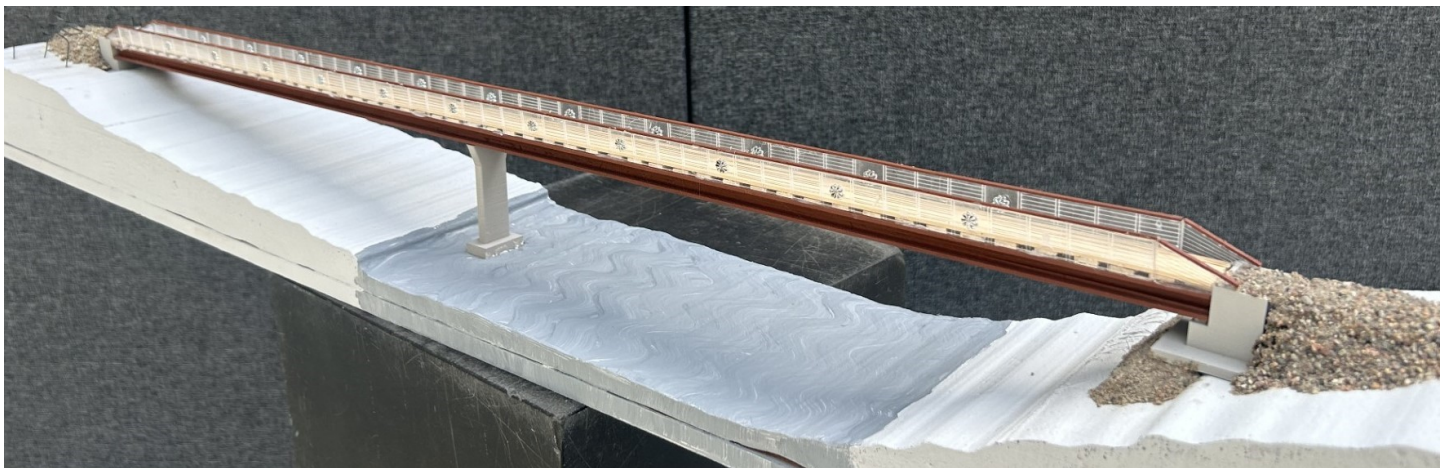




CHALMERS



Gång- och cykelbro i väderbeständigt stål över Rönne å i Ängelholm

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

MAHMOUD ALHAMAD, WILMA ERIKSSON,
EMIN GUSTAFSSON, MOHAMMAD SAMI RAAD,
ALVA SVENSK & ARVID THEGERSTRÖM

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

KANDIDATUPPSATS 2024

Gång- och cykelbro i väderbeständigt stål över Rönne å i Ängelholm

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

MAHMOUD ALHAMAD
WILMA ERIKSSON
EMIN GUSTAFSSON
MOHAMMAD SAMI RAAD
ALVA SVENSK
ARVID THEGERSTRÖM



CHALMERS

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

ACEX11-24-053

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2024

Gång- och cykelbro i väderbeständigt stål över Rönne å i Ängelholm
Förstudie och preliminär dimensionering
MAHMOUD ALHAMAD, WILMA ERIKSSON, EMIN GUSTAFSSON,
MOHAMMAD SAMI RAAD, ALVA SVENSK, ARVID THEGERSTRÖM.

- © MAHMOUD ALHAMAD, 2024.
- © WILMA ERIKSSON, 2024.
- © EMIN GUSTAFSSON, 2024.
- © MOHAMMAD SAMI RAAD, 2024.
- © ALVA SVENSK, 2024.
- © ARVID THEGERSTRÖM, 2024.

Handledare: Marcus Davidson och Staffan Lindén, COWI
Alexander Kjellgren, Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik
Examinator: Carlos Gil Berrocal, Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Kandidatarbete 2024
Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Konstruktionsteknik
ACEX11-24-053
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Skriven i L^AT_EX
Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik
Göteborg, Sverige 2024

Gång- och cykelbro i väderbeständigt stål över Rönne å i Ängelholm

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

MAHMOUD ALHAMAD

WILMA ERIKSSON

EMIN GUSTAFSSON

MOHAMMAD SAMI RAAD

ALVA SVENSK

ARVID THEGERSTRÖM

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Denna rapport avser dimensioneringen av en gång-och cykelbro över Rönne å i Ängelholm. Bron erfordrar en spännvidd på 90 meter och ska sammanbinda ett naturreservat med ett bostadsområde. Syftet är att ta fram ett lämpligt brokoncept, beskriva bakgrunden till valet samt dimensionera det valda konceptet. Utöver redan fastställda förutsättningar och begränsningar, har gruppen fått möjlighet att själva definiera och bestämma en betydande del av dem. Projektet är uppdelat i två delar bestående av en förstudie samt en dimensioneringsprocess.

Förstudiens syfte är att välja ett lämpligt brokoncept för aktuell plats. Processen sker genom en urvalsprocess bestående av tre delar. Det första urvalet avser en samling av vanligt förekommande broar som kan tänkas fungera utifrån givna förutsättningar. De mest lämpade koncepten utvärderas ytterligare med hjälp av en viktningsmall för att slutligen landa i ett brokoncept. Det valda brokonceptet är en balkbro i väderbeständigt stål.

Dimensioneringsprocessen fokuserar på de mest kritiska aspekterna för bronns bärformåga. Beräkningar och dimensionering utförs i MATLAB och dess tillhörande programvara CALFEM, baserat på krav och råd från Eurokod. Dimensioneringen görs både i längsled samt tvärlängd på bronns huvuddelar, mer specifikt undersöks primär- och sekundärstrukturerna samt temperatureffekter.

Nyckelord: Brokonstruktion, Balkbro, Gång- och cykelbro, Samhällsbyggnad, Stålbros, Preliminär dimensionering, Väderbeständigt stål

Pedestrian and bicycle bridge made of Weathering steel over Rönne River in Ängelholm

Bachelor's thesis in Civil Engineering

MAHMOUD ALHAMAD

WILMA ERIKSSON

EMIN GUSTAFSSON

MOHAMMAD SAMI RAAD

ALVA SVENSK

ARVID THEGERSTRÖM

Department of Architecture and Civil Engineering

Chalmers University of Technology

Abstract

This report concerns the design of a pedestrian and bicycle bridge over the Rönne River in Ängelholm. The bridge will span 90 meters, connecting a nature reserve with a residential area. The purpose is to develop a suitable bridge concept, describe the rationale behind the choice, and provide the structural design for the chosen concept. In addition to established conditions and constraints, the group has been able to define and determine a significant portion of them. The project is divided into two parts: a preliminary study and a design process.

The purpose of the preliminary study is to select a suitable bridge concept for the current location. The process unfolds through a selection process consisting of three stages. The first stage involves a collection of commonly used bridges that might be suitable given the conditions. The best-suited concepts are then identified for further evaluation according to a scoring matrix, concluding in a final bridge type. The chosen bridge concept is a weather-resistant steel beam bridge.

The dimension process focuses on the most critical aspects of the bridge's load-bearing capacity. Calculations and dimensioning are performed in MATLAB and its CALFEM software, based on requirements and guidance outlined in Eurocode. The dimensioning is analyzed in both longitudinal and transverse directions, covering the main bridge components in terms of primary and secondary structure, as well as temperature effects.

Keywords: Bridge Construction, Beambridge, Pedestrian- and bicyclebridge, Civil Engineering, Steelbridge, Preliminary dimensioning, Weathering Steel

Förord

Denna rapport är en kandidatuppsats skriven av sex studenter som studerar civilingenjörsprogrammet inom samhällsbyggnadsteknik på Chalmers tekniska högskola. Arbetet innefattar 15 högskolepoäng och sammanfattar tre års studier på programmet.

Arbetet har varit mycket givande och lärorikt då studenterna har fått arbeta med ett verklighetsbaserat projekt. Under processens gång har vi fått en djupare förståelse för ingenjörsmässig metodik samt utvecklat förmågan att arbeta i en projektgrupp. Erfarenheterna från detta arbete har gett oss en bra grund som kommer kunna utnyttjas i kommande projekt och yrkeskarriärer.

Kandidatgruppen vill rikta ett tack till alla som har bidragit med empirisk erfarenhet, handledning och därmed väglett oss under arbetets gång. Ett stort tack till COWI AB, där vi vill uppmärksamma Marcus Davidson och Staffan Lindén som alltid ställt upp och erbjudit sin expertis på dimensioneringsfrågor. Vi vill även tacka Alexander Kjellgren på Chalmers som har varit vår handledare och hjälpt oss med att driva arbetet framåt. Slutligen så vill vi rikta ett tack till arbetslaget i A-verkstaden för deras passion och hjälp med modellbygget.

Göteborg, Maj 2024

MAHMOUD ALHAMAD
WILMA ERIKSSON
EMIN GUSTAFSSON
MOHAMMAD SAMI RAAD
ALVA SVENSK
ARVID THEGERSTRÖM

Begreppslista

COWI - Konsultföretag.

Dimensionerande trafiklast - Lasten som bron ska klara av att bära.

Eurokod - Europas allmänna dimensioneringsregler för byggnation.

Fri höjd - Höjden på utrymmet mellan brons underkant och vattenytan.

Geoteknik - Information och beräkningar som berör den jord inklusive underliggande berg som bron som byggas på.

GC-bro - Gång- och cykelbro.

Hållfasthet - Bärförmåga.

Konceptuell dimensionering - Inledande dimensioneringsprocess där övergripande dimensioner och parametrar bestäms.

MKB - Miljökonsekvensbeskrivning.

Prefab - Prefabricerade material konstruerade på fabrik.

Primärstruktur - Huvudbärverket.

Preliminär dimensionering - Detaljerad dimensionering där exakta dimensioner och parametrar bestäms.

Pråm - En båt eller ett fartyg som kan nyttjas för transporter över vattendrag.

Pyloner - Vertikala element där kablar i hängande brokonstruktioner är förankrade.

Radie på bron - Beskriver krökningen för bron, en större radie innebär en mindre krökning.

Sekundärstruktur - Delar som ger stöd åt huvudbärverket och för vidare dess laster.

Sondering - Geoteknisk mätmetod.

Spännvidd - Avståndet mellan brons stöd.

Svällning - Materialet ökar i storlek på grund av vattenupptag.

Sättningar - Markens vertikala deformation vid belastning.

Underbyggnad - Del av bron som bär överbyggnaden.

Vippning - När tryckta sidan på en balk knäcker ut.

VS - Väderbeständigt Stål.

Överbyggnad - Del av bron som bär lasten från trafik.

Innehåll

Begrepp	ix
Figurer	xiii
Tabeller	xv
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Problembeskrivning	2
1.4 Avgränsningar	2
1.5 Metod	2
1.5.1 Förstudie	3
1.5.2 Dimensionering av valt brokoncept	3
1.6 Samhälleliga och etiska aspekter	3
2 Förutsättningar	4
2.1 Beställarens önskemål och krav	4
2.2 Konstruktionens förutsättningar	4
2.3 Geografiska förutsättningar	4
2.4 Geotekniska förutsättningar	5
2.5 Ekosystemets förutsättningar	5
3 Urvalsprocess	6
3.1 Urval 1	6
3.2 Urval 2	7
3.2.1 Bågbro i stål	7
3.2.2 Balkbro i förspänd betong	8
3.2.3 Balkrambro i förspänd betong	9
3.2.4 Snedkabelbro i trä	9
3.2.5 Balkbro i väderbeständigt stål	10
3.2.6 Fackverksbro i stål	11
3.3 Urval 3	12
3.3.1 Kriteriemall	12
3.3.2 Viktning av kriterier	12
3.3.3 Slutligt resultat	13
4 Valt brokoncept	14
4.1 Överbyggnad	14
4.2 Underbyggnad	14
4.3 Detaljer	15
4.4 Produktion	16
4.5 Förvaltning och underhåll	16

5	Beräkningsförutsättningar	18
5.1	Systemmodeller	18
5.2	Laster	18
5.2.1	Uteslutna laster	19
5.2.2	Laster i längsled	19
5.2.3	Laster i tvärläng	19
5.2.4	Vindlast	20
5.3	Lastkombinationer	20
6	Preliminär dimensionering	21
6.1	Lastintensitet	21
6.2	Dimensionering av tvärsnitt	22
6.2.1	Huvudbalkar	22
6.2.2	Tvärbalkar	23
6.3	Temperaturutvidgning	24
7	Diskussion	25
7.1	Urvalsprocessen	25
7.2	Dimensioneringsprocessen	25
7.2.1	Överbyggnad	26
7.2.2	Detaljer	26
7.2.3	Underbyggnad	27
7.2.4	Övriga kontroller	27
7.3	Risikanalyser	27
7.4	Hållbarhet	28
7.5	Källkritik	29
8	Slutsats	30
	Referenser	31
	Bilagor	I
A	Förslagshandling	I
B	Beskrivning av kriterier	II
C	Konstruktionsmaterial	III
C.1	Stål	III
C.1.1	Väderbeständigt stål	III
C.2	Trä	IV
C.3	Betong	IV
D	Konceptuella figurer	VI
E	Modell skala 1:100	VIII
F	Modell skala 1:20	IX

G Grundläggning	XII
H Kranmontering	XIII
I Lastfall längsled	XIV
J Lastfall tvärled	XV
K Koldioxidbesparing vid användning av väderbeständigt stål	XVII
L Bruks- och brottgränstillstånd	XVIII
L.1 Bruksgränstillstånd	XVIII
L.2 Brottgränstillstånd	XIX
M Systemmodeller CALFEM	XXI
N MATLAB beräkning	XXII
N.1 Beräkning längsled	XXII
N.2 Nedböjning längsled	XXVIII
N.3 Tvärled	XXXIII
N.4 Nedböjning tvärled	XLIV
N.5 Vindlast	LIII
N.6 Temperatur	LIV
N.7 Total area på huvudbalkar	LV
O Projekterings-PM	LVI

Figurer

1.1	Karta som visar bronns placering över Rönne å.	1
2.1	Linjeföring av GC-väg.	4
3.1	Modell av bågbro.	7
3.2	Modell av balkbro.	8
3.3	Modell av balkrambro.	9
3.4	Modell av snedkabelbro.	10
3.5	Modell av balkbro.	10
3.6	Modell av fackverksbro.	11
4.1	Konstruktionens lager vid respektive stöd i längsled.	15
5.1	Systemmodell i längsled.	18
5.2	Systemmodell i tvärled.	18
6.1	Slutliga dimensioner på huvudbalkar [mm].	23
D.1	Landfästets tänkta utformning.	VI
D.2	Mittstödet tänkta utformning.	VI
D.3	Bron sedd underifrån.	VI
D.4	Bron sedd ovanifrån.	VI
D.5	Över- och underbyggnad.	VII
E.1	Modell i skala 1:100.	VIII
E.2	Detaljer på bron i skala 1:100.	VIII
F.1	Bild på bron i skala 1:20.	IX
F.2	Detaljer på bron i skala 1:20 ovanifrån.	X
F.3	Bild på bron i skala 1:20 underifrån.	XI
H.1	Exempelbild på kranmontering på tillfälliga stöd.	XIII
I.1	Lastfall 1 i längsled.	XIV
I.2	Lastfall 2 i längsled.	XIV
I.3	Lastfall 3 i längsled.	XIV
I.4	Lastfall 4 i längsled.	XIV
J.1	Lastfall 1 i tvärled.	XV
J.2	Lastfall 2 i tvärled.	XV
J.3	Lastfall 3 i tvärled.	XV
J.4	Lastfall 4 i tvärled.	XV
J.5	Lastfall 5 i tvärled.	XVI
J.6	Lastfall 6 i tvärled.	XVI
J.7	Lastfall 7 i tvärled.	XVI

K.1	Utsläpp av koldioxid vid målning av vanligt stål.	XVII
M.1	Systemmodell för CALFEM i längsled.	XXI
M.2	Systemmodell för CALFEM i tvärlängd.	XXI
N.1	Moment- och tvärkraftsdiagram.	XXVII
N.2	Nedböjning för lastfall 1.	XXX
N.3	Nedböjning för lastfall 2.	XXXI
N.4	Nedböjning för lastfall 3.	XXXII
N.5	Nedböjning för lastfall 4.	XXXII
N.6	Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 1.	XXXVII
N.7	Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 2.	XXXVIII
N.8	Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 3.	XXXIX
N.9	Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 4.	XL
N.10	Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 5.	XLI
N.11	Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 6.	XLII
N.12	Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 7.	XLIII
N.13	Nedböjnings diagram för lastfall 1.	XLVI
N.14	Nedböjnings diagram för lastfall 2.	XLVII
N.15	Nedböjnings diagram för lastfall 3.	XLVIII
N.16	Nedböjnings diagram för lastfall 4.	XLIX
N.17	Nedböjnings diagram för lastfall 5.	L
N.18	Nedböjnings diagram för lastfall 6.	LI
N.19	Nedböjnings diagram för lastfall 7.	LII

Tabeller

3.1	Tabell över möjliga samt valda brokoncept i urval 1.	6
3.2	Kriteriemall.	12
3.3	Viktningsmall.	13
5.1	Beräknade laster som verkar på balkarna i bron, multiplicerade med ogynnsamma koefficienter.	20
6.1	Beräknade dimensionerande krafter i längsled	21
6.2	Beräknade dimensionerande krafter i tvärled	21
6.3	Resultat av beräkningar i längsled.	22
6.4	Resultat av beräkningar i tvärled.	24
L.1	partialkoefficienter och reduktionsfaktorer i bruksgränstillstånd. . . .	XIX
L.2	partialkoefficienter och reduktionsfaktorer i brottgränstillstånd. . . .	XX

1 Inledning

Otillgänglig terräng kan utgöra hinder för framkomlighet och en lösning på ett sådant problem kan vara väl utförd infrastruktur. Broar är exempel på konstruktioner som förbinder otillgängliga platser. Broprojektering innebär alltså stora möjligheter för samhället och utgör en viktig del av dess utveckling. I detta projekt tas ett brokoncept fram med målet att förbinda ett bostadsområde med ett naturreservat i Ängelholm. Konstruktionen följer beställarens krav samt samhällets intressen med avsikt att göra området mer tillgängligt och därmed naturnära för områdets invånare.

1.1 Bakgrund

Ängelholm är en tätort i Skåne och genom orten ringlar Rönne å. Staden växer och är i ständig utveckling för att bli mer attraktiv. I dagsläget finns det en gång- och cykelväg som går genom Nybroskogen och för att göra passagen komplett ska en bro byggas över ån. Denna bro ska förbinda Nybroskogen med bostadsområdet Haradal på andra sidan ån, vilket kan ses i figur 1.1.



Figur 1.1: Karta som visar brons placering över Rönne å (Ängelholms Kommun, u. å). Återgiven med tillstånd.

I grunden har konsultföretaget COWI fått i uppdrag att designa och konstruera denna passage och i verkligheten är uppdraget redan färdigställt och en bro är byggd. Företaget har i efterhand tillsammans med Chalmers tekniska högskola utformat detta kandidatarbete där ett alternativt brokoncept ska tas fram. Då bron redan är byggd har en del information krypterats för att ge utrymme åt nya idéer och tankar. Gruppen har därför behövt göra egna antaganden, grundade i uppgiften och informationen given från COWI.

1.2 Syfte

Syftet är att dimensionera ett optimalt brokoncept i avsikt att ge de boende närhet till naturen. Arbetet ska grunda sig i en iterativ metodik och beräkningar för att generera en konstruktion som är hållfast och gynnsam för det angivna området.

1.3 Problembeskrivning

Projektet avser en gång- och cykelbro som ska sträcka sig mellan ett bebyggelseområde och ett naturreservat i Ängelholm. Arbetet är baserat på det förslag som tillhandahållits av COWI. Förslagshandlingen finns tillgänglig i bilaga A. Brobyggnationen ska ge de boende i Hardal bättre tillgång och närhet till naturen. Enligt förslagshandlingen har bron en total längd på 90 meter och vägbanans bredd samt fria höjd är fastställd till minst tre meter (COWI, 2022).

1.4 Avgränsningar

För att minska arbetsbelastningen samt komplexiteten under projektets gång har vissa faktorer försumrats; områden som avgränsats är ekonomi, geoteknik och tidsåtgång. Enligt uppgiften finns inga ekonomiska begränsningar givna och krav gällande kalkyl finns ej. De ekonomiska aspekterna har dock fortfarande beaktats och rimlighetsbedömts. Gällande geoteknik så har kvalificerade bedömningar gjorts kring grundläggningen utifrån förutsättningar i COWI:s material, se bilaga O. Där emot har inga beräkningar utförts. Eftersom bron inte ska upprättas och därmed inte har någon projekt- eller slutförändetid har gruppen bedömt att tidsaspekten är irrelevant för detta projekt.

1.5 Metod

Kandidatarbetet utfördes i form av två delar: den första delen innefattade en förstudie och den andra delen behandlade dimensioneringen av brokonceptet. Fokus lades på tre olika delar och roller som ansågs vara viktiga i ett broprojekt: beställare, produktion samt förvaltning. Målet var att generera ett koncept som tog samhällets intressen i beaktning, hade en genomförbar produktionsmetod samt rimliga underhållsförhållanden.

Arbetsprocessen inleddes med en förstudie där en urvalsprocess användes som grund för valet av ett lämpligt brokoncept. Därefter genomfördes en preliminär dimensionering för utvecklandet av en bro med en teknisk livslängd på 80 år, enligt beställarens krav.

1.5.1 Förstudie

I förstudien definierades prioriteringar i form av urvalskriterier, dessa utvärderades och viktades sedan mot varandra för att skapa en tydlig målbild. Kriterierna baserades på en sammanställning av information gällande förutsättningar, avgränsningar och möjligheter. Slutmålet var att välja ett brokoncept att gå vidare med. Förstudierna skedde i följande steg:

1. Sammanställning av information.
2. Målformulering: Kriterier togs fram för att definiera vad bron skulle uppfylla samt vad som skulle prioriteras.
3. Intuitivt skede: Flera alternativ på brokoncept togs fram.
4. Utvärdering: De alternativa koncepten viktades mot varandra.
5. Val av ett brokoncept.

1.5.2 Dimensionering av valt brokoncept

Denna del av arbetet involverade en konceptuell dimensionering av det valda förslaget. Brokonceptet optimerades genom en iterativ och omprövande process, beskriven nedan. Detta genomfördes för att den mest optimala konstruktionen utifrån arbetets målbild skulle uppnås. Dimensioneringsprocessen utfördes i följande steg:

1. Detaljutformning och dimensionering: Beräkningar och en mer detaljerad utformning av bron genomfördes.
2. Utveckling: Avancerad analys med modifieringar för att uppnå bästa möjliga resultat.
3. Utvärdering: Kriterierna jämfördes ytterligare och konceptet optimerades.

1.6 Samhälleliga och etiska aspekter

I ett broprojekt är såväl samhälleliga som etiska aspekter viktiga att beakta. För en sådan analys kan begreppet hållbar utveckling vara relevant och utgöra en bra bedömningsgrund. Hållbar utveckling omfattar tre huvuddimensioner: social, ekonomisk och ekologisk hållbarhet. Social hållbarhet innebär att demokratiska principer och rättvisa inte ska äventyras. Den ekonomiska dimensionen syftar till att främja ekonomisk tillväxt på ett långsiktigt sätt medan den ekologiska hållbarheten fokuserar på bevarandet av biologisk mångfald och att undvika miljöförstörelse.

I denna rapport diskuteras det färdiga brokonceptet ur ett hållbarhetsperspektiv, där alla tre dimensioner analyseras översiktligt, se delkapitel 7.4. Detta tillvägagångssätt syftar till att ge en mer omfattande konsekvensanalys som kan bidra till en tydligare förståelse av de effekter som gruppens designval kan ha på samhället, ekonomin och miljön.

2 Förutsättningar

COWI har tillhandahållit krav och geotekniska förutsättningar för den aktuella platsen. Nedan beskrivs det mest relevanta innehållet samt gruppens bedömningar utifrån materialet.

2.1 Beställarens önskemål och krav

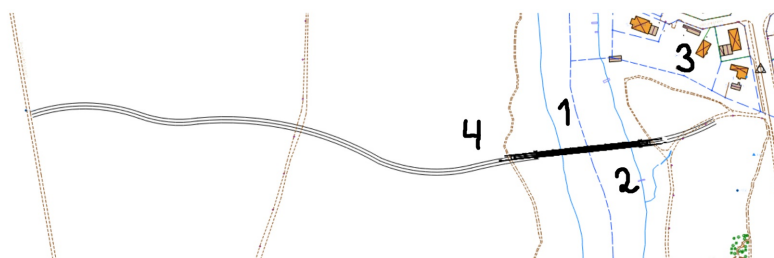
Detta är en fiktiv konstruktion vilket innebär att beställarens önskemål och krav inte stämmer helt överens med vad som vanligtvis gäller i verkliga projekt. Som tidigare nämnt är den ekonomiska aspekten viktig inom infrastruktur, men i detta projekt har beställaren värderat andra aspekter så som bron gestaltning och miljöpåverkan högre. Samma sak gällande tidsaspekten som inte heller beaktas. Beställarens krav och prioriteringar framgår i en viktningsmall, se avsnitt 5.3.

2.2 Konstruktionens förutsättningar

Bron ska ha en spännvidd på 90 meter och vägbanans bredd och nivå över högsta vattennivå är fastställd till minst tre meter vardera (COWI, 2022). Bron anpassas för gång- och cykeltrafik och behöver därmed uppfylla en dimensionerande trafiklast på 3.6 kN/m^2 , beräknad enligt ekvation 5.1. Konstruktionen ska dimensioneras för en livslängd på 80 år och dessutom är det endast tillåtet med ett stöd i vattnet. Slutligen anges en radie på bron, bestämd till 875 meter, samt en fri höjd på minst tre meter (COWI, 2022), se bilaga A. Figur 2.1 visar en preliminär linjeföring av gång- och cykelvägen.

2.3 Geografiska förutsättningar

Skogen i omgivningen består till största delen av lövskog (COWI, 2022). Slänterna ner mot vattnet är relativt branta, där den västra slänten är något brantare än den östra, se bilaga A och O. Brofästet på den östra sidan är beläget på ungefär +6 meter och den västra på +3-4 meter. Marken där brofästena planeras sitta är relativt platt. Vägarna i anslutning till samhället kan utnyttjas för transporter under byggnation, se figur 2.1.



Figur 2.1: Linjeföring av GC-väg (COWI, 2022). 1: Rönnå som bron ska byggas över, 2: Planerad placering av bro, 3: Bostadsområde, 4: Stig i naturreservat.

2.4 Geotekniska förutsättningar

I området har förstudier utförts för att erhålla vetskap gällande områdets geotekniska förutsättningar. Förstudierna visar på en jordlagerföljd bestående av svämsediment, lera, friktionsjord samt morän (COWI, 2022). Tjockleken på svämsedimentet är 1 till 2 meter på östra sidan och 0.3 meter på den västra, se bilaga O. Leran under har en mäktighet mellan 6 till 9 meter och enligt sonderingarna är den överkonsoliderad vilket innebär att den inte är lika känslig för sättningar som lera i många fall kan vara. Friktionslagret under detta varierar i mäktighet mellan 0.5 och 2.5 meter och underföljs av morän ner till ett djup på ungefär 30 meter. Mer om grundläggning på denna marktyp kan läsas om i bilaga G.

2.5 Ekosystemets förutsättningar

Då bron ska passera över ett vattendrag behöver ekosystemets förutsättningar beaktas. Gruppen har bedömt att vattendraget är en vattentäkt för djurliv samt att det vistas människor i området, men att det inte förekommer någon vandringsfisk. Vid byggnation som kan påverka dricksvatten finns det flera risker att analysera: geologiska utredningar om markens egenskaper, analys av potentiell påverkan från användning av mark- och vattenområden samt översvämningsutredningar (Boverket, 2024).

Enligt instruktioner från COWI (Personlig kommunikation, 2 februari 2024) så erhåller miljön korrosivitetssklass C4 vilket innebär att salter och luftföroreningar förekommer i måttliga mängder i atmosfären (Svensk Byggtjänst, 2004).

Enligt Jan Sandberg (Personlig kommunikation, 22 februari 2024) behöver egentligen Länsstyrelsen kontaktas för att genomföra en korrekt miljöbedömning, detta eftersom de har ansvar för området. Länsstyrelsen ska i sin tur fatta ett beslut om en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) ska upprättas eller inte. När en MKB skickas in till länsstyrelsen ska det framgå om det finns några specifika miljökonsekvenser vid byggnation i vattendraget. När MKB:n är granskad fås information om rådande vattenresurstillgång och vilken miljöbestämning det är som gäller.

3 Urvalsprocess

I detta kapitel presenteras den urvalsprocess som användes för att ta fram det lämpligaste brokonceptet. Urvalsprocessen bestod av tre delar: I det första urvalet valdes broar med passande koncept från trafikverkets handbok BATMAN (Trafikverket, 2014). I det andra urvalet utvärderades dessa baserat på spännvidd, komplexitet och ekonomi. Utifrån andra urvalet utsågs sex brokoncept vars detaljer analyserades mer ingående utifrån utseende och verkningssätt. I det tredje urvalet användes en viktningssmall som till slut genererade ett slutligt brokoncept.

3.1 Urval 1

I det första urvalet listades vanligt förekommande broar tillsammans med byggnadsmaterial, se tabell 3.1. Byggnadsmaterialen trä, stål samt betong kan läsas mer om i bilaga C. Konzepten valdes ut om den tekniskt möjliga spännvidden angiven i BATMAN (Trafikverket, 2014) uppfyllde COWI:s krav på 90 meter med ett stöd, se bilaga A. Dessutom gallrades brokoncept bort via utvärdering av dess komplexitet under både projektering och byggnation, samt hurvida kostnaden förhöll sig gentemot de andra alternativen.

Brotyp	Typ av material	Spännvidd [m]	>45 m (möjligt?)	Kommentar	Valda brokoncept
Bågbro	Trä	>25		Uppfyller ej krav på spännvidd	
	Stål	100	x		x
	Betong	100	x	Hög komplexitet	
Balkrambro	Betong	30		Uppfyller ej krav för spännvidd	
	Förspänd betong	50	x		x
Hångbro	Trä	1200	x	Byggs oftast för större spännvidder	
	Stål	1200	x	Byggs oftast för större spännvidder	
	Betong	1200	x	Byggs oftast för större spännvidder	
Snedkabelbro	Trä	>50	x		x
	Stål	410	x	Ej ekonomiskt gynnsam	
	Betong	410	x	Ej ekonomiskt gynnsam	
Balkbro	Trä	30		Uppfyller ej krav för spännvidd	
	Stål	80	x		x
	Betong	25		Uppfyller ej krav för spännvidd	
	Förspänd betong	200	x		x
fackverksbro	Stål	100	x		x
	Trä	30		Uppfyller ej krav för spännvidd	
Knislingebro	Stål	40		Uppfyller ej krav för spännvidd	

Tabell 3.1: Tabell över möjliga samt valda brokoncept i urval 1.

3.2 Urval 2

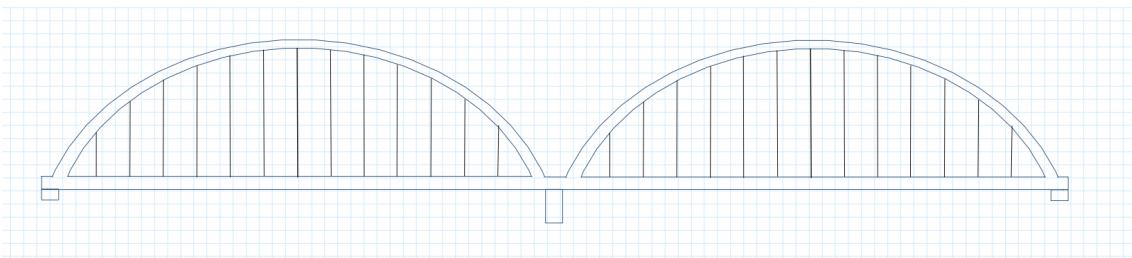
De återstående brokoncepten från tabell 3.1 i kolumnen ”Valda brokoncept” gick vidare till andra urvalet. De sex valda brokoncepten utvecklades ytterligare med avsikt att möjliggöra en jämförelse dem emellan och därigenom undvika förhastade slutsatser om vilket brokoncept som var bäst lämpat. Brokonceptens utseende och verkningsätt beskrivs nedan.

3.2.1 Bågbro i stål

Bågbroar i stål är kända för sin imponerande design och hållbarhet. De består av bågar som är sammanlänkade med tvärbalkar och förbundna med vertikala stänger eller linor för att fördela lasterna till bågar, se figur 3.1 (Trafikverket, 2014). Denna konstruktion tillåter spännvidder upp till 260 meter utan behov av mittstöd, vilket gör den särskilt lämplig för att överbrygga breda vattendrag.

En bågbro i stål erbjuder inte bara funktionell hållbarhet utan även estetiska fördelar (Trafikverket, 2022). Med sin slanka och eleganta design kan den bli ett landmärke i miljön och skapa en visuell attraktion för både lokalbefolkningen och besökare. Dessutom ger stålets flexibilitet möjlighet till en varierad utformning och kreativ design. Genom att integrera konstnärliga och estetiska element kan bågbroar i stål bli mer än bara en del av infrastrukturen - de kan också utgöra en del av samhällets identitet och stolthet.

För att minimera materialåtgången och dimensionerna på stängerna och bågar, hade ett stöd kunnat placeras i mitten av bron. Detta hade lett till två efterföljande bågar, var och en med en spännvidd på 45 meter, se figur 3.1. Genom att införa detta stöd hade bron kunnat byggas med mindre komponenter samtidigt som dess strukturella stabilitet säkerställdes.

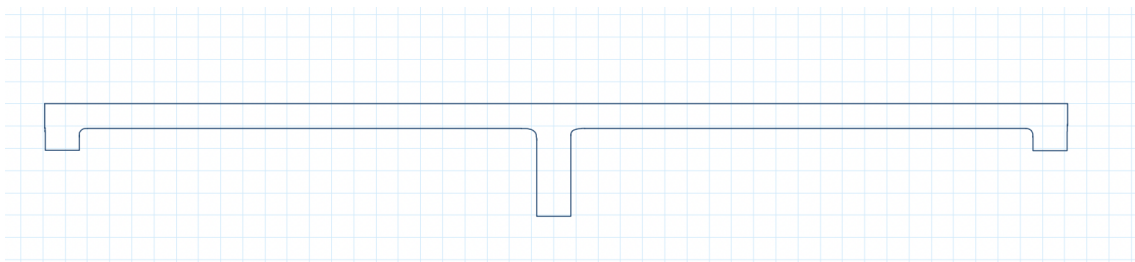


Figur 3.1: Modell av bågbro.

Under byggprocessen prefabriceras de olika komponenterna i fabriken för att garantera hög kvalitet och effektivitet. Därefter monteras de på plats och fästs för att skapa den slutliga konstruktionen (Trafikverket, 2022a). Ett noggrant korrosionsskyddssystem krävs för att skydda bron från väder och vind under dess livslängd, vilket innefattar regelbunden underhållsmålning och inspektion av konstruktionen (Trafikverket, 2022a).

3.2.2 Balkbro i förspänd betong

Balkbroar i förspänd betong är en viktig del av dagens brobyggnadsteknik och har många fördelar. Några av fördelarna är att de kan ha längre spännvidder, kräver mindre konstruktionsdimensioner och deformeras även mindre jämfört med traditionella betongelement utan förspänning. Det krävs däremot mer omfattande beräkningar för förspända balkar än för icke-förspända betongelement. Vanligtvis kan balkbroar i betong ha spännvidder upp till 25 meter, medan förspända balkbroar kan sträcka sig över 150 meter (Trafikverket, 2014). En balkbro i förspänd betong utgörs av huvudelement i form av betongbalkar som sträcker sig över ett spann. Dessa bärs upp av antingen fundament, integrerade landfästen eller pelare i olika former, se figur 3.2.



Figur 3.2: Modell av balkbro.

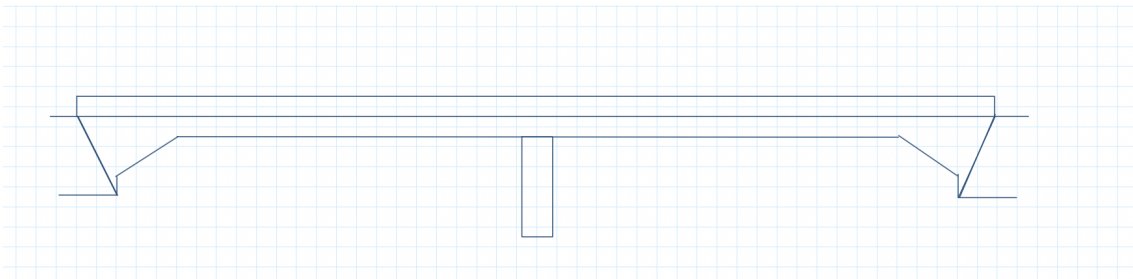
Idén bakom förspända betongelement är att en kraft appliceras på strukturen under tillverkningsprocessen genom spännkablar som sträcks ut tills en förutbestämmd spänning uppstår. Metoden ger extra styrka åt strukturen vilket resulterar i lång hållbarhet, motståndskraft mot korrosion samt minskat underhållsbehov. Denna typ av konstruktion används ofta inom väg- och järnvägsinfrastruktur för korta till medellånga spännvidder. Deras flexibilitet möjliggör anpassning för olika geometriska former och lastkrav, vilket gör dem passande för olika projektbetingelser och plats-specifika krav (Broo, 2024).

Vid långa spännvidder är det vanligt att balkar designas med antingen låd- eller T-tvärsnitt. Balkarna kan gjutas på plats men är ofta prefabricerade, vilket innebär en flexibel produktionsmetod som optimerar både kvalitet och tidsåtgång. I detta fall är spännvidden 45 meter och gör att transporten av prefabricerade balkar till byggplatsen blir komplicerad. En sådan transport kräver ansökan om undantag samt utförande av väganalys och planering av transportutrustning inklusive specialfordon och kvalificerade team (Sveriges Kommuner och Regioner, 2023). Ett möjligt och bättre alternativ i detta scenario kan vara att etablera en temporär byggplats vid sidan om broplatsen där balkarna prefabriceras och monteras senare.

Byggandet av bron kan också göras med två närliggande balkar per spännvidd. Genom att ha en bredd på 1.5 meter per balk säkerställs att den angivna bredden för bron är 3 meter. Detta gör det möjligt att undvika behovet av temporära ställningar vid gjutning av plattan över balkarna.

3.2.3 Balkrambro i förspänd betong

De mest elementära delarna av en balkrambro utgörs av en brobana uppbyggt av en eller flera balkar (Trafikverket, 2014), se figur 3.3. Balkarna kan i sin tur vila på antingen pelare eller skivor där armeringen går kontinuerligt över alla stöd. Vid ändstöden placeras en frontmur som har till uppgift att ta upp de krafter jordmassorna genererar samt att göra bron mer styv i sidled (Trafikverket, 2014). Gällande grundläggning är de vanligaste metoderna platta på mark eller pålning. Med förspänd betong som byggnadsmaterial kan en spännvidd på 50 meter uppnås (Trafikverket, 2014). Vanligtvis används balkrambron då plattrambrons egenskaper anses som otillräckliga eller när en balkbro innebär en överdimensionering. Gjutning av balkar och brobana kan antingen ske på plats eller i fabrik i form av prefabricerade element. Med större spännvidder innebär prefab material komplicerade transporter med långa balkar som måste innehålla kontinuerlig armering.

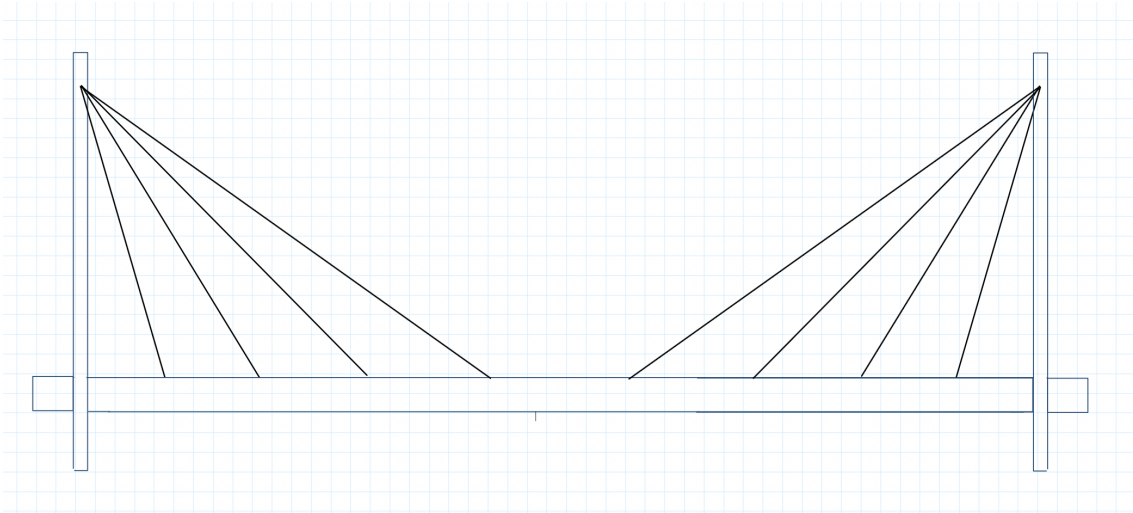


Figur 3.3: Modell av balkrambro.

3.2.4 Snedkabelbro i trä

Snedkabelbroar har blivit en allt mer vanlig brotyp för stora spännvidder, konkurrerande med traditionella fackverksbroar, bågbroar och hängbroar (Trafikverket, 2022a). En snedkabelbro är särskilt lämplig när behovet av långa spännvidder uppstår på grund av faktorer som underliggande farleder, vattendjup eller grundläggningsförhållanden (Trafikverket, 2022a).

Den typiska strukturen för en snedkabelbro inkluderar kablar, pyloner och förstyrningsbalk (brobana), se figur 3.4. Kablarna bär enbart dragkrafter medan pylonerna utsätts för stora tryckkrafter (Trafikverket, 2022a). De olika systemen för att arrangera kablar påverkar broarnas estetik och konstruktionskomplexitet. Solfjäderformen, halv-solfjäderformen och harpliknande formen erbjuder olika fördelar och utmaningar beroende på spännvidd och antal kablar (Trafikverket, 2022a). Pylonernas utformning varierar och kan göras av betong eller stål beroende på brostorlek och krav (Ronnerbrant & Glans, 1996). Själva brodäcket kan vara i trä eller en samverkanskonstruktion mellan stål och trä för att minska den resulterande egenvikten.



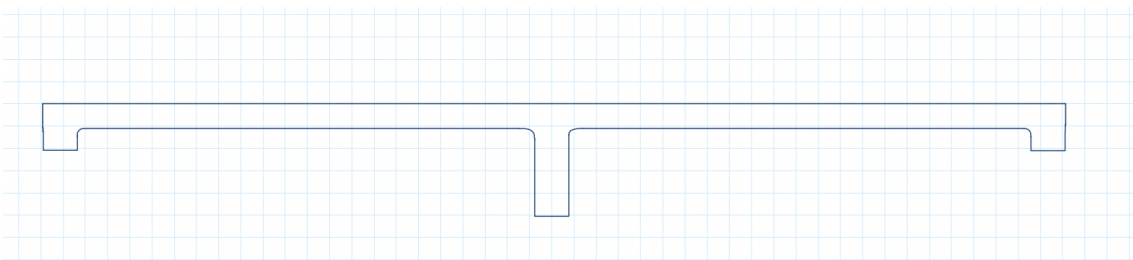
Figur 3.4: Modell av snedkabelbro.

Snedkabelbroar utformas för att klara egenvikten som den dominerande lasten (Trafikverket, 2022a). Detta för att möjliggöra byggnad utan ställning och för att säkerställa självförankring i varje byggskede.

Under senare år har snedkabelbroar utvecklats med fler kablar och mindre centrumavstånd, vilket möjliggör ännu större spännvidder (Ronnerbrant & Glans, 1996). Bron i detta fall valdes att vara i ett spann, alltså utan behov av stöd i mitten, se figur 3.4.

3.2.5 Balkbro i väderbeständigt stål

Balkbron består av två spann på 45 meter vardera där stålbalkar och stålplåt kommer att användas för brodäcket och övriga konstruktionsdelar, se figur 3.5. Verknings sättet är samma som för balkbron i förspänd betong, vilket står beskrivet i kapitel 3.2.2.

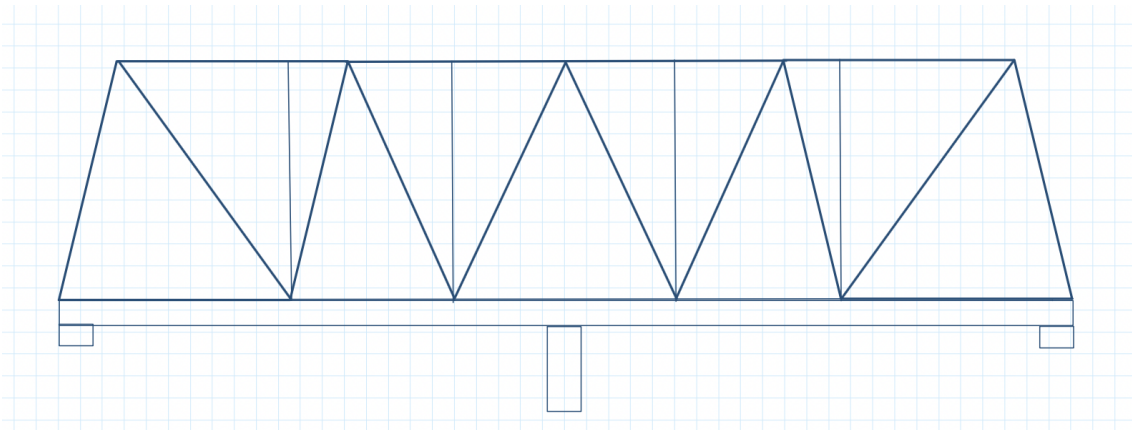


Figur 3.5: Modell av balkbro.

För att minimera byggtiden på plats kan bron prefabriceras i moduler. Detta möjliggör en effektiv och miljövänlig montering av bron. Eftersom VS är ett återvinningsbart material kan bron demonteras och återvinnas när dess livslängd är slut (SSAB, u. å). Dessutom ger den mörka rostbruna ytan på VS bron en vacker och naturlig estetik som smälter väl in i omgivningen.

3.2.6 Fackverksbro i stål

Fackverksbroar i stål är en alternativ lösning för att övervinna långa spännvidder med minimalt antal stöd. Denna brotyp utgörs av en komplex struktur där sammankopplade stänger och balkar effektivt fördelar lasten över bron. Enligt Trafikverket (2014) konstrueras fackverksbroar vanligtvis i spann mellan 50 och 100 meter och kan vara enkelspända eller flerspända. För att minska dimensioner på stänger och balkar och därmed materialåtgången appliceras ett stöd i mitten av bron, vilket resulterar i två spännvidder på vardera 45 meter, se figur 3.6.



Figur 3.6: Modell av fackverksbro.

En av de betydande fördelarna med fackverksbroar är deras möjlighet till hög grad av prefabricering och snabb montering på plats, vilket effektiviserar byggprocessen och minskar störningar på omgivningen (Ronnerbrant & Glans, 1996). Fackverken tillverkas vanligtvis i fabrik och transporteras sedan till byggplatsen, där de svetsas samman och lyfts på plats med hjälp av kranar (Mohammad Al-Emrani, Personlig kommunikation, 2024).

Stål är det primära materialet som används för fackverkskonstruktioner på grund av dess höga hållfasthet både i drag och tryck (Trafikverket, 2014). Dock medför stål höga kostnader för underhåll och korrosionsskydd, vilket har begränsat användningen av fackverksbroar till främst gång- och cykelbroar samt tillfälliga broar (Ronnerbrant & Glans, 1996). För att motverka korrosion och säkerställa broarnas långsiktiga hållbarhet krävs regelbunden underhållsmålning av stålkonstruktionerna (Trafikverket, 2022a).

3.3 Urval 3

I det tredje urvalet togs ett slutligt brokoncept fram med hjälp av en viktningssmall. Utvärderingen och de olika kriteriernas viktningssprocent baserades på en kriteriemall som följde den målbild och krav som formulerats under förstudien. Mallen skapades genom en iterativ process för att få fram de mest relevanta och utslagsgivande kriterierna. De sex kvarvarande brokoncepten från andra urvalet viktades mot varandra i tabell 3.3 där ett slutligt brokoncept sedan korades.

3.3.1 Kriteriemall

För att kunna vikta olika brokoncept mot varandra togs åtta kriterier fram, dessa är beskrivna i bilaga B. I grunden utgick kriterierna från de tre kategorierna projektering, produktion och förvaltning. Miljöpåverkan och ekonomi ansågs dock för breda för att kunna placeras in under en av dessa kategorier och därför tillämpades även en allmän kategori. Kravet var att kriterierna skulle kunna användas för att jämföra olika broar, och inte väga lika tungt för de möjliga brokoncepten. Av denna anledning uteslöts de kriterier som ansågs likvärdiga, oavsett brotyp. Något som diskuterades under processen var arbetsmiljöfaktorn, men då denna ansågs lika viktig oavsett brokoncept så tillämpades kriteriet inte i mallen. Arbetsmiljön är en fundamental aspekt som säkerställs och garanteras genom lagstiftning. Den utgör vanligtvis en central komponent som etableras och utvecklas av företag och organisationer. Följaktligen är det en parameter som inte kan ifrågasättas och därför uteslöts den som ett kriterium.

3.3.2 Viktning av kriterier

Viktningen mellan två kriterier gjordes med ett betygssystem med poäng mellan ett till tre. Betyget "1" avsåg att kriteriet var mindre viktigt i förhållande till det andra kriteriet. Betyget "2" avsåg att de var lika viktiga och "3" att det ena var viktigare, se tabell 3.2. De olika kriterierna fick utifrån detta system ett visst antal poäng. Denna dividerades med totalpoängen för att få fram en procentsats som beskriver hur viktiga de olika delarna bedöms vara. Resultatet av denna viktning användes för att jämföra de olika brokoncepten mot varandra.

Kategori	Kriteriet	Kriterier vs kriterier								Poäng	Ranking	Viktning [%]
		1	2	3	4	5	6	7	8			
Allmänt	Miljöpåverkan	1	3	3	2	2	3	3	2	18	1	16,1
	Ekonomi	2	1	1	3	3	3	2	3	16	2	14,3
Projektering	Gestaltning	3	1	3	2	1	3	2	1	13	5	11,6
	Komplexitet	4	2	1	2	2	3	3	2	15	3	13,4
Produktion	Produktionsteknik	5	2	1	3	2	3	1	2	14	4	12,5
	Produktionstid	6	1	1	1	1	1	1	1	7	6	6,3
Förvaltning	Inspekterbarhet	7	1	2	2	1	3	3	2	14	4	12,5
	Underhåll	8	2	1	3	2	2	3	2	15	3	13,4
Summa:										112		100,0

Tabell 3.2: Kriteriemall som används för att vikta olika kriterier mot varandra.

3.3.3 Slutligt resultat

De sex brokoncepten bedömdes var för sig utifrån de åtta kriterierna i ett slutgiltigt urval. Varje betyg multiplicerades med den procentandel som kriteriet erhöll under viktningsprocessen. Detta genererade ett nytt procentuellt värde för varje brokoncept med avseende på de olika kriterierna, se tabell 3.3. Procentvärdena sammanställdes så att varje bro erhöll ett slutligt viktvärde, där den bro med högst summa blev det valda brokonceptet.

Kategori	Kriteriet	Viktning [%]	Bågbro, Stål		Balkrambro, förspänd betong		Snedkabelbro, trä		Balkbro, värdebeständig stål		Balkbro, förspänd betong		Fackverksbro, Stål	
			Betyg (1-3)	Viktat värde	Betyg (1-3)	Viktat värde	Betyg (1-3)	Viktat värde	Betyg (1-3)	Viktat värde	Betyg (1-3)	Viktat värde	Betyg (1-3)	Viktat värde
Allmänt	Miljöpåverkan	16,1	2	0,32	1	0,16	3	0,48	3	0,48	1	0,16	2	0,32
	Ekonomi	14,3	2	0,29	2	0,29	1	0,14	2	0,29	3	0,43	2	0,29
Projektering	Gestaltning	11,6	3	0,35	1	0,12	3	0,35	2	0,23	1	0,12	2	0,23
	komplexitet	13,4	2	0,27	2	0,27	3	0,40	1	0,13	1	0,13	2	0,27
Produktion	Produktionsteknik	12,5	1	0,13	2	0,25	1	0,13	3	0,38	2	0,25	2	0,25
	Produktionstid	6,3	2	0,13	3	0,19	2	0,13	3	0,19	3	0,19	1	0,06
Förvaltning	Inspekterbarhet	12,5	1	0,13	2	0,25	1	0,13	3	0,38	2	0,25	2	0,25
	Underhåll	13,4	2	0,27	1	0,13	1	0,13	3	0,40	1	0,13	2	0,27
	Summa	100,0		1,87		1,65		1,88		2,47		1,66		1,94

Tabell 3.3: Viktningsmall. De kvarvarande brokoncepten har betygsatts utifrån kriteriemallen och fått ett betyg mellan 1 till 3.

4 Valt brokoncept

Enligt urvalsprocessen är det valda brokonceptet en balkbro i väderbeständigt stål. Nedan beskrivs bron utseende mer detaljerat i form av dess överbyggnad, underbyggnad samt detaljer. Exakta dimensioner beskrivs i kapitel 6. Dessutom beskrivs produktionsmetoden samt hur bron ska förvaltas och underhållas.

4.1 Överbyggnad

Överbyggnaden inkluderar bron huvudbärverk som utgörs av tre stycken balkar i väderbeständigt stål. Ovanpå huvudbärverket vilar träbalkar med ett avstånd på 60 centimeter (Träguiden, 2019-10-22). Dessa dimensioneras i limträ då materialet har bättre hållfasthet än konstruktionsvirke av samma storlek (Ågren, 2017). Bron kommer att luta något eftersom den enligt förslagshandlingen ska ha en radie på 875 meter, se bilaga A. Detta är fördelaktigt då det medför minskad vattenansamling på bron, vilket innebär längre livslängd och även mindre underhåll av träbanan. Ett impregnerat slitplank ska placeras som farbana för att göra bron mer estetiskt tilltalande men även för att förbättra vattenavrinningen.

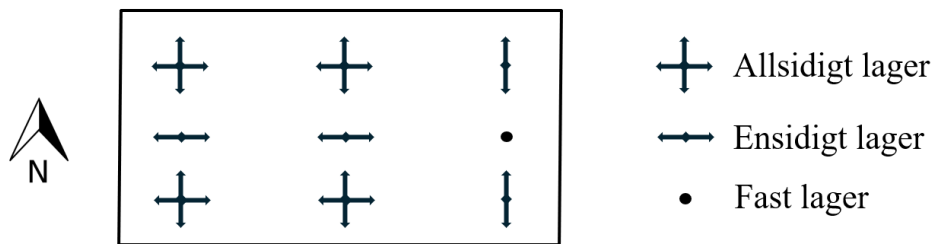
För att transportera de horisontella krafter som verkar på bron, exempelvis vindlast, appliceras korsstag, se figur D.3. Dessa består av smala upp och nedvända L-balkar satta i form av kryss mellan huvudbalkarna. För att motverka vippning, att huvudbalkarna böjer ut i sidled, appliceras även tvärbalkar med I-tvårsnitt mellan huvudbalkarna (Al-Emrani m. fl., 2013). Resultatet av dessa är att den kritiska lasten för vippning inte längre blir dimensionerande (Al-Emrani m. fl., 2013). På huvudbalkarna placeras även avstyvningar med ett mellanrum på två meter, se figur 6.1. Syftet med dessa är att skapa ett större motstånd mot skjuvbuckling (Al-Emrani m. fl., 2020).

4.2 Underbyggnad

Bron underbyggnad utgörs av ändstöd och en betongpelare som sträcker sig upp till överbyggnaden på mitten av bron. Ändstöden, se figur D.1, är i form av lättare fundament vilket leder till att majoriteten av den vertikala lasten på bron kommer att bäras av mittpelaren i vattnet. Pelaren är utformad med Y-tvårsnitt, se figur D.2.

4.3 Detaljer

Över- och underbyggnaden är sammanbundna genom lager vars funktion är att uppta samt överföra krafter och rörelser (AB, u. å). Det finns varianter av lager som tillåter rörelser i olika riktningar. Dessa är fast lager, allsidigt lager samt ensidigt lager (AB, u. å). Det bäst anpassade lagret för det valda brokonceptet bedöms vara av typen TOBE potlager (Personlig kommunikation, COWI). I figuren 4.1 visas lagerkombinationen för bron. Denna kombinationen tillåter utvidgning bland annat på grund av temperaturförändringar, utan att onödiga och påfrestande spänningar skapas vid mittpelaren.



Figur 4.1: Figuren visar vilka lager som används vid konstruktionens tre stöd i längsled, som kan ses i figur 5.1. De två vänstra visar rullstödens lager för respektive balk medan den högra visar triangelstödet lager för respektive balk.

Räcket på bron består av stolpar inklusive överliggare och dessa ska precis som huvudbalkarna vara i väderbeständigt stål. Mellan räcket stolpar fästs horisontella vajrar och med jämna mellanrum är dessa ersatta av en platt skiva med en utskuren prästkrage. Detta förväntas ge bron en mer estetiskt tilltalande och unik design med koppling till Ängelholm; prästkragar är Skånes landskapsblomma. Då bron går över en å krävs en räckeshöjd på 1.4 meter (Trafikverket, 2022b). För att säkerställa säkerheten för de som vistas på bron så kommer det även placeras en genomskinlig plastskiva framför vajrarna. Räckena är tänkta att fästas på utsidan av de tvärgående limträbalkarna. De ska monteras med hjälp av bultar för att undvika breddning av farbanan.

Balkarna som bär upp bron kan endast transporteras i spann om maximalt 12 meter (Sveriges Kommuner och Regioner, 2023), vilket innebär att det krävs flera etapper av balkar för att nå den önskade spannvidden. Skarvarna bör placeras där balken erhåller minst moment för att förhindra extra påfrestningar. Balkdelarna kommer från början att ha ett fastsvetsat förband av formen kälsvets i ena änden. Andra änden har förband i form av bultar och balkdelarna kommer därmed att bultas ihop med varandra på byggplatsen. Detta är fördelaktigt ur ett arbetsmiljöperspektiv eftersom svetsning sker under bättre förhållanden i fabrik och det enbart krävs bultning ute på arbetsplatsen.

4.4 Produktion

Produktionsprocessen inleds med att maskiner och arbetsbodar transporteras till byggplatsen. En temporär väg behöver anläggas i naturreservatet för att ge framkomlighet åt en lyftkran, den ska i ett senare skede lyfta bron på plats. Därefter inleds byggnationen med pålning för att förstärka marken vid landfästen och stöd. Detta diskuterats vidare i bilaga G. Efter pålningen gjuts betongpelarens grund som ska stå i vattnet. Detta sker med hjälp av en pråm från land ut till vattnet. Betongpumpen kommer på detta sätt kunna stå på land och enbart en slang vilar på pråmen. Resterande del av pelaren prefabriceras och monteras efter det att grunden är gjuten.

Brons huvudbalkar är som tidigare nämnt prefabricerade och kommer därmed enbart behöva skarvas ihop med bultförband på byggplatsen. När huvudbalkarna har satts ihop i två delar på vardera 45 meter, lyfts dessa ut från respektive sida av ån. Detta ska ske med hjälp av två lyftkranar, läs mer om bakgrunden till val av metod samt processen i bilaga H. När mittpelare samt huvudbalkarna är klara konstrueras de sista detaljerna i form av träbalkar, slitplank och räcke. Brobanans limträbalkar bultas fast på huvudbalkarna och slitplanket spikas fast ovanpå. Räcket förankras med hjälp av bultar på limträbalkarna. När de slutgiltiga detaljerna är monterade och konstruktionen kontrollerad är bron redo att användas.

4.5 Förvaltning och underhåll

För att bron ska behålla sin bärförmåga och se välbehållen ut bör den inspekteras och förvaltas med jämna mellanrum. Bron dimensioneras för en livslängd på 80 år och det kommer därmed krävas underhåll då utomhusmiljön sliter på konstruktionen. Då bron består av olika material så kräver detta olika slags underhåll. Konstruktionen kräver även ett underhåll på en global nivå och inte endast utifrån de enskilda materialen. Brons säkerhet får inte äventyras och därmed behöver de enskilda komponenterna samverka och fungera i sin helhet.

Väderbeständigt stål bygger upp ett skyddande lager när det rostar, läs mer om detta i bilaga C. Jämfört med vanligt stål som behöver målas så innebär materialvalet mindre underhållsbehov vilket också är fördelaktigt i miljösyfte. I bilaga K.1 presenteras en lättare beräkning av hur mycket koldioxid som besparas vid användning av VS.

Brobanans limträbalkar det överliggande slitplanket löper en betydande risk för mögelbildning och röta (Ågren, u. å-a). Jämfört med stålkomponenter så kräver brobanan fler inspektioner och ett mer omfattande underhåll. Under brons livslängd kommer brobanan behöva bytas ut med jämna mellanrum, hur ofta beror på mängden underhåll samt det omgivande klimatet. Slitplanket utsätts för mer slitage än limträbalkarna och kommer därför behöva bytas ut oftare. För att skydda träet ska det ytbehandlas, vilket även ställer krav på en regelbunden rengöring (Ågren, u. å-b).

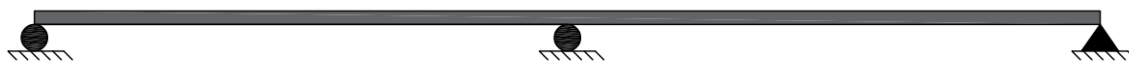
Betongstödet kommer att inspekteras för att upptäcka eventuella skador och större sprickor som kan påverka hållfastheten negativt. Allt för stora sprickor kan behöva åtgärdas, dessutom kan fundamentet behöva rengöras från växtlighet som kan uppstå i form av exempelvis mossa. Utöver brons huvudbärverk behöver även andra delar av inspekteras och underhållas. Detta avser bland annat räcken men även andra detaljer och olika slags infästningar. Det senare nämnda kan innebära dels en komplex inspektion men även komplexa underhållsförhållanden då detaljer och infästningar inte är lika lättillgängliga som exempelvis räcken och farbana.

5 Beräkningsförutsättningar

Detta kapitel utgör grunden för de beräkningar som har gjorts för det valda brokonceptet. Här presenteras bronns beräkningsmodell samt vilka laster som beaktas under den preliminära dimensioneringen.

5.1 Systemmodeller

Bron är kontinuerlig med en längd på 90 meter. Med ett mittstöd blir den uppdelad i två spann på vardera 45 meter. Det högra brofästet är ledat inspänd och resterande stöd är försedda med rullager, se figur 5.1 för en systemmodell i längsled.



Figur 5.1: Systemmodell i längsled.

Bron har en bredd på 3 meter. Mellan stöden är det 1 meter och konsolerna på vardera sida sticker ut 0.5 meter. En systemmodell över bron i tvärlängd visas i figur 5.2.



Figur 5.2: Systemmodell i tvärlängd.

5.2 Laster

För att säkerställa att kontrollen av bronns bärförmåga överensstämmer med verkligheten, analyseras de laster som verkar på bron samt olika lastkombinationer. Enligt Eurokod bör både permanenta och variabla laster beaktas (Swedish Standard Institute, 2003). Permanent last utgörs enbart av egen tyngden för bron, g . För att förenkla antas egen tyngden endast bero på vikten från balkar, vägbana och räcke. Räcken beräknas med egen tyngden 1 kN/m (Trafikverket, 2019). Egen tyngden för balkar och vägbana beräknas i bilaga N.1. Övriga konstruktionsdelar så som detaljutformningar, bedöms försumbara. Variabla laster som beaktas är trafiklast, vindlast och egen tyngd från ett servicefordon såsom ambulans eller fordon för underhåll samt en trafiklast.

5.2.1 Uteslutna laster

Snölast är sällan beaktad för stålbroar, med vissa undantag i områden där mycket snö förekommer (Lebet & Hirt, 2013). Utifrån brons geografiska placering blev bedömningen att snölasten inte behöver ses över.

Det enda fordon som planeras vistas på bron är ett servicefordon. Ett sådant fordon har en låg hastighet och genererar därför små bromskrafter. Dessa krafter försummas i beräkningsgången då de bedöms vara tillräckligt små för att inte vara dimensionerande.

5.2.2 Laster i längsled

I längsled belastas bron av den permanenta egentyngden, en ogynnsam punktlast i form av ett servicefordon och trafiklast. Servicefordonet beaktas som en punktlast i längsled då dess utbredning i förhållande till brons totala längd är liten. Storleken för punktlasten uppgår till $Q_{\text{service}} = 120 \text{ kN}$ (Swedish Standard Institute, 2003), verkande i fordonets tyngdpunkt. Den utbredda trafiklasten given från Eurokod är $q_d = 3.6 \text{ kN/m}^2$ (Swedish Standard Institute, 2003), beräknad med formeln i ekvation 5.1 nedan där belastade längden L är brons spännvidd på 45 meter.

$$q_d = 2,0 + \frac{120}{L + 30} \text{ kN/m}^2 \quad (5.1)$$

$$q_d \geq 2,5 \text{ kN/m}^2; \quad q_d \leq 5,0 \text{ kN/m}^2$$

Utbredd last där L är den belastade längden [m] (Swedish Standard Institute, 2003).

De variabla lasterna som bron dimensioneras för kan kombineras på olika sätt, vilket resulterar olika lastfall. Då bron har två spann på vardera 45 meter så kan den beaktas som symmetrisk vilket reducerar antalet lastfall. Antagande om att servicefordonet inte befinner sig på bron samtidigt som gång- eller cykeltrafikanter reducerar också antalet lastfall. Detta antagande gör att den permanenta egentyngden endast verkar tillsammans med antingen den utbredda lasten, q_d , eller punktlasten, Q_{serv} . Då servicefordonets punktlast kan verka på hela bron har de två mest kritiska och därmed dimensionerande positionerna valts ut för kontroll. Dessa är mitt i brospannet där maximalt moment erhålls, samt över mittstöd där maximal tvärkraft ges. De lastfall som beaktas kan ses i bilaga I.

5.2.3 Laster i tvärled

I tvärled verkar den permanenta egentyngden, trafiklast, punktlast från servicefordon och vindlast (Sören Lindgren, 2016). Vindlasten behöver tas upp av räcken, farbana samt en huvudbalk. Egentligen verkar vindlasten i alla tre riktningar men den blir mest kritisk i tvärled där den långa spännvidden medför en betydlig kraft jämfört med övriga riktningar. I tvärled bidrar även servicefordonet med en last, men i denna riktning behandlas den som två punktlaster där varje kraft representerar två hjul på vardera 40 kN. Att den i tvärled inte beaktas som en enda punktlast

beror på att avståndet mellan hjulen i förhållande till bronns totala bredd på tre meter inte är försumbart. Avståndet mellan dessa ansattes till 1.5 meter istället för 1.3 meter som det ska vara enligt Eurokod (Swedish Standard Institute, 2003). Denna förenkling genomfördes för att reducera antalet lastfall och innebar ett konservativt antagande. De olika lastfallen i tvärlängd kan ses i bilaga J.

5.2.4 Vindlast

Vindlasten som verkar på bron i tvärlängd tas fram med hjälp av ekvation 5.2 (Sören Lindgren, 2016). Vindlasten som påverkar bron i tvärlängd q_{vind} är beräknad till 586.26 N/m. För fullständig beräkning se bilaga N.5.

$$q_{vind} = c_p \cdot q_p \cdot A_{ref} \quad (5.2)$$

Formel för vindlast, q_{vind} [N/m] där c_p är en formfaktor som används för vindlast, q_p är karakteristisk hastighetstryck och A_{ref} är en referensarea (Swedish Standard Institute, 2003).

5.3 Lastkombinationer

Under en konstruktions livslängd kommer den att utsättas för olika typer av laster. Dessa kan kombineras på olika sätt och varierar ofta både i tid och rum vilket ger oändligt många lastkombinationer (Al-Emrani m. fl., 2013). Detta innebär att en konstruktion måste undersökas för flera olika lastfall för att den mest ogynnsamma och därmed dimensionerande kombinationen ska tas fram. Laster kontrolleras dels i bruksgränstillstånd vilket avser normal användning, men även i brottgränstillstånd som avser konstruktionens maximala belastning. Dessa beskrivs mer i bilaga L och framtagna laster som verkar på bron redovisas i tabell 5.1.

Lasttyp	Brottsgräns	Bruksgräns
Egenvikt på huvudbalkar, g [kN/m]	2.72	3.21
Egenvikt på tvärbalkar, g [kN/m]	1.64	1.93
Trafiklast, q_k [kN/m]	2.36	1.58
Servicefordon, P [kN]	60	30
Vindlast, q_{vind} [kN/m]	0.59	

Tabell 5.1: Beräknade laster som verkar på balkarna, multiplicerade med ogynnsamma koefficienter. Se bilaga N.5, N.1 och N.3 för fullständiga beräkningar.

6 Preliminär dimensionering

Det slutgiltiga brokonceptet som kommer utvecklas genom dimensionering och beräkningar är en balkbro i väderbeständigt stål. Nedan presenteras bronns exakta dimensioner på de huvudsakliga bärverken samt hur dessa har tagits fram. För exempelbilder i skala 1:100 se bilaga E och skala 1:20 se bilaga F.

6.1 Lastintensitet

Laster redovisade i tabell 5.1 användes för att bestämma dimensionerande moment och tvärkraft. Olika lastfall analyserades för att finna den mest kritiska kombinationen. Resultatet togs ut från moment- och tvärkraftsdiagram i figur N.1 och N.6-N.12. Maximala värden är sammanställda i tabell 6.1 och 6.2.

Lastfall	M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]
1	1236.3	137.4
2	962.9	131.3
3	942.6	112.2
4	689.5	76.6

Tabell 6.1: Beräknade dimensionerande krafter för alla antagna lastfall i längsled, se bilaga N.1 för fullständiga beräkningar.

Lastfall	M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]
1	0.5	2.3
2	0.5	2.2
3	0.5	2.2
4	0.5	2.0
5	0.27	2.1
6	30.2	60.8
7	12.2	36.3

Tabell 6.2: Beräknade dimensionerande krafter för alla antagna lastfall i tvärlid, se bilaga N.3 för fullständiga beräkningar.

Enligt tabellerna ovan är lastfall 1 mest kritiskt i längsled och lastfall 6 dimensionerande i tvärlid. Lastfallskombinationerna presenteras i bilaga I och J. Vanligtvis utförs både en statisk och dynamisk analys, men i detta fall har enbart bron undersökts för reaktioner på konstanta laster, vilket motsvarar en statisk analys. På en lång GC-bro kan vibrationer och rörelser äventyra komforten och orsaka obehag. De dynamiska effekterna kan därmed vara avgörande för utformningen av bron men har i detta fall inte beaktats, vilket diskuteras vidare i kapitel 7.2.4.

6.2 Dimensionering av tvärsnitt

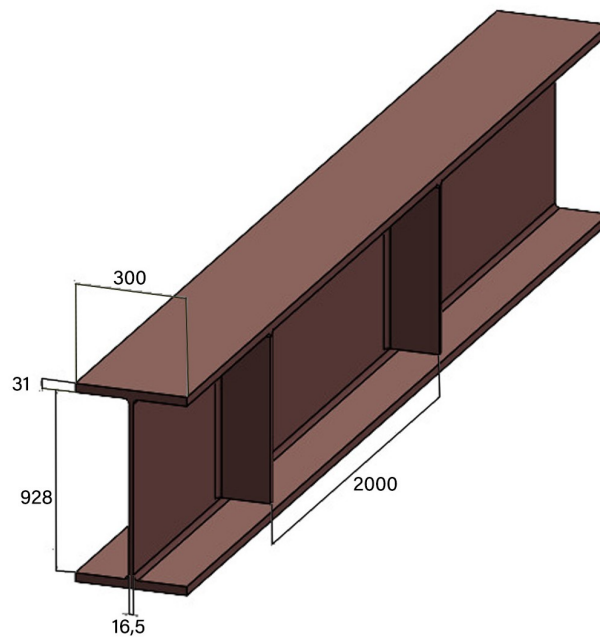
De kontroller som genomförts på tvärsnittet är momentkapacitet, tvärkraftskapacitet, nedböjning samt interaktion mellan moment och tvärkraft. Moment- och tvärkraftskapacitet beräknades i brottsgränstillstånd och nedböjningen i bruksgränstillstånd (Al-Emrani m. fl., 2020). Dimensioneringen samt kontrollerna har i längsled gjorts på huvudbalkarna och i tvärled på tvärbalkarna. Beräkningar har utförts med hjälp av MATLAB och dess programvara CALFEM. Hur bron har modellerats upp i CALFEM kan ses i bilaga M.

6.2.1 Huvudbalkar

Huvudbärverket i bron utgörs av tre huvudbalkar, se bilaga D. Dessa har dimensionerats och därefter kontrollerats enligt krav i Eurokod. Kraven innebar att kvoten mellan dimensionerande last och kapacitet, η , behövde understiga 100% för moment och tvärkraft. Dessutom fick nedböjningen, w_{net} , ej överstiga $L/400$ (Al-Emrani m. fl., 2020). Balkarnas dimensioner framgår i figur 6.1 och det slutgiltiga resultatet för beräkningarna är sammanställt i tabell 6.3. Det dimensionerande kriteriet var nedböjning, vilket är oberoende av stålets kvalitet. Detta innebar att det minst hållfasta stålet för brokonstruktion kunde användas, vilket enligt COWI motsvarar S355 (Personlig kommunikation, 9 april). Fullständiga beräkningar för huvudbalkarna finns i bilaga N.1. På balkarna bildas ett korrosionsskikt som behövde beaktas; de delarna av balken som rostar är ej bärande. Genom att addera 1 millimeter på balkens samtliga ytor så underskattades inte bärförmågan enligt COWI (Personlig kommunikation, 9 april).

M_{Ed} [kNm]	1236.3
M_{Rd} [kNm]	4427.2
η_{moment} [%]	27.9
V_{Ed} [kN]	137.4
V_{Rd} [kN]	3115.3
$\eta_{tvärkraft}$ [%]	4.4
w_{net} [mm]	110.5
$L/400$ [mm]	112.5

Tabell 6.3: Resultat av beräkningar i längsled för dimensionerande lastfall där M_{Rd} och V_{Rd} beskriver kapacitet, η beskriver utnyttjandegrad och w_{net} slutlig nedböjning.



Figur 6.1: Slutliga dimensioner på huvudbalkar [mm].

6.2.2 Tvärbalkar

Brons sekundärbärverk består av tvärgående limträbalkar. Dimensioneringen av dessa krävde en analys som liknande den för huvudbalkarna, men med andra materialparametrar. Materialet trä påverkas av fukt, krypning och tillverkningsmetod. Dessa faktorer togs hänsyn till genom koefficienterna k_{mod} och γ_M (Al-Emrani m. fl., 2020). Värdet på k_{mod} baserades på lastens varaktighet samt den geografiska platsens klimatklass (Al-Emrani m. fl., 2020). Lastens varaktighet bestämdes utifrån den dominerande lasten och dess varaktighet enligt COWI (Personlig kommunikation, 9 april). Under beräkningsgången jämfördes andelen egentyngd med trafiklasten för att interpolera en lastvaraktighet som resulterade i ett viktat k_{mod} på 0.65. Brons geografiska placering innebar klimatklass 3 och eftersom balkarna bestod av limträ ansattes γ_M till 1.25 (Al-Emrani m. fl., 2020). Dimensionerande hållfasthet beräknades enligt ekvation 6.1.

$$f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (6.1)$$

Ekvation för beräkning av dimensionerande hållfasthet, f_d [Pa] (Al-Emrani m. fl., 2020).

Samtliga kontroller som utfördes på huvudbalkarna gjordes även på tvärbalkarna. Även nedböjning i balkarnas ändar på den del som agerar konsol har kontrollerats. De framtagna dimensionerna på träbalkarna är 140 x 495 x 3000 millimeter med ett avstånd på 600 millimeter och limträkvalité GL36k. Slutgiltigt resultat för beräkningarna redovisas i tabell 6.4. Fullständiga beräkningar kan ses i bilaga N.3.

M_{Ed} [kNm]	30.2
M_{Rd} [kNm]	33.3
η_{moment} [%]	90.7
V_{Ed} [kN]	60.8
V_{Rd} [kN]	69.2
$\eta_{tvärkraft}$ [%]	87.9
$w_{net,konsol}$ [mm]	2.1
$w_{net,upplag}$ [mm]	0.45
$L/150$ (konsol) [mm]	3.3
$L/300$ (upplag) [mm]	3.3

Tabell 6.4: Resultat av beräkningar i tvärlid för dimensionerande lastfall där M_{Rd} och V_{Rd} beskriver kapacitet, η beskriver utnyttjandegrad och w_{net} slutlig nedböjning.

6.3 Temperaturutvidgning

Stål är ett material som påverkas av temperaturförändringar genom förlängning och förkortning. I Ängelholm är T_{max} 35°C och T_{min} -28°C (Gunnar & Robert, 2011). Enligt ekvation 6.2 var den största expansionen som kunde ske för huvudbalkarna 5.2 centimeter, se bilaga N.6 för beräkningar.

$$\Delta L = \alpha_T \cdot L \cdot \Delta T \quad (6.2)$$

Ekvation för beräkning av längdförändring i stål orsakad av temperaturförändringar där α_T är termiska expansionskoefficienten för stål, ansatt till $10^{-5} / ^\circ\text{C}$ (Lebet & Hirt, 2013).

7 Diskussion

I detta kapitel diskuteras de antaganden och beslut som har gjorts under arbetets gång, samt hur dessa har påverkat resultatet. Majoriteten av dem gjordes framförallt i urvalsprocessen och under den preliminära dimensioneringen. Det fattades även beslut i förstudien gällande avgränsningar eftersom brons geografiska placering från början var okänd.

7.1 Urvalsprocessen

Valet av brokoncept genomfördes i en urvalsprocess bestående av tre delar. De två första urvalen anses vara oberoende av gruppens värderingar då de baserades på teknisk genomförbarhet och de krav som tillhandahållits. Under denna del så styrde främst begränsningarna gällande spännvidden och kravet på att konceptet maximalt fick ha ett stöd i vattnet.

Det tredje urvalet baserades på åtta urvalskriterier. Valet av vilka kriterier som skulle ingå i viktningssmallen samt hur dessa viktades mot varandra gjordes så objektivt som möjligt. Detta gjorde gruppen genom att se det ur olika perspektiv samt ta hänsyn till olika åsikter och värderingar.

Även projektets förutsättningar hade en påverkan på hur kriterierna och koncepten viktades mot varandra, då det inte fanns några konkreta krav på exempelvis kostnad och byggtid. Dessutom analyserades kriterierna vid viktningen mot koncepten, se tabell 3.3, endast enkla uppskattningar gjordes. För en bättre bedömning hade en mer noggrann analys och beräkningar krävts.

Trots att projektets process skulle grunda sig i objektivitet, har konceptvalet troligen påverkats av arbetsgruppens åsikter, även om detta skedde oavsiktligt. Detta kan påvisas genom att jämföra den bro som COWI valde att bygga för det aktuella projektet; trots samma förutsättningar resulterade det i olika slutresultat. Subjektivitet är en mänsklig faktor som är svår att undvika. Arbetsprocessen har dessutom behövt förenklas genom de aktiva val som gjorts för att fastställa antaganden och förenklingar. För ett verkligt projekt hade processen krävt djupare analyser och mer exakt metodik.

7.2 Dimensioneringsprocessen

I detta delkapitel beskrivs de antaganden och förenklingar som gjordes under dimensioneringsprocessen. De förenklingar som gjordes var främst avsedda att underlätta beräkningarna eftersom detta arbete endast behandlar den inledande dimensioneringen. Nedan diskuteras resultatet, ifall andra lösningar hade kunnat tillämpas och vad som återstår att dimensionera.

7.2.1 Överbyggnad

En farbana kan designas på flera olika sätt. I detta fall valdes en design där ett slitplank i trä vilar ovanpå limträbalkar. Dessa balkar har mellanrum mellan sig och samma centrumavstånd används över hela bron. Ett annat alternativ som diskuterades var att enbart ha limträbalkar utan något mellanrum och på så vis inte behöva slitplanket. Valet grundade sig i materialeffektivitet och faktumet att ett sekundärt bärverk kan skydda tvärbalkarna. Dessutom ansågs ett slitplank vara mer estetiskt tilltalande och bättre ur ett underhållsperspektiv om det designas så att det lätt kan bytas ut. Farbanan hade även kunnat asfalterats men trä ansågs mer passande för en GC-bro som befinner sig i ett naturområde.

Vid dimensioneringen har varken slitplanket eller infästningarna såsom bultar kontrollerats. I ett verkligt projekt är dessa aspekter avgörande för både utformning och hållfasthet och bör egentligen kontrolleras noggrannare. Då detta projektarbete är förenklat ansågs inte dessa detaljer vara avgörande för resultatet och fokuset riktades därför mot huvudbärverken istället. Gruppen bedömde att dessa förband inte skulle styra bron i sin helhet utan enbart i liten skala såsom antalet bultar. Vid dimensioneringen av nämnda delar hade dock en annan design kunnat vara bättre anpassad beroende på framräknat centrumavstånd.

Beroende på vilket byggnadsmaterial huvudbalkarna består av kan de utformas på olika sätt. För balkar i väderbeständigt stål är en vanlig form I-balkar, dessa har ett smalt liv och en bredare fläns. I-balkar erhåller en hög styrka i förhållande till sin egenvikt och är bra på att motstå böjning och andra belastningar. En av anledningarna till att I-balkar valdes är att den omgivande marken mestadels består av lera, och därför ansågs det vara viktigt att minska huvudbalkarnas egenvikt i syfte att minimera behovet av pålning.

För att säkerställa god komfort för brons användare har ett krav ställts på balkarna avseende nedböjning. I detta fall blev detta krav dimensionerande och innebar att huvudbalkarnas utnyttjandegrad för moment och tvärkraft fick låga värden, 27.9% för moment respektive 4.4% för tvärkraft. Kravet för nedböjningen är däremot uppfyllt med liten marginal, där slutgiltiga nedböjningen beräknades till 110.5 millimeter och maximalt godkända är 112.5 millimeter. Ur ett hållbarhetsperspektiv är en låg utnyttjandegrad negativt, eftersom balkarna då blir överdimensionerade gällande bärförmåga. Detta innebär att de får större dimensioner och därmed större materialåtgång än vad som egentligen hade behövts om man bortsåg från kravet gällande nedböjning. För att åtgärda problemet kan en mindre hållfast stålqualität användas, men för bärande konstruktioner är det som tidigare nämnt ej rekommenderat att använda stål under klassen S355.

7.2.2 Detaljer

Räckena fästs på utsidan av de tvärgående limträbalkarna och monteras med hjälp av bultar för att undvika breddning av farbanan. Denna typ av infästning kan medföra vissa problem, eftersom vatten som kan samlas vid ändarna av limträet löper

stor risk att tränga in och orsaka fuktskador. Ett sätt att motverka detta är att placera ett ogenomträngligt material mellan räcket och limträbalken. Det finns flera olika sätt att montera räcket på där ett annat alternativ är att montera de ovanpå bron. Detta hade dock krävt en bredare bro för att fortfarande uppnå 3 meter farbana.

Bron har ett rullager över mittstödet och är därför helt rörlig över mittstödet, vilket ger både för- och nackdelar. Om mittstödet hade varit fast inspänt med rullager, skulle bron expanderat lika mycket i längsled på båda sidor. Detta kan vara fördelaktigt men orsakar samtidigt inre spänningar i mittpelaren, vilket är något man vill undvika eftersom pelaren är placerad i vatten. För att hantera sådana spänningar skulle mittpelaren behövt vara betydligt robustare än vad som krävs när ett rullager används.

7.2.3 Underbyggnad

Brons underbyggnad består av landfästen i brons ändar samt en pelare som bär upp bron i dess mitt. Konceptuell utformning ser ut enligt figur D.1 och D.2 och både ändstöd och pelare består av armerad betong. Materialet betong har en hög tryckhållfasthet i förhållande till andra material och bedömdes därför vara bäst anpassat till tryckkrafterna som verkar i stöden. Underbyggnadens bärförmåga uttryckt i motstånd mot knäckning är ej kontrollerad vilket innebär att inga exakta dimensioner har tagits fram. Utformningen för pelaren togs fram efter analys av vanliga former och övervägning av olika alternativ såsom en skiva, tre pelare eller en pelare med Y-form. Dessa alternativ utvärderades för att säkerställa att bron fick det högsta möjliga estetiska värdet enligt gruppen. I ett verkligt projekt är även detta något som hade behövts kontrolleras.

7.2.4 Övriga kontroller

En statisk analys har utförts på bron, medans en dynamiska analys har uteslutits. Då bron har en lång spännvidd så finns det risk att vibrationer och svängningar uppkommer i bron. Det är därför viktigt att kontrollera att dessa inte sammanfaller med den frekvens som människors fotsteg genererar på bron, i syfte att undvika resonans som kan skada konstruktionen och leda till brott.

7.3 Riskanalys

Ett stort byggprojekt innebär alltid många risker, inte minst under själva produktionskedet. Vid ett projekt är det viktigt att förutse dessa i syfte att kunna förebygga dem. En risk kan avse konstruktionen i sig, exempelvis att något går sönder eller inte går som planerat. Men det kan även avse skador på omgivningen såsom personer som befinner sig på byggarbetsplatsen men även negativ påverkan på naturen och ekosystemet. I ett vanligt byggprojekt kan även överskridning gällande tid eller ekonomi ses som potentiella risker, men i detta projekt där tydliga riktlinjer

för dessa faktorer saknas är detta inget att befara.

Byggprocessen innebär som sagt en hel del orosmoment. Ett sätt att minska dessa är att använda prefabricerade element eftersom risken för negativ inverkan av fukt under byggprocessen då minskar. Att organisera och ha en väl uppbyggd arbetsplats är även det en viktig faktor för att göra byggarbetsplatsen säker. Ett kritiskt moment för själva konstruktionen under byggskedet är när huvudbalkarna ska lyftas ut då de är så pass långa, där minsta lilla fel kan leda till en skada på konstruktionen. För att säkra upp detta moment krävs därför god planering och en väl anpassad arbetsplats.

7.4 Hållbarhet

Enligt Boverket (2020) så ska en bebyggd miljö bidra till välmående och en hälsosam livsmiljö. Utifrån dessa aspekter anses bron prestera bra inom hållbarhetens sociala dimension då den bidrar till ökad tillgänglighet till naturen.

Utifrån de ekologiska aspekterna så har gruppen gjort ett materialval vars miljöpåverkan är liten med hänsyn till underhåll. Det väderbeständiga stålet behöver inte målas och kräver därmed mindre underhåll än vanligt stål. Oavsett materialval så är det svårt att göra konstruktioner som inte ger något slags avtryck på miljön. I detta fall behandlades två miljöer (vattentäkt och naturreservat) som båda är känsliga för påverkan. För att minska inverkan på vattentäkten så är ett möjligt alternativ att dimensionera en bro utan ett stöd i vattnet. På grund av den långa spännvidden hade det då krävts ett helt annat brokoncept än det valda, vilken även det hade bidragit med konsekvenser på miljön.

Den ekonomiska dimensionen i hållbarhetsaspekten är svår att analysera då den har varit en försumbar faktor i urvalsprocessen. I verkliga projekt är den dock essentiell och har därför fortfarande beaktats. Det väderbeständiga stålet och dess höga stålqualität är dyrt vid inköp. Sett ur ett långsiktigt perspektiv kan det dock bli billigare än andra materialval, då bekostnaden på miljön blir mindre.

Det är viktigt att det hållbara byggandet appliceras tidigt i processen då resultatet formas för och av framtiden. Ju tidigare i processen som valen görs, desto effektivare blir dem och mycket resurser kan sparas genom ett bra konceptval (Lebet & Hirt, 2013). Att genomföra efterstrukturella åtgärder är mer komplicerat, därför blir urvalsprocessen avgörande med en utgångspunkt i en hållbar utveckling. För ytterligare evaluering av konceptvalet så hade det varit aktuellt att genomföra livscykel- och livscykelkostnadsanalyser.

7.5 Källkritik

I arbetet har det varit viktigt att följa byggsektorns standarder och riktlinjer samt sammanställa ämnesrelevant information. Sammanställningen utgjorde en grund för urvalsprocessen och bidrog med nödvändig information för viktningen av olika brokoncept. De källor som främst har använts är publikationer som tilldelats av handledare samt kurslitteratur från tidigare kurser. Majoriteten av publikationerna har utgetts av den svenska myndigheten Trafikverket och kurslitteraturen grundar sig i Eurokod. Arbetet har även baserats på vetenskapliga artiklar samt hemsidor. De källor som inte följer en etablerad standard eller kommer från en myndighet, granskades källkritiskt; informationen jämfördes mellan olika informatörer för att säkerställa akademisk trovärdighet.

8 Slutsats

Syftet med rapporten var att ta fram ett brokoncept för en gång- och cykelbro som skulle binda samman ett bostadsområde med ett naturreservat i Ängelholm. Med hjälp av en förstudie och ett system med viktningskriterier utarbetades ett brokoncept. Resultatet blev en balkbro med tre huvudbalkar i väderbeständigt stål. Detta koncept uppfyller projektets målbild och avklarar därmed syftet med avseende på hållfasthet och utformning. Utifrån hållbarhetsperspektivet så uppfyller bron inte alla dimensioner likvärdigt, framför allt så kräver den ekonomiska aspekten utvärdering. Då konceptet endast har dimensionerats översiktligt med huvudfokus på överbyggnad så födras en mer genomgående detaljutformning för ett komplett brokoncept.

Referenser

AB, S. S. (u. å). TOBE FR4 potlager.

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2013). *Bärande konstruktioner del 1*. Chalmers tekniska högskola, avdelningen för konstruktionsteknik.

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2020). *Bärande konstruktioner del 1*. Chalmers tekniska högskola, avdelningen för konstruktionsteknik.

Beräkna din koldioxidbesparing [Hämtad från SSAB Weathering]. (n.d.). <https://www.ssab.com/sv-se/varumarken-och-produkter/ssab-weathering/berakna-din-koldioxidbesparing>

Betongföreningen. (2013). *Hållbart byggande med betong* [PDF]. Svenska Betongföreningen.

Boverket. (2024). *Risker i vattenförsörjningen*. Hämtad 22 februari 2024, från <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/planering/detaljplan/temadelar-detaljplan/vattenforsorjning/risker/>

Broo, H. (2024). Preliminär dimensionering av förspända betongbroar [Efterspända betongbroar].

Brynhildsen, H. (2020). *Advantages of steel as a building material from a sustainability perspective* [examensuppsats, Chalmers University of Technology, Division of Structural Engineering].

COWI. (2022). *Projekterings PM Geoteknik* (Technical Report). COWI.

Fastighetsverk, S. (2023). *Trä som byggnadsmaterial*. Statens Fastighetsverk. <https://www.sfv.se/media/h3xfv4fs/sfv-tra-som-byggnadsmaterial-2005.pdf>

Group, H. C. (2022). *Kalkcement - En del av lösningen*. https://www.cement-heidelbergmaterials.se/sites/default/files/assets/document/e1/c3/kc_kalkcement.pdf

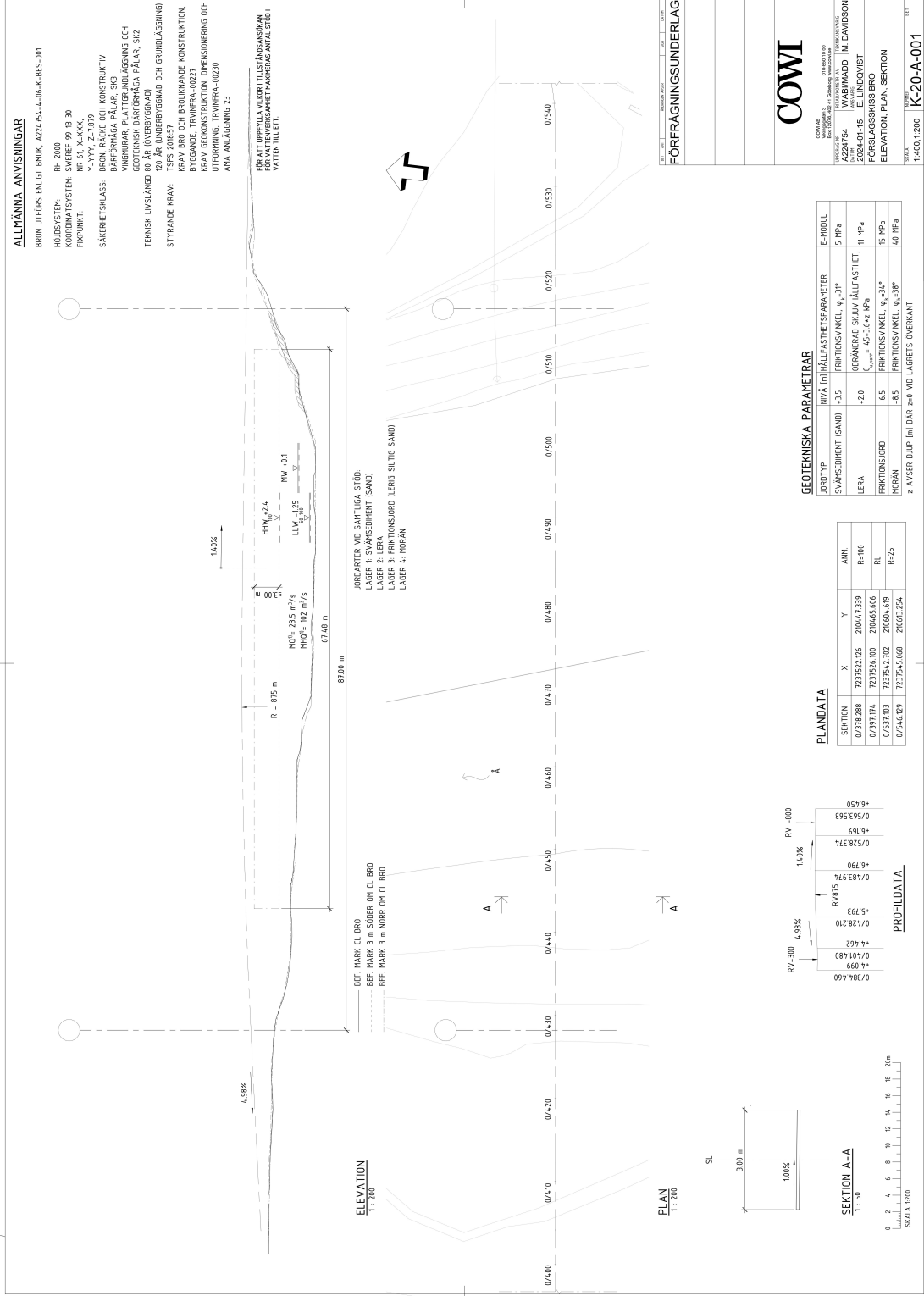
Gunnar, M., & Robert, R. (2011). I Trafikverket (Red.), *Trafikverkets författarsamling TRVFS 2011:12*. Trafikverket.

Jernkontoret. (2019a). *Energi - Jernkontoret*. Hämtad 25 februari 2024, från <https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/energi/>

- Jernkontoret. (2019b). *Slutprodukter av stål*. Hämtad 25 februari 2024, från <https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/slutprodukter-av-stal/>
- Jernkontoret. (2022). *Processernas Miljöpåverkan*. Jernkontoret. Hämtad 25 februari 2024, från <https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/processernas-miljopaverkan/>
- Lebet, J.-P., & Hirt, M. A. (2013). *Steel Bridges* (1st). EPFL Press English Imprint.
- Ronnerbrant, R., & Glans, L.-Å. *Broprojektering : en handbok* ([Rev. uppl.]). Borlänge, 1996.
- SSAB. (u. å). *SSAB väderbeständigt stål för långlivade broar och konstruktioner*. Hämtad 22 februari 2024, från <https://www.ssab.com/sv-se/varumarken-och-produkter/ssab-weathering/konstruktioner-och-broar>
- Swedish Standard Institute. (2002). *Eurokod: Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk*. Swedish Standard Institute.
- Swedish Standard Institute. (2003). *Eurokod 1: Laster på bärverk - del 2: Trafiklast på broar*. Swedish Standard Institute.
- Svensk Byggtjänst. (2004). *Korrosivitetsklasser – ett sätt att beskriva miljöns aggressivitet* [PDF]. Hämtad 28 februari 2024, från http://static.byggtjanst.se/amadocs/anyvvs_2-2004_17-19.pdf
- Svensson, A. (2002). *Undersökning av olika rostskydd hos armering och ingjutningsgods* [examensuppsats, Linköpings Universitet].
- Sveriges Kommuner och Regioner. (2023). *Undantag för tunga, breda och långa transporter*. Advant.
- Sällfors, G. (2013). *Geoteknik*. Cremona.
- Sören Lindgren. (2016). *Brolaster*.
- Trafikverket. (2014). *Batman - Kodförteckning och beskrivning av brotyper*.
- Trafikverket. (2019). *Krav Brobyggande*.
- Trafikverket. (2022a). *Broprojekteringshandboken*.
- Trafikverket. (2022b). *Krav - VGU, Vägars och gators utformning* (Rapport Nr 2022:001) (Kontaktperson: Kenny Dolleris). Trafikverket. Borlänge. Hämtad 22 mars 2024, från <https://www.trafikverket.se>

-
- Träguiden. (2019-10-22). *Balkar och ytbarverk*. Hämtad 18 april 2024, från <https://www.traguiden.se/konstruktion/dimensionering/barverk/barverk/balkar-och-ytbarverk/?previousState=1>
- Winsnes Sunnemark, G., & Tinnerstedt, G. (2020). *Återvinning av betong - för en cirkulär materialanvändning* [examensuppsats, Sveriges lantbruksuniversitet, SLU].
- Zhang, Y., Zheng, K., Zhu, J., Lei, M., & Feng, X. (2021). Research on corrosion and fatigue performance of weathering steel and High-Performance steel for bridges. *Construction and Building Materials*, 289, 123108. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123108>
- Ågren, A. R. (u. å-a). *Träbroar*. Svenskt Trä. <https://www.svenskttra.se/bygg-med-tra/byggande/olika-trakonstruktioner/trabroar/>
- Ågren, A. R. (u. å-b). *Ytbehandling av utvändigt trä*. Svenskt Trä. <https://www.svenskttra.se/bygg-med-tra/byggande/ytbehandling/>
- Ågren, A. R. (2017). *Limträ som konstruktionsmaterial*. Svenskt Trä. <https://www.traguiden.se/konstruktion/limtrakonstruktioner/projektering-av-limtrakonstruktioner/limtra-som-konstruktionsmaterial1/>
- Ängelholms Kommun. (u. å). *Ny gång- och cykelbro vid Haradal*. Hämtad 11 april 2024, från <https://www.engelholm.se/trafik-och-stadsplanering/kommunala-bygg--och-infrastrukturprojekt/projekt/2022-10-21-ny-gang--och-cykelbro-vid-haradal.html>

A Förslagshandling



B Beskrivning av kriterier

Miljöpåverkan: Avser effekter som byggandet och användningen kan ha på miljön och det omgivande ekosystemet under bronns hela livscykel. Miljöpåverkan bedömdes framför allt utifrån genererad mängd koldioxidekvivalenter.

Ekonomi: Innefattar kostnader som uppkommer under hela bronns livslängd.

Gestaltning: Syftar på bronns estetiska intryck och hur välintegrerad bron är i omgivningen.

Komplexitet: Innefattar den komplexa designen och byggmetoden. Avser de komplexa detaljerna, samt tekniska utmaningar under hela livscykeln. Projektering, produktion, förvaltning och underhåll beaktas.

Produktionsteknik: Avser de metoder, tekniker och processer som används för att bygga en bro. Omfattar allt från planering och förberedelse av arbetsplatsen till själva konstruktionen och färdigställande av bron.

Produktionstid: Avser den tid det tar att planera, bygga och färdigställa en bro. Inkluderar alla steg i processen från förstudier till att bron officiellt öppnas upp för användning av allmänheten.

Inspekterbarhet: Innebär förmågan att effektivt men samtidigt noggrant kunna genomföra inspektioner för att upptäcka samt förhindra skador och brister på bron. Beror på utformning och komplexitet av brostrukturen.

Underhåll: Avser hur ofta och genomgående konstruktionen behöver repareras och förstärkas för att säkerställa dess funktionalitet, prestanda och säkerhet över livslängden. Beror främst på materialval.

C Konstruktionsmaterial

För broar är de tre materialen stål, trä och betong ofta av intresse. Nedan beskrivs materialens egenskaper samt för- och nackdelar som kan finnas dem.

C.1 Stål

Stål är en legering av järn, kol och tillsatta legeringsämnen (Jernkontoret, 2022). Legeringsämnena kan väljas för att materialet ska erhålla specifika egenskaper som bland annat påverkar hållfasthet, hårdhet, seghet och beständighet mot korrosion. Materialval och produktionsmetod kan alltså anpassas för att erhålla ett optimalt stål utifrån givna förutsättningar för aktuell konstruktionstyp. Detta bidrar till att en stålbro kan utformas för en längre livslängd och anpassas för att klara av den specifika miljön som den ska upprättas i (Jernkontoret, 2019b).

Stål karakteriseras av en god hållfasthet i drag såväl som tryck och har dessutom en god termisk ledningsförmåga (Al-Emrani m. fl., 2013). Jämfört med trä och betong så kan man skapa slanka konstruktioner med låg egentynghet. Konstruktionsdelar av stål kan produceras som färdiga komponenter som sedan enkelt kan monteras på aktuell plats. För brokonstruktioner som kräver en stor spännvidd är detta fördelaktigt ur ett ekonomiskt perspektiv.

Sett ur ett hållbarhetsperspektiv är ståltillverkningen en energi- och resurskrävande process (Jernkontoret, 2019a), och produktionsfaktorer så som energi, miljöpåverkan och resursanvändning blir därför viktiga att beakta. Kol står för ca 50 % (Jernkontoret, 2022) av energianvändningen inom stålproduktionen vilket genererar ett koldioxidutsläpp som är större än det från trä och betong (Brynhildsen, 2020). Jernkontoret (2024) framför å andra sidan att stål är ett cirkulärt materialval; av de restprodukter som genereras under produktion och demontering av konstruktioner så återbrukas ca 80 %.

C.1.1 Väderbeständigt stål

När stål utsätts för en marin atmosfär eller vägsalt så ökar korrosionshastigheten hos materialet avsevärt (Zhang m. fl., 2021). Detta påverkar utmattningshållfastheten som är en viktig parameter styrd av bland annat ståltyp men även korrosionstid. Då det framtagna brokonceptet ska konstrueras i en miljö med korrosivitetsklass C4 så blir det aktuellt att överväga att använda ett stål med specifika egenskaper.

Väderbeständigt stål (VS) är ett låglegerat stål med hög korrosionshårdighet. Jämfört med konventionellt stål så kan VS bilda ett lager med skyddande egenskaper som minskar korrosionshastigheten. Det finns även ett så kallat högpresterande stål; en typ av väderbeständigt stål som erhåller ännu bättre kapacitet.

VS kan bidra med både fördelar så som ökad prestanda och minskat krav på underhåll, men även nackdelar i form av exempelvis ökade kostnader. Yu Zhang m.fl. (2021) förklarar att trots ett flitigt användande av VS inom brokonstruktion så medför den marina miljön, alltså den högre korrosivitetsklassen, vissa begränsningar.

C.2 Trä

Trä är ett naturligt byggnadsmaterial som ingår i naturens kretslopp (Fastighetsverk, 2023). Detta innebär att materialets livscykel inte bidrar med några ökade mängder koldioxid i atmosfären och kan därför beaktas som miljövänligt. Likt andra material genererar dock tillverkningen av träprodukter och transporter stora mängder utsläpp, vilka kan minimeras med miljövänligare produktions- och transportmetoder. Trä är enkelt att använda igen, antingen genom återanvändning eller återvinning. Om det inte är i skick för att användas igen kan det förbrännas vilket genererar värme som bland annat kan användas för uppvärmning av hus.

Nackdelen med det naturliga materialet är dock dess känslighet för fukt och risk för angrepp av mikroorganismer (Fastighetsverk, 2023). Detta kan leda till mögel, att materialet ruttnar och en minskad hållfasthet. För att träkonstruktioner ska vara beständiga med långa livslängder så krävs det att de skyddas, exempelvis genom impregnering. Ytterligare en aspekt som är väsentlig att beakta är att trä är ett anisotrop material; egenskaperna skiljer sig i olika riktningar, vilket bland annat gäller krympning, svällning och hållfasthet.

Trä är ett lätt men starkt material, det har därför förmågan att bära stora laster trots en låg egentyngd (Ågren, u. å-a). Jämfört med exempelvis betongkonstruktioner krävs det därför inte lika massiva träkonstruktioner för att kunna bära likvärdiga krafter. Broar av trä är ofta fördelaktiga när det gäller kortare spännvidder. Utöver svängningar så är ofta nedböjningen dimensionerande för broar av trä (Ågren, u. å-a).

C.3 Betong

Betong är ett av de mest använda byggnadsmaterialen världen över och utmärks av dess starka tryckhållfasthet, långvariga beständighet och höga energieffektivitet (Al-Emrani m. fl., 2020). Jämfört med andra material, såsom stål, kräver betong en betydlig mängd mindre energi för att producera en likvärdig kapacitet, vilket gör det till ett mer ekonomiskt och miljövänligare alternativ jämfört med andra material (Al-Emrani m. fl., 2020).

Ett karakteristiskt drag hos betong är dess formbarhet, vilket möjliggör skapandet av olika konstruktionsformer på ett effektivt sätt (Al-Emrani m. fl., 2020). För att minimera risken för sprickbildning, som är vanligt förekommande i betongkonstruktioner, används ofta förspända armeringsstänger som gjuts in i betongelementen (Al-Emrani m. fl., 2020).

Betong består huvudsakligen av cement, ballast, vatten och tillsatsmedel, och olika

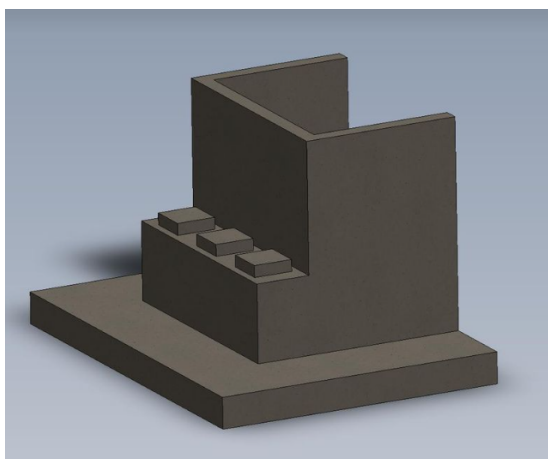
proportioner av dessa ingredienser resulterar i olika önskade egenskaper (Al-Emrani m. fl., 2020). Ett av materialets främsta kännetecken är den betydligt lägre dragkapaciteten jämfört med dess tryckkapacitet, vilket motiverar användningen av armeringsstänger i stål i syfte att förstärka betongtvärsnitten i dragzonen (Al-Emrani m. fl., 2020).

Även om betong är ett hållbart byggmaterial på grund av dess långa livslängd, är risken för korrosion av armeringen en viktig faktor att beakta då det kan förkorta livslängden (Svensson, 2002). Korrosion kan leda till en minskad bärförmåga och är främst ett resultat av kloridinträngning och karbonatisering (Svensson, 2002).

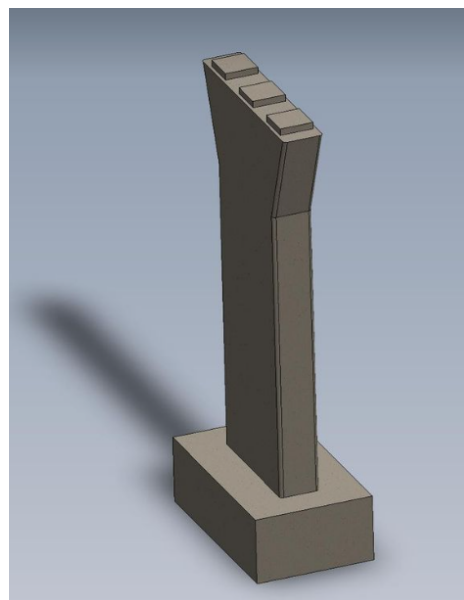
Återvinning av betong och armeringsstål efter demontering av konstruktionen är en fördelaktig strategi både ur miljö- och ekonomisk synvinkel. Även om tillverkningen av cement genererar stora utsläpp av koldioxid, kan betongens förmåga att binda koldioxid och dess återvinningspotential delvis kompensera för dess negativa miljöpåverkan (Winsnes Sunnemark & Tinnerstedt, 2020).

I sammanhanget av brokonstruktioner är betong ett populärt val på grund av dess höga hållfasthet i tryck och möjlighet att skapa långa spännvidder som är estetiskt tilltalande (Betongföreningen, 2013). Genom att beakta betongens egenskaper och dess potentiella miljöpåverkan, kan hållbara byggmetoder och konstruktioner utvecklas för att möta framtidens behov inom infrastruktur- och byggsektorn.

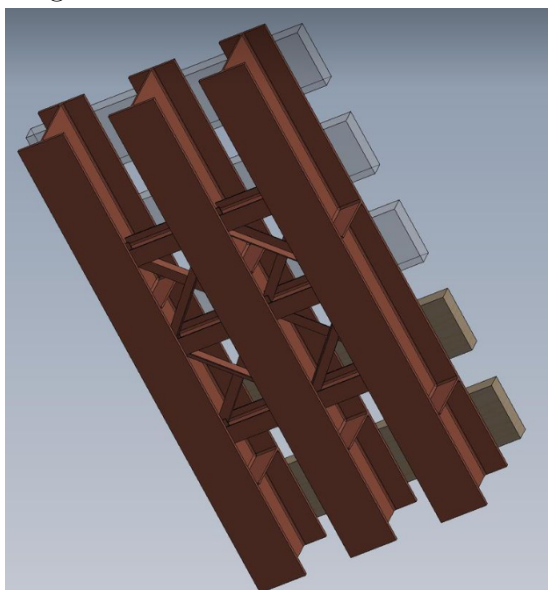
D Konceptuella figurer



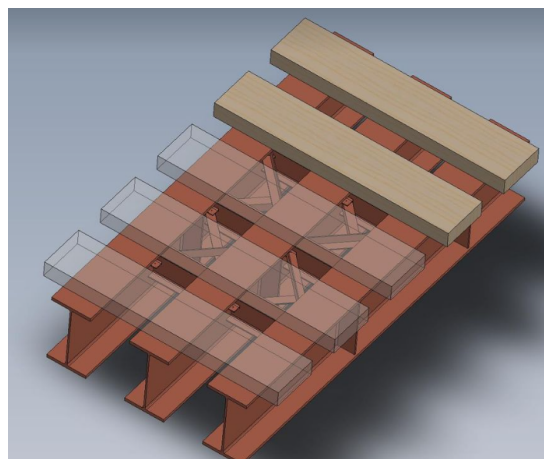
Figur D.1: Landfästets tänkta utformning.



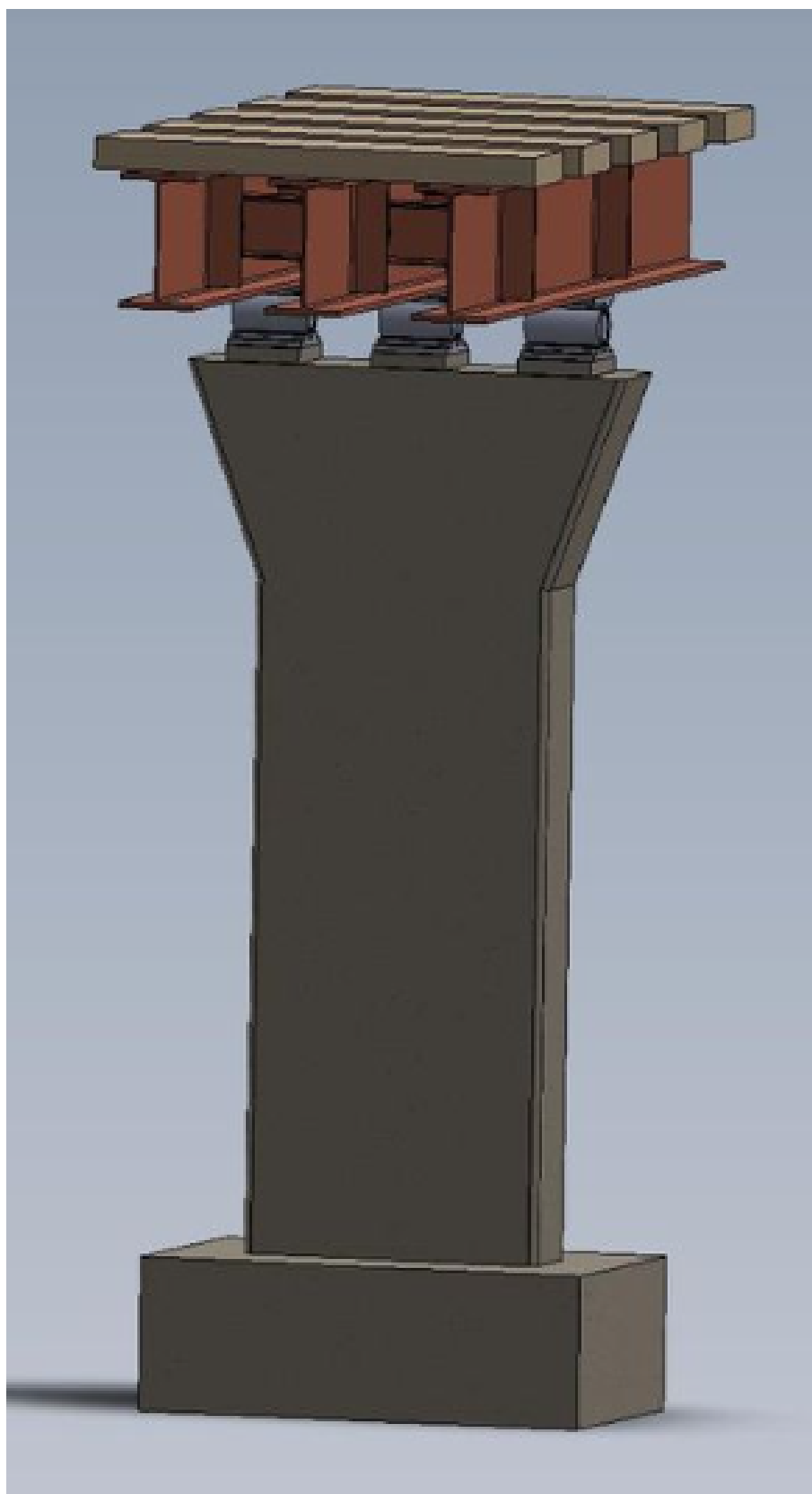
Figur D.2: Mittstödetts tänkta utformning.



Figur D.3: Bron sedd underifrån.

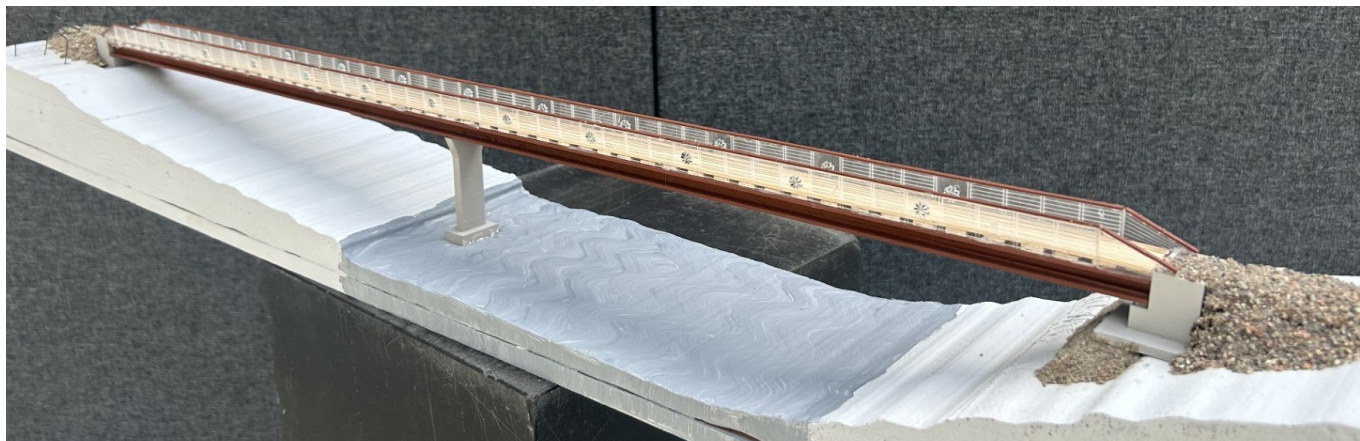


Figur D.4: Bron sedd ovanifrån.

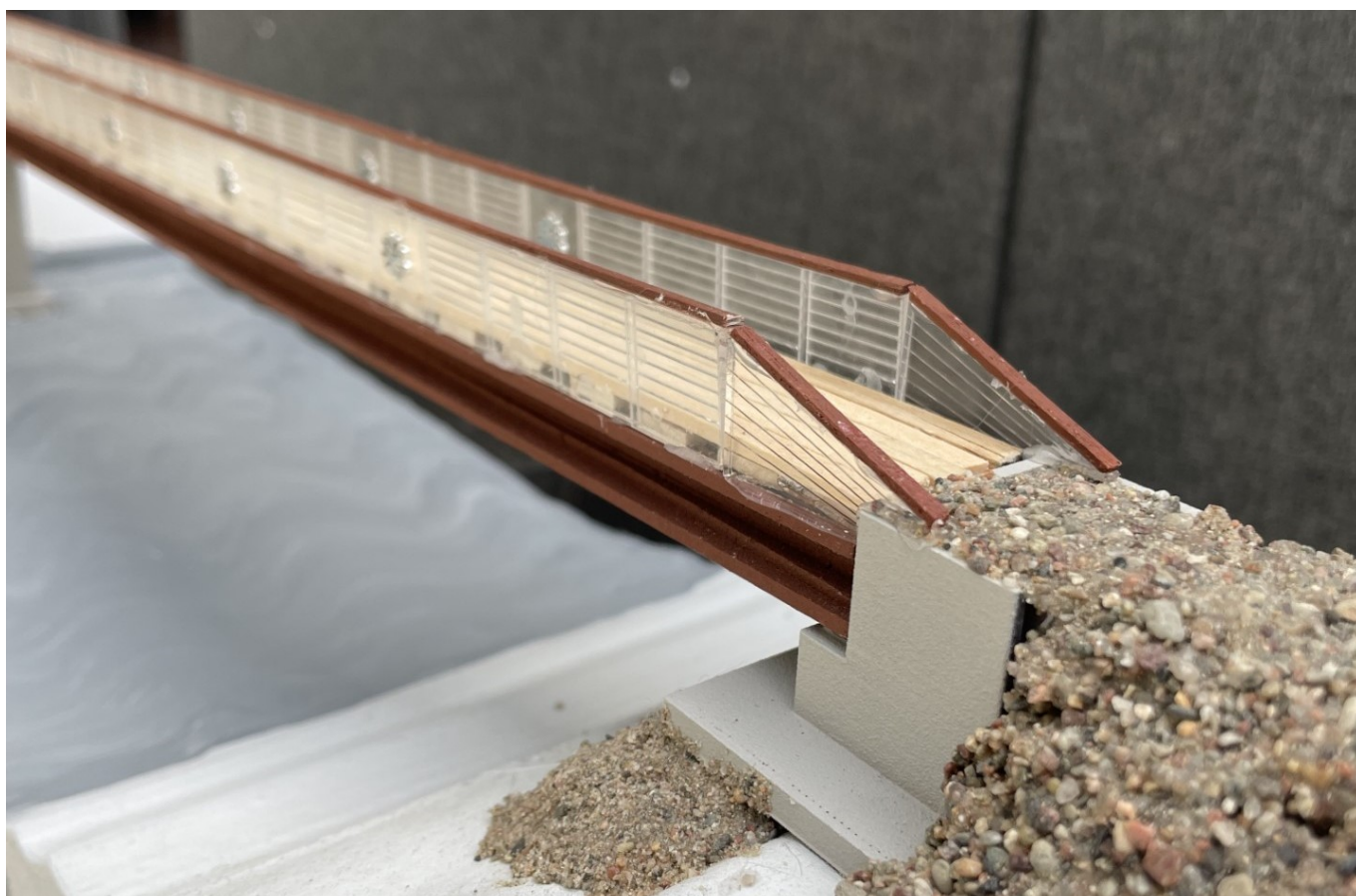


Figur D.5: Över- och underbyggnad.

E Modell skala 1:100



Figur E.1: Modell i skala 1:100.



Figur E.2: Detaljer på bron i skala 1:100.

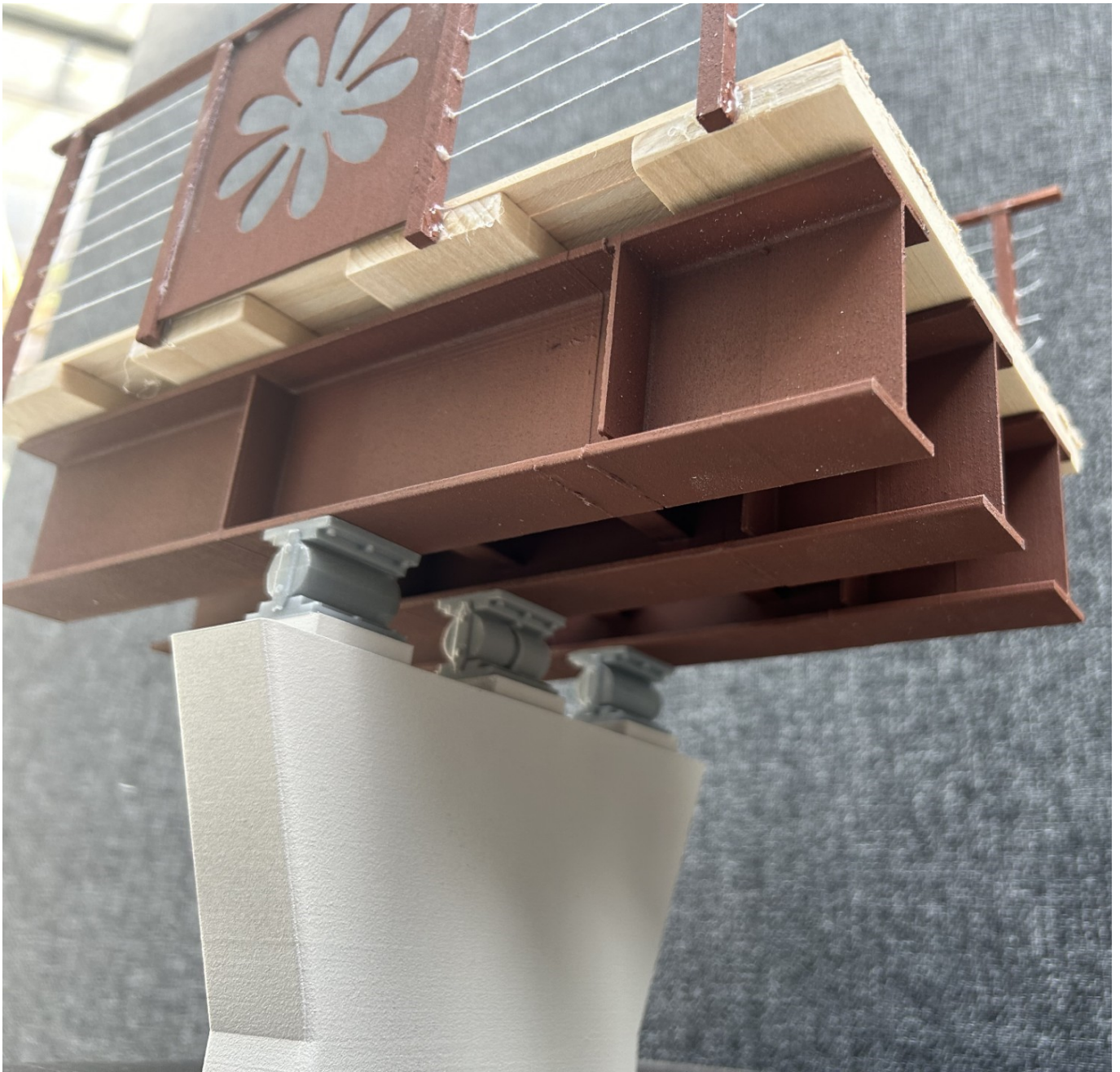
F Modell skala 1:20



Figur F.1: Bild på bron i skala 1:20.



Figur F.2: Detaljer på bron i skala 1:20 ovanifrån.



Figur F.3: Bild på bron i skala 1:20 underifrån.

G Grundläggning

Överkonsoliderad lera är inte lika känslig mot sättningar som annan lera kan vara, men det förekommer fortfarande en risk för skred. Definitionen för överkonsoliderad lera är att den har utsatts för större historiska belastningar och har därmed en lägre vattenhalt än vad den för närvarande befinner sig i (Sällfors, 2013). Detta fenomen uppstår vanligtvis när marken har genomgått perioder av snabb nedbrytning och avlastning, vilket resulterar i en jordmån som är mer tät än vad dess nuvarande belastning skulle kräva.

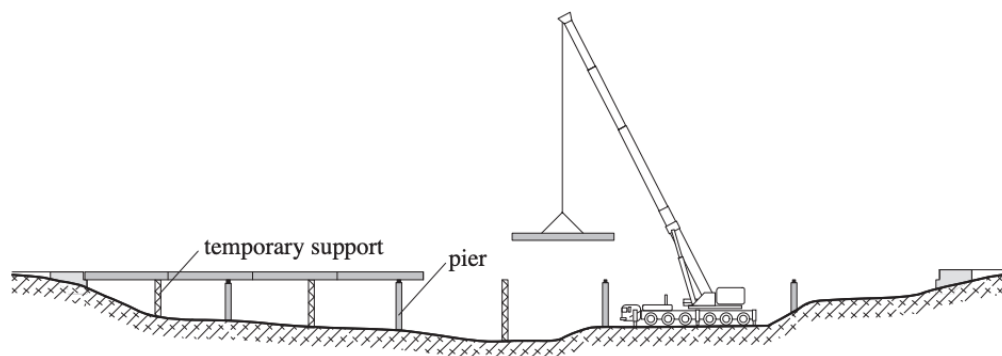
En av de främsta utmaningarna med grundläggning på överkonsoliderad lera är markens beteende under belastning. Eftersom jorden redan har genomgått betydande kompression i det förflutna kan den reagera på ett komplex och ibland svårförutsägbart sätt när den utsätts för ytterligare belastning från grundläggningskonstruktioner (Sällfors, 2013). Vid grundläggning på överkonsoliderad lera kan det därför vara nödvändigt att vidta åtgärder för att kompensera för markens tidigare kompression för att säkerställa att konstruktionen upprätthåller stabilitet över tid. Detta kan inkludera användning av förstärkningsmetoder såsom pålning eller injektion av stabiliserande material för att öka markens bärförmåga och minska risken för sättningar eller deformationer.

En lämplig grundläggningsmetod för bron baserat på dess geoförutsättningar är kalkcementpålar då dessa pålar ökar markens bärförmåga och minskar risken för sättningar (Group, 2022). Kalkcementpålar, även kallat KC-pelare, är en form av pålningsteknik som används för att förstärka marken och ger en stabil grundläggning för konstruktioner. Metoden innebär att hål borrar i marken och dessa fylls sedan med en blandning av kalk och cement, men ibland andra tillsatser beroende på markens specifika egenskaper. Denna blandning reagerar kemiskt med den omgivande leran och bildar en förstärkt pelare som ökar markens bärighet och stabilitet. KC-pelare har fördelen att de kan installeras även i trånga utrymmen och på platser där andra grundläggningsmetoder kanske inte är lämpliga.

H Kranmontering

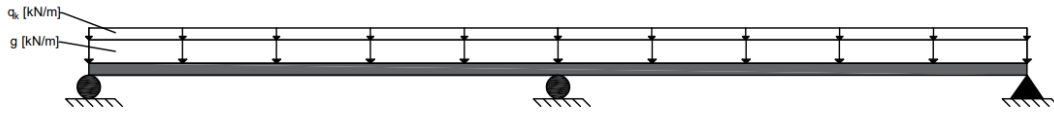
Vid byggnation av broar är det viktigt att beakta monteringsprocessen. För upprättning av stålstrukturer så finns det huvudsakligen tre metoder att välja mellan: kranmontering från mark, upprättning med konsol och montering via lansering (Lebet & Hirt, 2013).

Kranmontering innebär att en kran används för att lyfta upp stålelement från marken. Dessa kan sedan monteras direkt på pelare eller temporära stöd som bör vara kontinuerliga eller diskreta. Ett kontinuerligt stöd verkar utmed hela konstruktionen medan ett diskret stöd verkar i en fast punkt där rörelser och förskjutningar är förhindrade i en specifik riktning. Denna metod är fördelaktig när avståndet till marknivån är relativt litet (<15 meter) vilket gör den passande för det aktuella projektet.

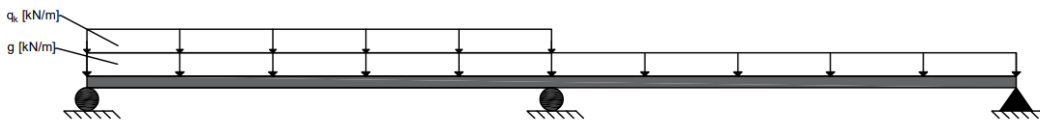


Figur H.1: Exempelbild på kranmontering på tillfälliga stöd.
Exempelbild på kranmontering på tillfälliga stöd (temporary support) och pelare (piers). Bilden är tagen från (Lebet & Hirt, 2013).

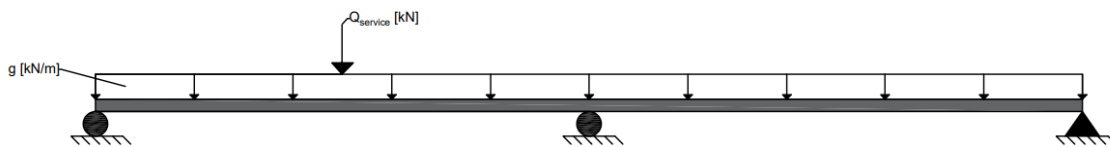
I Lastfall längsled



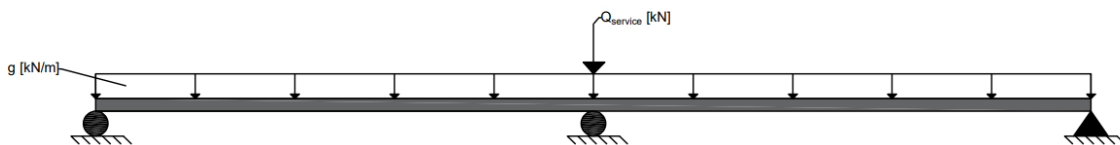
Figur I.1: Lastfall 1. Egentyngd, g , samt utbredd last, q_k , över hela bron. Lasterna i figuren är ej skalenliga.



Figur I.2: Lastfall 2. Egentyngd, g , samt utbredd last, q_k , över halva bron. Lasterna i figuren är ej skalenliga.

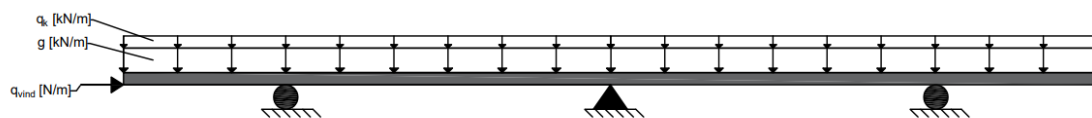


Figur I.3: Lastfall 3. Egentyngd, g , samt punktlast, $Q_{service}$ verkande mitt i bronspannet. Lasterna i figuren är ej skalenliga.

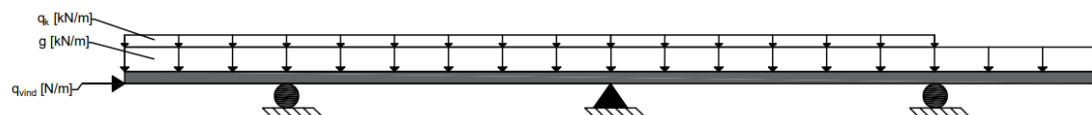


Figur I.4: Lastfall 4. Egentyngd, g , samt punktlast, $Q_{service}$ verkande vid mittstöd. Lasterna i figuren är ej skalenliga.

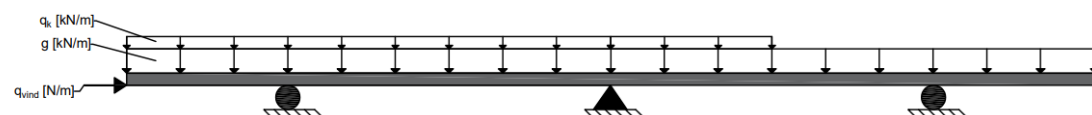
J Lastfall tvärled



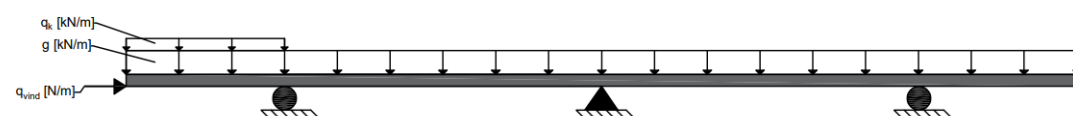
Figur J.1: Lastfall 1. Egentyngd, g , samt utbredd last, q_k , över hela bron. Vindlast, q_{vind} verkande horisontellt. Lasterna i figuren är ej skalenliga.



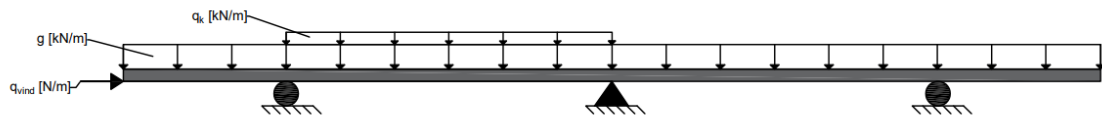
Figur J.2: Lastfall 2. Egentyngd, g , samt utbredd last, q_k . Vindlast, q_{vind} verkande horisontellt. Lasterna i figuren är ej skalenliga.



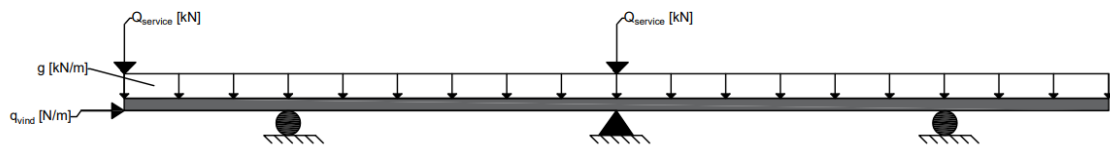
Figur J.3: Lastfall 3. Egentyngd, g , samt utbredd last, q_k . Vindlast, q_{vind} verkande horisontellt. Lasterna i figuren är ej skalenliga.



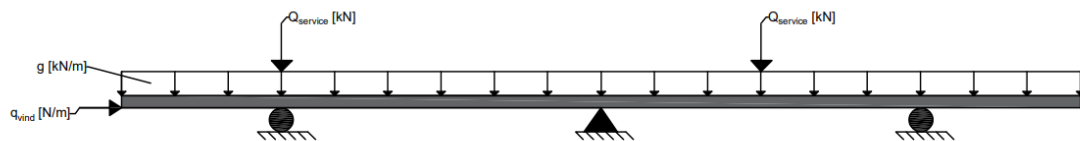
Figur J.4: Lastfall 4. Egentyngd, g , samt utbredd last, q_k . Vindlast, q_{vind} verkande horisontellt. Lasterna i figuren är ej skalenliga.



Figur J.5: Lastfall 5. Egentyngd, g , samt utbredd last, q_k . Vindlast, q_{vind} verkande horisontellt. Lasterna i figuren är ej skalenliga.



Figur J.6: Lastfall 6. Egentyngd, g , samt punktlaster, $Q_{service}$. Vindlast, q_{vind} verkande horisontellt. Lasterna i figuren är ej skalenliga.



Figur J.7: Lastfall 7. Egentyngd, g , samt punktlaster, $Q_{service}$. Vindlast, q_{vind} verkande horisontellt. Lasterna i figuren är ej skalenliga.

K Koldioxidbesparing vid användning av väderbeständigt stål

Konventionellt stål kräver vanligtvis målning eller behandling med jämna mellanrum. Väderbeständigt stål däremot kräver varken målning eller någon annan slags ytbehandling. Under en konstruktions livslängd behöver konventionellt stål målas flera gånger, vilket innebär att en betydande mängd färg används för att skydda balkarna. Enligt SSAB:s verktyg ”Beräkna din koldioxidbesparing” genererar ytbehandlingen av vanligt stål 1062,1 kg koldioxid varje gång den utförs, se figur K.1. Genom att använda väderbeständigt stål istället för konventionellt, kan man därmed spara cirka 1000 kg koldioxid för varje gång det vanliga stålet skulle behöva målas.

Den totala ytan för huvudbalkarna har beräknats med hjälp av MATLAB, se N.7, och med personlig kommunikation från Staffan Lindén på COWI kan färgskiktets tjocklek vid målning variera mellan 40 och 110 mikrometer. Gruppen fann att en färgtjocklek på 80 mikrometer var lämplig med tanke på brons exponering för utomhusförhållanden. Detta innebär att balkarna bör målas med ett tjockare skyddslager jämfört med en inomhusplacering, vilket innebär att koldioxidbesparingen inte blir lika hög som den maximalt skulle kunna bli.



Figur K.1: Utsläpp av koldioxid vid målning av vanligt stål. Utsläpp av koldioxid vid målning av vanligt stål (“Beräkna din koldioxidbesparing”, n.d.).

L Bruks- och brottgränstillstånd

I ekvationerna nedan står G för permanenta laster som alltid finns på konstruktionen medans Q står för variabla laster som varierar med tiden (Al-Emrani m. fl., 2013). P står för spännkrafter som i detta fall är lika med 0 (Swedish Standard Institute, 2002). γ är en partialkoefficient för extra säkerhet vid dimensionering (Al-Emrani m. fl., 2013), Ψ är en faktor som används för olika lastkombinationer och ξ är även den en reduktionsfaktor. Värden för faktorer och koefficienter ges i tabell L.2. Vid dimensionering av bron används olika tillstånd och lastkombinationer beroende på vad som ska kontrolleras.

L.1 Bruksgränstillstånd

Bruksgränstillstånd behandlar de laster som verkar på bron vid normal användning. Kontroll på funktionskrav och gränsvärden genomförs och definieras som att konstruktionen håller på att förlora någon av sina funktioner (Al-Emrani m. fl., 2013). Bruksgränstillstånd kontrolleras för tre olika lastkombinationer: karakteristisk kombination (L.1) frekvent kombination (L.2) samt kvasi-permanent kombination (L.3) (Al-Emrani m. fl., 2013). Karakteristisk är den last som kan förekomma någon enstaka gång under livslängden, frekvent är lastkombination som förekommer några gånger under livslängden och kvasi-permanent är lastens genomsnittliga storlek under en längre tid (Al-Emrani m. fl., 2013). I dimensioneringsberäkningarna, som kan ses i bilaga N.2 och N.4, så har nedböjning kontrollerats i bruksgränstillstånd.

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + Q_{k1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0i} Q_{ki} \quad (\text{L.1})$$

Karakteristisk kombination (Swedish Standard Institute, 2002).

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (\text{L.2})$$

Frekvent kombination (Swedish Standard Institute, 2002).

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (\text{L.3})$$

Kvasipermanent kombination (Swedish Standard Institute, 2002).

Värden på faktorer och koefficienter ges utifrån att det är en GC-bro. Dessa värden kan ses i tabell L.1.

Reduktionsfaktorer och partial koefficienter		Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Permanent last (egenvikt)	gynnsam	-	-	-
	ogynnsam	-	-	-
Utbredd last (variabel)	gynnsam	0,4	0,4	0
	ogynnsam	0,4	0,4	0
Punktlast (variabel)	gynnsam	0,75	0,75	0
	ogynnsam	0,75	0,75	0

Tabell L.1: Partialkoefficienter och reduktionsfaktorer i bruksgränstillstånd (Swedish Standard Institute, 2002).

L.2 Brottgränstillstånd

Brottgränstillstånd behandlar konstruktionens dimensionerande maximala laster. Detta innebär att man tar hänsyn till människors och konstruktionens säkerhet. I brottgränstillstånd kontrolleras alltså konstruktionens bärförmåga (Al-Emrani m. fl., 2013). Lasterna kan kombineras på olika sätt beroende på vilken eller vilka laster som beaktas som huvudlast. I den övre ekvationen i L.4 beaktas egentygden som huvudlast medans den nedre ekvationen beaktar de variabla lasterna som huvudlast (Swedish Standard Institute, 2002). De laster som inte beaktas som huvudlast reduceras med en faktor, Ψ . I dimensioneringsberäkningarna, vilket kan ses i bilaga N.1, så har tvärkraft- och momentkapacitet kontrollerats i brottgränstillstånd.

$$\begin{aligned} \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \Psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \\ \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \end{aligned} \quad (\text{L.4})$$

Brottgränstillstånd ges som den minst gynnsamma av de två ekvationerna (Swedish Standard Institute, 2002).

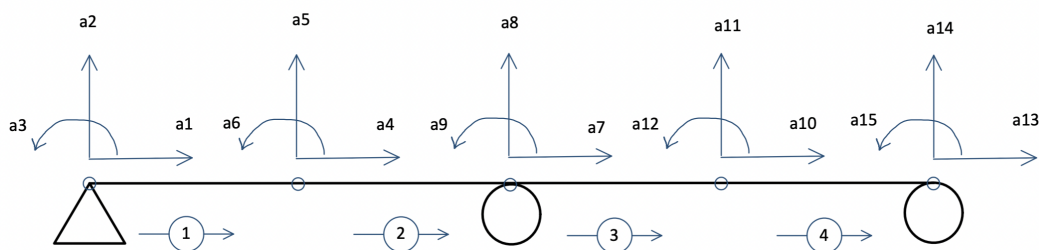
Värden på faktorer och koefficienter ges baserat på brotttyp, i detta fall en GC-bro. Dessa värden kan ses i tabell L.2.

Reduktionsfaktorer och partial koefficienter		Ψ_0	ξ	Υ
Permanent last (egenvikt)	gynnsam	-	0.85	1
	ogynnsam			1.35
Utbredd last (variabel)	gynnsam	0.4	-	0
	ogynnsam			1.5
Punktlast (variabel)	gynnsam	-	-	0
	ogynnsam			1.5

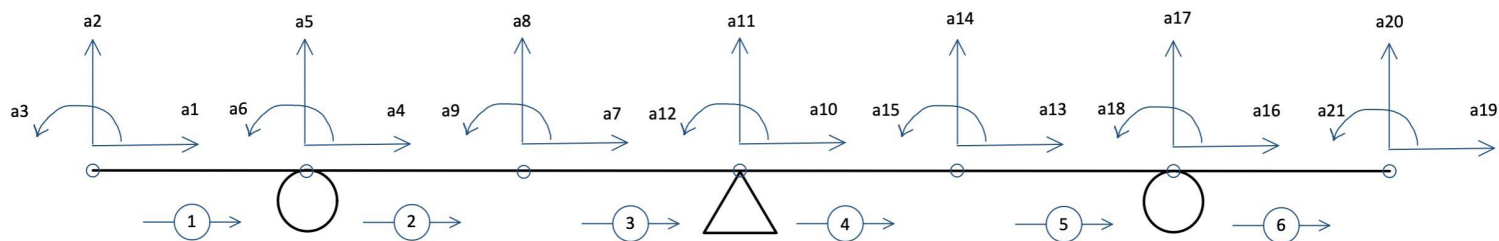
Tabell L.2: Partialkoefficienter och reduktionsfaktorer i brottgränstillstånd (Swedish Standard Institute, 2002).

M Systemmodeller CALFEM

Nedan visas systemmodeller av brokonceptet i tvär- och längsled. Dessa används som grund för beräkningarna i CALFEM, se bilaga N.7.



Figur M.1: Systemmodell för CALFEM i längsled med 15 frihetsgrader och fyra element.



Figur M.2: Systemmodell för CALFEM i tvärled med 21 frihetsgrader och sex element.

N MATLAB beräkning

Nedan redovisas beräkningarna som genomfördes i arbetet.

N.1 Beräkning längsled

```
% Kandidatarbete ACEX11-24-53 MAHMOUD ALHAMAD, WILMA ERIKSSON
% EMIN GUSTAFSSON, MOHAMMAD SAMI RAAD, ALVA SVENSK, ARVID THEGERSTRÖM
% Kandidatarbete Grupp 4
% Uppgifter: GC-bro
% Källa: (Al-Emrani m. fl., 2020).

% Rensa arbetsmiljön
close all; clear; clc;

% Definition av dimensioner
L_bro = 90; % Total längd på bron [m]
B_bro = 3; % Bredd på bron (m)
L_span = L_bro / 2; % Längd av varje spännvidd (m)

% Definition av fysikaliska och materialspecifika egenskaper
tyngdacceleration = 9.81; % Tyngdacceleration [m/s^2]
densitetStal = 7800; % Densitet av stål [kg/m^3]
densitetTra = 450; % Densitet av trä [kg/m^3]
egenViktRackePerMeter = 500; % Egenvikt per meter av räckle [N/m]

% Definition av balkens dimensioner (HEA 1000)
flansBredd = 0.3; % Flänsbredd [m]
flansTjocklek = 0.031; % Flänstjocklek [m]
livhojd = 0.928; % Livhöjd [m]
livtjocklek = 0.0165; % Livtjocklek [m]

% Träbalkdimensioner
traTjocklek = 0.140; % Trätjocklek [m]
traBredd = 0.495; % Trä balkbredd [m]
avstandTvarBalkar = traBredd + 0.6; % Avstånd mellan tvärbalkar,
% från mitten till mitten [m]

% Dimensioner för svetsar
svetsStorlek = 0.04; % Svetsens a-mått [m]

% Beräkning av vikttätheter för material
vikttathetStal = densitetStal * tyngdacceleration; % Vikttäthet för stål [N/m^3]
vikttathetTra = densitetTra * tyngdacceleration; % Vikttäthet för trä [N/m^3]

% Beräkning av tvärsnittsarean för stål balken
tvarsnittAreaStal = 2 * flansBredd * flansTjocklek + livhojd * livtjocklek;
% Balktvärsnitts area [m^2]

egenViktStalbalk = tvarsnittAreaStal * vikttathetStal; % Egenvikt per meter av stål balk [N/m]
egenViktTrabalk = traTjocklek * B_bro * vikttathetTra * traBredd / avstandTvarBalkar;
% Egenvikt per meter av trä balk [N/m]

% Beräkning av total egenvikt per meter för längsled (inklusive stål balkar)
fprintf(' <strong>Total egenvikt per meter</strong>\n');
totalEgenViktLangsled = 3 * egenViktStalbalk + egenViktTrabalk + 2 * egenViktRackePerMeter; % [N/m]
fprintf(' Egenvikt som verkar på balkar (längsled): %2.2f [kN/m]\n', totalEgenViktLangsled * 1e-3);

% Definition av laster (Brottgränstillstånd)
P_punkt = 1.5 * 120e3 / 3; % Punktlast [N]
W_egenvikt = 1 * 0.85 * (totalEgenViktLangsled) / 3; % Egenvikt per meter [N/m]
W_trafik = 1.5 * 3.6e3 * B_bro * 0.4 / 3; % Trafiklast per meter [N/m]
```

```

% Definiera intervall för beräkningar över olika sektioner
x1 = linspace(0, L_span, 100); % Intervall för snitt 1 från A till B
x2 = linspace(L_span, 2*L_span, 100); % Intervall för snitt 2 från B till C
x3 = linspace(0, L_span/2, 50); % Intervall för första halvan av AB (Fall 3)
x4 = linspace(L_span/2, L_span, 50); % Intervall för andra halvan av AB (Fall 3)

% Beräkna moment vid stöd B för alla fall
M_B_1 = - (W_trafik + W_egenvikt) * L_span^2 / 8;
M_B_2 = - (W_trafik + 2 * W_egenvikt) * L_span^2 / 16;
M_B_3 = - (W_egenvikt * L_span^2 / 8) - 3 * P_punkt * L_span / 32;
M_B_4 = - (W_egenvikt * L_span^2 / 8);

% Beräkna reaktionskrafter vid stöden A, B och C för alla fall
R_A_1 = (W_trafik + W_egenvikt) * L_span / 2 + M_B_1 / L_span;
R_B_1 = -2 * M_B_1 / L_span + (W_trafik + W_egenvikt) * L_span;
R_C_1 = R_A_1;

R_A_2 = (W_trafik + W_egenvikt) * L_span / 2 + M_B_2 / L_span;
R_B_2 = -2 * M_B_2 / L_span + (W_trafik + 2 * W_egenvikt) * L_span / 2;
R_C_2 = W_egenvikt * L_span / 2 + M_B_2 / L_span;

R_A_3 = W_egenvikt * L_span / 2 + M_B_3 / L_span + P_punkt / 2;
R_B_3 = -2 * M_B_3 / L_span + W_egenvikt * L_span + P_punkt / 2;
R_C_3 = R_A_3 - P_punkt / 2;

R_A_4 = W_egenvikt * L_span / 2 + M_B_4 / L_span;
R_B_4 = -2 * M_B_4 / L_span + W_egenvikt * L_span + P_punkt;
R_C_4 = R_A_4;

% Beräkna tvärkrafter i olika sektioner
V11 = R_A_1 - (W_trafik + W_egenvikt) * x1;
V12 = R_A_1 + R_B_1 - (W_trafik + W_egenvikt) * x2;
V21 = R_A_2 - (W_trafik + W_egenvikt) * x1;
V22 = -R_C_2 - W_egenvikt * x2 + W_egenvikt * 2 * L_span;
V31 = R_A_3 - W_egenvikt * x3;
V32 = R_A_3 - P_punkt - W_egenvikt * x4;
V33 = R_A_3 + R_B_3 - P_punkt - W_egenvikt * x2;
V41 = R_A_4 - W_egenvikt * x1;
V42 = R_A_4 + R_B_4 - W_egenvikt * x2 - P_punkt;

% Beräkna moment i olika sektioner
M11 = R_A_1 * x1 - (W_trafik + W_egenvikt) / 2 * x1.^2;
M12 = (R_A_1 + R_B_1) * x2 - (W_trafik + W_egenvikt) / 2 * x2.^2 - R_B_1 * L_span;
M21 = R_A_2 * x1 - (W_trafik + W_egenvikt) / 2 * x1.^2;
M22 = R_C_2 * (2 * L_span - x2) - (W_egenvikt / 2) * (2 * L_span - x2).^2;
M31 = R_A_3 * x3 - (W_egenvikt / 2) * x3.^2;
M32 = R_A_3 * x4 - (W_egenvikt / 2) * x4.^2 - P_punkt * (x4 - L_span / 2);
M33 = R_A_3 * x2 + R_B_3 * (x2 - L_span) - (W_egenvikt / 2) * x2.^2 - P_punkt * (x2 - L_span / 2);
M41 = R_A_4 * x1 - (W_egenvikt / 2) * x1.^2;
M42 = (R_A_4 + R_B_4) * x2 - (W_egenvikt / 2) * x2.^2 - R_B_4 * L_span - P_punkt * (x2 - L_span);

% Sammanställ tvärkrafts- och momentdiagram för alla fall
V1 = [V11, V12];
V2 = [V21, V22];
V3 = [V31, V32, V33];
V4 = [V41, V42];

M1=[M11 M12];
M2=[M21 M22];
M3=[M31 M32 M33];
M4=[M41 M42];

x_full = [x1, x2];
xx_full = [x3, x4, x2];

% Plottning av tvärkraftsdiagram
figure
subplot(2, 1, 1);
hold on;
grid on;

```

```

plot(x_full, V1, 'b', x_full, V2, 'r', xx_full, V3, 'g', x_full, V4, 'm');
title('Tvärkraftsdiagram');
xlabel('Längd [m]');
ylabel('V(x) [kN]');
line(get(gca, 'xlim'), [0 0], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1.5); % Ritar en svart linje vid y = 0
legend('Fall 1: Egenvikt och trafiklast över hela balken',
'Fall 2: Trafiklast över enbart AB',
'Fall 3: Egenvikt och punktlast i mitten av spännvidden',
'Fall 4: Egenvikt och punktlast över mittstödet');

% Plottning av momentdiagram
subplot(2, 1, 2);
hold on;
grid on;
plot(x_full, M1, 'b', x_full, M2, 'r', xx_full, M3, 'g', x_full, M4, 'm');
title('Momentdiagram');
xlabel('Längd [m]');
ylabel('M(x) [kNm]');
line(get(gca, 'xlim'), [0 0], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1.5); % Ritar en svart linje vid y = 0
legend('Fall 1: Egenvikt och trafiklast över hela balken',
'Fall 2: Trafiklast över enbart AB',
'Fall 3: Egenvikt och punktlast i mitten av spännvidden',
'Fall 4: Egenvikt och punktlast över mittstödet', 'Location', 'southeast');

% Beräkna och visa maximala moment och tvärkrafter
[Max_moment1, idx_m1] = max(abs(M1)); % Max moment Fall 1
[Max_tvarkraft1, idx_v1] = max(abs(V1)); % Max tvärkraft Fall 1
[Max_moment2, idx_m2] = max(abs(M2)); % Max moment Fall 2
[Max_tvarkraft2, idx_v2] = max(abs(V2)); % Max tvärkraft Fall 2
[Max_moment3, idx_m3] = max(abs(M3)); % Max moment Fall 3
[Max_tvarkraft3, idx_v3] = max(abs(V3)); % Max tvärkraft Fall 3
[Max_moment4, idx_m4] = max(abs(M4)); % Max moment Fall 4
[Max_tvarkraft4, idx_v4] = max(abs(V4)); % Max tvärkraft Fall 4

% Beräkna maximala värden över alla fall (Lasteffekter)
Med = max([max(abs(M1)), max(abs(M2)), max(abs(M3)), max(abs(M4))]) / 1e3; % [kNm]
Ved = max([max(abs(V1)), max(abs(V2)), max(abs(V3)), max(abs(V4))]) / 1e3; % [kN]
disp(' ');
fprintf('<strong>Lasteffekter, Längsled</strong>\n');
fprintf('Maximalt moment över alla lastfall Med = %2.2f kNm\n', Med);
fprintf('Maximal tvärkraft över alla lastfall Ved = %2.2f kN\n', Ved);

% Beräkningar av kapacitet för böjmoment och tvärkraft
% Initialparametrar
fy = 355e3; % Stålets flytspänning [kPa]
Es = 210*10^9; % elasticitetsmodul allmänt stål [Pa]
gamma_M0 = 1;
gamma_M1 = 1; % Partialkoefficient för materialets hållfasthet
XLT = 1; % Reduktionsfaktor mot vippning (antag stagad balk)
antagStyvLivplat = 1; % Antagande om avstyvad livplåt
mellanAvstyvningar = 2; % Avstånd mellan mellanliggande avstyvningar [m]
epsilon = sqrt(235e3 / fy); % Parameter för slankhet, korrekt enhet [Pa]

disp(' ');
fprintf('<strong>Böjmomentkapacitet, Längsled</strong>\n');

% Beräkning av slankhet och tvärsnittsklass för fläns
flansSlankhet = ((flansBredd - livtjocklek) / 2 - sqrt(2) * svetsStorlek) / flansTjocklek;
if flansSlankhet < 9 * epsilon
    TK_flans = 1;
elseif flansSlankhet < 10 * epsilon
    TK_flans = 2;
elseif flansSlankhet < 14 * epsilon
    TK_flans = 3;
else
    TK_flans = 4;
end

% Beräkning av slankhet och tvärsnittsklass för liv

```

```

livSlankhet = (livhojd - 2 * sqrt(2) * svetsStorlek) / livtjocklek;
if livSlankhet < 72 * epsilon
    TK_liv = 1;
elseif livSlankhet < 83 * epsilon
    TK_liv = 2;
elseif livSlankhet < 124 * epsilon
    TK_liv = 3;
else
    TK_liv = 4;
end

% Bestämning av sammanlagd tvärsnittsklass
Tvarsnittsklass = max(TK_flans, TK_liv);
fprintf('Tvärsnittsklas: %2.0f\n', Tvarsnittsklass);

% Beräkning av böjmotstånd och böjmomentkapacitet
Ix = (lvtjocklek * livhojd^3) / 12 + 2 * ((flansBredd * flansTjocklek^3) /
12 + (flansBredd * flansTjocklek) * ((livhojd + flansTjocklek) / 2)^2);
if Tvarsnittsklass <= 2
    W = flansTjocklek * flansBredd * (livhojd + flansTjocklek) + (lvtjocklek * livhojd^2) / 4;
% Plastiskt böjmotstånd [m^3]

    disp('Räknar med plastiskt böjmotstånd (Wpl)');
elseif Tvarsnittsklass == 3
    W = Ix / ((livhojd + 2 * flansTjocklek) / 2); % Elastiskt böjmotstånd [m^3]
    disp('Räknar med elastiskt böjmotstånd (Wel)');
else
    disp('ERROR: Ogiltig tvärsnittsklass för korrekt böjmotstånd');
    W = 0;
end

M_b_rd = XLT * W * fy / gamma_M1; % Beräknad böjmomentkapacitet [kNm]
Verk_Moment = Med / M_b_rd; % Verkningsgrad för moment
fprintf('Momentkapacitet: M_b_rd = %2.2f [kNm]\n', M_b_rd);
fprintf('Verkningsgrad Moment: %2.2f%%\n', 100 * Verk_Moment);

% Beräkning av tvärkraftskapacitet
disp(' ');
fprintf('<strong>Tvärfkraftskapacitet , Längsled</strong>\n');
n = 1.2; % n-faktor för stälkvaliteter upp till och med S460
if antagStyvLivplat == 1
    disp('OBS: Kontrollera antagande om styva/veka avstyvningar');
else
    disp('Styva ändavstyvningar antagna');

    if svetsStorlek / (livhojd - 2 * sqrt(2) * svetsStorlek) < 1
        K_tao = 4 + 5.34 / (mellanAvstyvningar / (livhojd - 2 * sqrt(2) * svetsStorlek))^2;
% Bucklingskoefficient
    else
        K_tao = 5.34 + 4 / (mellanAvstyvningar / (livhojd - 2 * sqrt(2) * svetsStorlek))^2;
    end

    if (livhojd / livtjocklek) <= (31 * epsilon * sqrt(K_tao) / n)
        disp('OK, Ingen risk för Skjuvbuckling uppstår');
        Av = n * livhojd * livtjocklek;
        V_pl_rd = Av * (fy / sqrt(3)) / gamma_M0; % Plastisk tvärkraftskapacitet [kN]
        Verk_Tvarkraft = Ved / V_pl_rd; % Verkningsgrad för tvärkraft
        fprintf('\nTvärfkraftskapacitet: Vplrd = %2.2f [kN]', V_pl_rd);
        fprintf('\nVerkningsgrad Tvärkraft: %2.2f%%\n', 100 * Verk_Tvarkraft);
    else
        disp('Varning: Risk för Skjuvbuckling uppstår');
        slankhetsgrans = (livhojd / livtjocklek) / (37.4 * epsilon * sqrt(K_tao));
        if slankhetsgrans < 0.8 / n
            Xw = n; % Skjuvbucklingskoefficienten enligt Eurokod
        elseif slankhetsgrans < 1.08
            Xw = 0.83 / slankhetsgrans;
        elseif slankhetsgrans > 1.08
            Xw = 1.37 / (0.7 + slankhetsgrans);
        else
            disp('Error i beräkning av skjuvbucklingskoefficient');
        end
    end
end

```

```

end
V_pl_rd = Xw * livhojd * livtjocklek * fy / (sqrt(3) * gamma_M1);
% Beräknad bucklingskapacitet [kN]
Verk_Tvarkraft = Ved / V_pl_rd; % Verkningsgrad för tvärkraft
fprintf('\nBucklingskapacitet: V_rd = %2.2f kN\n', V_pl_rd);
fprintf('Verkningsgrad Tvärkraft: %2.2f%%\n', 100 * Verk_Tvarkraft);
end
end

% INTERAKTIONSKONTROLL mellan moment- och tvärkraftskapacitet
W_pl_flans = 2 * flansTjocklek * flansBredd * (livhojd + flansTjocklek) / 2;
% Plastiskt böjmotstånd för flansar [m^3]

M_pl_flans_rd = W_pl_flans * fy / gamma_M1; % Plastiskt momentkapacitet för flansar [kNm]
disp(' ');
fprintf('<strong>INTERAKTIONSKONTROLL mellan moment- och tvärkraftskapacitet</strong>\n');
if Med < M_pl_flans_rd && Ved < V_pl_rd
    disp('Interaktionen mellan moment och tvärkraft är OK');
elseif Ved < 0.5 * V_pl_rd
    disp('Interaktionen mellan moment och tvärkraft är OK');
elseif Med <= (M_pl_flans_rd + (M_b_rd - M_pl_flans_rd) * (1 - ((2 * Ved / V_pl_rd) - 1)^2))
    disp('Interaktionen mellan moment och tvärkraft är OK');
else
    disp('Interaktionen mellan moment och tvärkraft är EJ OK');
end

Total egenvikt per meter
Egenvikt som verkar på balkar (längsled): 9.62 [kN/m]

Lasteffekter , Längsled
Maximalt moment över alla lastfall Med = 1236.88 kNm
Maximal tvärkraft över alla lastfall Ved = 137.43 kN

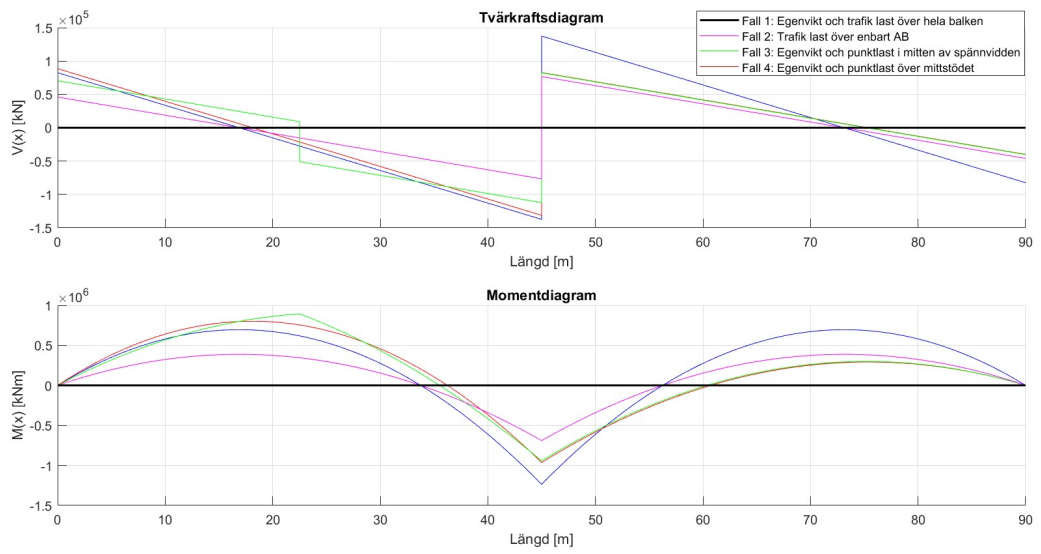
Böjmomentkapacitet , Längsled
Tvärsnittsklas: 1
Räknar med plastiskt böjmotstånd (Wpl)
Momentkapacitet: M_b_rd = 4427.23 [kNm]
Verkningsgrad Moment: 27.94%

Tvärkraftskapacitet , Längsled
Styva ändavstyvningar antagna
Varning: Risk för Skjuvbuckling uppstår

Bucklingskapacitet: V_rd = 3115.31 kN
Verkningsgrad Tvärkraft: 4.41%

INTERAKTIONSKONTROLL mellan moment- och tvärkraftskapacitet
Interaktionen mellan moment och tvärkraft är OK

```



Figur N.1: Moment- och tvärkraftsdiagram.

N.2 Nedböjning längsled

```

% Kandidatarbete ACEX11–24–53 MAHMOUD ALHAMAD, WILMA ERIKSSON
% EMIN GUSTAFSSON, MOHAMMAD SAMI RAAD, ALVA SVENSK, ARVID THEGERSTRÖM
% Kandidatarbete Grupp 4
% Uppgifter: GC–bro
% Källa: (Al–Emrani m. fl., 2020).

% Nedböjning beräkningar
disp(' ')
fprintf(' <strong>Nedböjning_beräkningar ,_Längsled </strong>\n');

% Definition av laster (Bruksgränstillstånd)
P_punkt1 = 0.75*120e3/3; % Punktlast [N]
W_egenvikt1=totalEgenViktLangsled/3; % Egenvikt per meter [N/m]
W_trafik1 = 3.6e3*B_bro*0.4/3; % Trafiklast per meter (N/m)

Edof=[1 1 2 3 4 5 6; 2 4 5 6 7 8 9;3 7 8 9 10 11 12;4 10 11 12 13 14 15]; %Topologimatrix
bc=[1 0; 2 0; 8 0; 14 0]; % Upplagsvillkor
ex=[0 L_span/2;L_span/2 L_span;L_span 3*L_span/2;3*L_span/2 2*L_span]; %Koordinatvektorer för
%elementen

ey=zeros(4,2); %Koordinatvektorer för elementen
ep=[Es tvarsnittAreaStal Ix]; %Skapar en vektor med elementegenskaper

Nedboj_max=0; %Fördefinierar (första spann)

%LOOPAR DE 4 OLIKA LASTFALLEN
for i=1:4
    f=zeros(15,1);
    K=zeros(15);
    eq = repmat([0 -(W_egenvikt1 + W_trafik1)], 4, 1);
    if i == 2
        eq(3:4, 2) = -W_egenvikt1;
    elseif i == 3
        eq(:, 2) = -W_egenvikt1;
        f(5) = -P_punkt1;
    elseif i == 4
        eq(:, 2) = -W_egenvikt1;
        f(8) = -P_punkt1;
    end
for n=1:4
    [Ke, fe]=beam2e(ex(n,:), ey(n,:), ep, eq(n,:)); % Tar fram styvhetsmatrix
% och lastvektor för varje balkelement

    [K, f]=assem(Edof(n,:), K, Ke, f, fe); % Assemblering till global
% styvhetsmatrix och global lastvektor
end

[a, r]=solveq(K, f, bc); %Beräknar förskjutningarna a[m] i noderna samt upplagskrafterna r[N]
Ed=extract(Edof, a); %Elementkrafterna beräknas, [N]

% Beräknar nedböjningar för varje element
for n = 1:4
    [es, edi, ec] = beam2s(ex(n,:), ey(n,:), ep, Ed(n,:), eq(n,:), 100);
    currentMaxNedboj = max(abs(edi(:,2))); % Maximal nedböjning
    if currentMaxNedboj > Nedboj_max
        Nedboj_max = currentMaxNedboj;
    end
end
%NEDBÖJNING PLOT
figure(1+i)
sgtitle(sprintf('Nedböjning ,_Lastfall_%d', i)); % Titel för varje lastfall
xlabel('Längd [m]')
sfac=scalfact2(ex(3,:), ey(3,:), Ed(3,:), 0.5); % Anger skala på figurerna
for n=1:4
    eldraw2(ex(n,:), ey(n,:), [2 1 0]);
    eldisp2(ex(n,:), ey(n,:), Ed(n,:), [1 2 1], sfac);
end

```

```

    end
end

fprintf('Nedböjning_max: %2.2f [mm]\n', Nedboj_max * 1e3)
fprintf('Tillåten nedböjning: %2.2f mm\n', L_span * 1e3 / 400);
if Nedboj_max > (L_span / 400)
    disp('Nedböjningskrav ej uppfyllda!');
else
    disp('Alla nedböjningskrav uppfyllda.');
```

end

```

% Kontroll av fri höjden under balkarna
disp(' ')
fprintf('<strong>Kontroll av den fria höjden under balkarna</strong>\n');
```

```

% Beräkna total höjd inklusive nedböjning
balkhojd = 2 * flansTjocklek + livhojd; % Total höjd av balken
overbyggghojd = balkhojd + traTjocklek + Nedboj_max; % Total höjd av
                                                    % överbyggnaden inklusive nedböjning
```

```

% Fastställer tillåten höjd under balkarna
tillatenhojd = 1.4; % Maxtillåtna avstånd från brobanas överkant [m]
```

```

% Kontrollera om den fria höjden under balkarna är tillräcklig
if overbyggghojd < tillatenhojd
    disp('Fri höjden under balkarna är OK.');
```

```

else
    disp('Fri höjden under balkarna är ej OK!');
```

end

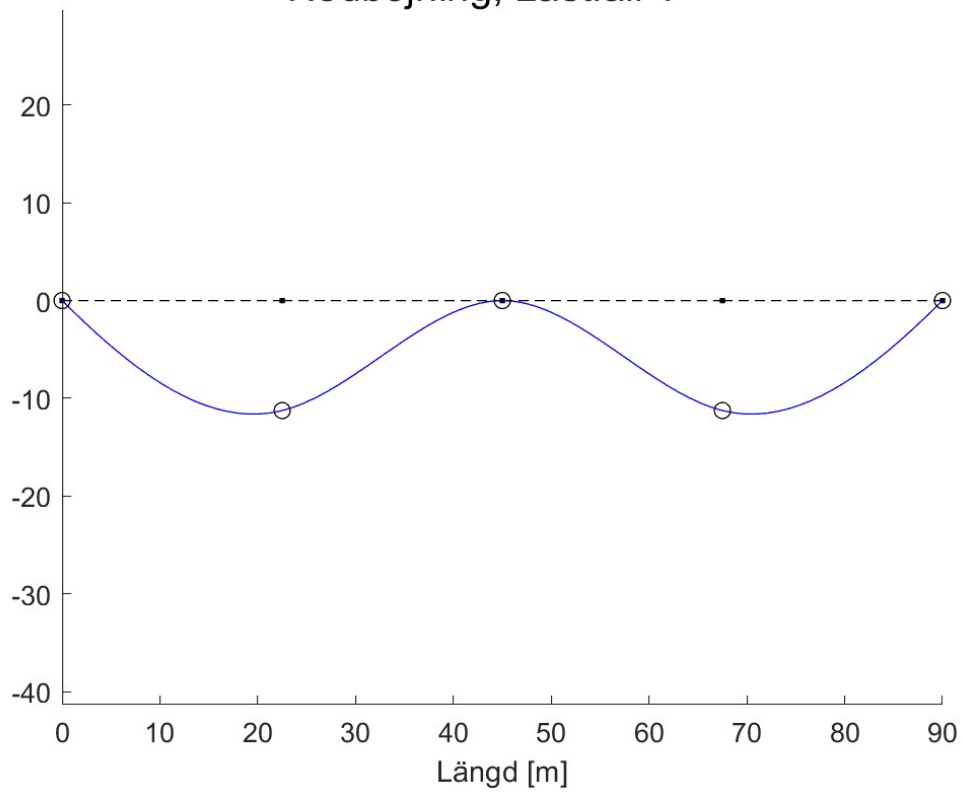
```

Nedböjning beräkningar, Längsled
Nedböjning max: 110.54 [mm]
Tillåten nedböjning: 112.50 mm
Alla nedböjningskrav uppfyllda.
```

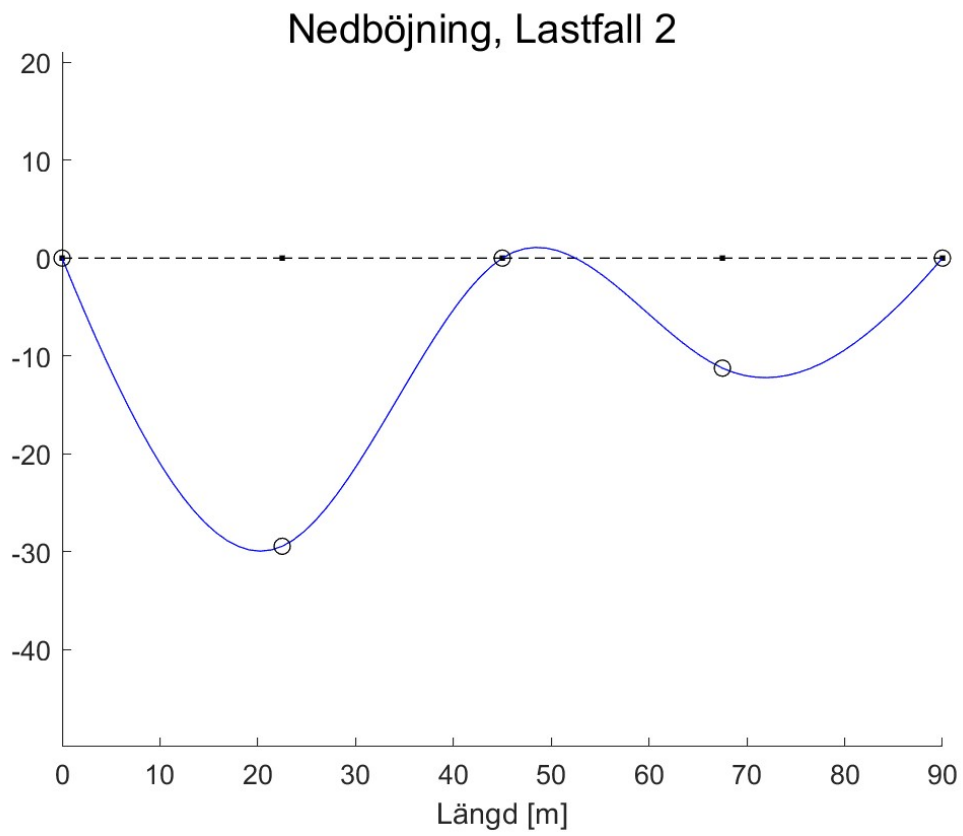
```

Kontroll av den fria höjden under balkarna
Fri höjden under balkarna är OK.
```

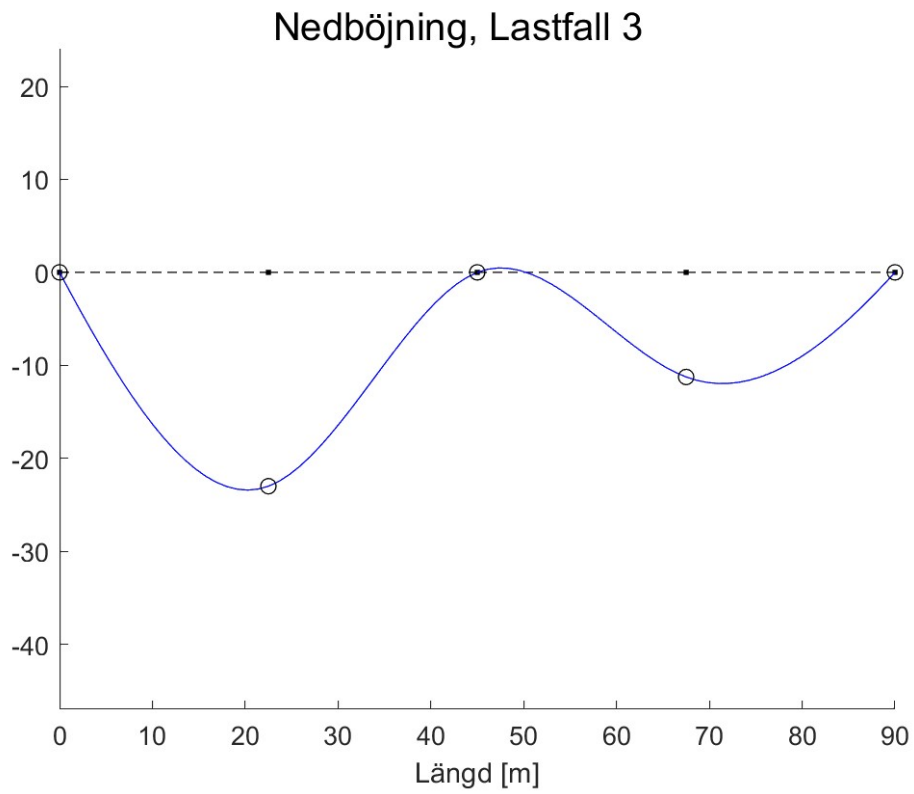
Nedböjning, Lastfall 1



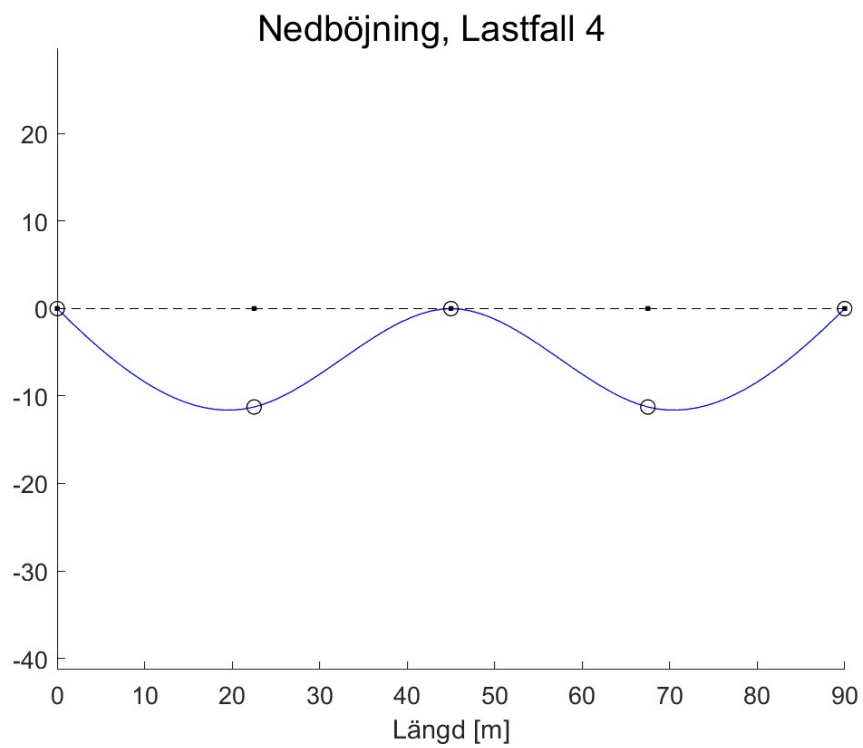
Figur N.2: Nedböjning för lastfall 1.



Figur N.3: Nedböjning för lastfall 2.



Figur N.4: Nedböjning för lastfall 3.



Figur N.5: Nedböjning för lastfall 4.

N.3 Tvärled

```

% Kandidatarbete ACEX11–24–53 MAHMOUD ALHAMAD, WILMA ERIKSSON
% EMIN GUSTAFSSON, MOHAMMAD SAMI RAAD, ALVA SVENSK, ARVID THEGERSTRÖM
% Kandidatarbete Grupp 4
% Uppgifter: GC–bro
% Källa: (Al–Emrani m. fl., 2013).

% Rensa arbetsmiljön
close all; clear; clc;

% Konstanta värden och initialiseringar
% Dimensioner och materialspecifika egenskaper
L_bro = 90; % Total längd på bron [m]
B_bro = 3; % Bredd på bron [m]
L_span = L_bro / 2; % Längd av varje spännvidd [m]
tyngdacceleration = 9.81; % Tyngdacceleration [m/s^2]
densitetStal = 7800; % Densitet av stål [kg/m^3]
densitetTra = 450; % Densitet av trä [kg/m^3]
egenViktRackePerMeter = 500; % Egenvikt per meter av räckes [N/m]

% Definition av balkens dimensioner (HEA 1000)
flansBredd = 0.3; % Flänsbredd [m]
flansTjocklek = 0.031; % Flänstjocklek [m]
livhojd = 0.928; % Livhöjd [m]
livtjocklek = 0.0165; % Livtjocklek [m]

% Träbalkdimensioner
traTjocklek = 0.140; % Trätjocklek [m]
traBredd = 0.495; % Trä balkbredd [m]
avstandTvarBalkar = traBredd + 0.6; % Avstånd mellan tvärbalkar,
% från mitten till mitten [m]

rackehojd = 1.4; % Räckehöjd [m]

% Beräkningar av vikttätheter och egenvikter
vikttathetTra = densitetTra * tyngdacceleration; % Vikttäthet för trä [N/m^3]
egenViktTrabalk = traTjocklek * B_bro * vikttathetTra * traBredd / avstandTvarBalkar; % Egenvikt
% per meter av träbalk [N/m]
totalEgenViktTvarled = egenViktTrabalk + 2 * egenViktRackePerMeter * avstandTvarBalkar; % Total egen
% för tvärled [N/m]

% Visa beräknade värden
fprintf(' <strong>Total egenvikt per meter</strong>\n');
fprintf(' Egenvikt som verkar på träfarbana (tvärled): %2f [kN/m]\n', totalEgenViktTvarled * 1e-3);

% Vindlastberäkningar
overbyggnadhojd = rackehojd + traTjocklek + livhojd + 2 * flansTjocklek; % Total höjd på
% överbyggnaden [m]

referensArea = L_bro * overbyggnadhojd; % Referensarea i x-led med en räckes på 1.4 m [m^2]
% Haradalsbron i Helsingborg kommun => Terrängtyp = hav
% => Referensvindhastigheten (vb) = 26 [m/s] , Tabell 4.1
% h = 10 [m] höjden ovan mark till den beräknade delens översta kant
% => qp= (1.13+1.22)/2 =1.175 [kPa], Karakteristiskt hastighetstryck, Tabell 4.2 (VVFS 2007:494)
hastighetstryck = 1.175; % Karakteristiskt hastighetstryck från standard [kPa]
% Beräkning av dragkoefficient
aspectRatio = B_bro / overbyggnadhojd;
if aspectRatio <= 0.5
    Cf = 2.4;
elseif aspectRatio < 5
    Cf = 2.56 - 0.311 * aspectRatio;
else
    Cf = 1;
end

vindLast = Cf * hastighetstryck * referensArea; % Horisontell vindlast per meter [N/m]

% Visa beräknade värden

```

```

disp(' ')
fprintf(' <strong>Vindlast</strong>\n');
fprintf(' Vindlast = %2.2f [N/m]\n', vindLast);

% Tvärsnittsegenskaper och material egenskaper för limträ GL36k

Et = 14.7e9; % Elasticitetsmodul [Pa]
tvarsnittAreaTra = traTjocklek * traBredd; % Area för träbalk [m^2]
It = (traBredd * traTjocklek^3) / 12; % Yttröghetsmoment för en träsyll [m^4]

% Definition av laster (Brott)
P_punkt = 1.5*80e3/2; % Punktlast för ett däck från fordonsaxel [N]
W_egenvikt=1*0.85*totalEgenViktTvarled; % Egenvikt per meter [N/m]
W_trafik = 1.5*0.4*3.6e3*avstandTvarBalkar; % Trafiklast per meter [N/m]

% SPÄNNVIDDER i tvärled
spannVidd= 1; % Spännivdd i tvärled [m]
L= spannVidd/2;
Edof = [1 1 2 3 4 5 6; 2 4 5 6 7 8 9; 3 7 8 9 10 11 12; 4 10 11 12 13 14 15;
        5 13 14 15 16 17 18; 6 16 17 18 19 20 21]; % Topologimatrix
bc = [5 0; 10 0; 11 0; 17 0]; % Upplagsvillkor
ex = [0 L; L 2*L; 2*L 3*L; 3*L 4*L; 4*L 5*L; 5*L 6*L];
ey = zeros(6,2); % Koordinatvektorer för elementen
ep = [Et tvarsnittAreaTra It]; % Elementegenskaper

% Förbered variabler för plotter och resultat
maxM = zeros(7,1); % Maximalt böjmoment för varje lastfall
maxV = zeros(7,1); % Maximal tvärkraft för varje lastfall

% Loopa över de 7 olika lastfallen
for i = 1:7
    K = zeros(21); % Skapar en 21x21 matris med nollor
    f = zeros(21, 1); % Skapar en 21x1 vektor med nollor
    f(1) = vindLast * avstandTvarBalkar; % Gemensam vindlast för alla lastfall appliceras
        % på den första noden

    % Definiera lastvektorn eq baserat på lastfall
    if i == 1
        eq = repmat([0 -(W_egenvikt + W_trafik)], 6, 1);
    elseif i == 2
        eq = [repmat([0 -(W_egenvikt + W_trafik)], 5, 1); 0 -W_egenvikt];
    elseif i == 3
        eq = [repmat([0 -(W_egenvikt + W_trafik)], 4, 1); repmat([0 -W_egenvikt], 2, 1)];
    elseif i == 4
        eq = [0 -(W_egenvikt + W_trafik); repmat([0 -W_egenvikt], 5, 1)];
    elseif i == 5
        eq = [0 -W_egenvikt; repmat([0 -(W_egenvikt + W_trafik)], 2, 1); repmat([0 -W_egenvikt], 3,
    elseif i == 6
        eq = repmat([0 -W_egenvikt], 6, 1);
        f([2 11]) = -P_punkt;
    elseif i == 7
        eq = repmat([0 -W_egenvikt], 6, 1);
        f([5 14]) = -P_punkt;
    end

    for n = 1:6
        [Ke, fe] = beam2e(ex(n,:), ey(n,:), ep, eq(n,:));
        [K, f] = assem(Edof(n,:), K, Ke, f, fe);
    end

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

    figure(i);
    sgttitle(sprintf('Lastfall %d', i)); % Titel för varje lastfall
    if i==7
        w=4;
    else
        w=2;
    end
end

```

```

e_s = beam2s(ex(w,:), ey(w,:), ep, Ed(w,:), eq(w,:), 10);
sfacV = scalfact2(ex(w,:), ey(w,:), e_s(:,2), 0.5); % Skalfaktor
sfacM = scalfact2(ex(w,:), ey(w,:), e_s(:,3), 0.5); % Skalfaktor

for n = 1:6
    x = linspace(ex(n, 1), ex(n, 2), 10);
    [es, ~, ~] = beam2s(ex(n,:), ey(n,:), ep, Ed(n,:), eq(n,:), 10);

    subplot(2,1,1); % Tvärkraft
    eldia2(ex(n,:), ey(n,:), es(:,2), [2 1], sfacV); % Plot
    title('Tvärkraft [N]');
    xlabel('Position [m]');
    ylabel('Tvärkraft [N]');

    subplot(2,1,2); % Böjmoment
    eldia2(ex(n,:), ey(n,:), es(:,3), [2 1], sfacM); % Plot
    title('Moment [Nm]');
    xlabel('Position [m]');
    ylabel('Moment [Nm]');
    V(n) = max(abs(es(:,2))); % Maximal tvärkraft i elementet
    M(n) = max(abs(es(:,3))); % Maximalt moment i elementet
end

% Uppdatera maximala värden
maxV(i) = max(V);
maxM(i) = max(M);
end

Med_t = max(abs(maxM)) / 1e3;
Ved_t = max(abs(maxV)) / 1e3;
disp(' ');
fprintf(' <strong>Lasteffekter , Tvärled </strong>\n');
fprintf(' Maximalt moment över alla lastfall Med_t = %2.2f kNm\n', Med_t);
fprintf(' Maximal tvärkraft över alla lastfall Ved_t = %2.2f kN\n', Ved_t);

% Beräkningar av kapacitet för böjmoment och tvärkraft för en träbalk

% Materialparametrar för Limträ GL36k
gammaM = 1.25; % Partialkoefficient (säkerhetsfaktor)
fMk = 36e6; % Karakteristisk böjhållfasthet parallellt med fibrerna [Pa]
fVk = 4.3e6; % Karakteristisk skjuvhållfasthet [Pa]

% Lastparametrar och klimatkorrigeringar
kMod = 0.65; % Lastvaraktighets- och klimatkorrigering (Medellång last, Klimatklass 3, limträ)
kCrit = 1; % Korrigering för vippning (antagen ingen risk för vippning)
kCr = 0.67; % Korrigering för spruckna material (gäller sågat virke och limträ)

% Korrigering för storlek (beroende på tjocklek)
if traTjocklek * 1e3 < 600
    kH = min((600 / (traTjocklek * 1e3))^0.1, 1.1);
else
    kH = 1;
end

% Beräknar böjmotstånd och dimensionerande hållfasthet
Bojmotstand = (traBredd * traTjocklek^2) / 6; % Böjmotstånd [m^3]
fMd = kMod * kH * kCrit * (fMk / gammaM); % Dimensionerande böjhållfasthet [Pa]
momentKapacitet = Bojmotstand * fMd / 1e3; % Böjmomentkapacitet [kNm]

% Utskrift av resultat för böjmomentkapacitet
fprintf('\n <strong>Böjmomentkapacitet , Tvärled </strong>\n');
if Med_t < momentKapacitet
    effektivitetMoment = Med_t / momentKapacitet; % Verkningsgrad för moment
    fprintf(' Momentkapaciteten är tillräcklig : M_rd = %2.2f kNm\n', momentKapacitet);
    fprintf(' Verkningsgrad för moment: %2.2f%%\n', 100 * effektivitetMoment);
else
    fprintf('OBS! Momentkapaciteten är ej tillräcklig!\n');
end

```

```

% Beräkning av dimensionerande skjuvhållfasthet och tvärkraftskapacitet
fVd = kMod * (fVk / gammaM); % Dimensionerande skjuvhållfasthet [N]
effektivBredd = kCr * traBredd; % Effektiv bredd på balken [m]
effektivArea = effektivBredd * traTjocklek; % Effektiv area [m^2]
TvarkraftsKapacitet = ((2 / 3) * effektivArea * fVd) / 1e3; % Tvärkraftskapacitet [kN]

% Utskrift av resultat för tvärkraftskapacitet
fprintf('\n<strong>Tvärkraftskapacitet , Tvärled</strong>\n');
if Ved_t < TvarkraftsKapacitet
    effektivitetTvar = Ved_t / TvarkraftsKapacitet; % Verkningsgrad för tvärkraft
    fprintf('Tvärkraftskapaciteten är tillräcklig: V_rd = %2.2f kN\n', TvarkraftsKapacitet);
    fprintf('Verkningsgrad för tvärkraft: %2.2f%%\n', 100 * effektivitetTvar);
else
    fprintf('OBS! Tvärkraftskapaciteten är ej tillräcklig!\n');
end

```

Total egenvikt per meter

Egenvikt som verkar på träfarbana (tvärled): 1.93 [kN/m]

Vindlast

Vindlast = 586.26 [N/m]

Lasteffekter , Tvärled

Maximalt moment över alla lastfall Med_t = 30.21 kNm

Maximal tvärkraft över alla lastfall Ved_t = 60.82 kN

Böjmomentkapacitet , Tvärled

Momentkapaciteten är tillräcklig: M_rd = 33.30 kNm

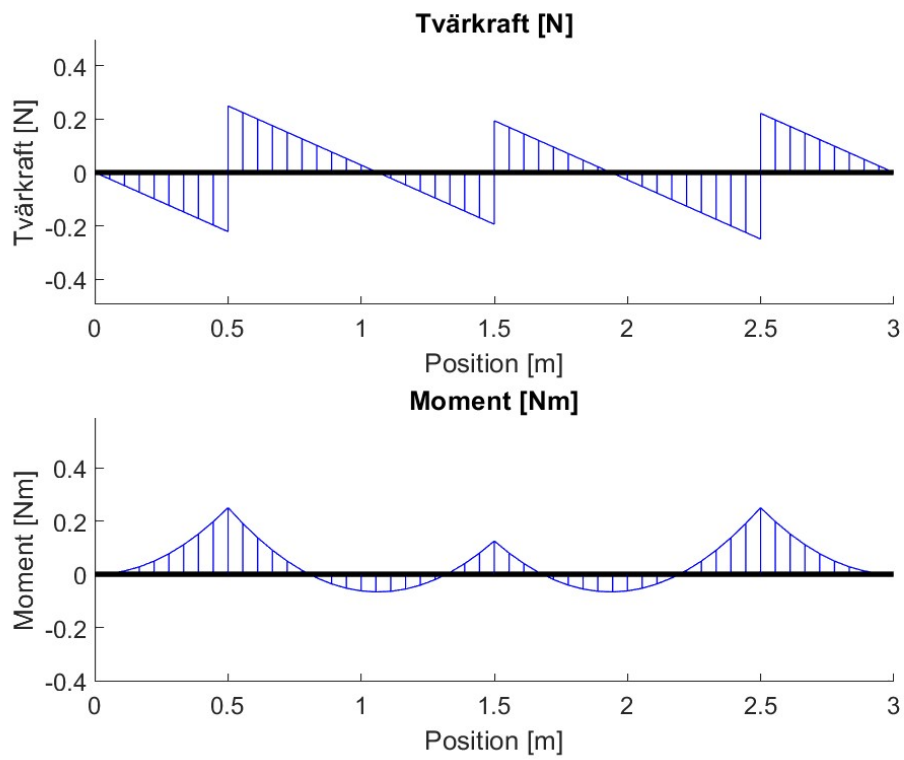
Verkningsgrad för moment: 90.71%

Tvärkraftskapacitet , Tvärled

Tvärkraftskapaciteten är tillräcklig: V_rd = 69.21 kN

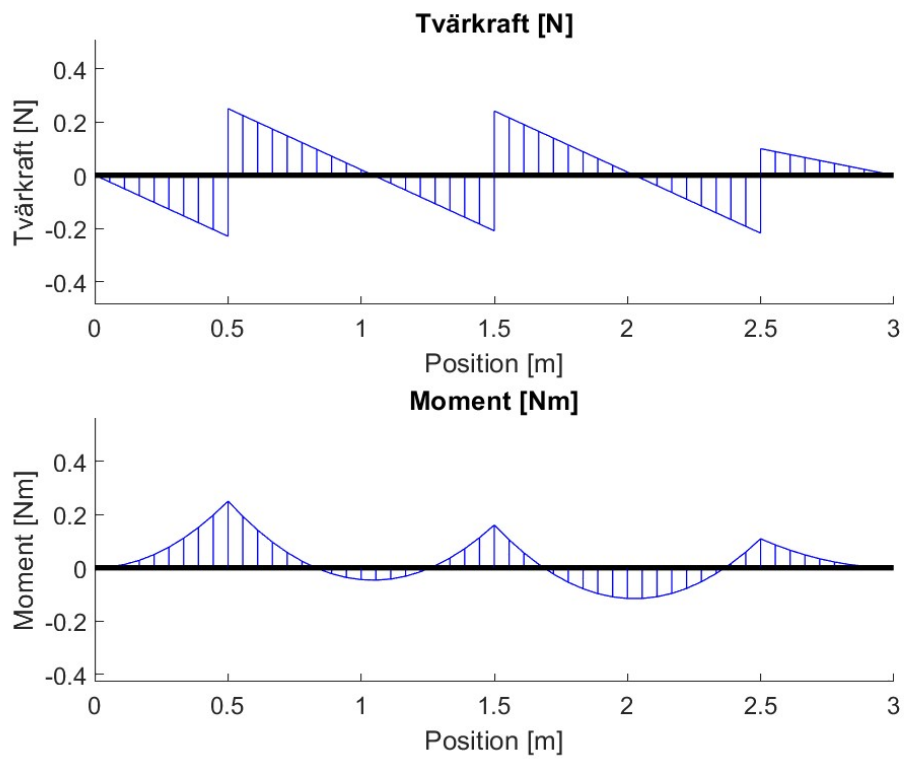
Verkningsgrad för tvärkraft: 87.88%

Lastfall 1



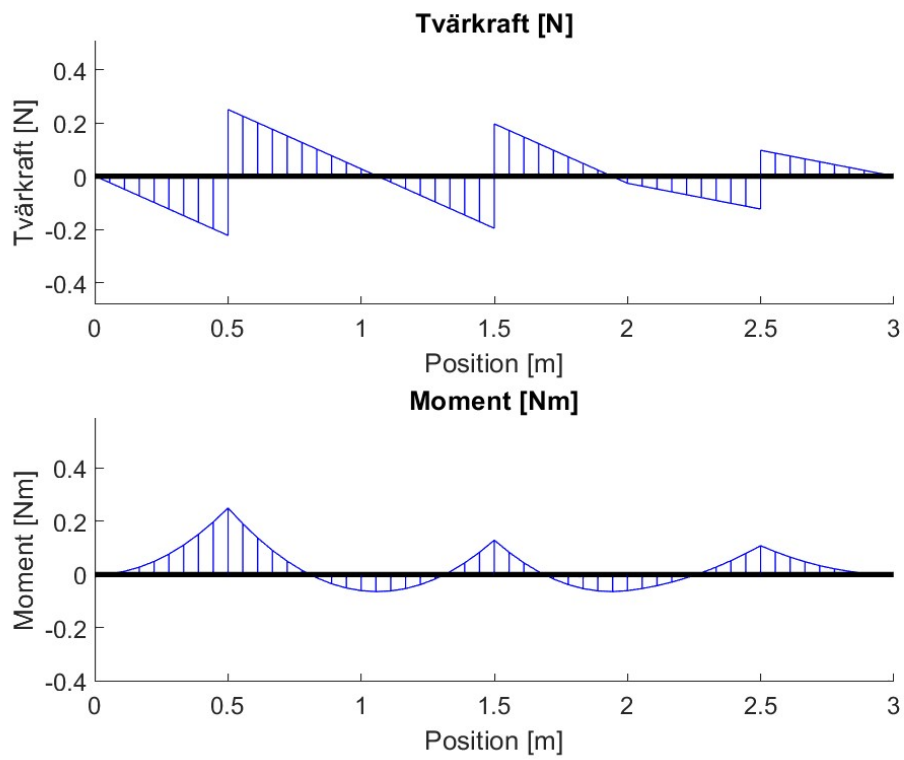
Figur N.6: Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 1.

Lastfall 2



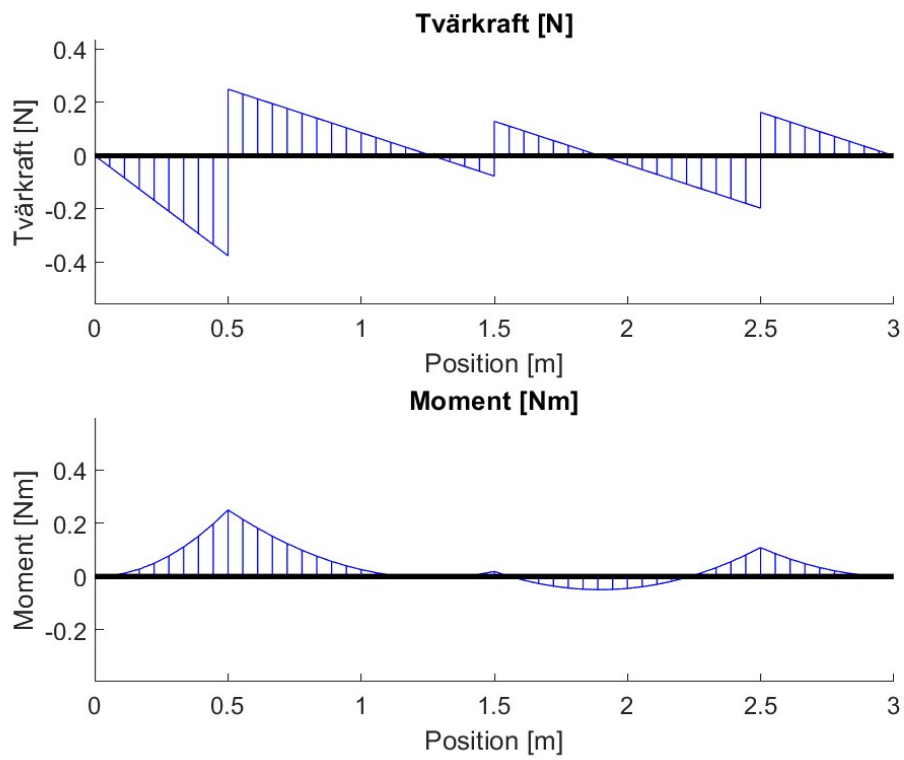
Figur N.7: Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 2.

Lastfall 3



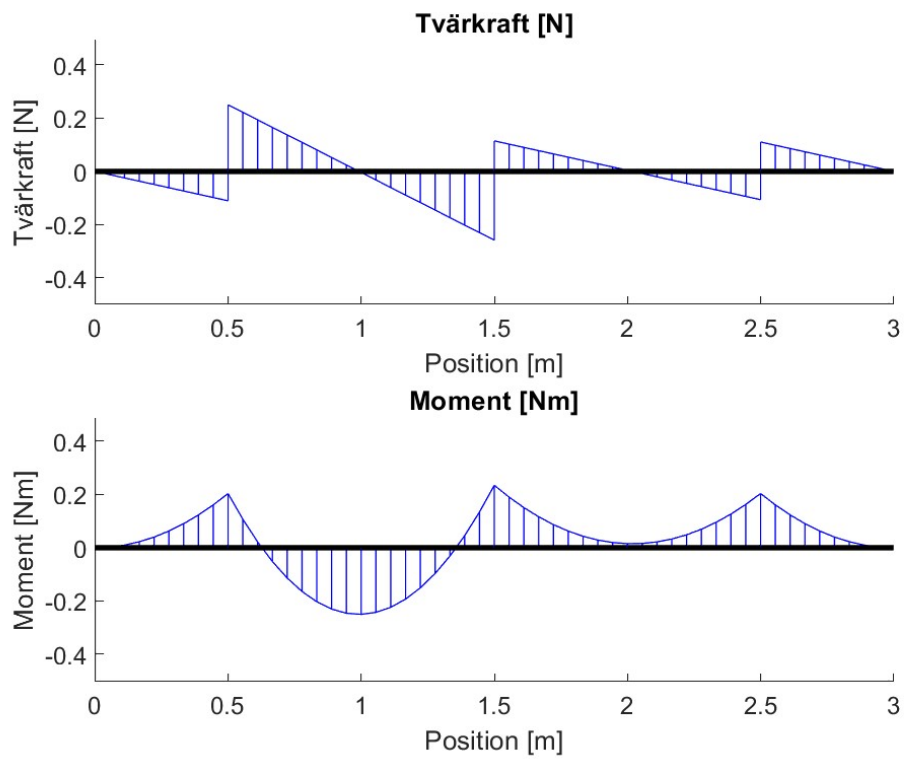
Figur N.8: Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 3.

Lastfall 4



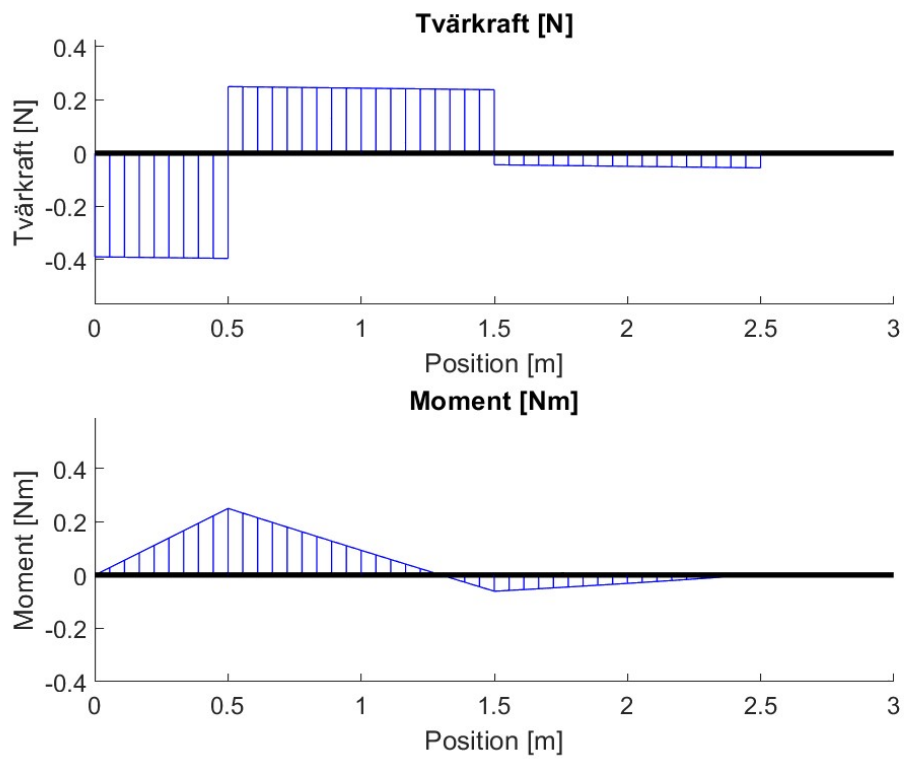
Figur N.9: Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 4.

Lastfall 5



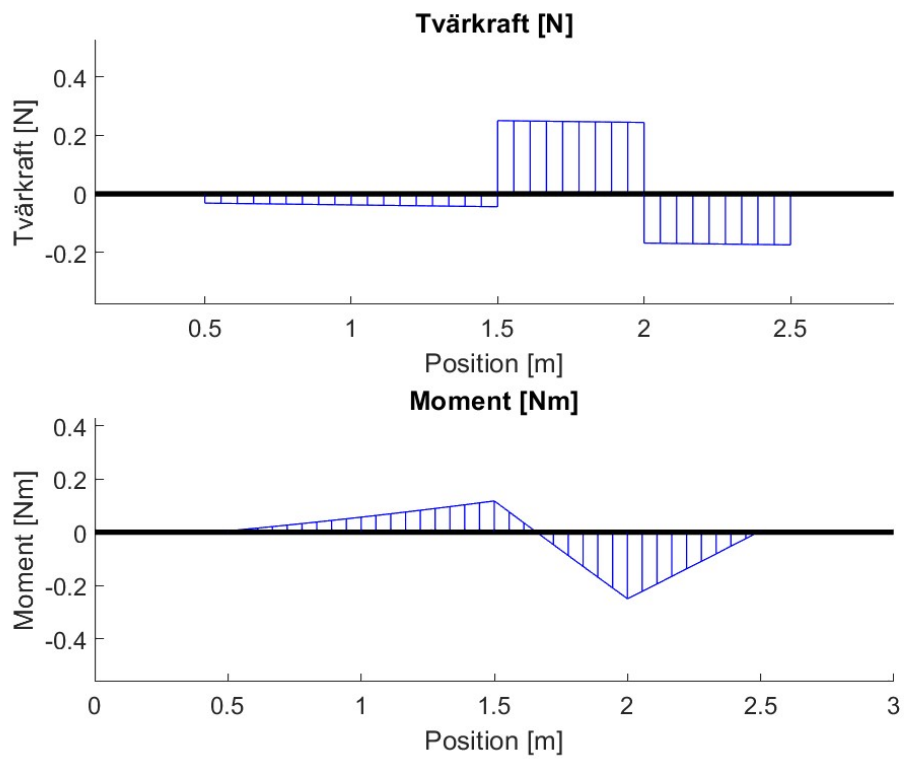
Figur N.10: Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 5.

Lastfall 6



Figur N.11: Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 6.

Lastfall 7



Figur N.12: Moment- och tvärkraftsdiagram för lastfall 7.

N.4 Nedböjning tvärled

```

% Kandidatarbete ACEX11–24–53 MAHMOUD ALHAMAD, WILMA ERIKSSON
% EMIN GUSTAFSSON, MOHAMMAD SAMI RAAD, ALVA SVENSK, ARVID THEGERSTRÖM
% Kandidatarbete Grupp 4
% Uppgifter: GC–bro
% Källa: (Al–Emrani m. fl., 2013).

% Initialisering av beräkningar för nedböjning av träbalkar
disp('□')
fprintf(' <strong>Nedböjningsberäkningar , □Tvärlid </strong>\n');

% Definition av laster (Bruks)
punktLast = 0.75 * 80e3 / 2; % Halva punktlasten för ett däck från fordonsaxel [N]
W_egenvikt1 = totalEgenViktTvarled; % Egenvikt per meter [N/m]
W_trafik1 = 0.4 * 3.6e3 * avstandTvarBalkar; % Trafiklast per meter [N/m]

% Spännvidder
spannVidd = 1; % Spännvidd i tvärled [m]
halvSpann = spannVidd / 2;
Edof = [1 1 2 3 4 5 6; 2 4 5 6 7 8 9; 3 7 8 9 10 11 12; 4 10 11 12 13 14 15;
        5 13 14 15 16 17 18; 6 16 17 18 19 20 21]; % Topologimatrix
bc = [5 0; 10 0; 11 0; 17 0]; % Upplagsvillkor
ex = [0 halvSpann; halvSpann 2*halvSpann; 2*halvSpann 3*halvSpann; 3*halvSpann 4*halvSpann;
      4*halvSpann 5*halvSpann; 5*halvSpann 6*halvSpann];
ey = zeros(6, 2); % Koordinatvektorer för elementen
ep = [Et tvarsnittAreaTra It]; % Elementegenskaper

% Nedböjningsgränser
maxNedbojKonsol = 0; % Fördefinierar maximal nedböjning för konsolspann [m]
maxNedbojMitt = 0; % Fördefinierar maximal nedböjning för mittspann [m]

% Beräkningar över alla lastfall
for i = 1:7
    K = zeros(21); % Skapar en 21x21 nollmatrix
    f = zeros(21, 1); % Skapar en 21x1 nollvektor
    f(1) = vindLast * avstandTvarBalkar; % Applicerar vindlasten på första noden

    % Definierar lastvektorn eq för varje lastfall
    if i == 1
        eq = repmat([0 -(W_egenvikt1 + W_trafik1)], 6, 1);
    elseif i == 2
        eq = [repmat([0 -(W_egenvikt1 + W_trafik1)], 5, 1); 0 -W_egenvikt1];
    elseif i == 3
        eq = [repmat([0 -(W_egenvikt1 + W_trafik1)], 4, 1); repmat([0 -W_egenvikt1], 2, 1)];
    elseif i == 4
        eq = [0 -(W_egenvikt1 + W_trafik1); repmat([0 -W_egenvikt1], 5, 1)];
    elseif i == 5
        eq = [0 -W_egenvikt1; repmat([0 -(W_egenvikt1 + W_trafik1)], 2, 1);
              repmat([0 -W_egenvikt1], 3, 1)];
    elseif i == 6
        eq = repmat([0 -W_egenvikt1], 6, 1);
        f([2 11]) = -punktLast;
    elseif i == 7
        eq = repmat([0 -W_egenvikt1], 6, 1);
        f([5 14]) = -punktLast;
    end

    % Assemblering och lösning av systemet
    for n = 1:6
        [Ke, fe] = beam2e(ex(n,:), ey(n,:), ep, eq(n,:));
        [K, f] = assem(Edof(n,:), K, Ke, f, fe);
    end

    [a, r] = solveq(K, f, bc); % Beräknar förskjutningar och reaktionskrafter
    Ed = extract(Edof, a); % Extraherar elementdeformationer

    % Beräknar nedböjningar för varje element
    for n = 1:6

```

```

[es, edi, ec] = beam2s(ex(n,:), ey(n,:), ep, Ed(n,:), eq(n,:), 100);
if n == 1 || n == 6
    currentMaxNedboj = max(abs(edi(:,2))); % Maximal nedböjning i konsolspann
    if currentMaxNedboj > maxNedbojKonsol
        maxNedbojKonsol = currentMaxNedboj;
    end
else
    currentMaxNedboj = max(abs(edi(:,2))); % Maximal nedböjning i mittspann
    if currentMaxNedboj > maxNedbojMitt
        maxNedbojMitt = currentMaxNedboj;
    end
end
end

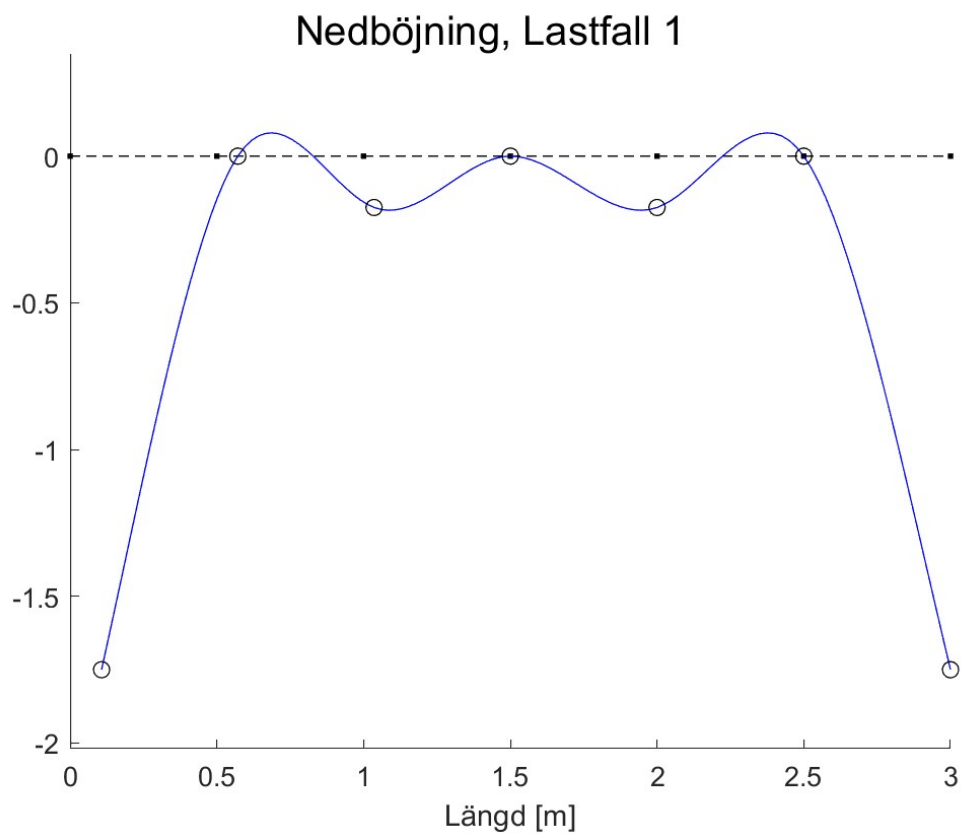
% NEDBÖJNING PLOT
figure(i+7)
sgtitle(sprintf('Nedböjning, Lastfall %d', i)); % Titel för varje lastfall
hold on
xlabel('Längd [m]')
sfac1=scalfact2(ex(3,:), ey(3,:), Ed(3,:), 0.7); %Anger skala på figurerna
for n=1:6
    eldraw2(ex(n,:), ey(n,:), [2 1 0]);
    eldisp2(ex(n,:), ey(n,:), Ed(n,:), [1 2 1], sfac1);
end
end

% Utskrift av maximala nedböjningar och gränsvärden
fprintf('Maximal nedböjning för konsolspann: %2.2f [mm]\n', maxNedbojKonsol * 1e3);
fprintf('Tillåten nedböjning för konsolspann: %2.2f [mm]\n', halvSpann * 1e3 / 150);
fprintf('Maximal nedböjning för mittspann: %2.2f [mm]\n', maxNedbojMitt * 1e3);
fprintf('Tillåten nedböjning för mittspann: %2.2f [mm]\n', spannVidd * 1e3 / 300);

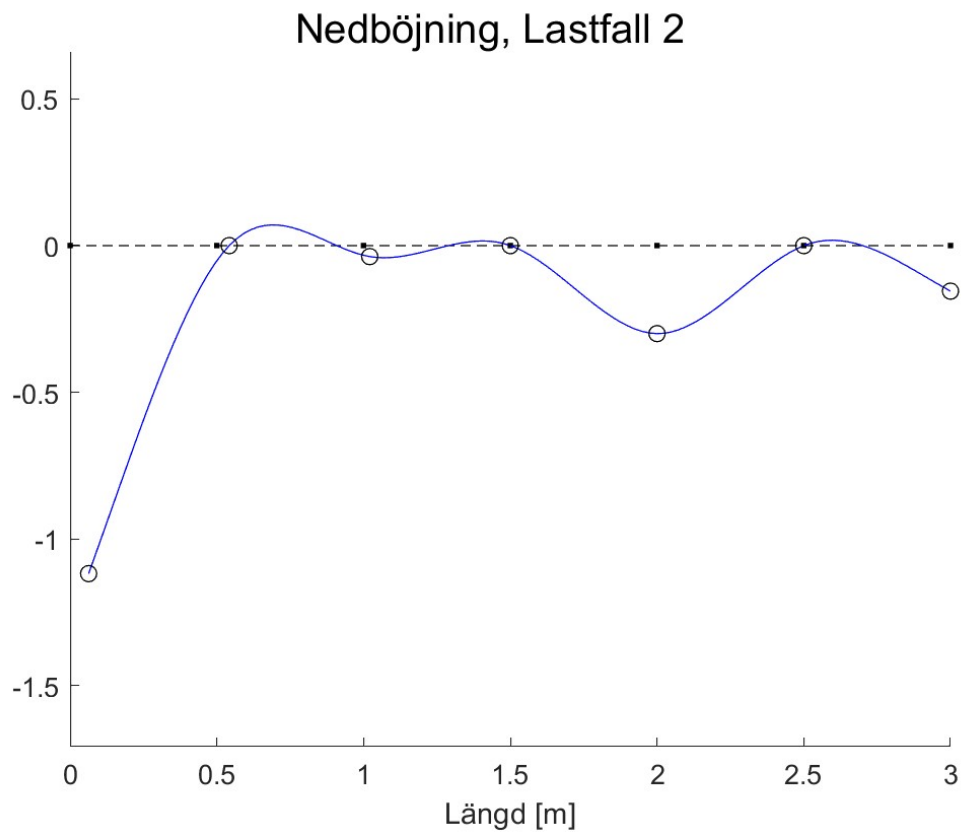
% Kontroll om nedböjningskraven uppfylls
if maxNedbojKonsol > (halvSpann/150) || maxNedbojMitt > (spannVidd/300)
    disp('Nedböjningskrav ej uppfyllda!');
else
    disp('Alla nedböjningskrav uppfyllda. ');
end
end

Nedböjningsberäkningar, Tvärled
Maximal nedböjning för konsolspann: 2.08 [mm]
Tillåten nedböjning för konsolspann: 3.33 [mm]
Maximal nedböjning för mittspann: 0.45 [mm]
Tillåten nedböjning för mittspann: 3.33 [mm]
Alla nedböjningskrav uppfyllda.

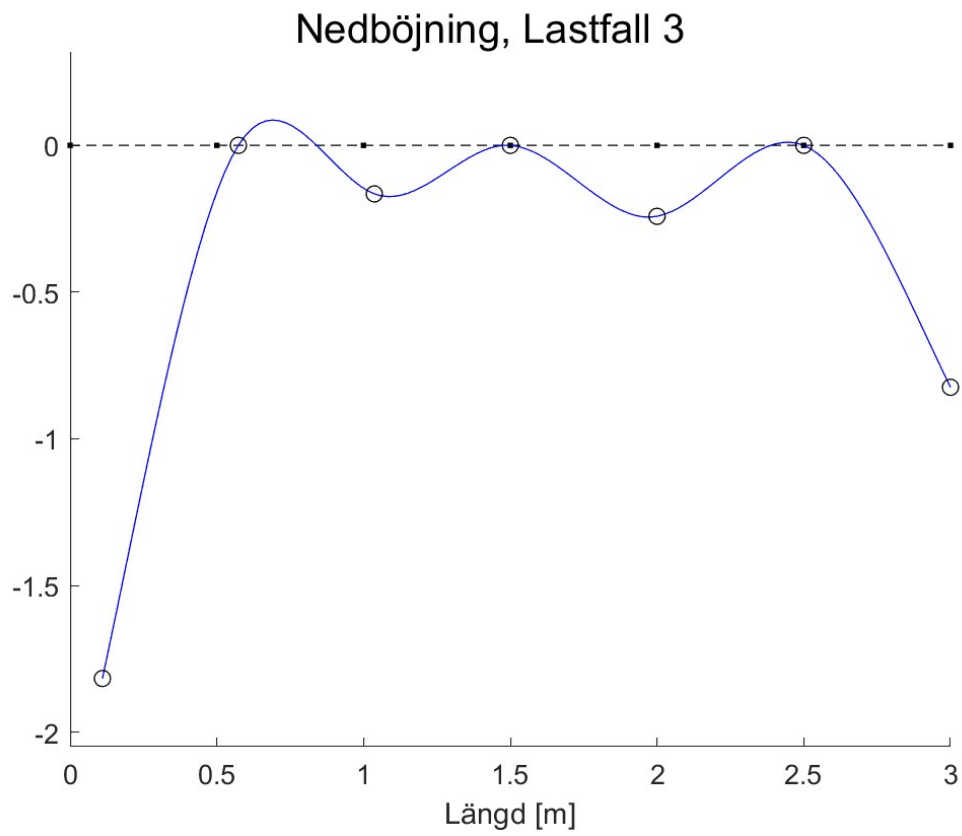
```



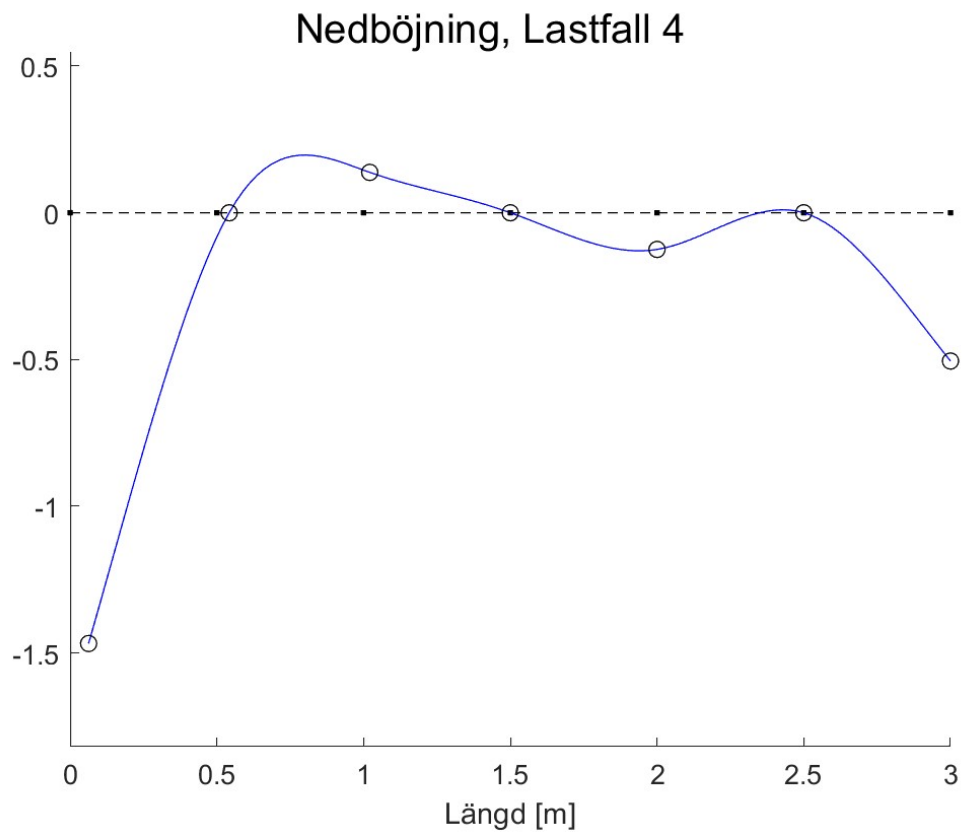
Figur N.13: Nedböjnings diagram för lastfall 1.



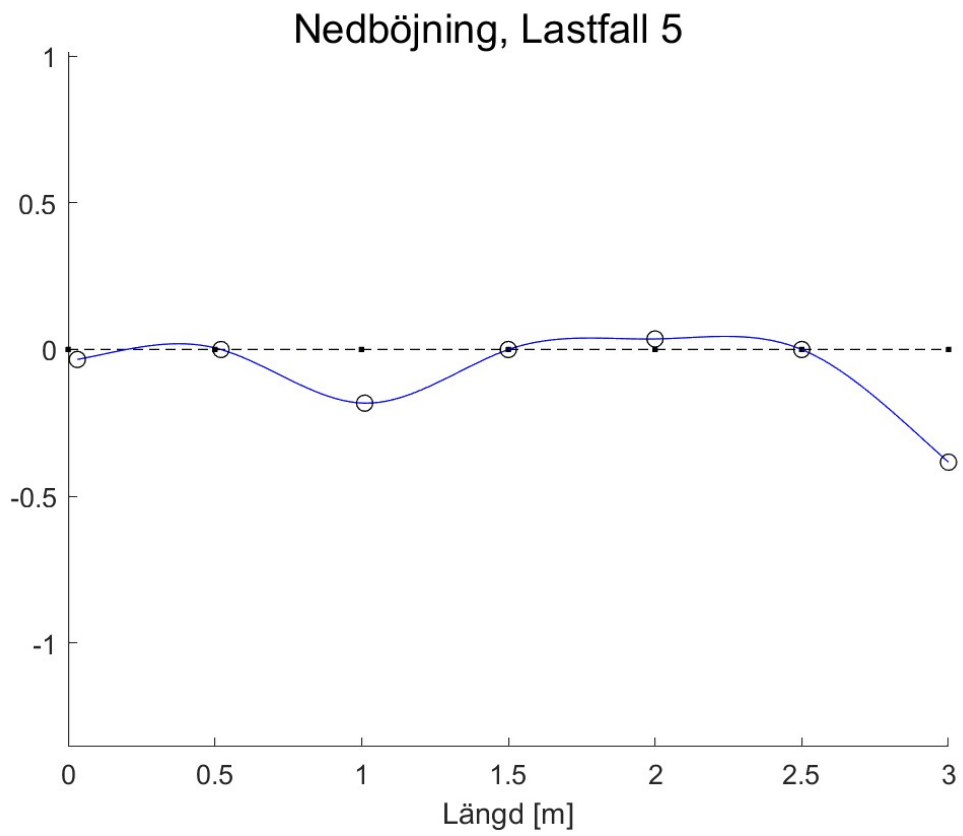
Figur N.14: Nedböjnings diagram för lastfall 2.



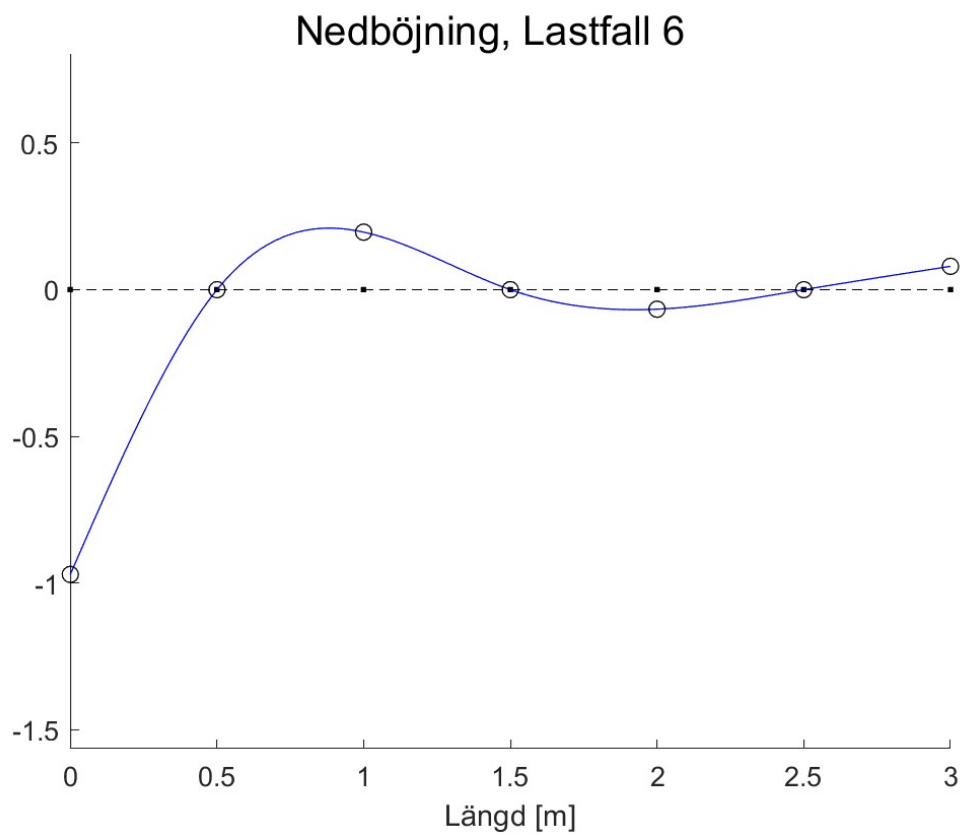
Figur N.15: Nedböjnings diagram för lastfall 3.



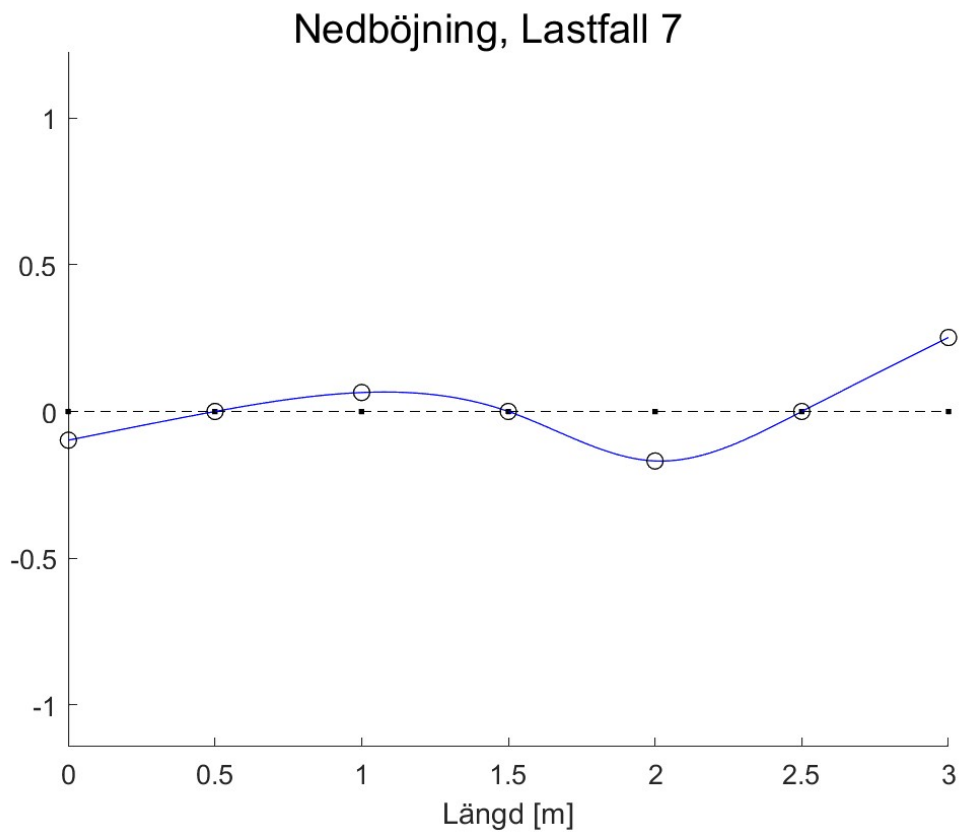
Figur N.16: Nedböjnings diagram för lastfall 4.



Figur N.17: Nedböjnings diagram för lastfall 5.



Figur N.18: Nedböjnings diagram för lastfall 6.



Figur N.19: Nedböjnings diagram för lastfall 7.

N.5 Vindlast

```

% Kandidatarbete ACEX11-24-53 MAHMOUD ALHAMAD, WILMA ERIKSSON
% EMIN GUSTAFSSON, MOHAMMAD SAMI RAAD, ALVA SVENSK, ARVID THEGERSTRÖM
% Kandidatarbete Grupp 4
% Uppgifter: GC-bro
% Källa: (Sören Lindgren, 2016)

% Vindlastberäkningar
overbyggnadshojd = rackehojd + traTjocklek + livhojd + 2 * flansTjocklek; % Total höjd på
% överbyggnaden [m]
referensArea = L_bro * overbyggnadshojd; % Referensarea i x-led med en räcke på 1.4 m [m^2]
% Haradalsbron i Helsingborg kommun => Terrängtyp = hav
% => Referensvindhastigheten (vb) = 26 [m/s] , Tabell 4.1
% h = 10 [m] höjden ovan mark till den beraknade delens översta kant
% => qp= (1.13+1.22)/2 =1.175 [kPa], Karakteristiskt hastighetstryck, Tabell 4.2 (VVFS 2007:494)
hastighetstryck = 1.175; % Karakteristiskt hastighetstryck från standard [kPa]
% Beräkning av dragkoefficient
aspectRatio = B_bro / overbyggnadshojd;
if aspectRatio <= 0.5
    Cf = 2.4;
elseif aspectRatio < 5
    Cf = 2.56 - 0.311 * aspectRatio;
else
    Cf = 1;
end

vindLast = Cf * hastighetstryck * referensArea; % Horisontell vindlast per meter [N/m]

% Visa beräknade värden
disp('u')
fprintf('<strong>Vindlast</strong>\n');
fprintf('Vindlast_uu=%2.2f_u[N/m]\n', vindLast);

Vindlast
Vindlast = 586.26 [N/m]

```

N.6 Temperatur

```
% Kandidatarbete ACEX11-24-53 MAHMOUD ALHAMAD, WILMA ERIKSSON
% EMIN GUSTAFSSON, MOHAMMAD SAMI RAAD, ALVA SVENSK, ARVID THEGERSTRÖM
% Kandidatarbete Grupp 4
% Uppgifter: GC-bro
% Källa: (Lebet & Hirt, 2013).

% Kontroll av den längsgående deformationen
disp(' ')
fprintf(' <strong>Kontroll av den längsgående deformationen pga temperatureffekter </strong>\n');
% Konstanter och materialparametrar
alfa = 1e-5; % Termisk expansionskoefficient för stål [1/C]

% Temperaturinformation från Helsingborg
T_max = 34; % Maximal temperatur [C]
T_min = -24; % Minimal temperatur [C]
deltaT = T_max - T_min; % Temperaturvariation [C]

% Längd på bron
L_bro = 90; % Total längd på bron [m]

% Beräkning av längsgående deformation
delta_L = alfa * L_bro * deltaT; % Längsgående deformation [m]

% Skriver ut den beräknade deformationen
fprintf(' Den längsgående deformationen som kan upptas av expansionsfogarna är: %.4f meter\n', delta_L);

Kontroll av den längsgående deformationen pga temperatureffekter
Den längsgående deformationen som kan upptas av expansionsfogarna är: 0.0522 meter
```

N.7 Total area på huvudbalkar

```
% Kandidatarbete ACEX11-24-53 MAHMOUD ALHAMAD, WILMA ERIKSSON
% EMIN GUSTAFSSON, MOHAMMAD SAMI RAAD, ALVA SVENSK, ARVID THEGERSTRÖM
% Kandidatarbete Grupp 4
% Uppgifter: GC-bro

% Beräkning arean av stål balkar som kommer att undvika att målas pga användningen av
% väderbeständigt stål
disp(' ')
fprintf('<strong>Arean som kommer att undvikas från att målas</strong>\n');
stalbalkOmkrets = 2 * (flansBredd + livhojd + 2 * flansTjocklek + (flansBredd - livtjocklek));
antalBalkar = 3; % Antal huvudbalkar

% Total målningensarea för alla balkar:
malningsArea = stalbalkOmkrets * L_bro * antalBalkar; % Area i kvadratmeter
fprintf('Total arean av huvudbalkar: %.2f kvadratmeter\n', malningsArea);

Arean som kommer att undvikas från att målas
Total arean av huvudbalkar: 849.69 kvadratmeter
```

O Projekterings-PM

SEPTEMBER 2022

PROJEKTERINGS PM GEOTEKNIK



COWI

INNEHÅLL

1	Objekt	7
2	Syfte	8
3	Styrande dokument	8
4	Underlag	9
5	Utförda undersökningar	9
6	Planerad konstruktion och anläggning	9
6.1	GC-Bro	9
6.2	GC-väg	10
7	Topografiska förhållanden och markbeskaffenhet	11
8	Geotekniska förhållanden	16
8.1	Jordlagerföljd inom GC-bro	16
8.2	Jordlagerföljd inom GC-väg	17
8.3	Hydrogeologiska förhållanden	17
9	Sättningsanalys	18
9.1	GC-bro	18
9.2	GC-väg	18
10	Stabilitetsanalys	18
10.1	GC-bro	18

11	Geoteknisk bärförmåga	22
11.1		23
11.2		23
11.3		24
11.4		24
12	Geotekniska rekommendationer	26
12.1	Grundläggning av GC-bro	26
12.2	Anläggning av GC-väg	27
12.3	Schaktarbeten	27
12.4	Packning och fyllning	28
13	Dimensionering	28
13.1	Plattgrundläggning	28
13.2	Pålgrundläggning	30
13.3	Geotekniska parametrar	32
14	Geoteknisk kontroll	34
Bilaga 1	Tolkad jordlagermodell	
Bilaga 2	Härledda värden, valda värden	

1 Objekt

COWI AB har på uppdrag av GVV AB utfört en geoteknisk utredning i samband med projektering av ny gång- och cykelbro

GC-vägen kommer att

korsa två mindre skogsvägar/stigar

För översiktsbild för det aktuella området, se Figur 1 nedan.



Figur 1 Översiktsbild, aktuellt område markerat med röd-streckad linje (kartkälla: eniro 2021)

2 Syfte

Syftet med denna PM är att utgöra underlag vid framtagande av underlag för kalkyl samt projekteringsförutsättningar avseende byggnation av ny GC-bro med anslutande GC-väg.

PM:n beskriver områdets geotekniska förhållanden såsom jordlagerföljd, jordlagrens hållfasthets- och deformationsegenskaper och grundvattennivåer.

I PM:n redovisas även rekommendationer för grundläggning, grundvattenhantering och schaktarbeten för planerad konstruktion och planerade anläggningar samt dimensionsförutsättningar för grundläggning av planerad konstruktion.

Resultat från utförda geotekniska undersökningar har utgjort underlag för utförda bedömningar och sammanställningar, se kapitel 5.

3 Styrande dokument

Denna PM ansluter till SS-EN 1997-1 med tillhörande nationell bilaga. För projektet gäller även:

- > Krav Bro och broliknande konstruktion, byggande, TRVINFRA-00227
- > Krav Geokonstruktion, dimensionering och utformning, TRVINFRA-00230
- > AMA Anläggning 23
- > VGU 2020
- > Eurokod, SS-EN 1997-1
- > Transsportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder), TSFS 2018:57
- > Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder), BFS 2019:1, EKS 11
- > Tillämpningsdokument enligt IEG ska användas för respektive konstruktionstyp.

4 Underlag

Underlag för denna PM redovisas i punktlistan nedan.

- > Gestaltningsprogram

- > Utförda undersökningar, se kapitel 5

- > Erhållna laster på respektive brostöd

- > Utförda undersökningar, se kapitel 5

5 Utförda undersökningar

PGB AB har på uppdrag av COWI AB, under vecka 38-39, september år 2021, utfört geotekniska undersökningar inom rubricerat område.

Laboratorieundersökningar har utförts på Tyréns geotekniska laboratorium i Malmö. Utsättning och avvägning av aktuella undersökningspunkter utfördes av PGB AB.

Undersökningen redovisas i koordinatsystem SWEREF 99 13 30 och höjdsystem RH 2000.

Undersökningsresultaten har sammanställts i en separat handling benämnd "*Markteknisk undersökningsrapport (MUR), Geoteknik, GC-bro,* , daterad 2021-02-11 med dokumentnamn A224754-G-RAP-001.

6 Planerad konstruktion och anläggning

6.1 GC-Bro

Planerad GC-bro kommer att utformas som en

Figur 2. Sektionsskiss planerad CG-bro, COWI 2021-06-29.

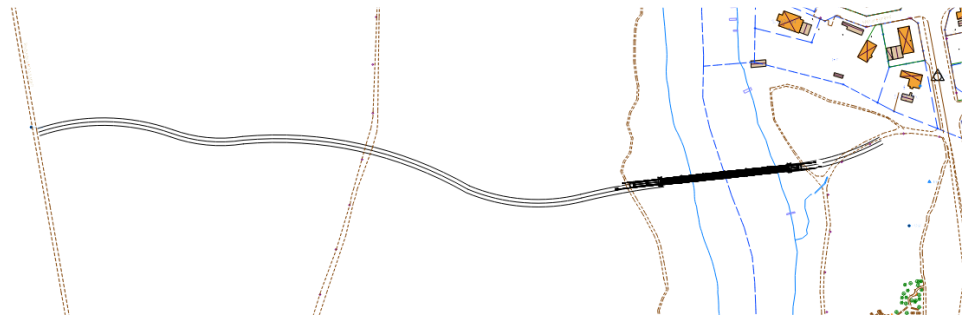
Figur 3. Planskiss planerad GC-bro, COWI 2021-06-29.

En preliminär lastnedräkning har erhållits av COWI 2022-03-02.

6.2 GC-väg

I anslutning till planerad GC-bro planeras en ny gång- och cykelväg.

Preliminär linjeföring ses i *Figur 4*.



Figur 4. Linjeföring av GC-väg, "Arbetskiss" framtagen av COWI 2020-08-31.

7 Topografiska förhållanden och markbeskaffenhet

Aktuellt område utgörs i huvudsak av naturmark i form av skog, se Figur 5. På den östra sidan av å är området en del av norra skogen och utgörs främst av lövskog med stora träd, se Figur 6. Slänten ner mot å är relativt brant. Viss erosion pågår i strandlinjen på den östra sidan.

Den västra sidan, närmst ån, utgörs också av lövskog. Slänten ner mot ån är flackare än på den östra sidan, se Figur 7. Längre västerut mot vägen övergår skogen till blandskog, se Figur 8 och Figur 9. Vid platsbesök observerades vattensjuka partier med högt ytvatten. Ungefär mitt på sträckan på den västra sidan finns ett kalhygge/större skogsglänta.

Inom den östra delen av området är markytan relativt flack men sluttar svagt från gatan fram till den branta slänten innan ån. Markytans nivå längst i öster är ca +6 till +7. Vid släntkrön för slänten ner mot ån är nivån ca +5. Nivån vid släntfot och vattenbryn är varierar mellan ca -1 och +2 beroende på vattennivå i ån.

På den västra sidan av ån ligger marknivån vid planerat brofäste på ca +3 till +4. Markytan sluttar svagt ner mot vattenbrynet till ca -1 och +2 beroende på vattennivå i ån.

Marknivån längs planerad gc-väg mellan vägen och planerat brofäste i väster är relativt plan och marknivåerna varierar mellan ca +3 och +5.



Figur 5. Vy från planerat brofäste i öster. Fotot är taget västerut mot planerat brofäste väster om å (COWI AB, 2021-06-22).



Figur 6. Vy över planerat brofäste i öster. Fotot är taget mot väster (COWI AB, 2021-06-22).



Figur 7. Vy från planerat brofäste i väster. Fotot är taget mot öster (COWI AB, 2021-06-22).



Figur 8. Vy inom sträckning för planerad gc-väg väster om å (COWI AB, 2021-06-22).



Figur 9. Vy inom sträckning för planerad gc-väg väster om å (COWI AB, 2021-06-22).

8 Geotekniska förhållanden

8.1 Jordlagerföljd inom GC-bro

Utförda undersökningar i undersökningspunkterna CW01-CW14 och CW21-CW24 visar att ytskikten generellt utgörs av ett tunt lager **mulljord**. Mulljorden underlagras av svämsediment av **sand**. Under sanden återfinns **lera**. Leran underlagras av friktionsjord i form av **lerig siltig sand** som på djupet övergår till sandig siltig **morän**.

Mulljorden har en mäktighet om ca 0,2-0,5 m. Mulljorden är ställvis sandig.

Under mulljorden återfinns svämsediment i form av **sand**. På den östra sidan av å varierar sandlagrets mäktighet mellan ca 1 och 2 m. På den västra sidan av ån är mäktigheterna mindre, ca 0-0,3 m. Sanden klassas ställvis som mellansand. Enligt utförda CPT- och hejarsonderingar har svämsedimenten en lös till medelfast lagringstäthet och friktionsvinkeln varierar mellan ca 31 och 38°. Enligt utförda laboratorieundersökningar har svämsedimenten en vattenkvot varierande mellan ca 3 och 18%.

Svämsedimenten underlagras av glacial **lera**. Leran klassas ställvis som siltig och har påträffats med tunna både silt- och sandskikt. Lerans mäktighet varierar mellan ca 6 och 9 m. Enligt utförda CPT-sonderingar har leran en odränerad skjuvhållfasthet på ca 40-50 kPa de översta 2 metrarna. Skjuvhållfastheten ökar sedan mot djupet till ca 60-70 kPa på ca 9-10 m djup. Vattenkvot och konflytgräns har analyserats på störda prover på geotekniskt laboratorium och varierar mellan ca 25 och 34% respektive 29 och 55%. Enligt CPT-sonderingarna, korrelerade med uppmätt konflytgräns, är leran starkt överkonsoliderad.

Under leran har friktionsjord påträffats. Friktionsjorden tolkas som **lerig siltig sand** enligt utförda skruvprovtagningar och utvärderade CPT-sonderingar. Mäktigheten på det tolkade frktionsjordslagret varierar mellan ca 0,5 och 2,5 m. Enligt utförda CPT- och hejarsonderingar har den leriga siltiga sanden en lös till medelfast lagringstäthet och friktionsvinkeln varierar mellan ca 31 och 38°. Troligen övergår den leriga siltiga sanden till en betydligt fastare moränliknande jord där CPT-sonderingarna stoppat på ca 10-13 m djup. Utförda hejarsonderingar har stoppat ca 0,5-6 m djupare än utförda CPT-sonderingar. Enligt utförda hejarsonderingar har detta jordlager en mycket fast lagringstäthet och friktionsvinkeln varierar mellan ca 38 och 42°.

För att undersöka moränens blockighet samt verifiera att berget inte sticker upp lokalt inom området utfördes två jord-bergsonderingar, en på varje sida om ån. Jord-bergsonderingarna visar på att den fasta moränen fortsätter ner till åtminstone ca 30 m djup. Mindre block och stenar kan tolkas i sonderingarna.

8.2 Jordlagerföljd inom GC-väg

Utförda undersökningar i undersökningspunkterna CW15-CW20 visar att ytskikten generellt utgörs av mulljord och sandig mulljord med en mäktighet på ca 0,05-0,1 m. I punkterna CW17 och CW20 har även ett tunt lager av torv, ca 0,05 m, påträffats överst. Under ytlagren består jordlagerföljden inom området i huvudsak av friktionsjord i form av sand som underlagras av lera. Sanden klassas ställvis som siltig finsand eller mellansand. Sandens mäktighet är ca 1-3 m. Leran under sanden förekommer ställvis som lera med tunna siltskikt och har påträffats ner till undersökt djup, ca 3 m.

8.3 Hydrogeologiska förhållanden

Grundvattenförhållandena inom aktuellt område har observerats dels utifrån installerade grundvattenrör, dels utifrån fria vattenytor i öppna skruvprovtagningshål.

Grundvattenobservationer i installerade grundvattenrör har skett vid tre tillfällen, 4 och 28 oktober samt 10 november år 2021 i punkterna CW03, CW11, CW17 och CW18. Vid mättillfällena uppmättes en grundvattenyta på nivåer varierande mellan ca +3,6 och ca -3,7, vilket motsvarar 0,7-9,5 m djup under markytan. Den djupaste mätningen (CW11) anses inte särskilt trovärdig eftersom filterdelen troligen sitter i leran och ingen större tillrinning har skett. I samband med planerad mätning i december 2021 observerades att grundvattenrören i CW11, CW17 och CW18 var saboterade och mätningar kunde inte utföras.

I samband med skruvprovtagningen observerades fria vattenytor i öppna skruvprovtagningshål i punkterna CW15-CW19. Uppmätta vattenytor varierar mellan ca 0,2 och 0,7 m djup under markytan, vilket motsvarar nivåer mellan ca +3,0 och +4,3.

Grundvattenytan påverkas av årstid och nederbörd samt nivåer i å. Med hänsyn till att observationstiden varit kort kan en stabiliserad grundvattennivå ligga högre än vad som hittills uppmätts.

Lägsta lågvatten (LLW) är + -1,25

Medelvatten (MW) är +0,1

Högsta högvatten (HHW) är +2,4

9 Sättningsanalys

9.1 GC-bro

Jordlagerföljden inom området utgörs i huvudsak av svämsediment ovan lera som underlagras av friktionsjord och morän. Leran är starkt överkonsoliderad och därmed inte speciellt sättningskänslig.

Då huvudstöden på bron planeras att grundläggas med pålar bedöms inga sättningar ske där. Mellanstöden på bron planeras att plattgrundläggas. Med hänsyn till lasterna på mellanstöden och bortschaktade svämsediment med hänsyn till aktuell grundläggningsnivå bedöms inga skadliga sättningar ske.

Vid en överslagsberäkning på landfästen och mellanstöden, med en last på 76 respektive 72 kPa för ett 3,5x4 respektive 2x3,5 m stort fundament grundlagt på packad fyllning i naturligt lagrad lera, erhålls en sättning på ca 1-2 cm. Lasterna (SLS) är erhållna av COWI:s brokonstruktörer 2022-03-02

9.2 GC-väg

Jordlagerföljden inom sträckningen för planerad GC-väg utgörs av ett ytligt lager organisk jord som underlagras av sand och finsand på lera. Under förutsättning att all organisk jord schaktas ur bedöms inga skadliga sättningar ske.

10 Stabilitetsanalys

10.1 GC-bro

Stabilitetsberäkningar har utförts i två sektioner. En längs med planerad bro väster om å och en längs med planerad bro öster om å. Beräkningar har utförts för både befintliga förhållanden och för slutskedet.

Syftet med beräkningarna har varit att utreda släntstabiliteten ut mot å med hänsyn till tillkommande laster från ny bro samt nytt erosionskydd.

10.1.1 Allmänt

Stabilitetsanalysen har utförts enligt partialkoefficientmetoden med valda värden för geotekniska materialparametrar och yttre last. Dimensionerande värden för geotekniska materialparametrar har beräknats enligt ekvationen nedan,

$$X_{dim} = \frac{X_k}{\gamma_M}$$

där:

X_k = valt karaktäristiskt värde

γ_m = partialkoefficient (enligt tabellvärden VVFS 2004:43)

Det karaktäristiska värdet (X_k) har bestämts genom en ingenjörsmässig bedömning i enlighet med

Beräkningen har utförts i säkerhetsklass 2 (SK2) med hänsyn till stabilitetsbrott. I enlighet med TR Geo 13 kapitel 2.3 innebär SK2 att beräknad säkerhetsfaktor (F_{EN}) mot stabilitetsbrott ska vara större än 1,0 för odränerad och kombinerad analys.

Stabilitetsberäkningar har utförts med sammansatta cirkulärcylindriska glidytor med odränerad analys och med kombinerad analys i respektive beräkningssektion. Ingen hänsyn har tagits till 3D-effekter.

Geoteknisk kategori 2 (GK2) har förutsatts gälla.

Karaktäristisk ytlast för trafik på GC-vägar har valts enligt TK Geo 13, kapitel 4.3.1 och har i beräkningarna placerats på planerad bank för GC-väg på den västra sidan.

Dimensionerande värden för trafiklast har beräknats enligt TK Geo 13, kapitel 2.3.2.1 och ekvationen nedan:

$$1,1 \cdot \gamma_d \cdot G_{kj} + 1,4 \cdot \gamma_d \cdot Q_k$$

där:

G_{kj} = permanent ogynnsam last

Q_k = variabel ogynnsam last

γ_d = partialkoefficient för säkerhetsklass

Vid beräkning av dimensionerande trafiklaster för SK2 har $\gamma_d = 0,91$ använts.

För ytlaster på vägar innebär det att:

- dimensionerande trafiklast = $6,4 \text{ kN/m}^2$ för GC-väg

I kombinerad analys har trafiklasten försumrats enligt

I stabilitetsberäkningarna har laster på landfästen och mellanstöd, erhållna av COWI:s borkonstruktörer 2022-03-02, använts. Följande laster på landfäste och mellanstöd har använts:

Max grundtryck ULS= 135 kPa
 Tillhörande horisontalkraft (totalt)= 221 kN (fördelas på L_{ef})
 B_{ef} = 2,55m
 L_{ef} = 3,81m

Max grundtryck ULS= 171 kPa
 Tillhörande horisontalkraft (totalt)= 108 kN (fördelas på L_{ef})
 B_{ef} = 1,16m
 L_{ef} = 3,24m

Stabilitetsberäkningarna har utförts med beräkningsprogrammet Geostudio 2020, version 10.2.2.20559, Slope/W.

10.1.2 Valda geotekniska parametrar

Valda beräkningsparametrar för stabilitetsberäkningarna redovisas i Tabell 1 nedan.

Tabell 1. Sammanställning av geotekniska parametrar i beräkning.

Jordmaterial	Jordparameter	Karakteristiskt värde	Dimensionerande värde
Ny packad fyllning. Packad enligt AMA	Tunghet, (γ)	20 kN/m ³	20 kN/m ³
	Effektiv tunghet, (γ')	12 kN/m ³	12 kN/m ³
	Inre friktionsvinkel (ϕ')	45°	37,6°
Svåmsediment	Tunghet, (γ)	18 kN/m ³	18 kN/m ³

Jordmaterial	Jordparameter	Karakteristiskt värde	Dimensionerande värde
	Effektiv tunghet, (γ')	10 kN/m ³	10 kN/m ³
	Inre friktionsvinkel (ϕ')	31°	24,8°
Lera	Tunghet, (γ)	17 kN/m ³	17 kN/m ³
	Effektiv tunghet, (γ')	7 kN/m ³	7 kN/m ³
	Odränerad skjuvhållfasthet, (c_u)	45+3,6z* kPa	30+2,4z* kPa
	Dränerad skjuvhållfasthet (c')	4,5+0,36z* kPa	3,5+0,27z* kPa
	Inre friktionsvinkel (ϕ')	30°	23,9°
Friktionsjord (lerig siltig sand)	Tunghet, (γ)	18 kN/m ³	18 kN/m ³
	Effektiv tunghet, (γ')	10 kN/m ³	10 kN/m ³
	Inre friktionsvinkel (ϕ')	34°	27,4°
Morän	Tunghet, (γ)	20 kN/m ³	20 kN/m ³
	Effektiv tunghet, (γ')	11 kN/m ³	11 kN/m ³
	Inre friktionsvinkel (ϕ')	38°	31°

*) z anger djup från aktuella lagrets ovankant

10.1.3 Beräkningsresultat

Säkerheten mot stabilitetsbrott har kontrollerats i två sektioner. Resultaten av utförda beräkningar för befintliga förhållanden och för slutligt läge redovisas i Tabell 2 och i bilagor, se bilageförteckning.

Tabell 2 Beräknade säkerhetsfaktorer med avseende på stabilitetsbrott.

Sektion, beskrivning	F_{EN} Odränerad analys	F_{EN} Kombinerad analys	Bilaga:sida
GC-bro Västra sidan, befintliga förhållande	5,21	3,00	3:1-2
GC-bro Västra sidan, slutskede	1,37	1,19	3:3-4
GC-bro Östra sidan, befintliga förhållande	1,31	1,30	3:5-6
GC-bro Östra sidan, slutskede	1,04	1,07	3:7-8
GC-bro Östra sidan, slutskede (beräkning 2 inkl. horisontalkraft)	1,43	1,24	3:9-10

Enligt utförda stabilitetsberäkningar bedöms totalstabiliteten ur geoteknisk synpunkt vara tillfredställande.

Två lokala glidytor med säkerhetsfaktor 1,04 respektive 1,07 har däremot uppmärksamats. Dessa glidytor påverkar inte totalstabiliteten men ska kontrolleras i detalj vid utformning av erosionsskyddet.

11 Geoteknisk bärförmåga

12 Geotekniska rekommendationer

12.1 Grundläggning av GC-bro

Grundläggning av brons huvudstöd förutsätts ske med
Grundläggningen bedöms kunna utföras med

vilka då

12.2 Anläggning av GC-väg

Anläggning av planerad gc-väg bedöms kunna ske i naturligt lagrade jordar under förutsättning att all organisk jord och jord med organiskt innehåll schaktats ur.

Mellan framschaktad terrass och ny överbyggnad läggs geotextil enligt AMA Anläggning

Terrassen hänförs till materialtyp 2 och tjälfarlighetsklass 1.

12.3 Schaktarbeten

Schaktarbeten och pålningsarbeten intill å kan komma att behöva utföras inom temporär stödkonstruktion, förslagsvis i form av tät stålspont. Eventuell spont ska dimensioneras med dimensioneringsparametrar under kapitel 12.3. Förslag på spontlösning kan ses i *Skiss, spont vi huvudstöd* daterad 2022-02-25.

Schaktarbetena ska utföras i enlighet med AMA Anläggning och skriften "Schakta säkert". Schaktarbetena ska utföras med betryggande säkerhet mot ras och skred.

Schaktarbetena för brons mellanstöd bedöms temporärt kunna utföras med slänt. Släntlutningar för schakter ska anpassas efter bland annat jordart, väderlek schaktdjup och närhet till grundvattenytan. Vid lokala schakter ska stabilitetsförhållandena kontrolleras.

Befintlig finjord är mycket känslig för vattenöverskott, dvs. förhöjda vattenkvoter. Vid schakt i dessa jordar är det därför av största vikt att schaktbotten och slänter hålls torra samt att inverkan av mekanisk påverkan minimeras.

För att säkerställa och bibehålla goda grundläggningsförhållanden ska schaktarbetena närmast schaktbotten utföras med skopa utan tändar, och skyddas omedelbart innan grundläggningsarbetena påbörjas. Framschaktad schaktbotten ska skyddas mot nederbörd, frysning och tjäle. Schaktbotten ska ej beträdas förrän schaktbotten skyddats.

Schaktbotten ska länshållas mot inläckande ytvatten, och vattenansamling på schaktbotten ska undvikas genom att denna utföras med fall. Schakt- och terrasseringsarbeten ska utföras vid torr väderlek. Schaktbotten får ej utsättas för frost.

12.4 Packning och fyllning

Fyllning och återfyllning utförs och packas enligt anvisningar i AMA Anläggning. På grund av förekommande befintliga finjordar packas första lagret varsamt utan vibration vid utläggning av ny fyllning.

Material som används till fyllning ska vara kontrollerat med hänsyn till radon och vara fritt från föroreningar.

Geotextil kravställs och läggs ut enligt AMA Anläggning mellan ny fyllning och befintliga jordar.

13 Dimensionering

13.1 Plattgrundläggning

Plattgrundläggning ska dimensioneras enligt Eurokod, SS-EN 1997-1 med tillhörande nationell bilaga, TSFS 2018:57.

Grundläggning av mellanstöden bedöms kunna hänföras till geoteknisk kategori 2 (GK2).

Säkerhetsklass väljs av projektören/konstruktören. Ur geoteknisk synpunkt rekommenderas dock säkerhetsklass 2 (SK2, $\gamma_d=0,91$).

Beräkningar i brott- och bruksgränstillstånd ska utföras med nedanstående parametrar och partialkoefficienter.

Dimensionering av grundplattor utförs enligt dimensioneringssätt DA3.

Dimensioneringen utförs med partialkoefficientmetoden. Jordlagrens dimensionerande parametervärden bestäms enligt följande:

$$X_d = \frac{1}{\gamma_m} \cdot \eta \cdot \bar{X}$$

där:

X_d = det dimensionerande värdet på aktuell egenskap

γ_m = fast partialkoefficient

η = omräkningsfaktor för aktuell geokonstruktion

\bar{X} = valt värde baserat på härledda värden

Partialkoefficienter ska väljas enligt TSFS 2018:57.

Omräkningsfaktorer, η , ska antas enligt Tabell 4:

Tabell 4. Val av delfaktorer för omräkningsfaktorn

	Odränerad parameter	Dränerad parameter
η egenvikt/tunghet,	-	1,0
η sammanvägd,	-	0,99
η 1-4,	-	1,0
η 5-6,	-	0,9*
η 7-8,	-	1,1

* bestäms av konstruktören då denna faktor beror på konstruktionens geometri och utformning (långsträckt eller kvadratisk platta), se mer i EN 1997-1 kapitel 6 Plattgrundläggning IEG Rapport 7:2008. Långsträckt platta är här antagen.

Partialkoefficienter med hänsyn till modellosäkerheter framgår av Tabell 5.

Tabell 5. Partialkoefficienter med hänsyn till modellosäkerheter

	γ_{Rd}
Vertikal bärförmåga	1,1
Glidning	1,1
Bruksgräns	1,3

13.2 Pålgrundläggning

Pålgrundläggning dimensioneras enligt Eurocode, SS-EN 1997-1, Kapitel 7 (IEG Rapport 8:2008, Rev 2), varvid denna bedöms kunna hänföras till geoteknisk kategori 2 (GK2). Säkerhetsklass väljs utav projektören. Ur geoteknisk synpunkt rekommenderas dock minst säkerhetsklass 2 (SK2, $\gamma_d=0,91$).

Dimensionering av pålar med hänsyn till geoteknisk bärförmåga (GEO) utförs enligt dimensioneringssätt, DA2 och enligt DA3 för dimensionering av pålars konstruktiva bärförmåga (STR).

Dimensioneringen utförs med partialkoefficientmetoden. Jordlagrens dimensionerande parametervärden bestäms enligt följande:

$$X_d = \frac{1}{\gamma_m} \cdot \eta \cdot \bar{X}$$

där:

X_d = det dimensionerande värdet på aktuell egenskap

γ_m = fast partialkoefficient

η = omräkningsfaktor för aktuell geokonstruktion

\bar{X} = valt värde baserat på härledda värden (karakteristiskt)

13.2.1 Partialkoefficienter

I Tabell 6 anges partialkoefficienter för verifiering av strukturella (STR) och geotekniska (GEO) gränstillstånd, enligt vad som finns angivet i TSFS 2018:57 tabell 38.3.

Tabell 6. Partialkoefficienter, γ_M för jordparametrar (STR och GEO).

Jordparametrar	Uppsättning M1 ²	Uppsättning M2 ³
Inre friktionsvinkel ¹	$\gamma_{\phi'}=1,0$	$\gamma_{\phi'}=1,3$
Effektiv kohesion	$\gamma_{c'}=1,0$	$\gamma_{c'}=1,3$
Odränerad skjuvhållfasthet	$\gamma_{cu}=1,0$	$\gamma_{cu}=1,5$
Tunghet	$\gamma_{\gamma}=1,0$	$\gamma_{\gamma}=1,0$

¹⁾ Denna koefficient tillämpas på $\tan \phi'$

²⁾ M1 nyttjas för pålars geotekniska bärförmåga (GEO) i DA2.

³⁾ M2 nyttjas för pålars strukturella bärförmåga i (STR) i DA3.

13.2.3 Pålbarhet

Pålningen bedöms kunna utföras utan svårighet genom naturligt lagrad lera och friktionsjord till stopp i morän. Lokala hinder i form av block kan förekomma.

13.3 Geotekniska parametrar

Geotekniska parametrar, \bar{X} , för dimensionering av plattor och sulor, bedömningar av sättningars storlek samt för dimensionering av pålgrundläggning framgår av Tabell 8-10. Parametrarna används i kombination med bilaga 1.

Tabell 8. Geotekniska parametrar, \bar{X} , (karaktäristiska värden) för dimensionering av plattgrundläggning av mellanstöd.

Jordlager	Djup (m u bef. my)	Jordparameter	Valt värde
Ny packad fyllning ¹ Packad enligt AMA		Tunghet, (γ)	20 kN/m ³
		Effektiv tunghet, (γ')	12 kN/m ³
		Inre friktionsvinkel (φ')	45°
		Elasticitetsmodul (E)	50 MPa

¹) Valda värden i enlighet med

Tabell 9. Geotekniska parametrar, \bar{X} , (karaktäristiska värden) för den västra sidan av å.

Jordlager	Djup (m u bef. my)	Jordparameter	Valt värde
Svåmsediment (sand)	0-1,5 m	Tunghet, (γ) ¹ Effektiv tunghet, (γ') Inre friktionsvinkel (φ') Elasticitetsmodul (E)	18 kN/m ³ 10 kN/m ³ 31° 5 MPa
Lera	1,5-10 m	Tunghet, (γ) ¹ Effektiv tunghet, (γ') Odränerad skjuvhållfasthet, (c_u) Elasticitetsmodul (E)	17 kN/m ³ 7 kN/m ³ 45 + 3,6 x z ²) kPa 11 MPa
Friktionsjord (lerig siltig sand)	10-12 m	Tunghet, (γ) ¹ Effektiv tunghet, (γ') Inre friktionsvinkel (φ') Elasticitetsmodul (E)	18 kN/m ³ 10 kN/m ³ 34° 15 MPa
Morän	<12 m	Tunghet, (γ) ¹ Effektiv tunghet, (γ') Inre friktionsvinkel (φ') Elasticitetsmodul (E)	20 kN/m ³ 11 kN/m ³ 38° 40 MPa

¹⁾ Valda värden i enlighet

²⁾ Där $z=0$ vid lagrets överkant.

Tabell 10. Geotekniska parametrar, \bar{X} , (karaktäristiska värden) för den östra sidan av å.

Jordlager	Djup (m u bef. my)	Jordparameter	Valt värde
Svämmediment (sand)	0-2 m	Tunghet, (γ) ¹⁾ Effektiv tunghet, (γ') Inre friktionsvinkel (φ') Elasticitetsmodul (E)	18 kN/m ³ 10 kN/m ³ 32° 6 MPa
Lera	1,5-8 m	Tunghet, (γ) ¹⁾ Effektiv tunghet, (γ') Odränerad skjuvhållfasthet, (c_u) Elasticitetsmodul (E)	17 kN/m ³ 7 kN/m ³ 45 + 3,6 x z ²⁾ kPa 11 MPa
Friktionsjord (lerig siltig sand)	8-12 m	Tunghet, (γ) ¹⁾ Effektiv tunghet, (γ') Inre friktionsvinkel (φ') Elasticitetsmodul (E)	18 kN/m ³ 10 kN/m ³ 34° 15 MPa
Morän	<12 m	Tunghet, (γ) ¹⁾ Effektiv tunghet, (γ') Inre friktionsvinkel (φ') Elasticitetsmodul (E)	20 kN/m ³ 11 kN/m ³ 38° 40 MPa

¹⁾ Valda värden i enlighet med TK Geo 13

²⁾ Där $z=0$ vid lagrets överkant.

Dränerad skjuvhållfasthet i leran uppskattas empiriskt med:

$$c' = 0,1 \times c_u$$

$$\varphi' = 30^\circ$$

14 Geoteknisk kontroll

Schaktnings- och grundläggningsarbetena ska ske i samråd med geotekniskt sakkunnig. Geoteknisk kontroll ska utföras enligt av entreprenören upprättat kontrollprogram med inriktning på:

- > *kontroller av avvikande förhållande jämfört med de geotekniska handlingarna såsom jordart (inkl. fasthet) och grundvatten,*
- > *om avvikelser (lukt- och synintryck) noteras ska ansvarig geotekniker kontaktas,*
- > *före och i samband med schaktning ska kontroll av grundvattennivån utföras. Avser kontroll av både slutna och öppna magasin,*
- > *schaktbottenbesiktning ska utföras och dokumenteras av geotekniskt sakkunnig innan grundläggningsarbetena påbörjas,*
- > *Kontrollprogram för pålning,*
- > *packningskontroller ska utföras där uppfyllnader utförs. Resultaten av packningskontrollerna ska verifiera utnyttjade egenskaper hos jorden.*

BILAGA 1

BILAGA 2

DIAGRAM SKJUVHÅLLFASTHET

Projekt:

Uppdragsnummer: A224754

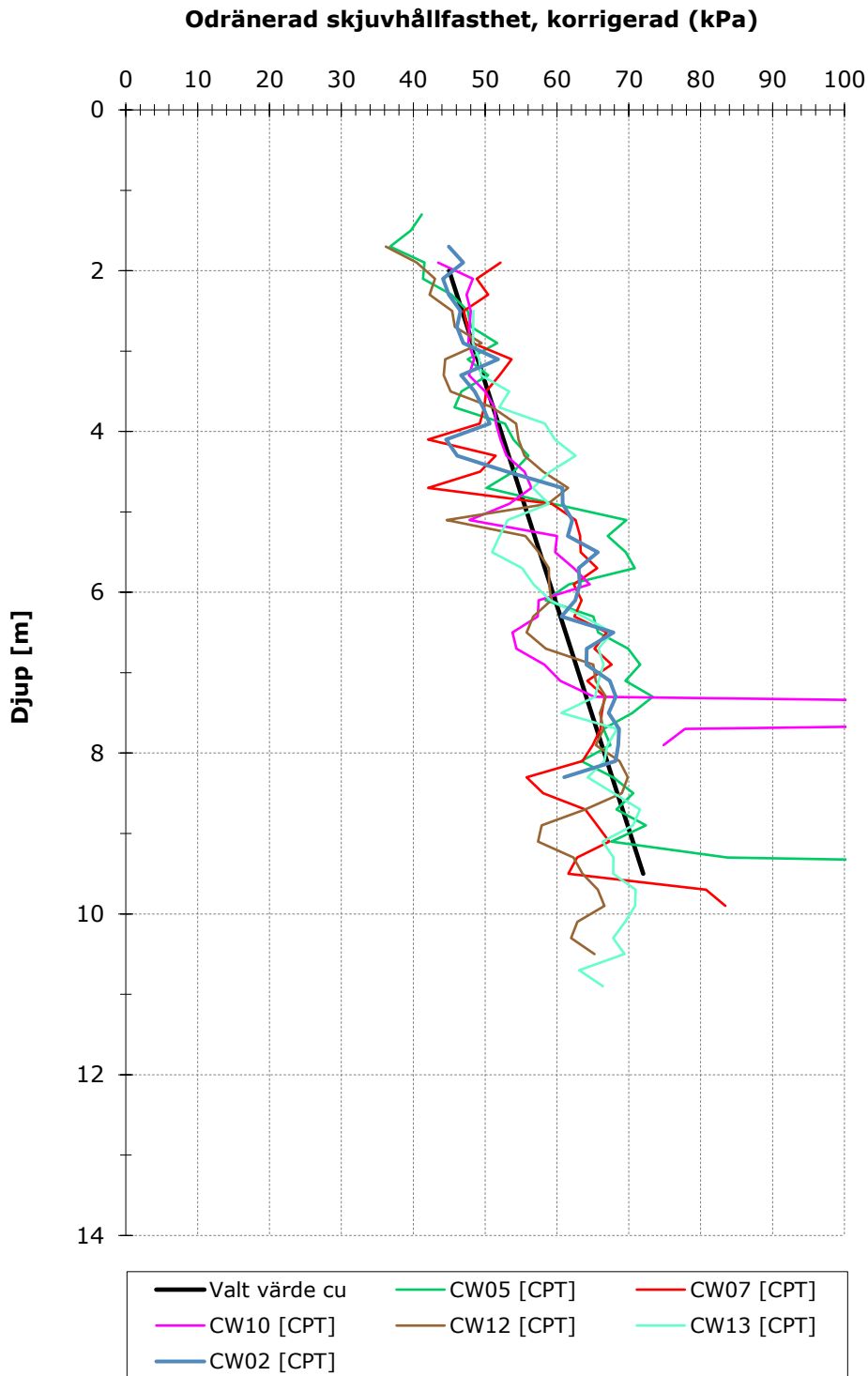


DIAGRAM FRIKTIONSVINKEL

Projekt:

Uppdragsnummer: A224754

Område: Väster om å

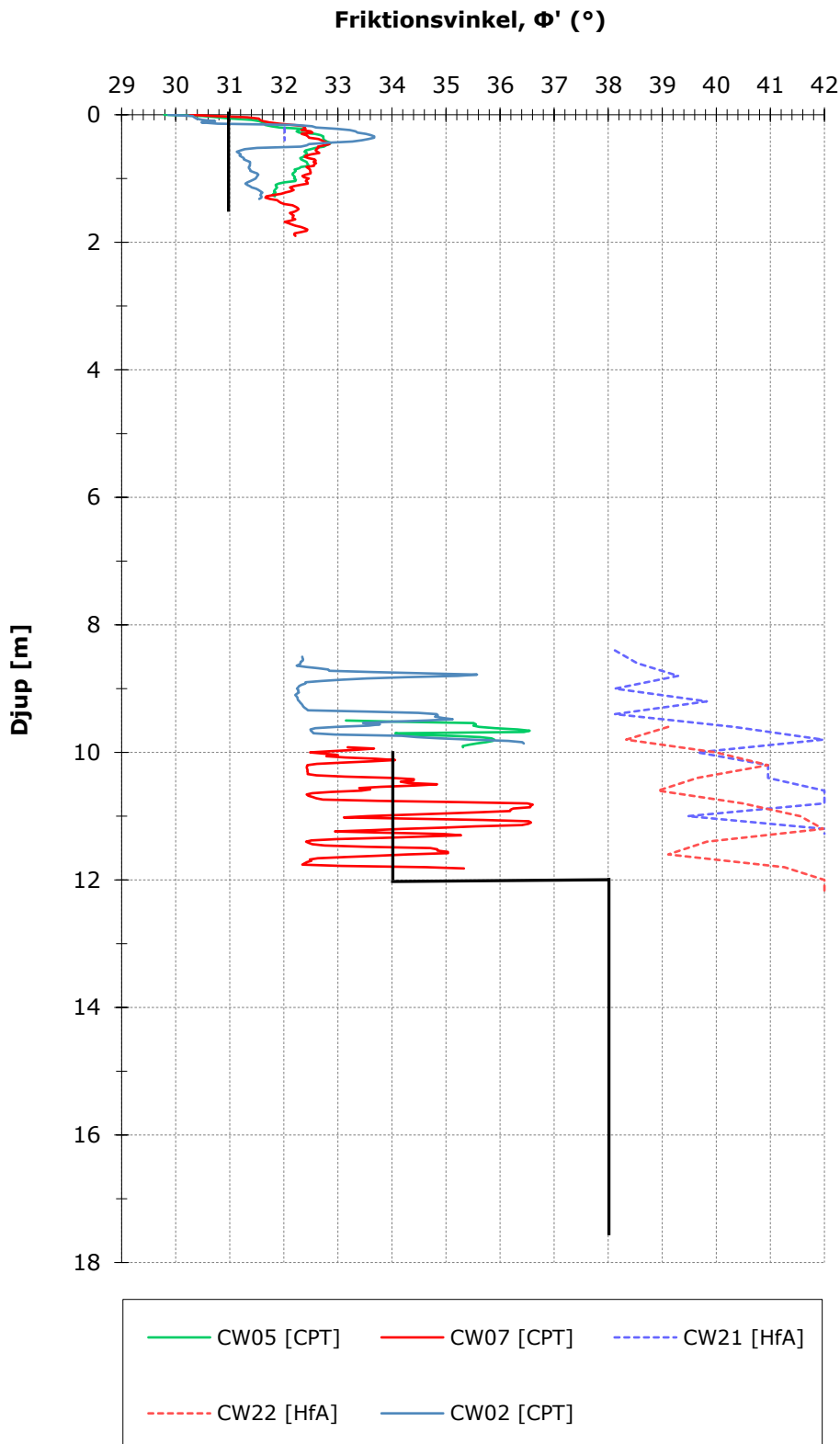


DIAGRAM ELASTICITETSMODUL

Projekt:

Uppdragsnummer: A224754

Område: Väster om å

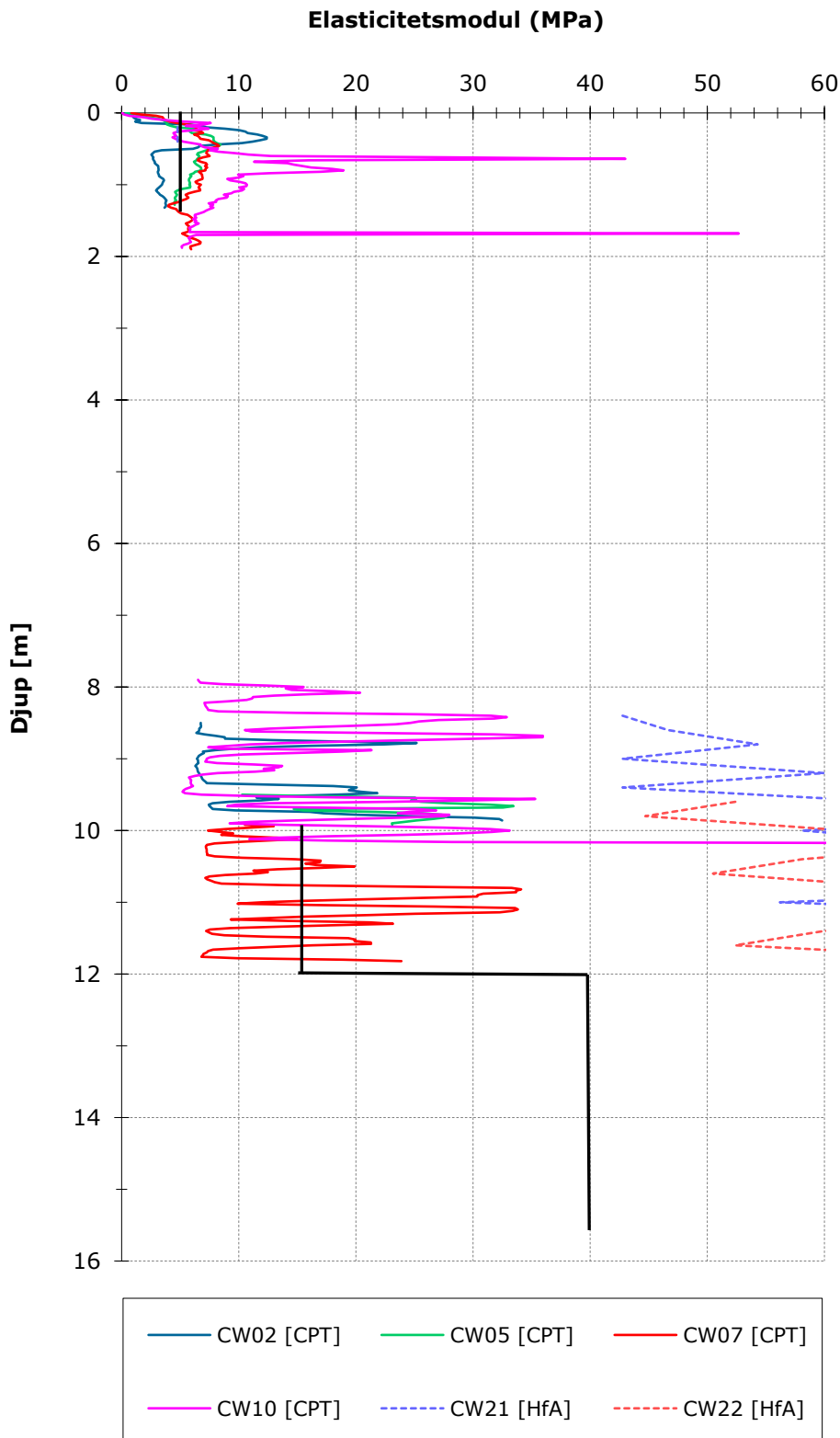


DIAGRAM FRIKTIONSVINKEL

Projekt:

Uppdragsnummer: A224754

Område: Öster om å

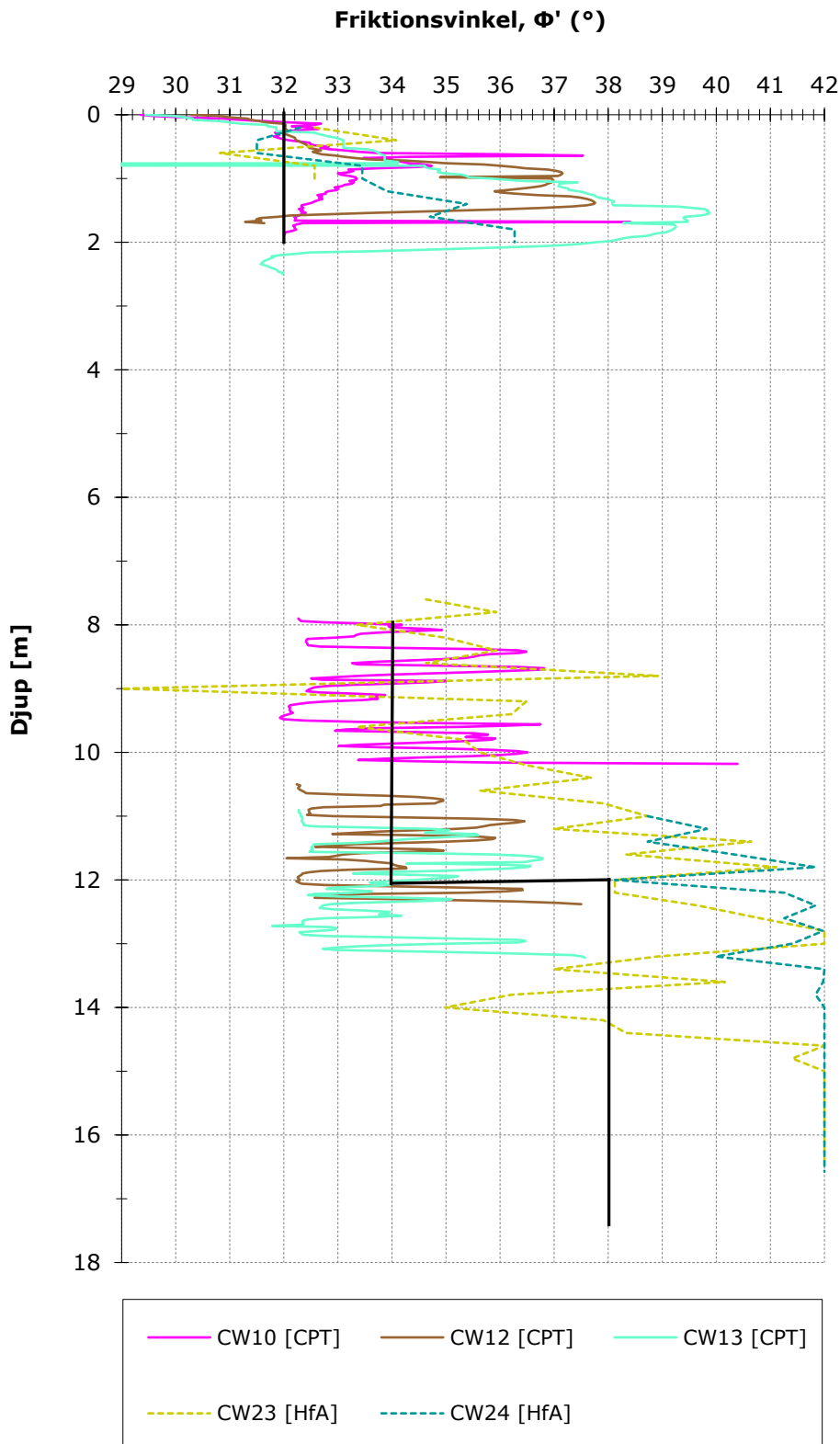
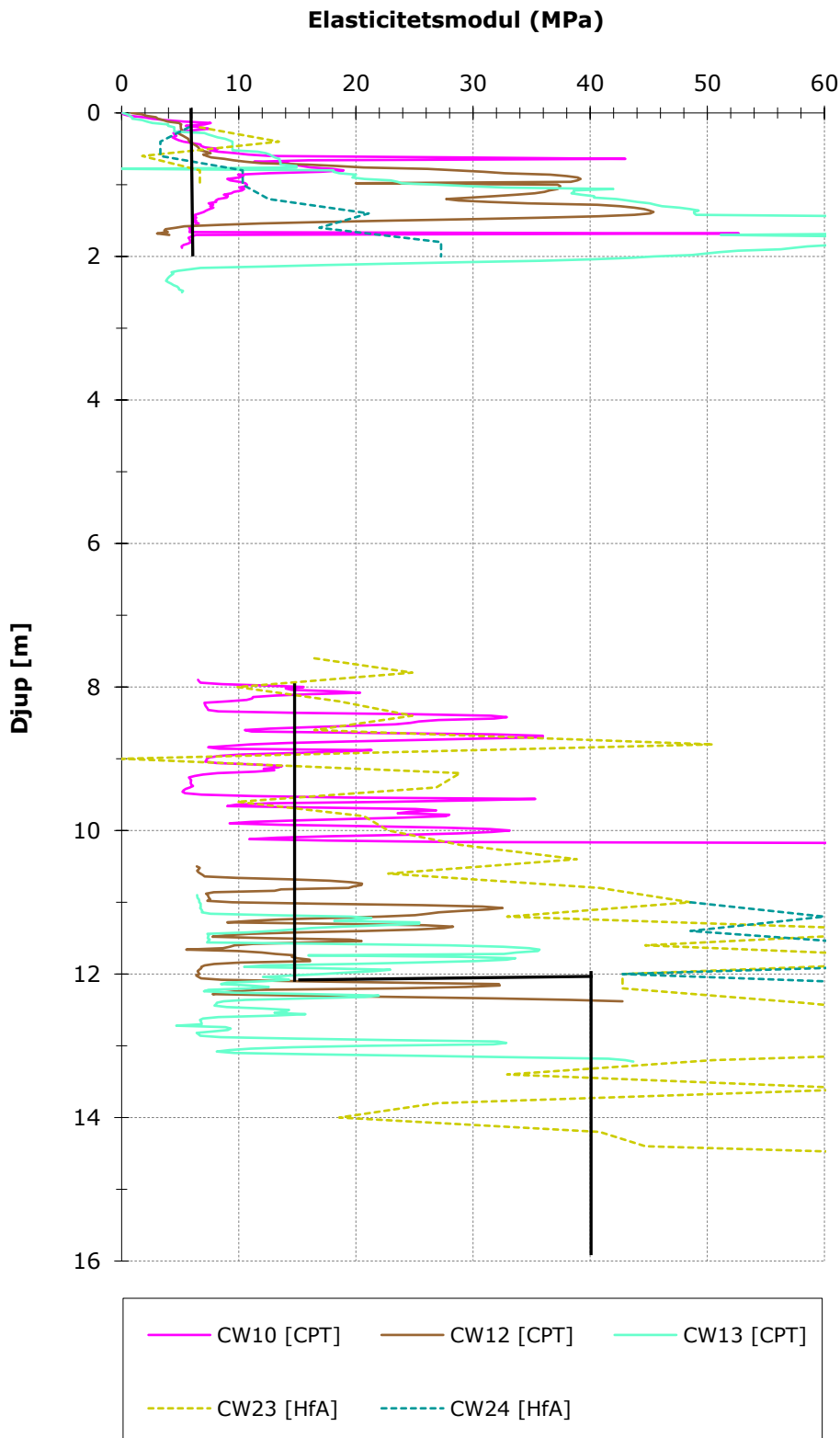


DIAGRAM ELASTICITETSMODUL

Projekt:

Uppdragsnummer: A224754

Område: Öster om å





CHALMERS