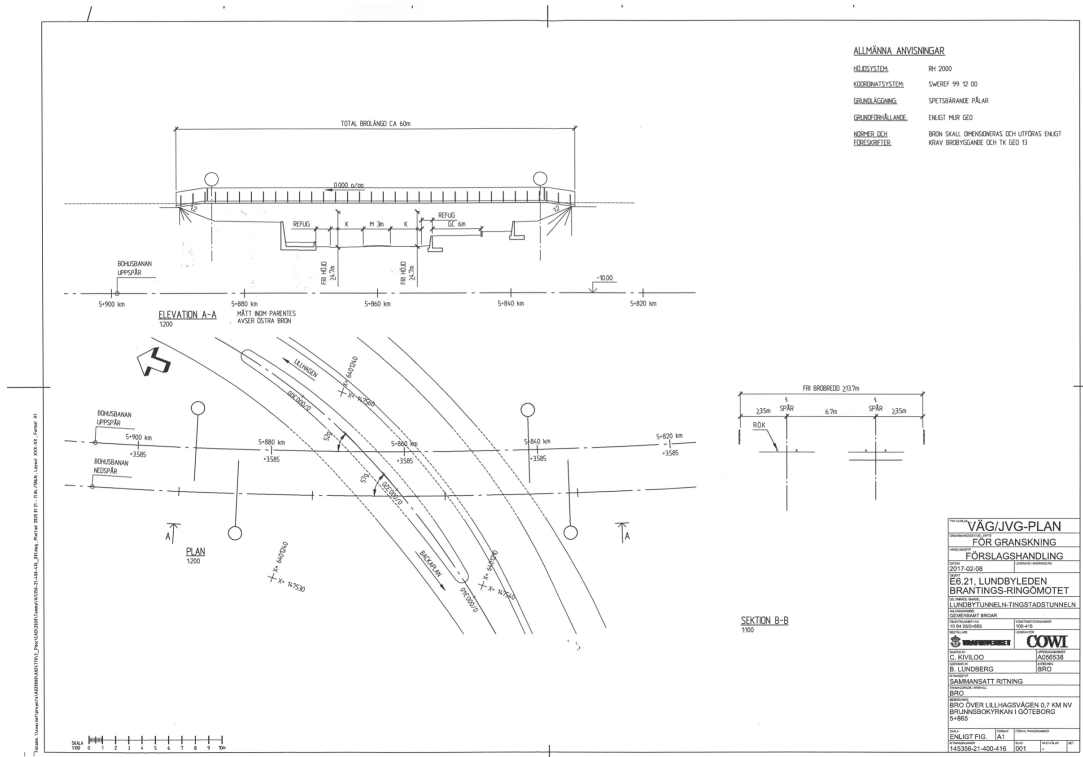
Bilaga C - Beräkningsunderlag

Bilaga D - Modellering i Revit

Bilaga E - Beräkningar i Matlab

Bilaga A - Plankarta

Underlaget till arbetet är från COWI och innehåller en plankarta över området med angivet brospann, pålningsmetod, fri höjd etcetera. Den totala brolängden ska vara cirka 60 meter och placering av brostöd i förhållande till omgivningen är angivet men kan frångås om ett bättre alternativ hittas. Den fria höjden ska vara minst 4,7 meter under mittspannet på bron. Ovankanten av rälsen ska ligga på nivån +3,585 med hänsyn till höjdsystemet RH 2000. Brostöden ska grundläggas med spetsbärande pälår. Den fria brobredden ska vara minst 13,7 meter för att få plats med två spår, ett upp- och ett nedspår av Bohusbanan. Från COWI ges även alternativet att antingen projektera en bro som bär upp båda spåren eller dela upp spåren på två separata broar. Mer detaljerade förutsättningar och koordinater ges av plankartan nedan.



Bilaga B - Litteraturstudie

1 Produktion

Produktionsfasen är en viktig och kritisk del av en bro livslängd då den ofta utgör en stor del av den totala kostnaden samt ibland kan vara avgörande för vilken typ av bro som kan byggas. En bro kan produceras på många olika sätt beroende på val av brotyp och material.

1.1 Platsbyggnation

Platsbyggnation innebär att de olika konstruktionsdelarna byggs på plats. När betong används som byggnadsmaterial innebär det till exempel att betongen gjuts på plats med hjälp av tillfälliga formar och ställningar (Trafikverket, 2018a). Arbetsmiljömässigt innebär platsbyggnation ofta fler risker på grund av många stödkonstruktioner samt ökad mängd arbetsmoment vilket kan resultera i en längre produktionstid och ett större områdesanspråk. Dock ger platsbyggnation enligt Mats Karlsson ofta möjlighet till mer kreativa lösningar, en större anpassningsbarhet och möjlighet att gjuta stora delar i ett stycke (personlig kommunikation, 27 februari 2020).

1.2 Prefabricering

Prefabricering innebär att olika konstruktionsdelar tillverkas i fabrik och transporteras till byggarbetsplatsen för montage. Transporten dit kan antingen göras på lastbil eller på pråm om läget för bron ligger i anslutning till något större vattendrag. Genom att tillverka delarna i en fabrik blir produktionstiden ofta betydligt kortare, riskerna färre och leder ofta till mindre omgivningspåverkan. Dock innebär transporten en begränsning av storleken på de olika delarna. Detta kan medföra många skarvar i den slutgiltiga bron vilket inte är optimalt utifrån hur inspektion och underhåll ska genomföras.

1.3 Industriellt/Rationellt byggande

Alla projekt inom byggbranschen har olika förutsättningar, varierande krav och ofta många möjliga utformningar vilket gör det svårt att standardisera byggandet (Trafikverket, 2018a). Varje projekt blir unikt vilket resulterar i en relativt låg produktionsutveckling med långa byggtider och låg lönsamhet. Industriellt byggande kan enligt broprojekteringshandboken (Trafikverket, 2018a) definieras som ”en radikal förändring av dagens process så att en signifikant skillnad mot dagens process skapas” (s. 115) och innebär rent praktiskt att man väljer att prefabricera så mycket av materialet som går. Industriellt byggande och tänkande kan vara sammankopplade men där industriellt tänkande inte enbart omfattar skillnaden mellan platsbyggande och prefabricering utan även kan innefatta leanteorier. Leanteorier innebär att man försöker skapa ett flöde utan avbrott vilket inom byggbranschen kan översättas till att man planerar arbetet på platsen så att produktionen flyter på så att

endast de hantverkare och det material som behövs finns på plats. Något som även är av yttersta vikt är att skapa byggbarhet inom projektet. Byggbarhet innebär att man redan under projekteringen tagit hänsyn till de olika krav som uppstår under byggnationstiden för att skapa rätt förutsättningar så att en kortare byggtid, ökad lönsamhet och en ökad produktivitet kan uppnås. En god byggbarhet ska eftersträvas och kan uppnås genom till exempel ökad standardisering av konstruktionsdelar och fundament (Trafikverket, 2018a).

2 Förvaltning

Inspektioner av broar genomförs kontinuerligt för att upprätthålla bronns bärighet och säkerhet. Utbildade inspektörer genomför så kallade handnära inspektioner där skador av olika slag noteras. Dessa registreras i databasen BaTMan vilket är ett förvaltningssystem som ger information om konstruktionens kondition (Trafikverket, 2019). Databasen innehåller även dokument och ritningar som kan vara till hjälp när bron kontrolleras och vid planering av eventuella åtgärder. För att upprätthålla en säker arbetsmiljö vid inspektioner och underhåll bör man ha förvaltningsaspekten i åtanke vid projektering av brolösningen. Det kan hända att konstruktören initialt vill välja den mest effektiva lösningen avseende lastöverföring men då inte tar hänsyn till att inspektioner och underhåll kan bli problematiskt på grund av brodelarnas utformning. Vilka kontroller som behöver genomföras avgörs dels av vilka material som ingår i konstruktionen.

2.1 Betongkonstruktioner

För betongkonstruktioner kontrolleras sprickbildning i betongen (Trafikverket, 2019). Inspektionerna kan effektiviseras genom att använda elektronisk utrustning för sprickövervakning vilket innebär att givare monteras för att mäta eventuella förändringar i konstruktionen. Då en spricka utvidgas över toleransnivån skickas ett larm vilket gör att en inspektör kan skickas ut vid behov. Elektronisk sprickutrustningsövervakning är något som sparar både tid och pengar. För att undvika att betongen påverkas av salter är en underhållsåtgärd att tvätta och impregnera betongen regelbundet. Impregnering sker enligt Trafikverket (2019) vart sjätte till tionde år. En annan åtgärd kan vara att återgjuta så att täckande betongskikt återfår sin ursprungliga tjocklek eller mer vid behov (Vägverket, 2008).

2.2 Stålkonstruktioner

Inspektioner för stålkonstruktioner utgörs i huvudsak av att kontrollera svetsar i konstruktionen samt inspektioner av utmattningsskänsliga detaljer. För att förenkla arbetet bör man från första början ta hänsyn till reparatörens ergonomi och bekvämlighet samt undvika att underhåll i trånga utrymmen. Även kommande underhållsarbeten av bron, exempelvis korrosionsskyddande målning, bör tänkas igenom för att optimera genomförbarheten och säkerheten. För att öka bronns beständighet krävs, enligt M. Al-Emrani docent på Chalmers avdelning för konstruktionsteknik,

en noggrann detaljutformning så att vatten och smuts avleds på ett välfungerande sätt (personlig kommunikation, 30 januari 2020).

2.3 Järnvägsbro

Vid inspektion av järnvägsbro behöver kontroller i brobaneplattan genomföras, varvid eventuell ballast under räl behöver avlägsnas. Kontrollerna avser i huvudsak skarvar eller sprickbildning beroende på brobaneplattans material. Om det finns möjlighet att uppföra två separata broar för respektive järnvägsspår bör detta övervägas då det kan underlätta både inspektioner och underhåll. Vid separata överbyggnader finns det möjlighet att vissa inspektioner och underhållsåtgärder kan genomföras medan det andra spåret fortfarande är i bruk. Detta kan vara en samhällsekonomiskt fördelaktig lösning då man vill undvika att stänga av trafiken helt. Underhåll som däremot kräver en tillfällig trafikavstängning bör planeras så att störningar av trafik och omgivning minimeras. Detta åstadkoms genom att förlägga arbetet vid exempelvis semester eller andra lågtrafikerade perioder (Trafikverket, 2019).

3 Balkverkansbroar

Balkverkansbroar är ett samlingsnamn för tre olika brotyper, rambro, plattbro och balkbro.

3.1 Rambroar

Det finns två typer av rambroar, plattrambro och balkrambro, vilka vanligtvis utförs i ett spann. Rambenshöjden är normalt beroende på brons spännvidd samt grundläggningsförhållandena och har vanligtvis samma höjd på grund av att horisontalkrafterna i konstruktion ska vara i jämvikt.

Den mest förekommande av kategorin rambroar är plattrambro med spännvidder mellan 20–35 meter beroende på huruvida den är spännarmerad eller inte. Fördelen med plattrambroar är deras låga konstruktionshöjd medan en nackdel är att den fria öppningen begränsas. Vidare är det även komplicerat, både att dimensionera och bygga, en sned plattrambro som dessutom ofta kräver stora armeringsmängder (Trafikverket, 2018a).

Balkrambroarna har större spännvidder än plattrambro men med konsekvensen att de även kräver större konstruktionshöjd. De är nästan uteslutande spännarmerade och kan utformas med en spännvidd upp till 50 meter i sitt vanligtvis enskilda spann. På grund av spännarmeringen är de vanligtvis vottade vid stöden för att armeringen ska kunna förankras (Trafikverket, 2018a).

3.2 Plattbro

För plattbroar består överbyggnaden av en homogen betongplatta och denna brotyp är vanlig när den tillgängliga höjden är liten. Stödets utformning är i form av skivor eller pelare. För platta konstruktioner som påverkas av koncentrerade laster, bör risken för genomstansning beaktas där någon form av förstärkningsplatta som omfördelar lasterna kan behövas. En fritt upplagd plattbro kan ha en spännvidd mellan 20-25 meter medan en kontinuerlig balk i flera spann kan ha ett inre brospann på upp till 25 meter och ytterspann ca 60-90 % av innerspannet. Väljer man ett för kort ytterspann finns det risk för att ändstödens lager lyfter (Trafikverket, 2018a). Spännvidden beror även på armeringen i betongen. För slakarmerad betong kan spännvidden vara upp till 25 meter, medan den för spännarmerad betong kan vara upp till 35 meter (Trafikverket, 2018b). För järnvägstrafik blir dock den maximala spännvidden kortare.

3.2.1 Grundläggning

Ofta används förhöjd grundläggning vid ändstöden av en plattbro vilket innebär att bottenplattan placeras en bit upp i slänten och skyddas helt eller delvis från horisontalkrafter från jordtryck och överlast av en ändskärm. Motfyllningen mot ändskärmen hjälper till att stabilisera konstruktionen samt begränsa de horisontella rörelserna. Förutsättningarna för att denna grundläggningsmetod ska fungera är att

snedvinkligheten är max 10 grader, samt att bron inte förekommer i skarp horisontalkurva och metoden används främst vid grundläggning vid vatten (Trafikverket, 2018b). Vid spännvidder på över 70 meter blir krafterna för stora i ändskärmarna vilket begränsar grundläggningsmetod.

3.3 Balkbroar

Balkbroar bärs upp genom balkverkan och används vanligen för längre broar där marken är sättningSkänslig. För att minska kostnaderna är det fördelaktigt att använda sig av höga balkar. Balkbroar kan utformas som enfältsbro, gå över två stöd, eller som flerfältsbro (kontinuerlig bro) som går över flera stöd. Har man långa spännvidder är det vanligt att man har en mindre tjocklek på tvärsnittet i fält och större över stöd, vilket kallas voter (Bro", u.å).

Balkbroar och plattbroar påminner om varandra, men enligt Trafikverket (2018b) skiljer de sig åt genom att en balkbro består av en eller flera huvudbärbalkar där balkarnas höjd är fem gånger större än balkarnas bredd. Att öka antalet balkar påverkar inte nämnvärt bronns bärförmåga, därför är det lämpligt att använda så få balkar som möjligt (Trafikverket, 2018b).

3.3.1 Betongbalkbro

Betongbalkbroar används vid spännvidder om 10-30 meter. Vid spännvidder på 25-200 meter är de spännarmerade (Trafikverket 2018a). För långa spännvidder utformas ofta balken som ett lådtvärsnitt, medan det för kortare spännvidder kan utformas med en eller flera balkar (Trafikverket 2018b). Spännvidderna gäller framför allt vägbroar. För järnvägsbroar är ofta spännvidderna något kortare. Enligt Trafikverket (2018a) är balkbroar i betong normalt inte vottade vertikalt utan i det horisontala planet istället.

3.3.2 Stålbalkbro

Vanligtvis uppförs inte en balkbro enbart i betong utan konstrueras som en samverkan av både betong och stål, en så kallad samverkansbro. Balkarna görs då i stål medan resten av brobaneplattan byggs i betong. Samverkansbroar är passande att välja då det bland annat är stora spännvidder, dåliga grundförhållandena och krav på låg egenvikt. De är oftast enkla att montera och har kort byggtid. Vidare används de vid spännvidder mellan 20 till 70 meter (Trafikverket, 2018a).

Eftersom överbyggnaden blir relativt lätt om man utformar den i stål, medför det en risk att den flyttas ur sitt läge vid eventuell påkörning. Därför ställer man högre krav på fri höjd över vägar för en stålbalkbro (Trafikverket, 2018a).

3.3.3 Lådbalkbro

Lådbalkbroar tillhör kategorin balkbro och kan både utformas med ett lådtvärsnitt i betong eller stål samt som en samverkansbro mellan de två materialen. Lådtvärsnit-

tet görs då i stål, medan brobaneplattan utformas i betong (Trafikverket, 2018b). Spännvidderna sträcker sig mellan 40 till 200 meter för en lådbalkbro i betong medan samverkansbron ungefär har samma spännvidder som en stålbro, 20 till 70 meter. Samverkansbron är lämplig att välja då bron ska utföras i en kurva men olämplig vid snedvinkliga upplag på grund av att lådkonstruktionen har stor vridstyvhet. Eftersom lådbalken måste kunna inspekteras, finns det krav på minsta fria invändiga höjd (Trafikverket, 2018a).

3.3.4 Trågbalkbro

En trågbalkbro kan utföras i betong eller stål och används vanligen främst för järnvägstrafik. Spännvidderna är 10 till 30 meter för en trågbalkbro i betong och brotypen används ofta då den tillgängliga höjden är begränsad. Om den utformas i stål är även den låga vikten en fördel (Trafikverket 2018a). Anledningen till att konstruktionshöjden kan hållas nere är att de långsgående balkarna sätts på sidan om brobanan istället för under. Utrymmet mellan dem fylls sedan med ballast som tågrälsen vilar på, vilket gör att bron inte är lika känslig för rörelser då man lätt kan fylla på ballast och jämna ut ojämnheter. Enligt Trafikverket (2018a) är det dock viktigt att man förser trågbotten med ett ytavlopp i fältmitt, samt att den förses med ett tätskikt som är tålig mot påverkan från ballasten. För en ståltrågbalkbro fungerar det materialet även som korrosionsskydd. Om en så låg vikt som möjligt eftersträvas för bron, kan balkarnas underkant placeras längre ner än brobaneplattan vilket gör att man minskar vikten på ballasten då den inte behöver vara lika tjock. För att inspektera bronns insida måste ballasten tas bort och därmed måste även tågtrafiken stängas av. Har man dubbelspårigt föredras det därför att använda sig av två separata tråg med ett utrymme i mellan för att underlätta vid inspektion och underhåll (Trafikverket, 2018a).

4 Bågverkansbroar

Bågverkansbroar är ett samlingsnamn för broar som bär laster via en båge och utgörs bland annat av olika sorters valvbroar och bågbroar.

4.1 Valvbro

En valvbro kännetecknas av ett cirkulärt eller box-format huvudbärverk. Idag tillverkas valvet vanligtvis av armerad eller oarmerad betong med separata bottenplattor, men tidigare var det vanligt att de byggdes i sten (Trafikverket, 2018b). Valvbroar kan även utformas i stål, men tillhör då kategorin rörbroar. För att konstruktionen ska fungera måste ovansidan av valvet vara täckt med fyllning vilket skapar tryckkrafter i huvudbärverket. Överfyllnadshöjden är direkt kopplad till bronns bärförmåga och en valvbro kan byggas med en spännvidd på upp till 30 meter (Trafikverket, 2018b). De kan även utformas i ett eller flera spann. Valvbroar utformas ofta där låg bygghöjd och stor spännvidd är viktigt (Trafikverket, 2018a).

4.1.1 Grundläggning

Eftersom det uppstår stora tryckkrafter i valvet är grundläggningen viktig för en valvbro. Vilken grundläggningsmetod som är vanlig beror på vilket material bron är tillverkad av. Exempelvis är betongvalvbroar ofta grundlagda direkt på mark eller med pålar, medan de i sten ofta kräver en grundläggning direkt på berg (Trafikverket, 2018b).

4.2 Bågbro

En bågbro består av en underliggande eller överliggande båge med en brobana placerad över respektive under bågen. Huvudbärverket utgörs av bågen, medan brobanan utgör sekundärbärverket. (Trafikverket, 2018b). En bågbro kan byggas med ett eller flera spann och förr användes de ofta vid spännvidder över 60 meter (Trafikverket 2018b s.66). I huvudbärverket uppstår stora tryckkrafter på grund av dess utformning samt egentyngd, vilket medverkar till bronns bärförmåga. Vidare kan bågbroar formges både i betong, stål och trä (Trafikverket, 2018b).

En bågbro kan vara fast inspända i landfästena om bron är tillverkad i betong alternativt innehålla leder i anslutning till landfästena om de byggs i trä eller stål. Vidare kan de även vara fritt upplagda i ett spann och i huvudbärverket ingår då även ett dragband (huvudbalk) mellan bågens ändar och förändrar delvis bronns verkningssätt.

4.2.1 Grundläggning

På grund av att det uppstår stora tryckkrafter i bågen är grundläggningen en viktig del vid utformningen av bågbroar. De horisontella krafterna som uppstår vid ändarna gör att bron ofta anläggs på berg. Är huvudbärverket fritt upplagd krävs inte en lika fast grundläggning då krafterna förs över till grunden på liknande sätt som för andra brotyper (Trafikverket, 2018b).

5 Linverkansbroar

Linverkansbroar är ett samlingsnamn för olika sorters broar som bär laster via hängande linor och utgörs av bland annat hängbroar och snedkabelbroar.

5.1 Hängbroar

Hängbroar består av en brobana som hängs upp på pyloner med hjälp av kablar och hängare, vilka även utgör huvudbärverket av bron. Kablarna förankras i ankare som exempelvis kan vara ett bergrum eller betonglandfästen med stor egentyngd och tar endast dragkrafter. Pylonerna tar i sin tur stora tryckkrafter. Brotypen används vid stora spännvidder upp till 1200 meter och därför utgörs den dominerande lasten av egentyngheten. Även vindlast utgör ett problem vid stora spännvidder och höga pyloner vilket medför att man ofta dimensionerar brobanan så att den hjälper till att minska påverkan av vindlast på övriga delar. Ofta utformas därför brobanan

som en sluten ställåda eller som en fackverksbalk. Att använda fackverksbalk var dock vanligare förr och minskar den möjliga spännvidden (Trafikverket, 2018b). Pylonernas höjd är normalt 10-15 % av det längsta spannet (Trafikverket, 2018a).

5.2 Snedkabelbroar

Snedkabelbroar används vid stora spännvidder, upp till drygt 400 m. Huvudbärverket utgörs av snedkablar, pylontorn och brobana. Brobanan hängs upp i kablar som är förankrade i pylontornen. Snedkablarna bär därför endast dragkrafter och pylontornen tryckkrafter. Då snedkabelbroar, likt hängbroar, ofta är mycket stora, blir lasten från egentynghden dominerande. Även vindlast har stor inverkan på grund av brons utbredning. Moderna snedkabelbroar med stora spännvidder är ofta utformade så att inverkan av vindlast minimeras. Detta görs genom att brobanan dimensioneras som en sluten låda av stål, även brobanaplattan är tillverkad i stål. Mindre snedkabelbroar kan tillverkas i armerad betong (Trafikverket, 2018b).

6 Fackverksbroar

Fackverksbroar är balkbroar med över- eller underliggande stänger som bildar ett fackverk. Den främsta anledningen till att välja ett fackverk för en balkbro vid längre spännvidder är att överbyggnadens egentynghd minskar och därmed även materialåtgången. Detta beror på att en fackverkskonstruktion tar kraft i tryck och drag och inte lika mycket moment. Huvudbärverket för fackverksbroar består av en eller flera balkar samt fackverk. Dessa kan variera i höjd och utformas på olika sätt efter exempelvis brons tänkta användningsområde (Trafikverket, 2018b).

7 Material

Vid byggnation av broar är det vanligast att använda sig av materialen trä, betong och stål. Nedan följer en mer detaljerad beskrivning av dessa.

7.1 Trä

Enligt SLU (2019) finns det 23,6 miljoner hektar produktiv skogsmark i Sverige som lämpas för produktion av skog vilket är 58 % av Sveriges totala yta. Den stora landsarealen har gjort att trä har varit det självklara byggnadsmaterialet historiskt i Sverige och är fortfarande en av de största näringsgrenarna (Burström, 2007). Trä är ett levande material och dess egenskaper bestäms av naturen. Träets materialegenskaper varierar därför för olika sorters virke beroende på växtplats samt om det finns kvistar i träet. Dessa variationer gör att säkerhetskoefficienter behöver användas vid dimensionering av trästrukturer (Burström, 2007).

Trä är ett anisotropt material och strukturen består av rör av främst cellulosa sammanbundna med lignin. Fiberstrukturen gör att egenskaperna varierar i olika riktningar. Därmed är belastningsriktningen samt om träet utsätts för drag eller tryck de viktigaste faktorerna för hållfastheten (Burström, 2007). Hållfastheten är större parallellt fiberriktningen jämfört med vinkelrätt fiberriktningen. Störst hållfasthet fås enligt Burström drag parallellt fiberriktningen (80-100 MPa) och träet är som svagast vid drag vinkelrätt fiberriktningen (0,5 MPa).

Även fukttinnehåll påverkar hållfastheten, där en högre fuktkvot ger en lägre hållfasthet (Al-Emrani, Engström, M. Johansson, P. Johansson, 2013). Vidare förklaras att en hög fuktkvot även ökar risken för nedbrytning av materialet från svampar och insekter. En låg fuktkvot (under 20%) förhindrar detta. Därför är det viktigt att utforma träkonstruktioner så att vatten kan avledas och luft kan cirkulera i konstruktionen (Al Emrani et al, 2013). Fukttinnehållet i en träkonstruktion ger rörelser i form av svällning (fuktupptagning) eller krympning (fuktavgivning) och är olika i träets olika riktningar (Burström, 2007).

Hållfastheten påverkas även av belastningstid, temperatur och dimensioner på virket (Al Emrani et al, 2013). För att åstadkomma starkare och styvare konstruktioner kan ihoplarning av ett antal lameller vara ett alternativ, exempelvis limträ och LVL-trä (Laminated Veneer Lumber) (Al Emrani et al, 2013). Trä är ett bra materialval ur ett ekologiskt hållbarhetsperspektiv då det lagrar koldioxid som tagits upp vid fotosyntesen (Skogsstyrelsen, 2018). Däremot är beständigheten en stor nackdel, vilken dock kan ökas genom ytbehandling, impregnering och intäckning (Banverket, 2007).

7.2 Betong

Betong är ett mycket vanligt byggnadsmaterial i Sverige och i världen, framförallt som bärande element. Det har en mycket god tryckhållfasthet som är cirka tio gånger

större än draghållfastheten, vilket är anledningen till att konstruktioner ofta förses med dragarmering (Al Emrani et al, 2013). Tryckhållfastheten är starkt beroende av hur mycket vatten som finns i förhållande till andelen cement, vattencementtal vct, och ju lägre vct desto högre hållfasthet. Hållfastheten kan variera mellan ca 20 MPa till 60 MPa (Burström, 2007).

Vid användning av betong är det viktigt att beakta krypning vilket är deformationer som uppkommer av långtidslast och beaktas med ett kryptal (Burström, 2007). Även betongens krympning är viktig att ta hänsyn till. Den uppkommer vid uttorkning och kan leda till sprickor i betongen. Krympningen beror på vattencementtal samt omgivningens relativa fuktighet, RF.

Ett av de stora problemen som måste tas hänsyn till är betongens beständighet. Burström (2007) beskriver att de mest frekventa beständighetsproblemen är frostangrepp, korrosion av armering samt kemiska angrepp. Frostangrepp uppkommer då vattnet i betongens porer fryser till is och en volymökning ger upphov till spänningar i betongen som slutligen gör att betongen slås sönder. Korrosion av armering minskar armeringens tvärsnittsarea vilket minskar dess hållfasthet, samt ökar armeringens volym vilket ger upphov till spänningar i betongen som kan leda till sprickbildning. Burström (2007) förklarar att det inte sker någon korrosion då armeringen befinner sig inne i betongen på grund av betongens höga alkalinitet. Detta tillstånd kan brytas ned genom antingen karbonatisering, koldioxid från luften tränger in i betongen och reagerar med dess kalciumhydroxid, eller att klorider tränger in i betongen, så kallad kloridinträngning.

Betong består främst av cement och vatten (cementpasta), grus och sten (ballast) samt något tillsatsmedel. Cement tillverkas av kalksten och lera som upphettas till 1450 grader celsius och i denna process avgår stora mängder koldioxid (Burström, 2007), vilket är den process som är betongens största bidragande faktor till utsläpp av växthusgaser. För att betongen ska kunna fungera för större krafter i drag måste den armeras. Enligt Du och Karoumi (2013) så jämförs en samverkansbro i stål och betong och en bro i endast betong och där kom forskarna fram till att armeringen gav lika stora utsläpp som betongen. Slutsatsen de kunde dra var att bron i endast betong gav större utsläpp, då en armerad betongbalk kräver mycket armering samt att det inte finns lika stora möjligheter för återanvändning som med stål. Det beskrivs att när betongen återvinns kan det endast återvinnas som fyllnadsmaterial vid exempelvis vägbyggnad. Därmed är det viktigt att inte använda mer cement än nödvändigt samt välja rätt hållfasthetsklass på rätt ställe.

För att en betongkonstruktion ska kunna ta mer last kan förspänd betong användas. Förspänning av betong gör att man kan konstruera broar med längre spännvidder då konstruktionerna kan göras slankare. Metoden innebär att armeringen dras ut och betongen utsätts för tryckkrafter. Vid pålastning spricker inte betongen och betongelementet befinner sig i stadium I istället för stadium II, vilket innebär att elementet får en ökad styvhet. Detta sammantaget gör att betongen presterar bättre i bruksstadiet enligt Mats Karlsson, Professor of the Practice vid avdelningen för

konstruktionsteknik på Chalmers Tekniska Högskola (personlig kommunikation, 14 februari 2020).

7.3 Stål

Burström (2007) menar att det som definierar materialet stål är att det ska bestå av järn (Fe) till största delen, vara framställt genom en smältprocess och med en kolhalt som inte är större än 1,8 viktprocent. Al Emrani et al (2013) beskriver att stål är ett mycket bra materialval för förtillverkning av byggnadsdelar och på så sätt kan en god och rationell produktion erhållas samt byggtiden på plats kortas ner.

Stål är en legering av järn och kol samt även ytterligare grundämnen (Al Emrani et al, 2013). I materialet kan kristaller urskiljas vilka bildar ett mönster som kallas gitter. För att ge stålet de egenskaper som önskas tillsätts legeringsämnen med olika egenskaper. Även storleken på legeringsatomen påverkar stålet då parametern påverkar gittrets form. Exempel på legeringsämnen är kol, mangan, kisel, svavel och fosfor, kväve samt väte. Viktigaste legeringsämnet som styr stålets egenskaper är kol, då större andel kol ger ökad hållfasthet och hårdhet på bekostnad av ett mer sprött brott och svårare vid svetsning. Mangan höjer också stålets hållfasthet och gör stålet mer segt.

Burström (2007) beskriver att stål har en mycket hög hållfasthet och E-modul vilket medför att väldigt slanka konstruktioner kan byggas. Enligt Burström varierar stålets hållfasthet mellan 200-2000 MPa med ungefär samma hållfasthet i drag och i tryck, men att det vid tryck ej uppstår någon brottgräns.

Beständigheten är viktig att beakta vid användning av stål. De viktigaste parametrarna att dimensionera för med hänsyn till beständighet är korrosion, utmattning och brand (Burström, 2007). En bro är mycket känslig för korrosion då den befinner sig utomhus med en hög relativ fuktighet och hög halt av föroreningar som påskyndar korrosionen. Vanliga metoder för att undvika korrosion är rostskyddsmålning och förzinkning. Utmattning är enligt NE ("Utmattning", u.å) ett fenomen som ofta leder till brott. Utmattning uppkommer vid varierande belastning där dragspänningar leder till sprickor i konstruktionen. Konstruktionsdelar med hög lokal spänning, exempelvis svetsar, är extra känsliga.

SSAB (u.å) beskriver att det finns två metoder att producera stål på. Första metoden kallas primär stålproduktion där järnmalmen reduceras med hjälp av koks och kol i masugnar, vilket ger upphov till stora utsläpp av koldioxid. Andra metoden är sekundär stålproduktion vilket innebär att använda återvunnet stål. Primärt producerat stål ger upphov till cirka 2000 kg CO₂-eq/ton stål medan om miljödeklarerat svenskt stål används kan utsläppen minska med upp till 80 % och därmed ge upphov till 400 kg CO₂-eq/ton. Därmed har stål ett mycket högt utsläpp av växthusgaser men samtidigt finns det en mycket stor möjlighet att återanvända och återvinna stål som gör att det finns möjlighet att använda stål som byggnadsmaterial utan att orsaka alltför stora koldioxidutsläpp.

Referenser bilaga B

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., Johansson, P. (2013). *Bärande konstruktioner Del 1*. Göteborg: Institution för Bygg- och miljöteknik, avdelningen för konstruktionsteknik.

Banverket. (2007). *Broprojektering* (BVH 583.20). Hämtad från <https://chalmers.instructure.com/courses/9711/files/351210/download?wrap=1/>

Burström, P-G. (2007). *Byggnadsmaterial: Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Lund: Studentlitteratur.

Du, G. & Karoumi, R. (2013). Environmental life cycle assessment comparison between two bridge types: reinforced concrete bridge and steel composite bridge. I *SCMT3, International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies*, 18-22 juli 2013, Kyoto, Japan.

Bro. (u.å.). I *Nationalencyklopedin (NE)*. Hämtad från <https://www-ne-se.proxy.lib.chalmers.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/bro>

Utmattning. (u.å.). I *Nationalencyklopedin (NE)*. Hämtad från <https://www-ne-se.proxy.lib.chalmers.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/utmattning>

Skogsstyrelsen. (2018). *Skogens roll för klimatet*. Hämtad från <https://www.skogsstyrelsen.se/miljo-och-klimat/skog-och-klimat/skogens-roll-for-klimat/>

SLU. (2019). *Produktiv skogsmark*. Hämtad från <https://www.slu.se/centrumbildningar-och-primarriksskogstaxeringen/statistik-om-skog/senaste-statistiken/produktiv-skogsmark/>

SSAB (u.å). *Två processer för stålproduktion*. Hämtad från <https://www.ssab.se/ssab-koncern/hallbarhet/hallbar-verksamhet/stalproduktion>

Trafikverket. (2018a). *Broprojekteringshandbok Förhandsutgåva*. Opublicerat manuskript.

Trafikverket. (2018b). *BaTMan- Kodförteckning beskrivning av brotyper*. Hämtad från https://batmanhandbok.trafikverket.se/dokument/Bro_konstruktionstyper/

Trafikverket. (2019, 5 augusti). *Drift och underhåll av broar och tunnlar | Trafikverket* [Videofil]. Hämtad från https://www.youtube.com/watch?time_continue=1&v=m9dgv1aKttM&feature=emb_logo

Vägverket. (2008). *Mall till Objektsteknisk beskrivning av brounderhåll (OTBbu)*. Hämtad från https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10824/RelatedFiles/2008_104_mall_till_objektsteknisk_beskrivning_brounderhall_otbbu.pdf

Bilaga C - Beräkningsunderlag

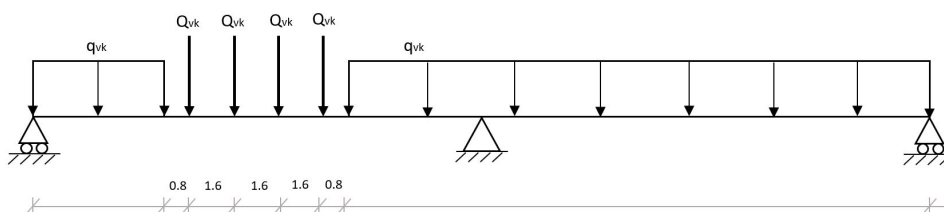
Beteckningar

α	Nationell anpassningsfaktor [-]
α_{\perp}	Normalspänning vinkelrätt svetsen [Pa]
α_T	Längdutvidgningskoefficient [$\frac{1}{^{\circ}C}$]
$\beta_{L,w1}$	Reduktionsfaktor [-]
β_w	Korrelationsfaktor [-]
χ_{LT}	Reduktionsfaktor med avseende på vippning [-]
χ_W	Skjuvbucklingskoefficient [-]
ΔL	Längdutvidgning [m]
ΔT_N	Temperaturskillnad [$^{\circ}C$]
η	Faktor som beaktar bidrag från stålets töjningshårnande [-]
γ_d	Partialkoefficient för säkerhetsklass [-]
γ_p	Partialkoefficient för spännkraft [-]
$\gamma_{G,j}$	Partialkoefficient för permanent last [-]
γ_{M0}	Korrektionskoefficient [-]
γ_{M1}	Partialkoefficient med avseende på materialets hållfasthet [-]
γ_{M2}	Partialkoefficient för svetsens bärförmåga [-]
$\gamma_{Q,i}$	Partialkoefficient för variabel last [-]
κ_t	Bucklingskoefficient [-]
λ_w	Slankhetstal [-]
ψ_0	Faktor for kombinationsvarde for variabe last [-]
ψ_1	Faktor for frekvent varde for variabel last [-]
ψ_2	Faktor for kvasipermanent varde for variabel last [-]
τ_{\perp}	Skjuvspänning vinkelrätt svetsen [Pa]
τ_{\parallel}	Skjuvspänning parallellt svetsen [Pa]
ε	Reduktionsfaktor [-]
ξ_j	Reduktionsfaktor för ogynnsamma permanenta laster [-]
A	Tvärsnittsarea [m ²]
a	Svetsens a-mått [m]
A_v	Skjuvarea [m ²]
d	Livhöjd exklusive svets [m]
E	Elasticitetsmodul [GPa]
f_t	Flänstjocklek [m]
f_u	Grundmaterialets brotthållfasthet [MPa]
f_y	Flytspänning [MPa]
F_{fn}	Kraft som verkar i nedre fläns [N]
F_{fu}	Kraft som verkar i övre fläns [N]
$F_{w,x}$	Vindlast i x-riktning [N]
$F_{w,y}$	Vindlast i y-riktning [N]

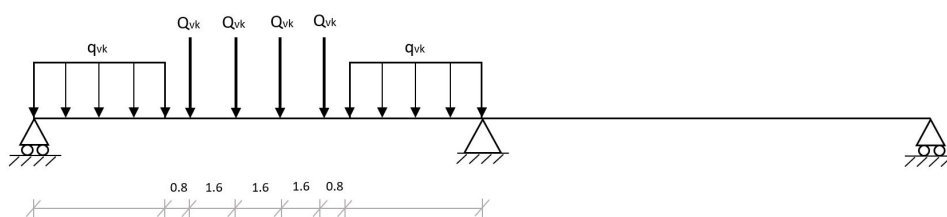
F_{wn}	Kraft som verkar i den del av livet som är nedanför tvärsnittets tyngdpunkt [N]
F_{wu}	Kraft som verkar i den del av livet som är ovanför tvärsnittets tyngdpunkt [N]
$G_{k,j}$	Karakteristiskt värde för permanent last (egentyngd) [N alt N/m]
h	Total tvärsnittshöjd inkl. fläns och liv [m]
h_w	Livhöjd [m]
H_x	Resultierande horisontell kraft på ett lager i x-riktning [N]
H_y	Resultierande horisontell kraft på ett lager i y-riktning [N]
I	Yttröghetsmoment [m ⁴]
L	Nyttig svetslängd [m]
L_j	svetslängd [m]
$L_{a,b}$	Influenslängd [m]
L_{tot}	Brons totala längd [m]
M_{Ed}	Dimensionerande moment [Nm]
M_{Rd}	Momentkapacitet [Nm]
P	Spännkraft eller kraft som verkar i svets[N]
$Q_{k,1}$	Karakteristiskt värde för variabel huvudlast [N alt N/m]
$Q_{k,i}$	Karakteristiskt värde för variabel last [N alt N/m]
Q_{lad}	Dimensionerande accelerationskraft [N alt N/m]
Q_{lak}	Karakteristisk accelerationskraft [N alt N/m]
Q_{lbd}	Dimensionerande bromskraft [N alt N/m]
Q_{lbk}	Karakteristisk bromskraft [N alt N/m]
Q_{sd}	Dimensionerande sidokraft [N alt N/m]
Q_{sk}	Karakteristisk sidokraft [N alt N/m]
t_f	Flänsbredd [m]
t_w	Livbredd [m]
$T_{e,max}$	Maximalt värde på den jämnt fördelade temperaturkomponenten [°C]
$T_{e,min}$	Minimalt värde på den jämnt fördelade temperaturkomponenten [°C]
V_{Ed}	Dimensionerande tvärkraft [N]
V_{Rd}	Tvärkraftskapacitet [N]
W_{el}	Elastiskt böjmotstånd [m ³]
W_{pl}	Plastiskt böjmotstånd [m ³]
z_{fn}	Avstånd från tvärsnittets tyngdpunkt till nedre flänsens tyngdpunkt [m]
z_{fu}	Avstånd från tvärsnittets tyngdpunkt till övre flänsens tyngdpunkt [m]
z_{wn}	Avstånd från tvärsnittets tyngdpunkt till tyngdpunkt i nedre delen av livet [m]
z_{wu}	Avstånd från tvärsnittets tyngdpunkt till tyngdpunkt i övre delen av livet [m]

1 Lastfall - längdled

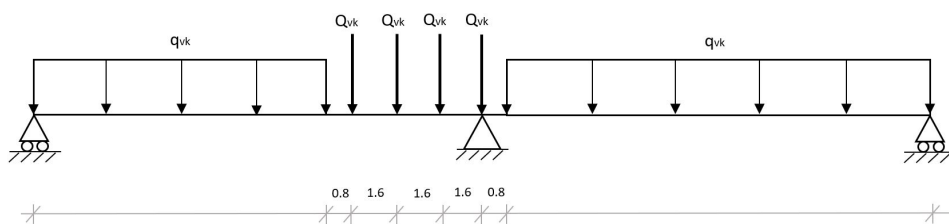
Tre olika lastfall beaktas i längdled eftersom dessa antas vara de mest kritiska vid dimensionering av huvudbärkverket. Placeringen av karakteristiska trafikklaster, Q_{vk} och q_{vk} som verkar på bron är en tillämpning av lastmodell LM 71 enligt SS-EN 1991-2. I figur 21-23 redovisas de lastfall som beaktas i kommande beräkningar.



Figur 21: Lastfall 1 - Punktlaster mitt i fält med jämnt utbredd last i båda brospann



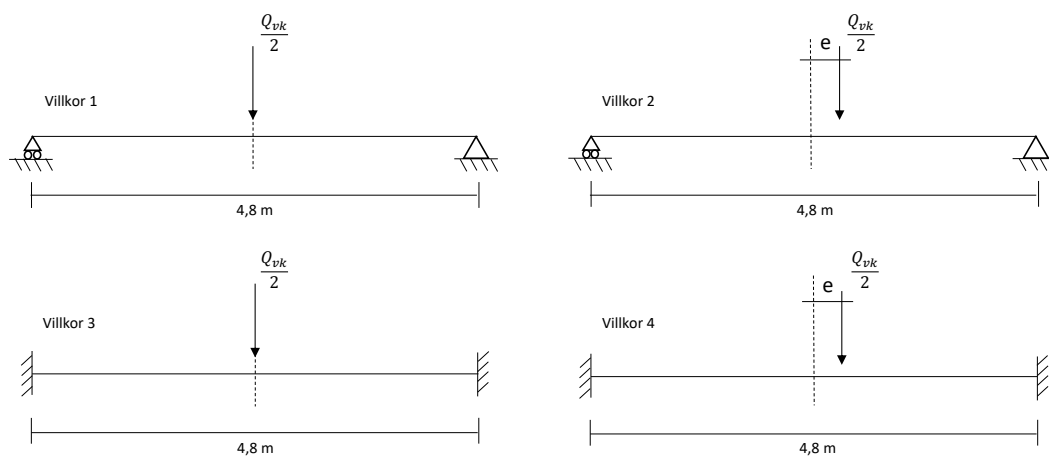
Figur 22: Lastfall 2 - Punktlaster mitt i fält med jämnt utbredd last endast i det brospann där punktlasterna är



Figur 23: Lastfall 3 - Punktlaster precis till vänster om mittstöd och jämnt utbredd last i båda brospann

2 Lastfall - tvärled

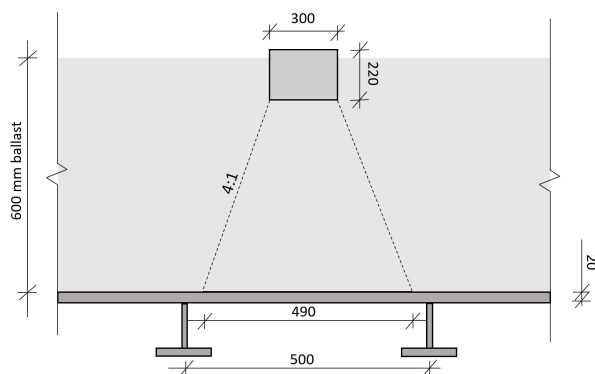
I tvärled beaktas fyra olika villkor utifrån randvillkor och eventuell excentrisk placering utav axellasten. De fyra villkoren numreras från 1-4 och är; fritt upplagd utan excentricitet, fritt upplagd med excentricitet, fast inspänd utan excentricitet och fast inspänd med excentricitet, se figur 24.



Figur 24: Beräkningsmodeller i tvärled för varierande upplagsvillkor och excentricitet

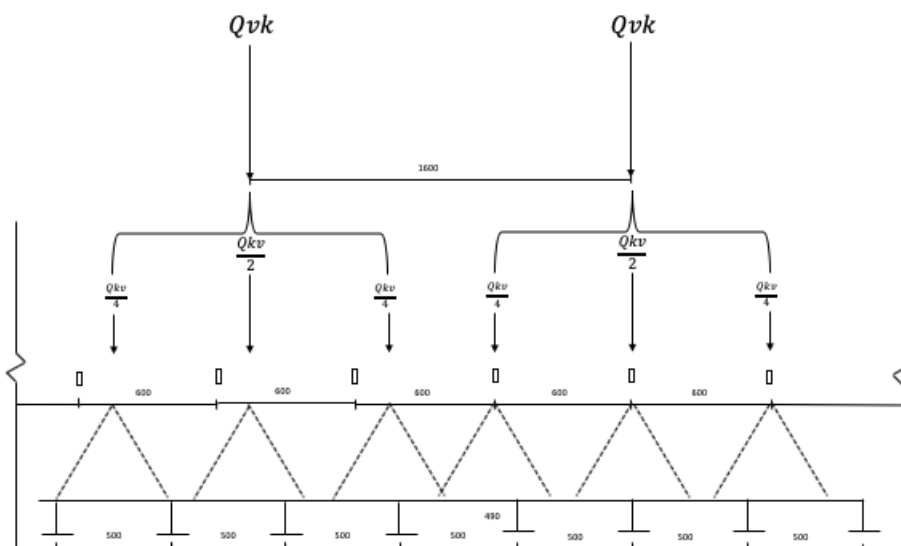
3 Lastspridning

Enligt SS-EN 1991-2 sker lastspridning genom ballast med en lutning 4:1. I spårets riktning sker lastspridning från sliper ned till trågets bottenplatta enligt figur 25. Följaktligen omvandlas axellaster till utbredda laster som kommer att verka på bottenplattan. I figur 25 visualiseras även det fall som är dimensionerande för bottenplattan, nämligen då en belastad sliper är placerad mittemellan två tvärbalkar.



Figur 25: Lastspridning i spårets riktning

Motiveringen till att den dimensionerande lasten på en tvärbalk utgörs av en halv axellast visualiseras i figur 26. Här beaktas en fördelning av axellasten enligt SS-EN 1991-2 avsnitt 6.3.6.1 där lasten sprids över tre sliprar. Därefter sker en lastspridning i ballasten innan den numera utbredda lasten når bottenplattan och tvärbalkarna. I figur 26 redovisas grafiskt att ingen tvärbalk kommer få större belastning än $Q_{vk}/2$.



Figur 26: Fördelning av axellast i spårets riktning, med lastspridning

4 Lastkombinering

Vid dimensionering av bron används fyra olika lastkombinationer, en vid brottgränstillstånd och resterande vid bruksgränstillstånd. Vid beräkning av moment- och tvärkraftskapacitet samt dimensionering av lager används lastkombination för brottgränstillstånd medan bruksgränstillstånd används vid kontroll av nedböjning.

4.1 Brottgränstillstånd

Lastkombinationen kan i brottgränstillstånd uttryckas som det minst gynnsamma av de två ekvationerna 6.10a och 6.10b i SS-EN 1990, vilka gäller för gränstillstånden STR och GEO. För att beakta osäkerheter i modellen för lasteffekter multipliceras dessa två ekvationer med en partitalkoefficient (säkerhetsfaktor) γ_d som beror av säkerhetsklass. Då fås ekvation 4.1 och ekvation 4.2. I ekvation 4.1 är permanenta lasten huvudlast och i ekvation 4.2 är variabla lasten huvudlast. Därmed väljs i beräkningarna den minst gynnsamma lasteffekt av dessa två ekvationer.

$$\sum \gamma_d \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_d \gamma_p P + \gamma_d \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_d \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4.1)$$

$$\sum \gamma_d \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_d \gamma_p P + \gamma_d \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_d \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4.2)$$

$G_{k,j}$ = Karakteristiskt värde för permanent last (egentyngd)

P = Spännkraft (ej aktuellt för denna brotttyp)

$Q_{k,i} = 0$ (Karakteristiskt värde för den samverkande variabla lasten i (ty antar att hela variabla lasten är huvudlast))

$Q_{k,1}$ = Karakteristiskt värde för en variabel huvudlast

Värden för reduktionstal och partitalkoefficienter:

$\psi_0 = 0,8$ (Lastreduktionstal (kombinationsvärde), SS-EN 1990 s.58)

$\gamma_d = 1$ (Partitalkoefficient för säkerhetsklass)

$\gamma_{G,j} = 1,35$ (Partitalkoefficient för permanent last), SS-EN 1990 s.48

$\gamma_p = 1,3$ (Partitalkoefficient för spännkraft)

$\gamma_{Q,i} = 1,5$ (Partitalkoefficient för variabel last), SS-EN 1990 s.48

$\xi_j = 0,89$ (Reduktionsfaktor för ogynnsamma permanenta laster, SS-EN 1990 s.48)

4.2 Bruksgränstillstånd

I bruksgränstillstånd kontrolleras brons funktion vid normal användning. En sådan kontroll är nedböjning. Det finns tre stycken ekvationer för bruksgränstillstånd enligt lastmodell 71. Dessa är karakteristisk- frekvent- och kvasipermanent kombination, motsvarande ekvationerna 4.3, 4.4 och 4.5, vilka motsvarar ekvationer 6.14b, 6.15b och 6.16b (SS-EN 1990)

Vid kontroll av nedböjning är endast den frekventa kombinationen av intresse. Frekvent kombination innebär ett reversibelt tillstånd i brukgränstillstånd där ingen konsekvens av lasterna finns kvar efter att bron inte längre belastas.

$$\text{Karakteristisk kombination: } \sum G_{k,j}'' + P_k'' + Q_{k,1}'' + \sum \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4.3)$$

$$\text{Frekvent kombination: } \sum G_{k,j}'' + P'' + \psi_{1,1} Q_{k,1}'' + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4.4)$$

$$\text{Kvasipermanent kombination: } \sum G_{k,j}'' + P'' + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4.5)$$

Se ovanstående beteckningar, där det för bruksgränstillstånd tillkommit följande:

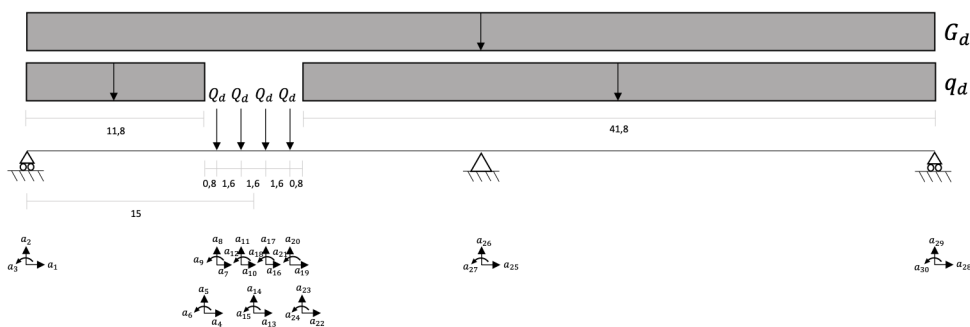
- P_k = Karakteristisk spännkraft (ej aktuellt för denna brotyp)
- $\psi_1 = 0,8$ (Lastreduktionstal (kombinationsvärde), SS-EN 1990 s.58)
- $\psi_2 = 0$ (Lastreduktionstal (kombinationsvärde), SS-EN 1990 s.58)
- $\gamma_{G,j} = 1,35$ (Partialkoefficient för permanent last), SS-EN 1990 s.48

5 Lasteffekt

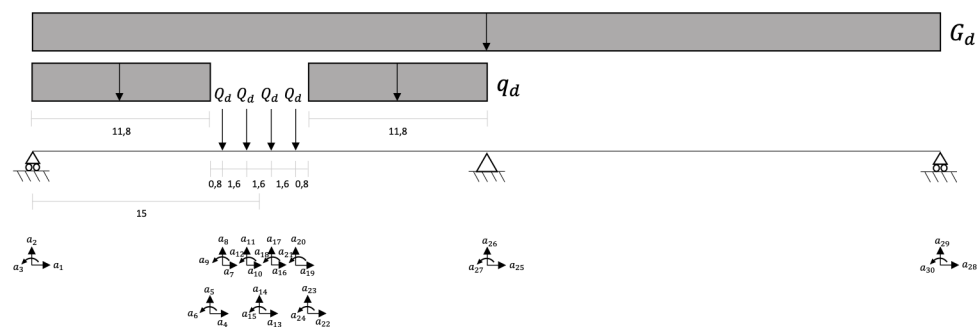
För att kunna dimensionera bron behöver lasteffekt bestämmas, alltså ta fram moment- och tvärkraftsdiagram. Moment- och tvärkraftsdiagram tas fram för de olika lastkombinationerna för de tre lastfallen i längsled respektive fyra lastfallsvillkoren i tvärlid. Framtagande av lasteffekt för längd- respektive tvärlid gjordes med hjälp av CALFEM-funktioner för balkverkan i 2D. För att ta fram dessa olika diagram måste en modell tas fram som visar antalet frihetsgrader och element. Antalet element avgörs av hur lasterna är placerade, och mellan varje element finns en nod som består av tre frihetsgrader.

5.1 Längdled - huvudbalkar

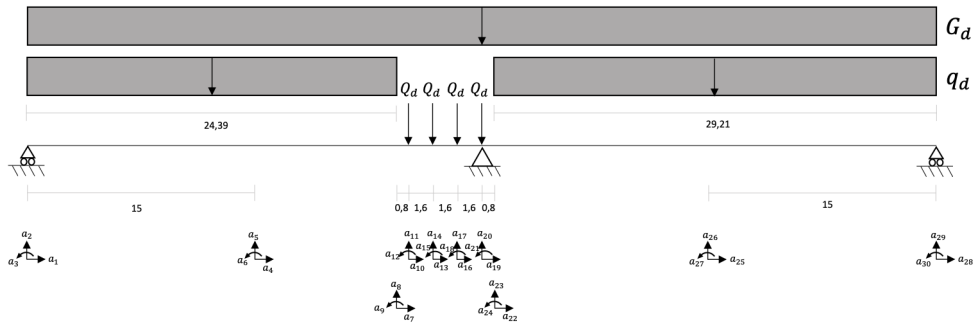
Snittkrafterna beräknas genom att beräkningsmodellen för huvudbalkarna delas upp i ett antal element och noder med tillhörande frihetsgrader. Frihetsgraderna för de tre lastfallen definieras i figur 27-29.



Figur 27: Frihetsgrader för lastfall 1

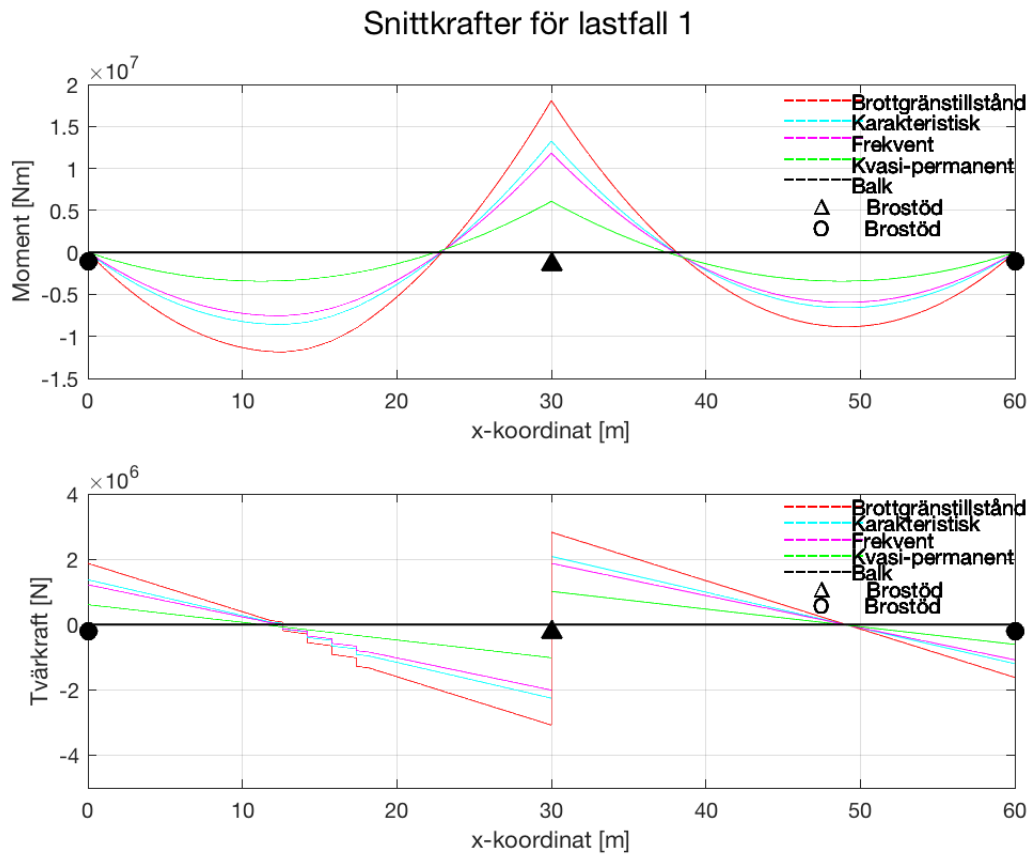


Figur 28: Frihetsgrader för lastfall 2



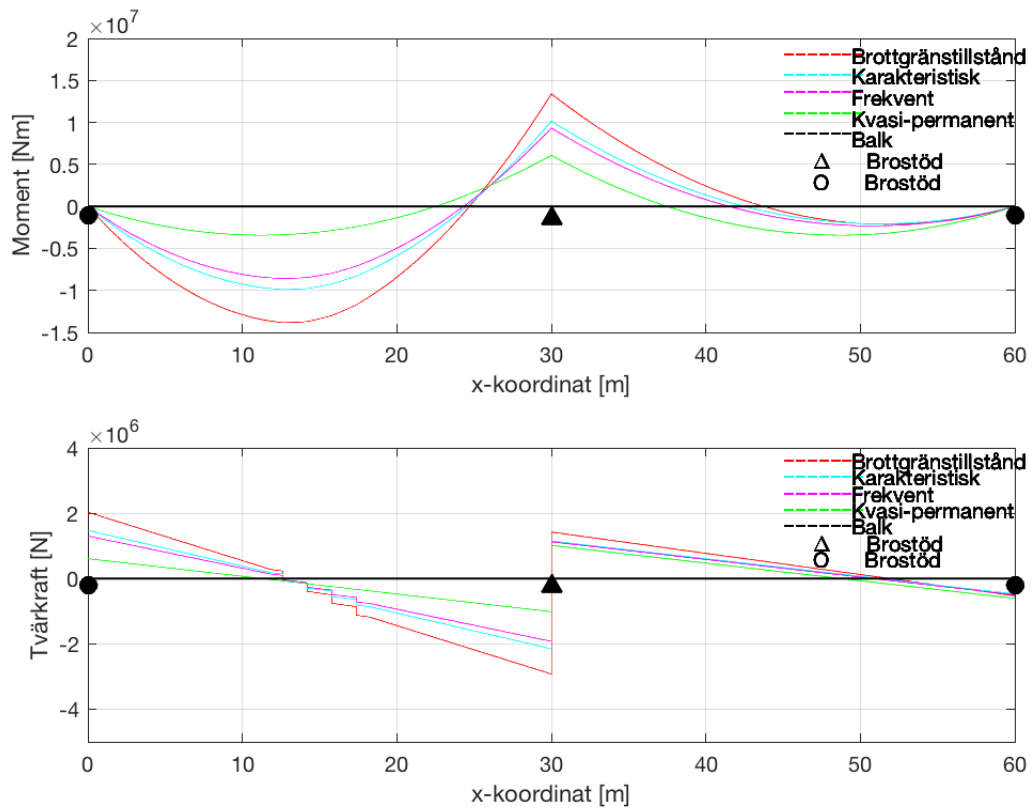
Figur 29: Frihetsgrader för lastfall 3

Efter beräkningar med CALFEM-funktioner i Matlab erhålls följande snittkrafter för de tre olika lastfallen i längdled, se figur 30-32.

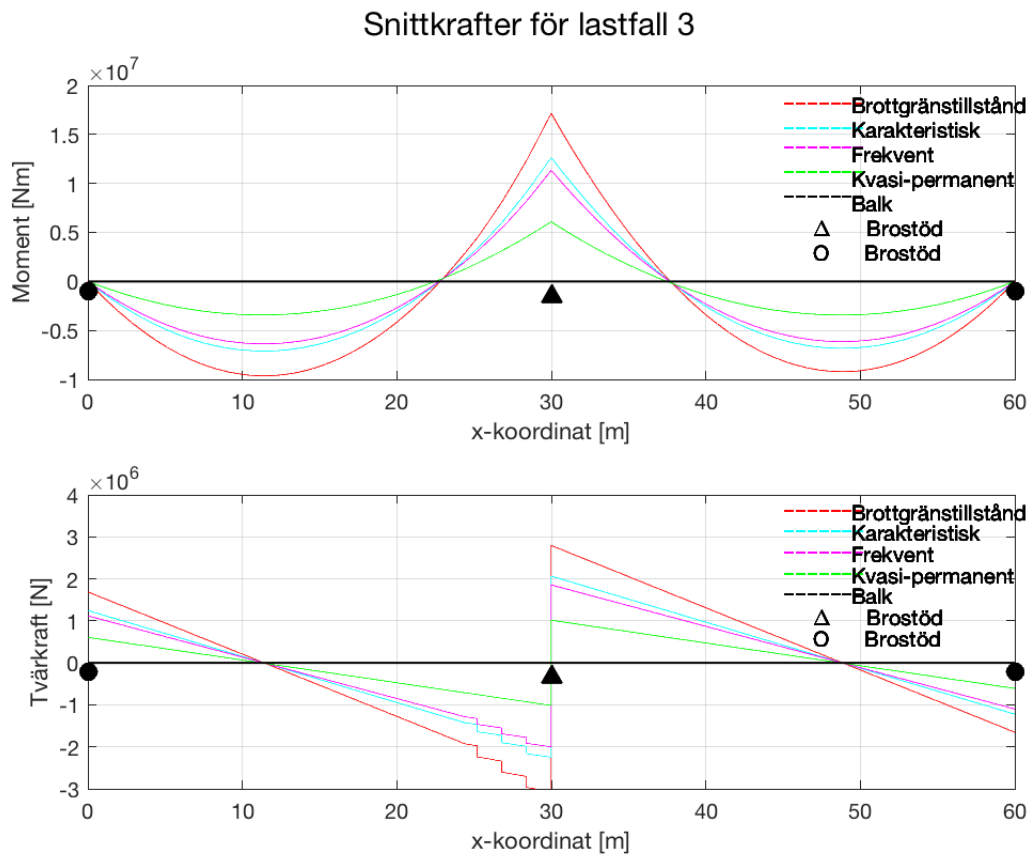


Figur 30: Moment och tvärkraftsdiagram för lastfall 1

Snittkrafter för lastfall 2



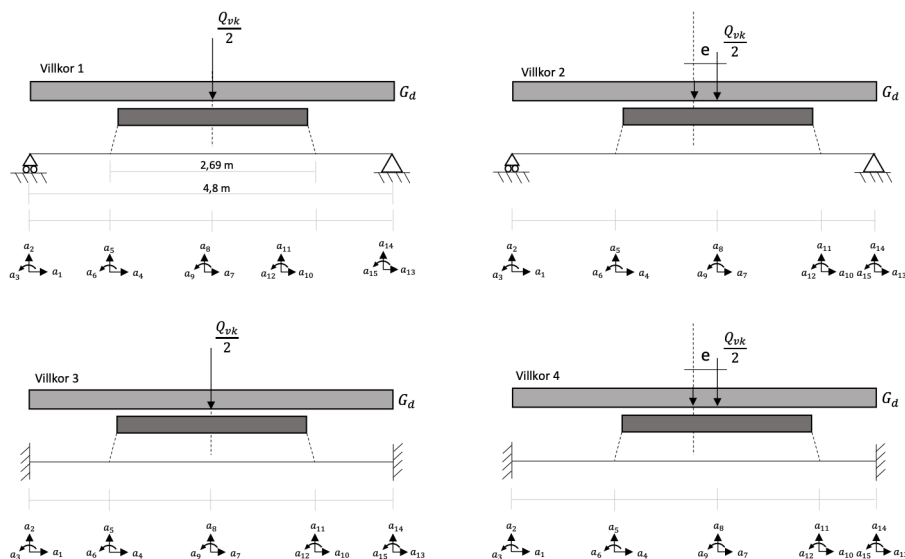
Figur 31: Moment och tvärkraftsdiagram för lastfall 2



Figur 32: Moment och tvärkraftsdiagram för lastfall 3

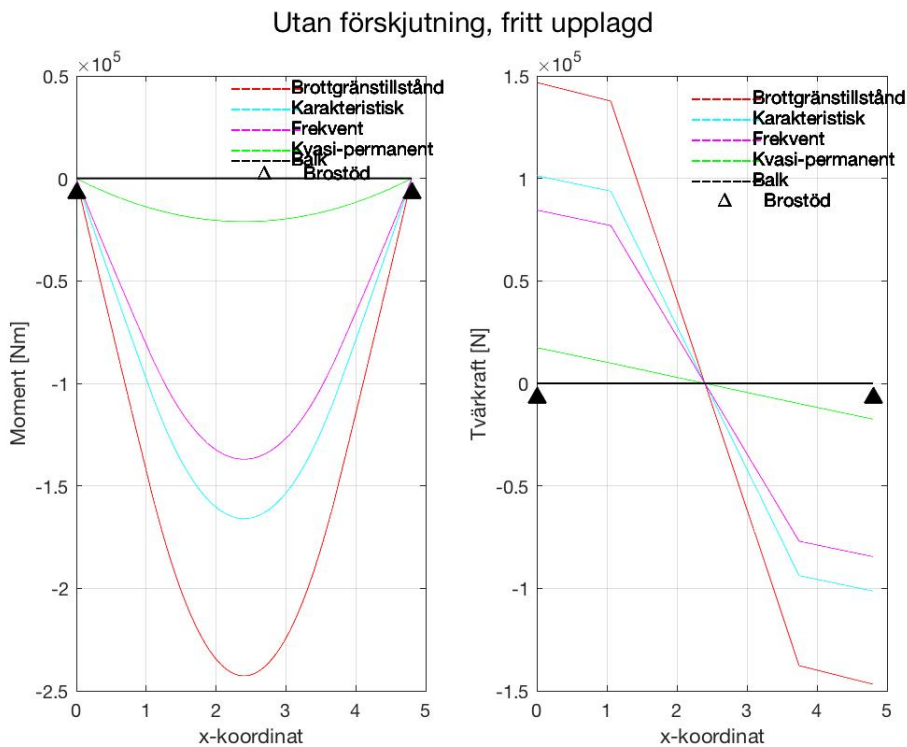
5.2 Tvärled - tvärbalkar

För att beräkna erhållna snittkrafter i tvärbalkarna delas beräkningsmodellen upp i olika element och frihetsgrader definieras. Element och frihetsgrader för tvärbalkarna redovisas i figur 33.



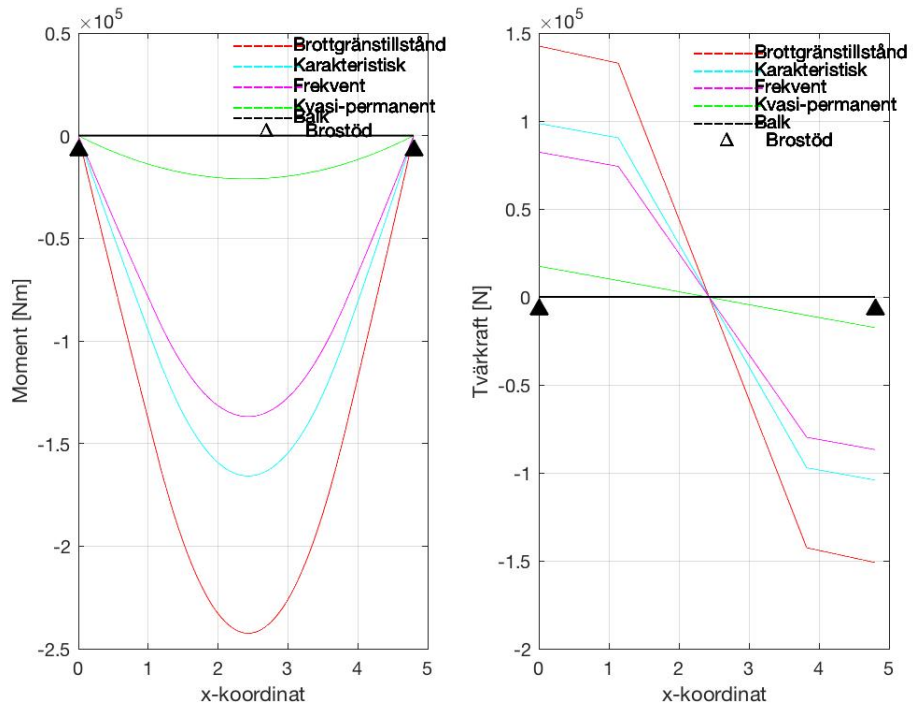
Figur 33: Frihetsgrader för de fyra olika villkoren i tvärled

Därefter beräknas snittkrafterna med hjälp av CALFEM-funktioner på samma sätt som i beräkningarna för huvudbalkarna. Här beräknas dock lasteffekten för de fyra villkor som definierats i 4.1. Erhållna värden på snittkrafter för de fyra olika villkoren redovisas i figur 34-37.



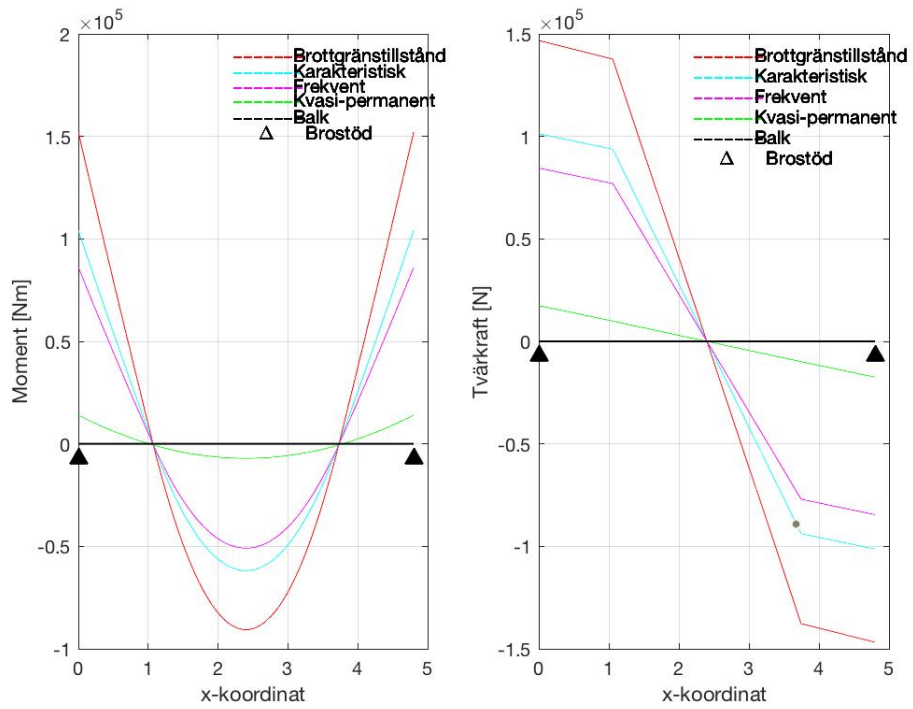
Figur 34: Moment och tvärkraftsdiagram för villkor 1

Med förskjutning, fritt upplagd



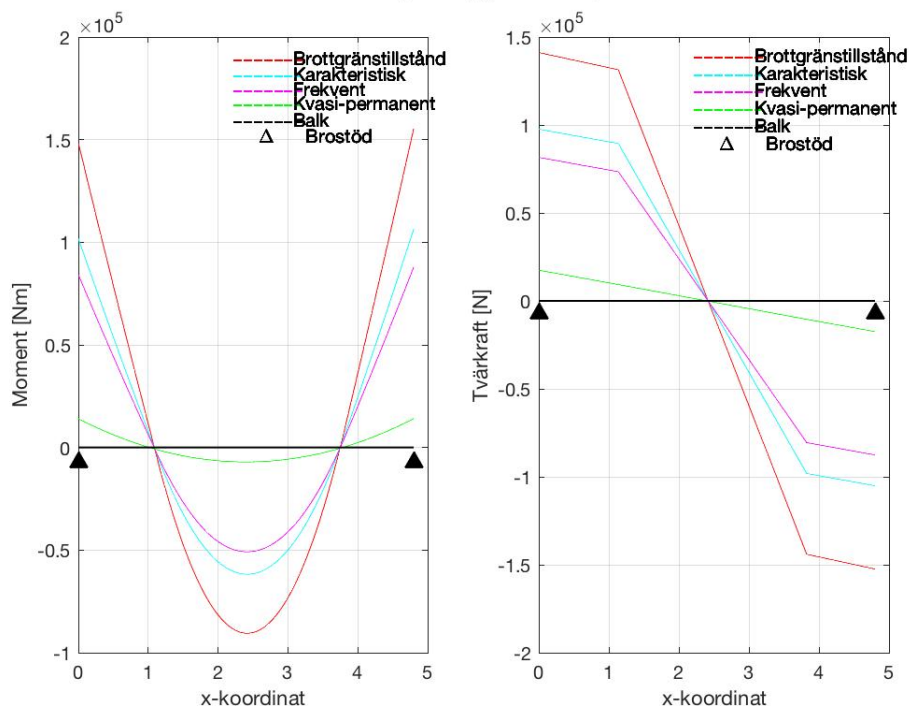
Figur 35: Moment och tvärkraftsdiagram för villkor 2

Utän förskjutning, fast inspänd



Figur 36: Moment och tvärkraftsdiagram för villkor 3

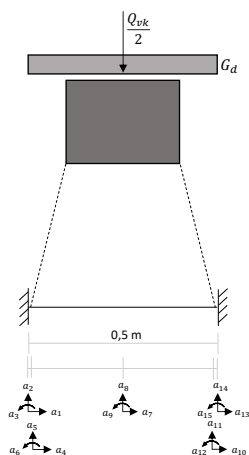
Med förskjutning, fast inspänd



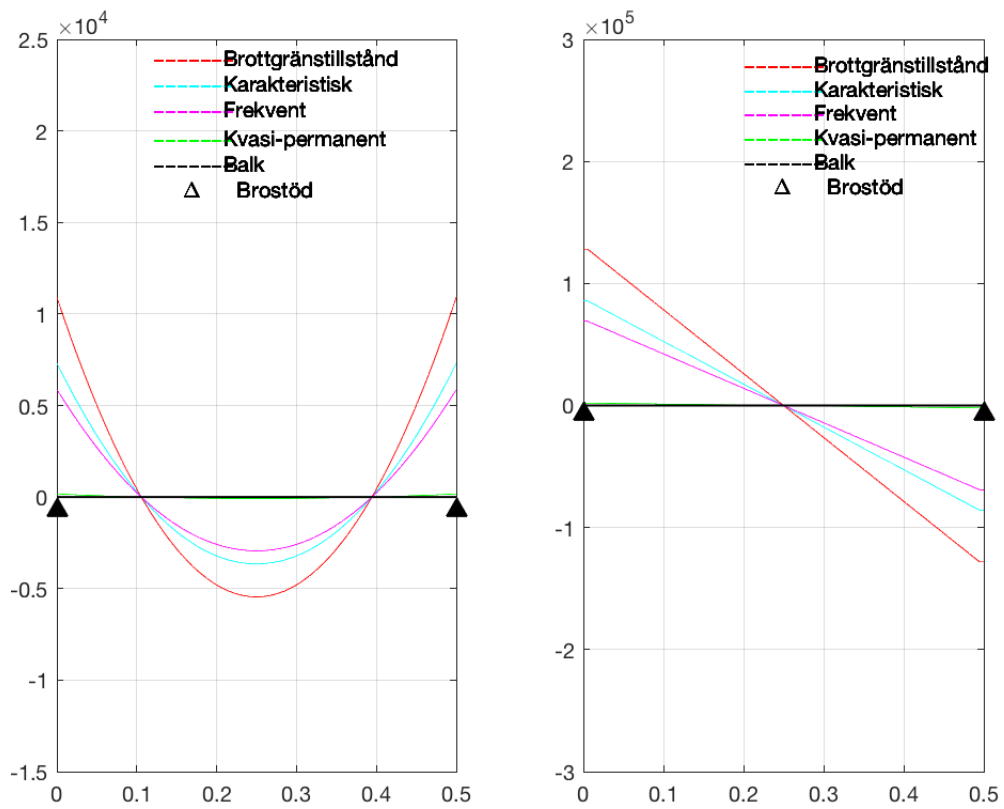
Figur 37: Moment och tvärkraftsdiagram för villkor 4

5.3 Längdled - bottenplatta

Bottenplattan modelleras som en fast inspänd balk eftersom den antas vara fastsvetsad i tvärbalkarna. Beräkningmodellen delas in i element och frihetsgrader på liknande sätt som för huvudbalkarna. Bottenplattans frihetsgrader definieras i figur 38. Därefter beräknas snittkrafter samt deformation med hjälp av CALFEM-funktioner. Erhållna snittkrafter för bottenplattan redovisas i figur 39.



Figur 38: Frihetsgrader för bottenplatta



Figur 39: Snittkrafter för bottenplatta

6 Kapacitet

I kapacitetsberäkningar kontrolleras moment- och tvärkraftskapacitet samt interaktion mellan dessa. Detta görs med hjälp av ekvationer från Bärande konstruktioner del 1 (Al-Emrani, Engström, Johansson, Johansson, 2013) och appliceras för såväl huvudbalkar som tvärbalkar och bottenplatta.

6.1 Momenkapacitet

Huvudbalkens tvärsnitt utgörs av ett symmetriskt I-tvärsnitt medan tvärbalkens tvärsnitt utgörs av ett osymmetriskt I-tvärsnitt då bottenplattan antas verka som tvärbalkens övre fläns. Vid beräkning av momentkapacitet kontrolleras vilken tvärsnittsklass tvärsnittet befinner sig i. För I-tvärsnitt görs det med hjälp av ekvationerna i tabell S4.2 för livplåt och tabell S4.3 för yttre flänsar i Bärande konstruktioner del 1 (Al-Emrani, et al., 2013). Vid bestämning av momentkapaciteten för tvärbalkarna kontrolleras endast övre flänsens (bottenplattans) tvärsnittsklass då denna är dimensionerande.

Kontroll av tvärsnittsklass för livplåt:

$$\begin{aligned} \text{Tvärsnittsklass 1: } & \frac{d}{t_w} \leq 72\epsilon \\ \text{Tvärsnittsklass 2: } & \frac{d}{t_w} \leq 83\epsilon \\ \text{Tvärsnittsklass 3: } & \frac{d}{t_w} \leq 124\epsilon \quad \text{där: } \epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \end{aligned}$$

Kontroll av tvärsnittsklass för yttre flänsar:

$$\begin{aligned} \text{Tvärsnittsklass 1: } & \frac{c}{t_f} \leq 9\epsilon \\ \text{Tvärsnittsklass 2: } & \frac{c}{t_f} \leq 10\epsilon \\ \text{Tvärsnittsklass 3: } & \frac{c}{t_f} \leq 14\epsilon \quad \text{där: } \epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \end{aligned}$$

Flytspänningen, f_y , beror på stålqualität och antas vara 355 MPa.

Tvärsnittets högsta tvärsnittsklass bestämmer vilket böjmotstånd som ska användas för beräkning. För tvärsnittsklass 1 och 2 gäller plastiskt böjmotstånd och för tvärsnittsklass 3 gäller elastiskt böjmotstånd. Hur dessa böjmotstånd beräknas skiljer sig för huvudbalkarna och tvärbalkarna, då tvärbalken ej är ett symmetriskt I-tvärsnitt. Efter kontroll i MatLab, visade sig tvärsnitten för huvudbalkarna och tvärbalkarna ligga i tvärsnittsklass 1 och 2, vilket innebar ett plastiskt böjmotstånd. Därför används endast plastiskt böjmotstånd vid beräkning i MatLab.

Plastiskt böjmotstånd för huvudbalkarna (symmetriskt I-tvärsnitt) kan beräknas enligt ekvation 6.1a:

$$W_{pl} = t_f \cdot b_f \cdot (t_f + h_w) + \frac{t_w \cdot h_w^2}{4} \quad (6.1a)$$

Plastiskt böjmostånd för tvärbalkarna (osymmetriskt I-tvärsnitt) kan beräknas enligt ekvation 6.1b, som fås genom att utgå ifrån ekvation S4-25 och S4-29 i Bärande konstruktioner del 1 (Al-Emrani, et al., 2013):

$$W_{pl} = (F_{fu} \cdot z_{fu}) + (F_{fn} \cdot z_{fn}) + (F_{wu} \cdot z_{wu}) + (F_{wn} \cdot z_{wn}) \quad (6.1b)$$

Plastiskt böjmotstånd för bottenplattan (per breddmeter) beräknas enligt ekvation 6.2.

$$W_{pl} = \frac{b \cdot h^2}{4} \quad (6.2)$$

Momentkapaciteten beräknas sedan med hjälp av ekvation 6.3.

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{pl} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.3)$$

$\chi_{LT} = 1$ (Om ingen risk för vippning finns)

$\gamma_{M1} = 1$ (För beräkning av momentkapacitet)

Tvärsnitten för huvudbalkarna samt tvärbalkarna anses vara stagade mot vippning.

Momentkapaciteten jämförs med dimensionerande moment, M_{Ed} . Kontrollen görs med hjälp av följande ekvation (6.4). Om likheten stämmer, är kapaciteten OK:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (6.4)$$

Vid beräkning av dimensionerande last, M_{Ed} , används funktioner i MatLab från tillägget CALFEM (2004). Bland annat användes funktioner för tvådimensionella balkelement samt andra funktioner som löser olika ekvationssystem och sorterar ut värden i en matris.

6.2 Tvärkraftskapacitet

Vid beräkning av tvärkraftskapacitet görs en kontroll om tvärsnittet riskerar skjuvbuckling med hjälp av ekvation 6.5a eller 6.5b. Om likheten stämmer inträffar inte skjuvbuckling. För bestämning av tvärkraftskapaciteten för tvärbalkarna används ekvation 6.5a, då dessa saknar avstyvningar. För huvudbalkarna används ekvation 6.5b, då dessa har vertikala avstyvningar.

För oavstyvad livplåt

$$\frac{h_W}{t_W} < 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad (6.5a)$$

För liv med vertikala avstyvningar

$$\frac{h_W}{t_w} < 31 \frac{\varepsilon}{\eta} \sqrt{\kappa_t} \quad (6.5b)$$

$$\eta = 1,2 \text{ (För stålqualiteer upp till S 460, annars är } \eta=1)$$

$$\kappa_t = \text{Bestäms genom ekvationer på sidan S84}$$

Om tvärsnittet ej riskerar skjubbuckling bestäms tvärkraftskapaciteten enligt ekvation 6.6 samt 6.7,

$$V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} \quad (6.6)$$

där

$$A_v = \eta \cdot h_w \cdot t_w \quad (6.7)$$

Om tvärsnittet riskerar skjubbuckling används ekvation (6.8).

$$V_{bw,Rd} = \chi_w \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad (6.8)$$

χ_w = Skjubbucklingskoefficient, bestäms med hjälp av ekvationerna 6.9-6.11 nedan

För balkar med tvärgående avstyvningar över upplag beräknas bucklingskoefficienten:

$$\kappa_t = 5,34 \quad (6.9a)$$

För balkar med ändavstyvningar och mellanliggande avstyvningar där $a/d < 1$ beräknas bucklingskoefficienten:

$$\kappa_t = 4 + \frac{5,34}{(a/d)^2} \quad (6.9b)$$

För balkar med ändavstyvningar och mellanliggande avstyvningar där $a/d > 1$ beräknas bucklingskoefficienten:

$$\kappa_t = 5,34 + \frac{4}{(a/d)^2} \quad (6.9c)$$

För styva ändavstyvningar:

$$\lambda_w < \frac{0,8}{\eta} \rightarrow \chi_w = \eta \quad (6.10a)$$

$$\frac{0,8}{\eta} \leq \lambda_w \leq 1,08 \rightarrow \chi_w = \frac{0,83}{\lambda_w} \quad (6.10b)$$

$$\lambda_w \geq 1,08 \rightarrow \chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \lambda_w} \quad (6.10c)$$

För veka ändavstyvningar:

$$\lambda_w < \frac{0,8}{\eta} \rightarrow \chi_w = \eta \quad (6.10d)$$

$$\frac{0,8}{\eta} \leq \lambda_w \leq 1,08 \rightarrow \chi_w = \frac{0,83}{\lambda_w} \quad (6.10e)$$

$$\lambda_w \geq 1,08 \rightarrow \chi_w = \frac{0,83}{\lambda_w} \quad (6.10f)$$

Där:

$$\lambda_w = \frac{h_w/t_w}{\sqrt{\kappa_t} 37,4 \varepsilon} \quad (6.11)$$

Tvärkraftskapaciteten beräknas och jämförs med dimensionerande tvärkraft, V_{Ed} . Kontrollen görs med hjälp ekvation 6.12. Om likheten stämmer, är kapaciteten OK:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (6.12)$$

Vid beräkning av dimensionerande last, V_{Ed} , används MatLab samt funktioner från tillägget CALFEM (2004). Bland annat används funktioner för tvådimensionella balkelement samt andra funktioner som löser olika ekvationssystem och sorterar ut värden i en matris.

6.3 Interaktion mellan moment och tvärkraft

Även om tvärkraftskapaciteten och momentkapaciteten är god kan interaktion mellan moment och tvärkraft behöva göras. Detta görs med hjälp av ett antal villkor. Interaktion är ej nödvändig att kontrollera om:

- $M_{Ed} < M_{f,Rd}$ där $M_{f,Rd}$ är flänsarnas bidrag till tvärsnittets momentkapacitet. En förutsättning är också att $V_{Ed} < V_{bw,Rd}$.

Eller:

- $V_{ed} < 0,5 \cdot V_{bw,Rd}$

Om kraven inte uppfylls, måste interaktion kontrolleras vilket görs med hjälp av följande ekvationer (6.13 och 6.14):

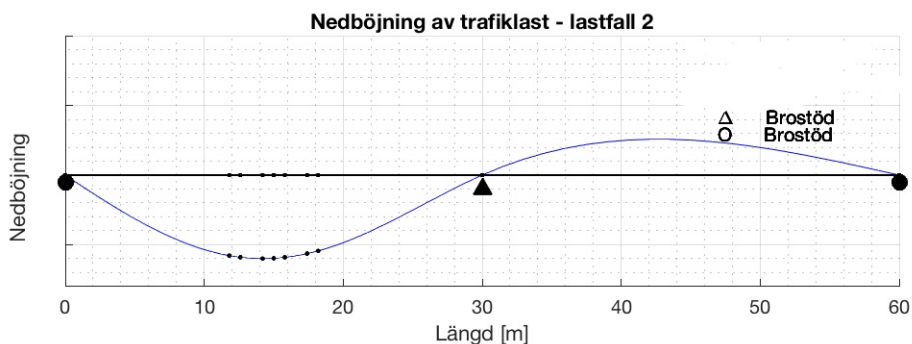
$$M_{Ed} \leq M_{f,Rd} + (M_{pl,Rd} - M_{f,Rd}) \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} - 1 \right)^2 \right] \quad (6.13)$$

För kontroll används följande villkor:

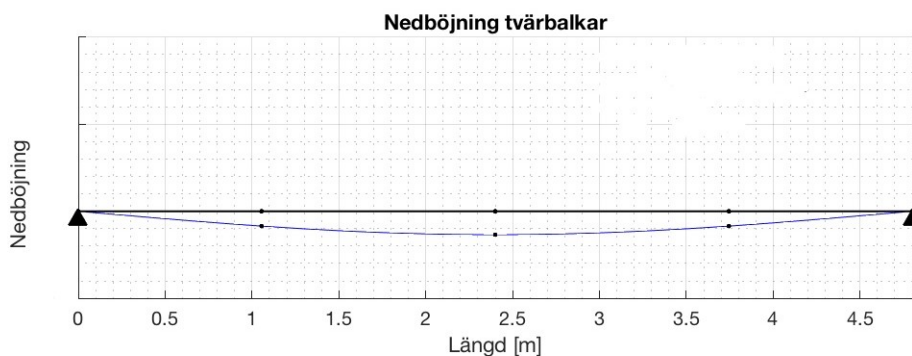
$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (6.14)$$

7 Nedböjning

Vid beräkning av nedböjning samt kontroll av kraven för nedböjning används CALFEM-funktioner för tvådimensionella balkelement. Illustrationer på nedböjningar har med hjälp av CALFEM-funktioner ritats upp i MatLab R2019b. Då brons nedböjning från egenvikten justeras vid installation används enbart trafiklasten vid dimensionerande nedböjning. Se figur 40 och 41 för en illustration över nedböjningen för huvudbalkarna samt tvärbalkarna.



Figur 40: Huvudbalkens nedböjning på grund av trafiklast i lastfall 2



Figur 41: Tvärbalkens nedböjning på grund av trafiklast

8 Kontroll svetsar

Eftersom bron är konstruerad i stål finns ett antal svetsar att kontrollera. Kapaciteten för huvudbalkarnas och tvärbalkarnas halssvets mellan liv och fläns, samt tvärbalkens och stålplattans infästning mot huvudbalkarna måste beräknas och kontrolleras. Ekvationerna nedan är hämtade ur Bärande konstruktioner del 2 (Al-Emrani, Engström, Johansson, Johansson, 2011).

8.1 Halssvetsar för huvudbalk

Svetsarna utsätts för både vinkelrät och parallell skjuvspänning samt vinkelrät normalspänning. För att bestämma spänningarnas storlek samt kontrollera svetsarnas bärförmåga används procedur 1 i 8.6.1. Även nyttig svetslängd bestäms, vilket görs i proceduren. Nominella svetslängden är längden på lagren. Kraften som sätts in i ekvation 8.1 och 8.2, enligt procedur 1, är maximala tvärkraften som uppkommer över varje stöd. Proceduren görs för både ytterupplag och mittupplag, då upplagen har olika storlek och olika stora tvärkrafter att dimensionera för.

8.2 Halssvetsar för tvärbalkar

Spänningar som uppkommer i tvärbalkens övre halssvetsar är vertikala spänningar samt parallella spänningar. De vertikala spänningarna är störst i mitten av tvärbalkarna där tåglasten verkar. Däremot är de parallella spänningarna störst längst ut på kanterna av tvärbalkarna där tvärkraften är som störst. För att inte behöva undersöka spänningen som uppkommer i övre halssvetsarna på flera ställen, kan slutsatsen dras att de vertikala spänningarna, som uppkommer i mitten av tvärbalken, är mycket små då lasten verkar på längden 2,7 meter. Därmed undersöks endast de övre halssvetsarna på tvärbalkarna precis intill där de fäster mot huvudbalken.

För att bestämma spänningarnas storlek samt kontrollera svetsarnas bärförmåga används procedur 1 nedan. Nominella svetslängden som används för ballasten sätts till 1 meter. Kraften, P samt V , som används i ekvation 8.1 samt 8.2 är lika med maximala tvärkraften.

Nedre halssvetsar kontrolleras inte då de utsätts för lika stora parallella spänningar som de övre halssvetsarna, men inte några vertikala spänningar. Därmed sätts svetsarnas a -mått lika med de övre halssvetsarnas.

8.3 Svets mellan bottenplatta och huvudbalkens liv

Svetsarna utsätts endast för vertikala spänningar. För att bestämma spänningarnas storlek samt kontrollera svetsarnas bärförmåga används procedur 2 i 8.6.2. Även nyttig svetslängd bestäms, vilket görs i proceduren. Nominella svetslängden är avståndet mellan varje tvärbalk (0,5 meter). Kraften som används i ekvation 8.5 uppkommer av momentet och beräknas genom att dela momentet med tvärbalkens totala höjd. Dimensioneringen av svetsen görs för det villkor som ger störst moment (fast

inspänd med förskjutning). Slutligen kan a-måttet bestämmas, enligt procedur 2.

8.4 Svets mellan tvärbalkens undre fläns och huvudbalkens liv

Svetsarna utsätts för samma spänningar som svetsarna mellan bottenplattan och huvudbalkens liv, således endast vertikala spänningar. Även här används ekvationer enligt procedur 2. Nominella svetslängden är bredden på undre tvärbalkens fläns. Även vid kontroll av kälsvetsen mellan tvärbalkarnas liv och nedre fläns används nedanstående ekvationer. Kraften som används i ekvation 8.5 uppkommer av momentet och beräknas genom att dela momentet med tvärbalkens livhöjd. Dimensioneringen av svetsen görs för villkoret som ger störst moment (fast inspänd med förskjutning). Slutligen kan a-måttet bestämmas, enligt procedur 2.

8.5 Svets mellan huvudbalkens och tvärbalkens liv

Det antas att livet endast bär tvärkraft och därmed utsätts svetsarna endast för parallella skjuvspänningar. Här används ekvationer enligt procedur 3 i 8.6.3. Kraften som används är den maximala tvärkraft som verkar i tvärbalkens ändrar, vilket fås för villkor 4 (fast inspänd med förskjutning av spåret). Slutligen kan a-måttet bestämmas, enligt procedur 3.

8.6 Tillhörande beräkningsprocedurer

Svetsarna nämnda ovan beräknas enligt tre olika procedurer beroende på vilka spänningar de utsätts för. Dessa beskrivs mer nedan.

8.6.1 Procedur 1

$$L_j \leq 150a \rightarrow L = L_j$$

$$L_j > 150a \rightarrow L = \beta_{L,w1} \cdot L_j \text{ där } \beta_{L,w1} = 1,2 - \frac{0,2 \cdot L_j}{150a}$$

Parametern L i ekvationen för beräkning av vinkelrät normalspänning och skjuvspänning benämns nyttig svetslängd och beräknas i enlighet med uttrycken ovan. Vid beräkning av vinkelräta normal- och skjuvspänningar används ekvation 8.1, där även hänsyn tagits till att dessa halssvetsar är svetsade på varsin sida om livet. Parallella skjuvspänningarna beräknas enligt ekvation 8.2.

$$\alpha_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{P}{\sqrt{2} \cdot L \cdot a \cdot 2} \quad (8.1)$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V \cdot S}{I \cdot 2a} \quad (8.2)$$

Kapacitetskontroll för svetsen görs sedan med hjälp av ekvation 8.3 samt 8.4.

$$\sqrt{\alpha_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (8.3)$$

$$\alpha_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad (8.4)$$

8.6.2 Procedur 2

$$L_j \leq 150a \rightarrow L = L_j$$

$$L_j > 150a \rightarrow L = \beta_{L,w1} \cdot L_j \text{ där } \beta_{L,w1} = 1,2 - \frac{0,2 \cdot L_j}{150a}$$

Parametern L i ekvationen för beräkning av vinkelrät normalspänning benämns nyttig svetslängd och beräknas beräknas i enlighet med uttrycken ovan. Vinkelräta normal- och skjuvspänningar beräknas med ekvation 8.5.

$$\alpha_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{P}{\sqrt{2} \cdot L \cdot a} \quad (8.5)$$

Kapacitetskontroll för svetsen görs sedan med hjälp av ekvation 8.6 samt 8.7.

$$\sqrt{\alpha_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (8.6)$$

$$\alpha_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad (8.7)$$

8.6.3 Procedur 3

$$L_j \leq 150a \rightarrow L = L_j$$

$$L_j > 150a \rightarrow L = \beta_{L,w1} \cdot L_j \text{ där } \beta_{L,w1} = 1,2 - \frac{0,2 \cdot L_j}{150a}$$

Parametern L i ekvationen för beräkning av vinkelrät normalspänning benämns nyttig svetslängd och beräknas beräknas i enlighet med uttrycken ovan. Här uppkommer endast parallella skjuvspänningar enligt ekvation 8.8. Kontroll för bärförmåga behöver kontrolleras med ekvation 8.9.

$$\tau_{\parallel} = \frac{P}{L \cdot a} \quad (8.8)$$

$$\sqrt{\alpha_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (8.9)$$

9 Horisontella laster

Medan överbyggnaden i huvudsak dimensioneras för vertikala laster antas de horisontella lasterna vara avgörande för underbyggnaden. För beräkningsbarhetens skull görs förenklingen att det endast är de horisontella lasterna som är dimensionerande vid val av lager. Lastkombinering utförs för horisontella laster i riktning parallellt respektive vinkelrätt brons längdriktning.

9.1 Temperaturlast

Temperaturlasten bör inte belasta något av lagren då övergångskonstruktionerna i brons ändrar är tänkta att anpassas efter temperaturutvidgningen. Därav kontrolleras överbyggnadens längdutvidgning för att se om rörelselängden är acceptabel för tänkt övergångskonstruktion. Beräkning av temperaturutvidgning utförs enligt SS-EN 1991-1-5 Kapitel 6. Nationella bilagan ger maximala och minimala lufttemperaturer för Göteborgs kommun och figur 6.1 används för att omvandla lufttemperaturerna till jämnt fördelade temperaturkomponenter, nedan $T_{e,max}$ och $T_{e,min}$. Temperaturutvidgningen beräknas enligt ekvation 9.1.

$$\Delta L = \alpha_T \cdot \Delta T_N \cdot L_{tot} \quad (9.1)$$

där

$$\Delta T_N = T_{e,max} - T_{e,min} \quad (9.2)$$

9.2 Accelerations- och bromskraft

Beräkningar för accelerations- och bromskraft utförs enligt SS-EN 1991-2. Från standarden fås karakteristiska värden, värden på nationella faktorn, α , samt partialkoefficienter.

Enligt ekvation (6.20-6.21) i SS-EN 1991-2 gäller karakteristiska värden samt begränsningar för accelerations- och bromskrafter i ekvation 9.3 och 9.4.

$$Q_{lak} = 33[kN/m]L_{a,b}[m] \leq 1000[kN] \quad (9.3)$$

$$Q_{lbk} = 20[kN/m]L_{a,b}[m] \leq 6000[kN] \quad (9.4)$$

Influenslängden, $L_{a,b}$, antas vara hela brons längd. Detta fall motsvarar att tåget är utbredd över hela bron, vilket kommer ge upphov till den största kraften. För lastmodell LM 71 multipliceras sedan de karakteristiska värdena med den nationella anpassningsfaktorn vilket redovisas i ekvation 9.5 och 9.6.

$$Q_{lad} = \alpha \cdot Q_{lak} \quad (9.5)$$

$$Q_{lbd} = \alpha \cdot Q_{lbk} \quad (9.6)$$

9.3 Vindlast

Vindlasten beräknas i x-riktning och y-riktning enligt SS-EN 1991-1-4 avsnitt (8.3.2) och (8.3.4), där x-riktning motsvarar riktning vinkelrätt bronns längdriktning och y-riktning motsvarar riktning parallellt bronns längdriktning.

Vindlasten i x-riktning ges av ekvation (8.2) i SS-EN 1991-1-4 och beräknas som

$$F_{w,x} = 1/2 \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x} \quad (9.7)$$

där ρ är luftens densitet, v_b är referensvindhastigheten, C är formfaktorn för kraft och $A_{ref,x}$ är referensarean. Referensvindhastigheten för Göteborgsområdet fås från Boverkets konstruktionsregler EKS 10.

Vindlasten i y-riktning beräknas som 25 % av vindlasten i x-riktningen.

$$F_{w,y} = F_{w,x} \cdot 0.25 \quad (9.8)$$

9.4 Sidokraft

Sidokraften är en koncentrerad last som beräknas enligt SS-EN 1991-2 avsnitt (6.5.2). Karakteristiskt värde på sidokraften är $Q_{sk} = 100[kN]$. Det karakteristiska värdet multipliceras med den nationella faktorn, α .

$$Q_{sd} = \alpha \cdot Q_{sk} \quad (9.9)$$

10 Dimensionering av lager

Lagren antas ta upp de vertikala och horisontella laster som kommer att belasta bronns överbyggnad och dimensioneras därefter. Kapaciteten för respektive lager definieras av maximal horisontell kraft samt maximal och minimal vertikal kraft. I kapitel (3.4.4) bestäms placeringen av allsidigt rörliga (typ A), ensidigt rörliga (E) respektive fasta lager (F). Lagrens kapacitet beror av lagertyp och väljs utifrån TOBE FR4 potlager (Spännteknik, 2011) baserat på de dimensionerande laster som beräknas. För att hitta dimensionerande horisontella och vertikala laster erfordras kombinerad enligt SS-EN 1990.

10.1 Kombinerad av horisontella krafter parallellt bronns längdriktning

Vid kombinerad av laster parallellt bronns längdriktning beaktas bromskraft och vindlast. Vid beräkning av accelerations- och bromskraft blir bromslasten den dimensionerande trafiklasten i horisontalled. Med tanke på att det endast är ett spår på respektive bro kommer inte heller bromskraft och accelerationskraft att verka samtidigt, vilket annars kunde varit ett dimensionerande fall.

Både bromslasten och vindlasten är utbredda laster som verkar längs hela bron. De lager som placeras över mittstöden är fasta i bronns längdriktning och kommer därmed att ta upp alla krafter som verkar i denna riktning. Lasten från bromskraften och vindlasten fördelas alltså på två lager. I lastkombinerad beräknas bromslasten som huvudlast och vindlasten som samhörande variabel last. Värderna på lasteffekterna multipliceras med lastreduktionsfaktorn därefter. Den resulterande kraften som kommer att verka på mittstödens lager blir då enligt ekvation 10.1.

$$H_y = \gamma_{Q,1} \cdot \frac{Q_{lbd}}{2} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{0,2} \cdot \frac{F_{w,y}}{2} \quad (10.1)$$

10.2 Kombinerad av horisontella krafter vinkelrätt bronns längdriktning

De krafter som kombineras vid beräkning av horisontell last i riktning vinkelrätt bronns längdriktning är vindlast och sidokraft. Här blir vindlasten dimensionerande och sidokraften beaktas då som en samhörande variabel last. Vindlasten fördelas i denna riktning på tre lager. Eftersom sidokraften är en koncentrerad last bedöms det minst gynnsamma lastfallet vara då kraften verkar rakt på ett lager. Den resulterande kraften som kommer att verka på ändstödens lager blir då enligt ekvation 10.2.

$$H_x = \gamma_{Q,1} \cdot \frac{F_{w,x}}{3} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{0,2} \cdot Q_{sd} \quad (10.2)$$

10.3 Maximala och minimala vertikala laster

De vertikala dimensionerande lasterna beräknas genom att kontrollera reaktionskrafter i samtliga stöd. Maximal vertikal last beräknas då trafiklast antas verka utbrett över hela bron i kombination med egentyngd. Lagren dimensioneras efter värden i brottgränstillstånd och därmed används ekvation 4.1 och 4.2 för lastkombering. Den maximala tvärkraften erhålls i mittstödet vid lastfall 1. Vid bestämning av minimal vertikal reaktionskraft beaktas endast lasteffekten till följd av egentyngd. Den minimala vertikala kraften erhålls då i ändstöden. Erhållna värden presenteras i tabell 5. För redovisning av genomförda beräkningar se bilaga E.

Tabell 5: *Dimensionerande värden på stödkrafter*

Lastriktning	Stödkraft mittstöd [kN]	Stödkraft ändstöd [kN]
H_{max}	1 218.1	416.4
V_{max}	5 468.2	1 743.0
V_{min}	600.1	2 000.3

Referenser bilaga C

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., Johansson, P. (2011). *Bärande konstruktioner Del 2*. Göteborg: Institution för Bygg- och miljöteknik, avdelningen för konstruktionsteknik.

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., Johansson, P. (2013). *Bärande konstruktioner Del 1*. Göteborg: Institution för Bygg- och miljöteknik, avdelningen för konstruktionsteknik.

Spännteknik. (2011). *TOBE FR4 potlager* [Produktblad]. Hämtad från <http://new.spennteknik.no/wp-content/uploads/2018/05/TobeFR4-svensk-14042011.pdf>

Swedish standards institute. (2002). SS-EN 1990. Eurokod - Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://www.sis.se>

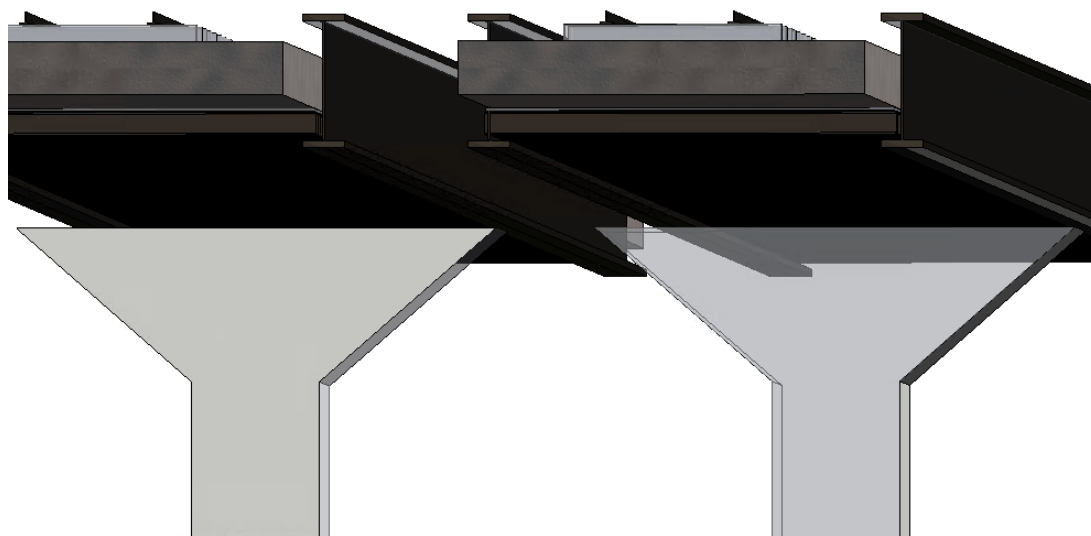
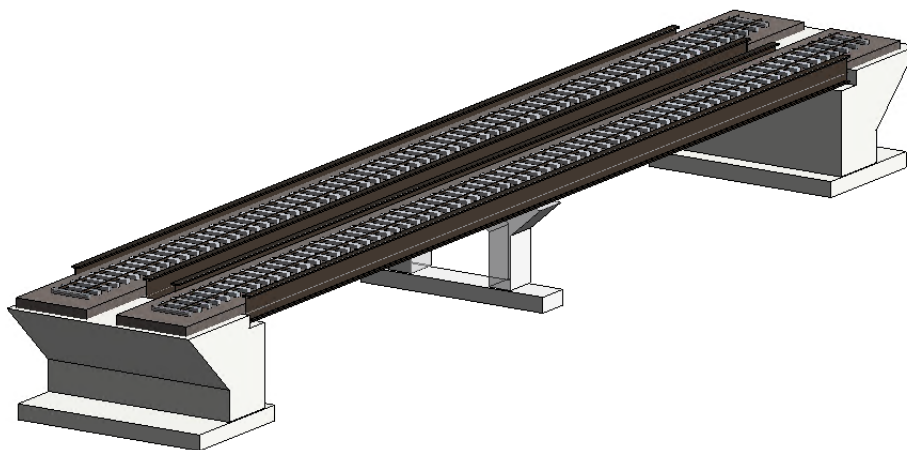
Swedish standards institute. (2003). SS-EN 1991-1-5. Eurokod 1: Laster på bärande konstruktioner - Del 1-5: Allmänna laster - Temperaturpåverkan. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://www.sis.se>

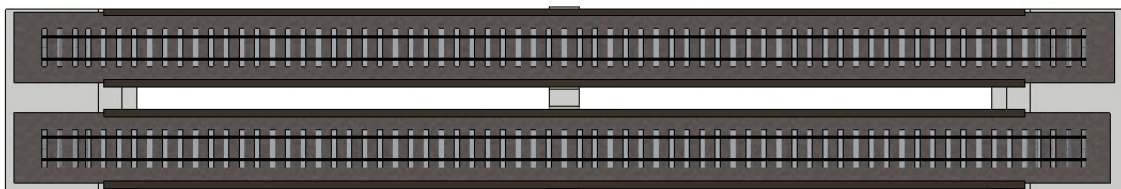
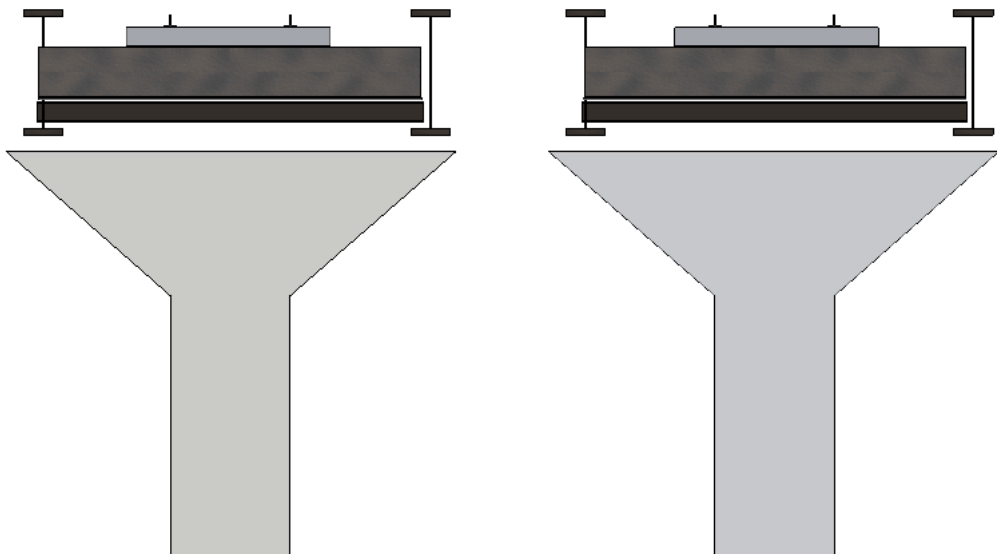
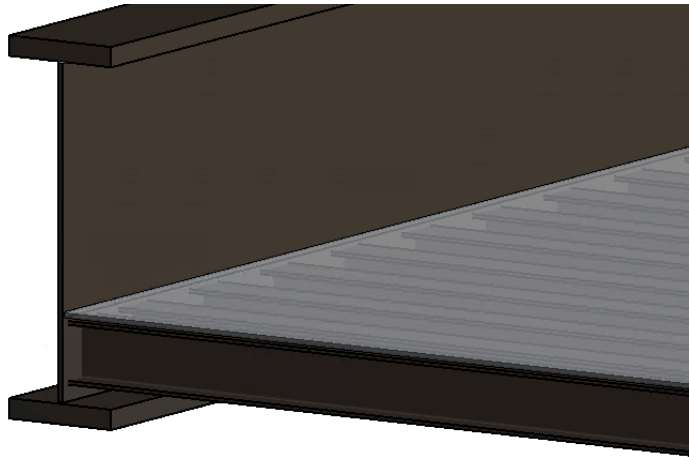
Swedish standards institute. (2003). SS-EN 1991-2. Eurokod 1: Laster på bärverk – Del 2: Trafiklast på broar. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://www.sis.se>

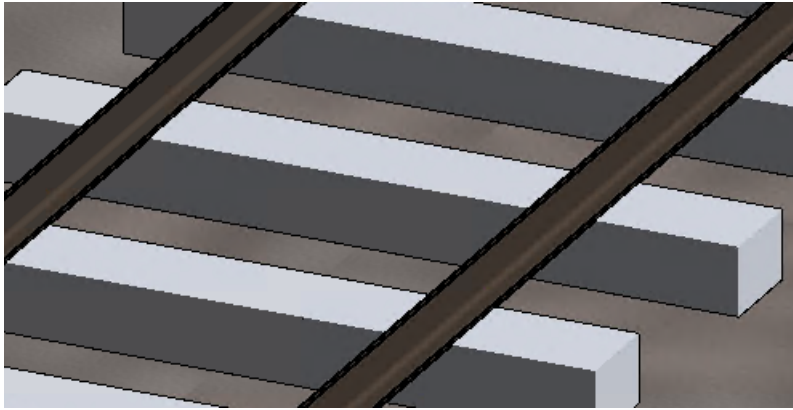
Swedish standards institute. (2005). SS-EN 1991-1-4. Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 1-4: Allmänna laster - Vindlast. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://www.sis.se>

Bilaga D - Modellering i Revit

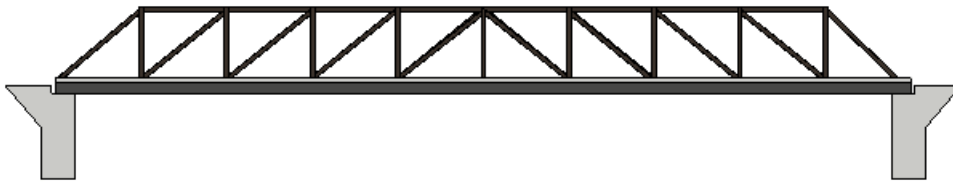
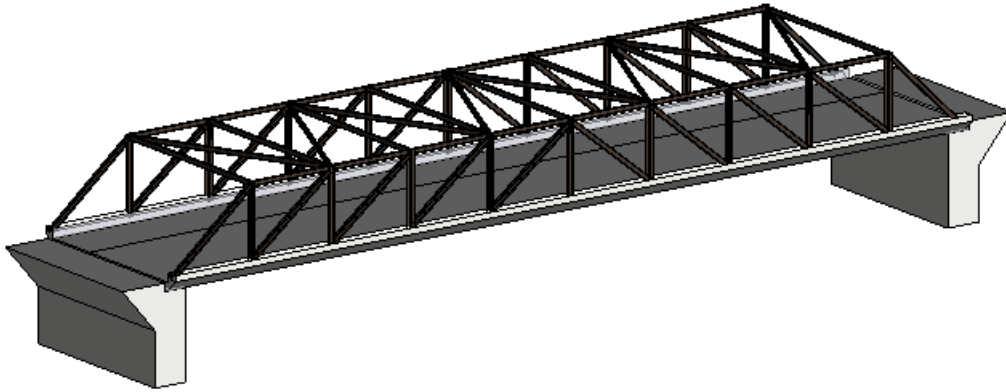
Brokoncept 1 - Trågbalkbro i stål med mittstöd



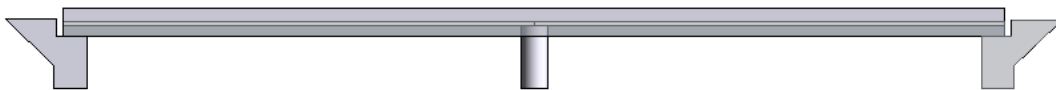
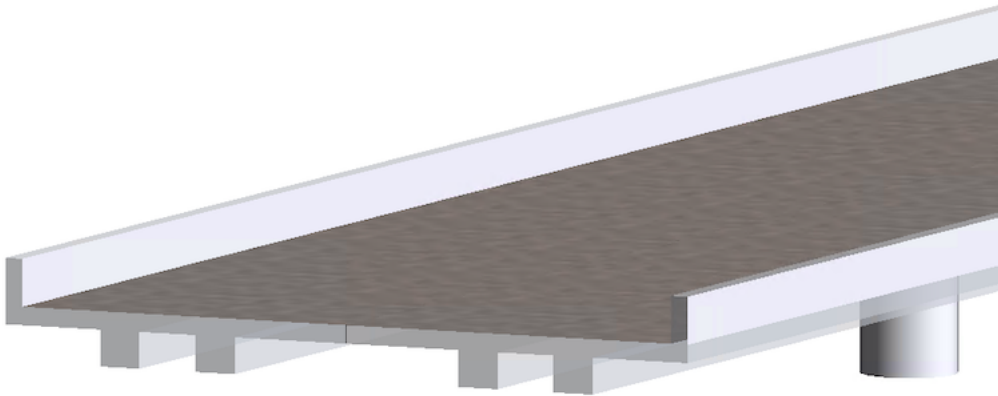




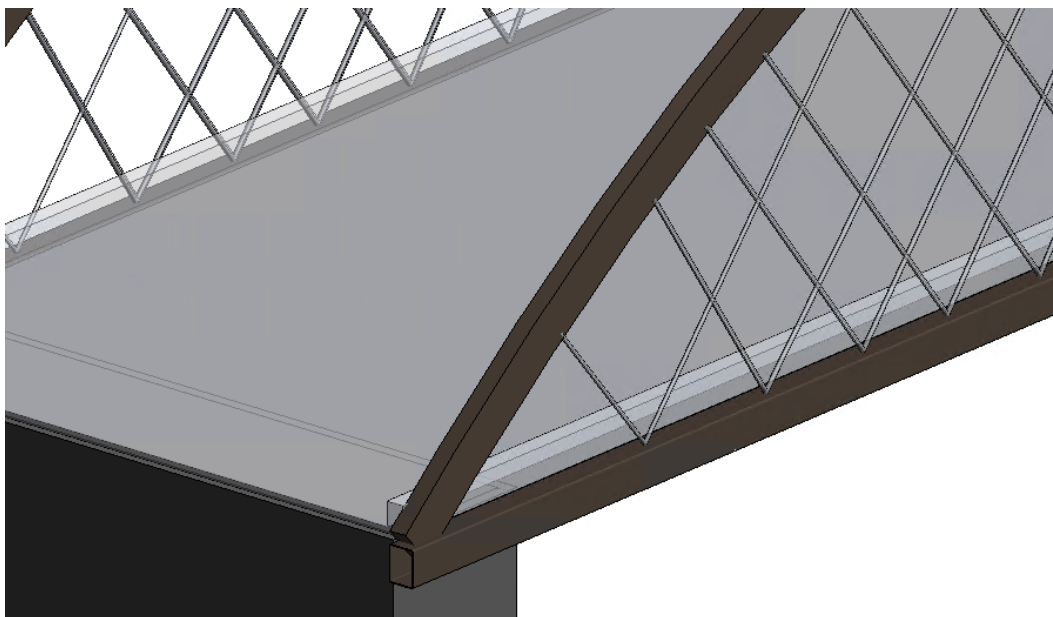
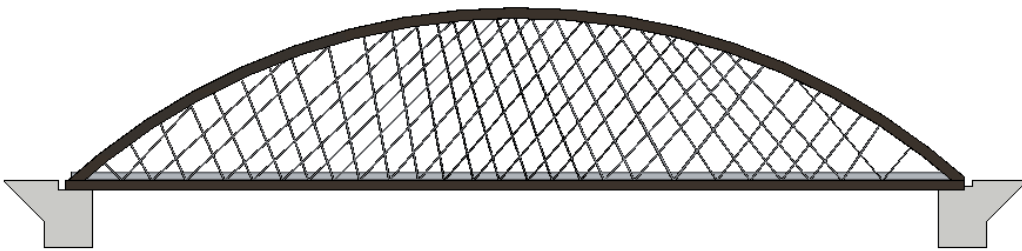
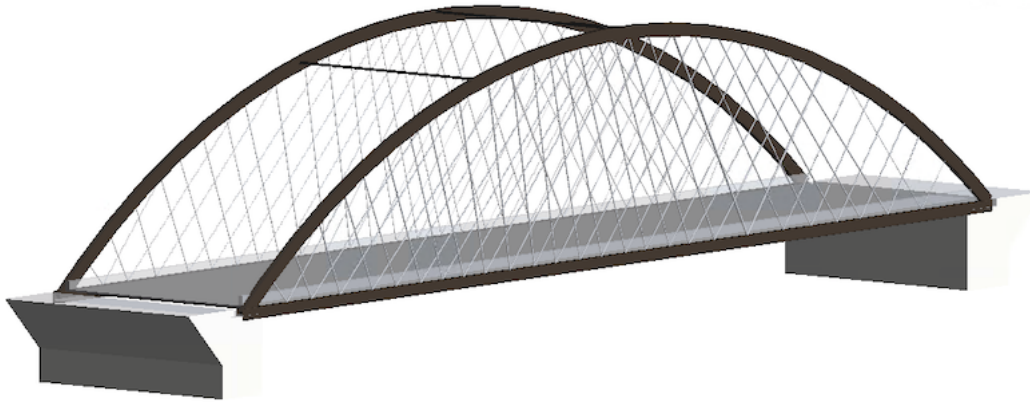
Brokoncept 2 - Fackversbro i stål



Brokoncept 3 - Balkbro i förspänd betong med mittstöd



Brokoncept 4 - Bågbro med överliggande båge och dragband
i stål



Bilaga E - Beräkningar i Matlab

Contents

- Dimensioner för bron
- Laster som verkar längs med huvudbalken
- Lasteffekt - Längdled
- Kontroll av kapacitet: Huvudbalkar
- Kontroll av mittnedböjning: Huvudbalkar
- Kontroll av svetsar: Halssvetsar huvudbalkar
- Laster som verkar på bron längs med en tvärbalk
- Lasteffekt - Tvärled
- Kontroll av kapacitet: Tvärbalkar
- Kontroll Mittnedböjning: Tvärbalkar
- Kontroll av svetsar: Tvärbalkar + bottenplatta (plåt)
- Laster som verkar på bottenplattan
- Lasteffekt för bottenplattan i längdled
- Kontroll av kapacitet och nedböjning - Bottenplatta (plåt)

Dimensioner för bron

```
% -----  
% Kandidatarbete ACEX10-20-52 Emelie Falkenberg, Vilma Johansson,  
% Carl-Johan Käll, Rebecka P. Franzen, Paulina Sundelius, Emy Wahlqvist  
% -----  
clc  
% clear close all  
  
% Tvärsnittsmått och tvärsnittsegenskaper  
% -----  
  
% Tvärsnittsmått huvudbalkar [m]  
h=1.5;           % Total tvärsnittshöjd (inklusive liv och flänsar)  
tf=0.08;        % Flänshöjd  
bf=0.5;         % Flänsbredd  
hw=h-2*tf;     % Livhöjd  
tw=0.021;      % Livtjocklek  
r=1.435;       % Spårvidd  
c=4.8;         % cc-avstånd mellan huvudbalkar  
L=30;          % Spännvidd ett spann  
a_matt=15e-3;  % a-mått för halssvetsar  
  
% Tvärsnittsegenskaper huvudbalkar  
E=210*10^9;    % Stålets elasticitetsmodul [Pa]  
fy=355e6;      % Stålets flytgräns [Pa]  
I=tw*hw^3/12+2*(bf*tf^3/12+(bf*tf)*(hw/2+tf/2)^2); % Tvärsnittets  
                                                    % tröghetsmoment [m4]  
fu=510e6;     % Svetsarnas stålqualität minst lika stark som stålets
```

```

% Tvärsnittsmått tvärbalkar [m]
h_t=0.25;      % Total tvärsnittshöjd (inklusive liv och fläns)
tf_t=0.015;   % Flänstjocklek
bf_t=0.20;    % Flänsbredd
hw_t=h_t-tf_t; % Livhöjd
tw_t=0.008;   % Livtjocklek
cc=0.5;       % cc-avstånd mellan tvärbalkar
bf_bp=cc;     % Effektiva bredden är samma som avståndet mellan
              % tvärbalkarna, då avståndet är så litet
bp=0.02;     % Tjocklek bottenplatta
a_matt_t=0.003; % a-mått för tvärbalkens halssvetsar

% Tvärsnittsegenskaper tvärbalkar
antal_tvarbalkar=(2*L)/cc;      % Totalt antal tvärbalkar
A_t=(tw_t*hw_t+bf_t*tf_t+bf_bp*bp); % Area [m2]
% Avstånd till TP från underkant
x_tp=((tw_t*hw_t*(hw_t/2+tf_t)+(bf_t*tf_t*(tf_t/2))+bf_bp*bp*...
      (tf_t+hw_t+bp/2)))/(tw_t*hw_t+bf_t*tf_t+bf_bp*bp);
% Tvärsnittets tröghetsmoment [m4]
I_t=((tw_t*hw_t^3/12)+(tw_t*hw_t)*(x_tp-(hw_t/2+tf_t))^2)+...
     ((bf_t*tf_t^3/12)+(bf_t*tf_t)*(x_tp-tf_t/2)^2)+((bf_bp*bp^3/12)+...
     (bf_bp*bp)*(x_tp-tf_t-hw_t-bp/2)^2);

% Tvärsnittsegenskaper plåt
I_plat=(1*bp^3)/12; % Plåtens yttröghetsmoment för en breddmeter [m4]
A_plat=1*bp;      % Area plåt [m2]

% Mått ballast
h_b=0.6;          % Ballastdjup [m]

% -----

Laster som verkar längs med huvudbalken

% Densitet för material [N/m^3]
stal=78.5e3;      % Tyngd för stål 77-78.5 kN/m^3
ballast=20e3;    % Tyngd för ballast
detalj=0.5e3;    % Tyngd för detaljer såsom broräcke & räl [N/m]

% Permanenta laster i huvudbalkens riktning (egentyngd)
%Längsgående balkar
A_stal_langsg=2*(2*tf*bf+hw*tw); % Tvärsnittsarea för de två huvudbalkarna
                                % [m2]
G_stal_langsg=A_stal_langsg*stal; % Egentyngd för huvudbalkarna [N/m]

% Tvärgående balkar

```

```

A_stal_tvar=(tf_t*bf_t)+(hw_t*tw_t); % Tvärsnittsarea för en tvärgående
% balk [m2]
V_tot_tvar=A_stal_tvar*c*antal_tvarbalkar; % Total volym av alla brons
% tvärbalkar [m3]
G_stal_tvar=(V_tot_tvar*stal)/(2*L); % Egentyngd för tvärgående balkarna
% [N/m]

% Bottenplatta
A_stal_bp=bp*c; % Tvärsnittsarea bottenplatta [m2]
V_stal_bp=A_stal_bp*2*L; % Total volym för bottenplatta [m3]
G_stal_bp=(V_stal_bp*stal)/(2*L); % Egentyngd bottenplatta [N/m]

% Sammanslagning av egentyngd för allt stål i bron [N/m]
G_stal=G_stal_tvar+G_stal_langs+G_stal_bp; % Total egentyngd i längsled för
% tvärgående- och längsgående balkar samt plåt

% Ballast
A_ballast=h_b*c; % Tvärsnittsarea ballast [m2]
G_ballast=ballast*A_ballast; % Total egentyngd för ballast [N/m]

% Spår, räcke och evakueringsgång [N/m]
G_detalj=3*detalj; % Egentyngd detaljer - ett spår, ett räcke
% och evakueringsgång

% Total egentyngd för varsinn sida av mitten av bron [N/m]
G_kjsup=((G_stal+G_ballast)/2)+G_detalj;

% Variabla laster i huvudbalkens riktning (Trafiklast)

% Här används lastmodell 71. För att ta hänsyn till dynamiska effekter
% multipliceras de variabla lasterna med en dynamikfaktor. För att
% bestämma dynamikfaktor måste en bestämmande längd bestämmas. För att
% göra om de karakteristiska lasterna till dimensionerade laster
% multipliceras de variabla lasterna även med en korrektionsfaktor. För
% att ta hänsyn till att spåret kan vara mer förskjtet åt ena huvudbalken
% används även en excentricitet i beräkningarna.

L_phi=2*L+3; % Bestämmande längd enligt tabell 6.2 EN91
phi=(2.16/(sqrt(L_phi)-0.2))+0.73; % Dynamikfaktor - normalt underhåll enl.
% ekv 6.5, EN91
alpha=1.33; % Korrektionsfaktor järnväg
e=r/18; % Excentricitet som spåret kan förskjutas med

% Variabel Punktlast från lok
Q_vk=(250e3*(1/2+e/c))*phi; % Karakteristisk punktlast från lok med hänsyn

```

```

% till excentricitet och dynamiska effekter [N]
Q_vd=Q_vk*alpha; % Dimensionerande punktlast från lok

% Variabel utbredd last från tåg
q_vk=(80e3*(1/2+e/c))*phi; % [N/m] Karakteristisk utbredd last från tåg
% med hänsyn till excentricitet och dynamiska effekter
q_vd=q_vk*alpha; % Dimensionerande utbredd last från tåg

% För att plotta moment- och tvärkrftsdiagram används 4 olika
% lastkombinationer. Dessa olika lastkombinationer beskrivs tydligare i
% rapporten. Dessa är: Lastkombination 1 - brottgränstillstånd 6.10a &
% 6.10b Lastkombination 2 - karakteristisk 6.14b Lastkombination 3 -
% frekvent 6.15b Lastkombination 4 - kvasi-permanent 6.16b

%I ekvationerna för de olika lastkombinationerna ingår följande
%tabellvärden:

% Lastreduktionstal enligt LM 71:
psi_0=0.8;
psi_1=0.8;
psi_2=0;

% PARTIALKOEFFICIENTER
gamma_d=1.0; % partialkoefficient för säkerhetsklass 3
gamma_G=1.35; % partialkoefficient för permanent last
gamma_Q=1.5; % partialkoefficient för variabel last
gamma_P=1.3; % partialkoefficient för spännkraft (används ej)
gamma_Gjsup=1.35; % partialkoefficient permanentlast ??

% Reduktionsfaktor
Xi=0.89; % reduktionsfaktor enligt dok broaster, 0.85 enligt
% SS-EN90 s.48

```

Lasteffekt - Längdled

```

Na=30; % Antalet frihetsgrader
Ne=9; % Antalet element
n=100; % Antal undersökta punkter
N_lastkombinationer=4; % Antal lastkombinationer

maximaltM=zeros(4,4); % Fördefinierar storleken på matrisen maximaltM
maximaltV=zeros(4,4); % Fördefinierar storleken på matrisen maximaltV
Deformation=zeros(Na,Ne); % Fördefinierar storleken på matrisen Deformation
Stodkrafter=zeros(3,3); % Fördefinierar storleken på matrisen Stodkrafter

for l=1:4

```

```

% Lastfall 1: Punktlaster mitt i fält med jämnt utbredd tåglast i bägge
% facken Lastfall 2: Punktlaster mitt i fält med jämnt utbredd tåglast
% i endast det facket där punktlasterna är Lastfall 3: Punktlaster
% precis till vänster om mittstöd Lastfall 4: Punktlaster mitt i fält
% med jämnt utbredd tåglast i endast det facket där punktlasterna är,
% ingen egentyngd

if l==1 % Lastfall 1
ex=[0 L/2-0.8-0.8-1.6; L/2-0.8-0.8-1.6 L/2-0.8-1.6; L/2-0.8-1.6 L/2-0.8;
L/2-0.8 L/2; L/2 L/2+0.8; L/2+0.8 L/2+0.8+1.6;
L/2+0.8+1.6 L/2+0.8+1.6+0.8;
L/2+0.8+1.6+0.8 L; L 2*L]; % X-koordinaterna för de nio elementen

bc=[2 0; 25 0; 26 0; 29 0]; % Upplagsvillkor

elseif l==2 % Lastfall 2
ex=[0 L/2-0.8-0.8-1.6; L/2-0.8-0.8-1.6 L/2-0.8-1.6; L/2-0.8-1.6 L/2-0.8;
L/2-0.8 L/2;L/2 L/2+0.8; L/2+0.8 L/2+0.8+1.6;
L/2+0.8+1.6 L/2+0.8+1.6+0.8;
L/2+0.8+1.6+0.8 L; L 2*L]; % X-koordinaterna för de nio elementen

bc=[2 0; 25 0; 26 0; 29 0]; % Upplagsvillkor

elseif l==3 % Lastfall 3
ex=[0 L/2;L/2 (L-1.6-1.6-1.6-0.8-0.01);
(L-1.6-1.6-1.6-0.8-0.01) (L-1.6-1.6-1.6-0.01);
(L-1.6-1.6-1.6-0.01) (L-1.6-1.6-0.01);
(L-1.6-1.6-0.01) (L-1.6-0.01);(L-1.6-0.01) (L-0.01);(L-0.01) L;
L 1.5*L;1.5*L 2*L]; % X-koordinaterna för de nio elementen

bc=[2 0;19 0;20 0;29 0]; % Upplagsvillkor

elseif l==4 % Lastfall 4
ex=[0 L/2-0.8-0.8-1.6;
L/2-0.8-0.8-1.6 L/2-0.8-1.6; L/2-0.8-1.6 L/2-0.8; L/2-0.8 L/2;
L/2 L/2+0.8; L/2+0.8 L/2+0.8+1.6; L/2+0.8+1.6 L/2+0.8+1.6+0.8;
L/2+0.8+1.6+0.8 L; L 2*L]; % X-koordinaterna för de nio elementen

bc=[2 0; 25 0; 26 0; 29 0]; % Upplagsvillkor
end

maxM=zeros(N_lastkombinationer,Ne); % Fördefinierar storleken på matrisen
% maxM
maxV=zeros(N_lastkombinationer,Ne); % Fördefinierar storleken på matrisen
% maxV

```

```

for j=1:4 % For-sats som tar fram lasteffekten för varje lastkombination
    lastkombination=j;
    if j==1      % Lastkombination 1 ska ge röd plot i grafen
        Color='r';
    elseif j==2 % Lastkombination 2 ska ge ljusblå färg i grafen
        Color='c';
    elseif j==3 % Lastkombination 3 ska ge rosa färg i grafen
        Color='m';
    elseif j==4 % Lastkombination 4 ska ge grön färg i grafen
        Color='g';
    end

% ----- LASTKOMBINATION 1 // 6.10a & 6.10b -----
if lastkombination==1

% Permanent last
G_da = gamma_Gjsup*G_kjsup;% Egentyngd [N/m]
G_db = Xi*gamma_Gjsup*G_kjsup;

% Variabla laster (från tågtrafik)
Q_da = gamma_Q*psi_0*Q_vd; % Punktlast [N]
Q_db = gamma_Q*Q_vd;

q_da = gamma_Q*psi_0*q_vd; % Utbredd last [N/m]
q_db = gamma_Q*q_vd;

% Kontrollerar om 6.10a eller 6.10b är dimensionerande i vårt fall
Eda=gamma_d*(G_da+Q_da+q_da);
Edb=gamma_d*(G_db+Q_db+q_db);

if Eda>Edb
    disp('Permanent lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10a')
    G_d = G_da;
    Q_d = Q_da;
    q_d = q_da;

elseif Eda<Edb
    disp('Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b')
    G_d = G_db;
    Q_d = Q_db;
    q_d = q_db;
end

% ----- LASTKOMBINATION 2 // 6.14b -----

```

```

elseif lastkombination==2
% Permanent last
G_d = G_kjsup;

% Variabel last
Q_d = Q_vd;
q_d = q_vd;

% ----- LASTKOMBINATION 3 // 6.15b -----
elseif lastkombination==3
% Permanent last
G_d = G_kjsup;

% Variabel last
Q_d = psi_1*Q_vd;
q_d = psi_1*q_vd;

% ----- LASTKOMBINATION 4 // 6.16b -----
elseif lastkombination==4
% Permanent last
G_d = G_kjsup;

% Variabel last
Q_d = psi_2*Q_vd;
q_d = psi_2*q_vd;

end

% ----- Beräkning av moment och tvärkraft -----
% - Jämmt utbredda Laster [N/m]
if l==1 % Lastfall 1
q_x1=0;
q_y1=-(q_d+G_d);
q_x2=0;
q_y2=-(G_d);
q_x3=0;
q_y3=-(G_d);
q_x4=0;
q_y4=-(G_d);
q_x5=0;
q_y5=-(G_d);
q_x6=0;
q_y6=-(G_d);
q_x7=0;
q_y7=-(G_d);
q_x8=0;

```

```

q_y8=-(G_d+q_d);
q_x9=0;
q_y9=-(G_d+q_d);
elseif l==2 % Lastfall 2
q_x1=0;
q_y1=-(q_d+G_d);
q_x2=0;
q_y2=-(G_d);
q_x3=0;
q_y3=-(G_d);
q_x4=0;
q_y4=-(G_d);
q_x5=0;
q_y5=-(G_d);
q_x6=0;
q_y6=-(G_d);
q_x7=0;
q_y7=-(G_d);
q_x8=0;
q_y8=-(G_d+q_d);
q_x9=0;
q_y9=-(G_d);
elseif l==3 % Lastfall 3
q_x1=0;
q_x2=0;
q_x3=0;
q_x4=0;
q_x5=0;
q_x6=0;
q_x7=0;
q_x8=0;
q_x9=0;
q_y1=-(G_d+q_d);
q_y2=-(G_d+q_d);
q_y3=-G_d;
q_y4=-G_d;
q_y5=-G_d;
q_y6=-G_d;
q_y7=-G_d;
q_y8=-(G_d+q_d);
q_y9=-(G_d+q_d);
elseif l==4 % Lastfall 4
G_d=0;

q_x1=0;
q_y1=-(q_d);

```

```

q_x2=0;
q_y2=-(G_d);
q_x3=0;
q_y3=-(G_d);
q_x4=0;
q_y4=-(G_d);
q_x5=0;
q_y5=-(G_d);
q_x6=0;
q_y6=-(G_d);
q_x7=0;
q_y7=-(G_d);
q_x8=0;
q_y8=-(G_d+q_d);
q_x9=0;
q_y9=-(G_d);
end

% y-koordinaterna för de nio elementen
ey=[0 0;0 0; 0 0; 0 0; 0 0; 0 0; 0 0; 0 0; 0 0];
ep=[E A_stal_langsg I]; % Materialdata

% Topologimatrix
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;9 25 26 27 28 29 30];
% Lastvektor för jämnt utbredda laster
eq=[q_x1 q_y1; q_x2 q_y2; q_x3 q_y3; q_x4 q_y4; q_x5 q_y5;
    q_x6 q_y6; q_x7 q_y7; q_x8 q_y8; q_x9 q_y9];

K=zeros(Na); % Fördefinierar storleken på global styvhetsmatrix K
f=zeros(Na,1); % Fördefinierar storleken på lastvektor

for i=1:Ne % For-loop som går igenom alla element.
    [Ke,fe]=beam2e(ex(i,:),ey(i,:),ep,eq(i,:)); % Beräknar styvhetsmatrix.
    [K,f]=assem(Edof(i,:),K,Ke,f,fe); % Gör assemblering av styvhetsmatrix
    % och lastvektor
end

% Adderar punktlasterna Q_d till lastvektorn
if l==1 || l==2 || l==4
f(8)=f(8)-Q_d;
f(11)=f(11)-Q_d;
f(17)=f(17)-Q_d;
f(20)=f(20)-Q_d;
elseif l==3

```

```

f(11)=f(11)-Q_d;
f(14)=f(14)-Q_d;
f(17)=f(17)-Q_d;
f(20)=f(20)-Q_d;
end

[a,fb]=solveq(K,f,bc); % Löser ekvationssystemet på formen Ka=f

if l==4 % Tar ut deformationer av balken för lastfall 4
Deformation(:,j)=Deformation(:,j)+a;
end

esM=zeros(100,9); % Fördefinierar storleken på matrisen esM
% innehållande värden på momentet [Nm]

figure(1)

if l==1
sgtitle('Lastfall 1')
elseif l==2
sgtitle('Lastfall 2')
elseif l==3
sgtitle('Lastfall 3')
elseif l==4
sgtitle('Lastfall 4')
end
end
subplot(2,1,1)

% Beräknar momentet för varje element samt plottar det i diagram
for i=1:Ne
[ed]=extract(Edof(i,:),a); % Tar ut förskjutning för varje element
% från globala förskjutningsmatrisen
[es,ed,ec]=beam2s(ex(i,:),ey(i,:),ep,ed,eq(i,:),n); % Funktion beam2s
% som beräknar snittkrafter och dess positioner
esM(:,i)=es(:,3)+esM(:,i);
explot=linspace(ex(i,1),ex(i,2),n);
plot(explot,-esM(:,i),Color);
hold on;
end

grid on
xlabel('x-koordinat [m]')
ylabel('Moment [Nm]')

maxM(j,:)=maxM(j,:)+max(abs(esM));

```

```

% Plottar balken
grid minor
line([0 60],[0 0], 'LineWidth',1, 'color', 'black')
plot([0 60],[-0.1*10^7 -0.1*10^7], 'o', 'color', 'black', ...
      'MarkerFaceColor', 'black', 'MarkerSize', 8)
plot(30,-0.15*10^7, '^', 'color', 'black', 'MarkerFaceColor', ...
      'black', 'MarkerSize', 8)
axis([0 60 -1.5*10^7 2*10^7]);

% Placerar och lägger in text i legend
text([45 45],[1.85*10^7 1.85*10^7], '-----', 'color', 'r', 'FontSize', 14)
text([49 49],[1.8*10^7 1.8*10^7], ' Brottgränstillstånd', 'color', 'black')
text([45 45],[1.6*10^7 1.6*10^7], '-----', 'color', 'c', 'FontSize', 14)
text([49 49],[1.55*10^7 1.55*10^7], ' Karakteristisk', 'color', 'black')
text([45 45],[1.4*10^7 1.4*10^7], '-----', 'color', 'm', 'FontSize', 14)
text([49 49],[1.3*10^7 1.3*10^7], ' Frekvent', 'color', 'black')
text([45 45],[1.15*10^7 1.15*10^7], '-----', 'color', 'g', 'FontSize', 14)
text([49 49],[1.05*10^7 1.05*10^7], ' Kvasi-permanent', 'color', 'black')
text([45 45],[0.9*10^7 0.9*10^7], '-----', 'color', 'black', 'FontSize', 14)
text([49 49],[0.8*10^7 0.8*10^7], ' Balk', 'color', 'black')
text([45 45],[0.55*10^7 0.55*10^7], ' \Delta Brostöd', 'color', ...
      'black')
text([45 45],[0.3*10^7 0.3*10^7], ' 0 Brostöd', 'color', 'black')

% Beräknar tvärkraften för varje element samt plottar det i diagram
esV=zeros(100,9); % Fördefinierar storleken på matrisen esV
                  % innehållande värden på tvärkraften [N]

subplot(2,1,2)
for i=1:Ne
    [ed]=extract(Edof(i,:),a); % Tar ut förskjutning för varje element
    % från globala förskjutningsmatrisen
    [es,ed,ec]=beam2s(ex(i,:),ey(i,:),ep,ed,eq(i,:),n); % Funktion beam2s
    % som beräknar snittkrafter och dess positioner
    esV(:,i)=es(:,2)+esV(:,i);
    explot=linspace(ex(i,1),ex(i,2),n);
    plot(explot,-esV(:,i),Color)
    hold on
end

% Beräknar reaktionskrafter för vänster- och höger stöd, samt mittstöd.
if l==1 && j==1
    Stodkrafter(1,1)=Stodkrafter(1,1)+max(abs(esV(:,1)));
    Stodkrafter(1,2)=Stodkrafter(1,2)+max(abs(esV(:,8)))+max(abs(esV(:,9)));
    Stodkrafter(1,3)= Stodkrafter(1,3)+max(esV(:,9));
elseif l==2 && j==1
    Stodkrafter(1,1)=Stodkrafter(1,1)+max(abs(esV(:,1)));

```

```

    Stodkrafter(1,2)=Stodkrafter(1,2)+max(abs(esV(:,8)))+max(abs(esV(:,9)));
    Stodkrafter(1,3)= Stodkrafter(1,3)+max(esV(:,9));
elseif l==3 && j==1
    Stodkrafter(1,1)=Stodkrafter(1,1)+max(abs(esV(:,1)));
    Stodkrafter(1,2)=Stodkrafter(1,2)+max(abs(esV(:,5)))+max(abs(esV(:,6)));
    Stodkrafter(1,3)= Stodkrafter(1,3)+max(esV(:,9));
end

grid on
xlabel('x-koordinat [m]')
ylabel('Tvärkraft [N]')

maxV(j,:)=maxV(j,:)+max(abs(esV));

% Placerar och lägger in text i legend
text([45 45],[3.7*10^6 3.7*10^6],'-----','color','r','FontSize',14)
text([49 49],[3.6*10^6 3.6*10^6],' Brottgärnstillstånd','color','black')
text([45 45],[3.2*10^6 3.2*10^6],'-----','color','c','FontSize',14)
text([49 49],[3.1*10^6 3.1*10^6],' Karakteristisk','color','black')
text([45 45],[2.7*10^6 2.7*10^6],'-----','color','m','FontSize',14)
text([49 49],[2.6*10^6 2.6*10^6],' Frekvent','color','black')
text([45 45],[2.2*10^6 2.2*10^6],'-----','color','g','FontSize',14)
text([49 49],[2.1*10^6 2.1*10^6],' Kvasi-permanent','color','black')
text([45 45],[1.7*10^6 1.7*10^6],'-----','color','black','FontSize',14)
text([49 49],[1.6*10^6 1.6*10^6],' Balk','color','black')
text([45 45],[1.1*10^6 1.1*10^6],' \Delta Brostöd','color','black')
text([45 45],[0.6*10^6 0.6*10^6],' 0 Brostöd','color','black')

% Plottar vertikala linjer för att få en kontinuerlig graf
if l==1 || l==2 || l==4
Vert=line([30 30],[-max(esV(:,8)) -min(esV(:,9))]);
Vert.Color='r';
plot(30,Vert,'r')
hold on
Vert=line([12.6 12.6],[-max(esV(:,2)) -min(esV(:,3))]);
Vert.Color=Color;
plot(30,Vert)
hold on
Vert=line([14.2 14.2],[-max(esV(:,3)) -min(esV(:,4))]);
Vert.Color=Color;
plot(30,Vert)
hold on
Vert=line([15.8 15.8],[-max(esV(:,5)) -min(esV(:,6))]);
Vert.Color=Color;
plot(30,Vert)
hold on

```

```

Vert=line([17.4 17.4],[-max(esV(:,6)) -min(esV(:,7))]);
Vert.Color=Color;
plot(30,Vert,Color)
elseif l==3
Vert=line([30 30],[-max(esV(:,7)) -min(esV(:,8))]);
Vert.Color='r';
plot(30,Vert)
hold on
Vert=line([L-1.6-1.6-1.6-0.01 L-1.6-1.6-1.6-0.01],...
[-max(esV(:,3)) -min(esV(:,4))]);
Vert.Color=Color;
plot(30,Vert)
hold on
Vert=line([L-1.6-1.6-0.01 L-1.6-1.6-0.01],[-max(esV(:,4)) -min(esV(:,5))]);
Vert.Color=Color;
plot(30,Vert)
hold on
Vert=line([L-1.6-0.01 L-1.6-0.01],[-max(esV(:,5)) -min(esV(:,6))]);
Vert.Color=Color;
plot(30,Vert)
hold on
Vert=line([L-0.01 L-0.01],[-max(esV(:,6)) -min(esV(:,7))]);
Vert.Color=Color;
plot(30,Vert)
end

% Plottar balken
grid minor
line([0 60],[0 0],'LineWidth',1,'color','black')
plot([0 60],[-0.2*10^6 -0.2*10^6],'o','color','black','MarkerFaceColor',...
'black','MarkerSize',8)
plot(30,-0.25*10^6,'^','color','black','MarkerFaceColor','black',...
'MarkerSize',8)
axis([0 60 -5*10^6 4 *10^6]);
end
% Bestämmer maximalt moment och tvärkraft
maximaltM(:,l)=maximaltM(:,l)+max(maxM)';
maximaltV(:,l)=maximaltV(:,l)+max(maxV)';
end

disp(' ')
disp('Max-moment för respektive lastkombination och lastfall');
Lastkombinering={'Brottgräns';'Karakteristisk';'Frekvent';'Kvasipermanent'};
lastfall_1=maximaltM(:,1);
lastfall_2=maximaltM(:,2);
lastfall_3=maximaltM(:,3);

```

```

lastfall_4=maximaltM(:,4);
table_1=table(Lastkombinering,lastfall_1,lastfall_2,lastfall_3,lastfall_4);
disp(table_1)

```

```

disp('Max-tvärkraft för respektive lastkombination och lastfall ');
lastfall_1=maximaltV(:,1);
lastfall_2=maximaltV(:,2);
lastfall_3=maximaltV(:,3);
lastfall_4=maximaltV(:,4);
table_2=table(Lastkombinering,lastfall_1,lastfall_2,lastfall_3,lastfall_4);
disp(table_2)

```

Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b
Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b
Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b
Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b

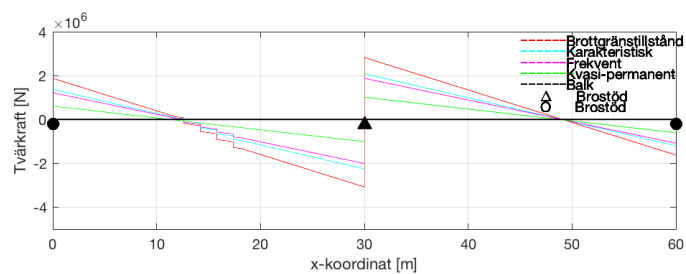
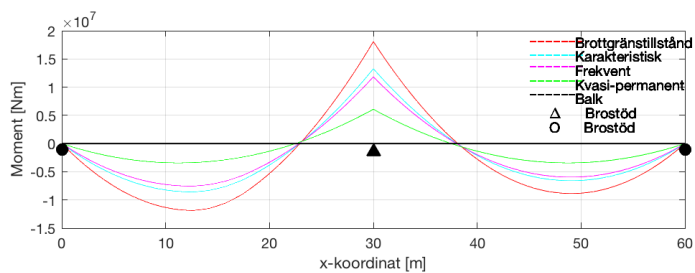
Max-moment för respektive lastkombination och lastfall

Lastkombinering	lastfall_1	lastfall_2	lastfall_3	lastfall_4
'Brottgräns'	1.677e+07	1.3115e+07	1.5851e+07	9.8793e+06
'Karakteristisk'	1.2174e+07	9.2943e+06	1.1561e+07	6.5862e+06
'Frekvent'	1.0738e+07	8.242e+06	1.0248e+07	5.269e+06
'Kvasipermanent'	4.9945e+06	4.9945e+06	4.9945e+06	0

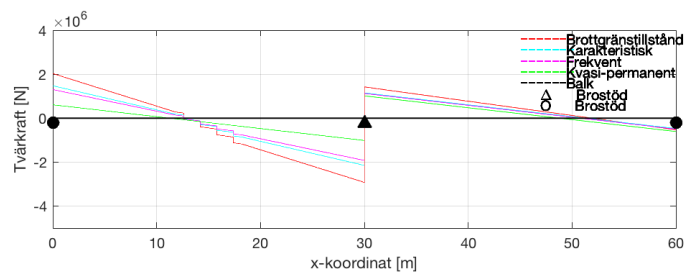
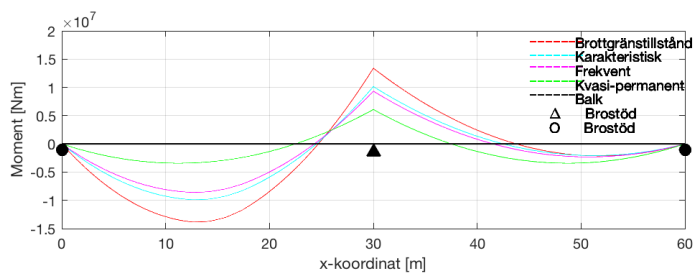
Max-tvärkraft för respektive lastkombination och lastfall

Lastkombinering	lastfall_1	lastfall_2	lastfall_3	lastfall_4
'Brottgräns'	2.861e+06	2.705e+06	2.8505e+06	1.7048e+06
'Karakteristisk'	2.073e+06	1.969e+06	2.0659e+06	1.1366e+06
'Frekvent'	1.8249e+06	1.7417e+06	1.8192e+06	9.0925e+05
'Kvasipermanent'	8.3242e+05	8.3242e+05	8.3259e+05	0

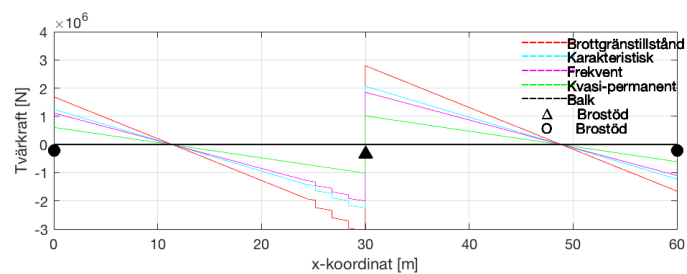
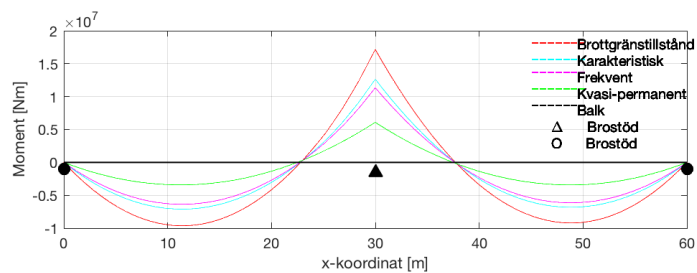
Snittkrafter för lastfall 1



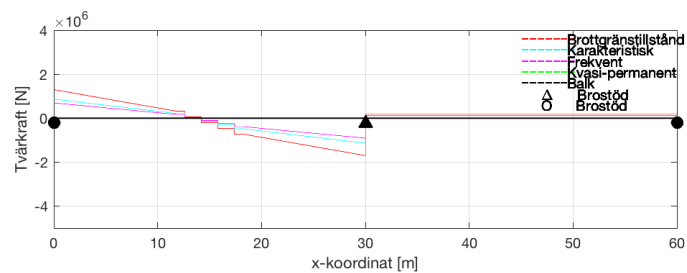
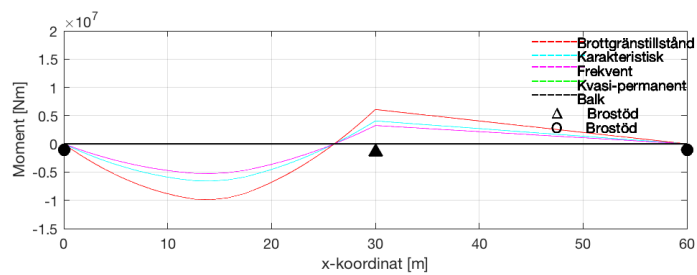
Snittkrafter för lastfall 2



Snittkrafter för lastfall 3



Lastfall 4



Kontroll av kapacitet: Huvudbalkar

```
clc

Med=[maximaltM(1,1) maximaltM(1,2)...
     maximaltM(1,3)]; % Dimensionerande moment [Nm]
Ved=[maximaltV(1,1) maximaltV(1,2)...
     maximaltV(1,3)]; % Dimensionerade Tvärkraft [N]

% Behöver endast kontrollera tvärsnittsklass en gång

% Tvärsnittsklass, beror på vilken profil man har! Böjmotstånd väljs
% utifrån högsta TK hos de plåtar som ingår i tvärsnittet TK livplåt:
d_TK=hw-2*sqrt(2)*a_matt; % d för att bestämma TK
e_k=sqrt(235/(fy*10^-6)); % Epsilon
for i=d_TK/tw % Jämför d/tw med gränsvärden för slankhet
    if i<=72*e_k % Gränsvärde för TK1
        disp('Livplåten är i TK1')
    elseif 72*e_k>i<=83*e_k % Gränsvärden för TK2
        disp('Livplåten är i TK2')
    elseif 83*e_k>i<=124*e_k % Gränsvärden för TK3
        disp('Livplåten är i TK3')
    else
        disp('Livplåten är i TK4')
    end
end

% TK yttre flänsar
Cs=((bf-tw)/2)-sqrt(2)*a_matt; % c - fläns svetsad
for i=Cs/tf % Jämför c/tf med gränsvärden för slankhet
    if i<=9*e_k % Gränsvärde för TK1
        disp('Yttre flänsar är i TK1')
    elseif 9*e_k>i<=10*e_k % Gränsvärden för TK2
        disp('Yttre flänsar är i TK2')
    elseif 10*e_k>i<=14*e_k % Gränsvärden för TK3
        disp('Yttre flänsar är i TK3')
    else
        disp('Yttre flänsar är i TK4')
    end
end

for k=1:3 % For-loop för de olika lastfallen 1-3

if k==1
    disp('LASTFALL 1 - Kontrollerar momentkapacitet');
elseif k==2
    disp('LASTFALL 1 - Kontrollerar momentkapacitet');
```

```

elseif k==3
    disp('LASTFALL 1 - Kontrollerar momentkapacitet');
end

% ----- Kontroll av Momentkapacitet enligt Eurokod 3 -----

Xlt=1;          % Då ingen risk för vippning föreligger
ym1=1;          % Vid beräkning av moment, gamma_M1
Wpl=tf*bf*(tf+hw)+(tw*hw^2)/4; % Plastiskt böjmotstånd för tvärsnittet
Mrd=fy*Xlt*Wpl/ym1; % Beräkning av plastisk momentkapacitet
if Mrd>Med(:,k) % Jämför tvärsnittets momentkapacitet med
                % dimensionerande moment
    disp('Momentkapacitet OK!')
else
    disp('Momentkapacitet ej OK!')
end

% ----- Kontroll av tvärkraftskapacitet enligt Eurokod 3 -----

% Kontroll av skjuvbuckling, % Antar balk med mellanliggande avstyvningar +
% styva ändavstyvningar
if k==1
    disp('LASTFALL 1 - Kontrollerar risk för skjuvbuckling');
elseif k==2
    disp('LASTFALL 2 - Kontrollerar risk för skjuvbuckling');
elseif k==3
    disp('LASTFALL 3 - Kontrollerar risk för skjuvbuckling');
end

as=cc; % Längden hos ett avstyvat plåtfält i balklivet
d=hw;  % Höjden hos ett avstyvat plåtfält i balklivet
eta=1.2; % eta=1.2 stålkvaliteter upp tom S460

% Beräknar bucklingskoefficient kt
for i=as/d % Jämför med gränserna som förtecknas på s. S84 i BK del 1
    if i<1
        kt=4+5.34/(as/d)^2;
    else
        kt=5.34+4/(as/d)^2;
    end
end

lambdaw=(hw/tw)/(37.4*e_k*sqrt(kt)); % Ekvation S5-21 i BK del 1
% Beräknar Xw från tabell S5.1 i BK del 1
for i=lambdaw % Jämför lambda_w med slankhetsgränserna
    if i<0.8/eta

```

```

        Xw=eta;
    elseif 0.8/eta<=i<1.08
        Xw=0.83/i;
    else
        Xw=1.37/(0.7+i);
    end
end

Av=eta*hw*tw; % Beräknar skjuvarean, s.S83 i bärande konstruktioner del 1
ym0=1.0; ym1=1; % gamma_0 och gamma_1

% Beräkningsgång för liv med vertikala avstyvningar
for i=hw/tf % Jämför hw/tf för tvärbalkens liv med gränserna i S.5-19, BK1
    if i<=31*e_k*sqrt(kt)/eta
        disp('Tvärsnittet riskerar ej skjuvbuckling')
        VRd=Av*fy/(sqrt(3)*ym0); % VRd=VplRd, Om tvärsnitt inte
                                % riskerar skjuvbuckling
    elseif i>31*e_k*sqrt(kt)/eta
        disp('Tvärsnittet riskerar skjuvbuckling')
        VRd=Xw*hw*tw*fy/(sqrt(3)*ym1); % VRd=VbwRd, Om tvärsnittet
                                        % riskerar skjuvbuckling
    end
end

if k==1
    disp('LASTFALL 1 - Kontrollerar tvärkraftskapacitet');
elseif k==2
    disp('LASTFALL 2 - Kontrollerar tvärkraftskapacitet');
elseif k==3
    disp('LASTFALL 3 - Kontrollerar tvärkraftskapacitet');
end

if VRd>Ved(:,k) % Jämför tvärsnittets kapacitet med dimensionerande
    disp('Tvärcraftskapacitet OK!')
else
    disp('Tvärcraftskapacitet ej OK!')
end

if k==1
    disp('LASTFALL 1 - Kontrollerar om interaktion behöver kontrolleras');
elseif k==2
    disp('LASTFALL 2 - Kontrollerar om interaktion behöver kontrolleras');
elseif k==3
    disp('LASTFALL 3 - Kontrollerar om interaktion behöver kontrolleras');
end
end

```

```

% ----- Interaktion mellan tvärkraft och moment -----

Wf=bf*tf*(hw+tf); % Flänsarnas plastiska böjmotstånd
MfRd=Wf*fy/ym1; % Flänsarnas plastiska momentkapacitet
MplRd=Wpl*fy; % Hela tvärsnittets plastiska momentkapacitet

VbwRd=Xw*hw*tw*fy/(sqrt(3)*ym1); % Livplätens tvärkraftskapacitet

% Kontrollerar om interaktion mellan moment och tvärkraft behöver
% kontrollernas samt kontrollerar det i så fall
for i=MfRd & j==VbwRd*0.5 % Jämför MfRd & VbwRd med kraven för interaktion
    if i>Med(:,k) && 2*j>Ved(:,k) || j>Ved(:,k)
        disp('Ingen interaktion behöver kontrolleras')
    else
        disp('Interaktion behöver kontrolleras')
        M=MfRd+(MplRd-MfRd)*(1-((2*Ved(:,k)/VbwRd)-1)^2); % Enligt ekvation
        % S.5-22 i bärande konstruktioner del 1
        if M>=Med(:,k)
            disp('Interaktion OK!')
        else
            disp('Interaktion ej OK!')
        end
    end
end
end

% Utnyttjandegrad för moment
disp('UTNYTTJANDEGRAD - moment');

disp(Med/Mrd)

% Utnyttjandegrad för tvärkraft
disp('UTNYTTJANDEGRAD - tvärkraft');

disp(Ved/VRd)

Livplåten är i TK2
Yttre flänsar är i TK1
LASTFALL 1 - Kontrollerar momentkapacitet
Momentkapacitet OK!
LASTFALL 1 - Kontrollerar risk för skjuvbuckling
Tvärsnittet riskerar ej skjuvbuckling
LASTFALL 1 - Kontrollerar tvärkraftskapacitet

```

```

Tvärkraftskapacitet OK!
LASTFALL 1 - Kontrollerar om interaktion behöver kontrolleras
Interaktion behöver kontrolleras
Interaktion OK!
LASTFALL 1 - Kontrollerar momentkapacitet
Momentkapacitet OK!
LASTFALL 2 - Kontrollerar risk för skjuvbuckling
Tvärsnittet riskerar ej skjuvbuckling
LASTFALL 2 - Kontrollerar tvärkraftskapacitet
Tvärkraftskapacitet OK!
LASTFALL 2 - Kontrollerar om interaktion behöver kontrolleras
Interaktion behöver kontrolleras
Interaktion OK!
LASTFALL 1 - Kontrollerar momentkapacitet
Momentkapacitet OK!
LASTFALL 3 - Kontrollerar risk för skjuvbuckling
Tvärsnittet riskerar ej skjuvbuckling
LASTFALL 3 - Kontrollerar tvärkraftskapacitet
Tvärkraftskapacitet OK!
LASTFALL 3 - Kontrollerar om interaktion behöver kontrolleras
Interaktion behöver kontrolleras
Interaktion OK!
UTNYTTJANDEGRAD - moment
    0.7133    0.5578    0.6742

UTNYTTJANDEGRAD - tvärkraft
    0.4134    0.3908    0.4119

```

Kontroll av mittnedböjning: Huvudbalkar

```

clc
disp('Kontroll bruksgräns för lastfall 4');
figure
% Lastkombinationer 1 - brottgränstillstånd 6.10a & 6.10b Lastkombinationer
% 2 - karakteristisk 6.14b Lastkombinationer 3 - frekvent 6.15b
% Lastkombinationer 4 - kvasi-permanent 6.16b

Nedbojning_L=zeros(1,3);      % Fördefinierar storleken på vektorn

for j=2:4 % For-loop för att beräkna nedböjningen
v_L=abs(Deformation(14,j)); % Tar ut mittnedböjning för tvärbalkarna
Nedbojning_L(1,j-1)=Nedbojning_L(1,j-1)+v_L;

KRAV=L/600; % Trvk bro11, Största tillåtna mittnedböjning för huvudbalkarna

```

```

if j==2
    disp('KARAKTERISTISK - Kontroll nedböjning');
elseif j==3
    disp('FREKVENT - Kontroll nedböjning');
elseif j==4
    disp('KVASI-PERMANENT - Kontroll nedböjning');
end

if v_L<=KRAV % Jämför den beräknade nedböjningen med den maximalt tillåtna
    disp('Nedböjning OK')
elseif v_L>KRAV
    disp('Nedböjning EJ OK')
end

% Plottar nedböjningen
grid on
grid minor
title('Nedböjning av trafiklast - lastfall 2')
xlabel('Längd [m]')
ylabel('Nedböjning [mm]')

% Fixar texten i legend
text([45 45],[9 9],'-----','color','red','FontSize',14)
text([49 49],[9 9],' Karakteristisk','color','black')
text([45 45],[7.8 7.8],'-----','color','blue','FontSize',14)
text([49 49],[7.8 7.8],' Frekvent','color','black')
text([45 45],[6.6 6.6],'-----','color','magenta','FontSize',14)
text([49 49],[6.6 6.6],' Kvasi-permanent','color','black')
text([45 45],[5.4 5.4],'-----','color','black','FontSize',14)
text([49 49],[5.4 5.4],' Balk','color','black')
text([45 45],[4.2 4.2],' \Delta Brostöd','color','black')
text([45 45],[3 3],' 0 Brostöd','color','black')

plotpar1=[2 1 0]; % Bestämmer färg på graf mm
eldraw2(ex,ey,plotpar1); % Plottar den odeformerade balken
eb1=extract(Edof,Deformation(:,j)); % Extraherar deformationer från den
% globala deformationsvektorn med hänsyn till
% topologimatrisen

if j==2 % Definerar olika färger för de olika lastkombinationerna
    plotpar1b=[1 4 0];
elseif j==3
    plotpar1b=[1 2 0];
elseif j==4
    plotpar1b=[1 3 0];

```

```

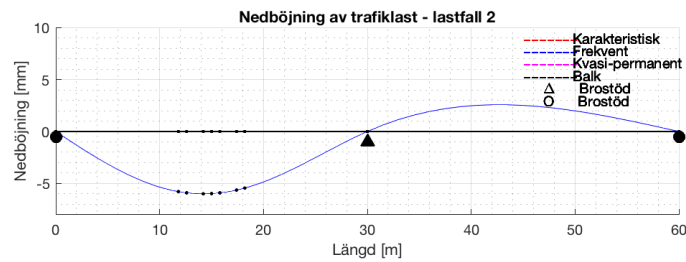
end
sfac=scalfact2(ex,ey,eb1);          % Beräknar skalfaktorn
eldisp2(ex,ey,eb1,plotpar1b,sfac); % Plottar den deformerade balken
hold on

% Plottar balken och dess stöd
axis([0 60 -8 10])                  % Definerar x- resp y-axeln
line([0 60],[0 0], 'LineWidth',1, 'color','black', 'Displayname','Balk')
plot([0 60],[-0.5 -0.5], 'o', 'color','black', 'MarkerFaceColor','black',...
     'MarkerSize',8, 'Displayname','Brostöd') % Plottar rullstöden
plot(30,-1, '^', 'color','black', 'MarkerFaceColor','black',...
     'MarkerSize',8, 'Displayname','Brostöd') % Plottar de fasta stöden

end
% Skriver ut nedböjningen för de olika lastkombinationerna
disp('NEDBÖJNING - LASTFALL 4');
disp('Karakteristisk Frekvent Kvasi-permanent')
disp(Nedbojning_L)

Kontroll bruksgräns för lastfall 4
KARAKTERISTISK - Kontroll nedböjning
Nedböjning EJ OK
FREKVENT - Kontroll nedböjning
Nedböjning OK
KVASI-PERMANENT - Kontroll nedböjning
Nedböjning OK
NEDBÖJNING - LASTFALL 4
Karakteristisk Frekvent Kvasi-permanent
0.0580    0.0464    0

```



Kontroll av svetsar: Halssvetsar huvudbalkar

```

clc
disp('KONTROLL SVETSAR');

a_matt=15e-3;

% Spänningar som kommer uppkomma i halssvetsarna är vertikala
% skjuvspänningar och vertikala normalspänningar, samt parallella
% skjuvspänningar.

% Huvudbalken är 60 meter lång, men den kommer att levereras i längder av
% 20 meter. Därmed kommer den att behöva skarvas vid 20m och 40m. Men dessa
% svetsar kommer utföras som stumsvetsar med full genomträngning och därmed
% kan dessa betraktas som minst lika starka som huvudbalken och därav
% behöver ingen kontroll av dessa svetsar att göras.

% Svetsarna som kommer vara mest belastade är de nedre halssvetsarna vid
% upplagen (lagren) Lagrens mått är olika stora (0.64 meter för mitten
% lagren och 0.39 meter för ytter lagren)

Lj_y=0.39; % Längd på yttre lagren
Lj_m=0.64; % Längd på mitten lagren

```

```

BL_w1_y=1.2-(0.2*Lj_y/(150*a_matt)); % Definierar reduktionsfaktorn för
                                     % svetslängden för yttre lagren
BL_w1_m=1.2-(0.2*Lj_m/(150*a_matt)); % Definierar reduktionsfaktorn för
                                     % svetslängden för mitten lagren

if Lj_y<=150*a_matt % Bestämning av nyttig svetslängd för yttre lagren
    L_y=Lj_y;
elseif Lj_y>150*a_matt
    L_y=BL_w1_y*Lj_y;
end

if Lj_m<=150*a_matt % Bestämning av nyttig svetslängd för mitten lagren
    L_m=Lj_m;
elseif Lj_m>150*a_matt
    L_m=BL_w1_m*Lj_m;
end

% Kontroll av svetsar behöver kontrolleras på ytterstöden och mittenstödet

% -----
% Kontroll av svetsar över ytterstöden:

% Börjar med att bestämma de spänningar som uppkommer i tvärsnittet

% Störst tvärkraft över ytterstöd ger lastfall 2 (Punktlaster mitt i fält
% med jämnt utbredd tåglast i endast det facket där punktlaster verkar).
% Därmed görs kontroll av svets över ytterstöd endast för lastfall 2.

S=((hw+tf)/2)*(bf*tf); % Flänsens statiska moment
V_ytter=max(Stodkrafter(1:3,1)); % Tar ut största tvärkraften som kan
                                % uppkomma i ytterstödet
R_ytter=max(Stodkrafter(1:3,1)); % Tar ut största upplagskraften som
                                % kan uppkomma i ytterstödet

% Beräkning av spänningar som uppkommer i tvärsnittet
tau_parallell_hals_ytter=V_ytter*S/(I*2*a_matt); % Skjuvspänning
                                                % parallellt med svetslängden

tau_vinkelrat_hals_ytter=R_ytter/(2*sqrt(2)*L_y*a_matt); % Skjuvspänning
% vinkelrätt med svetslängden, där även hänsyn tagits till att vi har en
% svets på varje sida om livet

% Normalspänning vinkelrät svetslängden
sigma_vinkelrat_hals_ytter=tau_vinkelrat_hals_ytter;

% Kontroll

```

```

sigma_j_hals_ytter=sqrt(sigma_vinkelrat_hals_ytter^2+3*...
    (tau_parallell_hals_ytter^2+tau_vinkelrat_hals_ytter^2)); % Jmfspänning
Bw=0.9; % Korrelationsfaktor som beror på stålets hållfasthet
ym2=1.25; % Partitialkoefficient för svetsens bärförmåga
Kontroll1=fu/(Bw*ym2); % För att svetsen ska ha tillräcklig bärförmåga
    % måste spänningarna vara mindre än detta uttryck och ...
Kontroll2=0.9*fu/ym2; % .... detta uttryck

disp('Mest belastade ytterstöd - Kontroll bärförmåga kälsvets mellan liv och fläns');

% Kontroll om villkoren för svetsens uppfylls
if sigma_j_hals_ytter<=Kontroll1 && sigma_vinkelrat_hals_ytter<=Kontroll2
    disp('Bärförmåga lastfall 1 OK')
elseif sigma_j_hals_ytter>Kontroll1 || sigma_vinkelrat_hals_ytter>Kontroll2
    disp('Bärförmåga lastfall 1 EJ OK')
end

% -----
% Kontroll av svetsar över mittstödet:

% Börjar med att bestämma de spänningar som uppkommer i tvärsnittet

% Störst tvärkraft över mittstöd ger lastfall 1 (Punktlaster mitt i fält
% med jämnt utbredd tåglast i bägge facken). Därmed görs kontroll av svets
% över ytterstöd endast för lastfall 1.

S=((hw+tf)/2)*(bf*tf); % Flänsens statiska moment
V_mitt=max(Stodkrafter(1:3,2)); % Tar ut största tvärkraften som
    % kan uppkomma i mittenstödet
R_mitt=max(Stodkrafter(1:3,2)); % Tar ut största upplagskraften
    % som kan uppkomma i mittenstödet

% Beräkning av spänningar som uppkommer i tvärsnittet
% Skjuvspänning parallellt med svetslängden
tau_parallell_hals_mitt=V_mitt*S/(I*2*a_matt);

% Skjuvspänning vinkelrätt med svetslängden
tau_vinkelrat_hals_mitt=R_mitt/(2*sqrt(2)*L_m*a_matt);

% Normalspänning vinkelrätt svetslängden
sigma_vinkelrat_hals_mitt=tau_vinkelrat_hals_mitt;

% Kontroll
sigma_j_hals_mitt=sqrt(sigma_vinkelrat_hals_mitt^2+3*...
    (tau_parallell_hals_mitt^2+tau_vinkelrat_hals_mitt^2)); % Jmfspänning
Bw=0.9; % Korrelationsfaktor som beror på stålets hållfasthet

```

```

ym2=1.25; % Partitalkoefficient för svetsens bärförmåga
Kontroll1=fu/(Bw*ym2); % För att svetsen ska ha tillräcklig bärförmåga
% måste spänningarna vara mindre än detta uttryck och ...
Kontroll2=0.9*fu/ym2; % .... detta uttryck

disp('Mittstöd - Kontroll bärförmåga kälsvets mellan liv och fläns');
% Kontroll om villkoren för svetsens uppfylls
if sigma_j_hals_mitt<=Kontroll1 && sigma_vinkelrat_hals_mitt<=Kontroll2
    disp('Bärförmåga lastfall 1 OK')
elseif sigma_j_hals_mitt>Kontroll1 || sigma_vinkelrat_hals_mitt>Kontroll2
    disp('Bärförmåga lastfall 1 EJ OK')
end

KONTROLL SVETSAR
Mest belastade ytterstöd - Kontroll bärförmåga kälsvets mellan liv och fläns
Bärförmåga lastfall 1 OK
Mittstöd - Kontroll bärförmåga kälsvets mellan liv och fläns
Bärförmåga lastfall 1 OK

```

Laster som verkar på bron längs med en tvärbalk

```

clc

% Dimensioner - slipers enligt banstandard i Göteborg
L_sliper=2.5;           % Längd slipers [m]
h_sliper=0.220;        % Höjd slipers [m]
b_sliper=0.30;         % Bredd slipers [m]

% Lastspridning sker enligt 1:4
h_lastspredning=h_b-h_sliper; % Lastspridning sker i ballasten och
                                % startar från slipers underkant [m]
b_lastspredning=h_lastspredning*(1/4)*2+L_sliper; % Längden på
                                                    % lastspridningen [m]

% Variabla laster i tvärbalkens riktning (Trafiklast) Variabel Punktlast
% från lok
Q_vk_t=250*10^3;        % Karakteristisk punktlast från lok, axellast [N]
Q_vd_t=Q_vk_t*alpha*phi; % Dimensionerande punktlast från lok [N]
q_vd=(Q_vd_t/2)/b_lastspredning; % Axellasten sprider sig på tre stycken
% slipers, där den mest belastade blir belastad med Q_vd_t/2.
% Denna last hinner ej sprida sig till någon annan tvärbalk.

% Permanenta laster i tvärbalkens riktning (egentyngd) Tvärbalkar
A_tvar_egentyngd=(tf_t*bf_t)+(hw_t*tw_t)+(bp*cc); % Tvärsnittsarea för
                                                    % tvärbalk inkl. bottenplatta som överfläns [m2]

```

```

G_stal=stal*A_tvar_egentyngd;    % Egentyngd för tvärbalkarna [N/m]

% Ballast
A_b=h_b*cc; % Tvärsnittsarean för ballasten
G_ballast=ballast*A_b; % Jämnt utbredd last från ballasten i tvärled.
% Här ingår även egentyngd från slipers [N/m]

G_bs=G_ballast+G_stal; % Permanenta egentyngden av ballast och stål [N/m]

% Detaljer (2 st räl)
G_detalj=(detalj*2*cc)/b_lastspredning; % Egentyngd detaljer [N/m]

```

Lasteffekt - Tvärled

```

disp('Moment och tvärkraftsdiagram tvärbalkar');

Ne=4;          % Antal element
Na=15;        % Antal frihetsgrader
N_lastfall=4; % Antal lastfall som kontrolleras
n=100;

maximaltM=zeros(4,5); % Fördefinierar storleken på matrisen maximaltM
maximaltV=zeros(4,5); % Fördefinierar storleken på matrisen maximaltV
deformation_t=zeros(15,4); % Fördefinierar storleken på matrisen deformation_t

for v=1:5

    % Villkor 1: Utan förskjutning och fritt upplagd Villkor 2: Med
    % förskjutning och fritt upplagd Villkor 3: Utan förskjutning och fast
    % inspänd Villkor 4: Med förskjutning och fast inspänd Villkor 5: Utan
    % förskjutning och fritt upplagd, ingen egentyngd

    if v==1 % Villkor 1

        ex=[0 (c/2-b_lastspredning/2);
            (c/2-b_lastspredning/2) (c/2);
            (c/2) (c/2+b_lastspredning/2);
            (c/2+b_lastspredning/2) c]; % X-koordinaterna för de fyra elementen

        bc=[1 0;2 0;14 0]; % Upplagsvillkor

    elseif v==2 % Villkor 2
        ex=[0 (c/2-b_lastspredning/2+e);
            (c/2-b_lastspredning/2+e) (c/2+e);
            (c/2+e) (c/2+b_lastspredning/2+e);
            (c/2+b_lastspredning/2+e) c]; % X-koordinaterna för de fyra elementen
    end
end

```

```

        bc=[1 0;2 0;14 0];          % Upplagsvillkor

elseif v==3 % Villkor 3
    ex=[0 (c/2-b_lastspredning/2);
        (c/2-b_lastspredning/2) (c/2);
        (c/2) (c/2+b_lastspredning/2);
        (c/2+b_lastspredning/2) c]; % X-koordinaterna för de fyra elementen

        bc=[1 0;2 0;3 0;13 0;14 0;15 0]; % Upplagsvillkor

elseif v==4 % Villkor 4
    ex=[0 (c/2-b_lastspredning/2+e);
        (c/2-b_lastspredning/2+e) (c/2+e);
        (c/2+e) (c/2+b_lastspredning/2+e);
        (c/2+b_lastspredning/2+e) c]; % X-koordinaterna för de fyra elementen

        bc=[1 0;2 0;3 0;13 0;14 0;15 0]; % Upplagsvillkor

elseif v==5 % Villkor 5
    ex=[0 (c/2-b_lastspredning/2);
        (c/2-b_lastspredning/2) (c/2);
        (c/2) (c/2+b_lastspredning/2);
        (c/2+b_lastspredning/2) c]; % X-koordinaterna för de fyra elementen

        bc=[1 0;2 0;14 0];          % Upplagsvillkor
end

maxM=zeros(N_lastfall,Ne); % Fördefinierar storleken på matrisen maxM
maxV=zeros(N_lastfall,Ne); % Fördefinierar storleken på matrisen maxV

for j=1:4 % For-sats som tar fram lasteffekten för varje lastkombination
    lastkombination=j;
    if j==1 % Lastkombination 1 ska ge röd plot i grafen
        Color='r';
    elseif j==2 % Lastkombination 2 ska ge ljusblå färg i grafen
        Color='c';
    elseif j==3 % Lastkombination 3 ska ge rosa färg i grafen
        Color='m';
    elseif j==4 % Lastkombination 4 ska ge grön färg i grafen
        Color='g';
    end

% ----- LASTKOMBINATION 1 // 6.10a & 6.10b -----
if lastkombination==1

```

```

% Permanent last (egentyngd)
G_da = gamma_Gjsup*G_bs;           % Egentyngd stål och ballast [N/m]
G_db = Xi*gamma_Gjsup*G_bs;
G_da_detalj = gamma_Gjsup*G_detalj; % Egentyngd räl [N/m]
G_db_detalj = Xi*gamma_Gjsup*G_detalj;

% Variabla laster (från tågtrafik)

q_da = gamma_Q*psi_0*q_vd;         % Utbredd last [N/m]
q_db = gamma_Q*q_vd;

% Kontrollerar om 6.10a eller 6.10b är dimensionerande i vårt fall
Eda=gamma_d*(G_da+G_da_detalj+q_da);
Edb=gamma_d*(G_db+G_db_detalj+q_db);

if Eda>Edb
    disp('Permanent lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10a')
    G_d = G_da;
    G_d_detalj = G_da_detalj;
    q_d = q_da;
elseif Eda<Edb
    disp('Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b')
    G_d = G_db;
    G_d_detalj = G_db_detalj;
    q_d = q_db;
end

% ----- LASTKOMBINATION 2 // 6.14b -----
elseif lastkombination==2
% Permanent last
G_d = G_bs;
G_d_detalj=G_detalj;

% Variabel last
q_d = q_vd;

% ----- LASTKOMBINATION 3 // 6.15b -----
elseif lastkombination==3
% Permanent last
G_d = G_bs;
G_d_detalj=G_detalj;

% Variabel last
q_d = psi_1*q_vd;

```

```

% ----- LASTKOMBINATION 4 // 6.16b -----
elseif lastkombination==4
% Permanent last
G_d = G_bs;
G_d_detalj=G_detalj;

% Variabel last
q_d = 2*psi_2*q_vd; % [N/m]

end

% ----- Beräkning av moment och tvärkraft -----

if v==5 % Sätter egentyngd=0 för villkor 5
    G_d=0;
    G_d_detalj=0;
end

% Utbredda laster [N/m]
q_x1=0;
q_y1=-(G_d);
q_x2=0;
q_y2=-(G_d+q_d+G_d_detalj);
q_x3=0;
q_y3=-(G_d+q_d+G_d_detalj);
q_x4=0;
q_y4=-(G_d);

ey=[0 0; 0 0; 0 0; 0 0]; % y-koordinaterna för de fyra elementen
ep=[E A_t I_t]; % Materialdata
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]; % Topologimatrix

% Lastvektor för jämnt utbredda laster
eq=[q_x1 q_y1; q_x2 q_y2; q_x3 q_y3; q_x4 q_y4];

K=zeros(Na); % Fördefinierar storleken på global styvhetsmatrix K
f=zeros(Na,1); % Fördefinierar storleken på lastvektor

for i=1:Ne % For-loop som går igenom alla element.
    [Ke,fe]=beam2e(ex(i,:),ey(i,:),ep,eq(i,:)); % Beräknar styvhetsmatrix.
    [K,f]=assem(Edof(i,:),K,Ke,f,fe); % Gör assemblering
end

[a,fb]=solveq(K,f,bc); % Löser ekvationssystem på formen Ka=f

```

```

if v==5 % Tar ut deformationer av balken för villkor 5
deformation_t(:,j)=deformation_t(:,j)+a;
end

esM=zeros(n,Ne); % Fördefinierar storleken på matrisen esM
% innehållande värden på momentet [Nm]

figure(v)

if v==1
sgtitle('Utan förskjutning, fritt upplagd')
elseif v==2
sgtitle('Med förskjutning, fritt upplagd')
elseif v==3
sgtitle('Utan förskjutning, fast inspänd')
elseif v==4
sgtitle('Med förskjutning, fast inspänd')
elseif v==5
sgtitle('Utan förskjutning, fritt upplagd, ingen egentyngd')
end
subplot(1,2,1)

% Beräknar momentet för varje element samt plottar det i diagram
for i=1:Ne
[ed]=extract(Edof(i,:),a); % Tar ut förskjutning för varje
% element från globala förskjutningsmatrisen
[es,ed,ec]=beam2s(ex(i,:),ey(i,:),ep,ed,eq(i,:),n); % Funktion beam2s
% som beräknar snittkrafter och dess positioner
esM(:,i)=es(:,3)+esM(:,i);
explot=linspace(ex(i,1),ex(i,2),n);
plot(explot,-esM(:,i),Color);
hold on;
end

ylabel('Moment [Nm]')
xlabel('x-koordinat')

maxM(j,:)=maxM(j,:)+max(abs(esM));

% Plottar balken
grid on
grid minor
line([0 c],[0 0],'LineWidth',1,'color','black')
plot([0 c],[-0.07*10^5 -0.07*10^5],'^','color','black',...
'MarkerFaceColor','black','MarkerSize',8)

```

```

if v==1 || v==2 || v==5
% Placerar och lägger in text i legend
text([2.2 2.2],[0.45*10^5 0.45*10^5], '-----', 'color', 'r', 'FontSize', 14)
text([3 3],[0.45*10^5 0.45*10^5], ' Brottgränstillstånd', 'color', 'black')
text([2.2 2.2],[0.35*10^5 0.35*10^5], '-----', 'color', 'c', 'FontSize', 14)
text([3 3],[0.35*10^5 0.35*10^5], ' Karakteristisk', 'color', 'black')
text([2.2 2.2],[0.25*10^5 0.25*10^5], '-----', 'color', 'm', 'FontSize', 14)
text([3 3],[0.25*10^5 0.25*10^5], ' Frekvent', 'color', 'black')
text([2.2 2.2],[0.15*10^5 0.15*10^5], '-----', 'color', 'g', 'FontSize', 14)
text([3 3],[0.15*10^5 0.15*10^5], ' Kvasi-permanent', 'color', 'black')
text([2.2 2.2],[0.1*10^5 0.1*10^5], '-----', 'color', 'black', 'FontSize', 14)
text([3 3],[0.1*10^5 0.1*10^5], ' Balk', 'color', 'black')
text([2.2 2.2],[0.03*10^5 0.03*10^5], ' \Delta Brostöd', 'color', 'black')
else
% Placerar och lägger in text i legend för villkor 3 och 4
text([2.2 2.2],[1.9*10^5 1.9*10^5], '-----', 'color', 'r', 'FontSize', 14)
text([3 3],[1.9*10^5 1.9*10^5], ' Brottgränstillstånd', 'color', 'black')
text([2.2 2.2],[1.82*10^5 1.82*10^5], '-----', 'color', 'c', 'FontSize', 14)
text([3 3],[1.82*10^5 1.82*10^5], ' Karakteristisk', 'color', 'black')
text([2.2 2.2],[1.75*10^5 1.75*10^5], '-----', 'color', 'm', 'FontSize', 14)
text([3 3],[1.75*10^5 1.75*10^5], ' Frekvent', 'color', 'black')
text([2.2 2.2],[1.68*10^5 1.68*10^5], '-----', 'color', 'g', 'FontSize', 14)
text([3 3],[1.68*10^5 1.68*10^5], ' Kvasi-permanent', 'color', 'black')
text([2.2 2.2],[1.6*10^5 1.6*10^5], '-----', 'color', 'black', 'FontSize', 14)
text([3 3],[1.6*10^5 1.6*10^5], ' Balk', 'color', 'black')
text([2.2 2.2],[1.52*10^5 1.52*10^5], ' \Delta Brostöd', 'color', 'black')
end

% Beräknar tvärkraften för varje element samt plottar det i diagram
esV=zeros(n,Ne); % Fördefinierar storleken på matrisen esV innehållande
% värden på tvärkraften [N]
subplot(1,2,2)
for i=1:Ne
    [ed]=extract(Edof(i,:),a); % Tar ut förskjutning för varje element
    % från globala förskjutningsmatrisen
    [es,ed,ec]=beam2s(ex(i,:),ey(i,:),ep,ed,eq(i,:),n); % Funktion beam2s
    % som beräknar snittkrafter och dess positioner
    esV(:,i)=es(:,2)+esV(:,i);
    explot=linspace(ex(i,1),ex(i,2),n);
    plot(explot,-esV(:,i),Color)
    hold on
end

ylabel('Tvärkraft [N]')
xlabel('x-koordinat')

```

```

maxV(j,:)=maxV(j,:)+max(abs(esV));

% Plottar balken
grid on
grid minor
line([0 c],[0 0],'LineWidth',1,'color','black')
plot([0 c],[-0.07*10^5 -0.07*10^5],'^','color','black',...
      'MarkerFaceColor','black','MarkerSize',8)

% Placerar och lägger in text i legend
text([2.2 2.2],[1.4*10^5 1.4*10^5],'-----','color','r','FontSize',14)
text([3 3],[1.4*10^5 1.4*10^5],' Brottgränstillstånd','color','black')
text([2.2 2.2],[1.3*10^5 1.3*10^5],'-----','color','c','FontSize',14)
text([3 3],[1.3*10^5 1.3*10^5],' Karakteristisk','color','black')
text([2.2 2.2],[1.2*10^5 1.2*10^5],'-----','color','m','FontSize',14)
text([3 3],[1.2*10^5 1.2*10^5],' Frekvent','color','black')
text([2.2 2.2],[1.1*10^5 1.1*10^5],'-----','color','g','FontSize',14)
text([3 3],[1.1*10^5 1.1*10^5],' Kvasi-permanent','color','black')
text([2.2 2.2],[1*10^5 1*10^5],'-----','color','black','FontSize',14)
text([3 3],[1*10^5 1*10^5],' Balk','color','black')
text([2.2 2.2],[0.9*10^5 0.9*10^5],' \Delta Brostöd','color','black')

end
% Bestämmer maximalt moment och tvärkraft
maximaltM(:,v)=maximaltM(:,v)+max(maxM)';
maximaltV(:,v)=maximaltV(:,v)+max(maxV)';

end
disp(' ')
disp('Max-moment för respektive lastkombination och villkor');
Lastkombinering={'Brottgräns';'Karakteristisk';'Frekvent';'Kvasi-permanent'};
Villkor_1=maximaltM(:,1);
Villkor_2=maximaltM(:,2);
Villkor_3=maximaltM(:,3);
Villkor_4=maximaltM(:,4);
Villkor_5=maximaltM(:,5);
table_1=table(Lastkombinering,Villkor_1,Villkor_2,Villkor_3,...
              Villkor_4, Villkor_5);
disp(table_1)

disp('Max-tvärfkraft för respektive lastkombination och villkor');
Villkor_1=maximaltV(:,1);
Villkor_2=maximaltV(:,2);
Villkor_3=maximaltV(:,3);
Villkor_4=maximaltV(:,4);
Villkor_5=maximaltV(:,5);

```

```

table_2=table>Lastkombinering,Villkor_1,Villkor_2,Villkor_3,...
        Villkor_4, Villkor_5);
disp(table_2)

```

Moment och tvärkraftsdiagram tvärbalkar

Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b

Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b

Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b

Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b

Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b

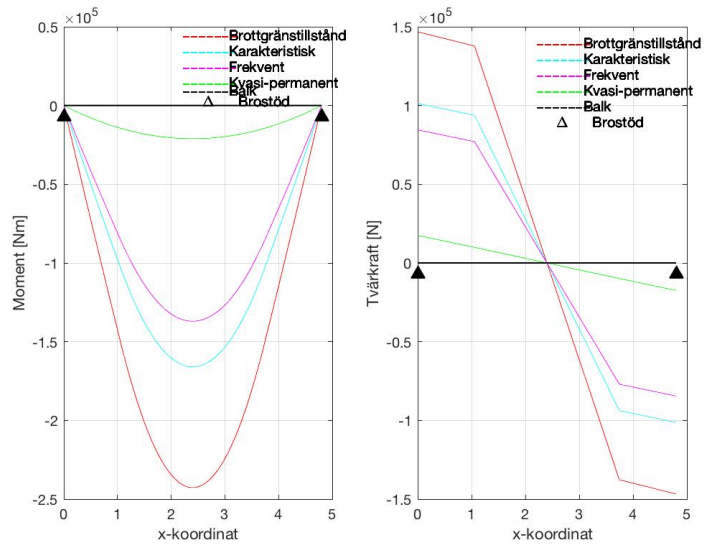
Max-moment för respektive lastkombination och villkor

Lastkombinering	Villkor_1	Villkor_2	Villkor_3	Villkor_4	Villkor_5
'Brottgräns'	2.427e+05	2.4245e+05	1.5205e+05	1.5532e+05	2.1737e+05
'Karakteristisk'	1.6599e+05	1.6583e+05	1.0416e+05	1.0634e+05	1.4492e+05
'Frekvent'	1.3701e+05	1.3687e+05	86132	87882	1.1593e+05
'Kvasi-permanent'	21076	21075	14031	14038	0

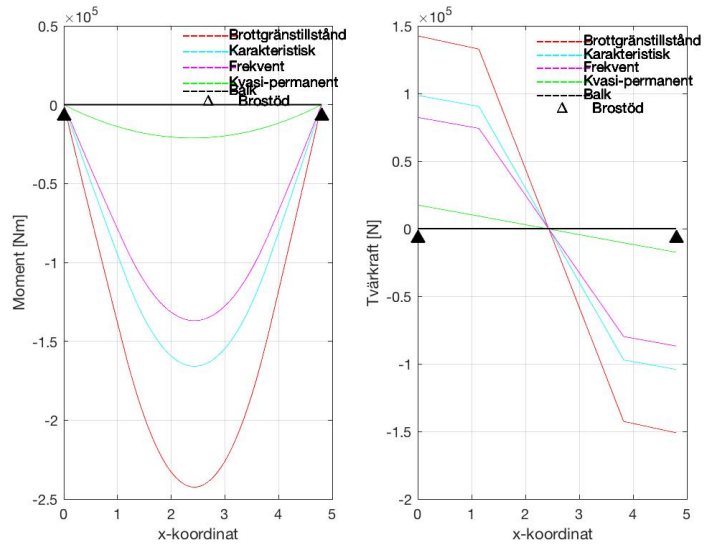
Max-tvärfkraft för respektive lastkombination och villkor

Lastkombinering	Villkor_1	Villkor_2	Villkor_3	Villkor_4	Villkor_5
'Brottgräns'	1.468e+05	1.5099e+05	1.468e+05	1.5243e+05	1.2583e+05
'Karakteristisk'	1.0134e+05	1.0414e+05	1.0134e+05	1.0509e+05	83887
'Frekvent'	84563	86801	84563	87567	67110
'Kvasi-permanent'	17453	17462	17453	17465	0

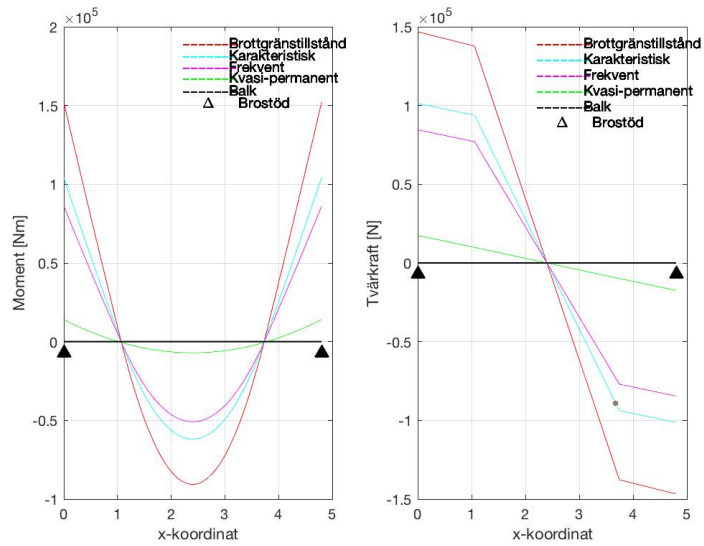
Utan förskjutning, fritt upplagd



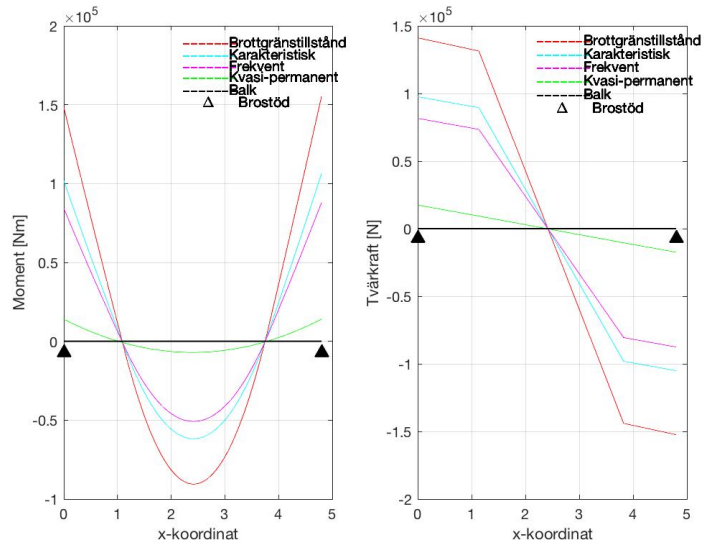
Med förskjutning, fritt upplagd



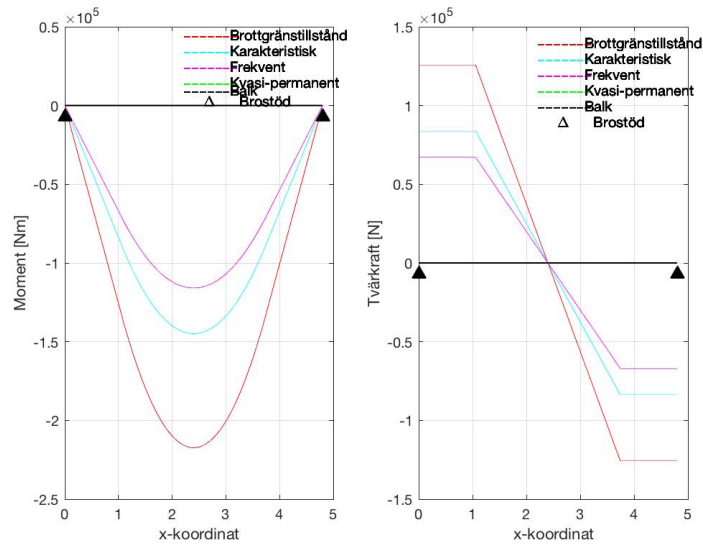
Utan förskjutning, fast inspänd



Med förskjutning, fast inspänd



Utan förskjutning, fritt upplagd, ingen egentygnd



Kontroll av kapacitet: Tvärbalkar

```

clc
disp('Kontroll kapacitet');

Ved_t=max(maximaltV(1,:)); % Dimensionerande tvärkraft [N]
Med_t=max(maximaltM(1,:)); % Dimensionerande moment [Nm]

% Tvärsnittsklass, beror på vilken profil man har! Böjmotstånd väljs
% utifrån högsta TK hos de plåtar som ingår i tvärsnittet TK livplåt
d_TK_t=hw_t-2*sqrt(2)*a_matt_t; % d för att bestämma TK
e_k_t=sqrt(235/(fy*10^-6)); % Epsilon i Tabell S4.2 i BK del 1
for i=d_TK_t/tw_t % Jämför d/tw med gränsvärden för slankhet
    if i<=72*e_k_t % Gränsvärde för TK1
        disp('Livplåten är i TK1')
    elseif 72*e_k_t>i<=83*e_k_t % Gränsvärden för TK2
        disp('Livplåten är i TK2')
    elseif 83*e_k_t>i<=124*e_k_t % Gränsvärden för TK3
        disp('Livplåten är i TK3')
    else
        disp('Livplåten är i TK4')
    end
end
end

```

```

%TK övre fläns (svetsad i plåt)
c_fs=((bf_bp-tw_t)/2)-sqrt(2)*a_matt_t; % c - fläns svetsad
for i=c_fs/tf_t % Jämför c/tf med gränsvärden för slankhet
    if i<=9*e_k_t % Gränsvärde för TK1
        disp('Övre yttre flänsar är i TK1')
    elseif 9*e_k_t>i<=10*e_k_t % Gränsvärden för TK2
        disp('Övre yttre flänsar är i TK2')
    elseif 10*e_k_t>i<=14*e_k_t % Gränsvärden för TK3
        disp('Övre yttre flänsar är i TK3')
    else
        disp('Övre yttre flänsar är i TK4')
    end
end

%TK nedre fläns (valsad)
c_fv=((bf_t-tw_t-2*sqrt(2)*a_matt_t)/2); % c- fläns valsad
for i=c_fv/tf_t % Jämför c/tf med gränsvärden för slankhet
    if i<=9*e_k_t % Gränsvärde för TK1
        disp('Nedre yttre flänsar är i TK1')
    elseif 9*e_k_t>i<=10*e_k_t % Gränsvärden för TK2
        disp('Nedre yttre flänsar är i TK2')
    elseif 10*e_k_t>i<=14*e_k_t % Gränsvärden för TK3
        disp('Nedre yttre flänsar är i TK3')
    else
        disp('Nedre yttre flänsar är i TK4')
    end
end

disp('Kontrollerar momentkapacitet');

% ----- Kontroll av Momentkapacitet enligt Eurokod 3 -----

Xlt=1; % Då ingen risk för vippning föreligger
ym1=1; % Vid beräkning av moment, gamma_M1
F_fu=fy*bp*bf_bp; % Kraft i övre fläns
F_fn=fy*tf_t*bf_t; % Kraft i nedre fläns
z_fu=(h_t+bp/2)-x_tp; % Avstånd från xtp till xtp för övre fläns
z_fn=x_tp-tf_t/2; % Avstånd från xtp till xtp för nedre fläns
F_wu=fy*(hw_t-(x_tp-tf_t))*tw_t; % Kraft i övre liv (över xtp)
F_wn=fy*(x_tp-tf_t)*tw_t; % Kraft i nedre liv (under xtp)
z_wu=(h_t-x_tp)/2; % Avstånd från xtp till xtp för övre liv
z_wn=(x_tp-tf_t)/2; % Avstånd från xtp till xtp för nedre liv

% Tvärsnittets plastiska momentkapacitet
Mpl_t=(F_fu*z_fu)+(F_fn*z_fn)+(F_wu*z_wu)+(F_wn*z_wn);

```

```

Wpl_t=Mpl_t/fy; % Plastiskt böjmotstånd för tvärsnittet

Mrd_t=fy*Xlt*Wpl_t/ym1; % Beräkning av plastisk momentkapacitet
if Mrd_t>Med_t % Jämför tvärsnittets kapacitet med dimensionerande moment
    disp('Momentkapacitet OK!')
else
    disp('Momentkapacitet ej OK!')
end

disp('Kontrollerar risk för skjuvbuckling');

% ----- Kontroll av tvärkraftskapacitet enligt Eurokod 3 -----

% Kontroll Skjuvbuckling % Antar styva ändstyvningar, inga
% mellanliggande avstyvninagar

eta=1.2; % eta=1.2 stålkvalitéer upp tom S460
kt_t=5.34; % Gäller för balkar m tvärgående avstyvningar endast över upplag (ändavstyvning:

lambdaw_t=(hw_t/tw_t)/(37.4*e_k_t*sqrt(kt_t)); %Ekvation S5-21 i BK del 1
% Beräknar Xw från tabell S5.1.
for i=lambdaw_t % Jämför lambdaw med slankhetsgränserna
    if i<0.8/eta
        Xw_t=eta;
    elseif 0.8/eta<=i<1.08
        Xw_t=0.83/i;
    else
        Xw_t=1.37/(0.7+i);
    end
end

Av_t=eta*hw_t*tw_t; % Beräknar skjuvarean, s.S83 i BK del 1
ym0=1; ym1=1; % gamma_0 och gamma_1

% Beräkningsgång för oavstyvad livplåt
for i=hw_t/tf_t % Jämför hw/tf för tvärbalkens liv med gränserna i S.5-19
    if i<72*e_k_t/eta
        disp('Tvärsnittet riskerar ej skjuvbuckling')
        VRd_t=Av_t*fy/(sqrt(3)*ym0); % VRd=VplRd, Om tvärsnitt
        % inte riskerar skjuvbuckling
    else %i>72*e_k_t/eta
        disp('Tvärsnittet riskerar skjuvbuckling')
        VRd_t=Xw_t*hw_t*tw_t*fy/(sqrt(3)*ym1); % VRd=VbwRd, Om tvärsnittet
        % riskerar skjuvbuckling
    end
end
end

```

```

disp('Kontrollerar tvärkraftskapacitet');
if VRd_t>Ved_t % Jämför tvärsnittets kapacitet med dim. tvärkraft
    disp('Tvärcraftskapacitet OK!')
else
    disp('Tvärcraftskapacitet ej OK!')
end

disp('Kontrollerar om interaktion mellan moment och tvärkraft behöver kontrolleras');

% ----- Interaktion mellan tvärkraft och moment -----

MfRd_t=(F_fu*z_fu)+(F_fn*z_fn); % Flänsarnas plastiska momentkapacitet
MplRd_t=Mpl_t; % Hela tvärsnittets plastiska momentkapacitet
VbwRd_t=Xw_t*hw_t*tw_t*fy/(sqrt(3)*ym1); % Livplätens tvärkraftskapacitet

% Kontrollerar om interaktion mellan moment och tvärkraft behöver
% kontrolleras samt kontrollerar det i så fall
for i=MfRd_t & j==VbwRd_t*0.5 % Jämför MfRd och VbwRd med kraven
    % för interaktion
    if (i>Med_t && 2*j>Ved_t) || j>Ved_t
        disp('Ingen interaktion behöver kontrolleras')
    else
        disp('Interaktion behöver kontrolleras')
        % Enligt ekvation S.5-22 i BK del 1
        M=MfRd_t+(MplRd_t-MfRd_t)*(1-((2*Ved_t/VbwRd_t)-1)^2);
        if M>=Med_t
            disp('Interaktion OK!')
        else
            disp('Interaktion ej OK!')
        end
    end
end

% Utnyttjandegrad för moment
disp('UTNYTTJANDEGRAD - moment');

disp(Med_t/Mrd_t)

% Utnyttjandegrad för tvärkraft
disp('UTNYTTJANDEGRAD - tvärkraft');

disp(Ved_t/VRd_t)

Kontroll kapacitet

```

```

Livplåten är i TK1
Övre yttre flänsar är i TK2
Nedre yttre flänsar är i TK1
Kontrollerar momentkapacitet
Momentkapacitet OK!
Kontrollerar risk för skjuvbuckling
Tvärsnittet riskerar ej skjuvbuckling
Kontrollerar tvärkraftskapacitet
Tvärkraftskapacitet OK!
Kontrollerar om interaktion mellan moment och tvärkraft behöver kontrolleras
Interaktion behöver kontrolleras
Interaktion OK!
UTNYTTJANDEGRAD - moment
    0.5004

UTNYTTJANDEGRAD - tvärkraft
    0.3296

```

Kontroll Mittnedböjning: Tvärbalkar

```

clc
disp('Beräknad nedböjning i tvärbalkar för villkor 1');
    % Lastkombination 1 - brottgränstillstånd 6.10a & 6.10b
    % Lastkombination 2 - karakteristisk 6.14b
    % Lastkombination 3 - frekvent 6.15b
    % Lastkombination 4 - kvasi-permanent 6.16b
figure
Nedbojning_tvarbalk=zeros(1,3); %Fördefinierar storleken på vektorn
for j=2:4 % For-loop för att beräkna nedböjningen
v_t=abs(deformation_t(8,j)); % Tar ut mittnedböjning för tvärbalkarna
Nedbojning_tvarbalk(1,j-1)=Nedbojning_tvarbalk(1,j-1)+v_t;

KRAV=c/600; % Trvk bro11, Största tillättna mittnedböjning för tvärbalkarna

if j==2
    disp('KARAKTERISTISK - Kontroll nedböjning');
elseif j==3
    disp('FREKVENT - Kontroll nedböjning');
elseif j==4
    disp('KVASI-PERMANENT - Kontroll nedböjning');
end

if v_t<=KRAV % Jämför den beräknade mittnedböjningen med den tillättna
    disp('Nedböjning OK')

```

```

elseif v_t>KRAV
    disp('Nedböjning EJ OK')
end

% Plottar nedböjningen
grid on
grid minor
title('Nedböjning tvärbalkar')
xlabel('Längd [m]')
ylabel('Nedböjning [mm]')

% Fixar texten i legend
text([3 3],[0.9 0.9], '-----', 'color', 'red', 'FontSize', 14)
text([3.3 3.3],[0.9 0.9], ' Karakteristisk', 'color', 'black')
text([3 3],[0.8 0.8], '-----', 'color', 'blue', 'FontSize', 14)
text([3.3 3.3],[0.8 0.8], ' Frekvent', 'color', 'black')
text([3 3],[0.7 0.7], '-----', 'color', 'magenta', 'FontSize', 14)
text([3.3 3.3],[0.7 0.7], ' Kvasi-permanent', 'color', 'black')
text([3 3],[0.6 0.6], '-----', 'color', 'black', 'FontSize', 14)
text([3.3 3.3],[0.6 0.6], ' Balk', 'color', 'black')
text([3 3],[0.5 0.5], ' \Delta Brostöd', 'color', 'black')

ex=[0 (c/2-b_lastspredning/2);
    (c/2-b_lastspredning/2) (c/2);
    (c/2) (c/2+b_lastspredning/2);
    (c/2+b_lastspredning/2) c]; % x-koordinaterna för tvärbalken

plotpar1=[2 1 0]; % Bestämmer färg på graf mm
eldraw2(ex,ey,plotpar1); % Plottar den odefornerade balken
eb=extract(Edof,deformation_t(:,j)); % Extraherar deformationer från den
% globala deformationsvektorn med hänsyn till topologimatriken

if j==2 % Definerar olika färger för de olika lastkombinationerna
    plotpar1b=[1 4 0];
elseif j==3
    plotpar1b=[1 2 0];
elseif j==4
    plotpar1b=[1 3 0];
end
sfac=scalfact2(ex,ey,eb); % Beräknar skalfaktorn
eldisp2(ex,ey,eb,plotpar1b); % Plottar den deformerade balken
hold on

% Plottar balken och dess stöd
axis([0 c -0.5 1]) % Definerar x- resp y-axeln
line([0 c],[0 0], 'LineWidth', 1, 'color', 'black') % Plottar balken

```

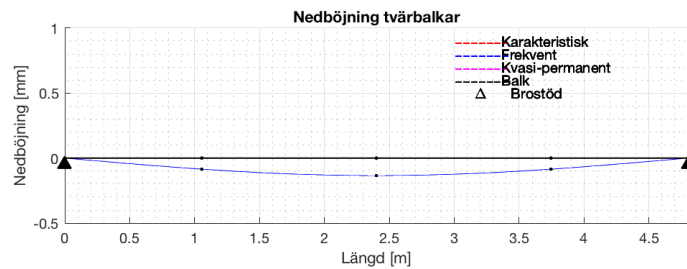
```

plot([0 c],[ -0.05 -0.05],'^','color','black','MarkerFaceColor',...
      'black','MarkerSize',8) % Plottar stöden

end
% Skriver ut nedböjningen för de olika lastkombinationerna
disp('NEDBÖJNING - TVÄRBALK');
disp('Karakteristisk Frekvent Kvasi-permanent')
disp(Nedbojning_tvarbalk)

Beräknad nedböjning i tvärbalkar för villkor 1
KARAKTERISTISK - Kontroll nedböjning
Nedböjning EJ OK
FREKVENT - Kontroll nedböjning
Nedböjning OK
KVASI-PERMANENT - Kontroll nedböjning
Nedböjning OK
NEDBÖJNING - TVÄRBALK
Karakteristisk Frekvent Kvasi-permanent
0.0097 0.0078 0

```



Kontroll av svetsar: Tvärbalkar + bottenplatta (plåt)

```
clc
```

```

a_matt_plat=0.005; % a-mått för svets mellan plåt och huvudbalkens livplåt
a_matt_underflans=0.011; % a-mått för svets mellan tvärbalkens
                        % underfläns och huvudbalkens liv
a_matt_liv=0.003; % a-mått för svets mellan tvärbalkens
                  % liv och huvudbalkens liv
a_matt_t=0.003; % a-mått för tvärbalkens halssvetsar

% ----- Svets mellan plåt och huvudbalkar -----

% Här får vi endast vinkelräta spänningar (sigma_vinkel och tau_vinkel)
disp('Kontroll svets mellan plåt och huvudbalkar');
Lj_plat=cc; % Svetslängd
BL_w1_plat=1.2-(0.2*Lj_plat/(150*a_matt_plat));

if Lj_plat<=150*a_matt_plat
    L_plat=Lj_plat;
elseif Lj_plat>150*a_matt_plat
    L_plat=BL_w1_plat*Lj_plat;
end

% Vi vill undersöka spänningarna för plåten som är svetsad mot livet.
% Störst moment fås där tvärbalken antas vara fast inspänd utan
% förskjutning (villkor 3).

% Får vinkelräta spänningar enligt ekvation (S9-3) i BK2. Kraften som sätts
% in i denna ekvation uppkommer från momentet. Kraften på svetsen, mellan
% plåten (fungerar som tvärbalkens övre fläns) och livplåten på
% huvudbalken, kommer att bli lika stor som kraften på svetsen mellan
% tvärbalkens undre fläns och huvudbalkens livplåt. Denna kraft räknas ut
% genom att dela momentet, som uppkommer från belastningen på tvärbalken,
% med tvärsnittets höjd.

Med_flans=maximaltM(1,4); % Dimensionerande moment, vilket är
% då tvärbalken är fast inspänd med förskjutning (villkor 4).

% Spänningar:

M_kraft_plat=Med_flans/(h_t); % Kraften som ersätter momentet vid svetsen
% mellan livplåt på huvudbalk och bottenplatta (plåt)

sigma_vinkel_plat=M_kraft_plat/(sqrt(2)*a_matt_plat*L_plat);
tau_vinkel_plat=sigma_vinkel_plat; % Vertikala skjuvspänningar i svetsen
sigma_j_plat=sqrt(sigma_vinkel_plat^2+3*tau_vinkel_plat^2); % Jmfspänning

% Kontroll:

```

```

Bw=0.9; % Korrelationsfaktor som beror av stålaterialet
ym2=1.25; % Partialkoefficient för svetsens bärförmåga
Kontroll1_plat=fu/(Bw*ym2); % För att svetsen ska ha tillräcklig
% bärförmåga måste spänningarna vara mindre än detta uttryck och ...
Kontroll2_plat=0.9*fu/ym2; % ... även uppfylla detta krav

% Kontroll om villkoren för svetsens uppfylls
if sigma_j_plat<=Kontroll1_plat && sigma_vinkel_plat<=Kontroll2_plat
    disp('Bärförmåga OK')
elseif sigma_j_plat>Kontroll1_plat || sigma_vinkel_plat>Kontroll2_plat
    disp('Bärförmåga EJ OK')
end

% ----- Svets mellan underfläns på tvärbalk och livplåt på huvudbalk
% -----

% Samma typ av spänningar som uppkommer i denna svets som i svetsen mellan
% plåt och huvudbalkens liv, alltså endast vertikala spänningar.

disp('Kontroll svets mellan underfläns tvärbalk och livplåt huvudbalk');
Lj_underflans=bf_t-tw_t; % Svetslängd
% Reduktionsfaktor som används för att bestämma nyttig svetslängd
BL_w1_underflans=1.2-(0.2*Lj_underflans/(150*a_matt_underflans));

if Lj_underflans<=150*a_matt_underflans % Bestämning av nyttig svetslängd
    L_underflans=Lj_underflans;
elseif Lj_underflans>150*a_matt_underflans
    L_underflans=BL_w1_underflans*Lj_underflans;
end

% Vi vill undersöka spänningarna vid undre flänsen och huvudbalkens liv.
% Störst moment fås där tvärbalken antas vara fast inspänd tillsammans med
% en viss förskjutning av spåret (villkor 4).

% Får vinkelräta spänningar enligt ekvation (S9-3) i BK2. Kraften som sätts
% in i denna ekvation uppkommer från momentet. Kraften på svetsen, mellan
% plåten (fungerar som tvärbalkens övre fläns) och livplåten på
% huvudbalken, kommer att bli lika stor som kraften på svetsen mellan
% tvärbalkens undre fläns och huvudbalkens livplåt. Denna kraft räknas ut
% genom att dela momentet, som uppkommer från belastningen på tvärbalken,
% med tvärsnittets höjd.

Med_flans=maximaltM(1,4); % Dimensionerande moment, som verkar längst

```

```

                                % ut på tvärbalken

% Soänningar:

M_kraft_underflans=Med_flans/(hw_t); % Kraften som ersätter momentet
% vid svetsen mellan livplåt på huvudbalk och bottenfläns på tvärbalk
sigma_vinkel_underflans=M_kraft_underflans/(sqrt(2)*...
    a_matt_underflans*L_underflans); % Vertikala normalspänningar i svetsen
tau_vinkel_underflans=sigma_vinkel_underflans; % Vertikala skjuvspänningar
sigma_j_underflans=sqrt(sigma_vinkel_underflans^2+...
    3*tau_vinkel_underflans^2); % Jämförelsespänning

% Kontroll:

Bw=0.9; % Korrelationsfaktor som beror av stålaterialet
ym2=1.25; % Partialkoefficient för svetsens bärförmåga
Kontroll1_underflans=fu/(Bw*ym2); % För att svetsen ska ha tillräcklig
% bärförmåga måste spänningarna vara mindre än detta uttryck och ...
Kontroll2_underflans=0.9*fu/ym2; % ... även uppfylla detta krav

% Kontroll om villkoren för svetsens uppfylls
if sigma_j_underflans<=Kontroll1_underflans &&...
    sigma_vinkel_underflans<=Kontroll2_underflans
    disp('Bärförmåga OK')
elseif sigma_j_underflans>Kontroll1_underflans ||...
    sigma_vinkel_underflans>Kontroll2_underflans
    disp('Bärförmåga EJ OK')
end

% ----- Svetsar mellan tvärbalkarnas liv och huvudbalkarnas liv
% ----- Det antas att livet endast bär vertikala krafter och därmed
% kommer det endast att uppstå parallella skjuvspänningar enligt ekv.
% (S9-1) i BK2.

disp('Kontroll svets mellan tvärbalkarnas- och huvudbalkarnas liv');
Lj_liv=hw_t; % Svetslängd
BL_w1_liv=1.2-(0.2*Lj_liv/(150*a_matt_liv)); % Reduktionsfaktor som
% används för att bestämma nyttig svetslängd

if Lj_liv<=150*a_matt_liv % Bestämning av nyttig svetslängd
    L_liv=Lj_liv;
elseif Lj_liv>150*a_matt_liv
    L_liv=BL_w1_liv*Lj_liv;
end

```

```

% Här undersöks villkoret för lastfall då spåret är förskjutet med en viss
% excentricitet vilket ger störst tvärkraft. Därmed används villkor 4 (Med
% förskjutning och fast inspänd).

% Spänning:

Ved_liv=maximaltV(1,4);
% Skjuvspänning parallellt med svetslängden
tau_parallell_liv=Ved_liv/(2*L_liv*a_matt_liv);
sigma_j_liv=sqrt(3*(tau_parallell_liv^2)); % Jämförelsespänning

% Kontroll:

Bw=0.9; % Korrelationsfaktor som beror av stålaterialet
ym2=1.25; % Partialkoefficient för svetsens bärförmåga
Kontroll1=fu/(Bw*ym2); % Här behöver endast kontroll 1 göras
% ty har inga vertikala spänningar.

if sigma_j_liv<=Kontroll1 % Kontroll om villkoren för svetsens uppfylls
    disp('Bärförmåga OK')
elseif sigma_j_liv>Kontroll1
    disp('Bärförmåga EJ OK')
end

% ----- Övre halssvetsar på tvärbalkarna -----

% Spänningar som uppkommer i dessa svetsar är vertikala spänningar från
% utbredda lasten (tåglast, ballast) i tvärlid samt parallella spänningar
% från tvärkraften. De vertikala spänningarna kommer att vara störst i
% mitten av tvärbalkarna, ty det är här tåglasten verkar. Däremot kommer de
% parallella spänningarna att bli störst längst ut på kanterna av
% tvärbalkarna, ty här är tvärkraften som störst. För att inte behöva
% undersöka spänningen som uppkommer i övre halssvetsarna på flera ställen,
% kan slutsatsen dras att de vertikala spänningarna, som uppkommer i mitten
% av tvärbalken, kommer bli mycket små då lasten verkar på längden 2,7
% meter. Därmed undersöks endast de övre halssvetsarna på tvärbalkarna
% precis intill där tvärbalken fäster mot huvudbalken.

% Lastmodellen som används när beräkning av de övre halssvetsarna för
% tvärbalkarna ska göras är att tvärkraften ger upphov till parallella
% spänningar och endast ballast ger upphov till vertikala spänningar längst
% ut på tvärbalkarna (tåglasten sprids inte ända ut till slutet av
% tvärbalkarna).

```

```

disp('Kontroll halssvets tvärbalkar');

L=1; % Nyttig längd som den utbredda lasten från ballast och bottenplatta
      % och i tvärled verkar på
S=(hw_t/2)*(bp*cc); % Beräkning av tvärbalkens fläns statiska moment

% Här undersöks villkoret för lastfall då spåret är förskjutet med en viss
% excentricitet vilket ger störst tvärkraft. Därmed använder vi t.ex.
% villkor 4 (Med förskjutning och fast inspänd).

Ved_halssvets_tvarb=maximaltV(1,4); % Tvärkraft från villkor 4

G_b_halssvets= Xi*gamma_Gjsup*G_ballast; % Utbredda lasten från ballast

% Spänningar:

tau_parallell_halssvets_tvarb=Ved_halssvets_tvarb*S/...
    (I_t*2*a_matt_t); % Skjuvspänning parallellt med svetslängden
tau_vinkelrat_halssvets_tvarb=G_b_halssvets*L/(2*sqrt(2)*...
    L*a_matt_t); %Skjuvspänning vinkelrätt med svetslängden
% Normalspänning vinkelrät svetslängden:
sigma_vinkelrat_halssvets_tvarb=tau_vinkelrat_halssvets_tvarb;
% Jämförelsespänning:
sigma_j_halssvets_tvarb=sqrt(sigma_vinkelrat_halssvets_tvarb^2+...
    3*(tau_parallell_halssvets_tvarb^2+tau_vinkelrat_halssvets_tvarb^2));

% Kontroll
Bw=0.9; % Korrelationsfaktor som beror av stålaterialet
ym2=1.25; % Partialkoefficient för svetsens bärförmåga
Kontroll1=fu/(Bw*ym2); % För att svetsen ska ha tillräcklig bärförmåga
      % måste spänningarna vara mindre än detta uttryck och ...
Kontroll2=0.9*fu/ym2; % ... även uppfylla detta krav

% Kontroll om villkoren för svetsens uppfylls
if sigma_j_halssvets_tvarb<=Kontroll1 &&...
    sigma_vinkelrat_halssvets_tvarb<=Kontroll2
    disp('Bärförmåga OK')
elseif sigma_j_halssvets_tvarb>Kontroll1 || sigma_vinkelrat_halssvets_tvarb>Kontroll2
    disp('Bärförmåga EJ OK')
end

% Nedre halssvetsar behöver EJ kontrolleras ty dessa utsätts för lika stora
% parallella spänningar men inte av några vertikala spänningar. Därmed
% sätts även dessa svetsars a-mått till lika stor som de övre
% halssvetsarna.

```

```

Kontroll svets mellan plåt och huvudbalkar
Bärförmåga OK
Kontroll svets mellan underfläns tvärbalk och livplåt huvudbalk
Bärförmåga OK
Kontroll svets mellan tvärbalkarnas- och huvudbalkarnas liv
Bärförmåga OK
Kontroll halssvets tvärbalkar
Bärförmåga OK

```

Laster som verkar på bottenplattan

Dimensioner - slipers enligt banstandard i Göteborg

```
clc
```

```

% Lastspridning sker enligt 1:4
% Längden på lastspridning i längsled
L_lastspridning=h_lastspridning*(1/4)*2+b_sliper;

% Variabla laster i tvärbalkens riktning (Trafiklast) Variabel Punktlast
% från lok
Q_vk_t=250*10^3; % Karakteristisk punktlast från lok, axellast [N]
Q_vd_t=Q_vk_t*alpha*phi; % Dimensionerande punktlast från lok [N]
q_vd_L=Q_vd_t/(2*L_lastspridning); % Axellasten sprider sig på tre stycken
% slipers, där den mest belastade blir belastad med Q_vd_t/2, [N/m]

% Permanenta laster i längdled(egentyngd)
G_stal_L=stal*bp*c; % Egentyngd plåten [N/m]
G_ballast_L=ballast*c*h_b; % Egentyngd ballast [N/m]
G_detalj_L=(detalj*2); % 2 stycken räl [N/m]
% Total egentyngd i längdled för plåten [N/m]
G_bs_L=G_ballast+G_stal+G_detalj_L;

```

Lasteffekt för bottenplattan i längdled

```

disp('BOTTENPLATTAN')
Ne=4; % Antal element
Na=15; % Antal frihetsgrader
N_lastfall=4; % Antal lastfall som kontrolleras
n=100; % Antal undersökta punkter

maxM=zeros(N_lastfall,Ne); % Fördefinierar storleken på matrisen maxM
maxV=zeros(N_lastfall,Ne); % Fördefinierar storleken på matrisen maxV

```

```

% Fördefinierar storleken på matrisen Deformation_plat
Deformation_plat=zeros(15,4);

figure
for j=1:4
    lastkombination=j; % For-sats som tar fram lasteffekten
    if j==1 % Lastkombination 1 ska ge röd plot i grafen
        Color='r';
    elseif j==2 % Lastkombination 2 ska ge ljusblå färg i grafen
        Color='c';
    elseif j==3 % Lastkombination 3 ska ge rosa färg i grafen
        Color='m';
    elseif j==4 % Lastkombination 4 ska ge grön färg i grafen
        Color='g';
    end

% ----- LASTKOMBINATION 1 // 6.10a & 6.10b -----
if lastkombination==1

% Permanent last
G_da = gamma_Gjsup*G_bs_L; % Egentyngd stål och ballast [N/m]
G_db = Xi*gamma_Gjsup*G_bs_L;

% Variabla laster (från tågtrafik)

q_da = gamma_Q*psi_0*q_vd_L; % Utbredd last [N/m]
q_db = gamma_Q*q_vd_L;

% Kontrollerar om 6.10a eller 6.10b är dimensionerande i vårt fall
Eda=gamma_d*(G_da+q_da);
Edb=gamma_d*(G_db+q_db);

if Eda>Edb
    disp('Permanent lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10a')
    G_d = G_da;
    q_d = q_da;

elseif Eda<Edb
    disp('Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b')
    G_d = G_db;
    q_d = q_db;
end

% ----- LASTKOMBINATION 2 // 6.14b -----
elseif lastkombination==2

```

```

% Permanent last
G_d = gamma_d*G_bs_L;

% Variabel last
q_d = gamma_d*q_vd_L;

% ----- LASTKOMBINATION 3 // 6.15b -----
elseif lastkombination==3
% Permanent last
G_d = gamma_d*G_bs_L;

% Variabel last
q_d = gamma_d*psi_1*q_vd_L;

% ----- LASTKOMBINATION 4 // 6.16b -----
elseif lastkombination==4
% Permanent last
G_d = gamma_d*G_bs_L;

% Variabel last
q_d = 2*psi_2*gamma_d*q_vd_L; % [N/m]

end

% ----- Beräkning av moment och tvärkraft -----

% Utbredda laster [N/m]
q_x1=0;
q_y1=-(G_d);
q_x2=0;
q_y2=-(G_d+q_d);
q_x3=0;
q_y3=-(G_d+q_d);
q_x4=0;
q_y4=-(G_d);

ex=[0 (cc/2-L_lastspredning/2);
(cc/2-L_lastspredning/2) cc/2;
cc/2 (cc/2+L_lastspredning/2);
(cc/2+L_lastspredning/2) cc]; % x-koordinater för plåten

ey=[0 0; 0 0; 0 0; 0 0]; % y-koordinaterna för de fyra elementen
ep=[E A_plat I_plat]; % Materialdata
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]; % Topologimatrix

```

```

bc=[1 0; 2 0; 3 0; 13 0; 14 0; 15 0];           % Upplagsvillkor

% Lastvektor utbredda laster
eq=[q_x1 q_y1; q_x2 q_y2; q_x3 q_y3; q_x4 q_y4];

K=zeros(Na); % Fördefinierar storleken på global styvhetsmatris K
f=zeros(Na,1); % Fördefinierar storleken på lastvektor

for i=1:Ne % For-loop som går igenom alla element.
    [Ke,fe]=beam2e(ex(i,:),ey(i,:),ep,eq(i,:)); % Beräknar styvhetsmatris.
    [K,f]=assem(Edof(i,:),K,Ke,f,fe); % Gör assemblering
end

[a,fb]=solveq(K,f,bc); % Löser ekvationssystem på formen Ka=f
Deformation_plat(:,j)=Deformation_plat(:,j)+a; % Tar ut def. av plåten

esM=zeros(n,Ne); % Fördefinierar storleken på matrisen esM
                % innehållande värden på momentet [Nm]
subplot(1,2,1)
for i=1:Ne
    [ed]=extract(Edof(i,:),a); % Tar ut förskjutning för varje element
    % från globala förskjutningsmatrisen
    [es,ed,ec]=beam2s(ex(i,:),ey(i,:),ep,ed,eq(i,:),n); % Funktion beam2s
    % som beräknar snittkrafter och dess positioner
    esM(:,i)=es(:,3)+esM(:,i);
    explot=linspace(ex(i,1),ex(i,2),n);
    plot(explot,-esM(:,i),Color);
    hold on;
end

maxM(j,:)=maxM(j,:)+max(abs(esM));

if j==1
    Med=max(abs(esM(:,1))); % Dimensionerande moment för plåten [N/m]
end

% Plottar plåten
grid on
grid minor
axis([0 cc -1.5*10^4 2.5*10^4])
line([0 cc],[0 0], 'LineWidth',1, 'color', 'black')
plot([0 cc],[-0.07*10^4 -0.07*10^4], '^', 'color', 'black', ...
    'MarkerFaceColor', 'black', 'MarkerSize',8)

% Placerar och lägger in text i legend

```

```

text([0.12 0.12],[2.4*10^4 2.4*10^4], '-----', 'color', 'r', 'FontSize', 14)
text([0.2 0.2],[2.4*10^4 2.4*10^4], 'Brottgränstillstånd', 'color', 'black')
text([0.12 0.12],[2.26*10^4 2.26*10^4], '-----', 'color', 'c', 'FontSize', 14)
text([0.2 0.2],[2.26*10^4 2.26*10^4], 'Karakteristisk', 'color', 'black')
text([0.12 0.12],[2.12*10^4 2.12*10^4], '-----', 'color', 'm', 'FontSize', 14)
text([0.2 0.2],[2.12*10^4 2.12*10^4], 'Frekvent', 'color', 'black')
text([0.12 0.12],[1.96*10^4 1.96*10^4], '-----', 'color', 'g', 'FontSize', 14)
text([0.2 0.2],[1.96*10^4 1.96*10^4], 'Kvasi-permanent', 'color', 'black')
text([0.12 0.12],[1.82*10^4 1.82*10^4], '-----', 'color', 'black', 'FontSize', 14)
text([0.2 0.2],[1.82*10^4 1.82*10^4], 'Balk', 'color', 'black')
text([0.12 0.12],[1.68*10^4 1.68*10^4], ' \Delta Brostöd', 'color', 'black')

esV=zeros(n,Ne); % Fördefinierar storleken på matrisen esV
                % innehållande värden på tvärkraften [N]
subplot(1,2,2)
for i=1:Ne
    [ed]=extract(Edof(i,:),a); % Tar ut förskjutning för varje element
                                % från globala förskjutningsmatrisen
    [es,ed,ec]=beam2s(ex(i,:),ey(i,:),ep,ed,eq(i,:),n); % Funktion beam2s
                                % som beräknar snittkrafter och dess positioner
    esV(:,i)=es(:,2)+esV(:,i);
    explot=linspace(ex(i,1),ex(i,2),n);
    plot(explot,-esV(:,i),Color)
    hold on
end

maxV(j,:)=maxV(j,:)+max(abs(esV));
if j==1
    Ved=max(abs(esV(:,1))); % Tar ut dimensionerande tvärkraft [N]
end

% Plottar plåten
grid on
grid minor
axis([0 cc -3*10^5 3*10^5])
line([0 cc],[0 0], 'color', 'black', 'LineWidth', 1)
plot([0 cc],[ -0.07*10^5 -0.07*10^5], '^', 'color', 'black', ...
     'MarkerFaceColor', 'black', 'MarkerSize', 8)

% Placerar och lägger in text i legend
text([0.2 0.2],[2.8*10^5 2.8*10^5], '-----', 'color', 'r', 'FontSize', 14)
text([0.28 0.28],[2.8*10^5 2.8*10^5], 'Brottgränstillstånd', 'color', 'black')
text([0.2 0.2],[2.6*10^5 2.6*10^5], '-----', 'color', 'c', 'FontSize', 14)
text([0.28 0.28],[2.6*10^5 2.6*10^5], 'Karakteristisk', 'color', 'black')
text([0.2 0.2],[2.4*10^5 2.4*10^5], '-----', 'color', 'm', 'FontSize', 14)
text([0.28 0.28],[2.4*10^5 2.4*10^5], 'Frekvent', 'color', 'black')

```

```

text([0.2 0.2],[2.2*10-5 2.2*10-5],'------','color','g','FontSize',14)
text([0.28 0.28],[2.2*10-5 2.2*10-5],' Kvasi-permanent','color','black')
text([0.2 0.2],[2*10-5 2*10-5],'------','color','black','FontSize',14)
text([0.28 0.28],[2*10-5 2*10-5],' Balk','color','black')
text([0.2 0.2],[1.8*10-5 1.8*10-5],' \Delta Brostöd','color','black')

end
disp(' ')
disp('Max-moment för lastfall 1:4 för respektive element');
Lastfall={'Brottgräns','Karakteristisk','Frekvent','Kvasi-permanent'};
Element_1=maxM(:,1);
Element_2=maxM(:,2);
Element_3=maxM(:,3);
Element_4=maxM(:,4);
table_1=table(Lastfall,Element_1,Element_2,Element_3,Element_4);
disp(table_1);

disp('Max-tvärkraft för lastfall 1:4 för respektive element');
Lastfall={'Brottgräns','Karakteristisk','Frekvent','Kvasi-permanent'};
Element_1=maxV(:,1);
Element_2=maxV(:,2);
Element_3=maxV(:,3);
Element_4=maxV(:,4);
table_2=table(Lastfall,Element_1,Element_2,Element_3,Element_4);
disp(table_2);

```

BOTTENPLATTAN

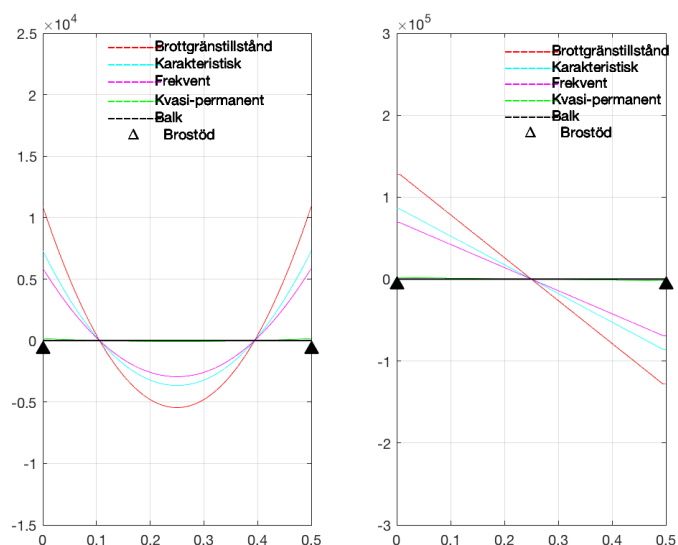
Variabla lasten är dimensionerande, använd ekv 6.10b

Max-moment för lastfall 1:4 för respektive element

Lastfall	Element_1	Element_2	Element_3	Element_4
'Brottgräns'	10898	10257	10257	10898
'Karakteristisk'	7299.2	6869.6	6869.6	7299.2
'Frekvent'	5873.4	5527.7	5527.7	5873.4
'Kvasi-permanent'	170.17	160.06	160.06	170.17

Max-tvärkraft för lastfall 1:4 för respektive element

Lastfall	Element_1	Element_2	Element_3	Element_4
'Brottgräns'	1.2828e+05	1.2824e+05	1.2824e+05	1.2828e+05
'Karakteristisk'	85929	85888	85888	85929
'Frekvent'	69152	69111	69111	69152



Kontroll av kapacitet och nedböjning - Bottenplatta (plåt)

```

clc
% ----- Kontroll av Momentkapacitet enligt Eurokod 3 -----

disp('Kontroll momentkapacitet plåt');
W_plat=(1*bp^2)/4; % Plastiskt böjmotstånd för tvärsnittet
Med_plat=Med; % Dimensionerande moment [Nm]
Xlt=1; % Då ingen risk för vippning föreligger
ym1=1; % Vid beräkning av moment, gamma_M1
Mrd_plat=fy*Xlt*W_plat/ym1; % Beräkning av plastisk momentkapacitet
if Mrd_plat>Med_plat % Jämför tvärsnittets kapacitet med dim. moment
    disp('Momentkapacitet OK!')
else
    disp('Momentkapacitet ej OK!')
end

% ----- Kontroll av nedböjning -----

disp('Beräknad nedböjning av plåt i längsled');

```

```

% Beräkning av Nedböjning i plåten i längdled
figure
Nedbojning_plat=zeros(1,3); %Fördefinierar storleken på vektorn
for j=1:3
v_plat=abs(Deformation_plat(8,j)); % Tar ut mittnedböjning för tvärbalkarna
Nedbojning_plat(1,j)=Nedbojning_plat(1,j)+v_plat;

% Plottar nedböjningen
title('Plåt')
grid on
grid minor
plotpar1=[2 1 0]; % Bestämmer färg på graf mm
eldraw2(ex,ey,plotpar1); % Plottar den odeformerade plåten
eb1=extract(Edof,Deformation_plat(:,j)); % Extraherar deformationer från
      % den globala deformationsvektorn med hänsyn till topologimatrisen

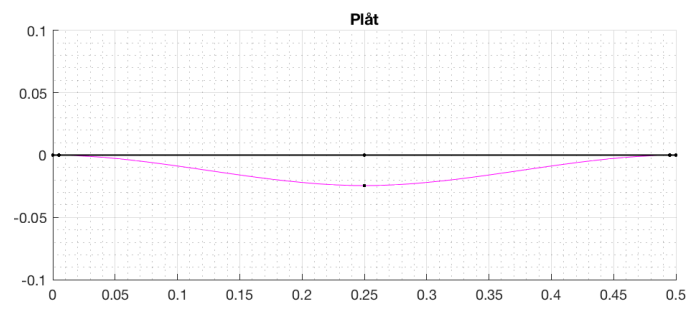
if j==1 % Definerar olika färger på grafen för de olika lastkombinationerna
    plotpar1b=[1 1 0];
elseif j==2
    plotpar1b=[1 2 0];
elseif j==3
    plotpar1b=[1 3 0];
else
    plotpar1b=[1 4 0];
end

eldisp2(ex,ey,eb1,plotpar1b); % Plottar den deformerade plåten
line([0 0.5],[0 0],'color','black','LineWidth',1)
axis([0 0.5 -0.1 0.1])
end
% Skriver ut nedböjningen för de olika lastkombinationerna
disp('NEDBÖJNING I PLÅTEN');
disp('Karakteristisk Frekvent Kvasi-permanent')
disp(Nedbojning_plat)

Kontroll momentkapacitet plåt
Momentkapacitet OK!
Beräknad nedböjning av plåt i längsled
NEDBÖJNING I PLÅTEN
Karakteristisk Frekvent Kvasi-permanent
1.0e-03 *

0.6085    0.4076    0.3279

```



Contents

- Temperaturutvidgning
- Acceleration- och bromskraft
- Vindlast
- Sidokraft
- Kombinerade krafter parallellt brons längdriktning
- Kombinerade krafter vinkelrätt mot brons längdriktning

Temperaturutvidgning

```
clc
fprintf('Beräkning temperaturutvidgning \n')

% Maximal resp. minimal lufttemperatur för Göteborgs kommun enligt SS-EN
% 1991-1-5 Nationell Bilaga
T_max=35;      % Grader Celsius
T_min=-29;    % Grader Celsius

alpha_T=1.2e-5; % Längdutvidgningskoefficient [1/grad Celsius] EN 1991-1-5 Bilaga C
L_tot=60;      % Brons totala längd

% Figur 6.1 i EN 1991-1-5 används för att hitta motsvarande värde på de
% jämnt fördelade temperaturkomponenterna T_e, samt reducerar maxvärde med
% 3 grader enligt ANM 2. Stålkonstruktioner innefattas av typ 1.

T_emax=52-3;      % Temperaturkomponent
T_emin=-33;      % Temperaturkomponent

delta_T=abs(T_emax-T_emin); % Temperaturskillnad
delta_L=delta_T*alpha_T*L_tot; % Längdutvidgning [m]

% Övergångskonstruktion med genomgående ballast kan användas om
% rörelselängden är < 80 mm, enligt Broprojekteringshandboken kap 5.2
L_80=0.080;
if delta_L<L_80
    disp('Rörelselängden < 80 mm, övergångskonstruktion utformas med genomgående ballast')
else
    disp('Rörelselängd >= 80 mm, övergångskonstruktion utformas utan genomgående ballast')
end

fprintf('Rörelselängd: %2.2f [mm] \n',delta_L*10^3)
disp('Övergångskonstruktion dimensioneras enligt Broprojekteringshandboken kap 5.2')

Beräkning temperaturutvidgning
Rörelselängden < 80 mm, övergångskonstruktion utformas med genomgående ballast
```

Rörelselängd: 59.04 [mm]
Övergångskonstruktion dimensioneras enligt Broprojekteringshandboken kap 5.2

Acceleration- och bromskraft

```
fprintf('Beräkning acceleration- och bromskraft \n')

L_inf=L_tot;          % Influenslängd, antas vara bronns totala längd
alpha=1.33;          % Nationella anpassningsfaktorn

% Accelerationskraft 33 kN/m (max 1000 kN), enligt SS-EN 1991-2 Bromskraft
% 20 kN/m (max 6000 kN), enligt SS-EN 1991-2

Qlak=33e3*L_inf;     % [N], ekv (6.20) SS-EN 1991-2
Qlbk=20e3*L_inf;     % [N], ekv (6.21) SS-EN 1991-2

if Qlak<=1000e3
    disp('Qlak<=1000 kN')
else
    disp('Qlak>1000 kN, värdet begränsas till 1000 kN')
    Qlak=1000e3;     % [N]
end

if Qlbk<=6000e3
    disp('Qlbk<=6000 kN')
else
    disp('Qlbk>6000 kN, värdet begränsas till 6000 kN')
    Qlbk=6000e3;     % [N]
end

% Karakteristiska värden multipliceras med nationella anpassningsfaktorn
% för svensk tillämpning
Qlad=Qlak*alpha;
Qlbd=Qlbk*alpha;

fprintf('Accelerationslast: %2.2f [kN] \n',Qlad*10^-3)
fprintf('Bromslast: %2.2f [kN] \n',Qlbd*10^-3)

Beräkning acceleration- och bromskraft
Qlak>1000 kN, värdet begränsas till 1000 kN
Qlbk<=6000 kN
Accelerationslast: 1330.00 [kN]
Bromslast: 1596.00 [kN]
```

Vindlast

Vindlast beräknas enligt SS-EN 1991-1-4

```
fprintf('Beräkning vindlast \n')

b=4.8+0.5;           % Bredd på brons tvärsnitt inklusive flänsar
dtot=1.5;           % Total höjd på tvärsnittet
h_fri=5.2;          % Fri höjd
ze=h_fri+dtot/2;    % Referenshöjd

fprintf('Förhållandet b/dtot=%2.2f [m] \n',b/dtot)
fprintf('Referenshöjden ze=%2.2f [m] \n',ze)

% Rekommenderat värde på formfaktorn för kraft, C [-], fås enligt tabell
% (8.2) SS-EN 1991-1-4
if ze<=20
    if b/dtot<=0.5
        C=6.7;
    elseif b/dtot>=4
        C=3.6;
    else
        C=6.7+(3.6-6.7)/(4-0.5)*(3.53-0.5);
    end
else
    disp('Linjär interpolation krävs för ze, se SS-EN 1991-1-4 tabell 8.2')
end

rho=1.2;             % Luftens densitet [kg/m3]
vb=25;              % Referensvindhastighet enligt Boverkets konstruktionsregler EK8

a=6;                % Avstånd från vägbeläggning under bron till RÖK [m]
A_ref=(4+(a-h_fri))*L_tot; % Referensarea enligt kapitel (8.3.1) SS-EN 1991-1-4

Fw_x=1/2*rho*vb^2*C*A_ref; % Krafter i x-riktningen, ekv (8.2) SS-EN 1991-1-4 [N]

Fw_y=Fw_x*0.25;     % Vindlast i y-riktning enligt SS-EN 1991-1-4 kapitel 8.3.4

fprintf('Vindlast, x-riktning: %2.2f [kN] \n',Fw_x*10^-3)
fprintf('Vindlast, y-riktning: %2.2f [kN] \n',Fw_y*10^-3)

Beräkning vindlast
Förhållandet b/dtot=3.53 [m]
Referenshöjden ze=5.95 [m]
Vindlast, x-riktning: 433.76 [kN]
Vindlast, y-riktning: 108.44 [kN]
```

Sidokraft

Sidokraft beräknas enligt SS-EN 1991-2 kapitel (6.5.2)

```
fprintf('Beräkning sidokraft \n')

Qsk=100e3;           % Sidokraft, karakteristiskt värde [N]
Qsd=Qsk*alpha;      % Karakteristiskt värde multipliceras med faktorn alpha

fprintf('Sidokraft: %2.2f [kN] \n',Qsd*10^-3)

Beräkning sidokraft
Sidokraft: 133.00 [kN]
```

Kombinerade krafter parallellt bronns längdriktning

```
fprintf('Kombinering av krafter parallellt bronns längdriktning \n')

% Bromskraften är dimensionerande, denna kombineras med vindlast i
% y-riktning (parallellt bronns längdriktning).

psi_0=0.75;         % Lastreduktionstal för vindlast
gamma_Q1=1.45;     % Partialkoefficient för bromskraft, SS-EN 1990 tabell A2.4(B)
gamma_Q2=1.5;      % Partialkoefficient för vindlast, SS-EN 1990 tabell A2.4(B)

% Resulterande kraft på lager (kombinering i brottgränstillstånd)
Q1b_lager=Q1bd/2;  % Bromslasten fördelas på två lager
Fw_y_lager=Fw_y/2; % Vindlasten i y-riktning fördelas på två lager

H_y=gamma_Q1*Q1b_lager+gamma_Q2*psi_0*Fw_y_lager;
fprintf('Resulterande kraft på ett lager: %2.2f [kN] \n',H_y*10^-3)

Kombinering av krafter parallellt bronns längdriktning
Resulterande kraft på ett lager: 1218.10 [kN]
```

Kombinerade krafter vinkelrätt mot bronns längdriktning

Då vindlasten är huvudlast betraktas sidokraften som en tillhörande variabel last och multipliceras därmed med tillhörande ψ_0

```
fprintf('Kombinering av krafter vinkelrätt bronns längdriktning \n')

psi_0=1.0;         % Lastreduktionstal för sidolast, SS-EN 1990 tabell A2.3
```

```

gamma_Q1=1.5;      % Partialkoefficient för vindlast, SS-EN 1990 tabell A2.4(B)
gamma_Q2=1.5;      % Partialkoefficient för sidokraft

% Resultterande kraft på lager (kombinering i brottgränstillstånd)
Fw_x_lager=Fw_x/3; % Vindlasten i x-riktning fördelas på tre lager
                % Sidokraften är en koncentrerad kraft

H_x=gamma_Q1*Fw_x_lager+gamma_Q2*psi_0*Qsd;
fprintf('Resultterande kraft på ett lager: %2.2f [kN] \n', H_x*10^-3)

Kombinering av krafter vinkelrätt brons längdriktning
Resultterande kraft på ett lager: 416.38 [kN]

```