



CHALMERS



Projektering av dubbelspårig järnvägsbro på Ostlänken

Konceptuell design och preliminär dimensionering

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

CALLE ALTHINI, NAEMI BRATOVIC JOHANSSON, FELIX FALK,
JOHN HELGESSON, OSHAS RAHIMI, JENNY URBERG

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2026

Projektering av dubbelspårig järnvägsbro på Ostlänken

Konceptuell design och preliminär dimensionering

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

CALLE ALTHINI
NAEMI BRATOVIC JOHANSSON
FELIX FALK
JOHN HELGESSON
OSHAS RAHIMI
JENNY URBERG



CHALMERS

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026

Projektering av dubbelspårig järnvägsbro på Ostlänken
Konceptuell design och preliminär dimensionering

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

CALLE ALTHINI

NAEMI BRATOVIC JOHANSSON

FELIX FALK

JOHN HELGESSON

OSHAS RAHIMI

JENNY URBERG

© CALLE ALTHINI, NAEMI BRATOVIC JOHANSSON, FELIX FALK, JOHN
HELGESSON, OSHAS RAHIMI, JENNY URBERG, 2026.

Handledare: Mozhdeh Amani (Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnads-
teknik), Victor Manuel Rios Villalba (COWI), Marcus Davidson (COWI)

Examinator: Carlos Gil Berrocal (Institutionen för arkitektur och samhällsbygg-
nadsteknik)

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola, 2026

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

Omslag: Modell av slutgiltigt brokoncept

Skriven i L^AT_EX

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2026

Projektering av dubbelspårig järnvägsbro på Ostlänken
Konceptuell design och preliminär dimensionering
Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik
CALLE ALTHINI
NAEMI BRATOVIC JOHANSSON
FELIX FALK
JOHN HELGESSON
OSHAS RAHIMI
JENNY URBERG
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Följande rapport är skriven i syfte att ta fram ett förslag på en 670 meter lång dubbelspårig järnvägsbro på Ostlänken, delsträcka Stavsjö-Loddbys i Norrköpings kommun. Bron ska vara anpassad för ett höghastighetståg och projektet innefattar en ingående analys och utvärdering av relevanta brokoncept som uppfyller givna tekniska förutsättningar och avgränsningar från Trafikverket.

Projektet är uppdelat i två delar som inkluderar en urvalsprocess där olika brokoncept studeras. Därefter väljs ett lämpligt alternativ ut för att sedan preliminärt dimensioneras för att undersöka det valda brokonceptets genomförbarhet och tekniska funktion. Urvalsprocessen handlar om att etablera kvalitativa och projektspecifika krav och begränsningar för de olika broarna som sedan jämfördes mot varandra för att identifiera det mest optimala brokonceptet. En beräkningsmodell framtas under dimensioneringens gång som innefattar villkor för laster och externa påverkan på bron.

Resultatet redovisar att en spännarmerad betongbalkbro med lådtvärsnitt är ett relevant val för den aktuella platsen och projektets förutsättningar. Den framtagna betongbalkbron presenteras sedan i form av en tvärsnittsmodell. Detta projekt har avgränsats till att endast dimensionera brons överbyggnad och en djupgående analys har gjorts på en mindre sektion av bron som bedöms kritisk för att öka arbetets genomförbarhet på grund av tidsbegränsningar. Det slutgiltiga resultatet lyckas besvara syftet och problemformuleringen men en vidare och djupare analys som beaktar utlämnade påverkande faktorer är värt att utföra för att fullända undersökningen.

Nyckelord: Bro, Järnvägsbro, Ostlänken, Betongbro, Balkbro, Lådtvärsnitt, Brodimensionering, Spännarmering.

Design and dimensioning of a double-track railway bridge on Ostlänken

Conceptual design and preliminary dimensioning

Bachelor's thesis in Civil Engineering

CALLE ALTHINI

NAEMI BRATOVIC JOHANSSON

FELIX FALK

JOHN HELGESSON

OSHAS RAHIMI

JENNY URBERG

Department of Architecture and Civil Engineering

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The following report is written for the purpose of producing a proposal of a 670 meter railway bridge with double tracks in Ostlänken, segment Stavsjö-Loddbý in Norrköping municipality. The bridge is meant to be used for a high-speed train and the project includes a detailed analysis and evaluation of relevant bridge design concept that takes in consideration given technical conditions and limitations from Trafikverket.

The project is divided into two parts which includes a selection process that studies varying bridge concepts. Subsequently a fitting alternative is to be preliminary designed which examines the bridges feasibility and technical functions. The selection process is supposed to establish qualitative and project specific requirements and restrictions for the different bridges to be compared in order to identify the most optimal bridge design. A computational model is prepared during the dimensioning process which includes conditions for load forces and external effects on the bridge.

The result presents that a pre-stressed concrete beam bridge with a box cross-section is the most relevant choice for the location and the prerequisite of the project. The concrete beam bridge will be presented in the form of a cross-section model. This project is limited to only designing the superstructure of the bridge and a deeper analysis has been done on a smaller section of the bridge which is assessed as the most critical part in order to increase the assignments producibility limited by time. The final result succeeds to answer the purpose and problem definition of the project, however a further and more thorough analysis that incorporates the affecting factors that were decided not to be included in the calculations should be conducted, in order to fully complete the research.

Key words: Bridge, Railwaybridge, Ostlänken, Concrete Bridge, Beam Bridge, Box Beam Cross-Section, Preliminary Designs, Pre-Stress.

Innehåll

Sammanfattning	v
Abstract	vi
Innehåll	vii
Förord	x
Beteckningar	xii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och mål	2
1.2.1 Problemformulering	2
1.3 Avgränsningar	3
1.4 Metod	3
2 Förutsättningar och krav	5
2.1 Projektspecifika förutsättningar	5
2.1.1 Fria höjder	5
2.1.2 Stödplacering	6
2.1.3 Tvärsnitt	7
2.1.4 Projektspecifika krav	7
2.2 Tekniska krav från Trafikverket	8
2.2.1 Allmänna krav från Trafikverket	8
2.2.2 Fria rummet	8
3 Urvalsprocessen	9
3.1 Urval 1	9
3.1.1 Fackverksbro i stål	10
3.1.2 Spännarmerad betongbalkbro med lådtvärsnitt	10
3.1.3 Samverkansbro med betongtråg	11
3.1.4 Bågbro med överliggande båge i stål	12
3.2 Urval 2	13

4	Slutgiltigt brokoncept	15
4.1	Bärande system	15
4.2	Beräkningsmodell	16
4.3	Lager	17
4.4	Grundläggning	17
4.5	Stöd och stödplacering	18
4.6	Produktion	18
4.7	Förvaltning	19
5	Preliminär dimensionering	21
5.1	Dimensionerande laster	21
5.2	Dimensionerande tvär- och momentkraft	21
5.3	Dimensionering i längdled	22
5.3.1	Medverkande flänsbredd och tvärsnittskonstanter	22
5.3.2	Spännkablar	22
5.3.3	Böjarmering och tvärkraftsarmering	24
5.4	Dimensionering i tvärled	25
5.4.1	Armering i tvärled	25
5.5	Kontroller	25
5.6	Slutgiltigt tvärsnitt	26
6	Diskussion	27
6.1	Urvalsprocess	27
6.2	Beräkningar och analys	28
6.3	Källkritik	28
7	Slutsats	29
8	Referenser	31
A	Förslagshandlingar	I
A.1	Ritning 1	II
A.2	Ritning 2	III
A.3	Ritning 3	IV
A.4	Ritning 4	V
A.5	Ritning 5	VI
A.6	Ritning 6	VII
B	Litteraturstudie	IX
B.1	Material	IX
B.1.1	Trä	IX
B.1.2	Stål	X
B.1.3	Betong	X
B.2	Brotyper	XI
B.2.1	Balkbro	XI
B.2.2	Samverkansbro	XI
B.2.3	Trågbro	XII

B.2.4	Fackverksbro	XII
B.2.5	Bågbro	XIII
B.2.6	Snedkabelbro	XIII
B.2.7	Övriga broar	XIV
C	Utvärderingsunderlag	XV
C.1	Underlag för urval 1	XV
C.2	Underlag för urval 2	XVII
C.2.1	Estetik och design	XVII
C.2.2	Produktionsmetod	XVII
C.2.3	Produktionstid	XVII
C.2.4	Arbetsmiljö	XVII
C.2.5	Ekonomi	XVII
C.2.6	Klimatpåverkan	XVIII
C.2.7	Inspektion	XVIII
C.2.8	Underhåll	XVIII
C.2.9	Viktningsmatris	XVIII
D	Beräkningsunderlag	XIX
D.1	Beteckningar	XIX
D.2	Lastkombinationer	XXI
D.3	Medverkande flänsbredd	XXIII
D.4	Täckande betongskikt	XXIV
D.5	Preliminärt val av förspänningskraft	XXV
D.6	Böjarmering	XXV
D.7	Tvärarmering	XXVI
D.8	Sprickkontroll	XXVI
D.9	Nedböjning	XXVII
E	Beräkningar	XXIX

Förord

Detta kandidatarbete har genomförts inom civilingenjörsprogrammet vid institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik på Chalmers tekniska högskola. Arbetet har utförts av sex studenter och behandlar systematisk utformning och dimensionering av järnvägsbroar. Syftet har varit att undersöka hur en järnvägsbro kan väljas och dimensioneras utifrån tekniska krav och rådande regelverk, samt att ge en fördjupad förståelse för den ingenjörsmässiga projekteringsprocessen.

Vi vill rikta ett stort tack till våra handledare Marcus Davidson och Victor M. Rios på COWI för deras stöd och värdefulla insikter under arbetets gång. Vi vill även tacka vår handledare Mozhdeh Amani för de föreläsningar hon planerat in och den expertis vi kunnat ta del av till följd av detta. Till sist vill vi tacka Joosef Leppänen för den vägledning vi fått under dimensioneringsfasen av arbetet.

Göteborg, Maj 2026

Calle Althini

Naemi Bratovic Johansson

Felix Falk

John Helgesson

Oshas Rahimi

Jenny Urberg

Beteckningar

Nedan följer en lista över akronymer som har använts, listade i alfabetisk ordning:

KTL	Kontaktledning
LM71	Lastmodell för järnvägstrafik
RÖK	Rälsöverkant
SIS	Svenska institutet för standarder
STH	Största tillåtna hastighet

1

Inledning

För att möta dagens och framtidens transportbehov krävs utveckling och modernisering av Sveriges befintliga infrastruktur. Allt eftersom Stockholms, Södermanlands och Östergötlands län växer, ökar även behovet av person- och godstransporter. Järnvägen i regionerna präglas av hög trafikbelastning i kombination med en stor efterfrågan på tågresor (Sweco, 2024). De nuvarande spåren saknar tillräcklig kapacitet för att möta det ökande transportbehovet, därmed utgör modernisering och utbyggnad av järnvägsnätet en viktig åtgärd för att främja ett mer hållbart transportsystem.

1.1 Bakgrund

Projektet Ostlänken är en planerad dubbelspårig järnväg som kommer att sträcka sig cirka 16 mil mellan Järna och Linköping (Sweco, 2024). Den nya banan ska möjliggöra tågresor i hastigheter uppåt 250 km/h med mål att förkorta restiderna och öka turtätheten. Ostlänken bidrar till stärkt kapacitet i järnvägssystemet och avlastar de befintliga spåren. Dessutom blir järnvägssystemet mindre sårbart och ger större möjligheter till trafikomledning vid exempelvis underhållsarbete eller olyckor.

I Trafikverkets infrastrukturregelverk ingår riktlinjer som styr utformningen av järnvägsanläggningar. Höghastighetståg medför särskilda tekniska utmaningar eftersom de är mycket känsliga för ojämnheter i spårssystemet. För att säkerställa god komfort och trafiksäkerhet ställs därför höga krav på spärgeometri, rälsens utformning och begränsning av deformationer i konstruktionen. Till följd av dessa tekniska utmaningar tillsammans med projektets geografiska förutsättningar kommer cirka 25 % av Ostlänken att byggas på bro eller i tunnel (Trafikverket, 2025a).

På delsträckan Stavsjö-Loddby planeras en cirka 670 m lång järnvägsbro som ska passera över Nyköpingsbanan, Nyköpingsvägen samt av- och påfarter till E4:an, se Figur 1.1 (Trafikverket, 2025f).



Figur 1.1: Illustration över bronns placering på platsen (nedtill i bild). Författarnas egna bild.

1.2 Syfte och mål

Syftet med arbetet är att ta fram ett förslag till en dubbelspårig järnvägsbro på Ostlänken med hänsyn till projektets givna förutsättningar. Arbetet innefattar att jämföra relevanta brokoncept samt att välja det alternativ som bäst uppfyller tekniska krav på bärförmåga och geometri, med beaktande av byggbarhet och platsens förhållanden. Det valda brokonceptet ligger till grund för en preliminär dimensionering och resultatet redovisas i form av en fysisk modell.

Målet är att projektera en bro som kan byggas och förvaltas med begränsad påverkan på omgivande infrastruktur, då den passerar över flera bilvägar och en järnväg. Konstruktionen ska utformas med hänsyn till hållbarhet, god arbetsmiljö, låg klimatpåverkan samt kostnadseffektivitet.

1.2.1 Problemformulering

Utifrån syftet ovan, krav nämnda i kapitel 2 samt givna ritningar, se Bilaga A, utformas följande frågeställningar, vilka ska besvaras under arbetets gång:

- Vilket brokoncept är mest optimalt för platsen, utifrån hållbarhet och estetik?
- Hur ska bron dimensioneras för att uppfylla rådande tekniska krav?
- Var är det möjligt att placera stöd?
- Hur ska produktion och förvaltning utföras för att minimera trafikstörningar?

1.3 Avgränsningar

Projektet avgränsas till att enbart omfatta brons överbyggnad. Underbyggnaden kommer beaktas i avseendet att stöd kommer placeras ut, men inte dimensioneras. Grundläggningen kommer endast diskuteras kort, men i likhet med underbyggnaden kommer inga beräkningar utföras.

Vidare behandlas endast den del av bron som passerar över bilvägarna och järnvägen, se Bilaga A.1 och Bilaga A.2. Detta motiveras av att bron är cirka 670 m lång, vilket innebär att den tillgängliga projekttiden inte räcker till för att projektera hela bron. Vid dimensioneringen utförs beräkningar endast i de snitt som bedöms vara mest kritiska, det vill säga över stöd samt i fält där momentet är som störst.

1.4 Metod

Projektet genomfördes i två huvudsakliga delar: urvalsprocess och preliminär dimensionering. Urvalsprocessen omfattade val av ett lämpligt brokoncept, där arbetet inleddes med att studera projektets förutsättningar och krav angivna i den tekniska beskrivningen (Trafikverket, 2025e), samt ritningar tillhandahållna av COWI, se Bilaga A. Därefter genomfördes en litteraturstudie som omfattade information om byggnadsmaterial och olika brotyper, se Bilaga B. Förstudien genomfördes genom att studera vetenskapliga texter om brotyper och material relevanta för en järnvägsbro anpassad till projektets platsförhållanden. Med förstudien som grund genomfördes därefter två urvalsomgångar för att identifiera det mest lämpliga brokonceptet. Det första urvalet syftade främst till att exkludera irrelevanta brotyper, medan det andra fokuserade på utvärdering av de valda brotyperna.

Inför det andra urvalet delades författarna in i tre specialistgrupper: *Beställare/Konstruktion*, *Produktion* samt *Förvaltning/Underhåll*. Respektive grupp identifierade och formulerade relevanta kriterier utifrån sina ansvarsområden. Dessa kriterier utgjorde grunden för den efterföljande viktningssprocessen. *Beställare/Konstruktion* beaktade övergripande aspekter såsom ekonomi, miljöpåverkan och estetisk utformning. *Produktion* fokuserade på byggskedet, vilket inkluderar arbetsmiljö, byggtid samt val av produktionsmetoder. *Förvaltning/Underhåll* utvärderade brokoncepten med avseende på underhållsbehov och möjligheter till inspektion.

De brokoncept som kvarstod efter det första urvalet bedömdes utifrån de framtagna kriterierna med hjälp av utvärderingsmatriser, vilket möjliggjorde en systematisk jämförelse mellan alternativen. Det inledande urvalet baserades på en översiktlig kvalitativ bedömning för att exkludera mindre lämpliga koncept. I det andra urvalet genomfördes en mer ingående analys, där kriterierna viktades och brokoncepten poängsattes utifrån hur väl de uppfyllde respektive kriterium. Detta resulterade i en sammanvägd bedömning, där det koncept som erhöll högst totalpoäng valdes för vidare utveckling.

Den preliminära dimensioneringen genomfördes med hjälp av konstruktionsberäkningar i programvaran MATLAB. En beräkningsmodell upprättades där relevanta lastkombinationer och randvillkor beaktades. Dimensioneringen utfördes iterativt, där delresultaten kontinuerligt verifierades genom rimlighetsbedömningar och dimensionerna justerades därefter. Arbetet syftade dels till att säkerställa en tekniskt fungerande konstruktion, men också till att optimera tvärsnittet med avseende på materialåtgång och därmed även klimatpåverkan. Det framtagna broförslaget redovisades slutligen genom en illustration, ritningar över tvärsnittet samt en fysisk modell.

2

Förutsättningar och krav

För att kunna projektera denna järnvägsbro finns det olika förutsättningar att ta i beaktande för att syftet med projektet ska kunna uppfyllas på bästa möjliga sätt. Dessa krav kan delas upp i projektspecifika krav och allmänna krav från Trafikverket.

2.1 Projektspecifika förutsättningar

De projektspecifika förutsättningarna inhämtas främst från de givna planritningarna, se Bilaga A, och den tekniska beskrivningen (Trafikverket, 2025e). Dessa förutsättningar och krav gäller utformningen rent geometriskt, men även utformningen med hänsyn till platsen och omgivande landskap.

2.1.1 Fria höjder

Bron korsar mestadels ängar och jordbruksmarker och beskrivs som en landskapsbro, vilket är relativt oproblematiskt när bron skall projekteras (Trafikverket, 2025f). Det finns emellertid en del hinder som behöver tas hänsyn till när det gäller fria höjder och placering av stöd. Bron ska korsa två bilvägar samt en järnväg, vars krav på fria höjder skiljer sig åt. De två bilvägarna innefattar en ombyggnad av den befintliga Nyköpingsvägen, som skall flyttas söderut, samt en på- och avfart till E4:an.

För Nyköpingsvägen beräknas avståndet mellan underkant på överbyggnad och rälsöverkant (RÖK) med hänsyn till att den fria höjden skall vara minst 4,7 m (Trafikverket, 2025e). Tillsammans med det projekterade avståndet mellan RÖK och mitten på Nyköpingsvägen, blev tvärsnittstjockleken 4,7 m.

Avståndet mellan underkant på överbyggnad och RÖK för på- och avfarten till E4:an beräknas på samma sätt som för Nyköpingsvägen. Resultatet blev däremot 5,3 m, eftersom avståndet mellan vägen och RÖK uppskattas till 10,0 m.

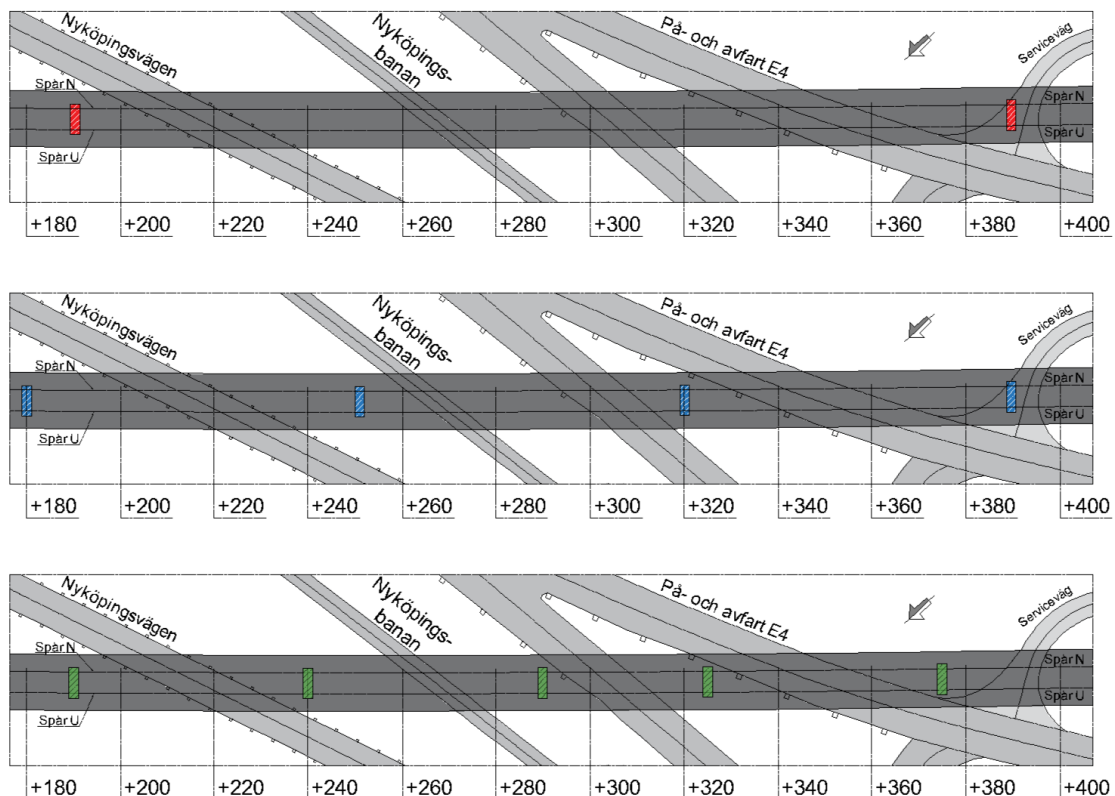
Den underliggande järnvägen som skall passeras kräver däremot en fri höjd på 6,2 m vilket förändrar beräkningen för höjden på överbyggnaden något (Trafikverket, 2025e). Höjden beräknas till 4,1 m, vilket blir den dimensionerande tvärsnittstjockleken för bron.

Utöver dessa tidigare nämnda vägar kommer en serviceväg att byggas, se Bilaga A. Dess syfte är att möjliggöra framkomlighet med fordon vid produktion och underhållsarbete på bron. Servicevägen anses vara möjlig att flytta och kommer därför inte att beaktas vid placering av stöd eller krav på fri höjd.

2.1.2 Stödplacering

Det är inte bara höjden på överbyggnaden som påverkas av dessa tre hinder, utan även var stöd kan placeras. Beroende på stödets placering behöver de dimensioneras för olika påkörningslaster (Trafikverket, 2019), men eftersom detta arbete enbart fokuserar på överbyggnaden kommer denna dimensionering inte göras. Däremot kommer riskerna för påkörning att tas i beaktande i den mån att rimligheten i stödplacering kommer bedömas utifrån denna risk.

Utifrån befintliga hinder och resulterande lasteffekter har tre möjliga alternativ för stödplacering identifierats. Alternativen fokuserar på ritning 1 och 2, se Bilaga A.1 och Bilaga A.2, vilka har sammanfogats i Figur 2.1 då dessa innefattar området kring hindren. Längs resten av bron kan stöd placeras relativt obehindrat, se Bilaga A, och kommer därför inte att behandlas i detta avsnitt.



Figur 2.1: Brons förhållande till nämnda hinder, med förslag till stödplacering. Röda stöd visar spannvidd 200 m, blåa stöd visar spannvidder 70-70-70 m och gröna stöd visar spannvidder 49-49-36-49 m. Författarnas egna bild.

Ett alternativ är att inte placera några stöd mellan hindren. Detta innebär att stöd placeras utanför på- och avfarten till E4 samt utanför Nyköpingsvägen vilket ger en spännvidd på 200 m. Dessa stöd är kvar i alternativen som följer men kan komma att flyttas något för att uppnå vissa spännvidder, dock aldrig på ett hinder.

Alternativ två är att placera ett stöd mellan Nyköpingsbanan och Nyköpingsvägen, samt ett stöd mellan på- och avfarten till E4. Stödet mellan Nyköpingsbanan och Nyköpingsvägen placeras mer än 10 m från Nyköpingsbanan och riskerar därmed inte påkörning från järnvägen. Denna stödplacering resulterar i tre spann över hindren på 70 m vardera.

Det tredje alternativet innebär att stöd placeras ut mellan Nyköpingsvägen och Nyköpingsbanan, mellan Nyköpingsbanan och påfarten till E4:an, samt mellan på- och avfarten till E4:an. Detta resulterar i fyra spann på 49-49-36-49 m. Denna stödplacering innebär alltså kortast spännvidder, men kan innebära att produktionen tar längre tid då fler stöd ska gjutas.

2.1.3 Tvärsnitt

Spåren placeras ovanpå en makadambädd, som ska ha en lutning i underkant på 2 % mot mitten av tvärsnittet. Broräcke ska finnas längs hela bron, med undantag för de partier där bullerskärm placeras, alltså mellan 103+400 och 103+550 (Trafikverket, 2025e). Detta broräcke ska utformas med lutning 10:1 och placeras utanför det fria utrymmet. Bullerskärmen ska liksom broräcket, utformas med lutning 10:1 samt finnas utanför det fria utrymmet. Bullerskärmen ska vara utformad med en höjd på minst 3 m över RÖK samt vara genomskinlig över broräcket (Trafikverket, 2025e).

Kontaktledningsstolpar (KTL-stolpar) samt medförande stag placeras längs med spåren enligt tabellen i Bilaga A.1. Dessa stolpar och stag får lov att inkräkta på det fria utrymmet.

2.1.4 Projektspecifika krav

Brons utformning ska ta hänsyn till närliggande landskap och bebyggelse, på ett sådant sätt att den blir integrerad på ett naturligt sätt i landskapet. Den ska även utformas på ett sådant sätt att den tar hänsyn till natur och kulturmiljö, samt energianvändning och klimatpåverkan i ett livscykelperspektiv. Bron ska vara enkel och billig att underhålla, sett till både ekonomi och arbetsmiljö. Den ska även dimensioneras med hänsyn till klotterskydd och annan skadegörelse (Trafikverket, 2025e). Bron ska dimensioneras enligt lastmodell LM71 som representerar normal järnvägstrafik på stomnätet med $\alpha = 1,33$ (Svenska Institutet för Standarder, 2003). Största tillåtna hastighet (STH) på bron är 250 km/h och den tekniska livslängden är 120 år (Trafikverket, 2025e).

2.2 Tekniska krav från Trafikverket

Kraven i detta avsnitt är till största del hämtade från Trafikverkets infrastruktur-regelverk vilket beskriver de krav som ställs på infrastrukturens egenskaper och underhåll.

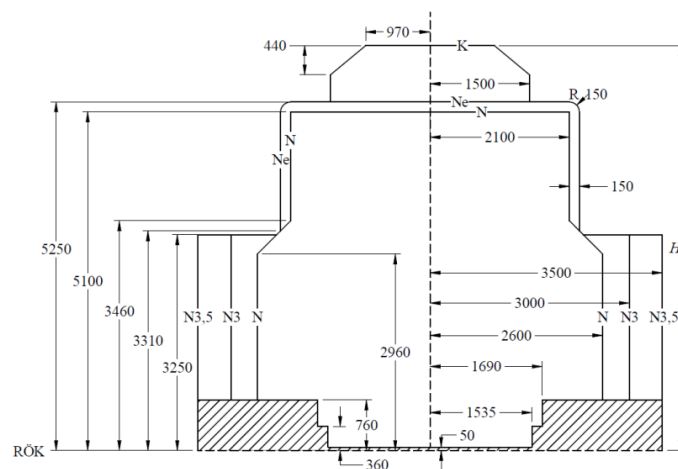
2.2.1 Allmänna krav från Trafikverket

Beräknade deformationer för nedböjning av trafiklast i längdled och i tvärled får inte överstiga $L/800$ av teoretisk spännvidd och för överbyggnadens vertikala rörelse uppåt och nedåt får nedböjningen inte överstiga 5 mm vid fri ände. Brons rörelser i spårets riktning vid broms och accelerationskrafter får inte överstiga 20 mm (Trafikverket, 2025c). Detta kommer det däremot inte utföras några beräkningar på. Vidare ska tjockleken för ballastlager under slipers på broar vara minst 400 mm (Trafikverket, 2025b).

2.2.2 Fria rummet

För nykonstruerade järnvägar ska normalsektion för fria rummet ovan 50 mm över RÖK användas (Trafikverket, 2026). Brokonstruktion ska i första hand placeras utanför det fria rummet, om detta ej är möjligt ska brokonstruktionen placeras högst 350 mm över RÖK samt minst 2 100 mm från spårmittpunkt (Trafikverket, 2026).

Broräcke antas vara av typen långa objekt, vilket enligt Trafikverket definieras som objekt med en längd större än 15 m och höjd större än 0,5 m. Således används sektion N3,5 för dimensionering av avstånd till broräcket samt bullerskärm, se Figur 2.2, vilket innebär att det fria utrymmet i sidled måste vara minst 3,5 m. Centrumavståndet mellan två spår vid nybyggnation skall vara minst 4,5 m (Trafikverket, 2026). Avståndet till broräcket och bullerskärmen kombinerat med spårens centrumavstånd medför en minsta bredd för det dubbelspåriga järnvägstvärsnittet på 11,5 m.



Figur 2.2: Krav på fria utrymmet ovan 50 mm över RÖK (Trafikverket, 2026, med tillstånd).

3

Urvalsprocessen

Detta kapitel redogör för urvalsprocessen som genomfördes i två steg. Inledningsvis genomfördes en gallring av brokoncept baserat på om de uppfyllde projektets grundläggande krav. Därefter utvärderades de kvarvarande alternativen utifrån ett antal definierade kriterier, framtagna av tre specialistområden. Urvalsprocessen genomfördes med hjälp av utvärderingsmatriser och resulterade i ett val av det brokoncept som sammantaget bedömdes mest lämpligt.

3.1 Urval 1

I det första urvalet genomfördes en grov gallring av brokoncept baserat på om de uppfyllde projektets krav på geometri och estetik. Bron får inte utformas så att den inskränker på den fria höjd som krävs för underliggande vägar, se avsnitt 2.1.1. Av denna anledning är underliggande bärverk inte lämpliga. Utifrån platsens förutsättningar togs tre alternativa stödplaceringar fram, se Figur 2.1, vilka möjliggör spännvidder på upp till 200 m utan mittstöd, alternativt 70 m respektive 49 m med mittstöd.

Litteraturstudien visade att träbroar inte lämpar sig för långa spännvidder i kombination med stora laster, se Bilaga B.1.1, därav valdes trä bort som möjligt konstruktionsmaterial. Även alternativet med en spännvidd på 200 m exkluderades, eftersom en sådan spännvidd medför stora snittkrafter och därmed krav på ett högre tvärsnitt. Detta är ogynnsamt då konstruktionshöjden är begränsad för att inte inskränka de fria höjdkraven över underliggande vägar.

Som nämnt i avsnitt 2.1.4, ställs krav på brons estetiska utformning för att den ska passa in i den omkringliggande miljön. Med hänsyn till att landskapet kring broläget är mycket flackt bör bron utformas som en slank konstruktion med begränsad konstruktionshöjd, så att den smälter in i den omgivande miljön.

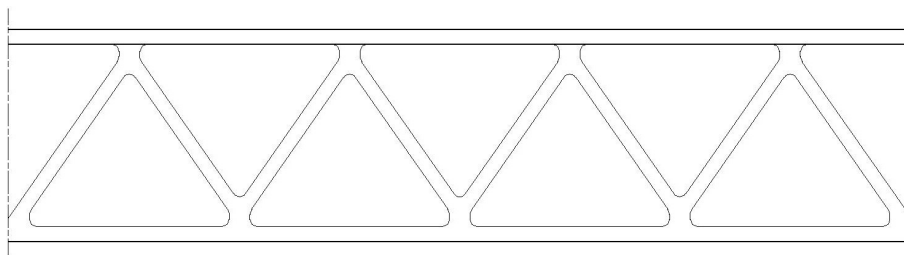
Tabell C.1 redovisar genomförandet av det första urvalet. Efter den inledande gallringen återstod fyra brokoncept, vilka analyserades vidare i det andra urvalet. Nedan presenteras en fördjupad beskrivning av respektive koncept.

3.1.1 Fackverksbro i stål

Det första utvalda konceptet är fackverksbro vars överbyggnad består av en kontinuerlig fackverksbalk i stål med en underliggande brobana av betong. Fackverket konstrueras med diagonala stänger som bildar likbenta trianglar och de övre och nedre ramstängerna löper parallellt med varandra, vilket ger en konstant höjd. Figur 3.1 visar en skiss över en möjlig utformning av fackverksbron.

Fackverksbron kan till stor del prefabriceras i verkstad där stålstänger och balkar monteras till större broelement under kontrollerade förhållanden, vilket ger en god arbetsmiljö eftersom mycket arbete sker på marknivå istället för på höjd (Lebet m. fl., 2013). De färdiga elementen transporteras till byggsplatsen där bron uppförs genom lyft med kran, vilket möjliggör en snabb montering och minskar trafikstörningar på befintliga vägar. Själva lyftmomentet kräver dock säkerhetsåtgärder eftersom tunga element hanteras ovanför trafikerade områden, men genom att utföra lyften under korta avstängningar, exempelvis nattetid, kan riskerna minimeras och säkerheten ökas.

Enligt en studie av en kontinuerlig Warren-fackverksbro i stål kan denna brotyp uppvisa god bärförmåga, hög styvhet och små deformationer även efter lång tids användning under tung järnvägstrafik (Y. Li m. fl., 2024). En nackdel är dock att bron består av många stänger och förband, vilket ökar behovet av inspektion och underhåll, exempelvis genom rotskydd och reparationer. Underhållsarbeten utförs ofta från arbetsplattformar eller liftar och innebär arbete på höjd som kräver fallskydd samt tillfälliga avstängningar av järnvägstrafiken och eventuellt även underliggande vägar. Detta innebär att förvaltningen av bron kan bli kostsam.



Figur 3.1: Exempelbild på bro med överliggande fackverk. Författarnas egna bild.

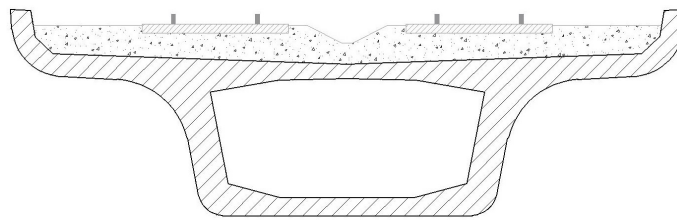
3.1.2 Spännarmerad betongbalkbro med lådtvärsnitt

En betongbalkbro med lådtvärsnitt har ett tvärsnitt som består av en farbana och en lådsektion, där båda delarna är bärande, se Figur 3.2. En fördel med denna brotyp är att konstruktionen kan uppföras både genom platsgjutning av betongen och med prefabricerade element (Haider m. fl., 2020). Som nämnt i avsnitt B.1.3 finns det flera fördelar med prefabricerad betong vad gäller kostnad, klimatpåverkan och konstruktionstid. Bron prefabriceras ofta med 4-5 m långa brodelar, och för att motverka dragspänningar i överkant under byggandet så efterspanns bron. Det är

vanligt att bron spännarmeras för att minska dragspänningar i underkant i fält och i överkant över stöd för att öka bärförmågan i systemet. Denna brotyp kan således nå spännvidder på uppemot 150 m (Haider m. fl., 2020).

En annan fördel med denna brotyp är dess höga vridstyvhet (Nassr m. fl., 2022). Bron är något krökt och den variabla lasten är excentrisk vilket leder till att rotation behöver förhindras i tvärsnittet. Med ett slutet betongtvärsnitt, som är fallet i ett lådtvärsnitt, förbättras bärförmågan avsevärt för excentriska laster vilket innebär att brotypen passar mycket bra för de givna förutsättningarna (Galal & Yang, 2009).

Nackdelar för denna brotyp kan främst hänvisas till byggnadsmaterialet betong, och inkluderar arbetsmiljö vid produktion och montage, samt bristen på kunskap vid arbetsplatsen, se avsnitt B.1.3. Brotypen kräver en stor mängd betong per meter vilket är ofördelaktigt ur miljösynpunkt, däremot bidrar spännarmeringen till att materialåtgången minskar jämfört med en slakarmerad betongbalkbro med lådtvärsnitt. Enligt M. Davidson (personlig kommunikation, 28 april 2026) kan det vara logistiskt komplicerat att bygga denna typ av bro, framförallt kan det bli låsningar i att leverantörer av spännarmering behöver spänna upp armering och fler aktörer blir inblandade.



Figur 3.2: Exempelbild betongbalkbro med lådtvärsnitt. Författarnas egna bild.

3.1.3 Samverkansbro med betongtråg

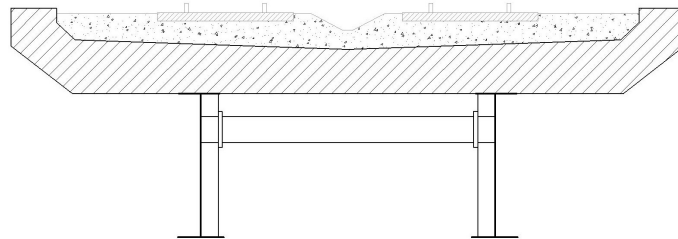
En samverkansbro med betongtråg består av ett betongtråg som bärs upp av en stålkonstruktion, där samverkan mellan betongen och stålet erhålls med hjälp av dymlingar (Fridlund & Svensson, 1992). Stål-betongsamverkansbroar har fördelen att de utnyttjar de mekaniska egenskaperna hos både stål och betong, samtidigt som de möjliggör kort byggtid och ger konstruktionen hög styvhet (Si m. fl., 2024).

En av de vanligaste typerna av samverkansbro med betongtråg består av längsgående I-balkar av stål som bär upp ett betongtråg, se Figur 3.3. Broarna utformas ofta med en hög slankhet, vilket kan orsaka problem under konstruktionsfasen då stålet generellt bär hela lasten vilket kan leda till vippning. Stagnation blir därför avgörande för stabiliteten under byggskedet och för att stabilisera I-balkarna. Samtidigt kan stagen innebära svaga punkter med avseende på utmattning och utgör en av de dyraste delarna på en bro per viktenhet (Gasser m. fl., 2023).

Produktionen av ett tvåspårigt betongtråg kan utföras antingen med prefabricerade

sidobalkar i kombination med platsgjuten platta eller genom att hela tråget prefabriceras i segment. Segmenten monteras ofta med en självskjutande stålportalbalk, och tidigare projekt har visat på hög produktionstakt (Montens m. fl., 2018). Det öppna trågtvårsnittet ger dessutom goda arbetsförhållanden och kräver ingen komplicerad intern formsättning vid prefabricering.

Vid inspektion av bron så är det viktigt att kontrollera balkarna och brodäcket för skador där några vanliga typer av skador är korrosion, sprickor, utmattningsskador för stålbalkarna och kloridinträngning för betong (L. Li m. fl., 2022).



Figur 3.3: Exempelbild samverkansbro med I-balkar i stål och tråg i betong. Författarnas egna bild.

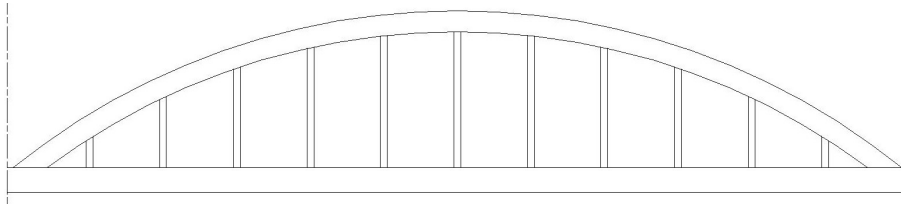
3.1.4 Bågbro med överliggande båge i stål

Det sista utvalda brokonceptet är en bågbro med överliggande båge i stål, se Figur 3.4. En bro med överliggande båge utformas både i enkelspann eller flerspann beroende på val av spännvidd och stöd (Trafikverket, 2014).

Den överliggande bågen utformas med en brobana som hängs upp via hängare och fungerar som ett sekundärbärverk. Bågen överför huvudsakligen laster som tryckkrafter till upplagen, vilket ger ett effektivt kraftflöde och en styv, i många fall självbärande, konstruktion (Lebet m. fl., 2013). Vid ideal belastning utsätts bågen främst för tryckkrafter, vilket gör konstruktionen materialeffektiv (Schanack & Ramos, 2016). I praktiken är dimensioneringen mer komplex, då trycklinjen påverkas av rörliga laster samt tidsberoende effekter såsom temperaturförändringar, krypning och krympning (Schanack & Ramos, 2016).

De flesta moderna bågbroar byggs idag i stål, trots materialets känslighet för instabilitet vid stora tryckkrafter (Lebet m. fl., 2013). Stål har samtidigt flera fördelar, såsom hög hållfasthet, vilket möjliggör slanka tvärsnitt och därmed en konstruktion med relativt låg egenvikt. Den låga egenvikten hos konstruktionen underlättar dessutom montage och bidrar till en effektiv byggprocess, vilket i sin tur kan leda till kortare byggtid och lägre kostnader. För att konstruera bron krävs oftast en mer avancerad byggteknik där delar av brobågen sammanfogas från änden till mitten av bågen. Då båghalvorna inte kan lyfta sig själva kräver denna process byggandet av en fribärande konstruktion som håller uppe alla delar (Schanack & Ramos, 2016). För att säkerställa lång livslängd bör bron korrosionsskyddas och underhållas

kontinuerligt i form av regelbunden rengöring och inspektion (Lebet m. fl., 2013).



Figur 3.4: Exempelbild på bågbro med överliggande båge. Författarnas egna bild.

3.2 Urval 2

Utifrån de tre specialistområdena *Beställare/Konstruktion*, *Produktion* och *Förvaltning/Underhåll* identifierades åtta bedömningskriterier:

1. Estetik och design
2. Produktionsmetod
3. Produktionstid
4. Arbetsmiljö
5. Ekonomi
6. Klimatpåverkan
7. Inspektion
8. Underhåll

En närmare beskrivning av respektive kriterium återfinns i Bilaga C.2. Kriterierna viktades därefter inbördes, vilket resulterade i tillhörande viktfactorer, se Tabell C.2. Dessa låg till grund för den fortsatta utvärderingen av de kvarstående brokoncepten i det andra urvalet.

I Tabell 3.1 redovisas resultatet av denna utvärdering. Tabellen visar hur de olika brokoncepten har bedömts utifrån respektive kriterium samt det sammanvägda resultatet. Bedömningen genomfördes med en fyrgradig betygsskala, där 1 motsvarar Godkänd, 2 Väl godkänd, 3 Mycket väl godkänd och 4 Utmärkt.

Tabell 3.1: Utvärderingsmatris för urval 2 med viktade resultat för respektive brokoncept.

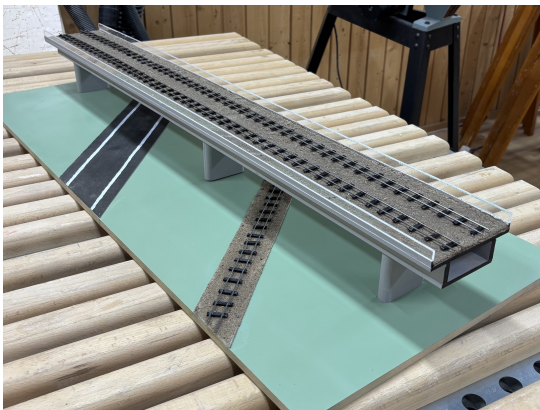
Kriterier		1	2	3	4	5	6	7	8	
Viktfaktor		11%	13%	9%	16%	12%	17%	9%	13%	Viktat resultat
Alternativ	Fackverksbro i stål	1	2	3	2	1	3	3	1	1.99
	Spännarmerad betongbalkbro med lådtvärsnitt	2	2	2	2	4	2	4	4	2.68
	Samverkansbro med betongtråg	2	3	3	3	2	3	2	2	2.55
	Bågbro med överliggande båge i stål	1	1	1	1	1	3	1	1	1.34

Med utgångspunkt i urvalsmatrisen valdes en spännarmerad betongbalkbro med lådtvärsnitt som det mest lämpliga brokonceptet, då den erhöll högst totalpoäng med hänsyn till viktningsfaktorerna. Brotypen presterade särskilt väl ur ett ekonomiskt perspektiv samt med avseende på underhållsbehov, men något sämre vad gäller klimatpåverkan. Detta beror främst på att betong som material medför relativt höga koldioxidutsläpp, se avsnitt B.1.3. För att minska brons klimatavtryck låg därför fokus i dimensioneringen på att optimera tvärsnittet och begränsa materialåtgången.

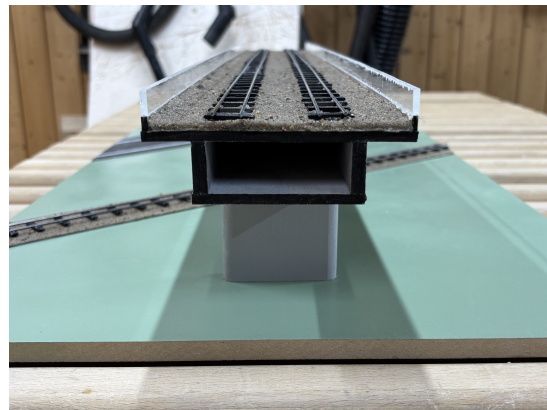
4

Slutgiltigt brokoncept

I följande kapitel presenteras det slutgiltiga brokonceptet, efter en djupgående analys, som en betongbalk bro med lådtvärsnitt. Utifrån beräkningarna som redovisas i kapitel 5 har en fysisk modell producerats som visas i Figur 4.1 och Figur 4.2. Kapitlet redovisar brons strukturella bestämmelser och metod för beräkning.



Figur 4.1: Fysisk modell som visar två spann över E4 och Nyköpingsbanan.



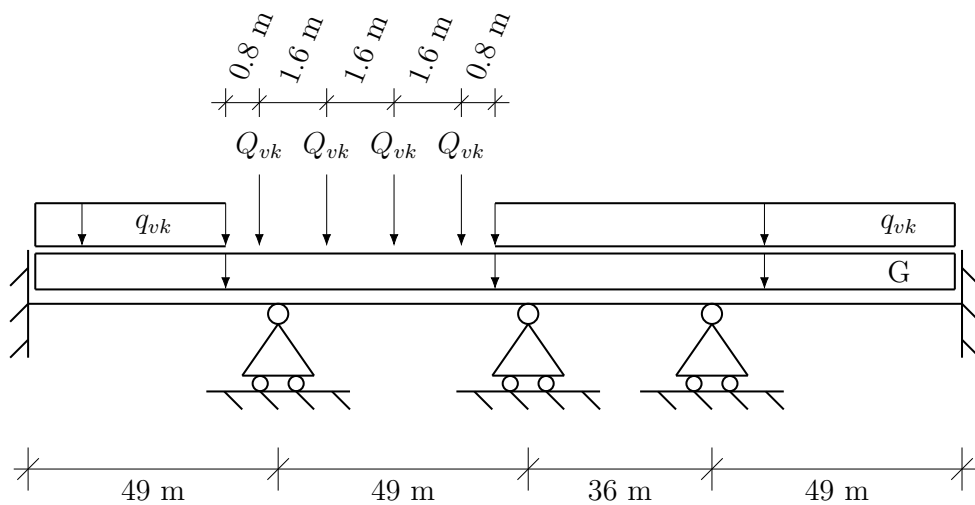
Figur 4.2: Fysisk modell som visar tvärsnittet i skala 1:100.

4.1 Bärande system

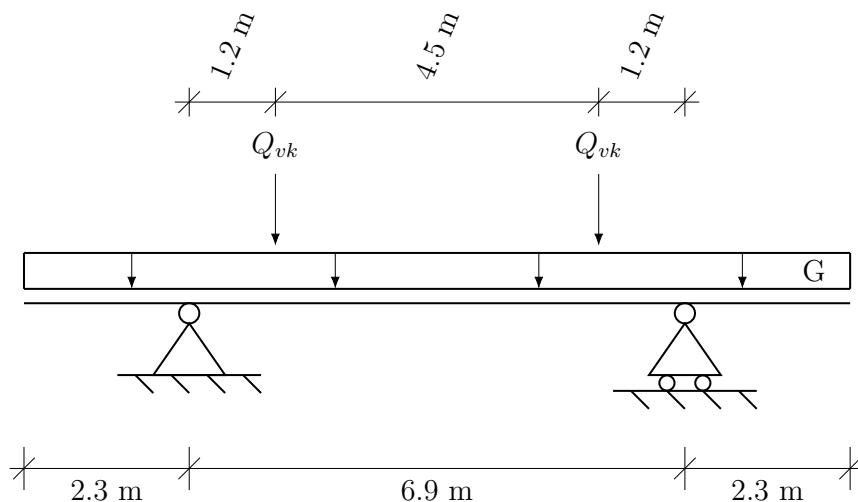
Det valda brokonceptet utgörs av ett bärande system i form av en kontinuerlig spännarmerad balkbro i betong med lådtvärsnitt. Överbyggnaden fungerar som ett sammanhängande huvudbärverk över brospannen. Huvudbärverket har valts att dimensioneras ytterliggare med ett lådtvärsnitt bestående av själva brobaneplattan, livet och en bottenplatta för att krafter och moment ska upptas genom tvärsnittet. Det slutna tvärsnittet syftar till att möjliggöra hög vridstyvhet och effektivt upptag av vridmoment från excentrisk last från tågtrafik ovanpå banan (Galal & Yang, 2009). Balken är försedd med efterspänd spännarmering placerade i lådtvärsnittet avsedd att reducera dragspänningar som uppstår i bron från yttre laster. Huvudbärverket kopplas sedan till underbyggnaden som utgörs av stöd och grundläggning.

4.2 Beräkningsmodell

Dimensioneringen börjar med att definiera en förenklad beräkningsmodell för det valda brokonceptet. Det definieras en modell i tvärled och en i längdled för att kunna räkna på lasterna i båda riktningarna och beräkningar kommer bara utföras på överbyggnaden och lagren. Beräkningsmodellen kommer också vara begränsad till det kritiska snitt som definieras i avsnitt 1.3. Eftersom brokonceptet modelleras som en kontinuerlig bro antas ändstöden vara fast inspända med rullstöd på resterande stöd. Figur 4.3 visar en längsgående beräkningsmodell med trafiklast LM71 där koncentrerad vertikallast, Q_{vk} , är 250 kN och utbredd vertikallast, q_{vk} , är 80 kN/m. Brobaneplattans transversella beräkningsmodell visas i Figur 4.4.



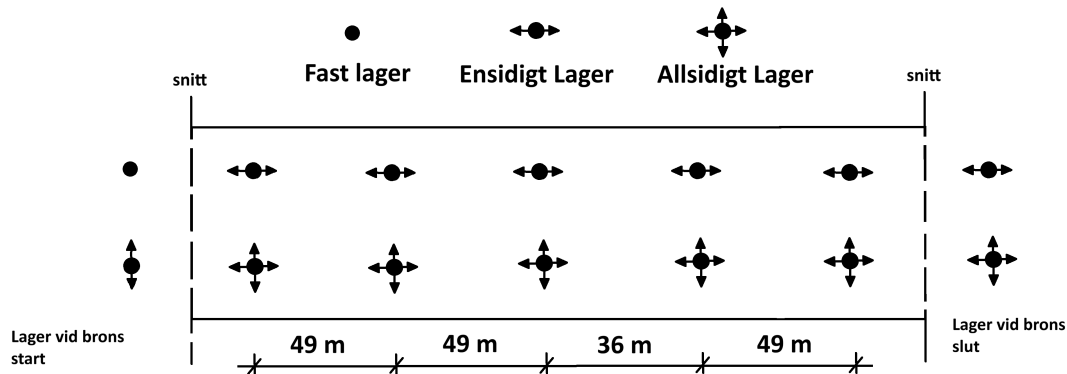
Figur 4.3: Beräkningsmodell i längdled för en lastuppställning. Författarnas egna bild.



Figur 4.4: Transversell beräkningsmodell för brobaneplattan. Författarnas egna bild.

4.3 Lager

Lager placeras mellan över- och underbyggnaden för att överföra laster samt möjliggöra rörelser till följd av temperaturvariationer och trafik (Lebet m.fl., 2013). Enligt teknisk beskrivning ska stöden förses med lager som har en teknisk livslängd på minst 50 år. Lageruppställningen visas i Figur 4.5.

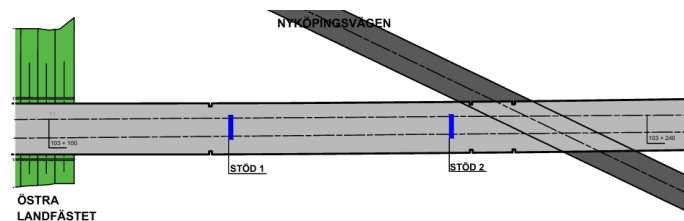


Figur 4.5: Lageruppställning med spännvidder för bron. Författarnas egna bild.

Lagerkonfigurationen har baserats på rekommendationer för placering av brolager enligt Spänntechnikens produktblad för TOBE FR4 potlager (Spänntechnik, u. å). Dimensioneringen av lagren utgår från den maximala tvärkraften i det kritiska snittet som fördelas på två lager. Med utgångspunkt i produktbladet väljs lager av typ 60 för både ensidigt rörliga lager, typ E, och allsidigt rörliga lager, typ A.

4.4 Grundläggning

Enligt ritningarna, se Bilaga A, varierar jorddjupet längs sträckan från cirka 5 m vid det östra landfästet till omkring 42 m i mitten, för att därefter minska mot cirka 10 m vid det västra landfästet. I Figur 4.6 visas området närmast det östra landfästet, där jorddjupet är begränsat till cirka 5 m fram till sektion 103+240, och där stöd 1 och 2 är placerade.



Figur 4.6: Sektionen med 5 m jorddjup vid det östra landfästet och ungefärlig placering av stöd 1 och 2 markerade. Författarnas egna bild.

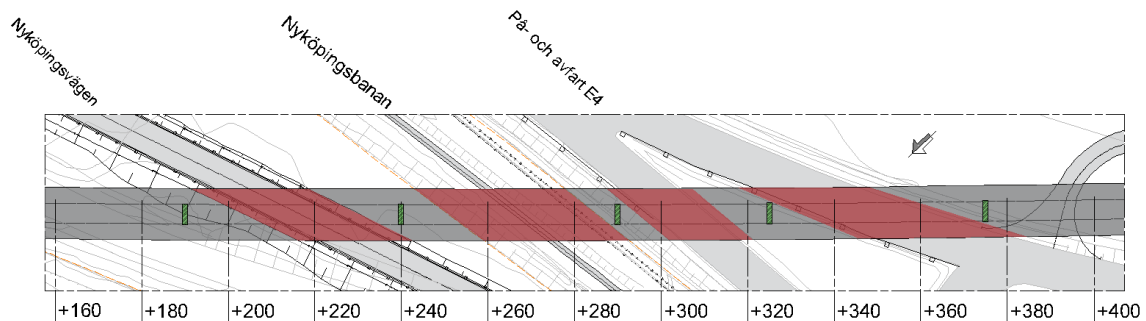
Variationerna i jorddjup medför att olika grundläggningsmetoder krävs. Den slutgiltiga stödplaceringen, se avsnitt 4.5, innebär att två stöd placeras inom området med grunt jorddjup, vilket framgår av Figur 4.6.

Då jorden till stor del utgörs av friktionsjord och jorddjupet överstiger 40 m i övriga delar av sträckan kommer majoriteten av stöden att pågrundläggas (Trafikverket, 2025e). Undantag görs för stöd 1 och 2, vilka istället antas grundläggas på packad fyllning på friktionsjord (Trafikverket, 2025e).

4.5 Stöd och stödplacering

Mellanstöden utförs som skivpelare i armerad betong, det vill säga pelare med rektangulärt, väggliknande tvärsnitt. De ska ges en enhetlig utformning och förses med rundade hörn (Trafikverket, 2025e).

För den fortsatta dimensioneringen fastställs stödplaceringen till alternativet med spännvidderna 49–49–36–49 m. Kortare spännvidder ger lägre böjmoment och tvärkrafter, vilket möjliggör en mer materialeffektiv konstruktion och begränsad konstruktionshöjd utan att inskränka de fria höjdkraven. Den slutgiltiga stödplaceringen i förhållande till väghindren redovisas i Figur 4.7.



Figur 4.7: Slutgiltig stödplacering med hinder markerade. Författarnas egna bild.

4.6 Produktion

Platsgjutning har valts som den mest fördelaktiga produktionsmetoden med hänsyn till en minskad komplexitet i installation, bland annat med hänsyn till uppspänning och infästningar av spännarmering och slakarmering. Eftersom denna produktionsmetod kräver formställningar, som enligt M. Davidson (personlig kommunikation, 14 april 2026) är 0,5 - 1 m, ställs ytterligare krav på största tvärsnittshöjd, vilket inte anses vara ett problem utifrån de beräkningar som redovisas i avsnitt 5.6. Detta innebär att avstängning av underliggande vägar och järnväg kan begränsas till enbart under uppbyggnad och rivning av formställningarna.

4.7 Förvaltning

Efter att bron har byggts behöver den förvaltas för att kunna nå sin tekniska livslängd. Inspektion är en viktig del av förvaltningen, där bland annat sprickor kontrolleras i form av antal, bredd, djup etc. Även lager och vertikala förskjutningar behöver kontrolleras. Denna brotyp ska inte behöva underhållas speciellt mycket, då spännarmering ofta dimensioneras för att en spännkabel ska kunna gå helt av och bron ska ändå kunna fungera normalt. Betongen ska även ha god beständighet och inte behöva bytas ut.

5

Preliminär dimensionering

Följande kapitel behandlar den preliminära dimensioneringen av bron, vilket utfördes i flera steg. Beräkningen genomfördes iterativt och det slutliga resultatet presenteras i kapitlet.

5.1 Dimensionerande laster

För att kunna beräkna lasteffekter på bron behöver de verkande lasterna vara kända. I dimensioneringen beaktas de vertikala lasterna, egentyingden samt trafiklasten, som verkar på bron. De dimensionerande lasterna presenteras i Tabell 5.1. För beräkning av egentyingden samt de dimensionerande trafiklasterna, se Bilaga D.

Tabell 5.1: Dimensionerande laster.

Egentyngd Konstruktion	$G_{tot} = 349,5 \text{ [kN/m]}$
Dimensionerande koncentrerad vertikallast	$Q_{vd} = 188,9 \text{ [kN]}$
Dimensionerande utbredd vertikallast	$q_{vd} = 60,5 \text{ [kN/m]}$

5.2 Dimensionerande tvär- och momentkraft

Utifrån de dimensionerande lasterna har brons dimensionerande tvärkraft och moment tagits fram. Detta gjordes genom att kombinera lasterna med fyra olika lastkombinationer. De dimensionerande moment- och tvärkrafterna presenteras i Tabell 5.2.

Tabell 5.2: Dimensionerande krafter.

Lastkombination	Maximal tvärkraft [kN]	Maximalt moment [kNm]	Minimalt moment [kNm]
Brottgränstillstånd	29 410	68 078	-127 706
Karakteristiskt	22 218	51 528	-96 461
Frekvent	21 049	48 559	-91 428
Kvasipermanent	18 321	41 633	-79 684

5.3 Dimensionering i längdled

De dimensionerande tvär- och momentkrafterna har bestämts initialt utan inverkan av förspänning. Dessa moment- och tvärkraftsresultat har används som utgångspunkt för dimensionering av tvärsnittets geometri, materialval och armeringsmängder, se Bilaga E.

När spännarmeringen introduceras förändras den statiska responsen genom de tvångsmoment som uppstår vid uppspänningen som ger upphov till momentomlagringar. I följande avsnitt redovisas dimensioneringen i längdled som omfattar bestämning av erforderlig armering, dimensionering och inplacering av spännkablar samt den medverkande flänsbredden.

5.3.1 Medverkande flänsbredd och tvärsnittskonstanter

Balkar med flänsförsedda tvärsnitt, som T-, L- och lådtvärsnitt, får ett bidrag från flänsarna vid lastupptagning under böjning. Detta beror på att balklivet samverkar med flänsarna vid deformation (Al-Emrani m. fl., 2013).

Enligt Eurokod 2 får denna medverkan beaktas på ett förenklat sätt genom införandet av en variabel av den medverkande flänsbredden b_{eff} där flänsen antas medverka fullt ut inom denna bredd (Al-Emrani m. fl., 2013). Den effektiva flänsbredden användes för att räkna ut tvärsnittskonstanter utan hänsyn till armering och ursparningar. Resultatet redovisas i Tabell 5.3 där x_{cs} och x_{cf} är tyngdpunktsläge från överkant, se Bilaga D och Bilaga E för fullständiga beräkningar.

Tabell 5.3: Tvärsnittskonstanter för stöd och fält, uk = underkant, ök = överkant.

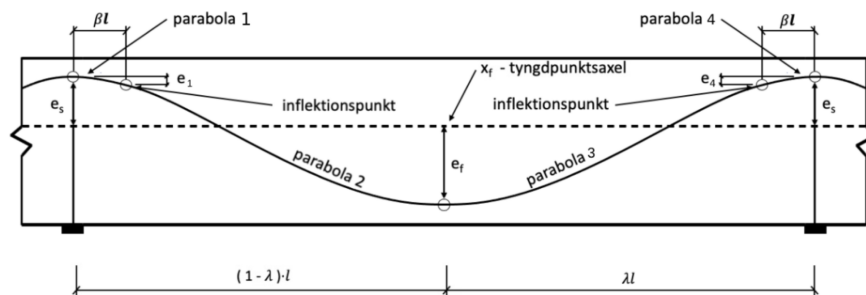
	b_{eff} ök [m]	b_{eff} uk [m]	A_{cs} [m ²]	x_{cs} [m]	I_{cs} [m ⁴]
Stödsnitt 1	5.75	3.75	5.595	1.3369	7.8557
Stödsnitt 2	4.57	2.7	4.5915	1.3072	6.0604
Stödsnitt 3	4.18	2.505	4.3283	1.3193	5.6341
Stödsnitt 4	4.18	2.505	4.3283	1.3193	5.6341
Stödsnitt 5	5.75	3.75	5.595	1.3369	7.8557
	b_{eff} ök [m]	b_{eff} uk [m]	A_{cf} [m ²]	x_{cf} [m]	I_{cf} [m ⁴]
Fältsnitt 1	5.75	3.75	5.595	1.3369	7.8557
Fältsnitt 2	5.75	3.75	5.595	1.3369	7.8557
Fältsnitt 3	5.75	3.75	5.595	1.3369	7.8557
Fältsnitt 4	5.75	3.75	5.595	1.3369	7.8557

5.3.2 Spännkablar

För dimensioneringen av spännkablar bestäms spännkraften med hänsyn till kravet om sprickfrihet vid uppspänning (Engström, u. å). Tvångsmomentet uppskattas först preliminärt till hälften av stödmomentet för karakteristisk last utan inverkan av uppspänning, se Bilaga E för beräkningar.

Enligt Eurokod 2 ska möjlig variation av spännkraft beaktas vid beräkningar i brukgränstillstånd för att beakta att tvärsnittet inte spricker (Engström, u. å.). Detta görs genom en tillämpning av en övre och undre gräns för spännkraften där gränsvärden för drag- och tryckspänningar inte får överskridas.

Inplacering av spännarmeringen utfördes i två delar anpassat efter respektive spännvidd på 49 och 36 m. Kabelföringen utformas som fyra parabelsegment där det för varje segment bestäms excentricitet, längd, krökning och lutning, se Figur 5.1 samt Tabell 5.4 och Tabell 5.5.



Figur 5.1: Spännarmeringens kabelföring. Författarnas egna bild.

Tabell 5.4: Parametrar för kabelföring, 49 m spännvidd.

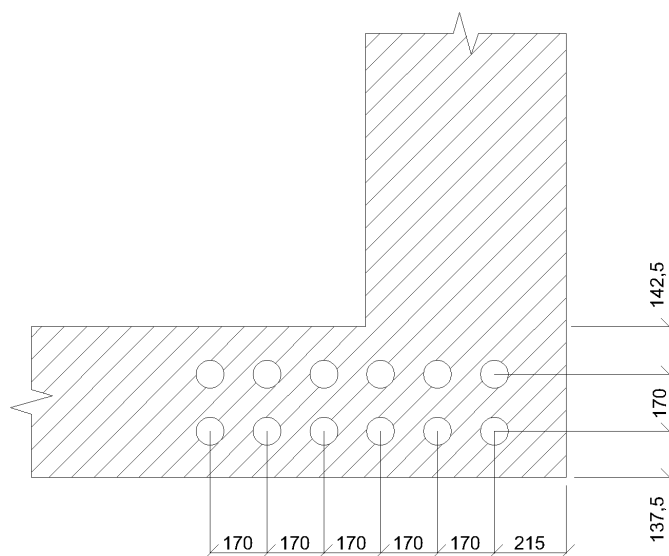
	Excentricitet från inflektionspunkt [m]	Längd [m]	Krökningsradie [m]	Lutning [rad]
Parabol segment 1	1.2995	11.27	48.8699	0.2306
Parabol segment 2	1.5255	13.23	57.3690	0.2306
Parabol segment 3	1.5255	13.23	57.3690	0.2306
Parabol segment 4	1.2995	11.27	48.8699	0.2306

Tabell 5.5: Parametrar för kabelföring, 36 m spännvidd.

	Excentricitet från inflektionspunkt [m]	Längd [m]	Krökningsradie [m]	Lutning [rad]
Parabol segment 5	1.5255	9.72	30.9664	0.3139
Parabol segment 6	1.2995	8.28	26.3788	0.3139
Parabol segment 7	1.2995	8.28	26.3788	0.3139
Parabol segment 8	1.5255	9.72	30.9664	0.3139

Vid uppspänning av spännkablar uppstår friktionsförluster mellan kablarna och ursparingsrör på grund av vinkeländringar och i denna studie har en förenkling tillämpats där friktionsförlusterna har antagits till 20 % av den initiala spännkraften. Spännarmeringssystemet har valts med ett aktivt ankare från CCL av typen XM-45,

spänntråden valdes av modell Y1860S7 med en diameter på 13 mm och ursparingsröret har en invändig diameter på 80 mm (CCL, u. å). Antal kablar beräknades till 24 stycken med 17 trådar i varje kabel, se Bilaga D och Bilaga E för beräkningar. Spännkablarna placeras i två lager enligt Figur 5.2.



Figur 5.2: Spännarmeringens placering i fält, med mått i millimeter. Författarnas egna bild.

5.3.3 Böjarmering och tvärkraftsarmering

Utöver spännarmeringen krävs det även kompletterande böjarmering samt tvärarmering. Då spännkablarna förväntas ta upp majoriteten av krafterna i böjning, dimensioneras böjarmeringen utifrån minimikravet från Eurokod 2 (Al-Emrani m. fl., 2013) och med en stångdiameter på 20 mm. Vidare placeras böjarmeringen i underflänsen i fältsnitt och i överflänsen i stödsnitt, vilket leder till två olika uppsättningar av böjarmering, vilka visas i Tabell 5.6.

Tabell 5.6: Böjarmering i längdled.

	Antal stänger	Centrumavstånd [m]	Antal lager
Fält	18	0.412	1
Stöd	27	0.423	1

Tvärkraftsarmeringen har, i likhet med böjarmeringen, dimensionerats utifrån Eurokod 2 (Al-Emrani m. fl., 2013). Bygeldiametern antogs till 12 mm, vilken sedan användes för att uppskatta armeringsinnehållet. Med hjälp av den uppskattningen beräknades bygelavståndet till 90 mm, vilket sedan kontrollerades mot det maximalt tillåtna avståndet (Al-Emrani m. fl., 2013), se Bilaga D.7. Några noggrannare be-

räkningar på antalet byglar utfördes inte, utan det uppskattade armeringsinnehållet kontrollerades endast mot ett minimivärde (Al-Emrani m. fl., 2013).

5.4 Dimensionering i tvärled

En dimensionering av överflänsen i tvärled är nödvändig eftersom även den utsätts för de dimensionerande lasterna i Tabell 5.1. De dimensionerande momenten och tvärkrafterna i tvärled beräknades på liknande sätt som i längdled för den karakteristiska lastkombinationen, se Bilaga E.

Enligt lastmodellen LM71, se avsnitt 4.2 är det maximala avståndet 1.6 m mellan punktlaster i längdled, vilket leder till att dimensioneringen i tvärled endast görs för detta avstånd. Detta innebär i sin tur att den beräknade mängden armering behöver upprepas var 1.6 m utefter hela brons längd.

5.4.1 Armering i tvärled

Den tvärgående böjarmeringen dimensionerades utifrån det maximala momentet i fält- respektive stödsnitt och stångdiametern valdes till 20 mm även i tvärled. Resultaten i fält samt över stöd presenteras i Tabell 5.7. Eftersom den tvärgående böjarmeringen alltid placeras i överflänsen, kommer armeringen i fält och över stöd att placeras i underkanten respektive överkanten av överflänsen.

Tabell 5.7: Böjarmering i tvärled.

	Antal stänger	Centrumavstånd [m]	Antal lager
Fält	17	0.089	1
Stöd	7	0.216	1

Tvärkraftsarmeringen i tvärled har, i likhet med den i längdled, en stångdiameter på 12 mm och den beräknades på samma sätt, se Bilaga E. Vidare kommer den, precis som böjarmeringen, endast att placeras i överflänsen med ett bygelavstånd på 110 mm.

5.5 Kontroller

Efter den preliminära dimensioneringen utfördes kontroller av tvärsnittet i längdled samt tvärled. I längdled kontrollerades momentkraftskapaciteten samt nedböjningen, och i tvärled kontrollerades tvär- och momentkraftskapacitet, nedböjning samt sprickbildning. Sprickkontroll utfördes endast i tvärled eftersom spännarmeringen i längdled förhindrar sprickbildning.

Tvär- och momentkraftskontrollen gjordes genom att beräkna kapacitetet på böj- och tvärkraftsarmeringen och jämföra dessa med de dimensionerande krafterna. Tvärsnittet hade tillräcklig kapacitet i både längdled och tvärled.

Nedböjningen beräknades enligt den grafiska metoden som presenteras i Bilaga D.9. Kravet på nedböjning är $L/800$, se avsnitt 2.2.1, där L är spännvidden i det aktuella spannet, vilket i tvärled är spannet mellan de två liven och i längdled spannet mellan stöd. De beräknade nedböjningarna redovisas i Tabell 5.8.

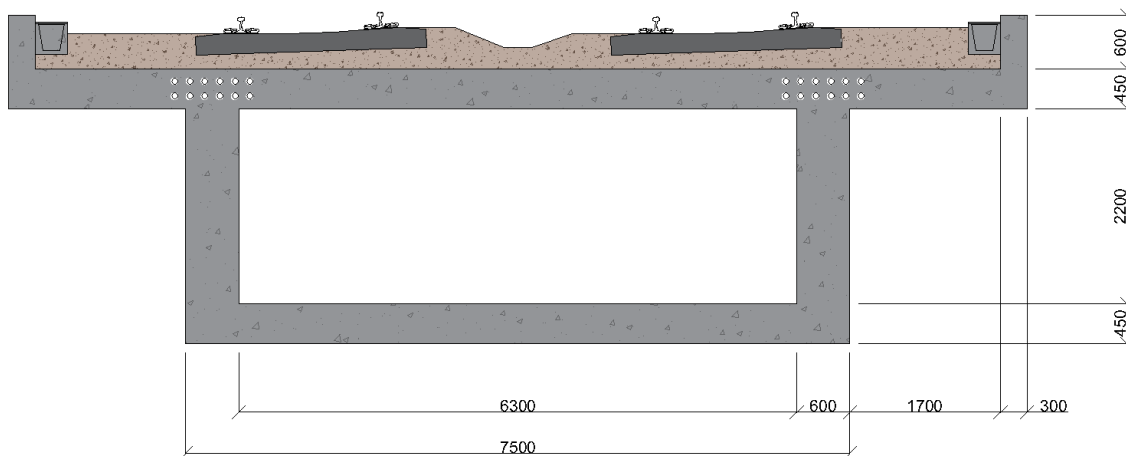
Tabell 5.8: Beräknad nedböjning.

	Spännvidd [m]	Krav [mm]	Beräknad nedböjning [mm]
Längdled	49,0	61,2	54,7
	36,0	45,0	11,5
Tvärled	6,9	8,63	4,03

Den sista kontrollen som utfördes var sprickkontroll, vilket endast utfördes på överflänsen i tvärled, se Bilaga D.8. Eftersom de dimensionerande momenten underskred det beräknade sprickmomentet över både fält och stöd drogs slutsatsen att överflänsen är osprucken över hela bron.

5.6 Slutgiltigt tvärsnitt

Den preliminära dimensioneringen genomfördes i syfte att i ett tidigt stadium utvärdera brokonceptets genomförbarhet och lämplighet. Således bestod beräkningarna delvis av en itereringsprocess i syfte att optimera tvärsnittet, men ytterligare beräkningar krävs för att slutföra dimensioneringen av bron. Den preliminära dimensioneringen resulterade i det tvärsnitt som redovisas i Figur 5.3.



Figur 5.3: Slutgiltigt tvärsnitt över stöd, med mått i millimeter. Författarnas egna bild.

6

Diskussion

I detta kapitel presenteras de reduceringar och antaganden som behövde göras under projektets gång för att simplificera och ta fram ett resultat som är anpassat för de kunskaps- och tidsbegränsningar som tillkommer i arbetet. Kapitlet lyfter även vidare utvecklingsmöjligheter för att förbättra arbetet.

6.1 Urvalsprocess

Urvalsprocessen av brokonceptet baserades på en viktad utvärderingsmatris där flera relevanta kriterier jämfördes. Beslutsprocessen för brovalet möjliggjordes genom att varje kriterium tilldelades en viktfaktor utifrån inbördes jämförelser. Klimatpåverkan och arbetsmiljö prioriterades högst i jämförelse med andra kriterier vilket visar en tydlig ambition för att beakta hållbarhet och säkerhet. Däremot erhöll den valda bron endast ett medelvärde inom klimatkriteriet och detta indikerar att en vidare analys behöver genomföras för att undersöka möjligheter att vidare minska brons klimatpåverkan i form av en ännu mer optimerad dimensionering. Även kriterier såsom inspektion och underhåll har tilldelats lägre vikt faktorer trots att det vid en fullständig projektering kan ha stor betydelse för brons långsiktiga funktioner. I ett sådant scenario kan dessa faktorer ha påverkat utfallet annorlunda jämfört med i detta arbete, där klimatpåverkan och arbetsmiljö var betydande för valet av bro.

Urvalet bygger till viss del på författarnas egna erfarenheter och bedömningar utifrån föreläsningar och seminarier under utbildningens tid, vilket innebär att viktningen i detta fall är subjektiv och kunskapsbegränsad. En mer erfaren ingenjör eller etablerad verksamhet hade potentiellt kunnat göra en annan prioritering av de valda kriterierna. Detta hade därför kunnat leda till att ett annat brokoncept hade passat bättre för det givna syftet. Inspektion och underhåll hade i ett verkligt projekt även utgjort en vital del av ekonomin, vilket hade kunnat påverka livscykelkostnader och mer hänsyn hade behövts tas för brons livslängd som inte analyserats tillräckligt djupt i detta teoretiska arbete. Trots dessa begränsningar är det möjligt att påstå att metoden för viktning ändå ses som ändamålsenlig och avgörande.

6.2 Beräkningar och analys

Beräkningarna som har genomförts i detta projekt har i flera avseenden förenklats för att anpassas till arbetets omfattning och avgränsningar. Dimensionering av järnvägsbron har baserats på begränsad mängd lastfall och i projektet har endast en sektion av bron undersökts i detalj. Valet att begränsa analysen till en delsektion innebär att slutresultatet ger en övergripande och mindre djupgående uppskattning av konstruktionens bärförmåga i helhet jämfört med dimensionering av hela bron. Vidare har även långtidseffekter som kan påverka brons deformationer och spänningsfördelningen över tid förenklats och endast beaktats i spännkablarna men inte i den övriga beräkningen, vilket hade kunnat påverka resultatet.

Fler förenklingar som har gjorts i projektet är att beräkningar av horisontella laster inte har inkluderats samt att kantbalkar i konstruktionen har försummats. Detta motiveras med att dessa laster har störst påverkan på underbyggnaden och grundläggningen vilka valdes att inte beräknas enligt avsnitt 1.3. Eftersom kantbalkarna inte räknades på innebär det att lokala spänningar som uppstår ihop med brons risk för sprickbildning inte helt tagits hänsyn till. Det antogs i balkbrons dimensionering att det är möjligt att placera spännkablar i underflänsen mellan fält- och stödsnitt. Denna lösning är egentligen konstruktivt komplex. Det krävs vidare beräkningar gällande placeringen och kabelföringen för spännkablarna som kan verifiera genomförbarheten.

Resultaten som framtogs bedöms däremot ändå rimliga för denna konceptnivå trots de förenklingar och antaganden som gjordes just för den anledning att arbetets syfte främst har varit att jämföra och utvärdera broalternativ snarare än att ta fram en helt färdig konstruktion.

6.3 Källkritik

Arbetet som utförts är baserat på källmaterial omfattande vetenskapligt och tillförlitligt grundad information. Informationen för litteraturstudien har i störst utsträckning hämtats från artiklar publicerade utav legitima experter med erfarenhet inom ämnet och meriterad kurslitteratur vilket styrker dess teoretiska värdighet. De använda källorna är även peer-review granskade vilket är ytterligare en aspekt för trovärdighet och vetenskaplig kvalitet. Utöver detta har även information som presenterats under föreläsningar utav erfarna föreläsare och akademiker från Chalmers inkluderats. Projektets följande del som fokuserar på dimensionering och kravställning av brobyggnaden är också förankrad i etablerade standarder såsom riktlinjer från Trafikverket och Svenska institutet för standarder (SIS) ihop med Eurokoder. Dessa källor är aktuella, branschledande och framtagna av kvalificerade aktörer. De används dessutom inom både forskning och praktiska situationer inom ingenjörsvetenskapen vilket gör projektets resultat jämförbart med ett verkligt projekt. Krav och avgränsningar är också legitima då de framställts utifrån en teknisk beskrivning producerat utav COWI som är ett etablerat konstruktionsbolag.

7

Slutsats

Projektets syfte var att ta fram ett förslag till en dubbelspårig järnvägsbro för Ostlänken på delsträckan Stavsjö–Loddby, samt att genomföra en preliminär dimensionering av det valda brokonceptet. Efter jämförelse och utvärdering av flera lämpliga brotyper, utifrån projektets förutsättningar och framtagna kriterier, valdes en spännarmerad betongbalkbro med lådtvärsnitt och fem mellanliggande stöd som slutligt brokoncept.

Den preliminära dimensioneringen resulterade i dimensioner för överbyggnadens tvärsnitt samt en tekniskt motiverad utformning anpassad efter projektets avgränsningar. För att vidare optimera konstruktionen krävs dock ytterligare analyser och mer detaljerade beräkningar. Framförallt behöver underbyggnad och grundläggning studeras vidare, samtidigt som det är möjligt att optimera tvärsnittet ytterligare med avseende på materialåtgång, ekonomi och klimatpåverkan. Trots de förenklingar som gjorts bedöms arbetet ha uppfyllt sitt syfte och problemformuleringen anses därmed besvarad.

8

Referenser

- Abelsson, B., Båge, P., & Westerlund, L. (1998). *Träbroar - ett alternativ till stål och betong*. Svenska Kommunförbundet.
- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2013). *Bärande konstruktioner Del 1*. Chalmers tekniska högskola.
- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2014). *Bärande konstruktioner Del 2*. Chalmers tekniska högskola.
- Balázs, G., Farkas, G., & Kovács, T. (2022). Reinforced and prestressed concrete bridges. I *Innovative bridge design handbook* (2. utg., s. 267–325). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823550-8.00009-3>
- Brosamverkan. (2022). *Broprojekteringshandboken* (1-2).
- CCL. (u. å). Post-Tensioning Systems. https://www.cclspannarmering.se/uploads/Downloads/CCL_Civils_Brochure_LR.pdf
- Engström, B. (u. å). *Preliminär dimensionering av förspända betongbroar*. [Föreläsningmaterial]. Chalmers tekniska högskola.
- Fridlund, A., & Svensson, J. (1992). *Trågbroar - Järnvägsbroar med genomgående ballast* (TVBK-5059). Tekniska Högskolan i Lund.
- Fröbel, J., & Bergkvist, P. (2020). Att välja trä. *Att välja trä*, (10). Hämtad 16 februari 2026, från <https://www.svenskttra.se/siteassets/5-publikationer/pdf/avt-2020-72ppi.pdf>
- Galal, K., & Yang, Q. (2009). Experimental and analytical behavior of haunched thin-walled RC girders and box girders. *Thin-Walled Structures*, 47(2), 202–218. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.05.010>
- Gasser, C., Bjelland, A., Fish, D., Park, S., Yarnold, M., Helwig, T., Hurlebaus, S., Williamson, E., Engelhardt, M., & Hebdon, M. (2023). Brace Stiffness Quantification for Lean-on Bracing. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85159330769&partnerID=40&md5=9d7f1ebce67a1a8f9e8ef99cafc9a791>
- Haider, M. A., Batikha, M., & Elhag, T. (2020). Precast versus cast in-situ concrete in the construction of post-tensioned box-girder bridges: Span effect. *Structural Concrete*, 21(1), 56–64. <https://doi.org/10.1002/suco.201800263>
- Han, X., Yang, D. Y., & Frangopol, D. M. (2021). Optimum maintenance of deteriorated steel bridges using corrosion resistant steel based on system reliability and life-cycle cost. *Engineering Structures*, 243(112633). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112633>

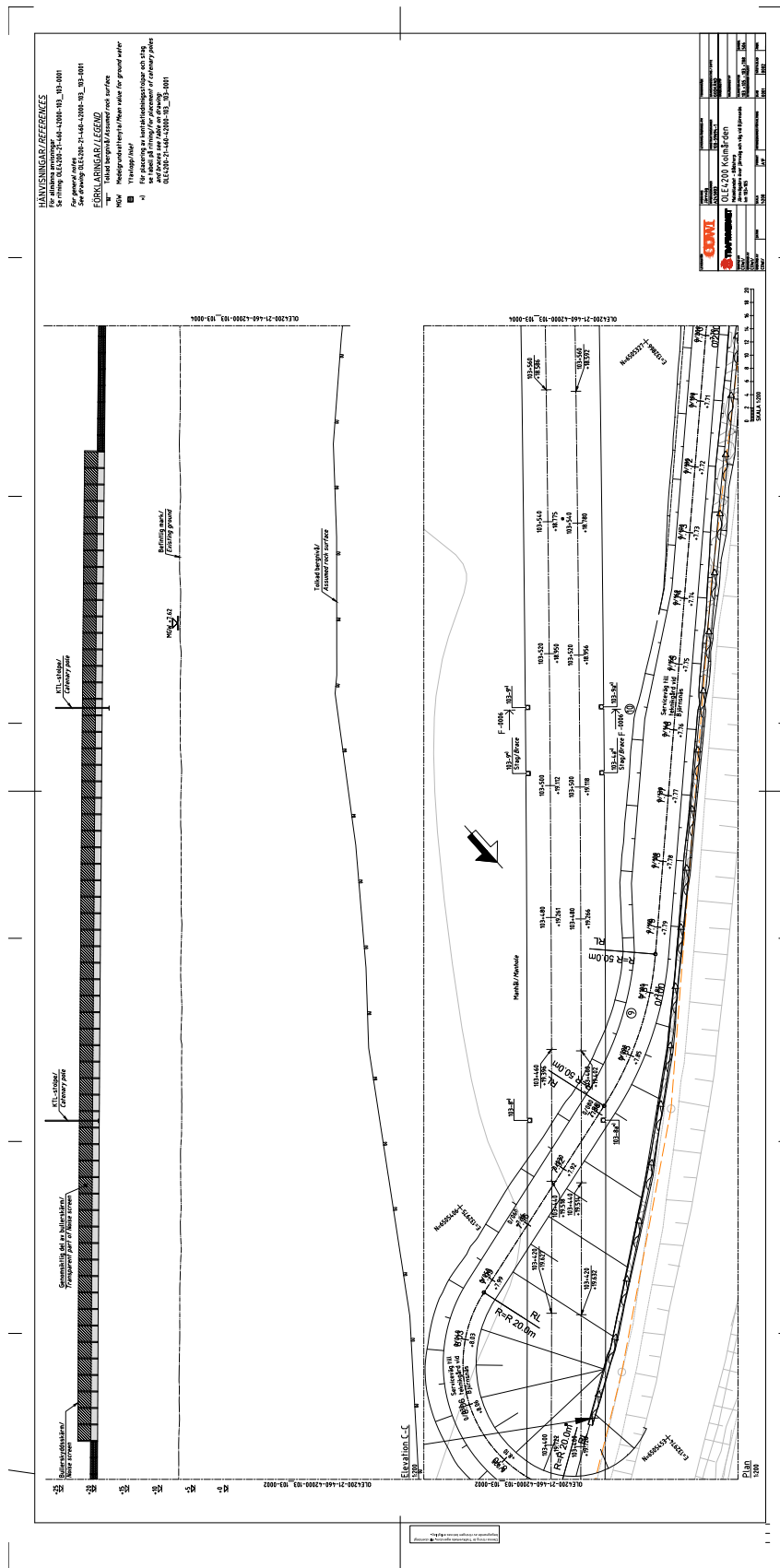
- Lebet, J.-P., Hirt, M. A., & Couchman, G. (2013). *Steel bridges: conceptual and structural design of steel and steel-concrete composite bridges*. EPFL Press.
- Li, L., Mahmoodian, M., Khaloo, A., & Sun, Z. (2022). Risk-Cost Optimized Maintenance Strategy for Steel Bridge Subjected to Deterioration. *Sustainability (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/su14010436>
- Li, Y., Luo, X., & Li, Y. (2024). Experimental Analysis of Static and Dynamic Performance for Continuous Warren Truss Steel Railway Bridge in Heavy Haul Railway. *Modelling and Simulation in Engineering*, (3767759). <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2024/3767759>
- Montens, S., Vollery, J.-C., & Pandey, A. (2018). 300 m of U-Shaped Viaducts for Metro Lines From Around the World. *Structural Engineering International*, 28(2), 123–127. <https://doi.org/10.1080/10168664.2018.1450692>
- Nassr, A. A., Abd-el-Rahim, H. H., Kaiser, F., & El-Sokkary, A. E.-H. (2022). Topology optimization of horizontally curved box girder diaphragms. *Engineering Structures*, 256, 113959. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113959>
- Pétursson, H., & Strandberg, A. (2020). Rostskyddsmålning av stålbroar. *Nyheter om Stålbyggnad*. Hämtad 17 februari 2026, från <https://www.stalbyggnad.se/stalbroar/rostskyddsmalning-av-stalbroar/>
- Pousette, A. (1998). *Snedstags- och hängbroar. Litteraturstudie med inriktning mot trä* (P 9812094). Träteknik – Institutet för träteknisk forskning. Hämtad 16 februari 2026, från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-28654>
- Saylan, A. A., & Seğer, M. (2024). Structural frequency-based maintenance management method for steel truss bridges under atmospheric corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering*. <https://doi.org/10.1080/15732479.2024.2401373>
- Schanack, F., & Ramos, O. R. (2016). Arch bridges. I *Innovative Bridge Design Handbook* (s. 335–357). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800058-8.00013-X>
- Si, J., Zhu, L., Ma, W., Meng, B., Dong, H., Ning, H., & Zhao, G. (2024). Study on Vibration and Noise of Railway Steel-Concrete Composite Box Girder Bridge Considering Vehicle-Bridge Coupling Effect. *Buildings*, 14(8), 2509. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings14082509>
- Song, Y. S., Ding, Y. L., Wang, G. X., & Li, A. Q. (2016). Fatigue-life evaluation of a high-speed railway bridge with an orthotropic steel deck integrating multiple factors. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(5), 04016036. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000887](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000887)
- Spännteknik. (u. å). *TOBE FR4 Potlager*. [Produktblad].
- Sweco. (2024, 18. januari). *Fastställelsehandling Ostlänken, järnvägsplan delen Stavsjö-Loddbys. Planbeskrivning, Norrköpings kommun, Östergötlands län samt Nyköpings kommun Södermanlands län*. (Planbeskrivning). Trafikverket. Hämtad 10 februari 2026, från <https://bransch.trafikverket.se/ostlanken-dokument>
- Svensk Betong. (u. å). *Betongens klimatpåverkan*. Hämtad 9 mars 2026, från <https://www.svenskbetong.se/hallbarhet/betong-och-klimat>
- Svenska Institutet för Standarder. (2003, 17. oktober). Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 2: Trafiklast på broar. <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/>

- produkter/byggnadsmaterial- och- byggnader/byggnadsindustrin/tekniska-aspekter/ssen19912/
- Trafikverket. (2014, 24. juni). *BaTMan – kodförteckning och beskrivning av brotyper*.
- Trafikverket. (2019, 5. juni). *Krav Brobyggande* (TDOK 2016:0204 Version 3.0). <https://trvdokument.trafikverket.se/Versioner.aspx?spid=289&dokumentId=TDOK%202016%3A0204>
- Trafikverket. (2025a, 23. juni). *Ostlänken, en ny dubbelspårig järnväg*. Hämtad 11 februari 2026, från <https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-som-stracker-sig-over-flera-lan/ostlanken-en-ny-dubbelsparig-jarnvag/>
- Trafikverket. (2025b, 1. juli). *Banöverbyggnad Spårssystem* (Kravdokument Nr TRVINFRA-00012 Krav Version 5.0). <https://puben.trafikverket.se/dpub/visa-dokument/f55286b0-928f-4d00-837f-87b5ddd99fa7>
- Trafikverket. (2025c, 1. juli). *Bro och broliknande konstruktion Byggande* (TRVINFRA-00227). [https://puben.trafikverket.se/dpub/api/v1/Dokument/DownloadDokument?id=b7172e0b-08ca-4742-b00a-425c71582c9c&dokumentName=Krav %20TRVINFRA-00227%20v6_0.pdf](https://puben.trafikverket.se/dpub/api/v1/Dokument/DownloadDokument?id=b7172e0b-08ca-4742-b00a-425c71582c9c&dokumentName=Krav%20TRVINFRA-00227%20v6_0.pdf)
- Trafikverket. (2025d, 1. juli). *Bro och broliknande konstruktion, Allmänna krav* (TRVINFRA-00226 Krav Version 6.0). <https://puben.trafikverket.se/dpub/visa-dokument/e8256974-a3a7-45c2-8e05-0354720d4d0d>
- Trafikverket. (2025e, 30. september). *Teknisk beskrivning - Bärverk i bro* (OLE4200-21-010-42000-91_106-0006).
- Trafikverket. (2025f, 7. november). *Ostlänken i Norrköpings kommun*. Hämtad 15 februari 2026, från <https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-som-stracker-sig-over-flera-lan/ostlanken-en-ny-dubbelsparig-jarnvag/ostlanken-i-norrkopings-kommun/>
- Trafikverket. (2026, 1. januari). *Banutformning* (Kravdokument Nr TRVINFRA-00398 Krav Version 3.0). <https://puben.trafikverket.se/dpub/visa-dokument/8930bd3e-3422-425e-8677-3631c77971d5>

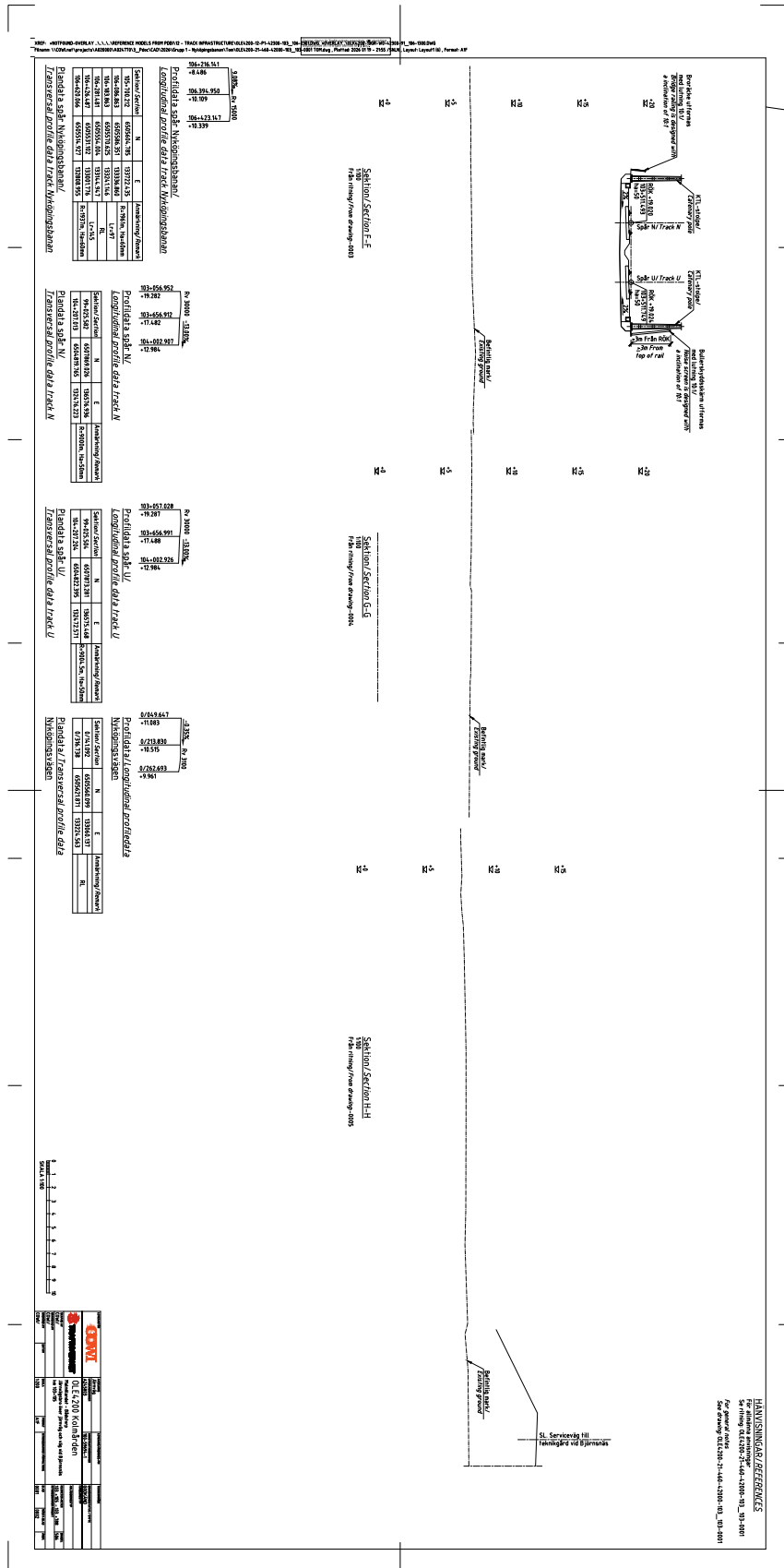
A

Förslagshandlingar

Nedan presenteras de förslagshandlingar som tillhandahållits av COWI.



A.6 Ritning 6



B

Litteraturstudie

Innan ett brokoncept kan väljas behöver ett relevant underlag tas fram. Följande litteraturstudie behandlar därför vanligt förekommande material inom brobyggnation samt några generella brotyper.

B.1 Material

De huvudsakliga materialen vid brobyggnation är trä, stål och betong. Dessa material har olika egenskaper och fördelar som beaktas vid val av brokoncept. Faktorer såsom hållfasthet, miljöpåverkan och kostnad är exempel på aspekter som påverkar materialvalet.

B.1.1 Trä

Traditionellt sett byggs brokonstruktioner i stål eller betong, men det finns fördelar med trä som material. Främst är trä fördelaktigt ur ett miljöperspektiv, eftersom energiåtgången samt utsläppen av koldioxid vid produktion är avsevärt lägre än vid tillverkning av stål och cement (Fröbel & Bergkvist, 2020). Trä lagrar koldioxid under sin livstid och fungerar som ett förnybart material vid hållbart skogsbruk, till skillnad från andra byggmaterial som framställs från ändliga resurser. Vidare är trä ett lätt material, vilket gör det enkelt att transportera och montera förtillverkade element.

Träbroar avser vanligtvis gång- och cykeltrafik, men kan också utformas för att bära biltrafik (Fröbel & Bergkvist, 2020). Lång spännvidd i kombination med stor last är dock inte lämpligt för träbroar, utan de lämpar sig bäst för relativt korta brolängder (Abelsson m. fl., 1998). Vid stora spännvidder blir trä som material oekonomiskt och ger stora konstruktionshöjder för att kunna bära lasterna. Vidare är vibrationer och svängningar ofta dimensionerande för träbroar, vilket ställer krav på konstruktionens styvhet och utformning (Brosamverkan, 2022). Vad gäller beständighet finns det inget som tyder på att en bro i trä skulle ha kortare teknisk livslängd än broar i stål eller betong (Abelsson m. fl., 1998). Med rätt utformning och underhåll kan träbroar uppnå en tillfredsställande och motsvarande livslängd.

B.1.2 Stål

Det finns en lång tradition av att konstruera järnvägsbroar i stål, en tradition med början långt innan betong och kompositmaterial utvecklades. Det traditionella konceptet utgår ifrån att minimera egenvikten, men samtidigt få en stel struktur, vilket oftast resulterade i fackverksbroar. Allt eftersom utvecklingen har gått framåt, har järnvägsbroarna blivit alltmer lika vägbroar, exempelvis i form av kompositbalkbroar (Lebet m. fl., 2013). På grund av dess lätta egenvikt och förhållandevis enkla konstruktion har många järnvägsbroar byggts i stål. Däremot finns det en oro kring huruvida sådana broar är tillräckligt tåliga för att bära den ständigt ökande lasten från tågtrafiken. Denna upprepande och ökande lasten tillsammans med en känslighet för korrosion och utmattning, leder till att det är viktigt att regelbundet utvärdera stålets utmattning och resterande livslängd (Song m. fl., 2016).

Stålets långa livslängd och möjlighet för återanvändning och återvinning, ger ett minskat resursuttag vid tillverkningen. Detta är en mycket betydelsefull egenskap hos stålet, eftersom det vanligtvis är resursuttaget som medför störst miljöpåverkan. Vidare bidrar även ytbehandlingen mot korrosion med en viss miljöpåverkan, samtidigt som den måste utföras flera gånger under konstruktionens livstid (Brosamverkan, 2022). Ett alternativ för att skydda mot korrosion är att använda rostfritt eller rosttrögt stål, däremot har det ännu inte kunnat appliceras på en global skala på grund av den höga kostnaden (Han m. fl., 2021).

B.1.3 Betong

Betong används för många olika brotyper, som exempelvis plattbroar, balkbroar och bågbroar, med varierande spännvidder. Gemensamt för dessa brotyper är att de oftast byggs med armerad betong, vilket kan göras i två utformningar; antingen slakarmerad eller spännarmerad betong där den spännarmerade betongen ger en längre spännvidd, upp till cirka 200 m för balkbroar (Trafikverket, 2014).

Vidare kan antingen prefabricerade betongelement eller platsgjuten betong användas. Båda dessa konstruktionstyper kan tillämpas för de allra flesta brostrukturer, förutsatt att det är armerad eller förspänd betong som används (Balázs m. fl., 2022). En av de stora skillnaderna mellan platsgjutna och prefabricerade betongelement, är konstruktionstiden; exempelvis går det cirka fem månader snabbare att bygga en bro med två spann på 70 m med prefabricerade element än med platsgjutna element. En kortare konstruktionstid innebär en kortare tid då omgivningen påverkas, men också en reducerad kostnad, vilket framförallt märks på broar med spann från cirka 60 m och uppåt (Haider m. fl., 2020).

Broar i betong medför däremot stora utmaningar när det kommer till arbetsmiljö, eftersom armeringsarbetet såväl som gjutningen innebär en stor påfrestning för arbetarna. Det är just betongarbetarna inom byggindustrin som utsätts för störst risk för förslitningsskador, på grund av repetitivt arbete i svåra arbetsställningar. Till följd av detta kan det vara svårt att hitta kvalificerad personal, vilket leder till underbemannade projekt och en ökad stress på arbetsplatsen. Detta kan i sin tur

medföra lägre produktivitet och därmed högre kostnad. Därför är det viktigt att redan under projekteringsstadiet gå igenom arbetarnas moment och hitta lösningar som passar både dem och konstruktionen (Brosamverkan, 2022).

Ur en miljösynpunkt är betong ett långsiktigt hållbart material, delvis på grund av dess långa livstid och potential för återvinning, men också tack vare förmågan att ta upp koldioxid från luften under dess livstid genom karbonatisering. De största utsläppen sker under produktionsskedet, där cementen står för cirka 90 %, vilket gör begränsningen av cement en av de största utmaningarna i betongindustrin (Svensk Betong, u. å).

B.2 Brotyper

Nedan följer en övergripande beskrivning av några vanliga brotyper. I urval 1 görs sedan en första utsortering av de brokoncept som inte lämpar sig för projektets geometriska förutsättningar och krav.

B.2.1 Balkbro

Balkbroar är en mycket vanlig brotyp som innebär att huvudbärverket består av balkar, som kan vara utformade på olika sätt. Ofta är balkbron utformad med ett sekundärbjälklag i betong som är placerad ovanpå ett antal balkar (Trafikverket, 2014). Balkbroar kan byggas i olika material, men vid spännvidder större än 20 m är stål eller betong vanligt (Brosamverkan, 2022). För betongbalkar är det vanligt med voter i horisontalplanet för att öka tvärkraftskapaciteten. Antalet balkar har en liten påverkan på lasteffekter varför det är vanligt att använda två eller tre balkar som bärverk.

Vanliga spännvidder för balkbroar i betong är ungefär 10-30 m, större spännvidder än så kräver armerad betong (Brosamverkan, 2022). En spännarmerad betongbro med vägtrafiklast kan ha spännvidder uppemot 200 m och något kortare för järnvägstrafik (Trafikverket, 2014). Balkbroar i betong som är avsedda för järnvägstrafik utformas ofta med ett lådtvärsnitt, vilket beskrivs närmare i avsnitt B.2.3. För balkbroar i stål avses att överbyggnaden huvudsakligen består av stål. Som tidigare nämnts projekteras dock farbanan i de flesta fall i betong, och bron kan då utformas antingen med eller utan samverkan mellan materialen.

B.2.2 Samverkansbro

En samverkansbro byggs av materialen stål och betong och används ofta vid spännvidder mellan 20 och 70 meter (Brosamverkan, 2022). Samverkansbron kännetecknas av en stålöverbyggnad med antingen I- eller lådbalkar och en farbana av betong. Samverkan mellan stålbalkarna och brobaneplattan tillfogas genom stålbultar, så kallade studs, som svetsas på överflänsarna och sedan gjuts in i betongplattan.

Samverkansbroar är lämpliga vid stora spännvidder och vid dåliga grundläggnings-

förhållanden. Denna brotyp är också passande när kort byggtid är ett krav. I regel behövs ingen ställning vid montering, utan balkelementen kan lyftas på plats eller lanseras ut från landfästen. Brobanan kan antingen bestå av platsgjuten betong eller monteras av förtillverkade betongelement. Stålöverbyggnaden är relativt lätt och medför en låg egenvikt för bron, vilket kan vara önskvärt i vissa fall. Dock måste säkerhetsåtgärder beaktas för att hindra flyttning i sidled vid en påkörning. Om bron byggs i en kurva är lådbalk fördelaktigt eftersom den har stor vridstyvhet.

B.2.3 Trågbro

Trågbro avser en bro som är utformad som ett tråg, oftast med ett öppet, rektangulärt kärl. Trågbroar avser främst järnvägsbroar där tråget fylls med ballast, vilket bidrar till att dämpa vibrationerna från tågtrafiken och därmed minska överföringen av stomljud till konstruktionen (Fridlund & Svensson, 1992). Ballasten medför dock även vissa nackdelar, då den ökade vikten belastar en redan tung konstruktion och ofta leder till en högre konstruktionshöjd. Detta kan vara ett problem vid begränsad bygghöjd på grund av passage av trafikled. Trågbroar utsätts också för höga mekaniska angrepp, vilket kan innebära ytterligare tekniska utmaningar för beständigheten i tråget. Vidare kan ansamling av smuts och fukt på trågets botten orsaka problem för ståltråg, medan kloridinträngning utgör en betydande utmaning för betongtråg.

Några vanliga brotyper är självbärande betong- och ståltråg som oftast används om utrymmet under bron är begränsat. Dessa brotyper har vanligtvis ett spännviddsintervall på 0-30 m för både betong- och ståltråg (Fridlund & Svensson, 1992). Om utrymmet inte är begränsat och stora spännvidder behövs, är samverkansbro med betongtråg en bra lösning där spännviddsintervallet är 30-80 m, beroende på tvärsnittets utformning.

B.2.4 Fackverksbro

En fackverksbro är en brotyp vars bärande konstruktion utgörs av ett fackverk. Fackverket består av stänger som bildar triangulära enheter förenade i knutar och fördelar lasten via tryck och drag. Konstruktionen innebär en rymlig design med låg egenvikt och används för spännvidder upp till 100 m (Trafikverket, 2014).

Oftast består fackverket av stål, men förekommer även i trä för gång- och cykelbroar (Trafikverket, 2014). På grund av höga produktionskostnader byggs inga fackverksbroar för vägtrafik, men det förekommer fortfarande för järnvägstrafik. För montering av fackverksstänger används oftast skruvförband eller svetsning vid platsmontering respektive prefabricerad tillverkning, där platsspecifika förutsättningar styr byggmetod. Montage till brons slutgiltiga placering kan genomföras genom lyft med kran eller lansering från landfäste.

Fackverk i stål behöver målas för att skydda stålet mot korrosion. Utöver detta behöver regelbundna inspektioner utföras, i syfte att kontrollera korrosionsgraden där punktmålning kan bli aktuell på särskilt utsatta områden. Underhållsmålning

genomförs med ungefär 25 års intervall (Saylan & Seger, 2024). Det är få standarder som är tillämpbara vid underhållsmålning, vilket innebär att projektspecifika lösningar behöver göras beroende på objektets förutsättningar (Pétursson & Strandberg, 2020). Beroende på brons komplexitet och längd kan detta vara en tidskrävande process. Utöver målningen, krävs blästring för att få bort det befintliga korrosionsskyddet. Vid användning av rosttrögt eller rostfritt stål minskas tiden för planerat underhåll, men i dagsläget används rosttrögt stål i huvudsak för vägbroar (Trafikverket, 2025d).

B.2.5 Bågbro

Bågbroar utformas med ett huvudbärverk som består av en eller flera bågar placerade antingen under eller över brobanan, som agerar som sekundärbärverk. Konstruktionen produceras vanligtvis i stål eller armerad betong där flera parallella bågar sammansätts med tvärbalkar (Brosamverkan, 2022). Byggmetoderna för en bågbro inkluderar möjligheten för prefabricerade bågsegment som lyfts och sammanfogas på plats eller att bågen och andra brodelar tillverkas med fribärande metod. En bågbros form är betydande för brons bärförmåga då dess egentygnd ger upphov till stora tryckkrafter som tas upp av bågen och leds vidare till upplagen. Detta är en stor fördel då denna kraftöverföring innebär att en bågbro kan dimensioneras för större spännvidder.

I regel kan bågbroar i ett spann användas för en spännvidd upp till 260 m medans flerfacksbroar normalt dimensioneras för ungefär 100 m per spann (Trafikverket, 2014). Däremot kan ett hinder uppkomma för brons konstruering då de horisontella krafter som uppstår från kraftfördelning ställer krav på lämplig grundläggning. För att minska dessa horisontella rörelser grundläggs denna typ av bro oftast på berg. Detta går dock att kringgå genom att utforma huvudbärverket med fria upplag på stöden med fasta och rörliga lager så att överbyggnadens krafter förs ner till marken (Trafikverket, 2014).

B.2.6 Snedkabelbro

En snedkabelbro har huvudsakligen tre utformningar vilket beskriver hur kablarna är arrangerade; harpform, solfjäderform samt halv-solfjäderform. Dessa utgörs för enkelt av tre konstruktionsdelar; pyloner, kablar och en förstyrningsbalk. Vanligtvis görs pylonerna i betong, medan brodäcket kan göras antingen med bara betong, som en samverkanskonstruktion eller en ortotrop stålplatta (Brosamverkan, 2022). Kablarna kan göras som stålkablar, linor eller solida stänger (Pousette, 1998). Beroende på hur pylonerna och kablarna placeras går det att få en spännvidd mellan pylonerna på 400 - 1 100 m. Det går att ha kortare spännvidder men det är först vid spann över 400 m som snedkabelbroar, ihop med hängbroar, är mer ekonomiska att använda jämfört med andra brotyper, exempelvis bågbroar (Lebet m. fl., 2013).

En fördel med snedkabelbroar är att de kan byggas helt utan ställning, eftersom dess utformning leder till att bron blir självförankrad under byggskedet, såväl som

när den är färdigbyggd. Den successiva utbyggnaden medför däremot att brobanan beter sig som en konsol innan hopbyggnad vid spannmitt. Det innebär att det finns en begränsning i förhållandet mellan spännvidden och brobredden, eftersom den nödvändiga stabiliteten i byggskedet endast är först styrningsbalkens sidostyvhet (Brosamverkan, 2022).

B.2.7 Övriga broar

Utöver ovan nämnda broar finns det ytterligare några typer som kommer diskuteras kort i detta avsnitt.

Rambroar finns normalt i två utformningar, plattrambro och balkrambro, och de används oftast endast i ett spann. Av de två typerna, är det balkrambron som kan nå den längsta spännvidden, cirka 50 m i ett spann (Brosamverkan, 2022). Eftersom denna spännvidd är gränsfall för vilka spännvidder som kan tänkas användas, samt med den förmodat höga lasten på bron anses denna vara irrelevant och kommer inte undersökas vidare.

Det finns också rena plattbroar, där överbyggnaden består av en sammanhängande platta. Till skillnad från plattrambro, kan en plattbro byggas i flera spann. Spännvidden för innerspannen blir då cirka 25 m och för ytterspannen blir den cirka 60 - 90 % av innerspannens spännvidd (Brosamverkan, 2022). 25 m är ett för kort spann i detta fall och plattbron är därför inte relevant för projektet.

Rörbroar fungerar för alla typer av trafik, men beroende på trafikslag ställs det olika krav på minsta överfyllnadshöjd. Vidare har rörbroar en mycket kort spännvidd, en rörbro av betong kan som mest nå en spännvidd på 3 m (Brosamverkan, 2022). På grund av överfyllnaden passar bron inte in på platsen, vilket ihop med den mycket korta spännvidden gör rörbroar irrelevanta för projektet.

Valvbroars huvudbärverk är utformat med ett valv av sten eller betong som är helt täckt med fyllning (Trafikverket, 2014). Fyllningen ger upphov till tryckkrafter på liknande sätt som för rörbroar. Valvbroar av sten kan utföras med spännvidder upp till 17 m och av betong upp till 30 m. Höga produktionskostnader, korta spännvidder kombinerat med estetisk utformning gör att valvbroar anses vara ett olämpligt brokoncept för detta projekt.

Hängbroar är tämligen lika snedkabelbroar i sin utformning, med skillnaden att hängbron har en förankringsanordning för bärkablarnas ändar. Hängbroar är lämpliga för mycket stora spann och är dessutom stabila upp till en längre spännvidd än snedkabelbron (Brosamverkan, 2022). Då snedkabelbron redan har diskuterats i urval 1, väljs hängbron bort på grund av dess likhet till snedkabelbron, men också på grund av dess mycket långa spännvidd och estetiska utformning.

C

Utvärderingsunderlag

Nedan presenteras underlag för urvalsprocessen i form av utvärderingsmatriser och bedömningskriterier.

C.1 Underlag för urval 1

De kvaliteter som bedömdes i det första urvalet, se Tabell C.1, är följande:

1. Utformning
2. Material
3. Möjlig spännvidd i meter
4. Uppnår spännvidd utan mittstöd (200 m)
5. Uppnår spännvidd med mittstöd (49 m)
6. Uppfyller krav på fri höjd (6,2 m)
7. Estetiskt godtagbar
8. Utvald

Tabell C.1: Urvalsmatris över urval 1. Egenskaperna för de olika brotyperna har sammanställts för att översiktligt utvärdera om de uppfyller ställda krav. Asterisk (*) innebär spännvidd för ett spann/flera spann.

Brotyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Fackverk	Överliggande fackverk	Stål	100	Nej	Ja	Ja	Ja	Ja
	Underliggande fackverk	Stål	100	Nej	Ja	Nej	Ja	Nej
Balkbro	Spännarmerad lådtvärsnitt	Betong	<200	Nej	Ja	Ja	Ja	Ja
	Slakarmerad	Betong	<25	Nej	Nej	Ja	Ja	Nej
Bågbro	Överliggande båge	Betong	260/100*	Ja	Ja	Ja		
	Överliggande båge	Stål	260/100*	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Underliggande båge	Betong	260/100*	Ja	Ja	Nej		
	Underliggande båge	Stål	260/100*	Ja	Ja	Nej	Nej	Nej
Sned-kabelbro	Överliggande pyloner	Stål och betong	1 100	Ja	Ja	Ja	Nej	Nej
Samverk-ansbro	I-balk	Stål och betong	70	Nej	Ja	Ja	Ja	Nej
	Lådbalk	Stål och betong	70	Nej	Ja	Ja	Ja	Nej
Trågbro	Självbärande tråg	Stål och betong	30	Nej	Nej	Ja	Ja	Nej
	Samverkanstråg	Stål och betong	80	Nej	Ja	Ja	Ja	Ja

C.2 Underlag för urval 2

Nedan följer ett sammandrag av de bedömningskriterier som beaktades och viktades för den slutgiltiga utvärderingen av de olika brokoncepten.

C.2.1 Estetik och design

Estetik och design beaktas vid installering av järnvägsbron på grund av dess närhet till skogs- och naturområde. En genomtänkt utformning av bron bör medföra att den upplevs som en naturlig del av landskapet och bevara områdets naturkänsla. Val av material och form av bron kan minska den visuella påverkan av konstruktionen på naturen så att bron smälter in i den omgivande miljön och inte stör landskapsbilden.

C.2.2 Produktionsmetod

Produktionsmetod avser tillvägagångssätt för tillverkning av brons beståndsdelar samt montering av dessa. Eftersom bron kommer konstrueras över tre bilvägar och en järnväg, är det av betydelse att minimera trafikstörningar på dessa. Val av produktionsmetod medför även ett störningsmoment för befolkning i form av buller, vilket skall tas i beaktande.

C.2.3 Produktionstid

Produktionstid avser tid under produktionsfasen. In-situ tiden kommer i synnerhet att värderas, men även tid för eventuell prefabricering kommer i viss mån att tas i beaktande. Detta eftersom in-situ tiden är det som har störst påverkan för de befintliga vägar som skall byggas över, med avseende på trafikstörningar.

C.2.4 Arbetsmiljö

Arbetsmiljö avser de förhållanden som påverkar säkerhet, hälsa och arbetsbelastning för personal under byggnation, underhåll och drift av bron. Kriteriet omfattar exempelvis säkerhetsrisker, arbetsmetoder samt behov av skyddsåtgärder vid genomförandet av olika moment i projektet.

C.2.5 Ekonomi

Investeringskostnader och framtida kostnader för en konstruktions design måste vägas mot den nytta det tillför projektet (Brosamverkan, 2022). För att kunna beakta kostnaderna av en bro måste hela brons livslängd räknas in från start till slut. Detta kan innebära allt från konstruktion, underhåll, rivning samt potentiella kostnader som olika lösningar kan ha på miljön eller kostnader av framtida förseningar som kan ge en kostnad för samhället.

C.2.6 Klimatpåverkan

Klimatpåverkan avser de utsläpp av växthusgaser, främst koldioxid, som de olika brokoncepten ger upphov till under deras livscykel. I detta kriterium beaktas framförallt påverkan från materialproduktion, konstruktion, montering och underhåll. Materialval och materialmängd är avgörande faktorer då dessa i hög grad påverkar konstruktionens totala klimatpåverkan.

C.2.7 Inspektion

Regelbundna inspektioner av bron är en viktig del i förvaltningen, då de används för att utvärdera exempelvis brons kvarvarande livslängd, korrosion eller sprickbildning. Eftersom det är ett regelbundet arbete som utförs under hela brons livslängd är det viktigt att inspektionen kan genomföras på ett enkelt och säkert sätt.

C.2.8 Underhåll

Underhållsarbete på bron är oundvikligt, vilket innebär att krav ställs på både underhållsbehov och möjligheten att genomföra arbetet på ett effektivt sätt. I detta avseende utgör både järnvägen på bron samt vägarna och järnvägen under bron begränsande faktorer, eftersom de försvårar förvaltningsarbetet och ställer ytterligare krav på arbetsmiljö, säkerhet och hantering av trafikstörningar i samband med underhållsåtgärder.

C.2.9 Viktningsmatris

Viktningsmatrisen presenteras i Tabell C.2 nedan och visar hur de olika kriterierna har värderats i förhållande till varandra utifrån hur viktiga de anses vara för projektet.

Tabell C.2: Viktningsmatris där kriterierna har viktats mot varandra och en vikt-faktor för varje kriterium har beräknats.

Utvärderingskriterier	1	2	3	4	5	6	7	8	Poäng	Viktfaktor
1 Estetik och design		2	3	1	1	1	3	1	12	11%
2 Produktionsmetod	2		3	1	2	1	3	3	15	13%
3 Produktionstid	1	1		1	2	1	2	2	10	9%
4 Arbetsmiljö	3	3	3		2	2	3	2	18	16%
5 Ekonomi	3	2	2	2		1	2	1	13	12%
6 Klimatpåverkan	3	3	3	2	3		3	2	19	17%
7 Inspektion	1	1	2	1	2	1		2	10	9%
8 Underhåll	3	1	2	2	3	2	2		15	13%
Summa									112	100%
1 = mindre viktig			2 = lika viktigt			3 = mer viktigt				

D

Beräkningsunderlag

Nedan redovisas de beteckningar och ekvationer som använts i den preliminära dimensioneringen.

D.1 Beteckningar

α	Lutning tvärkraftsbyglar
$\gamma_{G,j} = 1,35$	Partialkoefficient för permanentlast
$\gamma_P = 1,0$	Partialkoefficient för inverkan av förspänning
$\gamma_{Q,i} = 1,5$	Partialkoefficient för variabel last
$\eta = 0,9$	Faktor som beaktar långtidsförlust i preliminära dimensioneringar, [-]
$\psi_{0,i} = 0,8$	Lastreduktionstal, kombinationsvärde
$\psi_{1,i} = 0,7$	Lastreduktionstal, frekvent värde
$\psi_{2,i} = 0,0$	Lastreduktionstal, kvasipermanent värde
ϕ_p	Diameter för spänntråd
ε_{puk}	Karakteristisk brottöjning för spännarmering
θ	Lutning på skjuvsprickor
χ	Krökning
$\Delta c_{dev} = 10$	Tolerans täckande betongskikt
A_c	Tvärsnittets bruttoarea
A_i	Krökningsarea
$A_{s,min}$	Minsta tillåtna dragarmeringsarea, nationell parameter
A_s	Dragarmeringsarea
$A_{s,max}$	Största tillåtna dragarmeringsarea, nationell parameter
A_{sw}	Area på en tvärarmeringsbygel
b	Totalbredd för ett tvärsnitt
b_t	Medelbredd hos dragzon
b_w	Minsta tvärsnittsbredd mellan dragzon och tryckzon
b_w	Livtjocklek
b_{eff}	Effektiv flänsbredd
c	cc-avstånd mellan huvudbalkar
$c_{min,b}$	Minsta täckande betongskikt, vidhäftning
c_{min}	Minsta täckande betongskikt
$c_{min,dur}$	Minsta täckande betongskikt, korrosionsskydd

c_{nom}	Nominellt mått på täckande betongskikt
d	Tvärsnittets effektiva höjd
d_g	Största stenstorlek i mm
e	Excentricitet som spåret kan förskjutas
E_{cm}	Medelelasticitetsmodul för betong
E_{cd}	Dimensionerande elasticitetsmodul för betong
E_s	Elasticitetsmodul för armeringsstål
E_p	Elasticitetsmodul för spännarmering
f_{ck}	Karakteristisk tryckhållfasthet för betong
f_{cd}	Dimensionerande tryckhållfasthet för betong
f_{ctm}	Medeldraghållfasthet för betong
$f_{ctm,fl}$	Böjdraghållfasthet för betong
$f_{ctk,0,05}$	Karakteristisk axiell draghållfasthet för betong vid undre 5% - fraktilen
f_{ctd}	Dimensionerande axiell draghållfasthet för betong
f_{yk}	Karakteristisk flythållfasthet för armeringsstål
f_{yd}	Dimensionerande flythållfasthet för armeringsstål
f_{ywd}	Draghållfasthet tvärrarmering
$f_{p0,1k}$	Karakteristisk spänning vid 0,1 % plastisk töjning för spännarmering
f_{pd}	Dimensionerande draghållfasthet för spännarmering
f_{pk}	Karakteristisk draghållfasthet för spännarmering
f_{pud}	Dimensionerande draghållfasthet för spännarmering
$G_{k,j}$	Karakteristiskt värde för permanentlasten
$G_{k,j}$	Karakteristiskt värde för permanentlasten
h	Tvärsnittets höjd
I	Yttröghetsmoment
$k_1 = 1$	Nationell parameter, [-]
$k_2 = 5$	Nationell parameter, [mm]
l_0	Avstånd mellan momentnollpunkter
M_{Ed}	Dimensionerande moment
M_{Rd}	Momentkapacitet
P	Representativt värde för spännkraft
$Q_{k,i}$	Karakteristiskt värde för den samverkande variabla lasten i
$Q_{k,1}$	Karakteristiskt värde för en variabel huvudlast 1
Q_{vk}	Karakteristiskt värde på vertikallast
q_{vk}	Karakteristisk jämnt utbredd vertikallast
$r_{inf} = 0,9$	Nationell parameter, [-]
V_{Ed}	Dimensionerande Tvärkraft
V_{Rd}	Tvärkraftskapacitet
x_i	Tyngdpunkt för en krökningsarea
$z = 0,9d$	Intern hävarm i tvärsnittet

D.2 Lastkombinationer

De karakteristiska lasterna enligt avsnitt 4.2 omvandlas till ekvivalenta laster enligt ekvation D.3 och D.4 för att ta hänsyn till en oavsiktlig excentricitet av spåren. De ekvivalenta lasterna har sedan multiplicerats med α -faktorn enligt ekvation D.5 och D.6 för att ta fram de dimensionerande lasterna.

$$Q_{vk} = 250 [kN] \quad (D.1)$$

$$q_{vk} = 80 [kN/m] \quad (D.2)$$

$$Q_{ve} = (Q_{vk} \cdot (\frac{1}{2} + \frac{e}{c})) \cdot \Phi [kN] \quad (D.3)$$

$$q_{ve} = (q_{vk} \cdot (\frac{1}{2} + \frac{e}{c})) \cdot \Phi [kN/m] \quad (D.4)$$

$$Q_{vd} = Q_{ve} \cdot \alpha [kN] \quad (D.5)$$

$$q_{vd} = q_{ve} \cdot \alpha [kN] \quad (D.6)$$

För att avgöra om en dynamisk analys krävs, följs flödesschemat i Figur 6.9 i Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 2: Trafiklast på broar. En dynamisk analys är, i ett senare skede, nödvändig att genomföra eftersom bron ej består av ett enkelt bärverk. Dock genomförs en statisk analys med en dynamikfaktor i preliminärdimensioneringen.

För att ta hänsyn till den dynamiska förstoringen av spänningar och svängningar i bärverket används en dynamikfaktor Φ som multipliceras med de variabla lasterna. Dynamikfaktorn skall utgöras av antingen Φ_2 eller Φ_3 . Ett antagande om normalt underhållna spår innebär att Φ_3 används.

$$\Phi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,73 \quad (6.5)$$

$$\text{Med } 1,00 \leq \Phi_3 \leq 2,0$$

Där $L_\Phi [m]$ är den bestämmande längden och definieras i tabell 6.2 i Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 2: Trafiklast på broar. Fall 4.1 i Tabell 6.2 har använts, där bärverksdelen har definierats enligt "konsol i brons tvärled belastad med tåglast",

med en excentricitet utanför livet $e \leq 0,5 m$, vilket resulterar i att bestämmande längd L_Φ är lika med tre gånger avståndet mellan balkliven, se ekvation D.7.

$$L_\Phi = 3L_w \quad (D.7)$$

Enligt Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 2: Trafiklast på broar, kapitel 6.4.5.1, punkt (3), skall strukturer som bär mer än ett spår beaktas utan hänsyn till reduktion av dynamisk faktor.

Egentyngden för överbyggnaden beräknas genom att summera egentyngderna för betong, ballast, räls (räl + sliper) och broräcken. För beräkning av rälsens egentyngd har den europeiskt standardiserade rälprofilen UIC60 använts, vilket har en egenvikt på 60,21 kilogram per meter. Slipern A28 från företaget Heidelberg Materials har använts för beräkning av egentyngden, och denna har en egenvikt på 298 kilogram per sliper. Ett konservativt antagande om 0.6 sliprar per meter har gjorts. Samtliga dimensionerande laster presenteras i Tabell D.1.

Tabell D.1: Dimensionerande laster.

Egentyngd Spännarmerad betong	$G_{betong} = 263,5 \text{ [kN/m]}$
Egentyngd Ballast	$G_{ballast} = 79,2 \text{ [kN/m]}$
Egentyngd Räls	$G_{räls} = 5,9 \text{ [kN/m]}$
Egentyngd Broräcke	$G_{räcken} = 1,0 \text{ [kN/m]}$
Egentyngd Konstruktion	$G_{tot} = 349,5 \text{ [kN/m]}$
Dimensionerande koncentrerad vertikallast	$Q_d = 188,9 \text{ [kN]}$
Dimensionerande utbredd vertikallast	$q_d = 60,5 \text{ [kN/m]}$

Lastkombinationer enligt Eurokod - Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk. Ekvation 6.10a och 6.10b kommer från kapitel 6.4.3.2 Lastkombinationer för varaktiga eller tillfälliga dimensioneringssituationer. Ekvationer (6.14)-(6.16) kommer från kapitel 6.5.3 Lastkombinationer.

För dimensionering i brottgränstillstånd skall den minst gynsamma av 6.10a eller 6.10b användas. För dimensionering i bruksgränstillstånd används ekvationer 6.14b till 6.16b. Ekvation 6.14b motsvarar Karakteristisk kombination, ekvation 6.15b motsvarar Frekvent kombination och ekvation 6.16b motsvarar Kvasipermanent kombination. Resultaten från beräkningarna presenteras i Tabell D.2.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10a)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.14b)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.16b)$$

Tabell D.2: Resultande dimensionerande laster för de olika lastfallen.

Lastkombination	Egentyngd G_d [kN/m]	Punktlast Q_d [kN]	Utbredd last q_d [kN/m]
Brottgränstillstånd	472	227	73
Karaktéristiskt	350	189	60
Frekvent	350	132	42
Kvasipermanent	350	0	0

D.3 Medverkande flänsbredd

Vid dimensionering mot böjande moment tillgodoses en viss del av flänsen, eftersom flänsarna deformeras beroende av livet. Då avståndet mellan momentnollpunkterna skiljer sig krävs beräkningar för varje stöd- och fältsnitt.

Den medverkande flänsbredden beräknas enligt ekvationer i Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader. Den effektiva flänsbredden beräknas enligt ekvation 5.7, vilken även ställer krav på att den effektiva flänsbredden ej kan vara större än flänsens faktiska bredd. Ekvation 5.7a används för att beräkna den medverkande delen av flänsen, utanför livet. Krav ställs på att den effektiva flänsbredden ej får överstiga 20 % av avståndet mellan momentnollpunkterna. Ekvation 5.7b anger att den effektiva flänsbredden ej får överstiga den faktiska längden på flänsen. För geometrisk information om beteckningar, se Figur D.1. För resultande medverkande flänsbredd, se Tabell 5.3.

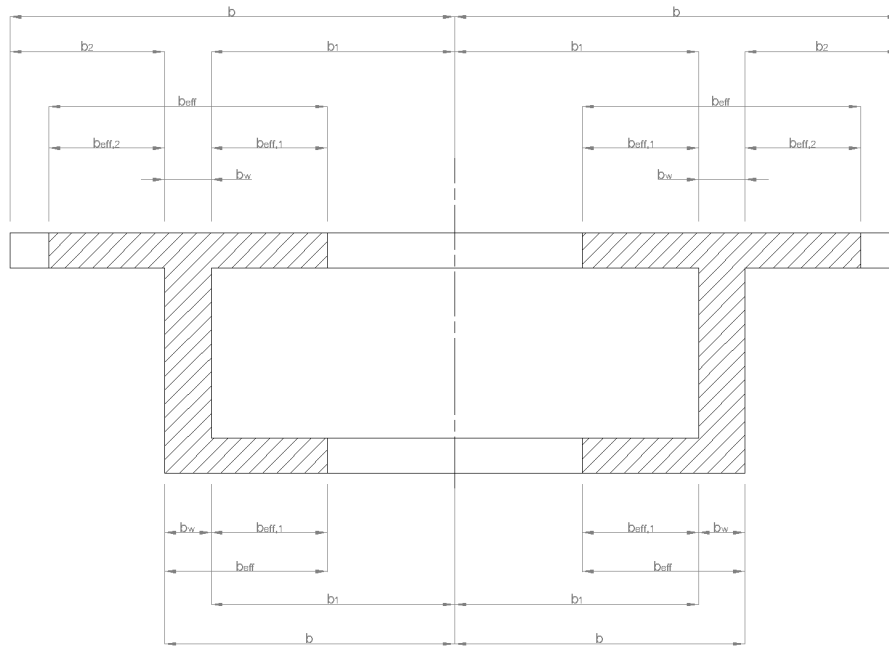
$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w \leq b \quad (5.7)$$

där:

$$b_{eff,i} = 0,2b_i + 0,1l_0 \leq 0,2l_0 \quad (5.7a)$$

och:

$$b_{eff,i} \leq b_i \quad (5.7b)$$



Figur D.1: Parametrar för effektiv flänsbredd.

D.4 Täckande betongskikt

Vid placering av spännkablar och kompletterande slakarmering används det nominella måttet på täckande betongskikt, c_{nom} , vilket består av ett minimimått samt en tolerans (Al-Emrani m. fl., 2013). Minimimåttet sätts till det största värdet av minsta täckande betongskikt med hänsyn till armeringens vidhäftning och korrosion, däremot som minst 10 mm.

$$c_{min} = \max(c_{min,b}, c_{min,dur}, 10) \quad (D.8)$$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (D.9)$$

Utöver detta ska även det minsta fria avståndet mellan parallella stänger, både horisontellt och vertikalt, bestämmas. Detta mått beräknas enligt Eurokod 2 (Al-Emrani m. fl., 2013) enligt följande formel.

$$c_{fria} = \max(k_1 * \phi, d_g + k_2, 20mm) \quad (D.10)$$

D.5 Preliminärt val av förspänningskraft

Enligt Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader, ska möjlig variation av spännkraft beaktas vid beräkningar i bruksgränstillstånd. Detta görs genom en nationell parameter r_{inf} , vilket är det undre karakteristiska värdet.

$$P_{i,k} = r_{inf} \cdot P_{m,t}(x) \quad (5.48)$$

Erforderlig spännkraft vid "dragen" kant beräknas enligt ekvation 5-24, och erforderlig spännkraft vid tryckt kant enligt ekvation 5-25.

$$P_i \leq \frac{M_{g0}(x) + \frac{I_c}{\bar{x}} \sigma_{cti,max}}{e - \frac{I_c}{\bar{x} \cdot A_c}} \cdot \frac{1}{r_{inf}} \quad (5-24)$$

$$P_i \leq \frac{M_{g0}(x) + \frac{I_c}{h-\bar{x}} |\sigma_{cci,max}|}{e + \frac{I_c}{(h-\bar{x}) \cdot A_c}} \cdot \frac{1}{r_{inf}} \quad (5-25)$$

Begränsning av spännkraft vid uppspanning med hänsyn till sprickbegränsning för kvasipermanent last vid tryckt kant beräknas enligt ekvation 5-26. Begränsning av spännkraft för karakteristisk last vid "dragen" kant beräknas enligt ekvation 5-27.

$$P_i \geq \frac{1}{\eta} \cdot \frac{M_{g0}(x) + M_{qt}(x) - \frac{I_c}{\bar{x}} |\sigma_{cc\infty,max}|}{e - \frac{I_c}{\bar{x} \cdot A_c}} \quad (5-26)$$

$$P_i \geq \frac{1}{\eta} \cdot \frac{M_{g0}(x) + M_q(x) - \frac{I_c}{h-\bar{x}} |\sigma_{ct\infty,max}|}{e + \frac{I_c}{(h-\bar{x}) \cdot A_c}} \quad (5-27)$$

D.6 Böjarmering

Böjarmeringens tvärsnittsarea begränsas enligt Eurokod 2 (Al-Emrani m. fl., 2013) enligt följande villkor. Respektive armeringsarea beräknas enligt ekvation B4-19, B4-21 och B4-22.

$$A_{s,min} \leq A_s \leq A_{s,max} \quad (\text{B4-20})$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} * z} \quad (\text{B4-19})$$

$$A_{s,min} = \min(0.26b_t d \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}, 0.0013b_t d) \quad (\text{B4-21})$$

$$A_{s,max} = 0.04A_c \quad (\text{B4-22})$$

D.7 Tvärarmering

Tvärarmering har, i likhet med böjarmering, ett centrumavstånd mellan byglarna. Detta avstånd beräknas enligt Eurokod 2 (Al-Emrani m. fl., 2013) med hjälp av en omskrivning av följande formel.

$$V_{Rd} = \frac{z * \cot\theta}{s} * f_{ywd} * A_{sw} \quad (\text{B6-21})$$

Vidare beräknas sedan armeringsinnehållet med följande formler i enlighet med Eurokod 2 (Al-Emrani m. fl., 2013).

$$\rho_{w,min} = 0.08 * \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (\text{B6-24})$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{sb_w \sin\alpha} \quad (\text{B6-25})$$

D.8 Sprickkontroll

Sprickkontroll utförs med hjälp av Naviers formel där spänningen sätts till betongens böjdraghållfasthet, samt antagandet om att tvärsnittet befinner sig i Stadium I.

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm,fl} * I}{\frac{h}{2}} \quad (\text{D.11})$$

D.9 Nedböjning

Nedböjningen beräknas med den grafiska metod som presenterats av (Al-Emrani m. fl., 2014) samt beräkningsmodellerna som presenterades i avsnitt 4.2. Då tvärsnittet fortsatt antas befinna sig i Stadium I följer krökningsfördelningen momentkurvan och beräknas enligt ekvation B8-1 (Al-Emrani m. fl., 2014).

$$\left(\frac{1}{r}\right)_f(\chi) = \frac{M_{Ed}}{E_{cm}I} \quad (\text{B8-1})$$

Med hjälp av krökningen beräknas sedan den maximala nedböjningen i mitten av tvärsnittet som summan av alla krökningsareor från de olika lasterna (Al-Emrani m. fl., 2014).

$$y_{ned} = \sum A_i x_i \quad (\text{B8-24})$$

E

Beräkningar

Nedan presenteras beräkningarna som utförts i MATLAB.

Table of Contents

.....	1
Indata	1
Tvär- och momentkraftsberäkning	4
Tvångsmoment	17
Tvärsnitt	21
Minsta täckande betongskikt för byglar	25
Preliminärt val av förspänningskraft	26
Inplacering av spännkabel	28
Val av spännkraft och spänneheter	31
Preliminär kontroll av momentkapacitet	33
Beräkning av tvångsmoment	33
Nedböjning i brukgränstillstånd	34
Längsgående böjarmering	36
Tvärkraftsarmering i längsled	38
Moment och tvärkraftsberäkningar i tvärled	39
Tvärgående böjarmering	45
Tvärkraftsarmering i tvärled	48
Sprickkontroll i tvärled	50
Nedböjning tvärled	51

```
% -----  
% Kandidatarbete: ACEX11 - Grupp 50 - Brogrupp 1  
% Calle Althini, Naemi Bratovic Johansson, Felix Falk  
% John Helgesson, Oshas Rahimi, Jenny Urberg  
% -----  
  
% Starta koden  
clear; close all; clc;
```

Indata

```
% Tvärnittets geometri  
% Överfläns:  
b1 = 11.5;      % [m]  
h1 = 0.45;      % [m]  
  
% Underfläns:  
b4 = 7.5;       % [m]  
h4 = 0.45;      % [m]  
  
% Liv:  
b2 = 0.6;       % [m]  
h2 = 3.1 - h1 - h4; % [m]  
b3 = b2;        % [m]  
h3 = h2;        % [m]
```

```

% Längsgående geometri
L_spann_49 = 49;      % 49 m spann
L_spann_36 = 36;      % 36 m spann
L_tot = L_spann_49*3 + L_spann_36; % tot. längd
L_P = 1.6;            % Avstånd LM71 - punktlaster
L_U = 0.8;            % Avstånd LM71 - utbredd last

% Materialdata
% Betong C40/50
fck = 40e6;           % [Pa]
fcd = fck/1.5;         % [Pa]
fctm = 3.5e6;          % [Pa]
fctk005 = 2.5e6;       % [Pa]
fctd = fctk005/1.5;    % [Pa]

Ecm = 35e9;           % [Pa]
Ecd = Ecm/1.2;         % [Pa]

% Betong C30/37
fcki = 30e6;          % [Pa]
fctk005i = 2.0e6;      % [Pa]
fctmi = 2.9;          % [Pa]

Ecmi = 33e9;          % [Pa]

% Armering B500B
fyk = 500e6;          % [Pa]
fyd = fyk/1.15;        % [Pa]
Es = 200e9;           % [Pa]

% Spännarmering Y1860S7
% XM -45, 13 mm, grade 1860
% => XM -45 19 13 L(/P)
% Stål: Y1860S7

phi_p = 13e-3;         % [m]
fp01k = 167e3/(pi*phi_p^2/4); % [Pa]
fpd = fp01k/1.15;      % [Pa]
fpk = 1860e6;          % [Pa]
fpud = fpk/1.15;       % [Pa]

Ep = 200e9;
epuk = 3.5e-3;

% Dimensionerande laster
% Egentyngd
% Gravitation
g = 9.81;               % [m/s2]

```

```

% Egentyngd räl
t_ral = 61.21; % [kg/m]
g_ral = t_ral*g * 4; % [N/m]

% Egentyngd sliper
t_sliper = 298; % [kg/st]
a_sliper = 0.6; % [st/m]
g_sliper = t_sliper*a_sliper*g*2; % [N/m]

% Egentyngd räls
g_rals = g_ral + g_sliper; % [N/m]

% Egentyngd ballast
t_makadam = 18e3; % [N/m3]
h_makadam = 0.4; % [m]
b_makadam = 11; % [m]
A_makadam = h_makadam*b_makadam; % [m2]

g_makadam = t_makadam*A_makadam; % [N/m]

% Egentyngd betong
gamma_betong = 2400; % [kg/m3]
A_betong = b1*h1 + b2*h2 + b3*h3 + b4*h4; % [m2]
t_betong = gamma_betong*A_betong; % [kg/m]

g_betong = t_betong*g; % [N/m]

% Egentyngd broräcke
t_broracke = 50; % [kg/m]
g_broracke = t_broracke*g*2; % [N/m]

% Egentyngd brokonstruktion
G_tot = g_rals + g_makadam + g_betong + g_broracke; % [N/m]

% Dimensionerande variabla laster
alpha = 1.33; % [-] Alpha-faktor, enl. TB

L_phi = 3*(b4); % Bestämmande längd, Tabell 6.2 EK1 - del 2:
Trafiklast på broar
phi_3 = 2.16/(sqrt(L_phi)-0.2) + 0.73; % (ekv. 6.5) EK1 - del 2: Trafiklast
på broar
e = 1.435/18; % Excentricitet
c = b4 - b2/2 - b3/2; % cc-avstånd mellan balkar (liv)

% Punktlast
Q_vk = 250e3; % [N]
Q_ve = (Q_vk * (1/2 + e/c)) * phi_3; % [N]
Q_vd = Q_ve*alpha; % [N]

% Utbredd last
q_vk = 80e3; % [N/m]
q_ve = (q_vk * (1/2 + e/c)) * phi_3; % [N/m]
q_vd = q_ve*alpha; % [N/m]

```

```

% Printa resultat av egentygder och dimensionerande laster
namn = ["Egentygd Spännarmerad betong", "Egentygd Ballast",
"Egentygd Räls", "Egentygd Broräcke", "Egentygd Konstruktion",
"Dimensionerande koncentrerad vertikallast", "Dimensionerande utbredd
vertikallast"];
variabel = ["G_betong = ", "G_ballast = ", "G_räls
= ", "G_räcken = ", "G_tot = ", "Q_vd = ",
", "q_vd = "];
varden = [ g_betong, g_makadam,
g_räls, g_broracke, G_tot,
Q_vd, q_vd]*1e-3;
enhet = ["kN/m", "kN/m", "kN/m",
"kN", "kN/m"];
fprintf('\n=====\\n');
fprintf('\nDimensionerande laster\\n');
fprintf('\n=====\\n');

fprintf('\\n');

for i = 1:length(namn)
    fprintf('%-45s %-12s %.1f %s\\n', namn(i), variabel(i), varden(i),
enhet(i));
end

fprintf('\\n=====\\n');

```

```

=====

Dimensionerande laster

=====

```

Egentygd Spännarmerad betong	$G_{betong} =$	263.5 kN/m
Egentygd Ballast	$G_{ballast} =$	79.2 kN/m
Egentygd Räls	$G_{räls} =$	5.9 kN/m
Egentygd Broräcke	$G_{räcken} =$	1.0 kN/m
Egentygd Konstruktion	$G_{tot} =$	349.5 kN/m
Dimensionerande koncentrerad vertikallast	$Q_{vd} =$	205.0 kN
Dimensionerande utbredd vertikallast	$q_{vd} =$	65.6 kN/m

```

=====

```

Tvär- och momentkraftsberäkning

```

% Koefficienter:
% Partialkoefficienter:
yd = 1;      % Säkerhetsklass
yp = 1;      % Inverkan av förspänning (gynsamm)
yQ = 1.5;    % Variabel last

```

```

yG = 1.35; % Permanent last
% Lastreduktionstal:
psi0 = 0.8; % Kombinationsvärde
psi1 = 0.7; % Frekvent värde
psi2 = 0.0; % Kvasipermanent
% Reduktionstal:
Xi = 0.85;

% Indata till CALFEM
N_dof = 11; % Antal noder, 5 stöd + 6 laster
N_ele = N_dof - 1; % Antal element
ep = [1 1 1]; % Elementmatris (endast för nedböjning)

fprintf('\n=====');
fprintf('\nDimensionerande laster och krafter för de olika lastfallen');

% Lastkombinationer
% Lastfall = 1 = Brottgränstillstånd
% Lastfall = 2 = Karakteristisk
% Lastfall = 3 = Frekvent
% Lastfall = 4 = Kvasipermanent
for lastfall = 1:4
    if lastfall == 1 % 6.10a, 6.10b
        G_d = max([ yd * yG * G_tot , yd * Xi * yG * G_tot ]);
        Q_d = max([ yd * yQ * psi0 * Q_vd , yd * Xi * Q_vd ]);
        q_d = max([ yd * yQ * psi0 * q_vd , yd * Xi * q_vd ]);

        fprintf('Lastfall %d\n', lastfall);
        fprintf('G_d = %.0f kN, Q_d = %.0f kN, q_d = %.0f kN/m\n\n',
            G_d*1e-3, Q_d*1e-3, q_d*1e-3);

    elseif lastfall == 2 % 6.14b
        G_d = yd * G_tot;
        Q_d = yd * Q_vd;
        q_d = yd * q_vd;

        fprintf('\nLastfall %d\n', lastfall);
        fprintf('G_d = %.0f kN, Q_d = %.0f kN, q_d = %.0f kN/m\n\n',
            G_d*1e-3, Q_d*1e-3, q_d*1e-3);

    elseif lastfall == 3 % 6.15b
        G_d = yd * G_tot;
        Q_d = yd * psi1 * Q_vd;
        q_d = yd * psi1 * q_vd;

        fprintf('\nLastfall %d\n', lastfall);
        fprintf('G_d = %.0f kN, Q_d = %.0f kN, q_d = %.0f kN/m\n\n',
            G_d*1e-3, Q_d*1e-3, q_d*1e-3);

    elseif lastfall == 4 % 6.16b
        G_d = yd * G_tot;

```

```

    Q_d = yd * psi2 * Q_vd;
    q_d = yd * psi2 * q_vd;

    fprintf('\nLastfall %d\n', lastfall);
    fprintf('G_d = %.0f kN, Q_d = %.0f kN, q_d = %.0f kN/m\n\n',
G_d*1e-3, Q_d*1e-3, q_d*1e-3);

end

% Lagra dim. värden för utbredd last i eq-matris (x, y)-riktning
eq_G = [0, -G_d]; % Utbredd last, permanentlast
eq_q = [0, -q_d]; % Utbredd last, variabellast

% Starta iterering för position av LM71 - laster
t = 0; % Startvärde iterering
for j = 0.1 : 0.2 : L_tot-4*L_P % Start : Steg : Slut
    t = t+1;
    v = j;

    % Definera x-värden för stöd och laster
    x(t,:) = [ 0 ; % Ändstöd
               v ; % Slut utbredd last
               v+L_U ; % Punktlast
               v+L_U+L_P ; % Punktlast
               v+L_U+L_P+L_P ; % Punktlast
               v+L_U+L_P+L_P+L_P ; % Punktlast
               v+L_U+L_P+L_P+L_P+L_P ; % Start utbredd last
               49; % Mittstöd 1
               98; % Mittstöd 2
               134; % Mittstöd 3
               L_tot ]; % Ändstöd
    x(t,:) = sort(x(t,:)); % varje rad i x-matris = olika position
    av LM71 + stöd

    ex = zeros(N_ele, 2); % Tom ex-vektor
    ey = zeros(N_ele, 2); % Tom ey-vektor

    % Bestämmer ex-vektor
    for i = 1:N_ele
        ex(i,:) = [x(t,i) x(t,i+1)]; % Elementens x-koord.
    end

    % Bestämmer frihetsgrader
    dof = zeros(N_dof, 4);
    for i = 1:N_dof
        dof(i,:) = [i 3*i-2 3*i-1 3*i];
    end

    % Bestämmer topologimatris
    for i = 1:N_ele
        Edof(i,:) = [i dof(i,2:4) dof(i+1,2:4)];
    end

```

```

end

% Bestämmer utbredd last
eq = zeros(N_ele, 2);

% Hitta vilket index q verkar på
xq = [v, v+L_U+L_P+L_P+L_P+L_U];

rad_q = x(t,:);
idx_q = zeros(1,2);
for k = 1:2
    idx_q(k) = find(abs(rad_q - xq(k)) < 1e-6);
end
idx_q = sort(idx_q); % Hitta vilket index som q_d börjar och
slutar vid
idx_q = idx_q(1) : 1 : idx_q(2)-1;

for i = 1:N_ele
    eq(i,:) = eq_q; % Ansätter hela eq till q_d
end

for i = 1:N_ele
    eq(idx_q,2) = 0; % Sätter eq till 0 där eq börjar och slutar
end

for i = 1:N_ele
    eq(i,:) = eq(i,:) + eq_G; % G verkar över hela balken
end

% Definera styvhetsmatris och lastvektor
K = zeros(N_dof*3, N_dof*3); % Styvhetsmatris
f = zeros(N_dof*3, 1); % Lastvektor

for i = 1:N_ele
    [Ke, fe] = beam2e(ex(i,:), ey(i,:), ep, eq(i,:));
    [K, f] = assem(Edof(i,:), K, Ke, f, fe);
end

% Hitta vilket index Q verkar på för att lägga in i f-vektor
xQ = [v+L_U , v+L_U+L_P , v+L_U+L_P+L_P , v+L_U+L_P+L_P+L_P];

% Applicera punktlast i f-vektorn
row = x(t,:);
idx = zeros(1,4);
for k = 1:4
    idx(k) = find(abs(row - xQ(k)) < 1e-6);
end

for k = 1:length(idx)
    node = idx(k);
    dof = 3*(node-1) + 2;

```

```

        f(dof) = f(dof) - Q_d;
    end

    % Randvillkor
    bc = [];
    support_pos = [0 49 98 134 183];
    support_nodes = [];
    for i = 1:length(support_pos)
        [~, idx] = min(abs(row-support_pos(i)));
        support_nodes = [support_nodes idx];
    end
    support_nodes;
    for i = 1:length(support_nodes)
        node = support_nodes(i);
        dof = 3*(node-1) + 2;
        bc = [bc; dof 0];
    end

    bc = sort([1 0; 3 0; 31 0; 33 0; bc]);

    % Löser ekvationssystemet
    [a, r] = solveq(K, f, bc);
    ed = extract(Edof, a);
    n = 100;

    % Definera storlek av spar-array
    T = zeros(n, N_ele); % Tvärkraft
    M = zeros(n, N_ele); % Moment
    f_y = zeros(n, N_ele); % Nedböjning
    x_k = zeros(n, N_ele); % x-koordinater
    R = r; % Reaktions/stödkrafter

    % Löser inre värden
    for i = 1:N_ele
        [es, edi, eci] = beam2s(ex(i,:), ey(i,:), ep, ed(i,:), eq(i,:),
n);
        T(:,i) = es(:,2); % Tvärkraft
        M(:,i) = es(:,3); % Moment
        f_y(:,i) = edi(:,2); % Nedböjning
        x_k(:,i) = eci + ex(i,1); % x-koordinater
    end

    % Lagring av värden
    Tvarspar(t,1) = {T}; % Tvärkraft
    Momentspar(t,1) = {M}; % Moment
    Nedbojningspar(t,1) = {f_y}; % Nedböjning
    xKoordSpar(t,1) = {x_k}; % x-koordinater
    RSpar(t,1) = {R}; % Reaktion/stödkrafter
    xQspar(t,1) = {xQ};

    % Lagring maxvärden

```

```

V_Ed(t,1) = max(max(abs(T)));           % Tvärkraft
M_Ed_pos(t,1) = max(max(M));           % Positivt moment
M_Ed_neg(t,1) = min(min(M));           % Negativt moment
nedbojning(t,1) = max(max(abs(f_y)));   % Nedböjning

end

% Dimensionerande värden
[V_Ed_dim, v_pos] = max(V_Ed);
[M_Ed_dim_pos, m_pos] = max(M_Ed_pos);
[M_Ed_dim_neg, m_neg] = min(M_Ed_neg);

% Ny spar maxmoment
V_spar(lastfall, 1) = V_Ed_dim;
M_spar_pos(lastfall, 1) = M_Ed_dim_pos;
M_spar_neg(lastfall, 1) = M_Ed_dim_neg;

% PLOTTAR
% Tvärkraftsdiagram

% Definera LineWidth för balk och plot
LW_b = 1.25;
LW_p = 1.0;

figure(lastfall);
hold on;

% Balk:
plot([0 183], [0 0], 'k', LineWidth = LW_b);

% Stöd:
plot(0, 0.8, '^', 'color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 10);
plot(49, 0.8, 'o', 'color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 10);
plot(98, 0.8, 'o', 'color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 10);
plot(134, 0.8, 'o', 'color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 10);
plot(183, 0.8, 'o', 'color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 10);

% Plottar punktlasternas position
x_row = x(v_pos,:);
idx = find(~ismember(x_row, support_pos));
idx = idx(2:end-1);

for k = 1:4
    xpos = x_row(idx(k));
    plot(xpos, -2, 'kv');
end

% Kompletlinjer:
x_hopp = [49, 98, 134];           % Stöd-positioner

```

```

    for k = 1:length(x_hopp)
        [rad, kolonn] = find(xKoordSpar{v_pos} == x_hopp(k)); % Hitta
vilken rad och kolonn i xSpar som x_hopp förekommer i
        x_komplement = [xKoordSpar{v_pos}(rad(1),kolonn(1)),
xKoordSpar{v_pos}(rad(2),kolonn(2))]; % plocka ut dessa x-värden
        y_komplement = [Tvarspar{v_pos}(rad(1),kolonn(1)), Tvarspar{v_pos}
(rad(2),kolonn(2))]*1e-6; % Plocka ut motsvarande y-värden
        plot(x_komplement, y_komplement, 'b', LineWidth = LW_p); % plotta
dessa x-y
    end
    x_komp_0 = [xKoordSpar{v_pos}(1,1), xKoordSpar{v_pos}(1,1)];
    y_komp_0 = [0, Tvarspar{v_pos}(1,1)]*1e-6;
    plot(x_komp_0, y_komp_0, 'b', LineWidth = LW_p);
    x_komp_183 = [xKoordSpar{v_pos}(100,10), xKoordSpar{v_pos}(100,10)];
    y_komp_183 = [0, Tvarspar{v_pos}(100,10)]*1e-6;
    plot(x_komp_183, y_komp_183, 'b', LineWidth = LW_p);

% Plottar tvärkraftsdiagram
plot(xKoordSpar{v_pos}, Tvarspar{v_pos}*1e-6, 'b', LineWidth = LW_p);

% Plotta 'komplement-hopp' pga tvärkraft
idx_Q = xQspar{v_pos};
for k = 1:length(idx_Q)
    [rad, kolonn] = find(xKoordSpar{v_pos} == idx_Q(k)); % Hitta
vilken rad och kolonn i xSpar som x_hopp förekommer i
    x_komplement_Tvar = [xKoordSpar{v_pos}(rad(1),kolonn(1)),
xKoordSpar{v_pos}(rad(2),kolonn(2))]; % plocka ut dessa x-värden
    y_komplement_Tvar = [Tvarspar{v_pos}(rad(1),kolonn(1)),
Tvarspar{v_pos}(rad(2),kolonn(2))]*1e-6; % Plocka ut motsvarande y-värden
    plot(x_komplement_Tvar, y_komplement_Tvar, 'b', LineWidth =
LW_p); % plotta dessa x-y
end

set(gca, 'YDir', 'reverse');
title('Dimensionerande Tvärkraft', ['Lastfall ', int2str(lastfall)]);
xlabel('Position i balk [m]'); ylabel('Tvärkraft [MN]'); grid minor;
xlim([-1 184]); ylim([-20 20]);
hold off;

% Momentdiagram
figure(lastfall+4);
hold on;
plot([0 183], [0 0], 'k', LineWidth = LW_b);
plot(0, 6, '^', 'color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 10);
plot(49, 6, 'o', 'color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 10);
plot(98, 6, 'o', 'color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 10);
plot(134, 6, 'o', 'color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 10);
plot(183, 6, 'o', 'color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 10);

plot(xKoordSpar{m_pos}, Momentspar{m_pos}*1e-6, 'r', LineWidth = LW_p);

```

```

set(gca, 'YDir', 'reverse');
title('Dimensionerande Moment', ['Lastfall ', int2str(lastfall)]);

xlabel('Position i balk [m]'); ylabel('Moment [MNm]'); grid minor;
xlim([-1 184]); ylim([-150 150]);

% Plottar punktlasternas position
x_row = x(m_pos,:);
idx = find(~ismember(x_row, support_pos));
idx = idx(2:end-1);

for k = 1:4
    xpos = x_row(idx(k));
    plot(xpos, -15, 'kv');
end

hold off;

% Skriv ut krafter
disp(['V = ', int2str((V_Ed_dim)*2*1e-3), ' [kN]']);
disp(['M+ = ', int2str((M_Ed_dim_pos)*1e-3), ' [kNm]']);
disp(['M- = ', int2str((M_Ed_dim_neg)*1e-3), ' [kNm]']);

% Skriv ut reaktionskrafter
Rmax = RSpar{v_pos};
Reaktionskraft = zeros(length(support_nodes),1);
for i = 1:length(support_nodes)
    node = support_nodes(i);
    dof_vertical = 3*(node-1) + 2;
    Reaktionskraft(i) = Rmax(dof_vertical)*1e-3;
end
Stod = {'Vänster ändstöd'; 'Mittstöd 1'; 'Mittstöd 2'; 'Mittstöd 3'; 'Höger
ändstöd'};
Enhet = {'[kN]'; '[kN]'; '[kN]'; '[kN]'; '[kN]'};
T = table(Stod, Reaktionskraft, Enhet);
disp(' ')
disp('Vertikala reaktionskrafter för stöd')
disp(T);

% Uppskattning av dimensionerande moment
% Stöd
Mb_A(lastfall) = Momentspar{m_pos}(1,1);
Mb_B(lastfall) = Momentspar{m_pos}(100,1);
Mb_C(lastfall) = Momentspar{m_pos}(1,9);
Mb_D(lastfall) = Momentspar{m_pos}(1,10);
Mb_E(lastfall) = Momentspar{m_pos}(100,10);

% Fält
tol = 1e-2;
% Ungefärligt x-värde för maxmoment fält

```

```

x_val_f1 = 23.7576;
x_val_f2 = 74.7;
x_val_f3 = 116.182;
x_val_f4 = 156.768;
% Hitta vilken rad, kolonn i x-matris dessa värden hittas
[rad_f1, col_f1] = find(abs(xKoordSpar{m_pos} - x_val_f1) < tol);
[rad_f2, col_f2] = find(abs(xKoordSpar{m_pos} - x_val_f2) < tol);
[rad_f3, col_f3] = find(abs(xKoordSpar{m_pos} - x_val_f3) < tol);
[rad_f4, col_f4] = find(abs(xKoordSpar{m_pos} - x_val_f4) < tol);
% Ansätt hittade rad, kolonn till motsvarande moment över fält
Mb_f1(lastfall) = Momentspar{m_pos}(rad_f1, col_f1);
Mb_f2(lastfall) = Momentspar{m_pos}(rad_f2(1), col_f2(1));
Mb_f3(lastfall) = Momentspar{m_pos}(rad_f3, col_f3);
Mb_f4(lastfall) = Momentspar{m_pos}(rad_f4, col_f4);

end

```

=====

Dimensionerande laster och krafter för de olika lastfallen Lastfall 1
 $G_d = 472 \text{ kN}$, $Q_d = 246 \text{ kN}$, $q_d = 79 \text{ kN/m}$

$V = 29809 \text{ [kN]}$
 $M+ = 69090 \text{ [kNm]}$
 $M- = -129423 \text{ [kNm]}$

Vertikala reaktionskrafter för stöd

Stöd	Reaktionskraft	Enhet
{ 'Vänster ändstöd' }	13245	{ '[kN]' }
{ 'Mittstöd 1' }	27961	{ '[kN]' }
{ 'Mittstöd 2' }	22738	{ '[kN]' }
{ 'Mittstöd 3' }	22395	{ '[kN]' }
{ 'Höger ändstöd' }	14904	{ '[kN]' }

Lastfall 2
 $G_d = 350 \text{ kN}$, $Q_d = 205 \text{ kN}$, $q_d = 66 \text{ kN/m}$

$V = 22550 \text{ [kN]}$
 $M+ = 52372 \text{ [kNm]}$
 $M- = -97892 \text{ [kNm]}$

Vertikala reaktionskrafter för stöd

Stöd	Reaktionskraft	Enhet
{ 'Vänster ändstöd' }	9986.5	{ '[kN]' }
{ 'Mittstöd 1' }	21082	{ '[kN]' }
{ 'Mittstöd 2' }	17144	{ '[kN]' }
{ 'Mittstöd 3' }	16886	{ '[kN]' }
{ 'Höger ändstöd' }	11275	{ '[kN]' }

Lastfall 3

$G_d = 350 \text{ kN}$, $Q_d = 144 \text{ kN}$, $q_d = 46 \text{ kN/m}$

$V = 21282 \text{ [kN]}$

$M_+ = 49149 \text{ [kNm]}$

$M_- = -92430 \text{ [kNm]}$

Vertikala reaktionskrafter för stöd

Stöd	Reaktionskraft	Enhet
{ 'Vänster ändstöd' }	9513.1	{ '[kN]' }
{ 'Mittstöd 1' }	20083	{ '[kN]' }
{ 'Mittstöd 2' }	16332	{ '[kN]' }
{ 'Mittstöd 3' }	16084	{ '[kN]' }
{ 'Höger ändstöd' }	10641	{ '[kN]' }

Lastfall 4

$G_d = 350 \text{ kN}$, $Q_d = 0 \text{ kN}$, $q_d = 0 \text{ kN/m}$

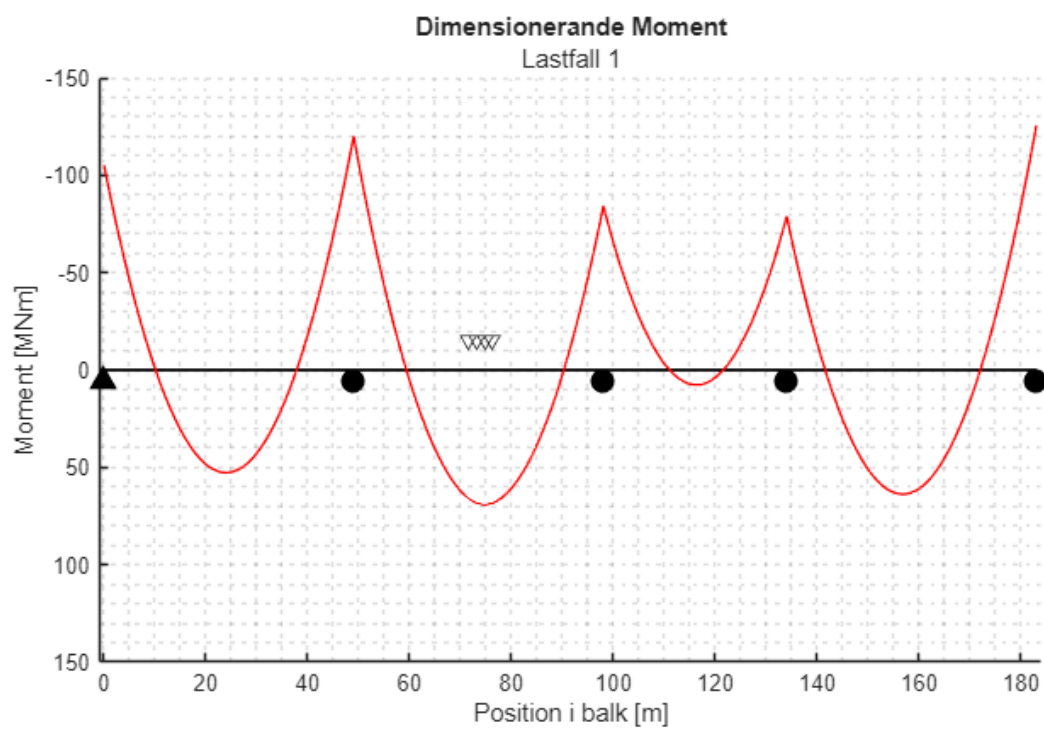
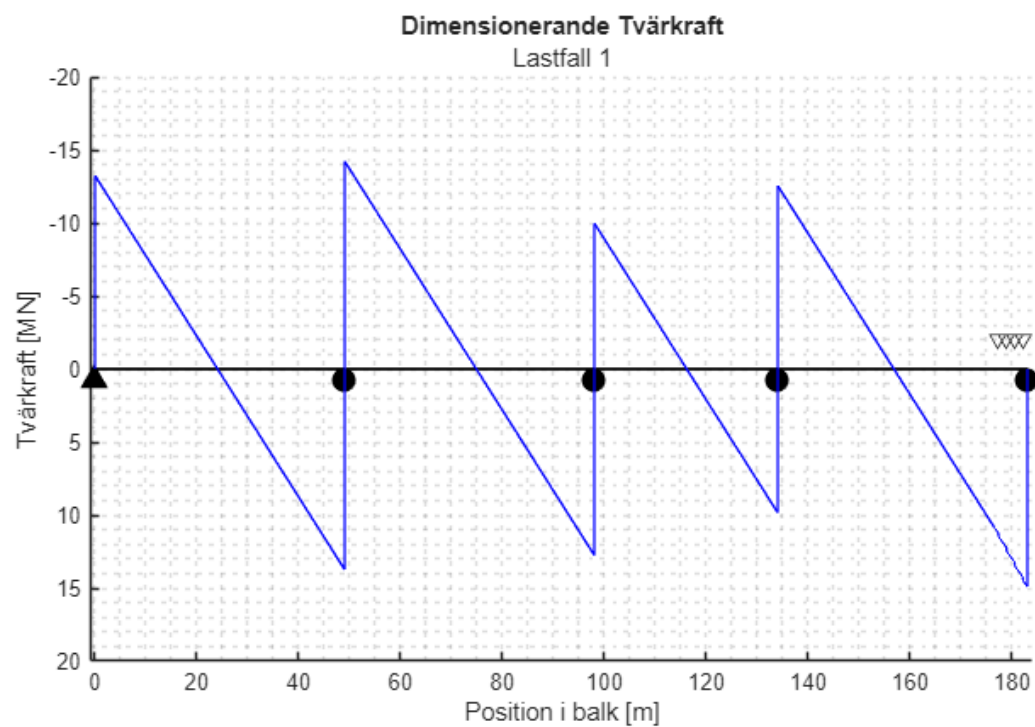
$V = 18321 \text{ [kN]}$

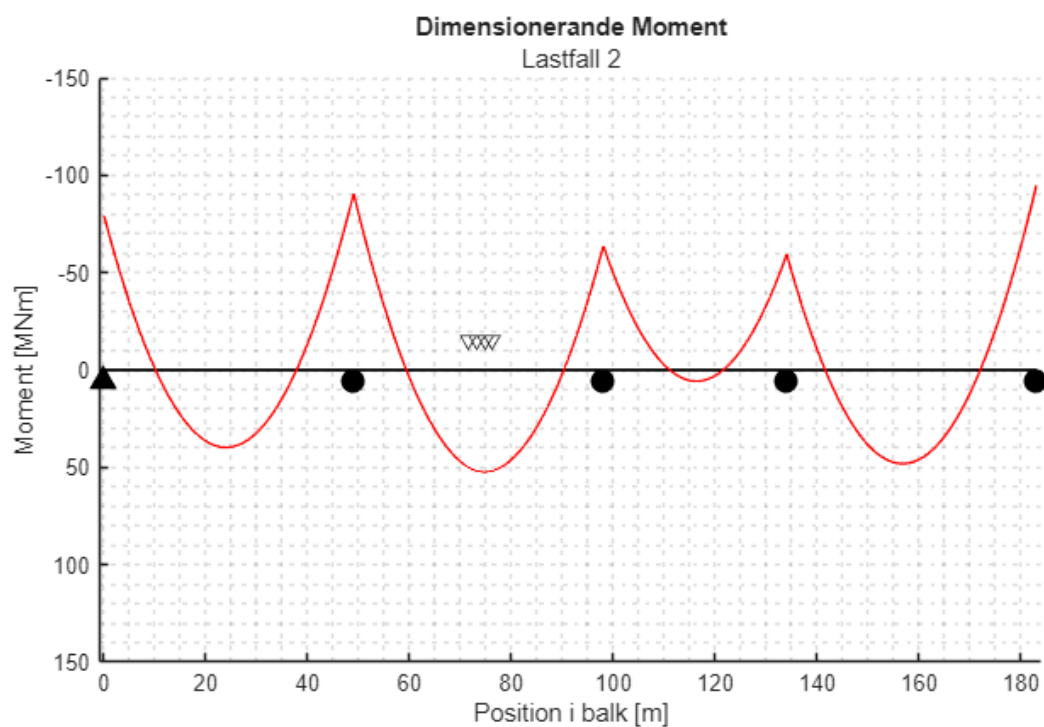
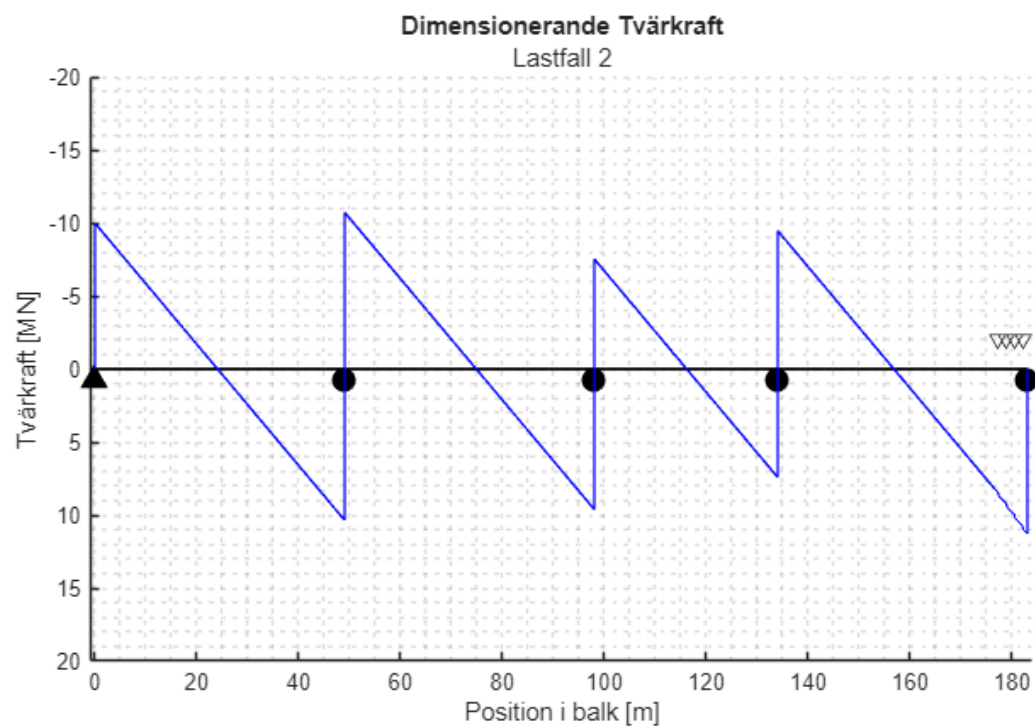
$M_+ = 41633 \text{ [kNm]}$

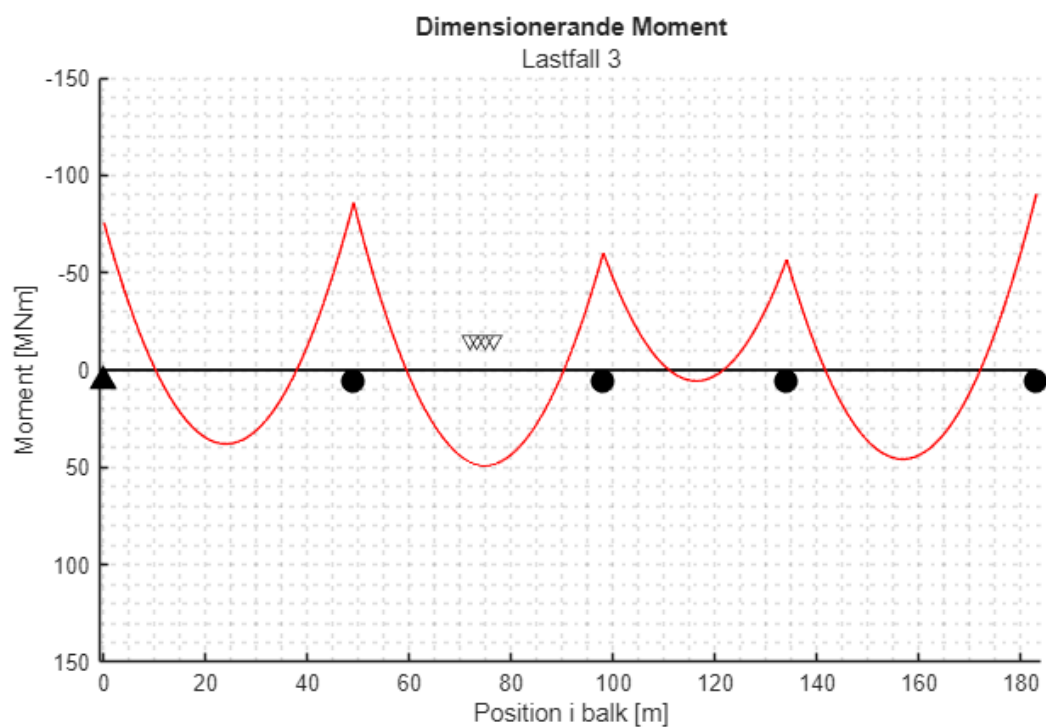
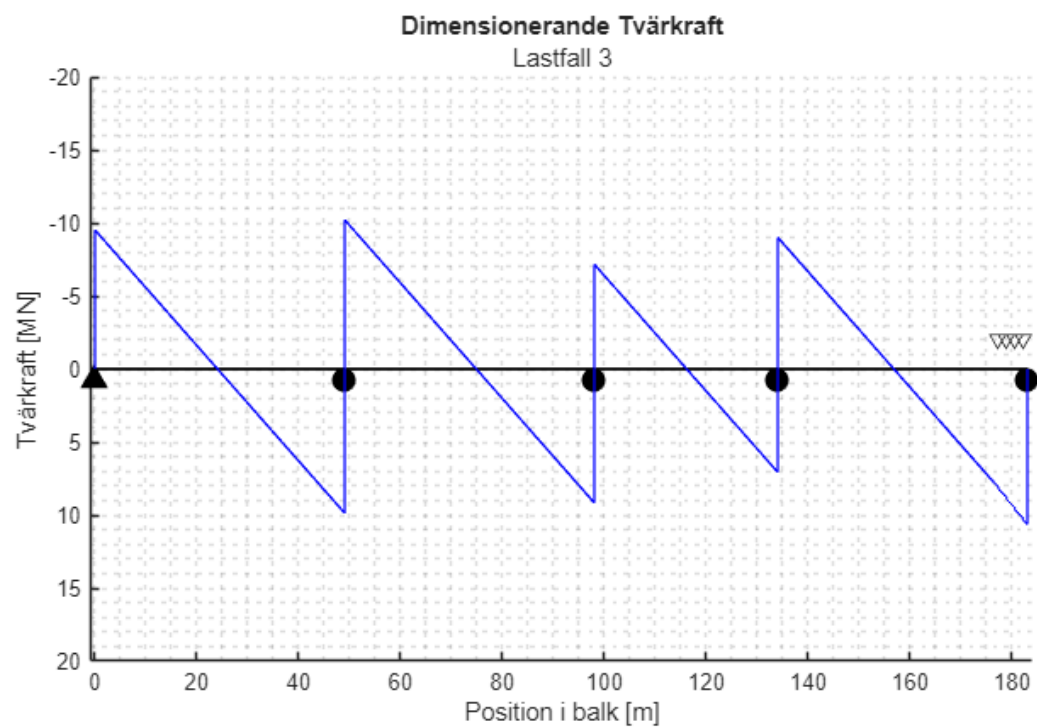
$M_- = -79684 \text{ [kNm]}$

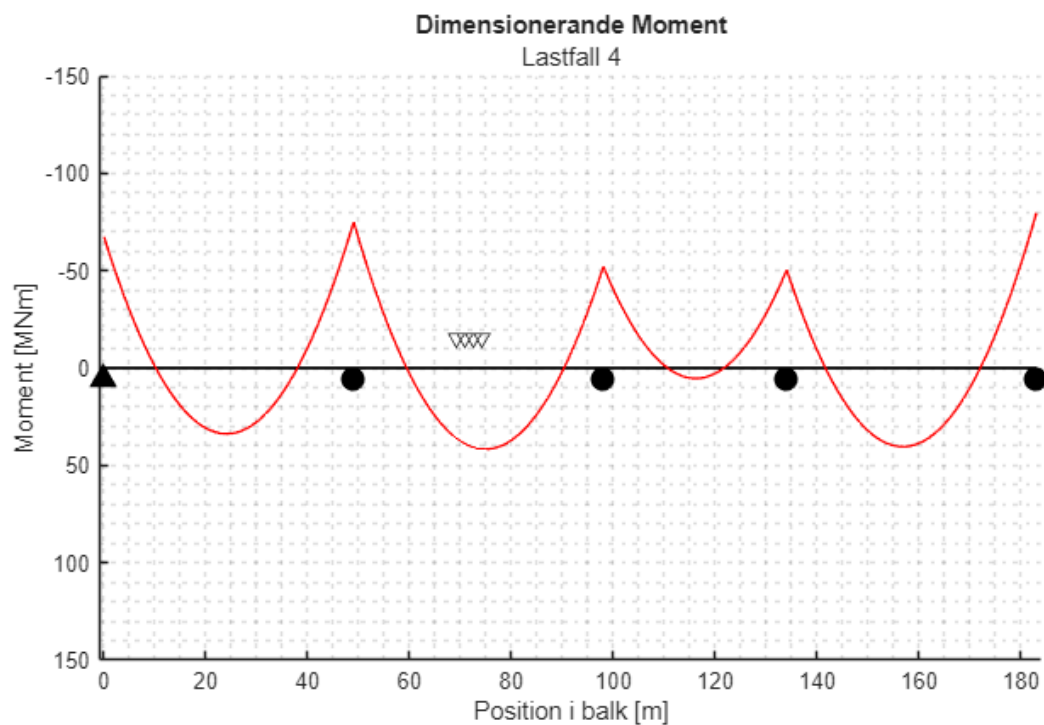
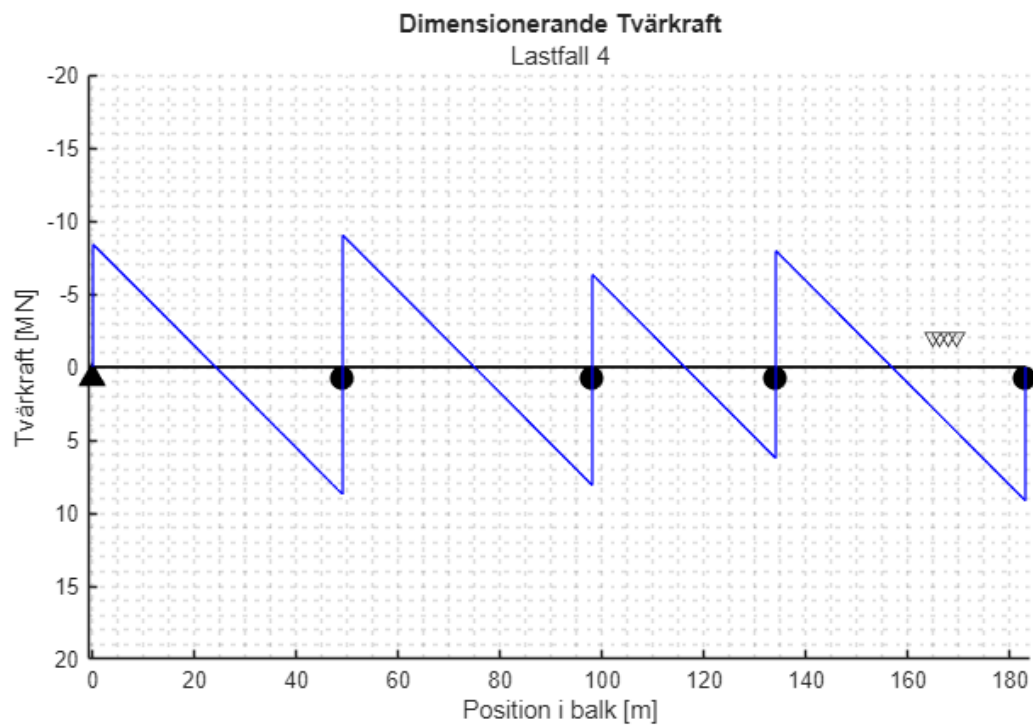
Vertikala reaktionskrafter för stöd

Stöd	Reaktionskraft	Enhet
{ 'Vänster ändstöd' }	8408.4	{ '[kN]' }
{ 'Mittstöd 1' }	17750	{ '[kN]' }
{ 'Mittstöd 2' }	14436	{ '[kN]' }
{ 'Mittstöd 3' }	14212	{ '[kN]' }
{ 'Höger ändstöd' }	9160.6	{ '[kN]' }









Tvångsmoment

```
% delta MB enligt Lastfall 2, karakteristisk last:
delta_Mb_A = Mb_A(2)*0.5;
```

```

delta_Mb_B = Mb_B(2)*0.5;
delta_Mb_C = Mb_C(2)*0.5;
delta_Mb_D = Mb_D(2)*0.5;
delta_Mb_E = Mb_E(2)*0.5;

% x-värden för stöd & fält
x_tvangsmoment = [0, 49/2, 49, 49+(98-49)/2, 98, 98+(134-98)/2, 134,
134+(183-134)/2, 183];

delta = [delta_Mb_A, delta_Mb_B, delta_Mb_C, delta_Mb_D, delta_Mb_E];
delta_f=[abs(delta_Mb_A+delta_Mb_B)/2, abs(delta_Mb_B+delta_Mb_C)/2,
abs(delta_Mb_C+delta_Mb_D)/2, abs(delta_Mb_D+delta_Mb_E)/2];

% Vill endast kolla brott, karakt., kvasiperm. (LF1, 2, 4)
lastfall = [1 2 4];

for i = 1:length(lastfall)
    lf = lastfall(i);

    % Stöd
    Mb_stod = [Mb_A(lf), Mb_B(lf), Mb_C(lf), Mb_D(lf), Mb_E(lf)];
    Mb_stod_dim = Mb_stod - delta;

    % Fält
    Mb_falt = [Mb_f1(lf), Mb_f2(lf), Mb_f3(lf), Mb_f4(lf)];
    Mb_falt_dim = zeros(1,4);

    for j = 1:4
        Mb_falt_dim(j) = Mb_falt(j) + abs(delta(j) + delta(j+1))/2;
    end

    % Kombinera
    y_tvangsmoment = [
        Mb_stod_dim(1), Mb_falt_dim(1), ...
        Mb_stod_dim(2), Mb_falt_dim(2), ...
        Mb_stod_dim(3), Mb_falt_dim(3), ...
        Mb_stod_dim(4), Mb_falt_dim(4), ...
        Mb_stod_dim(5)
    ] * 1e-6;

    % Plotta
    figure(4 + lf); % ger 5,6,8
    hold on;
    plot(x_tvangsmoment, y_tvangsmoment, 'b');
    set(gca, 'YDir', 'reverse');
    legend(' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', 'Momentdiagram', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ',
    ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', 'Momentdiagram mht. tvångsmoment');
    hold off;
end

% Printa
fprintf('\n===== \n');
fprintf('\nTvångsmoment \n');
fprintf('\n===== \n');

```

```

fprintf('\nFält: \n');
for i = 1:5
    fprintf('%.0f = %.1f MNm\n', i, y_tvangsmoment(2*i-1));
end

fprintf('\nStöd: \n')
for i = 1:4
    fprintf('%.0f = %.1f MNm\n', i, y_tvangsmoment(2*i));
end

fprintf('\n===== \n');

=====

Tvångsmoment

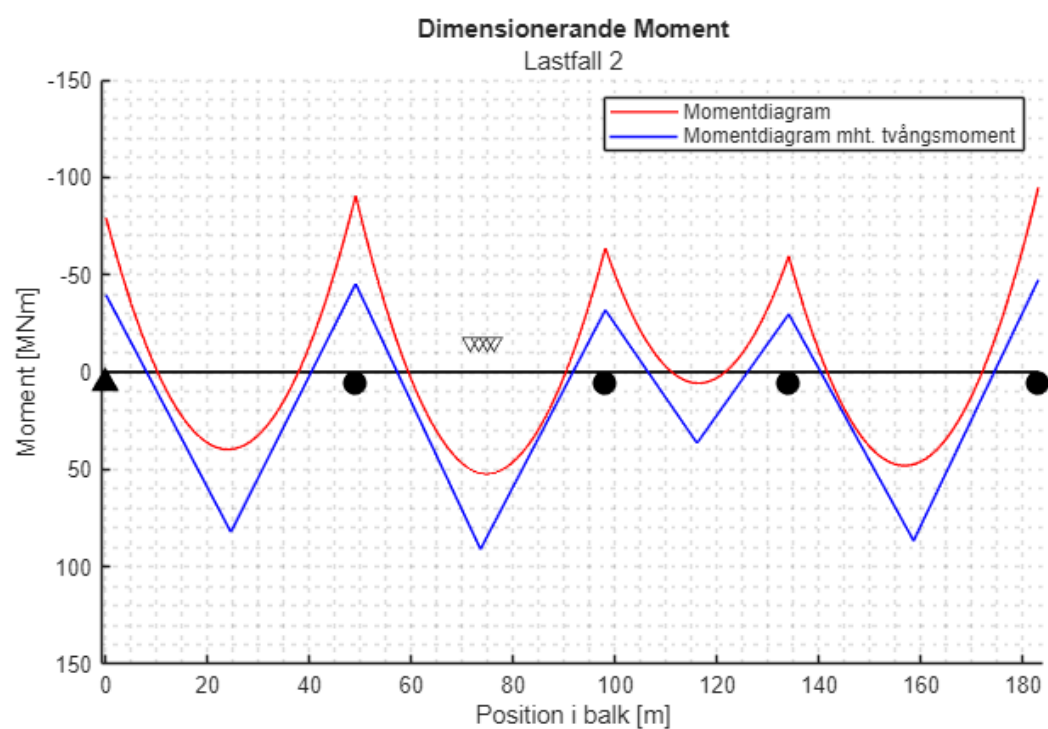
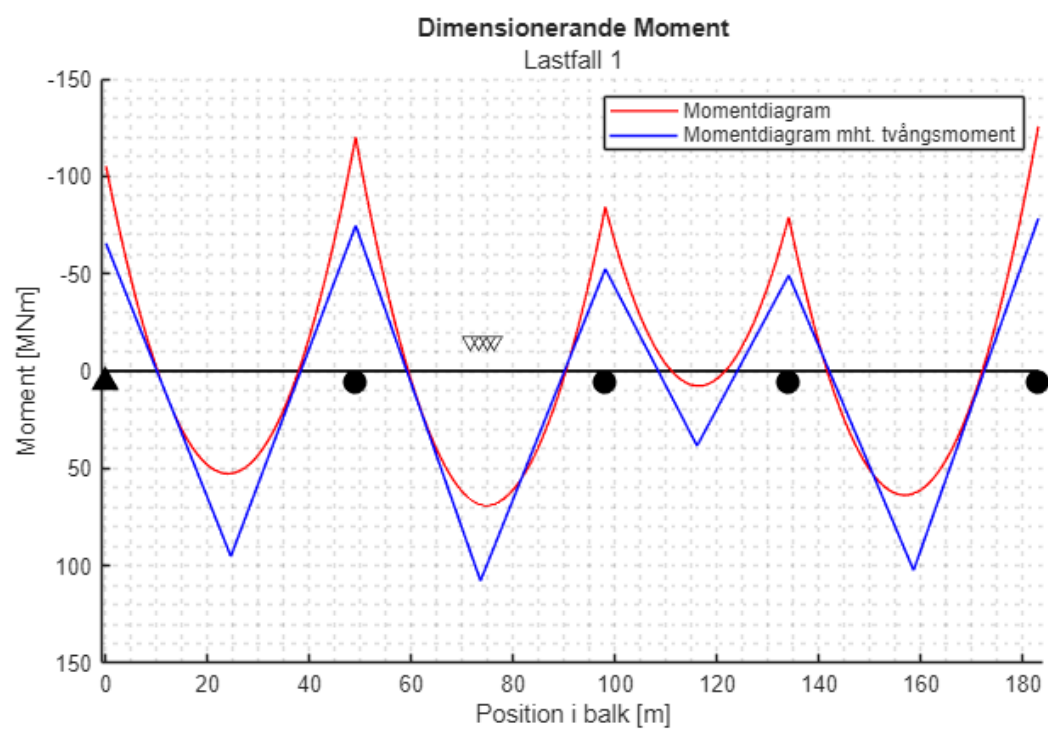
=====

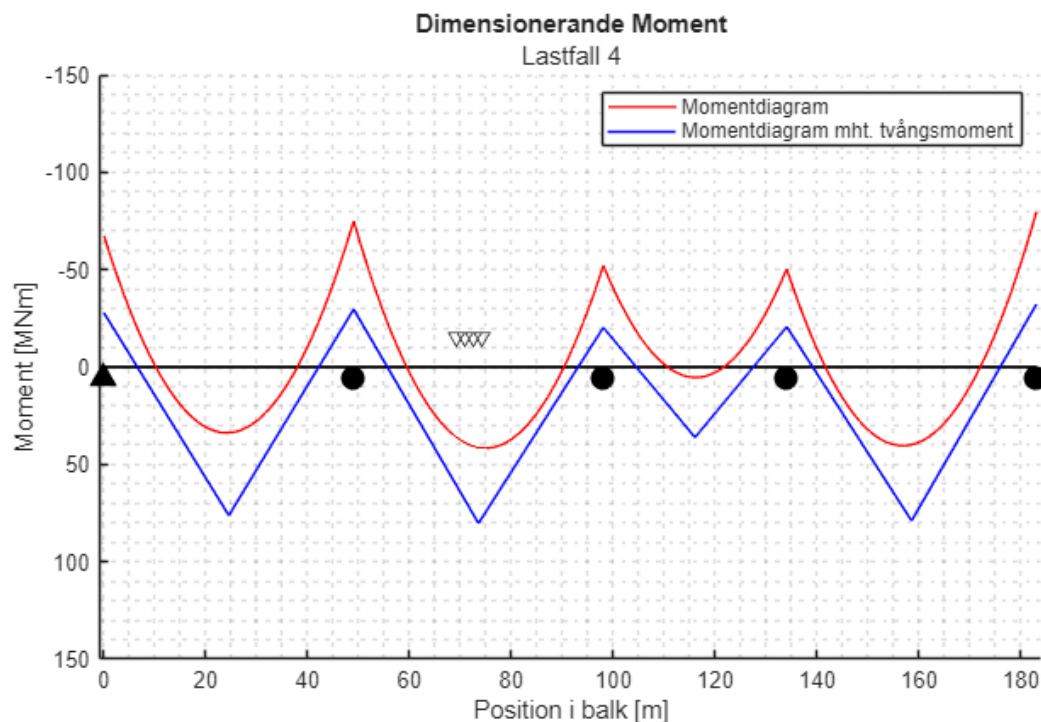
Fält:
1 = -27.8 MNm
2 = -29.7 MNm
3 = -20.3 MNm
4 = -20.7 MNm
5 = -32.3 MNm

Stöd:
1 = 76.2 MNm
2 = 80.2 MNm
3 = 36.1 MNm
4 = 78.9 MNm

=====

```





Tvärsnitt

```
% Överfläns
A1 = b1*h1;
y1 = h1/2;
Ii1 = b1*h1^3/12;

% Vänstra liv
A2 = b2*h2;
y2 = h1 + h2/2;
Ii2 = b2*h2^3/12;

% Högra liv
A3 = b3*h3;
y3 = h1 + h3/2;
Ii3 = b3*h3^3/12;

% Underfläns
A4 = b4*h4;
y4 = h1+h2+h4/2;
Ii4 = b4*h4^3/12;

% Tyngdpunkt från ovankant
xtp = (A1*y1+A2*y2+A3*y3+A4*y4) / (A1+A2+A3+A4);

% Avstånd till TP
a1 = xtp-y1;
a2 = y2-xtp;
```

```

a3 = y3-xtp;
a4 = y4-xtp;

% Yttröghetsmoment för varje del
I1 = Ii1 + a1^2*A1;
I2 = Ii2 + a2^2*A2;
I3 = Ii3 + a3^2*A3;
I4 = Ii4 + a4^2*A4;

% Spann och tvärsnitt
Atot = A1+A2+A3+A4;
htot = h1+h2+h4;
Itot = I1+I2+I3+I4;
rho = Itot/(Atot*xtp*(htot-xtp));

% Tvärsnittsdetaljer

% l0_fält = 0.85*l0
% l0_stöd = 0.15*l0 + 0.15*l1
l0s0 = (2*0.15*L_spann_49) * 2;
l0f1 = 0.85*L_spann_49;
l0s1 = 2*0.15*L_spann_49;
l0f2 = 0.85*L_spann_49;
l0s2 = (0.15*L_spann_49 + 0.15*L_spann_36);
l0f3 = 0.85*L_spann_36;
l0s3 = (0.15*L_spann_49 + 0.15*L_spann_36);
l0f4 = 0.85*L_spann_49;
l0s4 = (2*0.15*L_spann_49) * 2;

% Gör till vektor
l0f = [l0f1, l0f2, l0f3, l0f4];
l0s = [l0s0, l0s1, l0s2, l0s3, l0s4];

% b_eff_i
b1_T = b4/2 - b3;
b2_T = b1/2 - b4/2;
b3_T = b4/2 - b3;

% Gör till vektor
b_T = [b1_T, b2_T, b3_T];

% Fält:
b_T = b_T(:);

b_eff_f = 0.2 * b_T + 0.1 * l0f;    % (3x4 matris via implicit expansion)

b_eff_f = min(b_eff_f, 0.2 * l0f);    % jämför med 0.2*l0f
b_eff_f = min(b_eff_f, b_T);          % jämför med b_T

b_eff_f_OK = b_eff_f(1,:) + b_eff_f(2,:) + b3;

```

```

b_eff_f_UK = b_eff_f(3,:) + b3;

% Stöd:
b_eff_s = 0.2 * b_T + 0.1 * l0s;    % (3x4 matris via implicit expansion)

b_eff_s = min(b_eff_s, 0.2 * l0s);    % jämför med 0.2*l0f
b_eff_s = min(b_eff_s, b_T);          % jämför med b_T

b_eff_s_OK = b_eff_s(1,:) + b_eff_s(2,:) + b3;
b_eff_s_UK = b_eff_s(3,:) + b3;

% Tvärsnittskonstanter
Acf = b3*h3 + b_eff_f_OK * h1 + b_eff_f_UK * h4;
Acs = b3*h3 + b_eff_s_OK * h1 + b_eff_s_UK * h4;

xcf = ((b3*h3)*(h1+h3/2) + (b_eff_f_OK*h1)*(h1/2) +
(b_eff_f_UK*h4)*(h1+h3+h4/2)) ./ Acf;    % TP från ovankant
xcs = ((b3*h3)*(h1+h3/2) + (b_eff_s_OK*h1)*(h1/2) +
(b_eff_s_UK*h4)*(h1+h3+h4/2)) ./ Acs;

Icf = (b3*h3^3/12 + b3*h3*(h1+h3/2-xcf).^2) + (b_eff_f_OK*h1^3/12
+ b_eff_f_OK.*h1.*(xcf-h1/2).^2) + (b_eff_f_UK*h4^3/12 +
b_eff_f_UK*h4.*(h1+h3+h4/2 - xcf).^2);
Ics = (b3*h3^3/12 + b3*h3*(h1+h3/2-xcs).^2) + (b_eff_s_OK*h1^3/12
+ b_eff_s_OK.*h1.*(xcs-h1/2).^2) + (b_eff_s_UK*h4^3/12 +
b_eff_s_UK*h4.*(h1+h3+h4/2 - xcs).^2);

% Printa
fprintf('\n===== \n');
fprintf('\nEffektiv flänsbredd och tvärsnittskonstanter \n');
fprintf('\n===== \n');

% Tvärsnittskonstanter för varje del
Del = ['Del 1'; 'Del 2'; 'Del 3'; 'Del 4'];
ytp = [y1; y2; y3; y4];
A = [A1; A2; A3; A4];
a = [a1; a2; a3; a4];
Ii = [Ii1; Ii2; Ii3; Ii4];
I = [I1; I2; I3; I4];

T = table(Del, ytp, A, a, Ii, I);
disp(' ');
disp(T);

% Tvärsnittskonstanter tot
fprintf('Itot = %.2f m^4\n', Itot);
fprintf('htot = %.2f m\n', h1+h2+h4);
fprintf('p = %.3f\n', rho);

```

```

% Konstanter för snitten
% Fält
Del = ['Fältsnitt 1'; 'Fältsnitt 2'; 'Fältsnitt 3'; 'Fältsnitt 4'];
b_eff_f_OK = b_eff_f_OK';
b_eff_f_UK = b_eff_f_UK';
Acf = Acf';
xcf = xcf';
Icf = Icf';
T = table(Del, b_eff_f_OK, b_eff_f_UK, Acf, xcf, Icf);
disp(' ');
disp(T);

% Stöd
Del = ['Stödsnitt 1'; 'Stödsnitt 2'; 'Stödsnitt 3'; 'Stödsnitt 4';
'Stödsnitt 5'];
b_eff_s_OK = b_eff_s_OK';
b_eff_s_UK = b_eff_s_UK';
Acs = Acs';
xcs = xcs';
Ics = Ics';
T = table(Del, b_eff_s_OK, b_eff_s_UK, Acs, xcs, Ics);
disp(' ');
disp(T);

fprintf('=====\n');

```

=====

Effektiv flänsbredd och tvärsnittskonstanter

=====

<i>Del</i>	<i>ytp</i>	<i>A</i>	<i>a</i>	<i>Ii</i>	<i>I</i>
-----	-----	-----	-----	-----	-----
<i>Del 1</i>	0.225	5.175	1.1119	0.087328	6.4849
<i>Del 2</i>	1.55	1.32	0.21314	0.5324	0.59236
<i>Del 3</i>	1.55	1.32	0.21314	0.5324	0.59236
<i>Del 4</i>	2.875	3.375	1.5381	0.056953	8.0417

Itot = 15.71 m⁴

htot = 3.10 m

ρ = 0.596

<i>Del</i>	<i>b_eff_f_OK</i>	<i>b_eff_f_UK</i>	<i>Acf</i>	<i>xcf</i>	<i>Icf</i>
-----	-----	-----	-----	-----	-----
<i>Fältsnitt 1</i>	5.75	3.75	5.595	1.3369	7.8557
<i>Fältsnitt 2</i>	5.75	3.75	5.595	1.3369	7.8557
<i>Fältsnitt 3</i>	5.75	3.75	5.595	1.3369	7.8557
<i>Fältsnitt 4</i>	5.75	3.75	5.595	1.3369	7.8557

<i>Del</i>	<i>b_eff_s_OK</i>	<i>b_eff_s_UK</i>	<i>Acs</i>	<i>xcs</i>	<i>Ics</i>
<i>Stödsnitt 1</i>	5.75	3.75	5.595	1.3369	7.8557
<i>Stödsnitt 2</i>	4.57	2.7	4.5915	1.3072	6.0604
<i>Stödsnitt 3</i>	4.18	2.505	4.3283	1.3193	5.6341
<i>Stödsnitt 4</i>	4.18	2.505	4.3283	1.3193	5.6341
<i>Stödsnitt 5</i>	5.75	3.75	5.595	1.3369	7.8557

Minsta täckande betongskikt för byglar

```

phi_v = 12e-3; % Antag diameter 12 mm
cminb = phi_v;
cmindur = 25e-3; % Diverse utdrag, exp.klass XC3
cmin = max([cminb; cmindur; 10e-3]);

deltacdev = 10e-3; % Tolerans, Nationell parameter
cnom = cmin + deltacdev;
% Nominellt täckskikt måste vara multipel av 5 mm => OK!
cv = cnom; % [m]

% Minsta täckande betongskikt foderrör
phi_duct = 85e-3; % Yttre diameter för 19/13 linor (CCL produktblad)
cminb_duct = phi_duct;
cmin_duct = max([cminb_duct; cmindur; 10e-3]);
cnom_duct = cmin_duct + deltacdev; % 95 mm

% Avstånd mellan kant och centrum av foderrör:
s_e = cnom_duct + phi_duct/2;

% Avstånd mellan foderrör
% Minsta fria avstånd mellan rör i samma lager
dg = 16e-3; % Ballastens största storlek i betongen
k1 = 1.0; k2 = 5e-3;
s_sl = max([dg+k2; k1*phi_duct; 20e-3]); % (B4-27)
% Centrumavstånd mellan rör i samma lager
s_h = s_sl + 2*phi_duct/2;

% Minsta fria avstånd mellan lager
s_ml = max([dg; phi_duct; 20e-3]);

% Centrumavstånd mellan lager
s_v = s_ml + 2*phi_duct/2;

% Antal rör som ryms i ett lager (per liv)
bw = 0.6; % Bredd per liv
n = floor(((bw-2*s_e)/s_h) + 1); % Antal rör per lager per liv

fprintf('\n=====\\n');
fprintf('\nTäckande betongskikt\\n\\n')

```

```
fprintf('Högst %.0f st foderrör ryms per lager per liv\n', n);  
fprintf('\n=====\\n');
```

```
=====
```

Täckande betongskikt

Högst 2 st foderrör ryms per lager per liv

```
=====
```

Preliminärt val av förspänningskraft

```
% Kapad förspänd  
a_ccimax = 0.6*fcki;  
a_ctimax = fctk005i;  
  
% Långtidslast  
a_ccinfmax = 0.45*fck;  
  
% Karakteristisk last  
a_ctinfmax = 0;  
  
% Preliminärt val av förspänningskraft  
se = 137.5e-3;  
h = h1+h2+h4;  
dp = h-se;  
  
xcf = xtp;          % Tp I maxmomentsnitt, fullt utvecklad effektiv flänsbredd  
xcs = 3.1 - xcf;    % Över stöd från underkant  
  
ecf = dp - xcf;  
ecs = dp - xcs;  
  
% Erfoderlig spännkraft med hänsyn till sprickbegränsning vid karakteristisk  
last  
eta = 0.8;          % [-]  
I_cf = Icf(2)*2;    % [m4]  
A_cf = Acf(2)*2;    % [m2]  
  
I_cs = Ics(5)*2;    % [m4]  
A_cs = Acs(5)*2;    % [m2]  
  
% Moment, fält 2, karakteristisk  
M2k = 100.186e6;  
taljare_f1 = M2k - (I_cf / (h - xcf)) * abs(a_ctimax);  
namnare_f1 = ecf + (I_cf / ((h - xcf) * A_cf));  
Pi_f1 = (1/eta * (taljare_f1/namnare_f1))/0.9;
```

```

% Moment, stöd E, karakteristisk
MEk = 51.231e6;
taljare_s1 = MEk - (I_cs / (h - xcs)) * abs(a_ctimax);
namnare_s1 = ecs + (I_cs / ((h - xcs) * A_cs));
Pi_s1 = (1/eta * (taljare_s1/namnare_s1))/0.9;

% Begränsning av spännkraft vid uppspanning med hänsyn till sprickbegränsning
% Moment, fält 2, kvasipermanent (egentyngd)
Mf2g = 82.7661e6;
taljare_f2 = Mf2g + (I_cf/xcf) * fctk005i;
namnare_f2 = ecf - (I_cf/(xcf*A_cf));
Pi_f2 = (taljare_f2 /namnare_f2) / 1.1;

% Moment, stöd E, kvasipermanent (egentyngd)
MsEg = 26.6231e6;
taljare_s2 = MsEg + ((I_cs/xcs) * fctk005i);
namnare_s2 = ecs - (I_cs/(xcs*A_cs));
Pi_s2 = (taljare_s2 / namnare_s2) / 1.1;

% Begränsning av spännkraft vid uppspanning med hänsyn till
tryckspänningsbegränsning
taljare_f3 = Mf2g + (I_cf / (h-xcf) * a_ccimax);
namnare_f3 = ecf + (I_cf / ((h-xcf) * A_cf));
Pi_f3 = (taljare_f3/namnare_f3) / 1.1;

taljares3 = MsEg + (I_cs / (h-xcs) * a_ccimax);
namnares3 = ecs + (I_cs / ((h-xcs) * A_cs));
Pi_s3 = (taljares3 /namnares3) / 1.1;

fprintf('\n===== \n');
fprintf('\nVal av förspänningskraft\n');
fprintf('\n===== \n');

fprintf('\n%.1f MN < P_i,f < %.1f MN\n', Pi_f1*1e-6, min([Pi_f2,
Pi_f3])*1e-6);
fprintf('\n%.1f MN < P_i,s < %.1f MN\n\n', Pi_s1*1e-6, min([Pi_s2,
Pi_s3])*1e-6);
fprintf('Väljer P_i = %.1f MN\n', Pi_f1*1e-6);
fprintf('\n===== \n');

=====

Val av förspänningskraft

=====

47.2 MN < P_i,f < 91.3 MN
17.1 MN < P_i,s < 96.2 MN

Väljer P_i = 47.2 MN

```

Inplacering av spännkabel

```
% Välj lambda, beta, ef och es
ef = ecf;
es = xcf-se;
lambda = 0.5;
beta = 0.23;
```

```
L49 = L_spann_49;
L36 = L_spann_36;
```

```
% Parabel 1 (från stöd B)
% Excentricitet
e1 = beta*(ef+es)/lambda;
```

```
% Längd
l1 = beta*L49;
```

```
% Vinkel
alpha1 = 2*e1/l1;
```

```
% Krökningsradie
R1 = l1^2/(2*e1);
```

```
% Parabel 2
% Excentricitet
e2 = ef + es - e1;
```

```
% Längd
l2 = (lambda-beta)*L49;
```

```
% Vinkel
alpha2 = 2*e2/l2;
```

```
% Krökningsradie
R2 = l2^2/(2*e2);
```

```
% Parabel 3
% Excentricitet
e3 = ef + es - e1;
```

```
% Längd
l3 = (lambda-beta)*L49;
```

```
% Vinkel
alpha3 = 2*e3/l2;
```

```
% Krökningsradie
R3 = 13^2/(2*e3);

% Parabel 4
% Excentricitet
e4 = e1;

% Längd
l4 = beta*L49;

% Vinkel
alpha4 = 2*e4/l4;

% Krökningsradie
R4 = 14^2/(2*e4);

% Gör till vektorer
e49 = [e1, e2, e3, e4];
l49 = [l1, l2, l3, l4];
alpha49 = [alpha1, alpha2, alpha3, alpha4];
R49 = [R1, R2, R3, R4];

% 36 meters spann
beta2 = 0.27; % Nytt beta för 36 spann

% Parabel 1
% Excentricitet
e5 = beta2*(ef+es)/lambda;

% Längd
l5 = beta2*L36;

% Vinkel
alpha5 = 2*e5/l5;

% Krökningsradie
R5 = 15^2/(2*e5);

% Parabel 2
% Excentricitet
e6 = ef + es - e5;

% Längd
l6 = (lambda-beta2)*L36;

% Vinkel
alpha6 = 2*e6/l6;

% Krökningsradie
R6 = 16^2/(2*e6);
```

```

% Parabel 3
% Excentricitet
e7 = ef + es - e5;

% Längd
l7 = (lambda-beta2)*L36;

% Vinkel
alpha7 = 2*e7/l7;

% Krökningsradie
R7 = l7^2/(2*e7);

% Parabel 4
% Excentricitet
e8 = e5;

% Längd
l8 = beta2*L36;

% Vinkel
alpha8 = 2*e8/l8;

% Krökningsradie
R8 = l8^2/(2*e8);

% Gör till vektorer
e36 = [e5, e6, e7, e8];
l36 = [l5, l6, l7, l8];
alpha36 = [alpha5, alpha6, alpha7, alpha8];
R36 = [R5, R6, R7, R8];

% Printa
fprintf('\n===== \n');
fprintf('\nInplacering av spännkabel \n');
fprintf('\n===== \n');

fprintf('\nSpänn 1:\n\n');

Parabel = ['1'; '2'; '3'; '4'];
e49 = e49';
l49 = l49';
alpha49 = alpha49';
R49 = R49';

T49 = table(Parabel, e49, l49, alpha49, R49);
disp(T49);

fprintf('\nSpänn 2:\n\n');

```

```

e36 = e36';
l36 = l36';
alpha36 = alpha36';
R36 = R36';

T36 = table(Parabel, e36, l36, alpha36, R36);
disp(T36);

fprintf('=====\n');

```

```
=====
```

Inplacering av spännkabel

```
=====
```

Spann 1:

<i>Parabel</i>	<i>e49</i>	<i>l49</i>	<i>alpha49</i>	<i>R49</i>
-----	-----	-----	-----	-----
1	1.2995	11.27	0.23061	48.87
2	1.5255	13.23	0.23061	57.369
3	1.5255	13.23	0.23061	57.369
4	1.2995	11.27	0.23061	48.87

Spann 2:

<i>Parabel</i>	<i>e36</i>	<i>l36</i>	<i>alpha36</i>	<i>R36</i>
-----	-----	-----	-----	-----
1	1.5255	9.72	0.31389	30.966
2	1.2995	8.28	0.31389	26.379
3	1.2995	8.28	0.31389	26.379
4	1.5255	9.72	0.31389	30.966

```
=====
```

Val av spännkraft och spänningar

```

% Max stålspänning vis uppspanning enligt EK2 avsnitt 5.10.2.1(1) (P)
sigma_pi_max = min(0.8 * fpk, 0.9 * fp01k); % [MPa]

% Väljer stålspänning uppspanning
sigma_pi = sigma_pi_max; % [MPa]

% Spännkraft
P1 = Pi_f1; % [MN]
eta = 0.8; % Förlustfaktor [-]

% Initial uppspanningskraft

```

```

P0 = P1 / eta;

% Erforderlig stålarea
Ap = P0 / sigma_pi;    % [m2]

% Tråd-parametrar
trod_per_kabel = 17;    % [st] (max 19)
phi_p = 13e-3;         % [m] (diameter)
Api = (phi_p^2 * pi) / 4; % [m2] (area per tråd)

% Antal trådar som behövs
n = Ap / Api;    % [st]

% Antal kablar
num_cables = n/trod_per_kabel;
num_cables = ceil(num_cables);
Ap_total = num_cables * trod_per_kabel * Api;    % [m2]

% Uppspänningskraft
P0_actual = sigma_pi * Ap_total;    % [N]

% Printa resultat
fprintf('\n===== \n');
fprintf('\nVal av spännkraft och spänneheter \n');
fprintf('\n===== \n');

fprintf('\nMaximal stålspänning = %.1f MPa \nErforderlig stålarea = %.0f
mm2\n', sigma_pi_max*1e-6, Ap*1e6);
fprintf('\nAntal trådar = %.0f st \nAntal kablar = %.0f st \n', n, num_cables);
fprintf('\nFaktisk stålarea = %.0f mm2 \nUppspänningskraft = %.1f MN\n',
Ap_total*1e6, P0_actual*1e-6);

fprintf('\n===== \n');

=====

Val av spännkraft och spänneheter

=====

Maximal stålspänning = 1132.4 MPa
Erforderlig stålarea = 52139 mm2
Antal trådar = 393 st
Antal kablar = 24 st
Faktisk stålarea = 54155 mm2
Uppspänningskraft = 61.3 MN

=====

```

Preliminär kontroll av momentkapacitet

```
% Sätter z_stöd = z_fält pga flänsar i båda
z = dp - h1/2;

MRd = fpd * Ap * z; % Momentkapacitet för stöd och fält
% Dimensionerande moment 107.7 MNm (lastfall 1, fält 2)

Utnyttjandegrad = 107.7e6/MRd;

fprintf('\n===== \n');
fprintf('\nPreliminär kontroll av momentkapacitet \n');
fprintf('\n===== \n');

if MRd > 107.7e6
    fprintf('\nMomentkapacitet OK! \n');
    fprintf('M_Rd = %.1f MNm > 117.9 MNm = M_Ed \n', MRd*1e-6);
else
    fprintf('Momentkapacitet ej ok \n');
end
fprintf('\nUtnyttjandegrad: %.2f \n', Utnyttjandegrad);
fprintf('\n===== \n');

=====

Preliminär kontroll av momentkapacitet

=====

Momentkapacitet OK!
M_Rd = 156.2 MNm > 117.9 MNm = M_Ed

Utnyttjandegrad: 0.69

=====
```

Beräkning av tvångsmoment

```
% 49 m spann
dmax = ef + es + (e1 + e4)/2;

dm = 2/3 * dmax;

eB1 = dm - e1 - es;
eB2 = dm - e4 - es;

delta_e = abs(eB2 - eB1);

delta_M49 = 3/2 * P0_actual * eB1 + 1/2 * P0_actual * delta_e + 3/2 *
P0_actual * eB2;
skillnad_49 = abs(delta_f(2) - delta_M49);
```

```

% 36 m spann
dmax36 = ef + es + (e5 + e8)/2;

dm36 = 2/3 * dmax36;

eB3 = dm36 - e5 - es;
eB4 = dm36 - e8 - es;

delta_e36 = abs(eB4 - eB3);

delta_M36 = 3/2 * P0_actual * eB3 + 1/2 * P0_actual * delta_e36 + 3/2 *
P0_actual * eB4;
skillnad_36 = abs(delta_f(3) - delta_M36);

fprintf('\n=====\\n');
fprintf('\\nBeräknat tvångsmoment\\n');
fprintf('\\n=====\\n');

fprintf('\\nBeräknad ΔM_49 = %.1f MNm \\nSkillnad mot uppskattad ΔM = %.1f MNm
\\n', delta_M49*1e-6, skillnad_49*1e-6);
fprintf('\\nBeräknad ΔM_36 = %.1f MNm \\nSkillnad mot uppskattad ΔM = %.1f MNm
\\n', delta_M36*1e-6, skillnad_36*1e-6);

fprintf('\\n=====\\n');

=====

Beräknat tvångsmoment

=====

Beräknad ΔM_49 = 46.1 MNm
Skillnad mot uppskattad ΔM = 7.5 MNm

Beräknad ΔM_36 = 32.3 MNm
Skillnad mot uppskattad ΔM = 1.5 MNm

=====

```

Nedböjning i brukgränstillstånd

```

% Indata
Ec = Ecd;
I = I_cf;

% 49 m spann
M_Ed_max_49 = 100.186e6;    % [Nm], Uppskattat från figur, LF2

```

```

ksi_mitt_49 = M_Ed_max_49 / (Ec * I);
A_mitt_49 = (2/3) * ksi_mitt_49 * (L49 / 2);
x_mitt_49 = (5/8) * L49 / 2;
y_mitt_49 = A_mitt_49 * x_mitt_49;
y_max_49 = L49/800;      % Krav nedböjning: L/800

% 36 m spann
M_Ed_max_36 = 39.1796e6;      % [Nm], Uppskattat från figur, LF2

ksi_mitt_36 = M_Ed_max_36 / (Ec * I);
A_mitt_36 = (2/3) * ksi_mitt_36 * (L36 / 2);
x_mitt_36 = (5/8) * L36 / 2;
y_mitt_36 = A_mitt_36 * x_mitt_36;
y_max_36 = L36/800;

fprintf('\n===== \n');
fprintf('\nKontroll nedböjning \n');
fprintf('\n===== \n');

% 49 m spann
if y_mitt_49 < y_max_49
    fprintf('\nNedböjning (49 m spann) = %.1f mm < krav = %.1f mm --> Krav
OK! \n', y_mitt_49*1e3, y_max_49*1e3);
elseif y_mitt_49 > y_max_49
    fprintf('Krav ej ok \n');
end

% 36 m spann
if y_mitt_36 < y_max_36
    fprintf('Nedböjning (36 m spann) = %.1f mm < krav = %.1f mm --> Krav
OK! \n', y_mitt_36*1e3, y_max_36*1e3);
elseif y_mitt_36 > y_max_36
    fprintf('Krav ej ok \n');
end

fprintf('\n===== \n');

=====

Kontroll nedböjning

=====

Nedböjning (49 m spann) = 54.7 mm < krav = 61.2 mm --> Krav OK!
Nedböjning (36 m spann) = 11.5 mm < krav = 45.0 mm --> Krav OK!

=====

```

Längsgående böjarmering

```
fprintf('\n=====\\n');
fprintf('\nLängsgående minimiarmering\\n');

% Geometrier
h_under = 0.45;
h_over = 0.45;

% Armering B500B
f_yk = 500e6; % Bärande del 1
f_ctm = 3.5e6; % Bärande del 1
phi = 20e-3; % Stångdiameter
As_i = (pi*phi^2)/4; % Stångarea

% Centrumavstånd
c_minb = phi;
c_dev = 10e-3;
c_min_dur = 25e-3;
c_min = max([c_minb, c_min_dur, 10e-3]);
c_nom = c_min + c_dev;
cv = c_nom; % Multipel av 5 => OK!
s_kant = cv + (phi/2); % Avstånd från kant till centrum av stängen
k1 = 1;
k2 = 5e-3;
dg = 16e-3;
s_arm = max([k1*phi, dg + k2, 20e-3]); % Centrumavstånd mellan stänger

fprintf('\n=====\\n');
fprintf('\nAvstånd:\\n');
fprintf('\nAvstånd från kant till centrum av stängen blir: %.3f m', s_kant);
fprintf('\nCentrumavstånd mellan stänger blir: %.3f m\\n', s_arm);

% Fält
d_falt = h_under - s_kant; % Effektiv höjd undre fläns
bt_falt = 7.5; % Bredd undre fläns

As_min_falt = max([0.26*(f_ctm/f_yk)*bt_falt*d_falt, 0.0013*bt_falt*d_falt]);
n_falt = ceil(As_min_falt/As_i); % Minsta antal stänger
As_falt = n_falt*As_i;

fprintf('\n=====\\n');
fprintf('\nMinimiarmering i fält:\\n');
fprintf('\nMinsta antal stänger som behövs: %.f', n_falt);

if (bt_falt - 2*s_kant)/n_falt > s_arm
    fprintf('\nEndast 1 lager behövs med centrumavstånd: %.3f m\\n',
        (bt_falt-2*s_kant)/n_falt);

elseif (bt_falt - 2*s_kant)/(n_falt/2) > s_arm
    fprintf('\n2 lager behövs med centrumavstånd: %.3f m\\n', (bt_falt -
        2*s_kant)/(n_falt/2));
```

```

else
    fprintf('\nFler än 2 lager behövs\n');
end

% Stöd
d_stod = h_over - s_kant; % Effektiv höjd övre fläns
bt_stod = 11.5; % Bredd övre fläns
As_min_stod = max([0.26*(f_ctm/f_yk)*bt_stod*d_stod, 0.0013*bt_stod*d_stod]);
n_stod = ceil(As_min_stod/As_i); % Minsta antal stänger
As_stod = n_stod*As_i;

fprintf('\n===== \n');
fprintf('\nMinimiarmering i stöd:\n');
fprintf('\nMinsta antal stänger som behövs: %.f', n_stod);

if (bt_stod - 2*s_kant)/n_stod > s_arm
    fprintf('\nEndast 1 lager behövs med centrumavstånd: %.3f m\n',
(bt_stod-2*s_kant)/n_stod);

elseif (bt_stod - 2*s_kant)/(n_stod/2) > s_arm
    fprintf('\n2 lager behövs med centrumavstånd: %.3f m\n', (bt_stod -
2*s_kant)/(n_stod/2));

else
    fprintf('\nFler än 2 lager behövs\n');
end

fprintf('\n===== \n');

=====

Längsgående minimiarmering

=====

Avstånd:

Avstånd från kant till centrum av stången blir: 0.045 m
Centrumavstånd mellan stänger blir: 0.021 m

=====

Minimiarmering i fält:

Minsta antal stänger som behövs: 18
Endast 1 lager behövs med centrumavstånd: 0.412 m

=====

Minimiarmering i stöd:

```

Minsta antal stänger som behövs: 27
Endast 1 lager behövs med centrumavstånd: 0.423 m

=====

Tvärkraftsarmering i längsled

```
% Diameter armering
phi_v = 12e-3; % Antar diameter 12 mm

% Lutning skjuvsprickor
% Theta får väljas mellan 22-45 grader
theta = deg2rad(22); % [rad]

% Lutning byglar
alpha = deg2rad(90); % [rad]

% Area tvärkraftsarmering
Asw = (2*pi*phi_v^2)/4; % [m^2]

% Två liv som delar på kraften, tas ur tvärkraftsdiagram
V_Ed = 13.87e6/2;

H = h1+h2+h4; % Höjd på hela tvärsnittet
d = H-s_kant; % s_kant avstånd kant till centrum armering för böjarmering
längsled
z = 0.9*d;

% Bygelavstånd s
s = ((z * cot(theta)) / V_Ed) * Asw * fyd; % Omskrivning av ekv. (B6-21)
s = floor(s*100)/100; % [m]

% Minsta mängd tvärkraftsarmering
rho_wmin = 0.08 * sqrt(fck*10^-6)/(f_yk*10^-6);

% Tvärarmeringsinnehåll
rho_w = Asw/(s*bw*sin(alpha));

fprintf('\n===== \n');
fprintf('\nTvärkraftsarmering längsled \n');
fprintf('\n===== \n');

fprintf('\nBygelavstånd = %.f mm\n', s*1000);

% Kontrollera krav
if rho_w > rho_wmin
    fprintf('Minsta mängd tvärkraftsarmering uppfylls. OK!\n');
else
    fprintf('Minsta mängd tvärkraftsarmering uppfylls inte. EJ OK!\n');
end
```

```

s_max = 0.75 * d * (1 + cot(alpha));      % (B6-26)
if s < s_max
    fprintf('Bygelavståndet överstiger inte maximalt centrumavstånd. OK!\n');
elseif s > s_max
    fprintf('Bygelavståndet överstiger inte maximalt centrumavstånd. EJ OK!
\n');
end

fprintf('\n=====');

```

```

=====

Tvärkraftsarmering längsled
=====

```

```

Bygelavstånd = 90 mm
Minsta mängd tvärkraftsarmering uppfylls. OK!
Bygelavståndet överstiger inte maximalt centrumavstånd. OK!
=====

```

Moment och tvärkraftsberäkningar i tvärled

```

fprintf('\n=====');
fprintf('\nDimensionerande moment och tvärkraft\n');

```

```

r = 1.435; % cc-avstånd räls (från tidigare kod)
l_konsol = 2.3; % Längd konsol
l_rals = 4.5; % Avstånd mellan rälsnitt
l_stod = 1.2; % Avstånd från stöd till Q
l_balk = 11.5; % Total längd

```

```

% Moment och tvärkraft
% Permanent last - tas från tidigare kod
g = 9.81; % Gravitation [m/s^2]
b = 11.5; % Bredd [m]
h = h_over; % Höjd [m]
p = 2400; % Densitet betong [kg/m^3]
A = b*h; % Area [m^2]
G_bd = g*p*A; % Egentyngd utbredd [N/m]
eq = [0 -G_bd];

```

```

% Variabel last
alpha = 1.33;
Q_vk = 250e3; % Punktlast [N]
Q_vd = alpha*Q_vk;
ep = [1, 1, 1];
N_dof = 6; % Antal noder
N_el = 5; % Antal element
% Frihetsgrader

```

```

dof = zeros(N_dof,4);
for i = 1:N_dof
    dof(i,:) = [i 3*i-2 3*i-1 3*i];
end

% Topologi
edof = zeros(N_el,7);
for i = 1:N_el
    edof(i,:) = [i dof(i,[2 3 4]) dof(i+1,[2 3 4])];
end

% Lastvektor - utbredd last
ey = zeros(N_el,2);

% Nodkoordinater
coord = zeros(N_dof,1);
coord(1,1) = 0; % Ände konsol 1
coord(2,1) = l_konsol; % Stöd 1
coord(3,1) = l_konsol + l_stod; % Punktlast 1
coord(4,1) = l_konsol + l_stod + l_rals; % Punktlast 2
coord(5,1) = l_konsol + 2*l_stod + l_rals; % Stöd 2
coord(6,1) = l_balk; % Ände konsol 2

% Excentricitet
% Lastfall 1 - rälsarna flyttas in mot mitten
% Lastfall 2 - rälsarna flyttas lika mycket mot ett stöd
e = r/18;
coord0 = coord;

% Vektorer för dimensionerande värden
M_dim_falt_all = zeros(2,1);
M_dim_stod_all = zeros(2,1);
V_dim_falt_all = zeros(2,1);
V_dim_stod_all = zeros(2,1);

for last = 1:2
    coord = coord0;
    if last == 1
        coord(3,1) = coord(3,1) + e;
        coord(4,1) = coord(4,1) - e;
    elseif last == 2
        coord(3,1) = coord(3,1) + e;
        coord(4,1) = coord(4,1) + e;
    end

% Elementkoordinater
ex = zeros(N_el,2);
for i = 1:5
    ex(i,:) = [coord(i,1) coord(i+1,1)];
end

% Skapar styvhetsmatris

```

```

N_fr = N_dof*3; % 3 frihetsgrader/nod
K = zeros(N_fr);
f = zeros(N_fr,1);
for i = 1:5
    [Ke,fe] = beam2e(ex(i,:),ey(i,:),ep,eq);
    [K,f] = assem(edof(i,:),K,Ke,f,fe);
end

% Punktlaster
f(8,1) = f(8,1) - Q_vd;
f(11,1) = f(11,1) - Q_vd;

% Randvillkor
bc = [4 0; 5 0; 14 0];

% Löser systemet
[a,f_b] = solveq(K,f,bc);
ed = extract(edof,a);

% Ritar moment- och tvärkraftsdiagram
n = 100; % Definierar antalet punkter
M1 = zeros(n,N_el); % Moment
V1 = zeros(n,N_el); % Tvärkraft
f_y1 = zeros(n,N_el); % Nedböjning
f_x1 = zeros(n,N_el); % Koordinater

for i = 1:N_el
    [es, edi, eci] = beam2s(ex(i,:),ey(i,:),ep,ed(i,:),eq,n);
    M1(:,i) = es(:,3);
    V1(:,i) = es(:,2);
    f_y1(:,i) = edi(:,2);
    f_x1(:,i) = eci + ex(i,1);
end

% Ritar tvärkraftsdiagram
x_all = reshape(f_x1, [], 1);
V_all = reshape(V1/1000, [], 1);
[x_sorted, idx] = sort(x_all);
V_sorted = V_all(idx);
figure;
hold on;
plot(x_sorted, V_sorted, 'b')

if last == 1
    title('Tvärkraftsdiagram', 'Lastfall 1');
elseif last == 2
    title('Tvärkraftsdiagram', 'Lastfall 2');
end

set(gca, 'Ydir', 'reverse')

% Balk
plot([0 11.5],[0 0], 'k', 'LineWidth', 2.5)

```

```

% Stöd
y_support = 0 + 0.03 * (max(V_sorted(:)) - min(V_sorted(:)));

plot(2.3, y_support, '^', 'Color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k',
'MarkerSize', 10);
plot(9.2, y_support, 'o', 'Color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k',
'MarkerSize', 11);
xlabel('x [m]')
ylabel('Tvärkraft V [kN]')
grid on
hold off

% Ritar momentdiagram
figure;
hold on;
for i = 1:N_el
    plot(f_x1(:,i), M1(:,i)/1000, 'Color', 'r');
end
if last == 1
    title('Momentdiagram', 'Lastfall 1')
elseif last == 2
    title('Momentdiagram', 'Lastfall 2')
end
set(gca, 'Ydir', 'reverse')

% Balk
plot([0 11.5], [0 0], 'k', 'Linewidth', 2.5)

% Stöd
y_support = 0 + 0.03 * (max(M1(:)/1000) - min(M1(:)/1000));
plot(2.3, y_support, '^', 'Color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k',
'MarkerSize', 10);
plot(9.2, y_support, 'o', 'Color', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k',
'MarkerSize', 11);
xlabel('x [m]');
ylabel('Moment M [kNm]');
grid on;
hold off;

% Dimensionerande värden
M_dim_falt = max(abs(M1(:)));
V_dim_falt = max(abs(V1(:)));
M_dim_stod = min(M1(:));
V_dim_stod = min(V1(:));
M_dim_falt_all(last) = M_dim_falt;
M_dim_stod_all(last) = M_dim_stod;
V_dim_falt_all(last) = V_dim_falt;
V_dim_stod_all(last) = V_dim_stod;

```

```

fprintf('\n===== \n');
fprintf(' Lastfall %d\n', last);
fprintf('\nFält:\n');
fprintf(' Dimensionerande moment: %.2f kNm\n', M_dim_falt*10^-3);
fprintf(' Dimensionerande tvärkraft: %.2f kN\n', V_dim_falt*10^-3);
fprintf('\nStöd:\n');
fprintf(' Dimensionerande moment: %.2f kNm\n', M_dim_stod*10^-3);
fprintf(' Dimensionerande tvärkraft: %.2f kN\n', V_dim_stod*10^-3);
end % SLUT LOOP

```

```

% Fält
[M_dim_falt_max, last_falt_max] = max(abs(M_dim_falt_all));
[V_dim_falt_max, last_falt_max] = max(abs(V_dim_falt_all));

% Stöd
[M_dim_stod_min, last_stod_min] = min(M_dim_stod_all);
[V_dim_stod_min, last_stod_min] = min(V_dim_stod_all);

```

```

=====

```

Dimensionerande moment och tvärkraft

```

=====

```

Lastfall 1

Fält:

Dimensionerande moment: 828.31 kNm
Dimensionerande tvärkraft: 752.85 kN

Stöd:

Dimensionerande moment: -322.27 kNm
Dimensionerande tvärkraft: -752.85 kN

```

=====

```

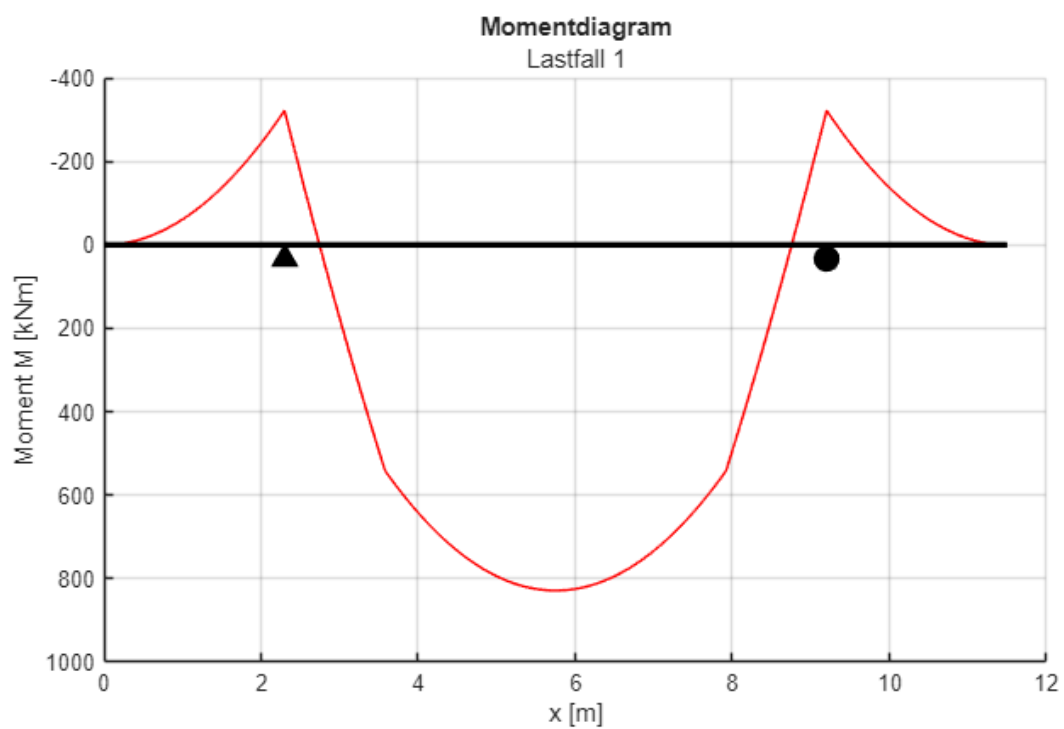
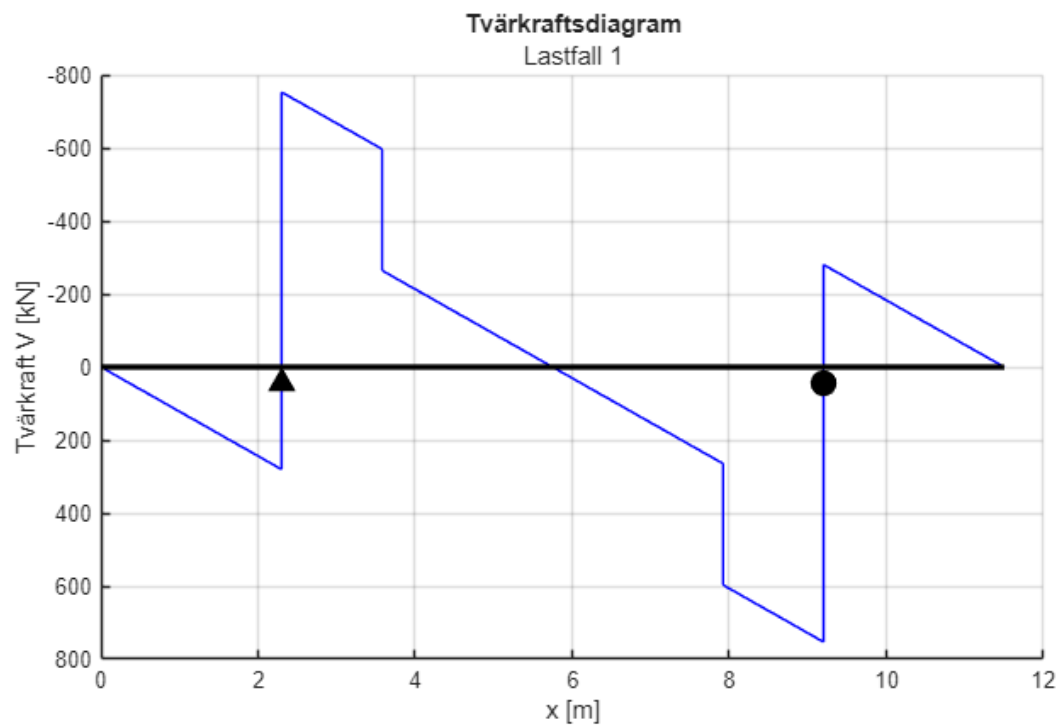
Lastfall 2

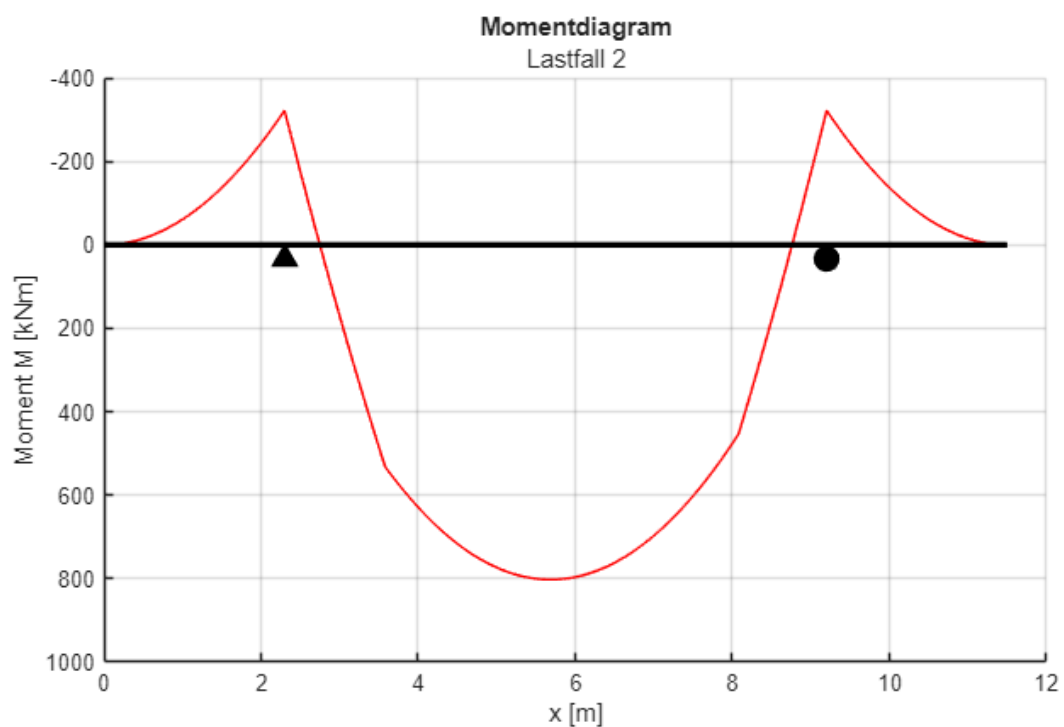
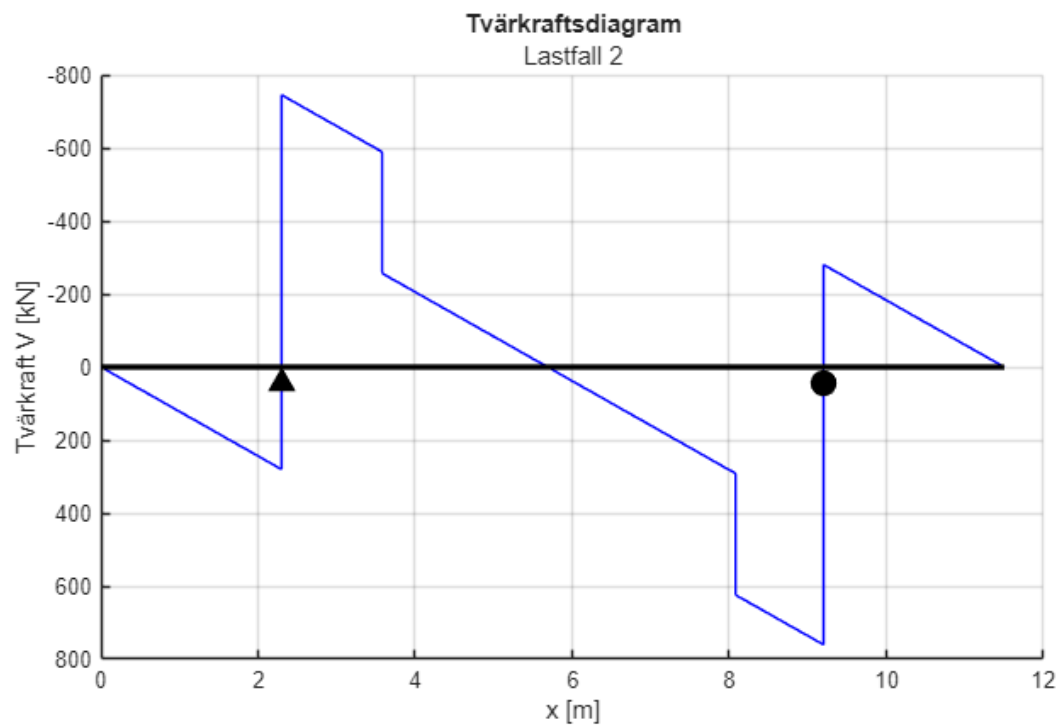
Fält:

Dimensionerande moment: 802.06 kNm
Dimensionerande tvärkraft: 760.53 kN

Stöd:

Dimensionerande moment: -322.27 kNm
Dimensionerande tvärkraft: -745.17 kN





Tvärgående böjarmering

```
fprintf('\n=====\\n');
fprintf('\nTvärgående böjarmering\\n');
```

```

M_ed_falt_tvar = M_dim_falt_max;
M_ed_stod_tvar = abs(M_dim_stod_min);

% Samma dimension som längsgående böjarmering => phi = 20 mm
% Samma geometrier som övre fläns
% Kollar på 1.6 m då detta är längsta avståndet mellan punktlaster i LM71
l = 1.6;
f_yd = f_yk/1.15;

% Erforderlig armeringsmängd underkant
d_tvar = d_stod;
z_tvar = 0.9*d_tvar;
As_uk = M_ed_falt_tvar/(f_yd*z_tvar);
n_uk = ceil(As_uk/As_i);
As_uk_ny = n_uk*As_i;

fprintf('\n=====');
fprintf('\nTvärgående böjarmering i underkant:\n');
fprintf('\nAntal stänger: %.f', n_uk);

if (l - 2*s_kant)/n_uk > s_arm
    fprintf('\nEndast 1 lager behövs med centrumavstånd: %.3f m\n',
    (l-2*s_kant)/n_uk);
elseif (l - 2*s_kant)/(n_uk/2) > s_arm
    fprintf('\n2 lager behövs med centrumavstånd: %.3f m\n', (l - 2*s_kant)/
    (n_uk/2));
else
    fprintf('\nFler än 2 lager behövs\n');
end

% Erforderlig armeringsmängd överkant
As_ok = M_ed_stod_tvar/(f_yd*z_tvar);
n_ok = ceil(As_ok/As_i);
As_ok_ny= n_ok*As_i;

fprintf('\n=====');
fprintf('\nTvärgående böjarmering i överkant:\n');
fprintf('\nAntal stänger: %.f', n_ok);

if (l - 2*s_kant)/n_ok > s_arm
    fprintf('\nEndast 1 lager behövs med centrumavstånd: %.3f m\n',
    (l-2*s_kant)/n_ok);
elseif (l - 2*s_kant)/(n_ok/2) > s_arm
    fprintf('\n2 lager behövs med centrumavstånd: %.3f m\n', (l - 2*s_kant)/
    (n_ok/2));
else
    fprintf('\nFler än 2 lager behövs\n');
end

% Kontroll mot max- och minimiarmering

```

```

A_c = l*h_over;
As_min_tvar = max([0.26*(f_ctm/f_yk)*l*d_tvar, 0.0013*l*d_tvar]);
As_max_tvar = 0.04*A_c;

% Underkant
fprintf('\n===== \n');
fprintf('\nKontroll armeringsmängd underkant\n');

if As_uk_ny > As_min_tvar && As_uk_ny < As_max_tvar
    fprintf('Armeringsarea OK!, uppfyller kraven\n');
else
    fprintf('Armeringsarea EJ OK!, uppfyller ej kraven\n');
end

% Överkant
fprintf('\nKontroll armeringsmängd överkant\n');
if As_ok_ny > As_min_tvar && As_ok_ny < As_max_tvar
    fprintf('Armeringsarea OK!, uppfyller kraven\n');
else
    fprintf('Armeringsarea EJ OK!, uppfyller ej kraven\n');
end

fprintf('\n===== \n');

% Momentkapacitet
M_rd_falt_tvar = As_uk_ny*f_yd*z_tvar;
M_rd_stod_tvar = As_ok_ny*f_yd*z_tvar;
fprintf('\nKontroll momentkapacitet\n');
if M_rd_falt_tvar > M_ed_falt_tvar && M_rd_stod_tvar > M_ed_stod_tvar
    fprintf('Momentkapacitet OK!\n');
else
    fprintf('Momentkapacitet EJ OK!\n');
end

% Utnyttjandegrader
u_falt = M_ed_falt_tvar/M_rd_falt_tvar;
u_stod = M_ed_stod_tvar/M_rd_stod_tvar;

if u_falt > 0.80 && u_stod > 0.80
    fprintf('\nUtnyttjandegrader OK!\n');
    fprintf('Ingen vidare optimering av plattan\n');
else
    fprintf('\nUtnyttjandegrader EJ OK!\n');
    fprintf('Vidare optimering bör göras\n');
end

fprintf('\n===== \n');

=====

```

Tvärgående böjarmering

=====

Tvärgående böjarmering i underkant:

Antal stänger: 17

Endast 1 lager behövs med centrumavstånd: 0.089 m

=====

Tvärgående böjarmering i överkant:

Antal stänger: 7

Endast 1 lager behövs med centrumavstånd: 0.216 m

=====

Kontroll armeringsmängd underkant

Armeringsarea OK!, uppfyller kraven

Kontroll armeringsmängd överkant

Armeringsarea OK!, uppfyller kraven

=====

Kontroll momentkapacitet

Momentkapacitet OK!

Utnyttjandegrader OK!

Ingen vidare optimering av plattan

=====

Tvärkraftsarmering i tvärled

```
fprintf('\n=====\\n');
```

```
fprintf('\nTvärkraftsarmering i tvärled\\n');
```

```
V_ed_tvar = abs(V_dim_falt_max);
```

```
% Betong C40/50
```

```
fck = 40e6;
```

```
phi_v = 12e-3; % Antar diameter 12 mm
```

```
% Lutning skjuvsprickor
```

```
% Theta får väljas mellan 22-45 grader
```

```
theta = deg2rad(22); % [rad]
```

```
% Lutning byglar
```

```
alpha = deg2rad(90); % [rad]
```

```
% Area tvärkraftsarmering
```

```

Asw = (2*pi*phi_v^2)/4; % [m^2]

% Bygelavstånd s
s_tvar = ((z_tvar * cot(theta)) / V_ed_tvar) * Asw * f_yd; % Omskrivning av
ekv. (B6-21)
s_tvar = floor(s_tvar*100)/100; % [m]

fprintf('\n=====\\n');
fprintf('\\nBygelavstånd = %.f mm\\n', s_tvar*1000);

% Minsta mängd tvärkraftsarmering
rho_wmin_tvar = 0.08 * sqrt(fck*10^-6)/(f_yk*10^-6);

% Tvärarmeringsinnehåll
rho_w_tvar = Asw/(s_tvar*l*sin(alpha));

% Kontrollera krav
if rho_w_tvar > rho_wmin_tvar
    disp('Minsta mängd tvärkraftsarmering uppfylls. OK!');
else
    disp('Minsta mängd tvärkraftsarmering uppfylls inte. EJ OK!');
end

s_max_tvar = 0.75 * d_tvar * (1 + cot(alpha)); % (B6-26)
if s_tvar < s_max_tvar
    disp('Bygelavståndet överstiger inte maximalt centrumavstånd. OK!');
elseif s_tvar > s_max_tvar
    disp('Bygelavståndet överstiger inte maximalt centrumavstånd. EJ OK!');
end

% Kontroll mot skjuvgildbrott - ekv B6-22
V_rd_s = ((z_tvar*cot(theta) + cot(alpha))/s_tvar)*f_yd*Asw*sin(alpha);
fprintf('\\n=====\\n');
fprintf('\\nKontroller\\n');
fprintf('\\n=====\\n');

fprintf('\\nKontroll mot skjuvgildbrott:\\n');
if V_rd_s > V_ed_tvar
    fprintf('\\nTvärkraftskapacitet OK!\\n');
else
    fprintf('\\nTvärkraftskapacitet EJ OK!\\n');
end

fprintf('\\n=====\\n');

=====

Tvärkraftsarmering i tvärled

=====

```

Bygelavstånd = 110 mm
Minsta mängd tvärkraftsarmering uppfylls. OK!
Bygelavståndet överstiger inte maximalt centrumavstånd. OK!

=====

Kontroller

=====

Kontroll mot skjuvglidbrott:

Tvärkraftskapacitet OK!

=====

Sprickkontroll i tvärled

% Stadium I

$I = (I_{balk} \cdot h^3) / 12;$

% Materialparametrar

$f_{cm} = 48 \text{e}6;$

$E_{cm} = 35 \text{e}9;$

$E_s = 200 \text{e}9;$

$k = \max([1.6 - h \cdot 1]);$

$\alpha_s = E_s / E_{cm};$

% Naviers formel

$f_{ctm_fl} = f_{ctm} \cdot k;$

$\sigma_{cr} = f_{ctm_fl};$

$M_{cr} = (\sigma_{cr} \cdot I) / (h/2);$

$\text{fprintf}(\backslash n \text{=====} \backslash n);$

$\text{fprintf}(\backslash n \text{Sprickkontroll i bruksgränstillstånd:} \backslash n);$

$\text{if } M_{ed_falt_tvar} > M_{cr}$

$\text{fprintf}(\backslash n \text{Plattan spricker i fält} \backslash n);$

else

$\text{fprintf}(\backslash n \text{Plattan är osprucken i fält} \backslash n);$

end

$\text{if } M_{ed_stod_tvar} > M_{cr}$

$\text{fprintf}(\backslash n \text{Plattan spricker över stöd} \backslash n);$

else

$\text{fprintf}(\backslash n \text{Plattan är osprucken över stöd} \backslash n);$

end

$\text{fprintf}(\backslash n \text{=====} \backslash n);$

=====

Sprickkontroll i bruksgränstillstånd:

*Plattan är osprucken i fält
Plattan är osprucken över stöd*

=====

Nedböjning tvärled

```
l_spannvidd = 6.9;           % Teoretisk spannvidd mellan stöd i tvärled
l_mitt = l_spannvidd/2;

y_max_36 = l_spannvidd/800;   % Krav på nedböjning från Trafikverket
I_k = (l_spannvidd*h^3)/12;
krokning = M_ed_falt_tvar/(E_cm*I_k);

% Maximal nedböjning i mitten
A_punkt = (1/2)*krokning*l_mitt;
x_punkt = (2/3)*l_mitt;
A_utbredd = (2/3)*krokning*l_mitt;
x_utbredd = (5/8)*l_mitt;
y_ned = (A_punkt*x_punkt) + (A_utbredd*x_utbredd);

fprintf('\n===== \n');

fprintf('\nKontroll nedböjning: \n');

if y_ned < y_max_36
    fprintf('\nNedböjning OK! \n');
    fprintf('Uppfyller kravet \n');
    fprintf('Nedböjningen i tvärled blir: %.2f mm \n', y_ned*1000);
else
    fprintf('\nNedböjning EJ OK! \n');
    fprintf('Uppfyller ej kravet \n');
end

fprintf('\n===== \n');
```

=====

Kontroll nedböjning:

*Nedböjning OK!
Uppfyller kravet
Nedböjningen i tvärled blir: 4.03 mm*

=====

Published with MATLAB® R2025b

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS