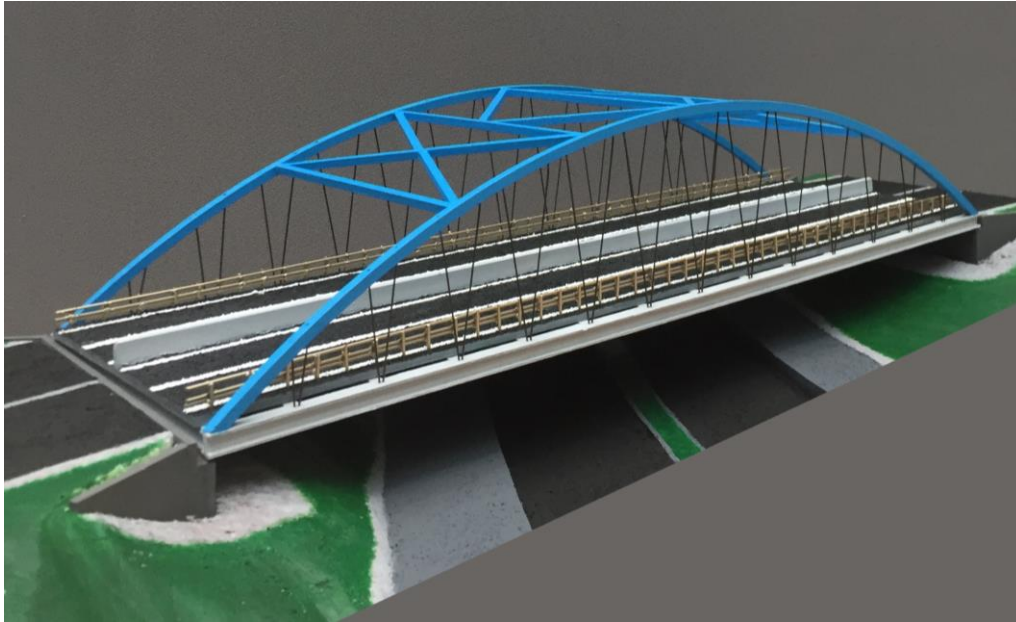




CHALMERS



Nya Kvilleledsbron över Backavägen

Konceptuell utformning samt
preliminärdimensionering av en bågbro
Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

DINA ABDALLAH
JOHAN DAHLÉN
AMILIA ENGDAHL
NATALIE LARSSON
LENNART NYLUND
PONTUS RAUTIO PÅLSSON

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

KANDIDATARBETE

Nya Kvilleledsbron över Backavägen

Konceptuell utformning samt preliminärdimensionering av en bågbro

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

DINA ABDALLAH
JOHAN DAHLÉN
AMILIA ENGDAHL
NATALIE LARSSON
LENNART NYLUND
PONTUS RAUTIO PÅLSSON

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2021

Nya Kvilleledsbron över Backavägen

Konceptuell utformning samt preliminärdimensionering av en bågbro

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

DINA ABDALLAH

JOHAN DAHLÉN

AMILIA ENGDAHL

NATALIE LARSSON

LENNART NYLUND

PONTUS RAUTIO PÅLSSON

© DINA ABDALLAH, JOHAN DAHLÉN, AMILIA ENGDAHL,
NATALIE LARSSON, LENNART NYLUND, PONTUS RAUTIO PÅLSSON, 2021

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola, 2021

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Författarnas egentillverkade modell av bron.
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2021

Nya Kvilleledsbron över Backavägen

Konceptuell utformning samt preliminärdimensionering av en bågbro

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

DINA ABDALLAH

JOHAN DAHLÉN

AMILIA ENGDAHL

NATALIE LARSSON

LENNART NYLUND

PONTUS RAUTIO PÅLSSON

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Backaplansområdet är under utveckling och för att ge förutsättningar till detta genom att underlätta trafikflödet, planeras en planskild korsning mellan den nya Kvilleleden och den befintliga Backavägen. Denna rapport syftar på att ta fram den mest lämpliga brolösningen för detta genom två urvalsprocesser samt en preliminärdimensionering av det valda brokonceptet.

För framtagande av brokoncept till första urvalsprocessen ligger en litteraturstudie till grund. I denna litteraturstudie tas geografiska platsens och projektets förutsättningar och krav fram. Litteraturstudien tar även upp geotekniska förhållanden, grundläggning och brounderhåll samt för- och nackdelar med olika material, produktionsmetoder och brotyper. Utifrån detta tas konceptuella broförslag upp varifrån den första urvalsprocessen tar ut fyra olika brokoncept som är genomförbara. Dessa brokoncept studeras noggrannare och möjlig utformning, produktionsmetod samt det konceptspecifika underhåll som kommer att krävas preciseras.

De fyra brokoncepten jämförs i den andra urvalsprocessen i en viktningsmatris för att få fram det brokoncept som lämpar sig mest. Till grund för viktningsmatrisen används 11 olika utvärderingskriterier som viktas mot varandra för att få fram det mest betydelsefulla kriteriet för den aktuella bron. Viktningsmatrisen mellan de fyra olika brokoncepten resulterar i det valda brokonceptet som är en bågbro med ett spann på 63 meter. Bågbron består av tvärbalkar, dragband och bågar i stål samt en betongplatta som samverkar med tvärbalkarna.

Bågbron preliminärdimensioneras i både brott- och brukgränstillstånd utifrån svensk standard. För att genomföra beräkningar används Matlab och som hjälp till detta används CALFEM.

Nyckelord: Konceptuell design, Broprojektering, Stål- och samverkansbro, Bågbro, Vägbro, Kvilleleden, Preliminärdimensionering

New bridge on Kvilleleden over Backavägen

Conceptual design and preliminary dimensioning of an arch bridge

Bachelor's thesis in Civil Engineering

DINA ABDALLAH

JOHAN DAHLÉN

AMILIA ENGDAHL

NATALIE LARSSON

LENNART NYLUND

PONTUS RAUTIO PÅLSSON

Department of Architecture and Civil Engineering
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The Backaplan area is under development and to provide conditions for this by facilitating the flow of traffic, a separate intersection is planned between the new Kvilleleden and the existing Backavägen. This report aims to develop the most suitable bridge solution for this through two selection processes and a preliminary dimensioning of the selected bridge concept.

A literature study is the basis for developing a bridge concept for the first selection process. In this literature study, the conditions and requirements of the geographical location and the project are presented. The literature study also addresses geotechnical conditions, foundations and bridge maintenance, as well as the advantages and disadvantages of different materials, production methods and bridge types. Based on this, conceptual bridge proposals are developed, from which the first selection process takes out four different bridge concepts that are feasible. These bridge concepts are studied more carefully and the possible design, production method and the concept-specific maintenance that will be required are specified.

The four bridge concepts are compared in the second selection process in a weighting matrix to produce the bridge concept that is most suitable. The weighting matrix is used as a basis for 11 different evaluation criteria that are weighted against each other in order to obtain the most significant criterion for the bridge in question. The weighting matrix between the four different bridge concepts results in the chosen bridge concept, which is an arch bridge with a span of 63 meters. The arch bridge consists of crossbeams, drawbars and steel frames as well as a concrete slab that cooperates with the crossbeams.

The arch bridge is preliminarily dimensioned in both ultimate limit and service limit states based on Swedish standards. Matlab is used to perform calculations and CALFEM is used to help with this.

Key words: Conceptual design, Bridge design, Steel bridge, Collaboration bridge, Arch bridge, Road bridge, Kvilleleden, Preliminary dimensioning

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	VII
BETECKNINGAR	VIII
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Frågeställning	2
1.5 Metod	2
2 KRAV OCH FÖRUTSÄTTNINGAR	3
2.1 Geografi och trafikflöde	3
2.2 Geometri	3
2.3 Geotekniska förhållanden och grundläggning	4
3 KONSTRUKTIONSMATERIAL	5
3.1 Trä	5
3.2 Stål	5
3.3 Armerad betong	5
4 PRODUKTION AV KVILLELEDSBRON	6
4.1 Produktionsordning och produktionsmetoder	6
4.2 Temporära konstruktioner för produktion	6
4.3 Risker vid produktion	7
5 FÖRVALTNING OCH UNDERHÅLL AV KVILLELEDSBRON	8
5.1 Inspektioner	8
5.2 Underhåll	8
5.2.1 Underhåll av trä	9
5.2.2 Underhåll av stål	9
5.2.3 Underhåll av betong	9
6 BROTYPER	10

6.1	Plattbro	10
6.2	Balkbro	10
6.3	Rambro	10
6.4	Valvbro	10
6.5	Bågbro	10
6.6	Fackverksbro	11
6.7	Hängbro	11
6.8	Snedkabelbro	11
6.9	Hängverksbro	11
7	FÖRSTA URVALSPROCESSEN	12
7.1	Konceptförslag och första urval	12
8	DE VALDA BROKONCEPTEN	13
8.1	Balkbro	13
8.1.1	Produktion	13
8.1.2	Förvaltning och underhåll	13
8.2	Balkrambro	13
8.2.1	Produktion	14
8.2.2	Förvaltning och underhåll	14
8.3	Bågbro	14
8.3.1	Produktion	14
8.3.2	Förvaltning och underhåll	15
8.4	Hängverksbro	15
8.4.1	Produktion	15
8.4.2	Förvaltning och underhåll	15
9	ANDRA URVALSPROCESSEN	16
9.1	Viktning av utvärderingskriterier	16
9.2	Viktning av brokoncept	16
10	VALT BROKONCEPT	18
10.1	Övergripande utformning av vald bro	18
10.2	Detaljutformning	18
10.3	Övergångskonstruktion och lager	19
10.4	Broräcken	19
10.5	Systemmodell av bågbro	19
10.6	Förvaltning- och Underhållsplan för Kvilleledsbron	19
11	PRELIMINÄR DIMENSIONERING AV VALT BROKONCEPT	20

11.1	Laster vid dimensionering av bro	20
11.2	Dimensionerande laster i brott- och brukgränstillstånd	20
11.3	Lastmodeller enligt svensk standard	21
11.3.1	Lastmodell 1, LM1	21
11.4	Preliminär dimensionering av betongplattan	22
11.5	Preliminär dimensionering av tvärbalkarna	23
11.6	Preliminär dimensionering av det bärande systemet	23
11.7	Preliminär dimensionering av upplagen	25
11.8	Preliminär dimensionering av detaljer	26
11.9	Återstående dimensionering	27
12	DISKUSSION	28
13	SLUTSATS	30
	REFERENSER	31
	BILAGA I GLOBAL MODELL AV BÄRVERKET	34
	BILAGA II DIMENSIONERANDE LASTER I BRUKS- OCH BROTTSGRÄNSTILLSTÅND	42
	BILAGA III DIMENSIONERANDE KRAFTER OCH NEDBÖJNING FÖR TVÄRBALK	45
	BILAGA IV PRELIMINÄR DIMENSIONERING AV DRAGBAND	55
	BILAGA V PRELIMINÄR DIMENSIONERING AV BÅGEN	60
	BILAGA VI PRELIMINÄR DIMENSIONERING AV TVÄRBALKAR	64
	BILAGA VII PRELIMINÄR DIMENSIONERING AV BETONGPLATTAN	70
	BILAGA VIII PRELIMINÄR DIMENSIONERING AV UPPLAGEN	78
	BILAGA IX PRELIMINÄR DIMENSIONERING AV DETALJER	83
	BILAGA X PLANKARTA ÖVER STUDERAT OMRÅDE	87
	BILAGA XI SEKTIONS-RITNING	88
	BILAGA XII GRAFISK MODELL AV BÅGEN MED BOWS NOTATION	89

BILAGA XIII	KRAFTPOLYGON I BÅGEN MED BOWS NOTATION	90
BILAGA XIV	SKISSER ÖVER OLIKA BROTYPER	91

Förord

Denna tekniska rapport är gjord av studenter på samhällsbyggnadsteknik på Chalmers tekniska högskola som ett kandidatarbete. Syftet är att tillämpa den kunskap vi har lärt oss under de första tre åren och möjligheten till ny kunskap som gynnar oss i vidare studier. Under arbetet har vi fått hjälp från ett antal personer som vi vill uppmärksamma.

Mario Plos, biträdande professor/avdelningschef betongbyggnad på avdelningen arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, som varit vår handledare. Vi vill tacka dig för att du besvarat våra frågor och tips på litteratur som har hjälpt oss under projektet.

Staffan Lindén, gruppchef på COWI, som har varit vår andra handledare vill vi tacka för att du har förmedlat din kunskap inom området och tagit dig tid att svara på våra frågor även utanför avsatt handledningstillfälle.

Mustafa Aygül, specialist på COWI som har hjälpt oss med sin erfarenhet.

Tabita Nilsson, tekniklektor, arkitektur och samhällsbyggnad, och Peter Lindblom Tekniklektor, verkstadsföreståndare, Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik. Vi tackar för er vägledning och era värdefulla tips som har bidrag till att vi lyckades få till en modell av vår valda bro.

Göteborg 2021

Dina Abdallah

Johan Dahlén

Amilia Engdahl

Natalie Larsson

Lennart Nylund

Pontus Rautio Pålsson

Beteckningar

Versala latinska bokstäver

A = area

A_s = tvärsnittsarea dragarmering

A'_s = tvärsnittsarea tryckarmering

E_{cm} = elasticitetsmodul (betong)

E_s = elasticitetsmodul (stål)

$F_{v,Rd}$ = dimensionerande skjuvbrottskapacitet för en bult

I_y = tvärsnittets tröghetsmoment

K_t = bucklingskoefficient

L = längd

M_{cr} = sprickmoment

M_{bRd} = dimensionerande moment för stålbalk

M_{Ed} = dimensionerande böjmoment, lasteffekt

M_{fRd} = momentkapacitet för stålbläs

M_{plRd} = samverkanstvärsnittets dimensionerande plastiska bärförmåga för moment vid full skjuvförbindning

M_{Rd} = dimensionerande momentkapacitet

N_{cr} = spricklast

N_{cr} = elastisk kritisk normalkraft

N_{Ed} = dimensionerande värde för normalkraften i ett snitt (drag-eller tryckkraft), lasteffekt

N_f = dimensionerande normalspänning för flänsen i stålbalk

N_{plRd} = samverkanstvärsnittets dimensionerande plastiska bärförmåga för normalkraft

N_{tRd} = dimensionerande bärförmåga för konstruktionsdel

N_w = dimensionerande normalspänning för livet i stålbalk

P = punktlast

Q_1 = punktlast

V_{bWRd} = dimensionerande tvärkraft för skjubucklingskapacitet

V_{Ed} = dimensionerande tvärkraften i ett snitt, lasteffekt

$V_{Ed,red}$ = reducerad dimensionerande tvärkraft

V_{plRd} = samverkanstvärsnittets dimensionerande plastiska bärförmåga för tvärkraft

V_{rdc} = dimensionerande tvärkraftskapacitet (skjuvglidbrott) utan tvärkraftsarmering

W = böjmotstånd

XLT = reduktionsfaktor med avseende på vippning

X_w = skjuvbucklingskoefficient

Gemena latinska bokstäver

b = bredd

b_{eff} = medverkande flänsbredd

c_{min} = minsta täckande betongskikt

d = effektiv höjd

d' = avstånd från tvärsnittskant till tryckt armering

f_{cd} = dimensioneringsvärde för betongens tryckhållfasthet

f_{ck} = karakteristiskt värde för betongens cylindertryckhållfasthet (28 dagar)

f_{ctm} = medelvärde för betongens draghållfasthet

f_u = grundmaterialets brotthållfasthet

f_y = armeringens sträckgräns

f_{yd} = flytgräns

f_{yk} = karakteristiskt värde för tvärkraftsarmeringens sträckgräns

h = höjd

q_d = utbredd linjelast

t = tjocklek

w_{el} = elastiskt böjmotstånd

w_k = karakteristiskt värde på sprickbredd

w_{max} = högsta tillåtna sprickbredd i bruksgränstillstånd

Gemena grekiska bokstäver

α_{cc} = faktor som beaktar reduktion av betongens tryckhållfasthet på grund av långvarig belastning

α_{ef} = effektivt värde på förhållandet mellan armeringen och betongens E-modul

β_w = korrelationsfaktor som beror på grundmaterialets hållfasthet

γ_d = dimensionerande jorddensitet

γ_{M0} = säkerhetskonstant

γ_{M1} = partialkoefficient

γ_{M2} = partialkoefficienten för svetsens bärförmåga

δ = förskjutning

ε = töjning

ε_{ca} = slutgiltigt värde på autogen krympning

ε_{cd} = slutgiltigt värde på uttorkningskrympning

ε_{cs} = slutligt krympmått

ε_s = töjning dragarmering

ε_{syd} = dimensionerande värde på flyttöjning

ε'_s = töjning tryckarmering

η = verkningsgrad

Θ = vinkel

λ_w = slankhetstal

σ_c = tryckspänning i betong

σ_j = jämförelsespänning som en svets utsätts för (beroende på lastförhållande)

σ_s = dragspänning i armering

σ_{\perp} = normalspänning som uppstår i svetsen

φ = kryptal

Övriga tecken

\emptyset = diameter

\emptyset'_d = dimensionerande friktionsvinkel

1 Inledning

Broar är en historisk konstruktion som har utvecklats under århundraden och vars syfte är att leda en väg över ett hinder. Broprojektering är ett typiskt öppet ingenjörproblem där det finns flera olika brotyper med flera olika materialval som kommer att uppfylla olika funktionskrav. Historiskt finns det många olika lösningar för ett problem eftersom förhållanden alltid kommer att skilja sig och broprojektörer har olika tankar kring vad som är viktigt vid brobygge. Vid projektet kommer det finnas unika problem som kommer att skapa ett stort antal olika designmöjligheter för bron. Målet som projektgrupp är att hitta bästa möjliga designen för bron.

1.1 Bakgrund

En ny bro ska projekteras över Backavägen utifrån förutsättningar på tillhandahållna ritningar upprättade av COWI. Syftet med bron är att öka trafikkapaciteten i området kring den redan högtrafikerade Lundbyleden och att förenkla orientering i området för motortrafik, gång och cykeltrafik. Detta är viktigt eftersom närområdet i framtiden kommer förtätas och byggas ut, både vad gäller handel, bostäder och trafik. Bron ska underlätta trafikflödet genom att planskilja det från vägen som går in mot Backaplan från Brunnsbo. Den nya sträckan som ska gå mellan Lundbyleden och Minelundsvägen, som går parallellt med Lundbyleden på norra sidan av Backaplan, kommer kallas Kvilleleden. Backavägen ska byggas om för att klara större trafik och genom att planskilja Backavägen och Kvilleleden görs trafikflödet mer framkomligt. Bron kommer att ge förutsättningar för hur Backaplansprojektet kommer kunna utföras inom de kommande 15 till 20 åren. Bron som ska leda Kvilleleden över Backavägen kommer kallas Kvilleledsbron.

1.2 Syfte

Syftet med rapporten är att ta reda på vilken typ av bro som är bäst lämpad för Kvilleledsbrons förutsättningar. Detta görs utifrån att jämföra olika brotyper och material. Studien bygger på att de givna geografiska och geometriska förutsättningarna, på platsen undersöks och ger förutsättningar för bron. Olika sorters byggnadsmaterial för bron undersöks och jämförs samt de produktionsmetoder och underhåll som de kräver. Olika brotyper jämförs överskådligt och ett urval görs av de typer som lämpar sig för platsen. Dessa brotyper undersöks mer ingående för att ta fram den bro som uppfyller de krav och önskemål som Kvilleledsbron har. Syftet med rapporten är även att preliminärdimensionera den valda bron.

1.3 Avgränsningar

I denna studie fokuserar materialvalen vid byggnationen på armerad betong, stålmaterial och trä samt samverkan mellan dessa material. Andra kompositmaterial än armerad betong behandlas ej på grund av bristfällig kunskap inom området. Gällande de geotekniska förutsättningarna utförs en enklare studie att så att en rimlig lösning för grundläggningen tas fram. Däremot utförs inga utförliga beräkningar över detta. Vidare vid preliminärdimensioneringen utförs enklare beräkningar över rimliga statiska lastfall. Fenomen som uppstår över tid som utmattningssymptom, dynamisk respons och vibrationer på grund av fordonsrörelser eller på grund av vindlaster beaktas ej. Ekonomikalkyler utförs inte för varken byggnationen av bron eller den samhälleliga kostnaden för möjliga trafikproblem under byggnationen. Däremot beaktas dessa ytligt i rapporten.

1.4 Frågeställning

Följande frågor ska besvaras under projektets gång.

- Vilka brokoncept kan utvärderas för aktuellt brolägg?
- Hur ska bron förvaltas och uppfylla alla mål långsiktigt?
- Vilket av brokoncepten tillgodoser kraven för broläget?
- Vad blir brokonceptets preliminära dimensionering?

1.5 Metod

Arbetet uppdelas i två delar. Första delen omfattar en analys av området och presentation av förslag till brokoncept, vars val görs av en iterativ utvärdering av förutsättningar och krav. I andra delen görs en preliminär dimensionsberäkning för det valda brokonceptets bärande konstruktion. Litteraturstudien uppdelas bland studenterna och utförs i tre specialistgrupper: beställare och konstruktion, produktion samt förvaltning och miljö och underhåll.

En utvärdering av området görs för principiella val av brokoncept vilket föresätter de råd och krav från indata som inhämtas från litteraturstudien. Dokumentationen av fakta för varje brokoncept görs i samarbete mellan specialistgrupperna som hämtar information från databaser och facklitteratur. Informationen sammanställs och analyseras för varje brokoncept och utifrån kriterier inom kapacitet och behov väljs det lämpligaste konceptet genom poänguppställning.

Därefter i dimensioneringsfasen används handböcker om brobyggande, eurokoder, standarder och föreskrifter för att preliminärdimensionera bron efter preliminärt beräknade laster under produktion och eftertänkta livslängden. Beräkningarna görs inom brott- och brukgränstillstånd för brons hållfasthet och bärförmåga med användning av datorverktygen MATLAB och CALFEM. De preliminära beräkningarna och dimensionerna redovisas i rapporten och bron visualiseras genom en fysisk modell. Figurer och tabeller i rapporten utan redovisad källa är författarnas egna.

2 Krav och förutsättningar

Detta kapitel avhandlar de krav och förutsättningar som avgör brons slutliga utformning. Förutom Trafikverkets tekniska krav, kommer områdets geografiska, geotekniska och estetiska förutsättningar tas upp.

2.1 Geografi och trafikflöde

Bro Kvilleleden är en del av Kvillemotet som ska placeras på Backaplan ca 3 km norr om Göteborgs centrum. Bron ska sträcka sig parallellt med Bohusbanan, över Backavägen och ansluta Lundbyleden i sydöst med Minelundsvägen i nordväst, se figur 1.



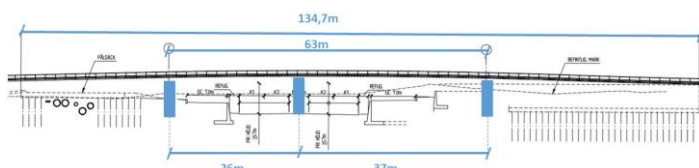
Figur 1 Till vänster, karta över Göteborg stad. Kvillemotet markerad med en röd prick. Till höger, karta över Backaplan. Brons placering är markerad med röd linje. Hämtad från Google Maps.

Backaplan är redan idag utsatt för hög trafikbelastning och det uppstår köer på områdets gator till exempel Gustav Dahlensgatan väster om Backaplan (Göteborgs stad, 2016a). I framtiden skall det byggas ca 2100 nya bostäder samt nya skolor, kulturhus och handel (Göteborgs stad, 2019). Syftet med den nya vägplaneringen är att täcka behovet av ökad mängd transport inom området, samt förbättra kopplingar med kringliggande områden. Kvilleledens framtida belastning bedöms vara 26700 – 32100 fordon per vardagsdygn (Göteborgs stad, 2016b).

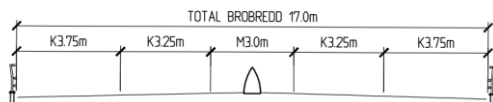
Hastigheten på Lundbyleden ligger på 70 km/h och den befintliga Minelundsvägen har hastigheten 50 km/h (Göteborgs stad, 2021a). Brons referenshastighet uppskattas utifrån det att vara högst 70 km/h.

2.2 Geometri

Beställarens geometriska krav finns skisserade i COWIs förslagsritningar, se Bilaga XI. Brons konstruktionslängd ska vara 134,7 m och brolängden över vägen blir minst 63 m. Brons spännvidder beror på utformningen men beräknas vara minst 37 m om mittstöd byggs mellan Backavägens körfält, se figur 2. Bron ska leda två körfält i vardera riktning med en total bredd på 17 m, se figur 3. Frihöjden för bron över Backavägen ska vara minst 5,7 m (mått från -1,41 m) och brons totala höjd upp till vägbanan får inte överstiga höjdnivån +6,52 m, vilket innebär att den tillgängliga konstruktionshöjden kan maximalt vara 2,186 m.



Figur 2 Möjliga stödplaceringar och minsta tillåtna spännvidder.



Figur 3 Utformning av brobanans tvärsnitt.

2.3 Geotekniska förhållanden och grundläggning

Det översta skiktet i jordlagret består av fyllningsmaterial som är sammansatt med materialen mulljord, sten, grus, sand, silt och lera, fyllningsmaterialets djup varierar mellan 1–4 m. Generellt i området finns det ett lager torrskorpelera under det översta skiktet som underlagras av lös normalkonsoliderad lera (Göteborgs stad, 2016b). Leran är avsatt på friktionsjord på berg eller direkt på berg. Det studerade området där bron ska monteras uppskattas ett djup från markytan till berg på 40m. Med hjälp av ovanstående uppgifter har en uppskattad jordprofil upprättats se figur 4.

Djup [m]	Material och tunghet	
0	Fyllningsmaterial	
1	Torrskorpelera	GVY
3,5	Lera	1.45 ton/m ³
7	Lera	1.75 ton/m ³
40	Berg	

Figur 4 Uppskattad jordprofil.

Syftet med grundläggning av broar är att klara kraven för säkerhet mot markbrott och att sättningarna begränsas till acceptabla nivåer som inte begränsar konstruktionens funktion (Trafikverket, 2018). Faktorer som ska tas till hänsyn vid grundläggning och nivå är jordens materialegenskaper, grundvattenytans nivå, tjälsäkert djup och lastens storlek. För att minska risken för sättningar och öka säkerheten för stabilitetsbrott, ska Kvilleden inom området ligga på en bank med höjder mellan 1–2,5 m. För att få en effektiv vägbank kompensationsgrundläggs vägbanken med lättfyllning på den sydöstra sidan av bron (Göteborgs stad, 2014). Då det är en stor mäktighet med lera ska spetsbärande pålar eller kohesionspålar användas vid brostöden.

3 Konstruktionsmaterial

Kapitlet undersöker de tre byggnadsmaterialen trä, stål och armerad betong när det gäller att använda dem inom brobyggnation. Dess egenskaper samt fördelar och nackdelar tas upp.

3.1 Trä

Trä är ett ortotrop material och ett naturligt kompositmaterial som har fördelen att det har låg densitet och har i förhållande till sin vikt en hög hållfasthet. Träets egenskaper varierar inte bara mellan olika träslag, utan variationerna kan uppkomma inom samma träslag och i samma tvärsnitt (Burström & Nilvér, 2018). Tryck- och draghållfastheten avgörs av förhållandet mellan fiberriktningen och belastningsriktning, vilket måste tas hänsyn till när en bro byggs. Trä är ett förnyelsebart byggnadsmaterial som kan återvinnas eller återanvändas efter rivningen. Därför har trä mindre miljöpåverkan och koldioxidutsläpp utefter sitt kretslopp i jämförelse med andra byggmaterial. Byggmaterialet trä är ett modernt och växande material, genom forskning och lagändringar har användningsområdet för trä ökat, vanliga användningsområden är bland annat stomkonstruktioner, broar och formar.

3.2 Stål

Stål är ett vanligt förekommande konstruktionsmaterial i dagens broar. Stålet förekommer i olika former med olika uppgifter beroende på hur bron är konstruerad. Exempelvis används stål som armering i betongkonstruktioner, där är stålets uppgift att ta upp dragspänningar eftersom betong är skört då det blir utsatt för dragspänningar (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2019). Exempel på vanliga konstruktionsdelar där stål är effektivt och användbart är i form av bärande balkar, ramar och vajer. Skyddas stålet mot korrosion skapas en beständig slutprodukt med lång livslängd (Stålbyggnadsinstitutet, 2021). En fördel är att stål möjliggör byggnation av konstruktioner med mindre dimensioner jämfört med andra vanliga konstruktionsmaterial som trä och betong (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2019).

3.3 Armerad betong

Betong består huvudsakligen av ballast (sten, grus, sand), det hydrauliska bindemedlet cement, vatten och för att inverka på betongens egenskaper tillförs ofta tillsatsmedel och tillsatsmaterial (Burström & Nilvér, 2018). Cementen reagerar med vattnet och fungerar som ett bindemedel för betongen, den kemiska reaktionen resulterar till att betongen härdar. Den färska betongen bearbetas till rätt form och porositeten reduceras med vibrering. Betong är ett poröst material med låg draghållfasthet i förhållande till tryckhållfastheten som är hög (Nationalencyklopedin, u.å.a). För att ta hand om detta läggs armeringsstänger in innan gjutning. Den armerade betongens hållfasthet samt att materialet är formbart och beständigt mot nedbrytning och brand bidrar till att materialet är ett av de vanligaste byggnadsmaterialen i Sverige idag. Även det låga priset och lättillgängligheten bidrar till att materialet är vanligt.

4 Produktion av Kvilleledsbron

Kapitlet tar upp olika produktionsmetoder som är möjliga för Kvilleledsbron samt i vilken ordning produktionen sker. De olika produktionsmetoderna kräver olika typer av temporära byggnader. Utöver detta tas även risker som kan finnas vid produktion upp.

4.1 Produktionsordning och produktionsmetoder

Det första steget i produktionsordningen är grundläggningen som sker med hjälp av att spetsbärande pålar slås ner i marken till berggrunden då detta val av påltyp är givet i ritningen från COWI (Bilaga XI). Dessa pålar bildar en pålgrupp som sedan länkas samman genom att pålarna gjuts in i en gemensam betongplatta vilket bronns pelare och murar vilar på. Pålning är nödvändigt för bronns grundläggning eftersom det finns ett mäktigt lerlager som Kvilleledsbron ska grundläggas på.

Efter grundläggning ska eventuella stöd byggas, vilket bronns huvudbärverk ska vila på. Ett vanligt stöd är en pelare i armerad betong. För en snedkabelbro eller hängbro byggs pyloner på grundläggningen som stöd. Plattor och balkar som skapar brobanan byggs därefter ut på de befintliga permanenta stöden. Dessa avgör konstruktionshöjden av bron och skall föra ned lasterna från vägbanan till stödkonstruktionen. Elementen platsgjuts eller lyfts på plats om elementen kommer i form av prefabricerade element.

4.2 Temporära konstruktioner för produktion

Det finns många typer av temporära byggnader som gör det möjligt att bygga bron. En av de temporära byggnader som krävs vid brobygget är grundläggning för byggställningar som i sin tur har till uppgift att bära upp gjutformar eller som stöd för prefabricerade delar. Stödkonstruktionen har även till uppgift att balansera bron under byggnationen så att arbetet kan utföras på ett effektivt och säkert sätt. Icke-bärande byggställning används för att underlätta åtkomligheten av konstruktionen för byggarbetare på plats. På byggställningen kan mindre konstruktionsdelar lyftas upp. Bärande byggställning byggs som tillfälliga stöd för att balansera konstruktionen. Temporära stag uppfyller liknande syfte som den bärande byggställningen, stagen kan även användas för att hålla gjutformar på plats vid gjutning av plattbroar och balkbroar

Formar som temporära byggnader kommer i olika typer beroende på om byggnationen sker i vertikalled eller horisontalled. Klätterformar används vid gjutning av vertikala element. Vid gjutning med hjälp av en klätterform gjuts en sektion och låter sedan betongen härda. Därefter flyttas gjutformen upp vertikalt, ofta med hjälp av hydrauliska domkrafter, till nästa nivå där processen återupprepas. Fördelar med denna form är att ingen gjutform behöver byggas och formen återanvänds under hela byggnationen vilket minimerar materialsvinn. Glidform är en variant av en klätterform som istället för att gjutas i etapper flyttas kontinuerligt.

Formvagn används för att transportera gjutformar längs bron (Vägverket, 2003) då den byggs ut. Lanseringsnos fästs längst fram på stål bärverket som lanseras ut på stöd för att skydda både stålkonstruktionen och stödkonstruktionen.

4.3 Risker vid produktion

Vid broproduktion förekommer en risk för olyckor som kan skada människor eller konstruktionen. Utöver olyckor kan det finnas risker som kommer från felaktigt utförande under produktion. En risk på byggarbetsplatsen är skador från arbetsutrustningen, exempelvis verktyg, liftar och maskiner. Det är därför nödvändigt att endast de med kompetens får använda utrustningen på arbetsplatsen och att alla på byggarbetsplatsen vet vilken utrustning som det krävs särskild kunskap för.

Enligt arbetsmiljöverket (Arbetsmiljöverket, 2020a) finns några viktiga punkter att tänka på vid byggarbete. Den första är att kontrollera utrustningen på arbetsplatsen och planera vid vilka tider kontrollerna ska ske, detta är för att vara säker på att utrustningen på plats inte är skadad eller osäker att använda. Den andra punkten handlar om lagring av material och utrustning på plats, där det är viktigt att det inte finns risk för att tunga delar rasar, den tredje punkten är skydd mot väder.

Arbetstagare ska inte utsättas för risk för säkerhet och hälsa och därför ska det finnas skydd mot hög värme, kyla och blåst. Den fjärde punkten handlar om säker grävning då det kan finnas farliga ämnen och ledningar under jorden, det finns även en risk för ras vid schaktning. Den sista punkten är risk för passerande trafik, vilket inte kommer vara en risk på bygget av Kvilleledsbron då trafiken på Backavägen kommer vara avstängd under byggnation.

Det finns många företag på en arbetsplats, därför är en åtgärd för att minska risker att ha bra samarbete och kommunikation mellan företag på byggarbetsplatsen så att alla på plats vet vad som ska göras och vilka moment som kommer medföra risker (Arbetsmiljöverket, 2020b).

5 Förvaltning och underhåll av Kvilleledsbron

Den tekniska livslängden (Trafikverket, 2018) för broar i Sverige är mellan 80–120 år med normal förvaltning av kontinuerliga inspektioner och underhållsarbeten. Dessa aspekter måste tas hänsyn till i bro- och detaljutformningen för att erbjuda personalen en säker och smidig arbetsmiljö. I detta kapitel redovisas de inspektioner och underhållsarbeten som behövs göras på Kvilleledsbron under dess tekniska livslängd på 100 år, vilket ska beaktas vid planeringen och utformningen av brokoncepten.

5.1 Inspektioner

Inspektionerna utreder Kvilleledsbrons fysiska och funktionella tillstånd (Trafikverket, 2014), vilket ger underlag för planering av eventuella åtgärder som behövs för att uppnå ställda krav på trafikanternas säkerhet. Utformningen på Kvilleledsbron ska göras så att alla delar av konstruktionselementen är åtkomliga för inspektion (Trafikverket, 2019a). Det ska finnas tillgång till lager och övergångskonstruktioner samt inspektionsanordningar, bland annat manhål, inspektionsbryggor, hissar och stegar. För Kvilleledsbron vars spännvidd är över två meter förekommer följande inspektioner (Trafikverket, 2014):

- **Översiktlig inspektion** ska utföras minst en gång per år. Inspektionen görs på konstruktionselementen som enligt avsedda krav ska upprätthålla sina egenskaper och där åtgärder är väsentliga.
- **Huvudinspektion** ska genomföras med ett intervall på max sex år och den första inspektionen sker innan Kvilleledsbron tas i drift. Syftet är att upptäcka och bedöma brister i funktionen eller säkerheten inom en tioårsperiod. Inspektören ska med handnära och visuella tillgångar inspektera konstruktionselementen, vägbankar, bergkärningar, slänter, koner, fyllningar, erosionskydd och ledverk. Inspektören tar mätningar på stålkonstruktioner och sprickor i betong samt fastställer om en kompletterande särskild inspektion behövs göras på Kvilleledsbrons eventuella bottenprofiler, kloridhalt och karbonatisering i betongelement, korrosion på armering, nit- och skruvförband, svetsförband, tätskiktet med mera.
- **Allmän inspektion** kontrollerar tidigare bedömningar av skador från huvudinspektionen som inte har åtgärdats. Syftet med inspektionen är också att bedöma och upptäcka skador som skulle orsaka brister i bärlighet, trafiksäkerhet eller skulle öka förvaltningskostnad innan nästa huvudinspektion.
- **Särskild inspektion** kontrolleras enskilda konstruktionselement som bedöms behöva fördjupande inspektion eller specialkompetens efter huvudinspektionen.

5.2 Underhåll

Kvilleledsbron ska utformas (Trafikverket, 2019a) så att dess överbyggnad, underbyggnad och omgivande markytor ska utan svårigheter ha återkomst för underhållsarbeten. Några av de vanligaste arbetsmomenten som kommer att genomföras (Trafikverket, 2018) är byte av broräcken, tätskikt och övergångskonstruktioner, samt ommålningar och betongreparationer. För byten av lager (Trafikverket, 2019a) ska Kvilleledsbrons under- och överbyggnad konstrueras så att överbyggnaden kan lyftas för att avlasta lagret. Det är viktigt att de underhållskrävande delarna (Trafikverket, 2018) tas hänsyn till vid utformningen. Idealet är att de undviks, om detta inte är möjligt ska undersökningar göras för att skapa goda förutsättningar för underhållsarbeten, exempelvis granska utrymme.

Vid underhållsarbeten av Kvilleledsbron är det vanligtvis nödvändigt att trafikflödet inte hindras av arbetet (Trafikverket, 2018), istället ska passagen avgränsas under arbetet. Vid byte av hängstag (Trafikverket, 2019a) får körfältets bredd högst vara 3m intill hängstagen. Eftersom Kvilleledsbron har två 3,25 m körfält i vardera riktningen, finns möjligheten att stänga av ett körfält i vardera riktningen. På så sätt kan acceptabla säkra arbets- och trafikförhållanden upprätthållas vid underhållsarbeten.

5.2.1 Underhåll av trä

Enligt Al-Emrani m.fl. (2013) är trä ett organiskt material som i hög grad påverkas av träts fuktkvot och därav är det viktigt att hålla fuktkvoten nere så att träbron håller länge (TräGuiden, 2018). Ett exempel på en åtgärd som går att göra för att bibehålla beständigheten är att ha skydd i form av exempelvis väggar och tak i trä eller ett annat tätskikt i ett annat material än trä (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2013). Trä kan även skyddas genom att målas, ytbehandlas eller impregneras. Ett tätskikt i form av väggar och tak ses inte som ett alternativ när det gäller Kvilleledsbron, främst eftersom det är en vägbro som ska vara lättorienterad. För att en Kvilleledsbro i trä ska behålla sin funktion så bra som möjligt finns det en del åtgärder som kan genomföras (TräGuiden, 2018). En av sakerna som kan göras är att årligen renskola bron för att därigenom få bort smuts. Utöver detta så kan även åtgärder så som efterdragning av förband, bättringsmålning samt kontroll av spännsystem och inspektioner av träbron genomföras. Vid inspektionen ska förutom eventuella skador på konstruktionen även bland annat fuktkvoten undersökas.

5.2.2 Underhåll av stål

Stål som byggnadsmaterial för Kvilleledsbron behöver skyddas mot fukt för att förhindra korrosion (Trafikverket, 2018). En av åtgärderna för att förhindra detta hos brokonstruktioner i korrosiva miljöer är att ha det materialet som kallas för rosttrött stål (Jernkontoret, 2018). Det här materialet får snabbt ett oxidlager som sedan skyddar materialet under. Andra alternativ för att göra ett skyddande skikt som förhindrar, alternativt minskar, korrosion av materialet är att skrapa ett tätt skikt genom ytbehandling av exempelvis färg.

5.2.3 Underhåll av betong

Till skillnad mot stål och trä är betong fukttåligt, vilket är en av fördelarna som bidrar till att det är ett vanligt förekommande byggnadsmaterial hos broar enligt Al-Emrani m.fl. (2013). Betong har en lång livslängd som främst avgörs av armeringskorrosion och därav är det viktigt att hålla koll på detta (Trafikverket, 2019a), faktorer som påverkar detta är valet av täckande betongskikt samt sprickbredden. Om betongen har karbonatiserats samt om det finns korrosiva ämnen påverkar även risken för korrosion (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2011). Korrosionen till följd av karboniseringen går oftast inte lika snabbt som av korrosiva ämnen. Klorider är ett korrosivt ämne och det är främst tölsalter och havsvatten som påverkar betongen. Eftersom Kvilleledsbron är placerad i Göteborg som ligger vid havet samt att det regnar en hel del där, och mer regn förväntas i och med klimatförändringarna (Göteborgs stad, 2021b), är detta viktigt att hålla koll på om bron byggs i betong. En metod att skydda betongen mot skadliga ämnen enligt Klotter Konsulten (u.å) är att hindra inträngningen av fukt genom att betongen impregneras.

6 Brotyper

I detta kapitel redovisas några brotyper som anses rimliga för Kvilleledsbro. Se bilaga XIV för skisser över dessa brotyper. Olika verkningssätt, materialval, spännvidder och anpassning till Kvilleledsbron tas upp.

6.1 Plattbro

Brons huvudbärverk är en armerad betongplatta. Broplattan kan även byggas av trä uppspant av stålstag. Plattbron kan byggas som fritt upplagd eller kontinuerlig över stöd. För vägtrafik utförs plattbron i slakarmerad betong upp till cirka 25 m spännvidd och i spännarmerad betong upp till cirka 35 m spännvidd (Trafikverket, 2008). Möjligheten finns därför, men inte med goda förutsättningar, att bygga en plattbro över Backavägen med mellanstöd. Den slanka konstruktionen medför goda möjligheter till prefabricerade delar som kan tillverkas i industrimiljö för att sedan monteras som sektioner vilket påskyndar byggtiden¹.

6.2 Balkbro

Principen med balkbro är att brobanan ligger på balkar i ett eller flera spann beroende på längden. Om bron består av mer än en balk, binds balkarna samman med tvärbalkar. Där tvärbalkarna bärs av pelare som överför lasterna till marken (TräGuiden, 2015a). Balkbroar kan byggas med trä, stål eller armerad betong, samt med kombination av dessa material. Möjliga spännvidder varierar stort beroende på materialet från 30 m för en träbalkbro, upp till 200 m för en spännarmerad betongbro (Trafikverket, 2008a). Balkbron ger chans att bygga Kvilleledsbron med ett spann utan mellanstöd. Möjligheten till prefabricering reducerar arbetstiden på byggplatsen och på så vis minimerar påverkan på Backavägen och omgivningen under byggtiden.

6.3 Rambro

Rambro finns både som plattrambro och balkrambro (Trafikverket, 2018). Till skillnad från plattbron och balkbron har rambro ramben och votar som kan variera i både i form och storlek. Votarna bidrar till ökad tvärkraftskapacitet samt styvhet kring ramhörnen, vilket leder till minskat moment i fält. Höjden på bron ramben beror dels av betongens armeringstyp och dels av grundläggningssättet. Om betongen är armerad eller spännarmerad påverkas även bron möjligen spännvidd. Spännvidderna för en spännarmerad balkrambro (<50 meter) är större än en plattrambro (<35 meter) vilket gör att de främst används för respektive längd. Rambroarna uppförs främst i ett spann men utifrån förutsättningarna för Kvilleledsbron kan en spännarmerad balkrambro i två spann vara en möjlig brotyp.

6.4 Valvbro

Valvbron står på ett valv av sten, betong eller stål och fylls med material upp till vägen. Lasten skapar tryckspänningar som leds ner genom fyllningen. Gjuten i betong klarar en valvbro spännvidder på ca 30 meter (Trafikverket, 2008). Eftersom valvbroar ej klarar stora spännvidder kombinerat med låga konstruktionshöjder, kommer en valvbrolösning bli svår att praktiskt genomföra.

6.5 Bågbro

Bågbrons huvudbärverk utformas med överliggande eller underliggande bågar kring sekundärbärverket som fungerar som brobana, (Trafikverket, 2008) vilket kan

¹ Mats Karlsson, (2021-02-23) Föreläsning: Brobyggnad – Produktionsmetoder

konstrueras på tre olika sätt. Bågen och brobanan förbinds på olika sätt beroende på bågens utförande, antingen med hängstag eller bågpelare. Brons bärförmåga orsakas av bågformen (Libert & Hirt, 2013) och dess egentyngd som ger upphov till starka tryckkrafter som leds ned till stöden.

Materialen som används för bågen och brobanan är armerad betong, stål eller trä (Trafikverket, 2008) och kan vid utformning i ett spann ha en spännvidd upp till 260 m eller flera spann på 100 m och använd för spann över 60 m (Trafikverket, 2018). Bågbroar i trä har en möjlig spännvidd på 10–60 m (TräGuiden, 2015b) beroende på konstruktionstyp.

6.6 Fackverksbro

En fackverksbro utformas med en överarmstång och en underarmstång, de förbinds med stänger i vertikala och diagonala stänger i friktionsfria leder. Fackverksbroar utnyttjar att tyngdpunkten i stängerna möts i ledade knutpunkter vilket således leder till drag- och trycksamverkan och momentsamverkan kan förbises i teorin men det gäller dock inte fullt ut i praktiken (Trafikverket, 2008). Lämplig spännvidd för en fackverksbro i stål är upp till 100m och för trä 30 m, dock byggs det inte permanenta fackverksbroar längre då produktionskostnaderna är för höga (Trafikverket, 2008), men det finns fall där beställaren önskar specifikt en fackverksbro och det gäller främst järnvägsbro.

6.7 Hängbro

En hängbro ingår i kategorin linverkansbroar tillsammans med snedstagsbroar. Det som är speciellt med hängbroar är att brobanan hängs upp i två parallellt gående huvudkablar som löper över pyloner som sedan ska fästas i ankare i berggrunden eller i massiva betongvikter. Huvudkablarna och vägbanan är förbinda med vertikala hängare, de består av vertikala kablar men i mindre dimension än huvudkablarna. Pylonerna kommer ta upp tryckkrafter och kablarna tar upp endast dragkrafter.

6.8 Snedkabelbro

Snedkabelbron består huvudsakligen av kablar, pyloner och förstyrningsbalkar (Trafikverket, 2018). Kablarna anordnas huvudsakligen i tre olika system: harpliknande form, solfjäderform och halv-solfjäderform. Dessa system bidrar, förutom till olika estetiska utseenden, till olika moment i pylonen och olika tryckkraft i förstyrningsbalken. Materialen som används för pylonerna kan vara både betong och stål. Snedkabelbron används ofta till större spännvidder (≥ 100 meter) om de ska vara ekonomiskt försvarbara (Nationalencyklopedin, u.å.b). Utifrån detta samt den geografiska placeringen kommer denna brotyp inte att analyseras vidare efter skisstadiet.

6.9 Hängverksbro

Hängverksbron kan byggas i olika material exempelvis vägbanan i armerad (överspänd) betong och hängverket i stål eller trä. Spännvidden för en hängverksbro kan nå 50 meter (TräGuiden, 2015c). En fördel med hängverksbro är att lasterna i strävorna bärs i tryck vilket möjliggör användning av trä som konstruktionsmaterial vilket både av miljömässiga skäl och estetiska skäl är att föredra.

7 Första urvalsprocessen

I detta kapitel ska första urvalsprocessen av möjliga broar utföras.

Faktorer som ligger till grund för första urvalet av brotyp är listade nedan: Spännvidd, Produktionskostnad, Konstruktionshöjd, Användningsområde.

7.1 Konceptförslag och första urval

Nedan punktats olika broförslag för hur varje brotyp skulle kunna utformas på den aktuella platsen, om detta är möjligt rent byggnadstekniskt.

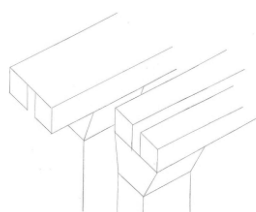
- **Plattbro med mittstöd, huvudbärverk i spännarmerad betong:**
Möjlighet till prefabricerade element eller platsgjuten. På grund av spännvidden på 37m utesluts detta koncept då plattbroar normalt ej byggs där spännvidden är över 35m även om plattbron är spännarmerad.
- **Spännarmerad betongbalkbro i ett spann:**
Spännarmerad betongbalkbro klarar spännvidden på 63 m. Med det här alternativet blir det ingen kostnad för grundläggning av mellanstöd. Problem som kan uppstå med större spännvidder är att konstruktionshöjden inte klarar det givna kravet, eftersom huvudbärverket är placerat under vägbanan och en utböjning av bärverket kommer uppstå. Med det i åtanke kommer vidare dimensionering innefatta ett mellanstöd.
- **Rambro med två spann i spännarmerad betong:**
Förutsatt att ett mittstöd konstrueras fås två spann där kraven på spännvidderna uppfylls. Eftersom stödmurar kommer att byggas vid broändorna för att hålla emot lättfyllningen som fylls mellan befintlig markyta upp till vägbanan, kan dessa stödmurar kombineras med votar utan extra kostnader för produktionen.
- **Valvbro i betong med fyllning av jordmaterial i två spann:**
Går ej att konstrueras utefter förutsatta kriterier.
- **Bågbro i ett spann, huvudbärverket består av stål:**
Klarar stora spännvidder förutsatt att den är byggd i stål eller betong. Valt material på bågarna och avstyvningsbalkar är stål, det kommer leda till en smidigare och billigare produktion samt montering. Fördelen med den här bron är att den möjliggör en stor markfrigång under bron på grund av att huvudbärverket ligger ovan vägbanan.
- **Överliggande Fackverksbro i ett spann, huvudbärverk i stål:**
Klarar spännvidder upp till 100 m men är dyr att tillverka till stor del på grund av de stora antal knutpunkter i fackverket. Möjligt att bygga i både ett eller två spann. Viktig fördel är att markfrigången är stor. Då de rekommenderas att använda detta koncept som järnvägsbro utesluts fackverksbro i första urvalet.
- **Hängbro och snedkabelbro med ett spann, kombinerade material av stål och betong:** Används ofta för stora spännvidder. Skulle fungera men är väl tilltagen för den givna spännvidden och därför ej ekonomiskt försvarbar i vårt fall.
- **Hängverksbro i två spann, brobana i överspänd betong med hängverk i trä:**
Möjliggör stor markfrigång på grund av att lasterna bärs ovan vägbanan däremot är denna typ av bro mer användbar för kortare spännvidder. Detta leder till att ett stöd på mitten är ett måste.

8 De valda brokoncepten

I detta kapitel beskrivs de fyra valda brokoncepten mer ingående. En beskrivning av en möjlig utformning av varje brokoncept, samt om deras produktion och vilken typ av förvaltning varje brokoncept är i behov av.

8.1 Balkbro

Balkbro av spännarmerad betong där bärverket är kontinuerligt över mittstöd vilket leder till att det största spannet blir 37m. I en betongbalkbro är balkarna gjutna ihop med plattan och ökar bronns hållfasthet och minskar deformationer genom att ge tvärsnittet ökat böjmotstånd. Balkarna är upplagda på två ändstöd där det norra stödet är ledat infäst och södra stödet är fritt upplagt. Bron är separerad för de två körriktningarna vilket ger en större säkerhetskänsla för trafikanterna, se figur 5 nedan. Bärverket utformas med två rektangulära balkar som spänner upp respektive vägbana.



Figur 5 Förslag på utformning av mittstöd under balkbro.

8.1.1 Produktion

Balkbroar har många möjliga produktionsmetoder som beror på materialval av balkar, bronns spännvidder och balkarnas utformning. Bron över Backavägen planeras med balkar av armerad betong. Konstruktioner av armerad betong kan använda spännarmerad betong för att öka styvhet och beständighet i balken². Produktionen av spännarmerad betong kan utföras med förspänd eller efterspänd armering. För att få en förspänd armering används vanligen hydrauliska domkrafter för att skapa en normalspänning i en spännkabel. När spännkabeln är uppspänd kan brobalkarna gjutas över kabeln. Efterspänd armering gjuts in som skyddade spännkablår i betongbalken utan spänningar. När betongen är hård kan spännkablarna spännas (Chen & Duan, 2013).

8.1.2 Förvaltning och underhåll

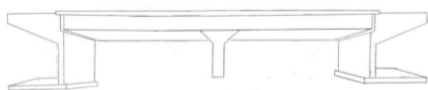
En balkbro kan bestå av två eller flera balkar vilka kommer behöva underhåll samt eventuella reparationer under sin livstid (Trafikverket, 2018). Att ha tre balkar istället för två underlättar detta arbete. Det är även lättare att genomföra underhåll och göra inspektioner om balkarna placeras under plattan, detta kräver en högre konstruktionshöjd än om balkarna är delar av ett tråg. En annan av sakerna som behöver inspekteras och kan behöva bytas hos en balkbro under dess livslängd är lagren vid upplagen. För att detta ska kunna ske utan svårigheter utformas bron och markytor runt omkring så det går att komma åt från alla sidor.

8.2 Balkrambro

Bärverket består av spännarmerad betong för att klara spännvidderna med ett tvärsnitt som inte överstiger kravet på konstruktionshöjd. För att minimera konstruktionshöjden används även votar vid ändstöden. Ändstöden konstrueras i form av ramben och vingar som gjuts som en enhet av betong, för att få en effektiv konstruktion används jordmassor som stabiliserar huvudbärverket och minskar

²Mats Karlsson, (2021-02-19), Föreläsning: Efterspända betongbroar

horisontell rörelse i bron. Över mittstöden är balken upplagd på ett lager för att ge möjlighet till horisontell rörelse. Se figur 6 för förslag på utformning.



Figur 6 Förslag på utformning av balkrambro.

8.2.1 Produktion

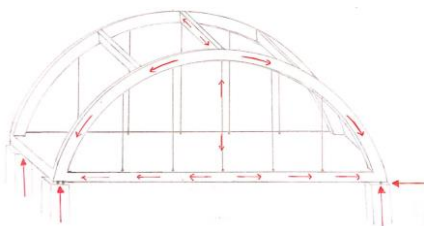
För att bygga en balkrambro över Backavägen krävs att balkarna är förspända och votade på grund av höga spännvidder. Produktionen påbörjas med grundläggning och gjutning av grund, frontmur och vingmur på varje sida av hindret. Mittstöd behöver också grundläggas och gjutas. Balkar gjuts mellan stöd och frontmur. När bron bärande konstruktion är byggd fylls ändstödens murar med jord som vägen ska gå över³.

8.2.2 Förvaltning och underhåll

Balkdelen av balkrambron kräver samma typ av underhåll som balkbron ovan. Balkrambron är likt balkbron enkel i sin design vilket gör att den går att komma åt för underhåll och inspektioner utan några besvärligheter.

8.3 Bågbro

För att få en så stor som möjligt fri höjd över Backavägen och för att anpassa bron till grundläggningsförhållanden är den bästa lösningen för Kvilleledsbron en bågbro med huvudbärverket ovan vägbanan. Bågbron är konstruerad utan mittstöd och är fritt upplagt vid ändstöden. För denna utformning av bron ska minst två bågar bära brobanan och bågaras ändar ska bindas samman med avstyvningsbalkar som fungerar som dragband. Laster som verkar på brobanan överförs till bågarna genom hängstag i stål, se figur 7. Vid valet av material för bågarna och avstyvningsbalkarna beaktas estetisk utformning, produktion och montering. Med de kriterierna som underlag väljs stål som material, produktionen av stålbågar och avstyvningsbalkar kan prefabriceras, det möjliggör att monteringen blir yteffektiv och tidsbesparande.



Figur 7 Förslag på utformning av bågbro och illustration av hur krafterna fördelas.

8.3.1 Produktion

Bågbrons produktion kan utföras med en ställning där brobågen först gjuts eller på annat vis fästs ihop, eller lyfts på om bågen är prefabricerad. En möjlig produktionsmetod kan då vara att först gjuta stöd och sedan bågen och vägbanan samtidigt. En annan metod som kan användas är att gjuta brobågen som en konsolutbyggd båge med temporära stag som håller konstruktionen på plats under konstruktion⁴.

³ Mario Plos, (2021-01-29), Föreläsning: Betongbroar

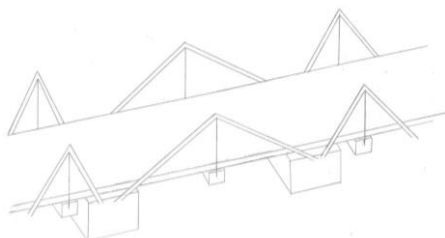
⁴ Mats Karlsson, (2021-02-23), Föreläsning: Produktionsmetoder

8.3.2 Förvaltning och underhåll

Bågbrons olika delar ska underhållas, repareras och eventuellt bytas ut. En av de kritiska punkterna är infästningen och anslutningen av hängstagen (Trafikverket, 2019a), dessa ska utformas på så sätt att de är lättillgängliga för inspektioner och underhåll, samt att placeringen gör dem lätta att byta ut. Ytterligare kritiska punkter är tvärbalkarnas förband, dessa ska lätt kunna inspekteras för korrosion, skjuv- och hållkanstbrott. Sekundärbärverket är utformat på samma princip som balkbron med huvudbalkarna och är därför i behov av samma förvaltning och underhåll som balkbron.

8.4 Hängverksbro

Bärverket ovan vägbanan består av behandlade limträbalkar, de tar upp tryckkrafter som genereras från vägbanan. Vägbanans trafiklast och egen vikt fördelas tvärs över vägbanan med hjälp av en tvärgående stålbalk som är placerad i mitten av hängverket, se figur 8. Det är i denna tvärgående balk hängstagen fästs och således för över krafterna upp till bärverket. Bärverket är fast inspänt över mittstöd och ändupplag medan brobanan är fritt upplagd.



Figur 8 Förslag på utformning av hängverksbro.

8.4.1 Produktion

Produktionen av en hängverksbro i trä i två spann kommer kräva att mittstöd först gjuts. Två bockar av limträ som har ytbehandlats före montering kan sedan fästas mellan mittstöd och ändstöd. Varmförzinkat stål ska sedan fästas på träbockarna där det finns risk för att limträbalkarna tar upp fukt. Brobanan kommer sedan kunna byggas. Broplattorna kan byggas i trä som är uppspänd med spännstag (TräGuiden, 2018). Det går även att gjuta broplattor i armerad betong.

8.4.2 Förvaltning och underhåll

Träet i en hängverksbro behöver regelbundet underhållas (Abelssoon, Båge, & Westerlund, 1998). En stor orsak till detta är att bärverket av trä är ovan farbanan och därmed inte blir skyddat. Är vissa detaljer inte optimalt utformade kan dessa orsaka röta och behöva åtgärdas. En åtgärd för att inte få fuktproblematik är att bron kontinuerligt rengörs. För att skydda träet kan det användas olika metoder av ytbehandling. För att ytbehandlingen ska behålla dess funktion behövs den kontinuerligt inspekteras och beroende på vilken sort som används behöver den underhållas med en viss års intervallperiod. Eftersom bärverket är på en viss höjd över farbanan kommer inspektioner och underhåll av dessa att vara mer komplicerade än andra alternativa brotyper. För att arbetarna ska kunna komma upp till dessa höjder samt ha en säker arbetsmiljö kan även trafikframkomligheten på bron alternativt vägen under påverkas.

9 Andra urvalsprocessen

I andra urvalsprocessen används en utvärderingsmatris med viktade kriterier beroende på hur relevanta de är till projektet. Varje brotyp diskuteras mellan gruppmedlemmarna och betygsätts. Med hjälp av utvärderingsmatrisen tas ett slutgiltigt brokoncept fram.

9.1 Viktning av utvärderingskriterier

Viktning av utvärderingskriterier för andra urvalsprocessen beskrivs i Broprojekteringshandboken (2018). Den första bedömningen är vilka kriterier som finns att rangordna. De utvärderingskriterier som bedöms vara viktiga att jämföra hämtas från en punktlista över kravområden i Broprojekteringshandboken (2018). Kravområden som ska utvärderas är: Gestaltning, utformning, miljö, arbetsmiljö och produktion. Se tabell 1 för att se hur de olika kravområden skildras med olika färger. Kravområdet bärförmåga väljer vi att ej använda vid utvärdering då alla broar i andra urvalsprocessen förväntas bära dimensionerande laster.

Viktning av utvärderingskriterierna sker enligt metoden i Broprojekteringshandboken (2018) med en viktningssmatris där kriterier jämförs mot varandra och ges poäng, där 3 poäng motsvarar att kriteriet bedöms vara viktigare än ett annat, 2 poäng betyder att utvärderingskriterierna är lika viktiga och 1 poäng då kriteriet är mindre viktigt än vad det jämförs med. Beroende på hur viktigt ett kriterie bedöms vara ges det en viktfaktor vilket kommer vara det avgörande värdet som används vid utvärderingsfasen av brotyperna. Se viktningen av kriterier i tabell 2 nedan.

Tabell 1 Visar vilka områden som färgerna representerar i viktningssmatrisen.

Kravområden:
Gestaltning
Utformning
Bärförmåga
Miljö
Arbetsmiljö
Produktion
Ekonomi

Tabell 2 Viktningssmatris för viktning av utvärderingskriterier där:

α = Poäng / kravområdets [%]

β = Kravområdets poäng/alla poäng [%]

$\alpha*\beta$: Viktfaktor [%]

Utvärderingskriterier	Kriterie vs. kriterie											Poäng	α	β	Viktning $\alpha*\beta$
	1	2	3	5	6	7	8	10	11						
1 Estetisk tilltalande	-	3	3	3	3	3	2	3	3	3	23	100,0%	16,0%	15,97%	
2 Trafiksäkerhet	1	-	2	3	3	2	3	3	2	19	51,4%	25,7%	13,19%		
3 Drift och underhåll	1	2	-	3	3	2	1	3	3	18	48,6%	12,50%	9,03%		
5 Materialval	1	1	1	-	3	2	1	3	1	13	56,5%	16,0%	9,03%		
6 Återvinningsbarhet	1	1	1	1	-	1	1	2	2	10	43,5%	11,1%	6,94%		
7 Arbetsmiljö i produktion	1	2	2	2	3	-	2	2	2	16	100,0%	11,1%	11,11%		
8 Möjlighet till rationellt byggande	2	1	3	3	3	2	-	2	1	17	100,0%	11,8%	11,81%		
10 Produktionskostnad	1	1	1	1	2	2	2	-	2	12	42,9%	19,4%	8,33%		
11 Underhållskostnad	1	2	1	3	2	2	3	2	-	16	57,1%	11,1%	11,11%		
	Summa:											144		100,0%	100,0%

9.2 Viktning av brokoncept

Viktning av brokoncepten sker enligt metoden i Broprojekteringshandboken med en viktningssmatris där koncepten graderas utefter hur väl de uppfyller utvärderingskriteriet, se tabell 3. Brokoncepten får olika poäng där 5 poäng betyder att bron uppfyller kriteriet mycket bra, 4 att bron uppfyller kriteriet bra, 3 poäng motsvarar ganska bra, 2 poäng motsvarar tillräckligt bra, 1 poäng motsvarar

acceptabel med tvekan och 0 motsvarar otillfredsställande. Poängen multipliceras med den viktningensprocenten, från tabell 2, som respektive utvärderingskriterier har och utifrån det fås ett viktat medelvärde för respektive brotyp.

Tabell 3 Viktningsmatris för viktning av de fyra brotyperna.

Utvärderingskriterier	Viktningensprocent	Bågbro	Balkbro	Hängverksbro	Rambalkbro
1 Estetisk tilltalande	11,8%	5 0,591	2 0,236	4 0,473	2 0,236
2 Trafiksäkerhet	10,0%	4 0,400	3 0,300	3 0,300	3 0,300
3 Drift och underhåll	10,5%	2 0,209	4 0,418	2 0,209	4 0,418
5 Materialval	8,2%	3 0,245	3 0,245	4 0,327	3 0,245
6 Återvinningsbarhet	5,9%	3 0,177	2 0,118	3 0,177	2 0,118
7 Arbetsmiljö i produktion	9,1%	3 0,273	3 0,273	2 0,182	3 0,273
8 Möjlighet till rationellt byggande	10,0%	3 0,300	4 0,400	3 0,300	4 0,400
10 Produktionskostnad	6,8%	3 0,205	4 0,273	3 0,205	3 0,205
11 Underhållskostnad	9,5%	2 0,191	3 0,286	2 0,191	3 0,286
Summa:		2,591	2,550	2,364	2,482

Av urvalskriterierna är det estetiken som har högst prioritet eftersom dess placering ger möjligheten till ett potentiellt landmärke, vilket bidrar till att bågbroen får 5 poäng. Under trafiksäkerhet ingår säkerhet för trafikerande och bedöms utifrån orienteringsmöjligheter på och under bron samt hur utformningen bidrar till risk för trafikolyckor. Bågbroen bedöms att ha högre trafiksäkerhet eftersom det inte behövs ett mittstöd och ges 4 poäng. För drift och underhåll bedöms brokoncepten med hänsyn till konstruktionsmaterial samt hur utformningen planeras för de kritiska konstruktionsdelarnas lättillgänglighet. Eftersom balkbroen och rambalkbroen har minst antal kritiska konstruktionsdelar tilldelas dessa 4 poäng.

Inom materialval utvärderas både sortens konstruktionsmaterial och mängden material med hänsyn till miljöpåverkan. För Kvilleledsbron anses materialvalet mindre väsentligt och därför ställs ingen stor vikt på kriteriet. Eftersom hängverksbron är det enda brokonceptet som konstrueras i trä ges 4 poäng. För återvinningsbarhet evalueras brokonceptens konstruktionsmaterial för miljöpåverkan. Konstruktions- och rivningsavfall står för 25-30% av allt avfall i EU (Anastasiades, Blom, Buyle, & Audenaert, 2020) och ett sätt att minska avfallets miljöpåverkan är genom att vid utbyte eller rivning återvinna materialet. Av alla konstruktionsmaterial har trä bäst återvinningsbarhet och betong minst (Maccarini Vefago & Avellaneda, 2013), därav bedöms hängverksbron med bäst återvinningsbarhet och tilldelas 3 poäng.

För arbetsmiljön i produktion värdesätts klämrisk vid tunga lyft med lyftkran, fallrisk från höga höjder och arbetsförhållanden som inkluderar bullrig och dammig arbetsmiljö samt kontakten med giftiga ämnen. Alla brokoncepten är snarlika men eftersom det sker arbete på högre höjd för bågbroen och hängverksbron ges de 2 poäng. Kriteriet möjlighet till rationellt byggande grundas på att brokoncepten ska byggas på ett rationellt sätt. För alla brokoncept kommer vissa konstruktionsdelar att prefabriceras, men möjligheten är större för balkbro och rambalkbro. Därför tilldelas balkbro och rambalkbro med 4 poäng.

För produktionskostnad bedöms brokoncepten utifrån material-, byggnation- och transportkostnad. Här bedöms balkbroen att ha en mindre produktionskostnad då den består av minst antal konstruktionsdelar och därför ges 4 poäng. Inom kriteriet underhållskostnad inkluderas kostnaden för att underhålla material, reparation och utbyte av komponenter. Bågbroen har många anslutningar som behövs kontrolleras och hängverksbron behöver bibehålla sin fukthalt med kontinuerliga underhållsarbeten. Därför ges lägre poäng för bågbroen och hängverksbron med 2 poäng.

10 Valt brokoncept

Med viktningmatrisen som grund tas beslutet att en bågbro utformad med stålbågar är den bästa lösningen för det studerade området, nedan beskrivs konceptet mer.

10.1 Övergripande utformning av vald bro

Bron utformas som en fritt upplagd konstruktion där bågen är infäst i ett dragband i ändarna och bär laster från tvärbalkar genom hängstag som fästs mellan dragbandet och huvudbärverket. Bågens tvärsnitt utformas som ett rör med rektangulär form för att bättre hålla för buckling från hängstag. Dragbandet utformas som en I-balk för att livet ska hålla för krafterna från hängstag⁵. Broplattan, som är av armerad betong fästs på ovansidan av tvärbalkarna för att skapa samverkan mellan konstruktionsdelarna. Brobågarna stabiliseras för laster i horisontell riktning samt knäckning av tvärstag.

Bågen utformas med en grafisk metod som beskrivs i boken *Form and forces* (Allen, 2009). Utformningen görs först genom att hitta ett förhållande mellan brons längd och brons höjd som liknar förhållanden på verkliga broar och samtidigt bedöms vara estetiskt. Metoden som används för att skapa en gynnsam form på bågen grundar sig i användandet av kraftpolygon med Bows notation.

För en båge belastad med jämnt utbredd last kommer en båge utformat som en cirkelbåge skapa tilläggsmoment, och kommer därför behöva större dimensioner än om bågen endast är belastad med normalkraft. Den optimala formen på en båge utsatt för en jämnt utbredd vertikal last är en funktion av formen *cosinus hyperbolicus* (Allen, 2009). Då förhållandet mellan höjd och längd på bågen är lägre än 0,25 kan enligt Allen en hyperbolisk funktion approximeras med god noggrannhet av en parabelfunktion. Denna approximation är nyttig att göra då det kan vara enklare att arbeta med parabelfunktioner än hyperboliska.

Förenklingar och antaganden görs för att minska komplexiteten på det slutliga polygontåg som används för att utforma brobågen. Den första förenklingen som görs är att kraft som verkar på huvudbärverket från hängstagen är jämnt fördelad längs den horisontella projektionen av bågen. Den jämnt utbredda lasten fördelas på tio lika breda delar längs brons bredd. De tio linjelasterna summeras till resultanter som verkar vertikalt i centrum på varje del, se Bilaga IV. Ytterligare en förenkling som görs är att egyptyngden av bågen är jämt fördelad i horisontellt plan och fördelad på samma vis som den yttre lasten. Allen beskriver i kapitel 3 hur metoden används för att utforma ett tak av cylindriskt skal. Samma metod används för bågens utformning eftersom antaganden som görs är samma. Skisser av bågens kraftpolygon och utformning med Bows notation redovisas i Bilaga XII och Bilaga XIII. Syftet med denna grafiska metod är att bilda en struktur som bär största möjliga andel av kraften axiellt längs samtliga delelement så att strukturen ej blir utsatt för stora moment.

10.2 Detaljutformning

För att skydda brobaneplattan från vägdagvatten appliceras beläggning överst på brobanan (Trafikverket, 2018). En av de vanligaste beläggningarna⁶ väljs för Kvilleledsbron, denna beläggning har tjockleken 95mm och uppbyggnaden 2IIA (Trafikverket, 2019b).

⁵Handledning med Mustafa Agül, COWI, (2021-04-20)

⁶Handledning med Staffan Lindén, COWI, (2021-04-21)

10.3 Övergångskonstruktion och lager

För att klara av rörelser främst mellan överbyggnad och underbyggnad hos bron behöver dess överkonstruktion vara anpassad för detta. Parametrar som påverkar rörelser i konstruktioner är bland annat temperaturförändringar samt bromslaster från trafiken på bron. För att tillåta att bron rör sig vilar bron på ett rullager i den ena änden vilket tillåter rörelser i längstriktningen, se figur 8. I övergångskonstruktionen på denna sida av bron placeras även en enspaltsfog med ett gummielement vilken tillåter rörelser på maximalt 90mm (Trafikverket, 2018).

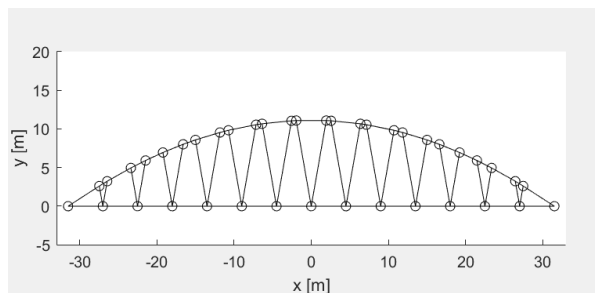
10.4 Broräcken

För att skydda trafikanterna på bron vid påkörning samt hindra fordon från att köra av bron ned på den underliggande trafiken monteras broräcke parallellt med körbanan på båda sidor av bron. Räckets placeras på ytterkanten av betongplattan, mellan hängstagen och vägbanorna, vilket gör att hängstagen skyddas till viss del från påkörning. Det primära vid val av broräcke är att räckets uppfyller den kapacitetsklass som bron ska ha. Eftersom bron ska vara lättorienterad samt att bron ska se estetiskt ut ska utseendet inte påverkas negativt av broräcket tas detta även i beaktande. Utifrån de nämnda kraven väljs modellen Birista 3P från Saferoad som är ett räcke med god genomsikt (Saferoad, u.å.).

10.5 Systemmodell av bågbro

Systemmodellen ritas som en enkel modell med en rad av balkar som går parallellt med x-axeln och en båge med ändarna på kantnoderna. Brobågens bredd- och höjdförhållanden antas utifrån andra exempel på bågbroar först till 1:5,7 vilket för bron längd, 63 m, ger en högsta höjd på brobågens systemlinje på ca 11,05 m. Brobågens systemlinje följer kurvan som utformats med metoden från kapitel 10.1.

Utvecklingen av systemmodellen beaktar det estetiska kravet på bron som enligt utvärderingskriterier är det viktigaste kravområdet på bron. Hängstagen vinklas och hängs i V-former som går från förstärkningsbalken till huvudbärverket, se figur 9. Denna ommodellering medför en ökad produktions- och förvaltningskostnad, vilket ej anses vara lika högt prioriterat som det estetiska.



Figur 9 Systemmodell för beräkning av Kvilleledsbron.

10.6 Förvaltning- och Underhållsplan för Kvilleledsbron

Förvaltnings- och underhållsplanen av Kvilleledsbron kommer att genomföras enligt kapitel 5. Viktiga underhållsarbeten som måste genomföras är byte av hängstag, ommålning på stålkonstruktionsdelar, brospolning och impregnering av betong. Hängstagen byts när önskad bärighetsförmåga ej uppnås. Ommålning av stålkonstruktionerna utförs då entreprenaden konstaterar att färgen eroderas. Kravet på renhållning grundar sig i SVEVIAs (u.å.a) krav på 95 procent renlighet. För att upprätthålla detta krav ska brospolning på Kvilleledsbron utföras tre gånger per år, den första sker på våren efter sista saltningen. Impregnering av ändstödens betongytor utförs vart sjätte år, enligt rekommendation av SVEVIA (u.å.b).

11 Preliminär dimensionering av valt brokoncept

Detta kapitel avhandlar preliminär dimensionering av det valda brokonceptet enligt europeiska standarder i Eurocode (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2013) (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2011) och Svensk Standard (SS-EN 1990, 2002) (SS-EN 1994-2, 2005) (SS-EN 1993-1-1, 2009). Beräkningar utförs i MATLAB med beräkningsprogrammet CALFEM eller som handberäkningar och redovisas i Bilagor.

11.1 Laster vid dimensionering av bro

Vid en preliminär dimensionering av bågbron behövs kunskap om de laster som verkar på bron. Utifrån dessa laster tas dimensionerande normal-, tvär- och momentkraft fram för bron vilka används för att ta fram dimensioner som uppfyller kraven på bärförmåga och utnyttjandegrad för bronns olika delar. De laster som tas hänsyn till vid preliminärdimensionering av bron är uppdelade i följande grupperingar: permanent last, variabel last, olyckslaster samt övriga laster.

Permanent laster, G , består av bronns egentyngder och storleken på denna varierar beroende på vilken av brodelarna som beaktas i den aktuella beräkningen. Detta beror på att alla komponenter inte behöver inkluderas i vissa dimensioneringsberäkningar. Variabla laster, Q , är till skillnad från permanenta laster tidsberoende. Exempel på variabla laster för en bro är trafiklaster och vindlaster. Vid beaktande av trafiklaster används olika belastningsmodeller vilka representerar de olika trafiklasterna som bågbron kan tänkas belastas med. Olyckslaster för en bro kan orsakas av exempelvis en påkörning från ett fordon eller att bron utsätts för en explosion. För att bron ska klara denna typ av laster utan att kollapsa görs beräkningar där en eller flera hängstag inte är medräknade. Laster som verkar på bron och inte grupperas i permanenta-, variabla eller olyckslaster är de som hamnar under övriga laster. De lasterna som är i denna gruppering är dels broms- och accelerationskraft. Eftersom bron inte är helt rak utan har en liten svängradie, som överstiger minimimåttet, ska även centrifugalkraften beaktas.

11.2 Dimensionerande laster i brott- och brukgränstillstånd

Vid dimensionering skiljer sig beräkningen mellan brottgränstillstånd och bruksgränstillstånd. Dimensionering vid brottgränstillstånd beaktar kapaciteten av bärverket innan kollaps och vilken säkerhet som det är för människor när det sker. Vid dimensionering för bruksgränstillstånd beaktas deformationer, vibrationer och svängningar för bron. Vid dimensionering av bron kan tre typer av lastkombinationer tillämpas för både brott- och bruksgränstillstånd: karakteristisk, frekvent och kvasipermanent. De olika lastkombinationerna har olika långa återkomsttider där karakteristiska värden har 1000 år, frekventa värden 7 dagar och kvasipermanenta värden återkomsttid beräknas enligt kalibrering, SS-EN 1990 (2002).

I brottgränstillstånd finns det två ekvationer (SS-EN 1990, 2002), se ekvation 1 och 2 nedan, som används för att ta fram det dimensionerande värdet för en bro. Det största värdet av dessa ekvationer är den lasten som är den dimensionerande för brottgränstillstånd, se partialkoefficienterna i tabell 4.

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

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{j > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

Tabell 4 Partialkoefficienter för beräkning av dimensionerande last i brottgränstillstånd.

$\gamma_{G,sup}$	$\gamma_{Q,sup}$	ξ	ψ_0
1,35	1,5	0,85	0,75

Den dimensionerande lasten i brukgränstillstånd tas fram enligt SS-EN 1990 (2002) med hjälp av tre olika ekvationer, se nedan. De tre ekvationerna används vid olika sorters brotgränstillstånd och ekvationerna använder olika lastkombinationer. I bron lastfall skall reversibelt tillstånd användas och därför används ekvation 4.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P_k" + "Q_{k,1}" + \sum_{j > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{j > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + \sum_{j \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (5)$$

11.3 Lastmodeller enligt svensk standard

För att täcka in alla trafiksituationer som normalt kan uppkomma under en vägbro tekniska livslängd har lastmodeller formulerats vilka motsvarar trafikklaster. För att använda modellerna som anges nedan ska kravet på en broslängd mindre än 200m uppfyllas. Den fria brobredden på bron kan benämnas körbandbredd, w , och är måttet mellan insida räcken. Bredden på den aktuella bron avgör hur många filer (lastfält) och bredden på dessa, se tabell 5 nedan.

Tabell 5 Fil- och körbandbredd enligt SS-EN1990 (2002).

w	Antal filer n_1	Filbredd	Återstående bredd
$3 \leq w < 5,4 \text{ m}$	1	3 m	$w - 3$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	2	$w/2$	0
$w \geq 6 \text{ m}$	$n_1 = w/3 \text{ m}$	3 m	$w - n_1 * 3 \text{ m}$

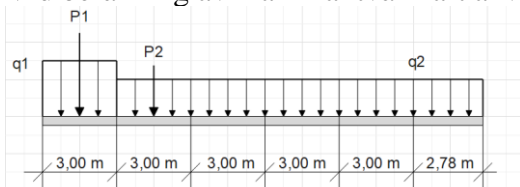
Bågbron har en bredd på totalt 17m, vilket ger fem stycken filer där varje fil har bredden 3 meter och den återstående ytan blir två meter bred. Vid dimensionering ska placeringen av lastfälten göras så ogynnsamt som möjligt och därav är placeringen olika beroende på vilken beräkning som utförs. Beräknas den maximala tvärkraften placeras det mest belastade lastfältet i ytterkanten medan vid beräkning av nedböjning placeras samma lastfält istället i mitten av körbandbredden.

11.3.1 Lastmodell 1, LM1

Lastmodell 1 används vid både lokala och globala beräkningar då den täcker stora delar av den trafiklast som uppstår från last- och personbilar. Lastmodellen består av två olika delsystem:

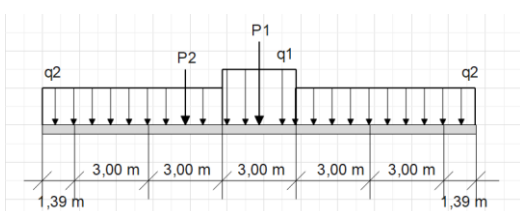
1. Två axellaster (TS) från ett boggisystem
2. Jämnt utbredda laster (UDL) med tyngden per kvadratmeter lastfält.

Vid beräkning av maximal tvärkraft används modell 1, se figur 10 nedan.



Figur 10 Placering av bron laster vid beräkning av maximal tvärkraft.

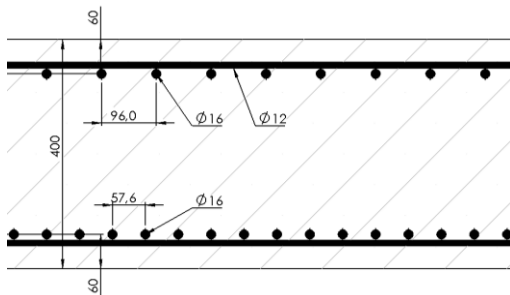
Vid beräkning av maximal nedböjning placeras krafterna i mitten av körbanan och modell 2 används, se figur 11 nedan.



Figur 11 Placering av bron laster vid beräkning av maximal nedböjning.

11.4 Preliminär dimensionering av betongplattan

Betongplattan som bär vägtrafiken dimensioneras med bredd 17 m där mått beskrivs i figur 12. Betongen dimensioneras för hållfasthetsklass C20/25, livslängdsklass L100 och exponeringsklass XD1. Samtliga armeringsstångers hållfasthetsklass är B500B.



Figur 12 Ritning av armering i betongplattan.

Lasterna som verkar på betongplattan vid dimensionering i brottgränstillstånd räknas på en 3 m bredd vilket motsvarar det värsta lastfältet i LM1. Utbredd last verkar över hela plattans längd $q_{last} = 7,2 \text{ kN/m}$ och en punktlast (boggielast) som testas i alla plattans punkter $Q_1 = 810 \text{ kN}$. Lastkombinationer och beräkningar redovisas i Bilaga VII.

Kontroll i brottgränstillstånd

Dimensionerande moment och reducerad dimensionerande tvärkraft:

$$M_{Ed} = 1293 \text{ kNm}, V_{Ed,red} = 526 \text{ kN}$$

Dimensionerande momentkapacitet i plattan beräknas:

$$M_{Rd} = 2152 \text{ kNm} > M_{Ed} \rightarrow \underline{OK}$$

Den dimensionerande tvärkraften beräknas då boggielasten verkar i snittet där en sned trycksträva från stöd med vinkel $\Theta = 45^\circ$ kan fullt bildas (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2013). Denna sträcka från stödets centrum är 456 mm.

Kontroll för livtrycksbrott görs där högsta tillåtna tvärkraft beräknas enligt EC 2. Erhållen hållfasthet mot livtrycksbrott: 3660 kN. Eftersom $V_{Ed,red}$ är under gränsen för livtrycksbrott förekommer ingen risk för att plattans liv går i brott.

Kontroll för skjuvglidbrott görs enligt EC 2 (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2013). Eftersom värdet för hållfasthet mot skjuvglidbrott som erhålls, $V_{rdc} = 741 \text{ kN}$ är större än $V_{Ed,red}$ finns ej behov av tvärkraftsarmering.

Kontroll i bruksgränstillstånd

Tvärsnittet spricker om $M_{cr} < M_{Ed}$, där $M_{Ed} = 1272 \text{ kNm}$, beräkningar i Bilaga VII visar att tvärsnittet är sprucket eftersom $M_{cr} = 221 \text{ kNm}$

Krypning och krympning beräknas i Bilaga VII. Spänningar i betong och armeringsstänger beräknas där stålsänningar uppfyller villkor för bruksgränstillstånd för drag- och tryckarmering (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2011). Vid kontroll av betongspänning i överkant uppfyller inte betongplattan villkor för bruksgräns.

$$\begin{aligned}\sigma_s &= 111 \text{ MPa} < 0,8 * f_{yk} = 400 \text{ MPa} \rightarrow \underline{OK} \\ \sigma_s &= -107 \text{ MPa} < 0,8 * f_{yk} = 400 \text{ MPa} \rightarrow \underline{OK} \\ \sigma_c &= -16 \text{ MPa} > 0,45 * f_{ck} = 9 \text{ MPa} \rightarrow \underline{EJ OK}\end{aligned}$$

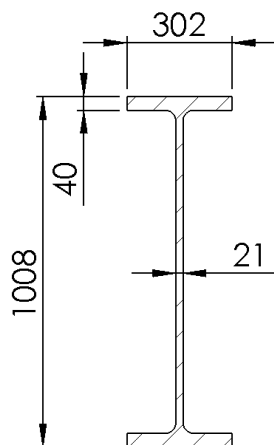
En möjlig lösning för att uppfylla kravet är att öka hållfasthetsklassen i betongen, vilket även kommer påverka övriga beräkningar som beror av betongens klass.

Beräkning av sprickbredd görs. Sprickbreddens övre gräns i bruksgränstillstånd bör ej överstigas.

$$w_k = 0,11 \text{ mm} < w_{max} = 0,20 \text{ mm} \rightarrow \underline{OK}$$

Sprickbredden beräknas vara godkänd.

11.5 Preliminär dimensionering av tvärbalkarna



Figur 13 Tvärbalkens tvärsnittsmått.

Tvärbalkarna är placerade under betongplattan och fästs i dragbanden som fritt upplagda med anslutning till hängstagen så en effektiv lastupptagning verkar. Krafterna som tvärbalken tar upp överförs till hängstagen som leder vidare kraften till bågen. Lasterna som påverkar tvärbalkarna är egentvingder från betongplattan.

Tvärbalkens profil är en valsad I-balk med tvärsnittsmåtten i figur 13. Vid valet av cc-avstånd mellan tvärbalkarna antogs ett avstånd på 4.5m, vilket blev en bra approximation då den effektiva bredden för betongflänsen beräknades fram till 4.03m. Med en överliggande betongplatta och underliggande stålbalk kan samverkan utnyttjas med hjälp av skjuvförbindare som svetsas på livet och gjuts in i betongplattan.

Under beräkningsgången har ett samverkande tröghetsmoment beräknats vilket leder till en styvare konstruktion med större inre hävarm vilket resulterar i lägre nedböjning. För momentkapacitetsberäkningen används stelplastisk teori enligt SS-EN 1994-2 (2005) eftersom tvärbalken ligger inom spannet för tvärsnittsklass 1. Vid jämviktsberäkning för normalspänningarna framkommer att en del av betongplattan är i drag, vilket leder till att fullt utnyttjande av samverkan ej kommer råda och risk för sprickor i betongen. För att få givna dimensionerande krafter har en Calfem-model modellerats (bilaga III), där även en kontroll mot elementarfall har gjorts för att säkerställa rimliga värden, se tabell 6 för framtagna värden.

Tabell 6 Dimensionerande krafter i bruks- och brottgränstillstånd.

	Bruksgräns	Brottgräns
M_{Ed}	4079 kNm	7120 kNm
V_{ed}	675.4 kN	1704.9 kN
Nedböjning	0.0258 m	0.0452 m

Beräkning av momentkapacitet, tvärkraftskapacitet, och kontroll av interaktion görs i Bilaga VI och redovisas i tabell 7. Utnyttjandegraden η ger en indikation så att beräkningarna stämmer, önskat värde på utnyttjandegraden varierar beroende på vilken konstruktion som beräknas, en industribyggnad bör ha en utnyttjandegrad runt 75-85% och för broar eftersträvas en kvot strax under 1⁷.

Tabell 7 Nyttjandegrader för moment och tvärkraft.

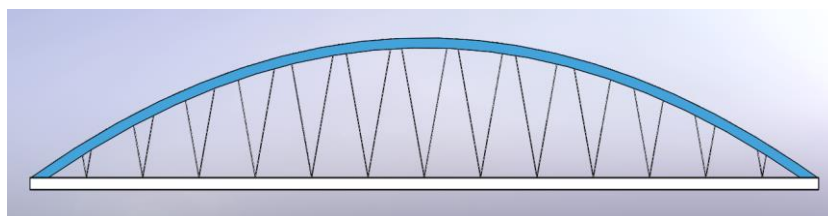
		Utnyttjandegrad
M_{plRd}	11080 kNm	36.8 %
V_{plRd}	4357 kN	24.7 %

11.6 Preliminär dimensionering av det bärande systemet

Det bärande systemet är konstruktionen med båge, hängstag och dragband, se Figur 14. Dragbandets balkverkan försummas då tvärbalkarnas laster antogs bäras av

⁷ Personlig kontakt med handledare Mario Plos, (2021-04-07)

hängstagen i varje belastad nod. Egenvikterna av bågen och dragbandet fördelas över balkarna som utbredda laster. Egenvikterna av tvärbalkarna och vägbanan fördelas som punktlaster över varje nod i hängstagens infästningar i huvudbalken. Den variabla trafiklastens verkan från värsta fall i tvärbalkens beräkning läggs på den nod som skapar de dimensionerande krafterna beroende på vilken konstruktionsdel i bärverket som skall dimensioneras (Bilaga I).



Figur 14 Huvudbärverket med hängstag och dragband.

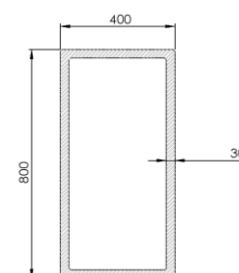
Dimensionering av huvudbärverk

Bågens balk dimensioneras som en valsad rörprofil med rektangulärt tvärsnitt med mått som redovisas i figur 15 och följer bågens kurva.

Dimensionerande tvärsnittskrafter som verkar på bågen hämtas ur den globala bärverksmodellen i Bilaga I och är:

$$M_{Ed} = 3075 \text{ kNm}, \quad V_{Ed} = 835 \text{ kNm}, \quad N_{Ed} = 7316 \text{ kNm}$$

Dimensionerande moment och tvärkraft verkar då punktlasten placeras i centrumnoden och ett hängstag i noden försummas för underhåll. Dimensionerande normalkraft verkar då kraften placeras i tvärbalkarna 4,5 m från stöd och ett hängstag i närmaste noden försummas.



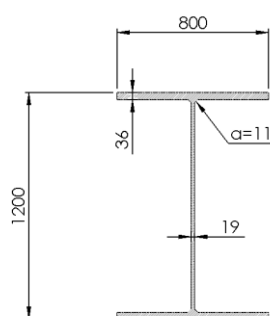
Figur 15 Bågens tvärsnittsmått.

Beräkningar redovisas i Bilaga V. Balken är i tvärsnittsklass 1 och momentkapacitet beräknas därför med plastisk analys. Kontroll för skjuvbuckling behöver ej göras. Normalkraftskapacitet beräknas och kontroll för knäckning görs enligt Svensk Standard (SS-EN 1993-1-1, 2009).

$$M_{bRd} = 6196 \text{ kNm} > M_{Ed} \rightarrow \underline{OK}$$

$$N_{pLRd} = 24280 \text{ kN} > N_{Ed} \rightarrow \underline{OK}$$

$$N_{cr} = 65590 \text{ kNm} > N_{Ed} \rightarrow \underline{OK}$$



Figur 16 Dragbandets tvärsnittsmått.

Dimensionering av dragband

Dragbandets mått motsvarar en HEB-Balk (Chalmers Tekniska Högskola, 2018) där dimensionerna sedan ökats för att balken ska uppfylla kraven som huvudbalk⁸, se figur 16.

Dragbandets dimensionerande laster beräknas med Calfem-modellen för fallet då dragbandets balkverkan ej försummas (Bilaga I).

Dimensionerande laster fås då punktlasten verkar på brons mitt och blir:

$$M_{Ed} = 6214 \text{ kNm}, \quad V_{Ed} = 734 \text{ kN}, \quad N_{Ed} = 1902 \text{ kN}$$

⁸ Personlig kommunikation med Mustafa Agül, COWI, (2021-04-20).

Balkens tvärsnittsmått och beräkningar redovisas i Bilaga IV. Momentkapacitet i dragbandet beräknas. Kontroll görs för att inte skjuvbuckling skall riskeras i livet på dragbandet. Ingen interaktionsberäkning behöver göras mellan tvärkraft och moment. Kontroll görs även av normalkraftskapacitet.

$$M_{Rd} = 12220 \text{ kNm} > M_{Ed} \rightarrow \underline{OK}$$

$$V_{bWRd} = 3980 \text{ kN} > V_{Ed} \rightarrow \underline{OK}$$

$$N_{PL,Rd} = 28060 \text{ kN} > N_{Ed} \rightarrow \underline{OK}$$

Dimensionering av hängstag

Den största och dimensionerande axiella kraften som verkar på ett hängstag sker då boggielasten placeras vid en nod 4,5 m från ändupplag. Tryckta hängstag räknas bort från modellen eftersom hängstag endast antas bära normalkraft i drag. För att motsvara situationen då underhåll av hängstag pågår försummas påverkan av hängstaget i drag närmast det dimensionerande vid beräkning. Den dimensionerande normalkraften är 2050 kN i de näst yttersta hängstagen vid dessa förutsättningar. Som hängstagsselement används Mconnect rods (Mürmann, u.å.) där samtliga delar till stången och stångens fäste är utformat så att dragmotstånd är lika. De stänger som väljs vid dimensionering är M90x4 där draghållfastheten är 2406 kN. De gängade stängerna som fästs i hängare har en diameter på 90 mm med stålqualität S460.

Största nedböjning i konstruktionen skall enligt krav från Trafikverket inte överstiga 1/400 av den teoretiska spännvidden (Trafikverket, 2019a). Detta krav gäller längs körfältet och vinkelrät mot körfältet. De dimensionerande lasterna beräknas i bruksgränstillstånd enligt LM1, se kapitel 11.3.1. För nedböjningen längs dragbandet summeras största nedböjning i tvärbalk med största nedböjning i dragbandet. Totala vertikala förskjutningen blir då:

$$\delta_{1+2} = \delta_1 + \delta_2 = 81,1 + 25,4 = 106,5 \text{ mm}$$

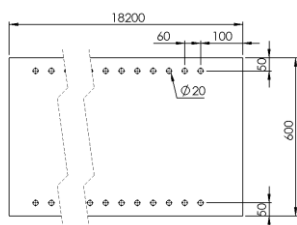
$$\frac{L}{400} = [L = 63000 \text{ mm}] = \frac{63000}{400} = 157,5 \text{ mm} > \delta_{1+2}, \quad \underline{OK}$$

Krav för nedböjning längs tvärbalkarna beaktar endast tvärbalkarnas nedböjning:

$$\frac{L}{400} = [L = 17781 \text{ mm}] = \frac{17781}{400} = 44,5 \text{ mm} > \delta_2, \quad \underline{OK}$$

För beräkningar av nedböjningar se Bilaga I och Bilaga III.

11.7 Preliminär dimensionering av upplagen



Figur 17 Ritning av sektion i ändstöd med armering.

Ändstöden dimensioneras som armerade betongpelare med olika höjder. Det längre stödet är 5,2 m högt från marknivå. Figur 17 beskriver mått på stödets tvärsnitt med armering. Ändupplag dimensioneras som armerade betongpelare med en linjärt ökande utbredd last som jordtryck från vägbanken. Bankmaterial ges dimensionerande parametrar enligt Utdrag från Geo-PM⁹.

$$\gamma_d = 20 \text{ kN/m}^3, \quad \phi'_d = 29,2^\circ$$

Valda värden används för att beräkna jordtryckets ökning längs djupet, Bilaga VIII.

⁹ Utdrag ur Geo-PM är ett dokument givet av handledare Staffan Lindén för att användas som källa för geotekniska förhållanden.

På ändupplaget läggs en kraft som är en resultant av en permanent och en variabel del, där den permanenta kraften är halva brons egentygnd och den variabla lasten är punktlasten för trafik från beräkningar i brottränns, se Bilaga VI. Lastkombinationer används för brottrännsstillstånd enligt tabell K1.5 i Bärande Konstruktioner Del 1 (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2013). Den vertikala punktlasten är: $P = 6810 \text{ kN}$, $q_d = 8,4 * x \text{ [N/m]}$, där x är djup från vägbankens överkant i meter.

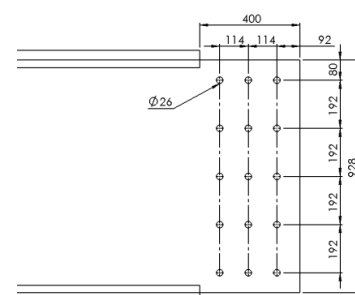
Det dimensionerande momentet för första ordningen bestäms och jämförs med beräknad momentkapacitet (Bilaga VIII):

$$M_{Ed} = 3049 \text{ kNm} < M_{Rd} = 21691 \text{ kNm} \rightarrow \underline{OK}$$

11.8 Preliminär dimensionering av detaljer

Dimensionering av skruvförband

Skruvförbanden som kopplar ihop tvärbalkarna med dragbanden och överför krafter där emellan är utformade som i figur 18. 400 mm av flänsarna skärs bort ur ändarna av tvärbalkarna och livet i tvärbalkarna används som hållplåt. Livet har en tjocklek på 21 mm och därför har tjockleken på överföringsplåten i dragbandet även valts till 21 mm. För att komma fram till den slutgiltiga dimensioneringen av skruvförbandet har ett ingenjörsmässigt antagande gjorts med avseende på antal hål och dimensioner på bultarna. Antal hål väljs till 15 stycken och bultarna väljs till sort 8.8 M24.



Figur 18 Änddetalj på tvärbalk.

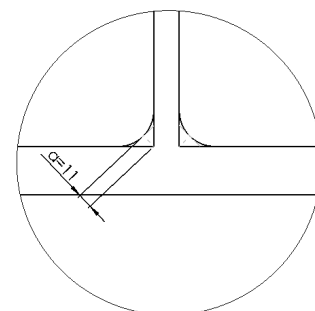
Dimensionerande laster för beräkning väljs från elementarfall i tvärbalk (Bilaga III). Ekvationer som används hämtas ur Bärande Konstruktioner Del 2 (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2011) och beräkningar redovisas i Bilaga IX. Kontroll av skjuvbrott för skruvarna görs för att säkerställa att de håller för krafterna de utsätts för. Erhållen skjuvbrottskapacitet för en bult $F_{v,Rd} = 135,5 \text{ kN}$. För 15 bultar med samma kapacitet erhålls en nyttjandegrad om 80% för bultförbandet.

Avståndet mellan yttersta hål och kanten på flänsen bestäms utifrån ett intervall mellan 31,2-124mm, avståndet mellan hålen mellan 57,2-200mm i kraftens riktning och 62,4-200mm tvärs kraftriktningen. Då avstånden valts kontrolleras dessa för hålkantsbrott för att säkerställa att plåten håller. Efter beräkning erhålls en kapacitet mot brott $F_{b,Rd} = 514 \text{ kN}$ vilket resulterar i en nyttjandegrad om 21%. Alltså är det kapaciteten mot skjuvbrott i bultarna som blir dimensionerande.

Dimensionering av kälsvets i dragbandet

Dragbandet som är i form av en I-balk, svetsas samman med en käl fog på var sida om livet (se figur 19), denna svets måste dimensioneras och kontrolleras för att klara krafterna svetsen utsätts för. Dragbandet kommer att bli utsatt för dragkrafter i sin längsgående riktning men dessa kommer ej att påverka beräkningen för svetsen då hela tvärsnittet tar upp dragkraften. Någon lokal skjuvspänning kommer inte heller att uppstå i svetsen, alltså kommer svetsen enbart bli utsatt för dragkrafter vinkelrät svetslängden. Jämförelsespänningen som svetsen utsätts för beräknas därför med formeln: $\sigma_j = \sqrt{(\sigma_{\perp}^2 + 3 * \sigma_{\parallel}^2)}$. Enligt EC 3 skall svetsen uppfylla två villkor för att säkerställa bärförmågan hos svetsen.

De två kraven lyder:



Figur 19 Detaljritning på kälsvets.

$$\sqrt{(\sigma_{\perp}^2 + 3 * \sigma_{\perp}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}} \text{ och } \sigma_{\perp} \leq 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

I det första kravet sätts jämförelsespänningen i relation till svetsens hållfasthet f_u vilket genom beräkning bestämmer svetsens minsta a-mått.

Erhållet minsta a-mått, $a \geq 10,2 \text{ mm}$ avrundat uppåt till närmsta heltal $a=11$ blir det valda a-måttet. I det andra kravet sätts den vinkelrät dragande spänningen i relation till svetsens hållfasthet: $53,4 * 10^6 = \sigma_{\perp} \leq 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 367,2 * 10^6 \text{ Pa}$.

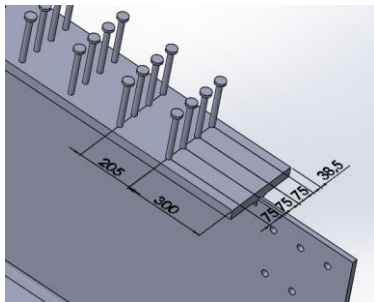
Båda kraven är således uppfyllda och det den valda svetsen håller.

Se Bilaga IX för lösningsgång. Ekvationer från Bärande konstruktioner Del 2 (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2011).

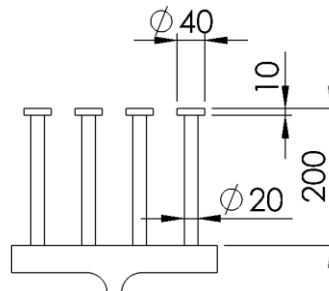
Dimensionering av skjuvförbindare

För att skapa en styvare konstruktion behöver betongplattan och tvärbalkarna samverka som en enhet. Detta samverkande tvärsnitt uppnås genom att skjuvförbindare i form av svetsbultar svetsas fast i tvärbalken och sedan gjuts in i betongen. Utformningen av svetsbultarna och avstånden mellan dem dimensioneras utifrån SS-EN 1994-2 (2005). Beräkninggång finns i Bilaga VI.

Den slutgiltiga utformningen av svetsbultar och avstånden mellan dem ses i figur 20 och 21 nedan.



Figur 20 Skjuvförbindarnas position på tvärbalk.



Figur 21 Mått på skjuvförbindare.

11.9 Återstående dimensionering

Det finns ytterligare kontroller att göra för preliminärdimensionering. En viktig beräkning som måste göras är hur konstruktionen påverkas av vindlast. Tvärstag som stabiliserar bågarna horisontellt har inte dimensionerats och inte beaktats i beräkningar. En annan beräkning som måste göras är en preliminärdimensionering av bågarnas infästningar i dragbandet. Vissa beräkningar för ändstöd saknas. För att bron ska stå säker krävs att sättningar i jorden bedöms och att ändstöden modelleras som upplagda på fjädrar. För att få en optimal broplatta behöver armeringen i över- och underkant dimensioneras. Det görs genom att med interaktionsberäkning mellan tvärkraft och moment används för att bestämma i vilka snitt armeringsmängden är överdimensionerad och minska den.

12 Diskussion

Projektet i stort behandlar broplanering och broprojektering på ett förenklat sätt i jämförelse med hur det skulle genomföras i ett verkligt fall. Detta beror på att kunskapen inom gruppen inte är på en nivå för att göra den så noggrann samt att tiden inte fanns för att göra en mer detaljerad och noggrann projektering. Följden av detta blir att projektet inte kan ligga som underlag för fortsatt arbete utan att det gjorda arbetet behöver kompletteras. Alla beräkningar i rapporten har genomförts för hand och med hjälp av egenskrivna Matlab script vilket är ett tidskrävande arbete. Hade dimensioneringen i stället genomförts med ett tekniskt program hade en mer detaljerad nivå på dimensioneringen kunnat uppnås och högre utnyttjandegrad hade kunnat erhållas på brons olika delar. Det hade gjort att det framtagna brokonceptet förmodligen blivit mer ekonomiskt och miljövänligt hållbar.

Eftersom det erhållna underlaget till Kvilleledsbron inte var så specificerat med krav på projekteringen av bro, fanns det stora valmöjligheter i val - och design av bron. De krav som erhöles och styrde arbetet var främst brobredd, möjlig placering av mittstöd och ändupplag samt den tillgängliga konstruktionshöjden. Mer givna krav på bron samt hänsyn till både ekonomi och miljöpåverkan hade gett mindre valmöjligheter gällande egna önskemål och tankar, och en mer trolig utformning i praktiken hade tagits fram. Vid viktningen av brokoncept går det konstatera att det fanns stora valmöjligheter. Utifrån att det etiska utseendet prioriterades väldigt högt samt att miljösynen och den ekonomiska aspekten prioriterades lägst var det bågbro som erhöles högst viktning. För att inte begränsa valmöjligheterna i arbetet samt att få tänka fritt i designen av Kvilleledsbron gjordes denna viktning. Detta medför att bron i dagsläget inte är försvarbar i praktiken, då hänsyn till miljö och ekonomi påverkar stort. Hade de olika utvärderingskriterierna i viktningsskematet viktats på ett annat sätt hade med största sannolikhet ett annat brokoncept blivit det vilken viktades högst.

Designen av brons olika delar är gjord utifrån innehavande kunskaper och personliga tankar och tyckande om vad som passade för just Kvilleledsbron. Alla har olika tankar om vad en bra design är och därav hade designen på bron troligtvis sett annorlunda ut om andra personer designat. I designarbetet togs ingen betydande hänsyn till omgivningen och omgivande byggnader, i praktiken är detta viktigt att väga in i designen av bron för att få en enhetlig och sammanhängande stadsplanering.

Komplexiteten i designen på bron i förhållande till dimensioneringskunskaper har begränsat hur stor del av brons delar och detaljer som har beräknats. Mer kunskap, erfarenhet och tid inom detta hade gett ett mer utförligt och noggrant arbete.

Källorna som används i rapporten är till för att ge den kunskap inom brobyggnation samt de krav som behövs i detta skeende av arbetet. Källorna som används i rapporten i helhet anses vara trovärdiga och pålitliga. Eftersom COWI är engagerade i den verkliga projekteringen av Kvilleledsbron har de tillgång till de krav som finns och eftersom denna bro ska byggas i praktiken anses dessa källor högst trovärdiga. Ytterligare faktorer som gör att källorna anses trovärdiga är att personerna som arbetar på COWI inom området regelbundet och har flera års erfarenhet. Detta gör att de har en bred kunskap inom området och är insatta i vilka krav som finns och hur man kan tänka vid broprojektering.

Mycket av informationen och kunskapen i arbetet är hämtat från Trafikverket samt litteratur och personer med anknytning till Chalmers. Eftersom Trafikverket ansvarar

för uppföranden av statligt ägda broar i Sverige anses dokumentation utgiven av dem som högst tillförlitliga. Eftersom Trafikverket arbetar med många broar samt ständigt ger ut nya upplagor av sina dokument anses risken för tryckfel vara låg. Dessutom att dokument är uppdaterade för den senaste kunskap och krav inom trafiksäkerhet och brobyggnationen som finns. Uppfyller bron de krav som står i dokumenten så anses den vara säker utifrån de ställda kraven i dagsläget.

Eftersom källorna som har en anknytning till Chalmers är läroböcker samt föreläsningmaterial anses detta vara trovärdiga källor. Materialet är till för att utbilda framtida ingenjörer som ska vara redo för arbetslivet och som där ska kunna applicera sina kunskaper. Chalmers har ett gott rykte och det hade dem troligtvis inte haft om bristfällig kunskap lärdes ut.

Eftersom kunskapen och kraven ständigt utvecklas är det inte säkert att bron kommer att uppfylla de krav som finns i framtiden men detta gäller alla även befintliga broar och är alltså en aspekt som inte går att ta i beaktande utan det är dagens kunskap som utgår från.

13 Slutsats

Genom litteraturstudie där bland annat olika sorters material, produktionsmetoder och brotyper undersökts tas de brokoncept som kunde utvärderas för det aktuella broläget fram. Dessa är balkbro, balkrambro, bågbro och hängverksbro. Valda brotyper bedömdes vara lämpliga att jämföras mot kriterier i andra urvalsprocessen.

Den bäst lämpade typen för Kvilleledsbron var en bågbro i ett spann som togs fram genom den andra urvalsprocessen. Denna bro uppfyllde projektets syfte genom att följa de givna kraven och förutsättningarna. Bland annat maximal konstruktionshöjd, brobredd samt spannvidd. Bågbron skapar ett gott och säkert trafikflöde och säkerställer att även i framtiden kunna genom vägnätet erhålla goda trafikflöden. Det estetiska värdet i bågbron leder till att den enligt utvärderingsmatrisen var ett lämpligt val.

Den framtagna Kvilleledsbron består av 15 tvärbalkar som samverkar med en betongplatta genom skjuvförbindare. Kraften från lasterna på brobanan förs via tvärbalkarna ut till dragbanden och genom de vinklade hängstagen till bågen som är huvudbärverket i konstruktionen. För att stabilisera bågen finns övre tvärstag fästa mellan bågarna ovan farbanan.

Den framtagna bron är designad så att inspektioner och underhåll lätt kan genomföras från alla håll. Brons utformning är även anpassad för att skydda materialet, för det första är detaljerna designade för att minimera korrosionsrisken och för det andra fungerar betongplattan som ett skyddande skikt för de underliggande tvärbalkarna. Detta kombinerat med ett kontinuerligt underhållsarbete med bron där materialet skyddas från yttre påfrestningar gör att bron kan ha en lång livslängd. Den långa livslängden gör att bron kan förvalta och uppfylla alla mål som finns som både när den står klar och för en lång tid framöver.

Referenser

- Abelssoon, B., Båge, P., & Westerlund, L. (1998). *Träbroar*. Svenska kommunförbundet.
- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2011). *Bärande konstruktioner del 2*. (CTH rapport, 2011:1). Chalmers Tekniska Högskola.
- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2013). *Bärande konstruktioner del 1*. (CTH rapport, 2013:1). Chalmers Tekniska Högskola.
- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2019). *Bärande konstruktioner*. Chalmers Tekniska Högskola.
- Allen, E. (2009). *Form and forces: designing efficient, expressive structures*. Wiley-Blackwell.
- Anastasiades, K., Blom, J., Buyle, M., & Audenaert, A. (2020). *Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review*. *Sciencedirect*. (117).
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109522>
- Arbetsmiljöverket. (den 2 juni 2020a). *Förebygg risker på byggarbetsplatsen*. Hämtat från <https://www.av.se/produktion-industri-och-logistik/bygg/forebygg-risker-pa-byggarbetsplatsen/>.
- Arbetsmiljöverket. (den 2 juni 2020b). *Tänk på detta vid byggnadsarbete*. Hämtat från Av.se: <https://www.av.se/produktion-industri-och-logistik/bygg/forebygg-risker-pa-byggarbetsplatsen/tank-pa-detta-vid-byggnadsarbete/>
- Burström, P. G., & Nilvér, K. (2018). *Byggnadsmaterial: Tillverkning, egenskaper och användning*. Studentlitteratur.
- Chalmers Tekniska Högskola. (2018). Diverse utdrag Bärande konstruktioner (BMT016, BOM580) 2018. Göteborg, Västra Götalands län, Sverige.
- Chen, W.-F., & Duan, L. (Eds.). (2013). *Bridge Engineering Handbook* (Second ed.). Taylor & Francis group.
- Göteborgs stad. (2014). *Detaljplan för Gator inom Backaplansområdet i Göteborg*. Göteborg: Göteborgs stad.
- Göteborgs stad. (2016a). *Detaljplan för gator vid Backaplan inom stadsdelen Backa i Göteborg*. (1044/12, Red.) Hämtat från [https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/Backaplan%20-%20detaljplan%20%3A%20Gator%20inom%20Backaplan-Plan%20-%20laga%20kraft-Planhandling/\\$File/H5350.pdf?OpenElement](https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/Backaplan%20-%20detaljplan%20%3A%20Gator%20inom%20Backaplan-Plan%20-%20laga%20kraft-Planhandling/$File/H5350.pdf?OpenElement)
- Göteborgs stad. (2016b). *Program för Backaplan*. Diarienummer: 0802/14. Hämtat från [https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/Backaplan%20-%20Program%20f%C3%B6r%20Backaplan-Program%20-%20inf%C3%B6r%20godk%C3%A4nnande-Stadsbyggnadsstudie%20Backaplan-Brunnsbo/\\$File/06%20Stadsbyggnadsstudie%20Backaplan%2](https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/Backaplan%20-%20Program%20f%C3%B6r%20Backaplan-Program%20-%20inf%C3%B6r%20godk%C3%A4nnande-Stadsbyggnadsstudie%20Backaplan-Brunnsbo/$File/06%20Stadsbyggnadsstudie%20Backaplan%2)
- Göteborgs stad. (2019). *Program för Backaplan*. Diarienummer: 0698/16. Hämtat från [https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/Backaplan%20-%20Program%20f%C3%B6r%20Backaplan-Program%20-%20inf%C3%B6r%20godk%C3%A4nnande-Programhandling/\\$File/01.%20Ny_Programhandling.pdf?OpenElement](https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/Backaplan%20-%20Program%20f%C3%B6r%20Backaplan-Program%20-%20inf%C3%B6r%20godk%C3%A4nnande-Programhandling/$File/01.%20Ny_Programhandling.pdf?OpenElement)

- Göteborgs stad. (2021a). *Trafikmängder på olika gator*. Hämtat från <https://goteborg.se/wps/portal/start/gator-vagar-och-torg/gator-och-vagar/statistik-om-trafiken/trafikmangder-pa-olika?uri=gbglnk%3Agbg.page.9e45336d-a23b-46f5-92e6-e556814192c0>
- Göteborgs stad. (2021b). *Rain Gothenburg*. Hämtat från <https://stadsutveckling.goteborg.se/rain-gothenburg/>
- Jernkontoret. (2018). *Korrosionshårdighet*. Hämtat från <https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/slutprodukter-av-stal/korrosion/>
- Klotter konsulten. (u.å.). *Betongimpregnering*. Hämtat från <https://klotterkonsulten.se/tjanster/impregnering/betongimpregnering/>
- Libert, J.-P., & Hirt, M. (2013). *Steel bridges*. Switzerland: EPEL Press.
- Maccarini Vefago, L., & Avellaneda, J. (2013). *Resources, Conservation and Recycling. Sciencedirect*. (72).
doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.015>
- Mürmann. (u.å.). Mconnect. Wittenburg, Tyskland.
- Nationalencyklopedin. (u.å.a). *Armerad betong*. Hämtat från Nationalencyklopedin:
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/armerad-betong>
- Nationalencyklopedin. (u.å.b). *Brotyper*. Hämtat från Nationalencyklopedin:
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/bro/brotyper>
- Saferoad. (u.å.). *Birista 3P*. Hämtat från https://www.saferoad.se/contentassets/3c4345424bdf4d9db03ebf9924ff73e1/birista3p_h3b_productsheet.pdf
- SS-EN 1990. (den 28 06 2002). *Eurokod - Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk*. Hämtat från <https://enav.sis.se/sv/Standard/?std=STD-SS-EN-1993-1-1>.
- SS-EN 1993-1-1. (den 21 10 2009). *Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader*. Hämtat från <https://enav.sis.se/sv/Standard/?std=STD-8013745>
- SS-EN 1994-2. (den 21 10 2005). *Eurokod 4 - Dimensionering av samverkanskonstruktioner i stål och betong - Del 2: Broar*. Hämtat från <https://enav.sis.se/sv/Standard/?std=STD-68884>
- Stålbyggnadsinstitutet. (2021). *Rostskydd*. Hämtat från <https://www.sbi.se/rostskydd-2/>
- SVEVIA. (u.å.a). *Brounderhåll i vänesbrog*. Hämtat från <https://www.svevia.se/gemensamma-sidor/projekt/broar/brounderhall-vanersborg.html>
- SVEVIA. (u.å.b). *Bro- och betongunderhåll*. Hämtat från <https://www.svevia.se/stat--kommun/startside---stat--kommun/dina-behov/vagunderhall/brounderhall.html>
- Trafikverket. (2008). *Batman: Kodförteckning och beskrivning av brotyper*. Hämtat från https://batmanhandbok.trafikverket.se/dokument/Bro_konstruktionstyper/

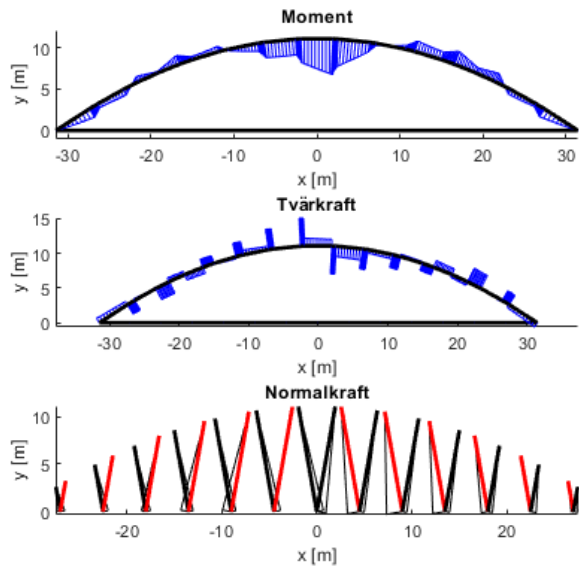
- Trafikverket. (2014). *Krav på inspektion av byggnadsverk*. Hämtat från <https://batman.trafikverket.se/batinfo/Batman/Biblioteket/Dokument/Krav%20Insp%20Byggnadsverk%20inkl%20Beslut.pdf>
- Trafikverket. (2018). *Broprojekteringshandbok Förhandsutgåva*.
- Trafikverket. (2019a). *Krav Brobyggande*.
- Trafikverket. (2019b). *Råd Brobyggande*.
- TräGuiden. (2015a). *Balkbroar*. Hämtat från <https://www.traguiden.se/planering/planera-ett-trabygge/trabroar/trabroar/balkbroar/>
- TräGuiden. (2015b). *Bågbroar*. Hämtat från <https://www.traguiden.se/planering/planera-ett-trabygge/trabroar/trabroar/bagbroar/>
- TräGuiden. (2015c). *Hängverks- och sprängverksbro*. Hämtat från <https://www.traguiden.se/planering/planera-ett-trabygge/trabroar/trabroar/hangverks--och-sprangverksbroar/>
- TräGuiden. (2018). *Inspektion och underhåll*. Hämtat från <https://www.traguiden.se/planering/planera-ett-trabygge/trabroar/trabroar/inspektion-och-underhall/>
- Vägverket. (2003). *Brobyggnad - kvalitet i byggskedet*. Hämtat från https://www.trafikverket.se/contentassets/ae26c562046a410c8611b1bce0f15631/filer/2003_45_brobyggnad_kvalitet_byggskedet_vagverket_del_1av4.pdf

Bilaga I

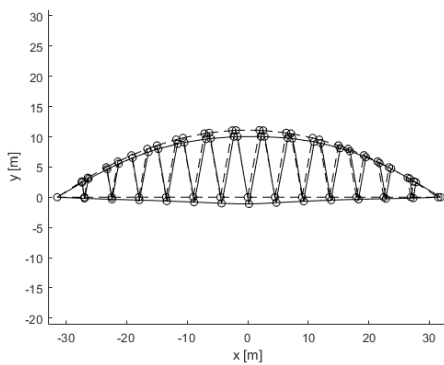
Global modell av bärverket

Den globala modellen av bärverket är en beräkningsmodell som används för att bestämma krafter i båge, dragband och hängstag. Den globala modellen belastar bågen och dragbandet med en jämnt utbredd egenvikt och belastar bärverket med yttre punktlaster som leds från tvärbalkar. Dragbandet antas endast bära konstruktionen i stångverkan, men kontrolleras med balkverkan för dragbandets dimensionering. Beräkningar i Bilaga I görs i MATLAB med programmet CALFEM. Textfiler som hämtas i Matlab-scriptet finns under scriptet.

Figur 1 visar diagram över moment och tvärkraft i bågen då punktlasten i LM1 placeras i centrumnoden ($x=0$). Diagram över normalkraft visar hängstag i tryck (röda) och hängstag i drag (svarta). Diagrammet används för att bedöma vilka hängstag som ska försummas i beräkningen. Figur 2 visar nodförskjutningar i större skala i beräkningsmodellen vid samma lastförutsättningar som figur 1.



Figur 1 Moment, Tvärkraft, Normalkraft



Figur 2 Nodförskjutningar

```

load Noderparabel.txt
load Element.txt
Nodes=Noderparabel;
Elements=Element;

%Indata
tf=36e-3;
tw=19e-3;
B=800e-3;
H=1200e-3;
t=30e-3;
h=400e-3;
b=800e-3;
D1=90e-3;
Iy_drag=tw*(H-tf)^3/12+2*((B*tf^3/12)+2*(tf*B)*(H-tf)^2/2);
Iz_bow=t*b^3/6+t*b^2*h/2;
A_drag=tf*B*2+tw*H-2*tw;
A_bow=b*h-((h-2*t)*(b-2*t));
A_bar=pi*D1^2/4;
Es=210e9;

```

```

% Element properties för olika delar i bågen
Ep_drag=[Es A_drag Iy_drag/1e10]; %Yttröghetsmomentet för dragbandet försummas då
balkverkan försummas enligt förenklingar beskrivna i rapporten
Ep_bow=[Es A_bow Iz_bow];
Ep_bar=[Es A_bar];

%Skapar Ex och Ey
for i=1:length(Element)
    for j=1:2
        Ex(i,j)=Nodes(Elements(i,j+1),1); %[m]
        Ey(i,j)=Nodes(Elements(i,j+1),2); %[m]
    end
end

%Skapar en matris [n, 3] som ger varje nod 3 frihetsgrader
dofs=zeros(length(Nodes),3);

for i=1:length(dofs)
    %ger första frihetsgraden till nod "i"
    dofs(i,1)=3*i-2;
    %ger andra frihetsgraden till nod "i"
    dofs(i,2)=3*i-1;
    %ger tredje frihetsgraden till nod "i"
    dofs(i,3)=3*i;
end

%Topologimatrix endast för balkelement
for i=1:41
    %fyller första kolumnen med elementnumret
    Edofb(i,1)=i;

    %Hämtar frihetsgrader för kolumner 2-4 från frihetsgradsmatrisen genom
    %att ur Elements hämta de noder som tillhör varje element
    Edofb(i,2)=dofs(Elements(i,2),1);
    Edofb(i,3)=dofs(Elements(i,2),2);
    Edofb(i,4)=dofs(Elements(i,2),3);
    Edofb(i,5)=dofs(Elements(i,3),1);
    Edofb(i,6)=dofs(Elements(i,3),2);
    Edofb(i,7)=dofs(Elements(i,3),3);
end

%Topologimatrix endast för stängelement
for i=1:26
    %fyller första kolumnen med elementnumret
    Edofs(i,1)=i;

    %Hämtar frihetsgrader för kolumner 2-4 från frihetsgradsmatrisen genom
    %att ur Elements hämta de noder som tillhör varje element
    Edofs(i,2)=dofs(Elements(i+41,2),1);
    Edofs(i,3)=dofs(Elements(i+41,2),2);
    Edofs(i,4)=dofs(Elements(i+41,3),1);
    Edofs(i,5)=dofs(Elements(i+41,3),2);
end

%Topologimatrix för alla element
for i=1:67
    %fyller första kolumnen med elementnumret
    Edof(i,1)=i;

```

```

%Hämtar frihetsgrader för kolumner 2-4 från frihetsgradsmatrisen genom
%att ur Elements hämta de noder som tillhör varje element
Edof(i,2)=dofs(Elements(i,2),1);
Edof(i,3)=dofs(Elements(i,2),2);
Edof(i,4)=dofs(Elements(i,2),3);
Edof(i,5)=dofs(Elements(i,3),1);
Edof(i,6)=dofs(Elements(i,3),2);
Edof(i,7)=dofs(Elements(i,3),3);

end

%Skapar global styvhetsmatris fylld med nollor som är storleken av antal frihetsgrader
K=zeros(3*length(dofs),3*length(dofs));
f=zeros(length(K),1);

gs=78.5e3; %N/m3
G_bow=A_bow*gs; %N/m
G_drag=A_drag*gs; %N/m
Eq_drag=[0 -G_drag];
Eq_bow=[0 -G_bow];

%Last från värsta fall i brottsgräns
Qtot=1.6352e6; %N
%Last från värsta fall i bruksgräns
%Qtot=8.6876e5; %N

%Permanent last i värsta fall i brottsgräns
QG=4.6232e+05;
%Permanent last i värsta fall i bruksgräns
%QG=5.3052e+05;

for j=1:1
    %Skapar global styvhetsmatris fylld med nollor som är storleken av antal
    frihetsgrader
    K=zeros(3*length(dofs),3*length(dofs));
    f=zeros(length(K),1);

    %Lägger permanent last på noder
    for i=1:14
        f(Edofb(i,3))=-QG;
        f(Edofb(i,6))=-QG;
    end

    %f(Edofb(j,3))=-Qtot;
    %f(23)=-Qtot;

    %Randvillkor
    bc=[1 0; 2 0; 44 0];

    %Assemfunktioner
    for i=1:14
        [ke, fe]=beam2e(Ex(i,:),Ey(i,:),Ep_drag,Eq_drag);
        [K, f]=assem(Edofb(i,:),K,ke, f, fe);
    end
    for i=15:41
        [ke, fe]=beam2e(Ex(i,:),Ey(i,:),Ep_bow,Eq_bow);
        [K, f]=assem(Edofb(i,:),K,ke, f, fe);
    end

    %if-satsen används för att försumma hängstag som är belastade med tryckande

```

```

normalkraft
for i=42:67
    if i==00
        Ke=bar2e(Ex(i,:),Ey(i,:),[1e-10 A_bar]);
        K=assem(Edofs(i-41,:),K,Ke);
    else
        Ke=bar2e(Ex(i,:),Ey(i,:),Ep_bar);
        K=assem(Edofs(i-41,:),K,Ke);
    end
end

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

%Hämtar matriser med elementförskjutningar i balkar och stänger
Edb=extract(Edofb,a);
Eds=extract(Edofs,a);

n=10;
M=zeros(n,3);
V=zeros(n,3);
N=zeros(1,3);

for i=1:length(Element)

    if i <= 14
        [esb,edi,eci]=beam2s(Ex(i,:),Ey(i,:),Ep_drag,Edb(i,:),Eq_drag,n);
        M(:,i)=esb(:,3);
        V(:,i)=esb(:,2);
        N(1,i)=esb(1,1);
    elseif i >= 42
        es=bar2s(Ex(i,:),Ey(i,:),Ep_bar,Eds(i-41,:));
        N(:,i)=es;
    else
        [esb,edi,eci]=beam2s(Ex(i,:),Ey(i,:),Ep_bow,Edb(i,:),Eq_bow,n);
        M(:,i)=esb(:,3);
        V(:,i)=esb(:,2);
        N(1,i)=esb(1,1);
    end
end

% Plot över moment
subplot(3,1,1)
title('Moment')

for i=1:41
    eldia2(Ex(i,:),Ey(i,:),M(:,i),[2 1],1e-6);
end

%Plot över Tvärkraft
subplot(3,1,2)
title('Tvärkraft')
for i=1:41
    eldia2(Ex(i,:),Ey(i,:),V(:,i),[2 1],8e-6);
end

%Plot över Normalkraft
subplot(3,1,3)
title('Normalkraft')
for i=42:length(Element)

```

```

if N(1,i)<1
plotpar=[1 4];
elseif N(1,i)>1
plotpar=[1 1];
end
eldia2(Ex(i,:),Ey(i,:),N(:,i),plotpar,1e-6);
end

% %Rita odeformerad båge
% eldraw2(Ex,Ey,[1 1 1]);
% xlabel('x [m]');
% ylabel('y [m]');
% xlim([-33 33]);
% ylim([-5 20]);
%
% %Rita deformerad båge
% Ed=extract(Edof(:,:),a);
% plotpar=[1, 1, 1];
% eldisp2(Ex,Ey,Ed,plotpar)
% xlabel('x [mm]')
% ylabel('y [mm]')

for k=1:14
dragbandsnoder(k,1)=Edofb(k,3);
end

p1=a(dragbandsnoder);
amax(j)=min(p1);
Mmax=max(abs(M(:)));
Vmax=max(abs(V(:)));
Nmax=max(abs(N(15:41)));
Maxnormalkraft(j,1)=Nmax;
end

```

```

% Element.txt
%(nod 1-15 brobana) (nod 16-42 båge) (element 1-41 balk) (element 42-67 stång)
%nr    nod1    nod2
1      1      2
2      2      3
3      3      4
4      4      5
5      5      6
6      6      7
7      7      8
8      8      9
9      9      10
10     10     11
11     11     12
12     12     13
13     13     14
14     14     15
15     1      16
16     16     17
17     17     18
18     18     19
19     19     20
20     20     21
21     21     22
22     22     23
23     23     24
24     24     25
25     25     26

```

26	26	27
27	27	28
28	28	29
29	29	30
30	30	31
31	31	32
32	32	33
33	33	34
34	34	35
35	35	36
36	36	37
37	37	38
38	38	39
39	39	40
40	40	41
41	41	15
42	2	16
43	2	17
44	3	18
45	3	19
46	4	20
47	4	21
48	5	22
49	5	23
50	6	24
51	6	25
52	7	26
53	7	27
54	8	28
55	8	29
56	9	30
57	9	31
58	10	32
59	10	33
60	11	34
61	11	35
62	12	36
63	12	37
64	13	38
65	13	39
66	14	40
67	14	41

% Noderparabel.txt

% xcoord [m]	ycoord [m]
-31.5	0
-27	0
-22.5	0
-18	0
-13.5	0
-9	0
-4.5	0
0	0
4.5	0
9	0
13.5	0
18	0
22.5	0
27	0
31.5	0
-27.457	2.608
-26.433	3.230
-23.368	4.950
-21.462	5.914
-19.218	6.943
-16.596	8.002
-15.003	8.570
-11.827	9.532
-10.722	9.814

-7.151	10.536
-6.369	10.656
-2.562	11.043
-1.943	11.075
1.943	11.075
2.562	11.043
6.369	10.656
7.151	10.536
10.722	9.814
11.827	9.532
15.003	8.570
16.596	8.002
19.218	6.943
21.462	5.914
23.368	4.950
26.433	3.230
27.457	2.608

Bilaga II

Dimensionerande laster i bruks- och brottsgränstillstånd

Beräkning för vilken modell för dimensionerande laster av ekvation 1 och 2 som ska användas för brottsgränstillstånd. Värdet på ekvation 4 som används för bruksgränstillstånd i reversibelt tillstånd.

%Beräkna vilka ekvationer som ska användas i bruksgräns och brottgräns

%Karakteristiska värden för egentyngd

%tvärbalk HEM1000

psta1=78.5e3; %tunghet stål [N/m³]

At=0.04442; %[m²] hämtat från diverse utdrag

Gbalk=At*psta1; %egentyngd tvärbalk [N/m]

%betongplatta

hb=0.4; %[m]

b=4.5; %[m]

pbetong=25e3; %tunghet betong [N/m³]

Gbtg=hb*b*pbetong; %egentyngd betongplatta [N/m]

%beläggning

hbe=0.05; %[m]

pbel=23e3; %[N/m³]

Gbel=hbe*b*pbel; %[tunghet beläggning [N/m³]

Gk=Gbtg+Gbel+Gbalk %[N/m³]

%karakteristiska värden för trafiklast (LM1)

%punktlaster

alpha_Q1=0.9;

alpha_Q2=0.9;

alpha_Q3=0;

TS1=600e+3; %[N]

TS2=400e+3; %[N]

TS3=200e+3; %[N]

%[kN]

Q1k=alpha_Q1*TS1; %Svensk standard centrisk last mellan axlarna

Q2k=alpha_Q2*TS2;

Q3k=alpha_Q3*TS3;

psi0_boggie=0.75;

%utbredda laster

alpha_q1=0.8; %svenska förhållanden

alpha_q2=1; %svenska förhållanden

alpha_q3=1; %svenska förhållanden

UDL1=9e+3; %[N/m²]

UDL2=2.5e+3; %[N/m²]

q1k=alpha_q1*UDL1; %[Pa]

q2k=alpha_q2*UDL2; %[Pa]

q3k=alpha_q3*UDL2; %[Pa]

psi0_utb=0.4;

zeta=0.85;

```

gammaq=1.35;

% 6.10a
lm1a=1.35*Gk+gammaq*psi0_boggie*(Q1k+Q2k)+gammaq*psi0_utb*(q1k+q2k)

% 6.10b
lm1b=gammaq*zeta*Gk+gammaq*Q1k+gammaq*psi0_boggie*Q2k+gammaq*q1k+gammaq*psi0_utb*q2k

if lm1a>lm1b
disp('Ekvation 6.10a är dimensionerande [N]')
else
disp('Ekvation 6.10b är dimensionerande [N]')
end

```

G_k =

5.3662e+04

l_{m1a} =

9.8893e+05

l_{m1b} =

1.1661e+06

Ekvation 6.10b är dimensionerande [N]

```

clc
% den frekventa kombinationen tillämpas normalt för reversibelt
% tillstånd alltså ekv b tillämpas
psi1_boggie=0.75;
psi1_utb=0.4;

lm15b=Gk+psi1_boggie*Q1k+psi1_utb*q1k % [N]

```

l_{m15b} =

4.6154e+05

Bilaga III

Dimensionerande krafter och nedböjning för tvärbalk

Dimensionerande tvärkraft, moment och normalkraft tas fram med hjälp av brukslast och brottlast. Vid beräkning av maximalnedböjning används bruksgänstillstånd. För att kontrollera beräkningarna i CALFEM jämförs resultatet från elemetarfall för fritt upplagd balk.

Brottgräns

```
% moment och nedböjning tvärbalk för en funicular bow i brottgräns
clear all
close all
clc
L_btg=17; % längd brobanan [m]
L=17.78; % längd tvärbalk [m]
Lcc=4.5; % cc mått tvärbalkar [m]
Lz=3; % längd på lastfält [m]

%tvärbalk HEM1000

pstal=78.5e3; %tunghet stål [N/m^3]
It=0.1572; %tröghetsmoment samverkan platta och balk [m^4]
Et=30e9; %modul betong
At=0.04442; %[m^2] hämtat från diverse utdrag
Gbalk=At*pstal; %egentyngd tvärbalk [N/m]
ep=[Et At It]; % element egenskaper

%betongplatta
hb=0.4; %höjd [m]
pbetong=25e3; %tunghet betong [N/m^3]
Gbtg=hb*Lcc*pbetong; %egentyngd betongplatta

%beläggning
hbe=0.05; %[m]
pbel=23e3; %[N/m^3]
Gbel=hbe*Lcc*pbel; %tunghet beläggning [N/m^3]

%lastkombinationer brottgräns

zeta=0.85; %SS1990 tab A2.1
psi0_boggie=0.75; %SS1990 tab A2.4(B)
psi0_utb=0.4;
gammaG=1.35; %konstant för ogynnsam inverkan
gammaQ=1.35; %konstant för ogynnsam inverkan

Gtot=(Gbalk+Gbtg+Gbel)*gammaG*zeta; %egentyngd tot [N/m]
q1=7.2e3*Lcc*gammaQ*psi0_utb; %utbredd last lastfält 1 [N/m]
q2=2.5e3*Lcc*gammaQ*psi0_utb; %utbredd last resterande lastfält [N/m]

P1=540e+3*gammaQ; %boggielast lastfält 1 [N]
P2=360e+3*gammaQ*psi0_boggie; %boggielast lastfält 2 [N]

%definerar element och dess placering
x1=linspace(0,0.37,2);
x2=linspace(0.37,1.37,2);
x3=linspace(1.37,16.37,11);
x4=linspace(16.37,17.37,2);
x5=linspace(17.37,17.78,2);

ex(1,:)=[x1(1) x1(2)];
ex(2,:)=[x2(1) x2(2)];
ex(13,:)=[x4(1) x4(2)];
ex(14,:)=[x5(1) x5(2)];
```

```

for i=3:12
    ex(i,:)=x3(i-2) x3(i-1)];
end

ey=zeros(14,2);

%initerar loop för Topologimatrix
Edof(1,:)=1 1 2 3 4 5 6];
for i=2:14
    Edof(i,:)=i Edof(i-1,5) Edof(i-1,6) Edof(i-1,7) 3*i+1 3*i+2 3*i+3];
end

% K-matrix
K=zeros(45);

% ansätter laster för maximal nedböjning
f=zeros(45,1);

f(23)=-P1;    %värsta lastfall för nedböjning
f(17)=-P2;    %värsta lastfall för nedböjning
%f(5)=-P1;    %värsta lastfältet för tvärkraft
%f(8)=-P2;    %nästa värsta lastfältet för tvärkraft

eqy=[0; -(Gtot+q2); -(Gtot+q2); -(Gtot+q2);
      -(Gtot+q2); -(Gtot+q2); -(Gtot+q1); -(Gtot+q1);
      -(Gtot+q2); -(Gtot+q2); -(Gtot+q2); -(Gtot+q2); -(Gtot+q2); 0];

eqx=zeros(14,1);

eq=[eqx eqy]; % utbredda lastmatrisen
bc=[ 1 0; 2 0; 43 0; 44 0]; %randvillkor

for i=1:14
    [Ke, fe]=beam2e(ex(i,:), ey(i,:), ep, eq(i,:));
    [K, f]=assem(Edof(i,:), K, Ke, f, fe);
end

%beräkning av förskjutning av element samt plot
[a, r]=solveq(K, f, bc);
Ed=extract(Edof, a);
eldraw2(ex, ey, [1, 2, 2]);
eldisp2(ex, ey, Ed, [1, 2, 2]);

%moment, tvärkraft och normalkraft
n=100;
M=zeros(n, 3);
for i=1:14
    [es, edi, eci]=beam2s(ex(i,:), ey(i,:), ep, Ed(i,:), eq(i,:), n);

    N(:, i)=es(:, 1);
    V(:, i)=es(:, 2);
    M(:, i)=es(:, 3);

end

figure(2)
subplot(2, 2, 1)

```

```

plotpar2=[2,1];
sfac2=[0.0000005];
ylabel(' [N/m] ');
xlabel(' [m] ');

for i=1:14
    eldia2(ex(i,:),ey(i,:),M(:,i),plotpar2,sfac2);
end

subplot(2,2,2)
plotpar3=[2,1];
ylabel(' [N] ');
xlabel(' [m] ');
sfac3=[0.000005];
for i=1:14
    eldia2(ex(i,:),ey(i,:),V(:,i),plotpar3,sfac3);
end

%max nedböjning och moment i brottgränstillstånd
amax=a(23)
M1=abs(max(M(:)))
V1=abs(max(V(:)))
N1=abs(max(N(:)))

```

amax =

-0.0452

M1 =

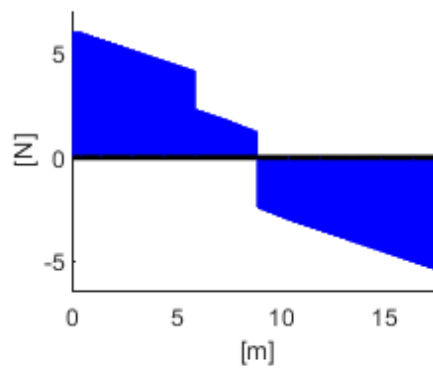
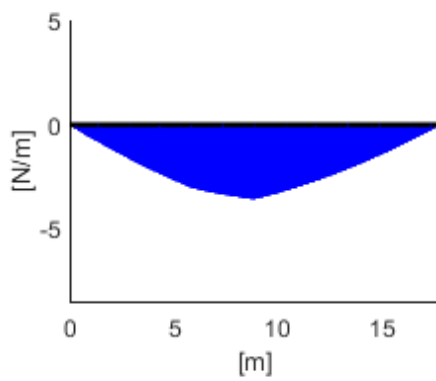
7.1202e+06

V1 =

1.0749e+06

N1 =

0



Bruksgräns

```

% moment och nedböjning tvärbalk för en funicular bow i bruksgräns
clear all
close all
clc

L=17.78; %m
Lcc=4.5; %m
Lz=3; %m

%tvärbalk HEM1000
pstal=78.5e3; %tunghet stål [N/m^3]
It=0.1572; %tröghetsmoment samverkan platta och balk [m^4]
Et=30e9; %emodul betong
At=0.04442; %m^2 hämtat från diverse utdrag
Gbalk=At*pstal; %egentyngd tvärbalk [N/m]
ep=[Et At It]; % element egenskaper
%betongplatta
hb=0.4; %[m]
pbetong=25e3; %tunget betong [N/m^3]
Gbtg=hb*Lcc*pbetong; %egentyngd betongplatta

%beläggning
hbe=0.05; %[m]

```

```

pbel=23e3;          %[m]
Gbel=hbe*Lcc*pbel;%[tunghet belaggning [N/m^3]

%konstanter för lastfall
psi0_boggie=0.75;          %SS1990 Tabell A2.1
psi1_utb=0.40;           %SS1990 Tabell A2.1

%lastkombinationer

Gtot_bruk=Gbalk+Gbtg+Gbel;          %egentyngd tot [N/m]

q_bruk=7.2e3*Lcc*psi1_utb;          %utbredd last lastfält 1 [N/m]

P1=540e3*psi0_boggie;          %boggielast lastfält 1 [N]

%definerar element och dess placering
x1=linspace(0,0.37,2);
x2=linspace(0.37,1.37,2);
x3=linspace(1.37,16.37,11);
x4=linspace(16.37,17.37,2);
x5=linspace(17.37,17.78,2);

ex(1,:)=[x1(1) x1(2)];
ex(2,:)=[x2(1) x2(2)];
ex(13,:)=[x4(1) x4(2)];
ex(14,:)=[x5(1) x5(2)];

for i=3:12
    ex(i,:)=[x3(i-2) x3(i-1)];
end

ey=zeros(14,2);

%initerar loop för Topologimatrix
Edof(1,:)=[1 1 2 3 4 5 6];
for i=2:14
    Edof(i,:)=[i Edof(i-1,5) Edof(i-1,6) Edof(i-1,7) 3*i+1 3*i+2 3*i+3];
end

% K-matrix
K=zeros(45);

% ansätter laster för maximal nedböjning
f=zeros(45,1);

f(23)=-P1;          %värsta lastfältet

eqy=[0;-(Gtot_bruk);-(Gtot_bruk);-(Gtot_bruk);-(Gtot_bruk);
      -(Gtot_bruk);-(Gtot_bruk+q_bruk);-(Gtot_bruk+q_bruk);-(Gtot_bruk);
      -(Gtot_bruk);-(Gtot_bruk);-(Gtot_bruk);-(Gtot_bruk);0];

eqx=zeros(14,1);

eq=[eqx eqy];          % utbredda lastmatrisen
bc=[ 1 0; 2 0; 43 0; 44 0]; % randvillkor

```



```

for i=1:14
    [ke, fe]=beam2e(ex(i,:),ey(i,:),ep,eq(i,:));
    [K, f]=assem(Edof(i,:),K,ke, f, fe);
end

%beräkning av förskjutning av element samt plot
[a, r]=solveq(K, f, bc);
Ed=extract(Edof, a);
eldraw2(ex, ey, [1, 2, 2]);
eldisp2(ex, ey, Ed, [1, 2, 2]);

%moment, tvärkraft och normalkraft
n=100;
M=zeros(n, 3);
for i=1:14
    [es, edi, eci]=beam2s(ex(i,:),ey(i,:),ep,Ed(i,:),eq(i,:),n);

    N(:, i)=es(:, 1);
    V(:, i)=es(:, 2);
    M(:, i)=es(:, 3);

end

figure(2)
subplot(2, 2, 1)
plotpar2=[2, 1];
sfac2=[0.0000005];
ylabel(' [N/m] ');
xlabel(' [m] ');

for i=1:14
    eldia2(ex(i,:),ey(i,:),M(:, i), plotpar2, sfac2);
end

subplot(2, 2, 2)
plotpar3=[2, 1];
ylabel(' [N] ');
xlabel(' [m] ');
sfac3=[0.000005];
for i=1:14
    eldia2(ex(i,:),ey(i,:),V(:, i), plotpar3, sfac3);
end

%max nedböjning och moment i brottgränstillstånd
amax=max(abs(a))
M1=abs(max(M(:)))
V1=abs(max(V(:)))
N1=abs(max(N(:)))
a(23)

```

amax =

0.0258

M1 =

4.0749e+06

v1 =

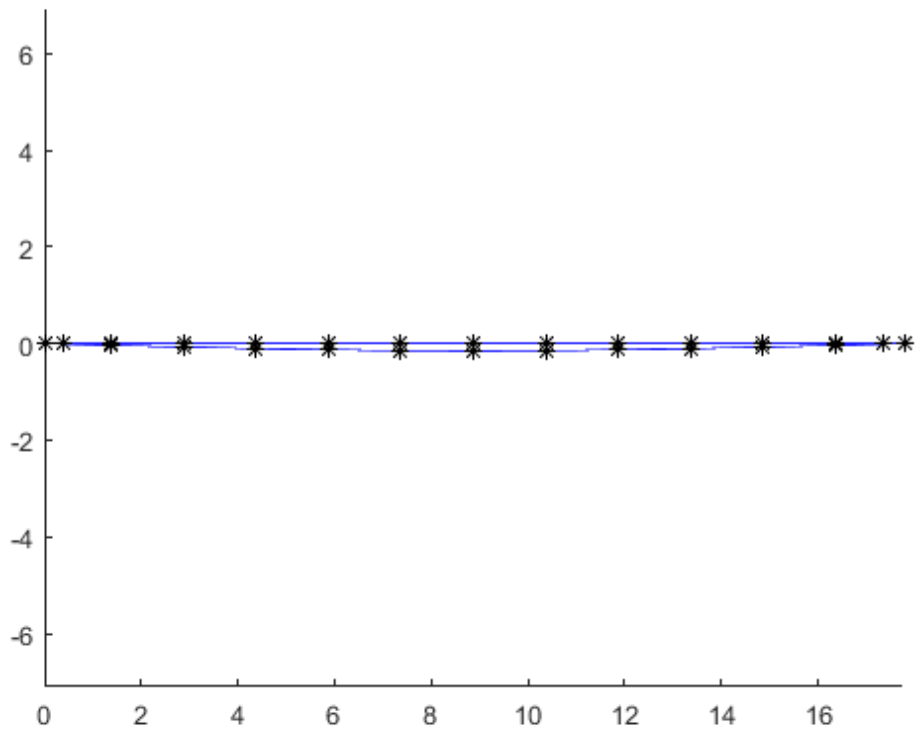
6.7654e+05

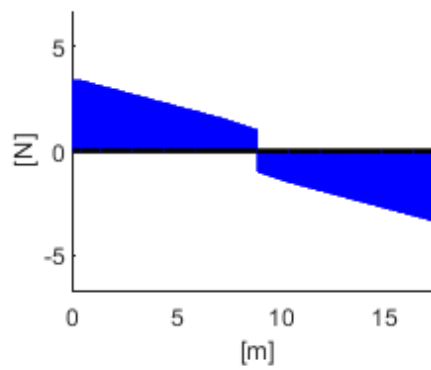
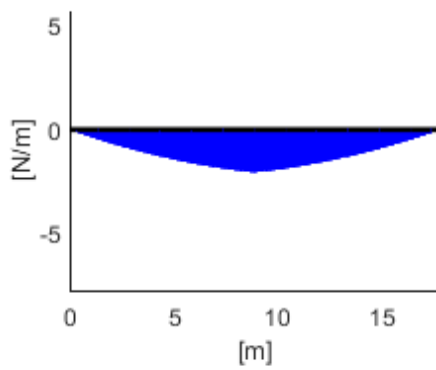
N1 =

0

ans =

-0.0258





Kontroll med elementarfall

```

clear all
clc
I=0.1572; % HEM1000+betongplattan
E=30e9;
%laster och dim
q1=7.2e3*4.5;
q2=2.5e3*4.5;
g_btg=45e3;
g_balk=1.83e3;

P1=540e+3;
P2=360e+3;

L=17.78;

a=L/2-3;
b=L/2+3;

P3=(q1-q2)*3; %gör om utbredda lasten till punktlast

%fritt upplagd

R1_m=P1/2+P3/2+P2*(b/L)+(g_btg+g_balk+q2)*L/2

```

```

R2_m=P1/2+P3/2+P2*(a/L)+(g_btg+g_balk+q2)*L/2

p1_m=(P1*L^3)/(48*E*I)+(P3*L^3)/(48*E*I)+P2*(a*L^2)/(48*E*I)*(3-
(4*a^2/L^2))+(g_btg+g_balk+q2)*5*L^4/(384*E*I)

% Fritt upplagd maxlast i änden

a2=1.5; %m
b2=17.78-a2;
a21=4.5;
b21=17.78-4.5;

R1_tv=(b2*(P1+P3))/L+P2*b21/L+(g_btg+g_balk+q2)*L/2

R2_tv=(a2*(P1+P3))/L+P2*a21/L+(g_btg+g_balk+q2)*L/2

jamvk2=R1_tv+R2_tv-P1-P3-P2-L*(+g_btg+g_balk+q2) %kontroll med jämvikt

```

Bilaga IV

Preliminär dimensionering av dragband

De dimensionerande krafterna från globala analysen hämtas och de antagna tvärsnittsmåtten för dragbandet kontrolleras mot skjuvbuckling, tvärkraftskapacitet, momentkapacitet och normalkraftskapacitet. Kontroll av interaktionsbehov mellan moment och tvärkraft kontrolleras.

Tvärsnittsmått

$$t_f := 0.036 \text{ m}$$

$$b_f := 0.8 \text{ m}$$

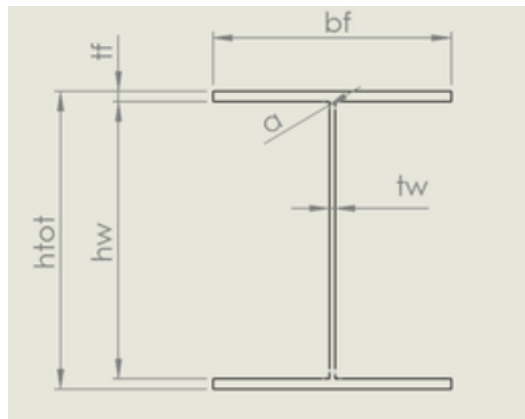
$$h_w := 1.128 \text{ m}$$

$$h_{tot} := 1.2 \text{ m}$$

$$t_w := 0.019 \text{ m}$$

$$A_{tot} := 2 \cdot b_f \cdot t_f + h_w \cdot t_w = 0.079 \text{ m}^2$$

$$A_{fläns} := 2 \cdot b_f \cdot t_f = 0.058 \text{ m}^2$$



Materialdata

$$f_y := 355 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$I_{y_dragband} := \frac{(t_w \cdot h_w^3)}{12} + 2 \cdot \left(\left(\frac{(b_f \cdot t_f^3)}{12} \right) + A_{fläns} \cdot \left(\frac{h_{tot}}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 \right) = 0.041 \text{ m}^4$$

$$I_{y_fläns} := 2 \cdot \left(\left(\frac{(b_f \cdot t_f^3)}{12} \right) + A_{fläns} \cdot \left(\frac{h_{tot}}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 \right) = 0.039 \text{ m}^4$$

Dimensionerande laster

$$M_{ed} := 6.2136 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Hämtad från global analys bilaga 1

$$V_{ed} := 7.3402 \cdot 10^5 \text{ N}$$

Hämtad från global analys bilaga 1

$$N_{ed} := 1.9017 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Hämtad från global analys bilaga 1

Kontroll momentkapacitet

$$a := 0.011 \text{ m}$$

mått för svets

$$a_{horisontell} := \frac{a}{2\sqrt{2}} = 0.008 \text{ m}$$

mått för svets

$$\varepsilon := 0.81$$

Bärande konstruktioner Tabell S4.2

Kontroll av tvärsnittsklasser för liv och fläns, beräknat enligt bärande konstruktioner S4.3

Kontroll för livet

$$\begin{array}{l} \text{if } \frac{(h_w - 2 \cdot a_{\text{horisontell}})}{t_w} < 72 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \text{“Livet är i tvärsnittsklass 1”} \\ \text{else if } \frac{(h_w - 2 \cdot a_{\text{horisontell}})}{t_w} < 83 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \text{“Livet är i tvärsnittsklass 2”} \\ \text{else if } \frac{(h_w - 2 \cdot a_{\text{horisontell}})}{t_w} < 124 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \text{“Livet är i tvärsnittsklass 3”} \end{array} \quad = \text{“Livet är i tvärsnittsklass 2”}$$

Kontroll för flänsen

$$\begin{array}{l} \text{if } \frac{\left(\frac{b_f}{2} - \frac{t_w}{2} - a_{\text{horisontell}}\right)}{t_f} < 9 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \text{“Flänsarna är i tvärsnittsklass 1”} \\ \text{else if } \frac{\left(\frac{b_f}{2} - \frac{t_w}{2} - a_{\text{horisontell}}\right)}{t_f} < 10 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \text{“Flänsarna är i tvärsnittsklass 2”} \\ \text{else if } \frac{\left(\frac{b_f}{2} - \frac{t_w}{2} - a_{\text{horisontell}}\right)}{t_f} < 14 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \text{“Flänsarna är i tvärsnittsklass 3”} \end{array} \quad = \text{“Flänsarna är i tvärsnittsklass 3”}$$

$$W_{el} := \frac{I_{y_dragband}}{h_{tot}} = 0.034 \text{ m}^3$$

Bärande konstruktioner S4-22

$$W_{el_fläns} := \frac{I_{y_fläns}}{h_{tot}} = 0.033 \text{ m}^3$$

Bärande konstruktioner S86

$$W := W_{el} = 0.034 \text{ m}^3$$

för tvärsnittsklass 3

$$M_{rd} := W \cdot f_y = (1.222 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}$$

Momentkapacitet

$$M_{fRd} := W_{el_fläns} \cdot f_y = (1.155 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}$$

Momentkapacitet för flänsen

$$\eta_{moment} := \frac{M_{ed}}{M_{rd}} = 0.509$$

Verkningsgrad moment

Kontroll skjuvbuckling

$$n := 1.2$$

$$a := 4.5 \text{ m}$$

$$d := 1 \text{ m}$$

Avstånd mellan avstyvningarna

Höjd på avstyvningarna

$$\gamma_{M0} := 1.1$$

$$A_v := n \cdot h_w \cdot t_w = 0.026 \text{ m}^2$$

Bärande konstruktioner (S5-18)

Skjuvarean

$$K_t := 5.34 + \frac{4}{\left(\left(\frac{a}{d}\right)^2\right)} = 5.538$$

Bärande konstruktioner S84

$$\text{if } \frac{h_w}{t_w} < \frac{(31 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{K_t})}{n} \quad \left. \begin{array}{l} \text{|| "skjuvbuckling inträffar ej"} \\ \text{else} \\ \text{|| "Behov av kontroll mht skjuvbuckling"} \end{array} \right\} = \text{"Behov av kontroll mht skjuvbuckling"}$$

$$\lambda_w := \frac{\left(\frac{h_w}{t_w}\right)}{(37.4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{K_t})} = 0.833$$

slankhetstal

$$X_w := \frac{0.83}{\lambda_w} = 0.997$$

Skjuvbucklingskoefficienten från tabell S5.1 bärande konstruktioner

$$V_{bwRd} := \frac{(X_w \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y)}{(\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})} = (3.98 \cdot 10^6) \text{ N}$$

Bärande konstruktioner (S5-20)

$$\eta_{tvärkraft} := \frac{V_{ed}}{V_{bwRd}} = 0.184$$

Verkningsgrad tvärkraft

Kontroll av interaktionsbehov

$$\text{if } 0.5 \cdot V_{bwRd} > V_{ed} \quad \left. \begin{array}{l} \text{|| "Inget behov av interaktionsberäkning"} \\ \text{else if } M_{fRd} > M_{ed} \\ \text{|| "Inget behov av interaktionsberäkning"} \\ \text{else} \\ \text{|| "vidare beräkning för interaktion krävs"} \end{array} \right\} = \text{"Inget behov av interaktionsberäkning"}$$

Kontroll för normalkraftskapacitet

$$N_{plRd} := f_y \cdot A_{tot} = (2.806 \cdot 10^7) \text{ N}$$

$$N_{tRd} := N_{plRd}$$

$$\eta_{normalkraft} := \frac{N_{ed}}{N_{tRd}} = 0.068$$

Ingen lokal försvagning finns i konstruktionen

Verkningsgrad normalkraft

Bilaga V

Preliminär dimensionering av bågen

De dimensionerande krafterna från globala analysen (Bilaga I) hämtas och de antagna tvärsnittsmåtten för bågen kontrolleras mot skjuvbuckling, tvärkraftskapacitet, momentkapacitet. Kontroll av genomslag och knäckning genomförs enligt SS-EN 1993-1-1.

Tvärsnittsmått

$$h := 0.8 \text{ m}$$

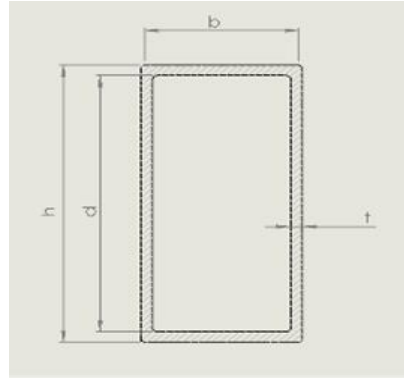
$$b := 0.4 \text{ m}$$

$$t := 0.03 \text{ m}$$

$$d := h - 3 \cdot t = 0.71 \text{ m}$$

$$A := b \cdot h - ((h - 2 \cdot t) \cdot (b - 2 \cdot t)) = 0.068 \text{ m}^2$$

$$L := 63 \text{ m}$$



Materialegenskaper

$$f_{yd} := 355 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

flytgräns

$$E_s := 200 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

Elasticitetsmodul

$$I_y := \frac{(t \cdot h^3)}{6} + \frac{(t \cdot b \cdot h^2)}{2} = 0.006 \text{ m}^4$$

Tröghetsmoment

Dimensionerande krafter

$$M_{ed} := 3075 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Hämtad från global analys bilaga I

$$V_{ed} := 835 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Hämtad från global analys bilaga I

$$N_{ed} := 7316 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Hämtad från global analys bilaga I

Kontroll momentkapacitet

$$XLT := 1$$

Bärande konstruktioner S4.3.2

$$\gamma_{M1} := 1$$

Bärande konstruktioner S4.3.2

$$\varepsilon := 0.81$$

Bärande konstruktioner tabell S4.2

Tvärnittsklasser

if $\frac{(b-3 \cdot t)}{t} < 33 \cdot \epsilon$ “Inre fläns är i tvärnittsklass 1” else if $\frac{(b-3 \cdot t)}{t} < 38 \cdot \epsilon$ “inre fläns är i tvärnittsklass 2” else if $\frac{(b-3 \cdot t)}{t} < 42 \cdot \epsilon$ “Inre fläns är i tvärnittsklass 3”	= “Inre fläns är i tvärnittsklass 1”
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------

if $\frac{d}{t} < 72 \cdot \epsilon$ “Livet är i tvärnittsklass 1” else if $\frac{d}{t} < 83 \cdot \epsilon$ “inre fläns är i tvärnittsklass 2” else if $\frac{d}{t} < 124 \cdot \epsilon$ “Inre fläns är i tvärnittsklass 3”	= “Livet är i tvärnittsklass 1”
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------

$$W_{pl} := t \cdot b \cdot (t + (h - 2 \cdot t)) + \frac{(t \cdot (h - 2 \cdot t)^2)}{2} = 0.017 \text{ m}^3 \quad \text{Bärande konstruktioner (S4-30)}$$

$$W := W_{pl} = 0.017 \text{ m}^3$$

$$M_{bRd} := \frac{(XLT \cdot W \cdot f_{yd})}{\gamma_{M1}} = (6.196 \cdot 10^6) \text{ N} \cdot \text{m} \quad \text{Bärande konstruktioner (S4-41)}$$

$$\eta_{moment} := \frac{M_{ed}}{M_{bRd}} = 0.496 \quad \text{Verkningsgrad moment}$$

Dimensionering för tvärkraft

$$\begin{aligned}\gamma_{M0} &:= 1.1 \\ n &:= 1.2\end{aligned}$$

Kontroll för skjuvbuckling

$$\begin{aligned}\text{if } \frac{(h-2 \cdot t)}{(2 \cdot t)} < 72 \cdot \varepsilon \cdot n & \quad = \text{“Kontroll för skjuvbuckling behövs ej”} \\ \parallel \text{“Kontroll för skjuvbuckling behövs ej”} & \\ \text{else} & \\ \parallel \text{“Kontroll för skjuvbuckling behövs”} & \end{aligned}$$

$$A_v := n \cdot (h - 2 \cdot t) \cdot 2 \cdot t = 0.053 \text{ m}^2$$

$$V_{plRd} := \frac{(A_v \cdot f_{yd})}{(\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})} = (9.927 \cdot 10^6) \text{ N} \quad \text{Bärande konstruktioner (S5-18)}$$

$$\eta_{tvärkraft} := \frac{V_{ed}}{V_{plRd}} = 0.084 \quad \text{Verkningsgrad tvärkraft}$$

Dimensionering av normalkrafter och kontroll för knäckning

$$N_{plRd} := f_{yd} \cdot A = (2.428 \cdot 10^7) \text{ N}$$

$$N_{tRd} := N_{plRd} = (2.428 \cdot 10^7) \text{ N}$$

$$\eta_{normal} := \frac{N_{ed}}{N_{tRd}} = 0.301 \quad \text{Verkningsgrad normalkraft}$$

$$\begin{aligned}s &:= 33.85 \text{ m} && \text{Halva båglängden} \\ \beta &:= 0.41 && \text{Tabell D4 SS1993}\end{aligned}$$

$$N_{cr} := \left(\frac{\pi}{(\beta \cdot s)} \right)^2 \cdot E_s \cdot I_y = (6.559 \cdot 10^7) \text{ N}$$

$$\eta_{buck} := \frac{N_{ed}}{N_{cr}} = 0.112 \quad \text{Verkningsgrad knäckning}$$

$$K := 8 \quad \text{Tabell D5 ss1993}$$

$$\begin{aligned}\text{if } L \cdot \sqrt{\left(\frac{(E_s \cdot A)}{(12 \cdot E_s \cdot I_y)} \right)} > K & \quad = \text{“Genomslag behöver ej kontrolleras”} \\ \parallel \text{“Genomslag behöver ej kontrolleras”} & \\ \text{else} & \\ \parallel \text{“Genomslag i bågar behöver kontrolleras”} & \end{aligned}$$

Bilaga VI

Preliminär dimensionering av tvärbalkar

De dimensionerande krafterna från globala analysen (Bilaga I) hämtas och de antagna tvärsnittsmåtten för bågen kontrolleras mot skjuvbuckling och momentkapacitet. Skjuvförband dimensioneras och den effektiva bredden av samverkan från betongplattan beräknas.

Tvårsnittsmått

$$t_f := 0.04 \text{ m}$$

$$b_f := 0.302 \text{ m}$$

$$h_w := 0.928 \text{ m}$$

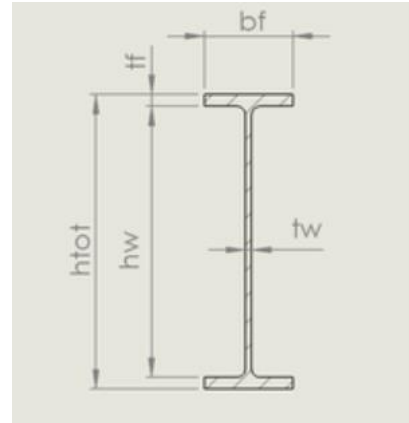
$$h_{tot} := 1.008 \text{ m}$$

$$t_w := 0.021 \text{ m}$$

$$b_{eff} := 4.03 \text{ m}$$

$$h_b := 0.4 \text{ m}$$

Effektiv bredd beräkning på sida 3
höjd betongplatta



Figur 1

Materialdata

$$f_{yd} := 355 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

sträckgräns för stål

$$f_{ck} := 35 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Karakteristiskt värde för betongens cylindertryckhållfasthet

Dimensionerande krafter

$$M_{ed} := 4.0749 \cdot 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Hämtad från bilaga II

$$V_{ed} := 1.0749 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Hämtad från bilaga II

Kontroll momentkapacitet

$$R := 0.03 \text{ m}$$

Radien för valsningen, hämtad från diverse utdrag

$$\varepsilon := 0.81$$

Bärande konstruktioner tabell S4.2

Kontroll av tvärsnittsklasser för liv och fläns, beräknat enligt bärande konstruktioner S4.3

Kontroll för livet

$$\begin{array}{l} \text{if } \frac{(h_w - 2 \cdot R)}{t_w} < 72 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \text{“Livet är i tvärsnittsklass 1”} \\ \text{else if } \frac{(h_w - 2 \cdot R)}{t_w} < 83 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \text{“Livet är i tvärsnittsklass 2”} \\ \text{else if } \frac{(h_w - 2 \cdot R)}{t_w} < 124 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \text{“Livet är i tvärsnittsklass 3”} \end{array} \quad \Bigg| \quad = \text{“Livet är i tvärsnittsklass 1”}$$

Kontroll för flänsen

$$\text{if } \frac{\left(\frac{b_f}{2} - \frac{t_w}{2} - R\right)}{t_f} < 9 \cdot \epsilon = \text{“Flänsarna är i tvärsnittsklass 1”}$$

$$\parallel \text{“Flänsarna är i tvärsnittsklass 1”}$$

$$\text{else if } \frac{\left(\frac{b_f}{2} - \frac{t_w}{2} - R\right)}{t_f} < 10 \cdot \epsilon$$

$$\parallel \text{“Flänsarna är i tvärsnittsklass 2”}$$

$$\text{else if } \frac{\left(\frac{b_f}{2} - \frac{t_w}{2} - R\right)}{t_f} < 14 \cdot \epsilon$$

$$\parallel \text{“Flänsarna är i tvärsnittsklass 3”}$$

Momentkapacitetsberäkning med stelplastikteori pga tvärsnittsklass 1

$$\gamma_{MC} := 1.5$$

$$\alpha_{cc} := 1$$

$$f_{cd} := \frac{(\alpha_{cc} \cdot f_{ck})}{\gamma_{MC}} = (2.333 \cdot 10^7) \text{ Pa}$$

```

65
66 - for XPL=0.4:-0.00001:0
67 -   Ncf=0.85*fcd*beff*XPL;
68 -   if Ncf-2*Nf-Nw < 0.00001
69 -     break
70 -   end
71 - end

```

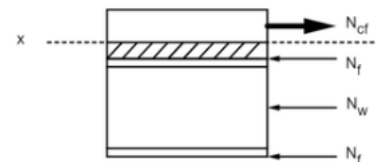
Figur 2

$$XPL := 0.1944 \text{ m}$$

$$N_f := f_{yd} \cdot b_f \cdot t_f = (4.288 \cdot 10^6) \text{ N}$$

$$N_w := f_{yd} \cdot t_w \cdot h_w = (6.918 \cdot 10^6) \text{ N}$$

$$N_{cf} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot XPL = (1.554 \cdot 10^7) \text{ N}$$



Figur 3

Avståndet mellan det plastiska neutrallagret och tryckt kant i betongplattan se figur 2 för iteration

$$h_c := \frac{h_b}{2} - XPL = 0.006 \text{ m}$$

Hävarm från betongspänning till neutrallagret

$$h_l := h_b + t_f + \frac{h_w}{2} - XPL = 0.71 \text{ m}$$

Hävarm från spänningen i livet till neutrallagret

$$h_{f1} := h_b + \frac{t_f}{2} - XPL = 0.226 \text{ m}$$

Hävarm från spänningar i övre fläns till neutrallagret

$$h_{f2} := h_b + t_f + h_w + \frac{t_f}{2} - XPL = 1.194 \text{ m}$$

Hävarm från undre fläns till neutrallagret

$$M_{plRd} := h_c \cdot N_{cf} + N_f \cdot (h_{f1} + h_{f2}) + h_l \cdot N_w = (1.108 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}$$

Dimensionerande plastiskböjmotstånd

$$\eta_{moment} := \frac{M_{ed}}{M_{plRd}} = 0.368$$

Verkningsgrad moment

Dimensionering för tvärkraft

$$\eta_s := 1.2$$
$$\gamma_{M0} := 1.1$$

Antaget då given stålqualität S355
Bärande konstruktioner (S5.3)

$$\text{if } \frac{h_w}{t_w} < \frac{(72 \cdot \varepsilon)}{\eta_s} \quad \left| \begin{array}{l} = \text{“Ingen risk för skjuvbuckling”} \\ \parallel \text{“Ingen risk för skjuvbuckling”} \end{array} \right.$$

else

$$\parallel \text{“Kontroll för skjuvbuckling görs”}$$

$$A_v := \eta_s \cdot h_w \cdot t_w = 0.023 \text{ m}^2 \quad \text{Skjuvarea}$$

$$V_{plRd} := \frac{(A_v \cdot f_{yd})}{(\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3})} = (4.357 \cdot 10^6) \text{ N}$$

$$\eta_{tvärkraft} := \frac{V_{ed}}{V_{plRd}} = 0.247 \quad \text{Verkningsgrad normalkraft}$$

Interaktion mellan moment och tvärkraft

$$M_{fRd} := h_c \cdot N_{cf} + N_f \cdot (h_{f1} + h_{f2}) = (6.173 \cdot 10^6) \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{if } V_{ed} < V_{plRd} \cdot 0.5 \quad \left| \begin{array}{l} = \text{“Interaktionsberäkning är inte nödvändig”} \\ \parallel \text{“Interaktionsberäkning är inte nödvändig”} \end{array} \right.$$

else if $M_{ed} < M_{fRd}$

$$\parallel \text{“Interaktionsberäkning är inte nödvändig”}$$

else

$$\parallel \text{“Interaktionsberäkning är nödvändig”}$$

Beräkning av studs enligt ss1994

Dimensioner

$d := 0.020 \text{ m}$	Skaftdiameter
$h_{studs_min} := 3 \cdot d = 0.06 \text{ m}$	Minsta totalhöjd studs
$h_{studs} := 0.2 \text{ m}$	Antagen totalhöjd studs
$d_{studshuvud_min} := 1.5 \cdot d = 0.03 \text{ m}$	Minsta diameter för studshuvud
$d_{studshuvud} := 0.04 \text{ m}$	Antagen diameter för studshuvud
$h_{studshuvud_min} := 0.4 \cdot d = 0.008 \text{ m}$	Minsta höjd på studshuvud
$h_{studshuvud} := 0.01$	Antagen höjd på studshuvud
$h_{platta} := 0.4 \text{ m}$	höjd betongplatta
$t_f := 0.04 \text{ m}$	
$e_{d_min} := 0.025 \text{ m}$	Minsta avstånd mellan flänskant och studs
$e_d := 0.0285 \text{ m}$	Antaget avstånd från flänskant till studs
$l_{min_tvär} := 2.5 \cdot d = 0.05 \text{ m}$	SS1994 (6.6.5.7)
$l_{min_längs} := 5 \cdot d = 0.1 \text{ m}$	SS1994 (6.6.5.7)
$l_{tvärs} := 0.075 \text{ m}$	Avstånd mellan bultar tvärsgående
$l_{längs} := 0.205 \text{ m}$	Avstånd mellan bultar längsgående

Materialdata

$f_{ck} := 40 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	Betongens karakteristiska cylinderhållfasthet
$f_u := 500 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	Svetsbultens brottgräns
$\gamma_v := 1.25$	Given i SS1994
$E_{cm} := 30 \cdot 10^9 \text{ Pa}$	E-modul betong
$I_{samverkan} := 0.1498 \text{ m}^4$	samverkanströghetsmoment hämtad från bilaga xx

Beräkning av den effektiva bredden enligt SS1994

$$l_1 := 17.78 \text{ m}$$

$$l_e := 0.85 \cdot l_1 = 15.113 \text{ m}$$

Avstånd mellan momentnollpunkter
ekvivalent spännvidd

$$b_m := \frac{l_e}{8} = 1.889 \text{ m}$$

$$b_1 := 2.099 \text{ m} + e_d + \frac{d}{2} = 2.138 \text{ m}$$

$$b_{e1} := \min(b_m, b_1) = 1.889 \text{ m}$$

$$b_{e2} := b_{e1} = 1.889 \text{ m}$$

$$b_0 := 0.302 \text{ m} - 2 \cdot \left(\frac{(e_d + d)}{2} \right) = 0.254 \text{ m}$$

$$b_{eff} := b_0 + (b_{e1} + b_{e2}) = 4.032 \text{ m}$$

Bilaga VII

Preliminär dimensionering av betongplattan

I denna bilaga redovisas dimensioner materialegenskaper för betongplattan. Beräkningar utförs för momentkapacitet, långtidseffekter, sprickbredd och tvärkraftsarmering.

Samtliga indata och samband är hämtade från boken ”Bärande Konstruktioner Del 1 och Del 2” (Al-Emrani,2019) respektive (Al-Emrani,2011). Det hänvisas till boken enligt: (X-βY ·Z), där X står för Tabell(T), Figur(F) eller Ekvation(E), βY är kapitlets nummer och Z är sambandets nummer.

Materialegenskaper

Betong

Exponeringsklass XD1, Livslängdsklass L100, Klass c20/25

$$f_{ck} = 20 \text{ MPa} \quad (\text{T-B2.1})$$

$$f_{cm} = 28 \text{ MPa} \quad (\text{T-B2.1})$$

$$f_{ctm} = 2,2 \text{ MPa} \quad (\text{T-B2.2})$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ctm}}{1,5} = 13,3 \text{ MPa} \quad (\text{E-B2.3})$$

$$E_c = 30 \text{ GPa} \quad (\text{T-B2.3})$$

Armeringsstål

Armeringstyp B500B

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa} \quad (\text{T-B2.11})$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15} = 434,78 \text{ MPa} \quad (\text{E-B2.25})$$

$$E_s = 200 \text{ GPa} \quad (\text{E-B2.26})$$

Geometri

Betongtvärsnitt

$$b = 3 \text{ m}$$

$$L = 4,5 \text{ m}$$

$$h = 0,4 \text{ m}$$

$$A_{bg} = 1,2 \text{ m}^2$$

$$d = 340 \text{ mm}$$

$$d' = 60 \text{ mm}$$

Beläggning

$$h_{bt} = 0,05 \text{ m}$$

$$A_{bt} = 0,15 \text{ m}^2$$

Armeringsstål

$$\phi = 16 \text{ mm}$$

$$\phi_b = 12 \text{ mm}$$

$$n_d = 50$$

$$n_t = 30$$

$$A_{si} = \frac{\pi \phi^2}{4} = 201 \text{ mm}^2$$

Täckande betongskikt

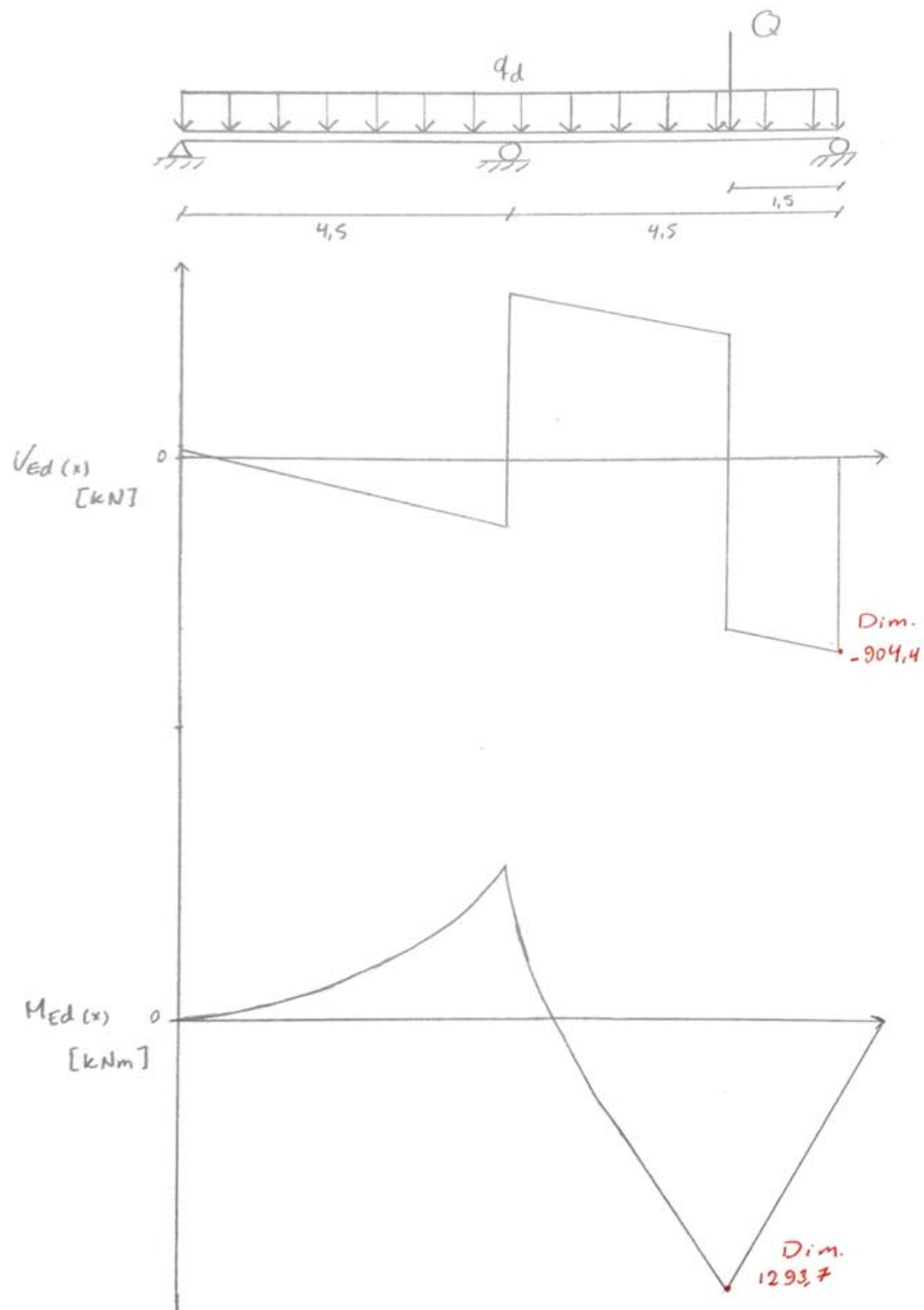
$$c_{min} = 30 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 40 \text{ mm} \quad (\text{E-B4.24})$$

$$\text{Centrumavstånd} = c_{nom} + \phi_b + \phi/2 = 60 \text{ mm}$$

Dimensionerande tvärfkraft och böjmoment bestäms enligt figuren nedan. Q har det läget som ger största möjliga böjmoment.



Dimensionerande laster

$$g_{bl} = 23kN/m^3$$

$$g_{bg} = 25kN/m^3$$

$$G = A_{bl} \cdot g_{bl} + A_{bg} \cdot g_{bg} = 33,5kN/m$$

$$Q = 7,2kN/m$$

$$Q_p = 810kN$$

Lastkombinationer i brottgränstillstånd:

$$q_d = 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot Q \quad (\text{T-K1.5}) \quad q_d = 55,9kN/m$$

$$M_{Ed} = 1293,7kNm$$

$$V_{Ed} = 904,4kN$$

Lastkombinationer i brukgränstillstånd:

$$q_d = G + Q \quad (\text{T-K1.7}) \quad q_d = 40,65kN/m$$

$$M_{Ed} = 1272,2kNm$$

$$V_{Ed} = 878,6kN$$

Lastkombinationer i långtidslast:

$$q_d = G + \psi_2 \cdot Q \quad (\text{T-K1.7-8}) \quad q_d = 37,7kN/m \quad \psi_2 = 0,6$$

$$M_{Ed} = 1268kNm$$

$$V_{Ed} = 873,7kN$$

Analys i brottgränstillstånd

$$\eta = 1 \text{ (T-B5.2)}, \quad \lambda = 0.8 \text{ (T-B5.2)}, \quad \varepsilon_{cu} = 3,5 \cdot 10^{-3}$$

Projekteringsekvation ger tryckzonhöjd:

Antag att armering flyter

$$\eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \lambda \cdot x + f_{yd} \cdot A'_s = f_{yd} \cdot A_s \quad (\text{E-B5.35})$$

$$x = \frac{f_{yd} \cdot A_s - f_{yd} \cdot A'_s}{\eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \lambda} \quad x = 0,0546m$$

Deformationsvillkor:

(E-B5.25) och (E-B5.26)

$$\varepsilon_s = \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} = 0,0183 \quad > \varepsilon_{syd} = 2,175 \cdot 10^{-3} \quad \text{flyter, OK}$$

$$\varepsilon'_s = \frac{x-d'}{x} \cdot \varepsilon_{cu} = -0,0003 \quad < \varepsilon_{syd} = 2,175 \cdot 10^{-3} \quad \text{flyter inte, ej OK}$$

Nytt antagande: dragarmering flyter, men ej tryckarmering

$$\eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \lambda \cdot x + E_s \cdot \frac{x-d'}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \cdot A'_s = f_{yd} \cdot A_s$$

$$x = 0,16m$$

Deformationsvillkor:

$$\varepsilon_s = \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} = 0,0039 \quad > \varepsilon_{syd} = 2,175 \cdot 10^{-3} \quad \text{flyter, OK}$$

$$\varepsilon'_s = \frac{x-d'}{x} \cdot \varepsilon_{cu} = 0,0022 \quad > \varepsilon_{syd} = 2,175 \cdot 10^{-3} \quad \text{flyter, OK}$$

Momentjämvikt kring dragresultanten ger momentkapacitet:

$$M_{Rd} = \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \lambda \cdot x \cdot (d - \frac{\lambda \cdot x}{2}) + E_s \cdot \varepsilon'_s \cdot A'_s \cdot (d - d') \quad (\text{E-B5.24})$$

$$M_{Rd} = 2152kNm$$

Analys i brukgränstillstånd

Kontroll om tvärsnittet spricker:

tvärsnittet spricker om $M_{Ed} \geq M_{cr}$

$$M_{cr} = \frac{\sigma_{c,cr} \cdot I_c}{z}$$

$$\sigma_{c,cr} = f_{ctm,fl}$$

$$k = 1,6 - \frac{h}{1000} = 1,2$$

$$f_{ctm,fl} = k \cdot f_{ctm} = 2,64MPa$$

$$\Rightarrow \sigma_{c,cr} = 2,64MPa$$

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} = 0,016m^4$$

$$z = \frac{h}{2} = 0,2m$$

$$M_{cr} = 211,2kNm$$

$$M_{Ed} \geq M_{cr} \quad \text{Tvärsnittet är sprucket! OK!}$$

Krypning

Slutligt krypfall: (E-B2.23)

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} * \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.7} \right] \cdot \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.2}$$

$$RH = 80$$

$$\beta(f_{cm}) = 3,18 \quad (\text{T-B2.9})$$

$$\beta(t_0) = 0,488 \quad (\text{F-B2.20})$$

$$u = 2 \cdot (b + h) \quad u = 6,8m$$

$$A_C = b \cdot h \quad A_c = 1,2m^2$$

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} \quad h_0 = 0,3529m \quad h_0 = 352,9mm \quad (\text{E-B2.19})$$

$$\Rightarrow \varphi_{RH} = 1,28$$

$$\Rightarrow \varphi = 1,99$$

$$\Rightarrow \alpha_{ef} = (1 + \varphi) \cdot \frac{E_s}{E_{cm}} \quad \Rightarrow \alpha_{ef} = 19,94$$

Krympning

Slutlig krympning:

$$\varepsilon_{cs}(\infty) = \varepsilon_{cd}(\infty) + \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (\text{E-B2.17})$$

Uttorkningskrympning:

$$\varepsilon_{cd}(\infty) = k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} \quad (\text{E-B2.18})$$

$$\varepsilon_{cdi} = 0,401 \quad (\text{T-B2.5})$$

$$\beta_{RH} = 0,756 \quad (\text{T-B2.6})$$

$$k_h = 0,75 \quad (\text{T-B2.7})$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{cd}(\infty) = 0,227 \cdot 10^{-3}$$

Autogen krympning:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 0,025 \cdot 10^{-3} \quad (\text{T-B2.8})$$

Slutlig krympning:

$$\Rightarrow \varepsilon_{cs}(\infty) = 0,252 \cdot 10^{-3}$$

Krympkrafter:

$$F_{cs} = \varepsilon_{cs} \cdot E_s \cdot A_s \quad F_{cs} = 507,4kN \quad (\text{E-B7.61})$$

$$F'_{cs} = \varepsilon_{cs} \cdot E_s \cdot A'_s \quad F'_{cs} = 304,5kN \quad (\text{E-B7.61})$$

Beräkning av stålspänningarna:

Statisk momentjämvik: (Ren böjning $\Rightarrow x = x_{tp}$)

$$b \cdot \frac{x^2}{2} + (\alpha - 1) \cdot A'_s \cdot (x - d') = \alpha \cdot A_s \cdot (d - x)$$

$$\text{Lös ut } x \quad \Rightarrow x = 0,142m$$

$$A_{ef} = b \cdot x + (\alpha - 1) \cdot A'_s + \alpha \cdot A_s \quad A_{ef} = 0,741m^2$$

$$I_{ef} = \frac{b \cdot x^3}{3} + (\alpha - 1) \cdot A'_s \cdot (x - d')^2 + \alpha \cdot A_s \cdot (d - x)^2 \quad I_{ef} = 0,0115m^4$$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_{cm}} \quad \alpha = 6,67$$

Kontroll av betongspänning i överkant: $z = -x$

(E-B7.70a)

$$\sigma_c = \frac{F_{cs} + F'_{cs}}{A_{ef}} + \frac{F_{cs} \cdot e_s + F'_{cs} \cdot e'_s + M}{I_{ef}} \cdot z$$

$$\sigma_c = -15,5 \text{ MPa} \quad > 0,45 \cdot f_{ck} = 9 \text{ MPa} \quad \text{EJ OK!}$$

Stålspänningar på dragarmeringsnivå: $z = -e_s$
(E-B7.70a) och (E-B7.71)

$$\sigma_c = \frac{F_{cs}}{A_{ef}} + \frac{F_{cs} \cdot e_s + M}{I_{ef}} \cdot z$$

$$\sigma_s = \alpha \cdot \sigma_c - \frac{F_{cs}}{A_s}$$

$$\begin{aligned} \sigma_c &= 24,3 \text{ MPa} \\ \sigma_s &= 111,2 \text{ MPa} \quad < 0,8 \cdot f_{yk} = 400 \text{ MPa} \quad \text{OK!} \end{aligned}$$

Stålspänningar på tryckarmeringsnivå: $z = -e'_s$
(E-B7.70a) och (E-B7.71)

$$\sigma'_c = \frac{F'_{cs}}{A_{ef}} + \frac{F'_{cs} \cdot e'_s + M}{I_{ef}} \cdot z$$

$$\sigma'_s = \alpha \cdot \sigma'_c - \frac{F'_{cs}}{A'_s}$$

$$\begin{aligned} \sigma'_c &= -8,5 \text{ MPa} \\ \sigma'_s &= -107 \text{ MPa} \quad < 0,8 \cdot f_{yk} = 400 \text{ MPa} \quad \text{OK!} \end{aligned}$$

Srpickbreddskontroll

Srpickbredden beräknas genom: (E-B9.18), (E-B9.11) och (E-B9.19):

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\varphi}{\rho_{eff}}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - \frac{k_t \cdot f_{ctm}}{\rho_{eff}} \cdot (1 + \alpha \cdot \rho_{eff})}{E_s}$$

$$c = 0,06 \text{ m}$$

$$k_1 = 0,8$$

$$k_2 = 0,5$$

$$k_3 = 3,4$$

$$k_4 = 0,425$$

$$\varphi = 0,016 \text{ m}$$

$$k_t = 0,4$$

$$\rho_{eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} = 0,039$$

Effektiv betongarea:

$$h_{c,eff} = \min \{2,5(h-d), (h-x)/3, h/2\} = 0,086 \text{ m} \quad \text{(E-B9.13)}$$

$$A_{c,eff} = b \cdot h_{c,eff} = 0,26 \text{ m}^2$$

$$s_{r,max} = 0,2738 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 0,4 \cdot 10^{-3}$$

$$\Rightarrow w_k = 0,11 \text{ mm} \quad < w_{max} = 0,2 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

Tvärkraftsarmering

Kontroll av livtryckbrott:

Dimensionerande tvärkraft $V_{Ed} = 921kN$

$$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$$

$$v = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250}\right] = 0,552$$

$$\Rightarrow V_{Ed} < 3659,7 \cdot 10^3 \quad \text{OK!}$$

Kontroll om tvärkraftsarmering behövs:

Kontrollen görs i ett snott $0,9 \cdot d$ från upplagskanten. Upplagsbredden = 300mm (Tvärbalkarnas flänsbredd).

$$x = 0,3/2 + 0,9 \cdot 0,34 = 0,456m$$

$$V_{Ed}(0,456) = 876kN$$

$$\Rightarrow V_{Ed,red}(x) = V_{Ed}(x) - \frac{(2d-x)^2}{4d} \cdot q_d = 525,9kN$$

Kontroll skjuvglidbrott:

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck}) \cdot b_w \cdot d$$

$$V_{Rd,c} \geq v_{min} \cdot b_w \cdot d$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$K = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{340}} = 1,77 < 2,0$$

$$\rho_l = \frac{A_{st}}{b_w \cdot d} = \frac{0,01}{3 \cdot 0,34} = 0,0098 < 0,02$$

$$\Rightarrow V_{Rd,c} = 740,925kN$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot K^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0,228$$

$$\Rightarrow V_{Rd,c} > v_{min} \cdot b_w \cdot d = 232,56kN$$

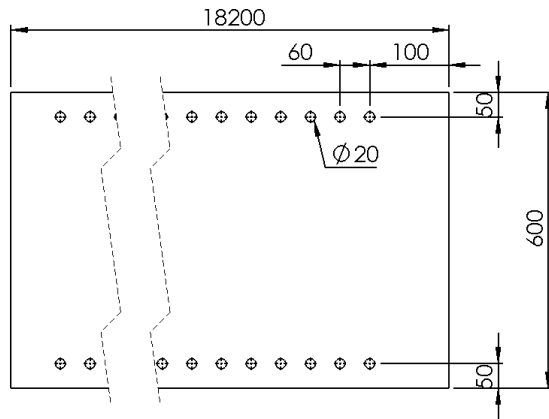
$$\Rightarrow V_{Rd,c} > V_{Ed,red}(x)$$

Tvärarmering krävs ej!

Bilaga VIII

Preliminär dimensionering av upplagen

Beräkningar för dimensionering av upplag och dess slankhetstal och momentkapacitet utförs i den här bilagan.



Laster:

Knäcklast:

$$N_{Ed} = 1,35 \cdot 3741 + 1,5 \cdot 1173 = 6809,85 \text{ kN}$$

Sidolast orsakad av jordtryck:

$$q_d = 1,35(6,88 \cdot 18,2 \cdot 5,2) = 879 \text{ kN}$$

Materialegenskaper:

Betong

c30/37

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa} \quad (\text{T-B2.1})$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,5} = 20 \text{ MPa} \quad (\text{E-B2.3})$$

$$E_{cm} = 33 \text{ GPa} \quad (\text{T-B2.3})$$

$$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{1,2} = 27,5 \text{ GPa} \quad (\text{E-B2.15})$$

Armeringsstål

B500B 600 ϕ 20

$$A_{si} = 314 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$f_{yd} = 435 \text{ MPa} \quad (\text{E-B2.25})$$

$$E_s = 200 \text{ GPa} \quad (\text{E-B2.26})$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{435 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^9} = 2,18 \cdot 10^{-3}$$

1-a ordnings moment:

(E-B11.8) och (E-B11.6)

$$M_{Ed,0}(z) = N_{Ed}[e_o(z) + e_i(z)]$$

$$e_i = \theta_i \cdot \frac{l_0}{2}$$

$$e_o\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{M\left(\frac{l}{2}\right)}{N_{Ed}} = \frac{q_d \cdot \frac{l^2}{8}}{N_{Ed}}$$

Initiallutning:

$$\theta_i = \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m \quad (\text{E-B11.3})$$

$$\theta_0 = 0,005 \quad (\text{E-B11.3})$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = 1 \quad (\text{E-B11.5})$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l}} = \frac{2}{\sqrt{5,2}} = 0,87 \quad (\text{E-B11.4})$$

$$\Rightarrow \theta_i = 4,4 \cdot 10^{-3}$$

$$l_0 = l = 5,2m$$

$$\Rightarrow e_i = 0,0114$$

$$\Rightarrow e_o\left(\frac{l}{2}\right) = 0,436$$

$$\Rightarrow M_{Ed,0} = 3048,65kNm$$

2-a ordnings moment:

Enligt EC 2, om slankheten λ är mindre än ett värde λ_{lim} kan andra ordnings effekter ignoreras.

$$\lambda_{lim} = \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}} \quad (\text{E-B11.12})$$

$$A = \frac{1}{1 + 0,2 \cdot \varphi_{ef}}$$

$$C = 1,7 - r_m$$

$$B = \sqrt{1 + 2 \cdot \omega}$$

$$\omega = \frac{f_{yd} \cdot A_s}{f_{cd} \cdot A_c}$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{f_{cd} \cdot A_c}$$

φ_{ef} är inte känd \rightarrow Välj: $A = 0,7$

r_m är inte känd \rightarrow Välj: $C = 0,7$

$$\Rightarrow \omega = 0,38$$

$$\Rightarrow B = 1,32$$

$$\Rightarrow n = 0,03$$

$$\Rightarrow \lambda_{lim} = 73,4$$

Slankhetstal:

$$A_c = b \cdot h = 10,92m^2$$

$$x_{tp} = h/2 = 0,3m$$

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} = 0,3276m^4$$

$$I_s = A_s(d - x_{tp})^2 = 0,012m^4$$

$$i = \sqrt{I_c/A_c} = 0,17m$$

$$\Rightarrow \lambda = l_0/i = 30,6 \quad (\text{E-B11.10})$$

$$\lambda_{lim} \geq \lambda$$

Andra ordnings effekter behöver inte beaktas!

Momentkapacitet:

Antag att betongens kantstukning är avgörande. Rektangulär tryckzon → metod med tryckblocksfaktorer:

$$\varepsilon_{cu} = 3,5 \cdot 10^{-3} \quad , \alpha = 0,81 \quad , \beta = 0,416 \quad (\text{T-B5.1})$$

Antag att armering flyter:

$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x = N_{Ed} \quad (\text{E-B5.11})$$

$$x = \frac{N_{Ed}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b} = 0,023$$

$$\varepsilon'_s = \frac{x-d'}{x} \cdot \varepsilon_{cu} = -4 \cdot 10^{-3} \quad < \varepsilon_{yd} = 2,17 \cdot 10^{-3} \quad \text{Ej OK!}$$

Antag att endast dragarmering flyter:

$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x + E_s \cdot \frac{x-d'}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \cdot A'_s = f_{yd} \cdot A_s + N_{Ed}$$

$$\text{Lös ut } x \quad \Rightarrow x = 0,08m$$

$$\varepsilon'_s = \frac{x-d'}{x} \cdot \varepsilon_{cu} = 1,3 \cdot 10^{-3} \quad > \varepsilon_{yd} \quad \text{OK!} \quad (\text{E-B5.26})$$

$$\sigma'_s = E_s \cdot \varepsilon'_s = 262,5 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_s = \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} = 20,6 \cdot 10^{-3} \quad > \varepsilon_{yd} \quad \text{OK!} \quad (\text{E-B5.25})$$

$$M_{Rd} = \alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \cdot (d - \beta \cdot x) + \sigma'_s \cdot A'_s (d - d') - N_{Ed} (d - \frac{h}{2}) \quad (\text{E-B5.24})$$

$$\Rightarrow M_{Rd} = 21691 \text{ kNm}$$

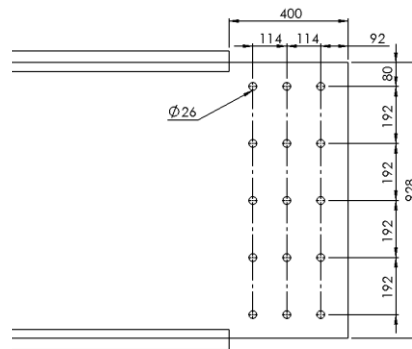
Dimensioneringsvillkor:

$$M_{Rd} \geq M_{Ed} \quad \text{OK!}$$

Bilaga IX

Preliminär dimensionering av detaljer

Beräkningar för dimensionering av skruvförband mellan tvärbalk och dragband och dimensionering av källsvets i dragbandet utförs i den här bilagan.



Preliminär dimensionering av skruvförband mellan tvärbalk och dragband

Indata:

$$V = 1630 \text{ kN}$$

Tjocklek liv (platta) = 21 mm

skruvhållfasthet:

$$f_{yb} = 640 \text{ MPa}$$

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$$

$$A_s = 353 \text{ mm}^2$$

Stålkvalitet I-balk:

S355

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

Utformning av förbandet:

$$1,2 \cdot d_0 \leq e_1 \leq 40 + 4 \cdot t \quad \Rightarrow \quad 31,2 \leq e_1 \leq 124$$

$$1,2 \cdot d_0 \leq e_2 \leq 40 + 4 \cdot t \quad \Rightarrow \quad 31,2 \leq e_2 \leq 124$$

$$2,2 \cdot d_0 \leq p_1 \leq \min(14t, 200) \quad \Rightarrow \quad 57,2 \leq p_1 \leq 200$$

$$2,4 \cdot d_0 \leq p_2 \leq \min(14t, 200) \quad \Rightarrow \quad 62,4 \leq p_2 \leq 200$$

Sjkuvbrott i skruv: (E-S8-20)

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ud} \cdot A}{\gamma_{M_2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 353}{1,25} = 135,55 kN$$

15 stycken bultar:

$$15 \cdot 135,55 = 2030 kN$$

Nyttjandegrad:

$$\eta = \frac{V}{F_{v,Rd}} = \frac{1,63}{2,03} = 0,803 \approx 80\%$$

Hålkantbrott: (E-S8-21) och (E-S8-22)

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M_2}}$$

$$\alpha_b = \min\left(\alpha_d, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1\right)$$

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot 26} = 1,03 \quad (\text{E-S8-22})$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{510} = 1,57$$

$$\Rightarrow \alpha_b = 1$$

$$k_1 = \min\left(2, 8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7, 2,5\right)$$

$$\Rightarrow k_1 = 2,5$$

$$\Rightarrow F_{b,Rd} = 514,08 kN$$

15 st hål:

$$\frac{V}{15} = \frac{1,63 \cdot 10^6}{15} = 108,7 kN$$

Nyttjandegrad:

$$\eta = \frac{108,7}{514,08} = 0,211 \approx 21\%$$

Skjuvbrott i skruv blir dimensionerande: $\eta = 80\%$

Preliminär dimensionering av källsvetsen i dragbandet

$$\sigma_j = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\perp}^2} \quad (\text{E-S9.3})$$

$$\text{där: } \sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{P}{\sqrt{2} \cdot L \cdot a} \quad (\text{E-S9.3})$$

Källsvetsen har tillräcklig bärförmåga om:

$$\sigma_j \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (\text{E-S9.12}) \quad \text{och} \quad \sigma_{\perp} \leq 0,9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad (\text{E-S9.13})$$

$$\sigma_j = \sqrt{4 \cdot \left(\frac{P}{\sqrt{2} \cdot L \cdot a} \right)^2}$$

$$P = \frac{V}{2} = \frac{1,63 \cdot 10^6}{2} = 815 \text{ kN}$$

$$L = \left(1,2 - \frac{0,2 \cdot L_j}{150 \cdot a} \right) \cdot L_j \quad (\text{E-S9.2})$$

$$L_j = 9 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad L = \left(1,2 - \frac{0,2 \cdot 9}{150 \cdot a} \right) \cdot 9$$

$$\sigma_j = \sqrt{4 \cdot \left(\frac{P}{\sqrt{2} \cdot a \cdot \left(1,2 - \frac{1,8}{150 \cdot a} \right) \cdot 9} \right)^2} = \frac{1,63 \cdot 10^6}{15,27 \cdot a - 0,1527}$$

$$\frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{510 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 1,25} = 453,3 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\Rightarrow \frac{1,63 \cdot 10^6}{15,27 \cdot a - 0,1527} \leq 453,3 \cdot 10^6$$

$$\Rightarrow a = 0,0102 \text{ m} \quad \underline{\text{Välj: } a = 11 \text{ mm}}$$

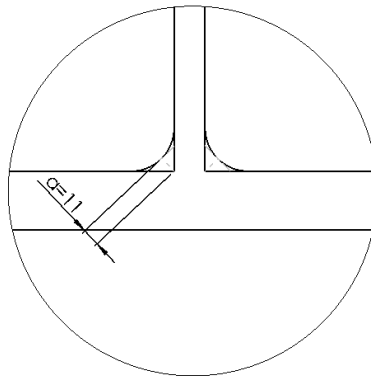
Test med kontroll z:

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$\Rightarrow \frac{P}{\sqrt{2} \cdot L \cdot a} \leq 0,9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

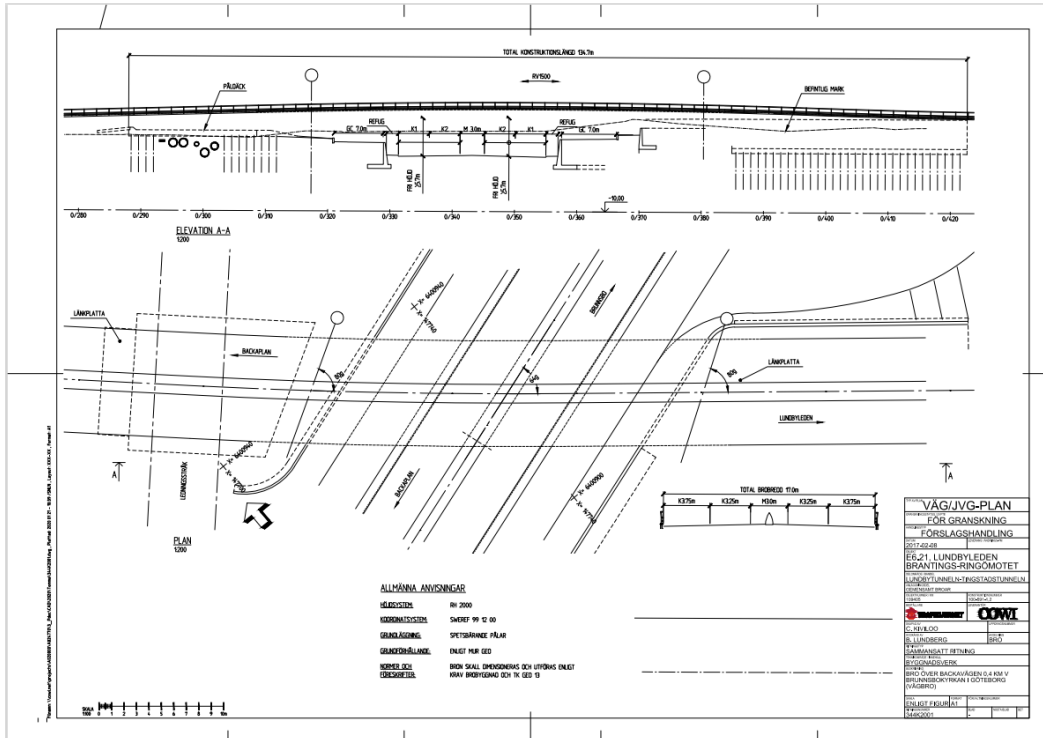
$$L = \left(1,2 - \frac{0,2 \cdot 9}{150 \cdot 0,011} \right) \cdot 9 = 0,98 \text{ m}$$

$$\Rightarrow 53,36 \cdot 10^6 \leq 367,2 \cdot 10^6 \quad \text{OK!}$$



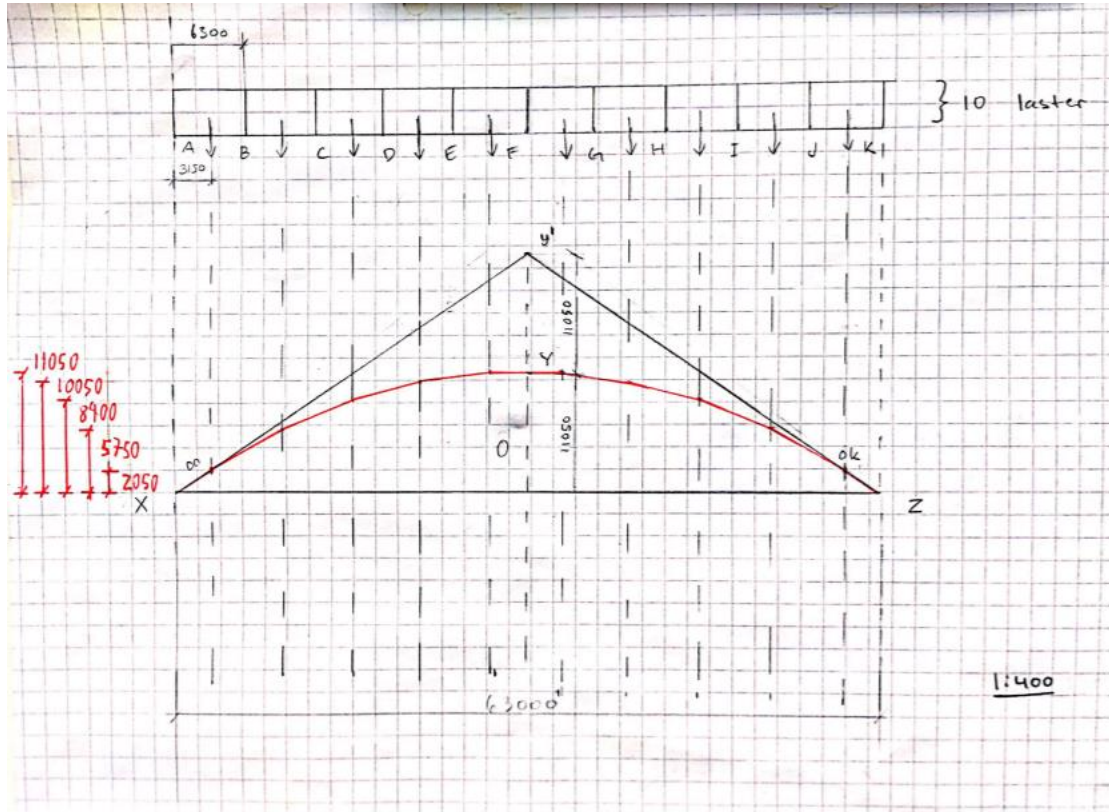
Bilaga XI

Sektionsritning



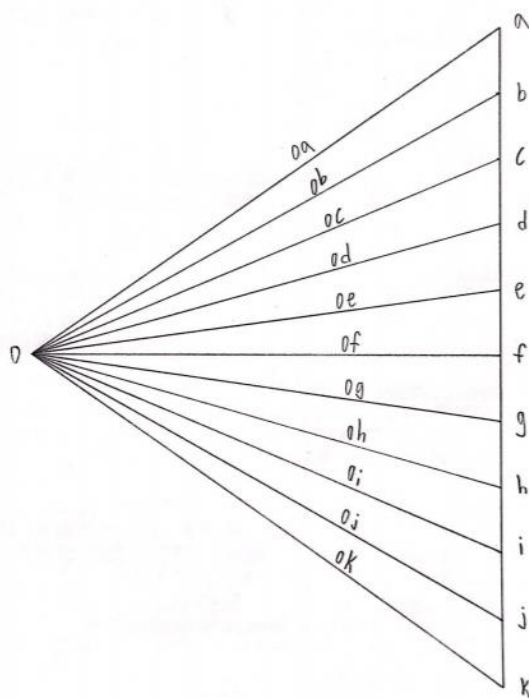
Bilaga XII

Grafisk modell av bågen med Bows notation



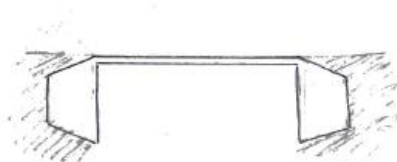
Bilaga XIII

Kraftpolygon i bågen med Bows notation

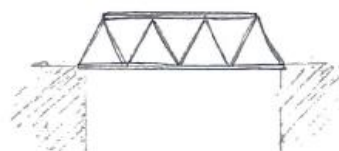


Bilaga XIV

Skisser över olika brotyper



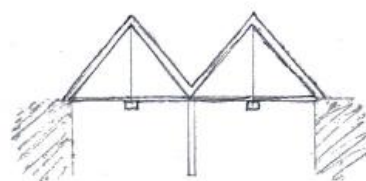
RAMBRO



FACKVERKSBRÖ



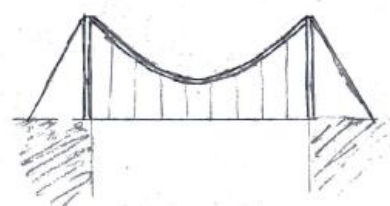
BALKBRÖ



HÄNGVERKSBRÖ



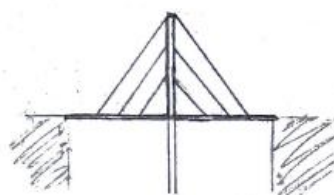
PLATTBRÖ



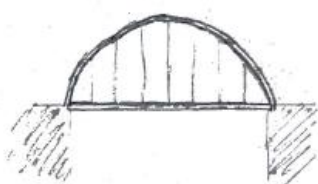
HÄNGBRÖ



VALVBRÖ



SNEDKABELBRÖ



BÅBRÖ

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se



CHALMERS