



Ulricehamnsmotet

- Konceptframtagning och preliminärdimensionering av vägbro
över riksväg 40

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

JOHAN ANTONSSON
JAKOB BRANDIN
DAVID DACKMAN
JENS HÅKANSSON
HENRIK WALLERMAN
JOHAN ÖSTERBERG

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen konstruktionsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2013
Kandidatarbete BMTX01-13-61

Kandidatarbete

Ulricehamnsmotet

Konceptframtagning och preliminärdimensionering av vägbro över riksväg 40

Johan Antonsson
Jakob Brandin
David Dackman
Jens Håkansson
Henrik Wallerman
Johan Österberg

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige, 2013

The Ulricehamn junction

Conceptual development and preliminary design of a bridge over national road 40

Bachelor's thesis in Civil and environmental engineering

Johan Antonsson

Jakob Brandin

David Dackman

Jens Håkansson

Henrik Wallerman

Johan Österberg

© Johan Antonsson, Jakob Brandin, David Dackman,
Jens Håkansson, Henrik Wallerman, Johan Österberg, 2013

Department of Civil and environmental engineering

Division of structural engineering

Chalmers University of Technology

SE-412 96 Göteborg

Sweden

Bachelor's thesis BMTX01-13-61

Omslag:

Visualisering av framtaget brokoncept.
(K. Borgstrand).

Förord

Detta kandidatarbete, genomfört av studenter på Väg- och Vattenbyggnadsprogrammet på Chalmers Tekniska Högskola, är utformat som en teknisk rapport vilken behandlar förstudie och preliminär dimensionering av en bro. Under de tre första åren av utbildningen ges de kunskaper som krävs för att genomföra huvuddelen av broutredningen och dimensioneringen. Det som saknas i kunskapsväg förvärvas dels via självstudier och dels genom föreläsningar kopplade till kandidatarbetet.

Tack till personalen vid avdelningen för Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola, som har givit vägledning och svarat på otaliga frågor. Särskilt tack till Joosef Leppänen som alltid välkomnat oss med en öppen dörr samt Robert Kliger som gav oss mod och inspiration till materialvalet trä. Tack ägnas också till Moelven i Töreboda för det studiebesök som ni öppenheartigt välkomnade oss på. Ett extra tack skänks till Tomas Frödelius och Erik Johansson, projektledare respektive konstruktör på Moelven, för guidning, dimensioneringsunderlag och inspiration. Tack även till Karl Borgstrand som ägnade en fredagskväll åt att rita försättsbladet till denna rapport.

Sammandrag

För att göra hela sträckan mellan Göteborg och Stockholm mötesfri byggs för närvarande riksväg 40, mellan Göteborg och Jönköping, ut till motorväg. Som en följd av detta måste en förbindelse som leder riksväg 46 förbi nya riksväg 40, strax norr om Ulricehamn, konstrueras. Trafikverket har beslutat att en bro som för riksväg 46 över riksväg 40 är den bästa lösningen. Denna rapport utreder vilken typ av bro som är mest lämpad för denna förbindelse, samt dimensionerar preliminärt dess utformning.

För att bestämma vilken brotyp som är mest passande genomförs en urvalsprocess, där ett flertal brotyper jämförs. Efter ett första urval viktas kvarvarande brotyper mot varandra utifrån ett antal utvalda parametrar. Några av dessa parametrar som i detta projekt viktas högt är estetik, innovation samt miljövänlighet.

Den mest lämpade brotypen bedöms vara en bågbro med förstyrningsbalk, konstruerad huvudsakligen i trä. Bågbrons mittspann kommer vara 55 m långt och flankeras på båda sidorna av balkbroar. Dessa sidobroar som också är byggda av trä, utgör resten av bronns totala längd på 82,7 m.

I preliminärdimensioneringen undersöks vilka dimensioner som krävs för de olika komponenterna i bron. Denna dimensionering behandlar huvudsakligen brottgränstillstånd, och avgränsas till de viktigaste bärande delarna. Det framkommer, på grund av den låga konstruktionshöjden, att bronns tvärgående balkar inte kommer kunna byggas i trä utan måste utformas i höghållfast stål.

Nyckelord: Träbyggande, langerbalkbro, bågbro, träbro, Kerto, limträ

Abstract

In order to make the entire route between Gothenburg and Stockholm into a dual carriageway, Swedish national road 40 between Gothenburg and Jönköping is currently being expanded into a motorway. As a result of this, a bridge leading national road 46 over the new road 40 just north of the town Ulricehamn, has to be constructed. This report investigates which type of bridge is the most suitable for this connection, and contains a preliminary design of the bridge.

To decide which type of bridge is the most suitable a selection process is conducted, in which several types of bridges are compared. After the initial selection the remaining types are compared with respect to a number of criteria. Some important criteria in this project are aesthetics and innovation, as well as environmental friendliness.

The most suitable type of bridge is a tied-arch bridge, constructed mainly of wood. The main span of the arch bridge is 55 m, and on either side of it are two beam bridges which constitute the rest of the bridge's total span of 82.7 m.

The preliminary design of the bridge examines what dimensions the various components of the bridge will have. It mainly focuses on the limit state design, and the main load bearing elements. The results of the design process shows that the crossbeams, due to the limited construction height, cannot be constructed of wood but that high-performance steel has to be used.

Key words: Timber engineering, tied-arch bridge, arch bridge, timber bridge, Kerto, glulam

Begreppsförklaring

Bank, vägbank	Fyllnadsmaterial som leder vägen till bronns höjd vid ändarna.
Blästring	En metod som innebär att högt tryck används och blåser partiklar mot en yta, så att ytan rengörs eller omformas.
Brottgränstillstånd	Då en konstruktion är på gränsen att förlora sin bärformaga.
Brottmoder	Olika sätt för en konstruktion att nå brottgränsen.
Bruksgränstillstånd	Då en konstruktion är på gränsen att förlora sin funktion vid normal användning.
Cc-avstånd	Avståndet mellan två centrumlinjer. Exempelvis avståndet mellan två parallella balkars referenslinjer.
Eulerfall	Knäckningsfall med avseende på en pelare med olika infästningar.
Eurocode	Samling av regler och standarder som ska följas vid dimensionering av bärande system.
Fritt upplagd	Ett konstruktionselement vars ändupplag inte överför momentkrafter.
Förstyvningsbalk	Balk som förstyrar andra konstruktionselement. Exempelvis genom att hålla ihop de bågiga ändarna på en båge.
Huvudspann	Brons längsta spann.
Iterering	Upprepning av beräkningar eller andra operationer tills önskat resultat uppnås.
Konsol	Konstruktionselement som saknar stöd i en ände.
Konstruktionshöjd	Det vertikala avståndet mellan bronns underkant till vägbanans överkant.
Lanseringsnos	En konstruktion placerad längst fram vid stegvis lansering som kompenserar för nedböjningen av brobanan.
Pilhöjd	Vertikala avståndet mellan upplagen och konstruktionslinjens högsta punkt för ett valv eller en båge.
Prefabricering	Tillverkning av ett monteringsbart konstruktionselement i fabrik.
Underbyggnad	Alla delar av konstruktionen belägna över grundläggningen och under överbyggnaden.

Spann	Delen av bron mellan två upplagspunkter.
Spännvidd	Avståndet mellan två av en bros upplagspunkter.
Styvhet	Hur mycket en konstruktion rör sig under en viss last.
Vridstyvhet	Styvhet med avseende på moment kring konstruktionens axel i längsled.
Årsdygnstrafik, ÅDT	Det under ett år genomsnittliga trafikflödet per dygn.

Innehållsförteckning

1 Inledning.....	1
1.1 Syfte.....	1
1.2 Problembeskrivning.....	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Metod.....	2
2 En bros livscykel	3
2.1 Projektering	3
2.2 Produktion	3
2.3 Förvaltning.....	4
3 Förutsättningar	5
3.1 Geografisk placering.....	5
3.2 Geohydrologiska förhållanden	6
3.3 Beständighet	6
3.4 Spännvidd	6
3.5 Trafik	6
4 Byggnadsmaterial.....	7
4.1 Betong.....	7
4.2 Stål.....	7
4.3 Trä.....	8
4.4 Miljöjämförelse	9
5 Grundläggning.....	11
5.1 Platta på mark	11
5.2 Pålning	11
5.3 Vingmurar.....	12
5.4 Stöd.....	12
5.5 Grundläggning av anslutande bankar	12
6 Brotyper.....	13
6.1 Balkverkansbroar.....	13
6.2 Fackverksbroar	16
6.3 Linverkansbroar.....	17
6.4 Bågverkansbroar	18
7 Produktionsmetoder	22

7.1	Betongbroar	22
7.2	Stål- och samverkansbroar.....	23
7.3	Träbroar	24
8	Val av brokoncept	25
8.1	Första urval	25
8.3	Utveckling av kvarstående brokoncept.....	29
8.4	Matriskriterier	33
8.5	Viktning av kriterium	35
8.6	Jämförelse av brokoncept	35
8.7	Betygsättning av brokoncept	38
9	Slutgiltigt brokoncept	39
9.1	Mittspannets utformning.....	39
9.2	Sidospann.....	44
9.3	Stöd.....	45
9.4	Detaljer	45
9.5	Produktionsgång	45
10	Dimensionering	47
10.1	Lastframtagning.....	47
10.2	Broplatta och tvärbalk	48
10.3	Stag	49
10.4	Infästning mellan båge och stag	49
10.5	Båge och förstyrningsbalk	49
10.6	Sidospann.....	50
10.7	Stöd.....	51
10.8	Bruksgränstillstånd	52
10.9	Översiktlig kostnadsberäkning	52
11	Resultat.....	53
11.1	Mittspannets broplatta	53
11.2	Tvärbalkar.....	54
11.3	Stag	57
11.3	Infästningar	57
11.4	Båge och förstyrningsbalk	58
11.6	Sidospann.....	61

11.7 Stöd.....	62
11.8 Nedböjning	62
11.9 Konstruktionshöjd	62
11.10 Kostnadsberäkning	62
12 Diskussion	63
12.1 Framtagning av brokoncept	63
12.2 Dimensioneringsprocessen	64
12.3 Återstående dimensionering och utformning	69
12.4 Jämförelse med Gislavedsbron	71
12.5 Tillförlitlighet av använda källor	72
13 Slutsats	73
Källförteckning.....	74

Bilageförteckning

- Bilaga 1: Förslagsritning
- Bilaga 2: Teknisk beskrivning
- Bilaga 3: Beräkning av konstruktionshöjd
- Bilaga 4: Preliminärdimensionering
- Bilaga 5: CALFEM-beräkningar
- Bilaga 6: Kostnadsberäkning

1 Inledning

Riksväg 40 är en nationell stamväg som förbinder Göteborgsområdet med Jönköping. Det har funnits planer på att bygga ut den till en mötesfri väg sedan början av 1990-talet (Trafikverket, 2012a). Vägen ifråga beräknas år 2015 vara trafikerad av 12 000 fordon per årsmedeldygn och siffran väntas öka till 15 100 fordon per årsmedeldygn år 2035. När byggnationen är färdigställd kommer riksväg 40 ha motorvägsstandard mellan Göteborg och Ulricehamn, vilket gör väg 40/E4 mötesfri hela sträckan Göteborg-Stockholm. För trafikanter kommer den nya vägen ge kortare restider och för boende i Ulricehamn kommer trafiken på den gamla riksväg 40 minska vilket förbättrar boendemiljön.

Ombyggnaden av riksväg 40, som innehåller 13 nya broar samt en tunnel, kommer ske i tre etapper (Trafikverket, 2013a). Veidekke ska genomföra produktionen av etapp ett och två. Den tredje produceras av PEAB. Den aktuella bron kommer ta väg 46 över väg 40 vilket skapar en planskild korsning. Detta bidrar till en trafiksäker och effektiv anslutning mellan vägarna (Trafikverket, 2013b).

Varje broprojekt är unikt med egna förutsättningar som behöver beaktas vid val av vilket brokoncept som är bäst lämpat. Trafikverkets projekt är ofta hårt pressade av ekonomiska krav vilket minskar möjligheten att bygga innovativa och estetiska lösningar.

1.1 Syfte

Syftet med denna rapport är att utifrån givna förutsättningar projektera bron över väg 40 så att den blir estetiskt tilltalande samtidigt som den uppfyller krav på bärighet, funktion samt produktions- och underhållsmöjligheter. Ekonomiska aspekter ska beaktas men inte påverka valet av bro på ett avgörande sätt. En grundläggande dimensionering ska göras på de bärande delarna av bron vid statistiska förhållanden.

1.2 Problembeskrivning

Bron som ska projekteras ingår i Ulricehamnsmotet och har en längd på 82,7 m. Under bron kommer en sex filer bred motorväg med mittremsa att gå. Två av dessa filer är av- respektive påkörningsfiler som leder upp till bron. Bron byggs samtidigt som vägen den överbryggar vilket gör att trafik på underliggande väg inte existerar. Däremot måste trafiken på väg 46 ledas om under byggtiden.

På grund av grundläggningsförhållandena på platsen kan problem med sättningar uppkomma vilket måste beaktas vid val av brokoncept. Kraven på ekonomin är i detta projekt inte lika hårda som i de flesta andra broprojekt vilket ger utrymme för mer estetiska, miljövänliga och innovativa lösningar.

1.3 Avgränsningar

Horisontella laster, som vind- och bromslast, beaktas men inkluderas inte i beräkningarna. Dimensionering av detaljlösningar genomförs endast för utvalda detaljer. Grundläggningen

dimensioneras inte men rådande grundläggningsförhållandena beaktas vid val av brokoncept.

Miljöjämförelsen bygger på koldioxidutsläppen för de olika byggnadsmaterialen. Någon livscykelanalys eller miljökonsekvensbeskrivning genomförs inte. Den ekonomiska beräkningen är översiktlig.

1.4 Metod

I första etappen var gruppen indelade i tre delgrupper där varje grupp hade ansvar för var sitt område. Ansvarsområdena var beställarens intressen, produktionsaspekter och underhållsaspekter. I denna del utfördes en bred litteraturstudie där alla vanliga brotyper behandlades, varefter olämpliga brotyper sållades bort. Den studerade litteraturen är till största del Trafikverkets broprojekteringshandbok. Gruppen satte därefter upp kriterier som vägdes mot varandra och sedan jämfördes de kvarvarande brotyperna i en matrisviktning. I viktningen togs även hänsyn till olika byggnadsmaterial. Den brotypen som fick högst totalpoäng i matrisviktningen valdes ut till den preliminära dimensioneringen som genomfördes i etapp två.

Genomförandet av etapp två började med studier av hur beräkningar på den aktuella brotypen utförs. Kunskaper som är specifika för brodimensionering och som inte ingår i de tre första årens Väg- och Vattenbyggnadskurser har inhämtats genom självstudier och föreläsningar. Beräkningarna, som utfördes i programmen Mathcad och MATLAB, följer Trafikverkets normer och är i enlighet med Eurocode.

Ett studiebesök på företaget Moelven i Töreboda genomfördes för att öka förståelsen och kunskapen om materialen limträ och Kerto samt användningen av dessa. Konsultföretaget COWI har bistått med handledning för hur broar byggs och dimensioneras.

2 En bros livscykel

Livscykeln för en bro kan delas in i tre faser: Projektering, produktion och förvaltning. Det är viktigt att redan i början av projektet tänka igenom alla dessa faser, så att exempelvis inte förvaltningen och underhållet visar sig vara svårgenomförbart och dyrt för ett valt brokoncept.

2.1 Projektering

Målet med broprojekteringen är att utifrån givna förutsättningar uppnå "bästa utformning och läge" (Vägverket, 1996). Detta behöver inte nödvändigtvis innebära att den mest optimala utformningen rent konstruktionsmässigt väljs, eftersom många andra faktorer såsom ekonomi och miljö även måste beaktas.

I broprojekteringsstadiet genomförs en förstudie där problemsammanställning och inventering genomförs (Vägverket, 1996). Efter förstudien utförs en vägutredning där olika brotyper jämförs ur ett ekonomiskt och tekniskt hänseende. Enligt Engström¹ är det i detta stadie viktigt att tänka brett och överväga alla möjliga alternativ för att inte missa det mest optimala alternativet. Vid förhastade beslut kan en ogenomtänkt lösning väljas. Efter vägutredningen sammanställs arbetsplanen, där den valda brotypen utreds noggrannare och dimensioneras (Vägverket, 1996). Slutligen framställs bygghandlingen som innefattar detaljerade ritningar på projektet.

En bro påverkar miljön både lokalt och globalt. Bron bör därför konstrueras på ett sätt som gör dess inverkan på miljön så liten som möjligt genom att underlätta återanvändning av material samt minimera förbrukningen av icke förnyelsebara naturresurser. Detta utreds i en så kallad miljökonsekvensbeskrivning (Vägverket, 1996). En ny bro innebär också en förändring av landskapet, och bör därför utformas så att den harmoniserar med omgivningen.

2.2 Produktion

En bro innebär ett stort och komplext konstruktionsarbete, där många aspekter måste samverka för att kostnaderna och byggnadstiden ska hållas nere. Planering av byggskedet är därför mycket viktigt, och stor vikt måste läggas vid logistik och brons geografiska läge, vilket styr hur produktionen kan genomföras.

Det geografiska läget dikterar både hur själva byggandet kan genomföras och hur smidigt produktionen kan framskrida. Läget kan begränsa möjligheter till temporära konstruktioner, och i vilken utsträckning material, kranar och baracker kan placeras på området. Läget kan också skapa stora logistiska utmaningar då problematik kan uppkomma med transport av materialet till platsen, både på grund av avstånd till fabriker och på grund av rådande vägförhållanden.

För att produktionen ska kunna genomföras smidigt måste ovanstående problem vara lösta

¹ Björn Engström (Bitr. Professor, Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola) föreläsning den 8 februari 2013

och en väl genomarbetad tidsplan måste vara upprättad. Tidsplanen måste innehålla både lösningar till hur och i vilken ordning byggandet ska genomföras samt direktiv för när allt material ska finnas på plats. Om det materialet som behövs inte finns på plats vid rätt tidpunkt kommer byggandet avstanna, vilket medför höga tilläggskostnader.

2.3 Förvaltning

Erfarenheter har visat att kontinuerligt och systematiskt underhåll av en bro ökar dess livslängd och minskar kostnaderna (ACI, 1997). Därför är det viktigt att inte slarva med underhållet. Nedbrytning av broar kan delas in i två grupper. Funktionsbetingad nedbrytning från laster och användning, och miljöbetingad nedbrytning (Mattson, 2006). Funktionsbetingad nedbrytning innefattar de laster som konstruktionen är dimensionerad för, exempelvis trafiklast, och kan leda till utmattning och sprickbildning. Miljöbetingad nedbrytning sker under inverkan av det som finns i omgivningen såsom luft, vatten, jord och andra kemiska nedbrytningar.

För att krav på säkerhet och framkomlighet ska uppfyllas ska broar inspekteras regelbundet. Detta genomförs med hjälp av fem olika inspektionstyper; fortlöpande, översiktlig, allmän, huvud- och särskild inspektion (Vägverket, 1994):

- Fortlöpande inspektion utförs kontinuerligt och omfattar brons översida samt anslutande vägbankar. Syftet med dessa inspektioner är att upptäcka akuta skador som kan påverka säkerheten och brokonstruktionens bestånd på kort sikt.
- Översiktlig inspektion genomförs minst två gånger per år för broar på nationellt vägnät. Denna inspektion syftar till att kontrollera att de olika krav som är ställda på olika konstruktionsdelar är uppfyllda.
- Allmän inspektion ska utföras med maximalt tre års intervall, huvudinspektion inräknat. Denna inspektion omfattar alla konstruktionselement förutom de i vatten, och syftar till att upptäcka och bedöma skador som leder till otillfredsställande bärighet eller väsentligt ökade förvaltningskostnader.
- Huvudinspektionen utförs med maximalt sex års intervall och innefattar alla konstruktionselement, även de placerade i vatten. Erforderliga mätningar för att fastställa bland annat korrosion på armering och sprickor i stålkonstruktioner utförs. Syftet med huvudinspektionen är att upptäcka sådana brister som kan påverka konstruktionens funktion eller trafiksäkerheten inom en tioårsperiod.
- Särskild inspektion genomförs för att närmare undersöka konstaterade eller förmodade brister efter de har upptäckts vid någon av de regelbundna inspektionerna.

3 Förutsättningar

Broar som byggs har olika förutsättningar som till stor del styr utformningen. Olika typer av förutsättningar är mer eller mindre avgörande för valet av bro. Det är viktigt att alla förutsättningar beaktas så att inget viktigt missas.

3.1 Geografisk placering

Bron ska överbygga väg 40 vid Ulricehamnsmotet öster om Karlsnäs industriområde och kommer uppföras i nord-sydlig riktning, se figur 1. Terrängen sluttar neråt både söder- och norrut från bronns tänkta placering, se bilaga 1. Ulricehamns centrum ligger söder om bron. Väg 46 byggs om cirka 100 m norrut och 50 m söderut.



Figur 1 – Stadskarta (Trafikverket, 2013a)

3.2 Geohydrologiska förhållanden

Enligt den tekniska beskrivningen (se bilaga 2) består marken av åker och ängsmark med ån Ätran cirka 50 m väster om bron. Djup till berg är cirka 50 m och jordlagerföljden är ovanifrån:

Mulljord 0-0,3 m

Siltig finsand 0,3-4 m

Växelvis siltig lera, silt och finsand 4-14 m

Sand och grus 14-45 m

Bottenmorän som överlagrar berg cirka 45-50 m

Lagret med sand och grus har mycket hög relativ fasthet. Grundvattennivån i området varierar mellan 1,4–3,5 m under markytan.

3.3 Beständighet

Ulricehamn ligger i Västergötland och har en relativ luftfuktighet på runt 70 % sommartid och 85 % vintertid (Burström, 2007). Under vintern kan det bli kallt och snöa mycket vilket gör att vägsalt används vid snöröjningen. Detta bör beaktas då bron ska konstrueras med en teknisk livslängd på 80 år, enligt bilaga 2.

3.4 Spännvidd

Total brolängd är 82,7 m vilket kan ses i bilaga 1. På grund av utformningen av väg 40 kommer ett mittstöd kunna placeras i vägens mittremsa vilken är 4 m bred. Sidostöd kan placeras 10 m från väg 40 på respektive sida vilket ger en minsta spännvidd för facken på cirka 20 m (Vägverket, 1996). Konstrueras vägen utan mittstöd blir motsvarande spännvidd 55 m.

3.5 Trafik

Väg 40 är hårt trafikerad med ett beräknat ÅDT på 12 000 fordon år 2015 och 15 100 fordon år 2035. Andelen tung trafik antas vara 22 %, se bilaga 2. Enligt Thorsell¹ kan väg 46, som är mindre trafikerad, beräknas ha ÅDT på 3000 fordon år 2015 och 3800 fordon år 2035.

Ökningen av ÅDT påverkar inte beräkningen av brodimensioner då vi inte dimensionerar efter mängden trafik utan typ av trafik. Slitlagret och det bundna lagrets tjocklekar är förutbestämt i den tekniska beskrivningen och påverkas inte heller av trafikmängdsökningen. Bron kommer inte att konstrueras så att antalet körfält kan ökas eftersom två körfält anses tillräckligt för ett ÅDT på 3800 fordon.

Eftersom väg 40 kommer få en helt ny sträckning kommer den inte ha någon trafik under byggnationen. Däremot måste trafiken på väg 46 ledas om under uppförandet av bron. Enligt bilaga 2 kommer inte heller vägskyltar eller gatubelysning sättas upp på bron.

¹ Mikael Thorsell (Broprojektör, Brotteknik, COWI) handledning den 19 februari 2013

4 Byggnadsmaterial

Vid byggnation av broar används främst betong, stål och trä. Dessa material har olika egenskaper samt olika för- och nackdelar. För att kunna välja den optimala utformningen behöver projektören vara medveten om vad valet av material ger för effekter och krav på utformning.

4.1 Betong

Betong är det dominerande byggnadsmaterialet och används till alla typer av konstruktioner. Det är ett sammansatt material som består i huvudsak av cement, sand, sten och vatten. Den mest typiska egenskapen för hårdnad betong är att draghållfastheten uppgår till endast ungefär en tiondel av tryckhållfastheten (Engström, 2011). För att kompensera för detta och skapa ett kraftsystem i jämvikt förses betongkonstruktioner med armeringsstänger i stål som överför konstruktionens dragkrafter. Betong karakteriseras som ett ”levande” material som under hela sin livslängd krymper vid uttorkning (Engström, 2011).

Råvarorna för betong är relativt lättillgängliga över hela världen. Detta, tillsammans med konstruktörens möjlighet att styra kraftspel och verkningsätt är anledningar till att betong ofta används (Lyang, 2000). En av betongens nackdelar är den stora egentygden, cirka 24 kN/m^3 , som innebär att en stor del av bärförmågan används för att bära den egna tyngden (Engström, 2011). Vid utförande av betongbroar kommer därför grundläggningen att ha en större betydelse jämfört med stål och trä.

4.2 Stål

Stål är en legering av järn, som huvudbeståndsdel, och framförallt kol men även andra grundämnen (Johansson, 2011b). De ståltyper som vanligen används i broar är konstruktionsstål och höghållfast stål (Duan, 2000). En nackdel med materialet är att det vid en temperaturhöjning till 500 grader tappar stålet hälften av sin bärförmåga och det är därför viktigt att brandskydda konstruktioner av stål (Johansson, 2011b).

Stål har en hög och likvärdig hållfasthet i drag och tryck (Burström, 2007). I bruksgränstillståndet bör materialet verka inom det elastiska området eftersom materialet då får relativt små deformationer vilka återgår vid avlastning. Den höga hållfastheten gör det möjligt att bygga slanka konstruktioner (Johansson, 2011b).

Stålelement lämpar sig väl för förtillverkning. Färdiga komponenter tillverkas i fabrik och transporteras sedan ut till byggarbetsplats för att monteras ihop i en stomme. Modern teknologi och hög standardiseringsgrad gör att komponenter tillverkas med hög precision efter givna krav (Johansson, 2011b). Stålbalkar utförs antingen i helt förtillverkade valsade profiler eller svetsas samman av förtillverkade stålplåtar. Enligt Al-Emrani¹ är svetsade stålbalkar det

¹ Mohammad Al-Emrani (Docent, Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola) föreläsning den 12 februari 2013

vanligaste alternativet i Sverige eftersom dessa kan optimeras efter rådande krav och därmed kan materialåtgången minimeras.

4.3 Trä

Träets fiberstruktur, med tunna och ganska styva rör av i huvudsak cellulosa sammanbundna med en matris av bindemedlet lignin gör att trä skulle kunna kallas för ett kompositmaterial (Pousette, 2008). Det är anisotropt, vilket betyder att det har olika egenskaper i olika riktningar.

Trä har ett antal stora fördelar jämfört med stål och betong. Det har i förhållande till sin vikt en hög hållfasthet (Johansson, 2011a). Limträ är till och med starkare än stål om bärförmåga jämförs med hänsyn till egenvikt (Carling, 2008). Det klassas som ekonomiskt gynnsamt och är det enda byggnadsmaterial som är förnyelsebart (Domone, 2010). Även Fridley (2000) menar att trä är ett konkurrenskraftigt gentemot andra brobyggnadsmaterial både när det gäller byggkostnad och underhållskostnad. Den låga vikten gör trä lätt att transportera och det är även lättbearbetat med enkla maskiner på byggarbetsplatsen (Johansson, 2011a).

För vissa av materialets nackdelar såsom fuktkänslighet, risken för insekts- och rötangrepp samt brännbarhet har metoder utvecklats som gör de hanterbara (Johansson, 2011a). Naturliga imperfektioner, till exempel kvistar, medför svaga partier i materialet. Genom att virket kontrolleras och limträbalkar tillverkas, där imperfektionerna sprids ut jämnt över volymen, får dessa mindre påverkan på hållfastheten (Johansson, 2011a). Detta kallas lamelleringsseffekt eftersom den uppkommer genom att tunna lameller av materialet sammanförs.

Andra nackdelar med trä som konstruktionsmaterial kvarstår dock. Eftersom konstruktionerna får en relativt låg egenvikt är de känsliga för dynamiska och horisontella laster vilket är viktigt att ta hänsyn till vid projekteringen. Enligt Lundgren¹ är det även svårt att göra fasta infästningar i trä, vilket ytterligare kan öka nedböjningen. Sammantaget gör detta att dimensionerna för en träbalk vanligtvis blir större än en stål- eller betongbalk som dimensioneras för samma last.

För bärande konstruktioner används ofta limträbalkar. Dessa är uppbyggda av minst fyra lameller av massivt trä som limmas ihop med fiberriktningen parallellt med konstruktionens längsriktning (Johansson, 2011a). Detta gör att balken statiskt utger en enhet. Limträ tillverkas normalt av granvirke och maxhöjden för en balk är cirka 2 m. Det är dock möjligt att tillverka högre balkar genom att sammanfoga flera mindre. Balkarnas längd är som mest 30 m eftersom detta är gränsen för transport på landsväg utan att behöva eskort från polis eller transportledare (Transportstyrelsen, 2012). Vid andra transportmöjligheter eller om balkarna skarvas på byggsplatsen kan längre balkar skapas (Johansson, 2011a).

¹ Karin Lundgren (Bitr. Professor, Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola) föreläsning den 21 januari 2013

4.4 Miljöjämförelse

När byggnadsmaterial för hus jämförs, ur ett energiperspektiv, är det viktigt att sig av uppgifter baserade på hela husets livslängd används. Detta gör att inte bara materialet i sig undersöks utan också hur det påverkar husets energibehov (Tarmac, 2012). För broar gäller andra förutsättningar. Energiförbehovet för en bro ligger i huvudsak i byggskedet och under produktionen av byggnadsmaterialet. Detta gör att det blir mer rättvisande att använda siffror som visar hur mycket energi som krävs för att producera byggnadsmaterialet (Ukswedensustainability, 2006).

Mätt i koldioxidutsläpp ger ett ton cement ungefär ett tons koldioxidutsläpp; hälften på grund av utsläpp från kalkstenen i brytningen och hälften på grund av energiåtgången vid framställningen (Bremner, 2001). Omräknat till konventionell betong ger detta ett utsläpp på 200 kg koldioxid per ton producerad betong. Detta gör att betongindustrin står för sju procent av världens totala utsläpp av koldioxid. För att reducera denna siffra kan flygaska eller masugnsslagg användas istället för en del av cementen (Bremner, 2001). Trots detta krävs ofta inte mer än en tiondel så mycket energi för att uppföra en betongbyggnad som motsvarande byggnad i stål. Detta är mycket tack vare att framställningsprocessen är relativt effektiv och att betongens råvaror inte behöver fraktas över stora avstånd (Bremner, 2001).

I en studie av SP jämförs miljöpåverkan vid uppförande av ett bostadshus i betong respektive trä. Eftersom jämförelsen beaktar produktionsfaser som är snarlika med uppförandet av en bro anses siffrorna applicerbara även för brobyggnad.

Om huset uppförs med huvudsakligen trä som byggnadsmaterial beräknas utsläppet av koldioxid i materialens produktionsfas till 142 kg koldioxid per kvadratmeter boendeyta (Peñaloza, 2013). Motsvarande siffra för en betongkonstruktion är 248 kg CO₂/m². I husets produktionsfas släpps för trä 13 kg CO₂/m². Motsvarande siffra för betong är 28 kg CO₂/m². Om hänsyn även tas till vilken positiv miljöpåverkan de olika materialen har efter husets livslängd, det vill säga vilka möjligheter som finns för återvinning och energiutvinning, visar det sig att trä ger en vinst på 233 kg CO₂/m² medan betong endast ger 166 CO₂/m².

Vid återvinning av betong krossas materialet och armering plockas bort. Det krossade materialet kan sedan användas som fyllnadsmaterial. Under senare tid har fyllnadsmassorna även börjat användas som ballast i ny betong, vilket dock skapar vissa hållfasthetsrelaterade problem (Domone, 2010). Återanvändning av ståldelar är genomförbart men kan vara problematiskt då delar av materialet kan ha korroderat bort. Vid återvinning smälts stål ned till förmån för nya produkter. Processen är dock nästan lika energikrävande som nyproduktion och föroreningar i materialet kan ge upphov till vissa problem i den nya produkten. En fördel med trä är det faktum att koldioxid absorberas under trädets uppväxt och sedan lagras i materialet. När trädet sedan avverkas för produktion olika träprodukter planteras nya plantor som med tiden kan vidta processen med att uppta koldioxid från atmosfären.

Vid en jämförelse av EC, Embodied Carbon, vilket innebär hur stora koldioxidutsläpp respektive byggnadsmaterial ger ifrån sig från utvinning till montering med hänseende till

dess hållfasthet uppvisas följande resultat. Trä och oarmerad betong släpper båda ut 6 kg CO₂/(m³*MPa) medan stål ger ett betydligt större utsläpp, 55 kg CO₂/(m³*MPa) (Domone, 2010).

5 Grundläggning

Vid projektering av broar väljs det grundläggningsutförande som är mest förmånligt samt ger bro och anslutande vägbankar en säker funktion (Vägverket, 1996). Jordlagerföljder och materialegenskaper beaktas i beräkningar av sättningar, stabilitet och bärförmåga. Vid val av grundläggning bör hänsyn tas till grundvattenytans läge, brotypen, tjälsäkert djup och närhet till befintliga konstruktioner. Då mindre bärkraftiga jordar överlagras bra grundläggningsmaterial som ligger på rimligt djup kan det vara fördelaktigt att schakta bort de dåliga jordarna och ersätta med packad fyllning (Vägverket, 1996).

5.1 Platta på mark

Grundläggning av en platta kan ske på berg, jord eller packad fyllning. Med platta på berg krävs i regel plant eller plansprängt berg (Vägverket, 1996). Om berget lutar kan sprängning ske i trappstegsformade avsatser. För en platta på jord bestäms grundläggningsdjupet av bärförmåga, sättningar och tjälfarlighet. Vid grundläggning på måttligt eller mycket tjälfarliga material ska grundplattans underkant ligga på tjälsäkert djup (Vägverket, 1996).

5.2 Pålning

Då grundläggning ska ske på mindre bärkraftiga jordar används oftast pålar. Dessa kan vara antingen spets- eller mantelburna. För spetsburna pålar erhålls den huvudsakliga bärförmågan genom pålens spets och lasterna leds ner till berg (Vägverket, 1996). Mantelburna pålar bärs upp av friktion eller kohesion mellan jorden och pålens mantelarea. Pålning är en relativt dyr grundläggning och därför krävs det av konstruktören att noga beräkna pålningens utförbarhet samt pålgruppens storlek. Pålgrupper som utsätts för stora horisontella laster och små vertikala, exempelvis under en stödmur, blir mycket stora vilket bör beaktas vid val av bro och spännvidd (Vägverket, 1996).

Pålning för broar utförs i Sverige till största delen av slagna betongpålar. Massiva stålpålar används vid svåra pålningförhållanden, till exempel vid blockrik jord eller då betongpålar medför oacceptabla jordrörelser (Vägverket, 1996). Träpålar vid brostöden används endast som underpåle till betongpålar vid mantelbärande pålar.

En mindre vanlig typ av pålning vid broar är grävpålar. Med grävpåle menas en påle som inte är prefabricerad utan gjuts på plats i jorden (Vägverket, 1996). Den är vanligtvis spetsburen och tränger inte undan jord. En annan fördel är att den kan ta betydligt större laster än vanliga prefabricerade pålar. Grävpålar är vanligtvis endast ekonomiska om de kan föras till berg.

En för Sverige ny grundläggningsmetod är att slå ner kraftiga stålrörspålar till berg. Detta kräver mindre schaktning och betonggjutning än betongpålar vilket gör att tidsåtgången blir mindre och mycket schaktning kan undvikas (Lundberg, 2012). Pålarna, vanligen två stycken under varje brostöd, slås eller borrar ner till berg (Larsson, 2011).

5.3 Vingmurar

En vingmur ska "fånga upp" höjdskillnaden vid bronns ändstöd så att slänter förblir stabila (Vägverket, 1996). Det är därför viktigt att den utformas med tillräcklig längd för att klara av höjdgeometrin för givna släntlutningar. En för liten vingmur medför svårigheter vid motfyllnadsarbetet samt erosionsproblem i slänterna.

Ur estetisk synvinkel kan stora vingmurar bli alltför dominerande vid broar med små spännvidder eller liten brobredd. En tumregel är att vingmurens längd inte bör överstiga bronns fria spännvidder eller totala brobredd (Vägverket, 1996).

5.4 Stöd

Mellanstöd utformas antingen som pelare eller som en längre skiva. Vid stora broar kan även lådsektion förekomma. Stöden bör utformas sammangjutna med överbyggnaden och bottenplattan (Vägverket, 1996). Om en ingjutning medför alltför stora påkänningar används istället en led under överbyggnaden. Landfästen är en fristående avslutning på bron. Det ska bära både laster från överbyggnaden samt laster från anslutande bank (Vägverket, 1996).

5.5 Grundläggning av anslutande bankar

Bankarna som ansluter till bron måste vara så pass bra grundlagda att de inte sätter sig relativt bron (Vägverket, 1996). En vanlig åtgärd för att jämna ut sättningsskillnader är att utföra en länkplatta som placeras bakom varje ändstöd. Bankarna får inte heller under sin livslängd förändra det jordtryck som bron är dimensionerad för eller orsaka rörelse som är skadlig för pågrundlagda brostöd. Påldäck eller kompensationsgrundläggning kan behöva utföras om undergrunden består av material med låg bärighet (Vägverket, 1996).

6 Brotyper

En bro består av överbyggnad och underbyggnad. Överbyggnadens uppgift är att ta upp trafiklasten, vilket den gör i huvudbärverk och sekundärbärverk, medan underbyggnaden överför lasten till grunden (Vägverket, 1996).

Vid dimensionering av en brokonstruktion måste typ av bro väljas innan beräkningarna kan påbörjas. Dessa brotyper kan delas in i ett antal kategorier efter hur krafterna tas upp. De olika verkanssätten är balkverkansbroar, fackverksbroar, linverkansbroar, bågbroar, öppningsbara broar och flytbroar. De två sistnämnda används endast vid vattenpassager och är därför inte aktuella i detta projekt.

6.1 Balkverkansbroar

En balkverkansbro har en eller flera konstruktionsdelar som upptar krafter likt en balk. Balken utsätts för tryckspänningar i överkant och dragspänningar i underkant, vilket kan medföra vissa problem eftersom byggnadsmaterialen ofta har högre hållfasthet för antingen drag- eller tryckspänningar. Detta leder till att det inte blir riktigt lika materialeffektivt som en konstruktion där varje material enbart behöver ta upp rena tryck- eller dragkrafter. En balkverkansbro kan beräknas med vanlig balkteori.

6.1.1 Plattbro

Huvudbärverket i en plattbro utgörs av broplattan. Den är vanligen av armerad betong men kan även bestå av trälameller som är hopspända med stålstag (Vägverket, 2008).

Betongplattor utförs slakarmerade med spännvidd upp till cirka 18 m vid ett spann och 25 m vid flera spann (Vägverket, 1996). Plattbroar kan utföras antingen som fritt upplagda mellan stöden eller kontinuerliga över stöden. Plattbroar är oftast enspannsbroar med fri uppläggning där överbyggnaden är upplagd direkt på ändstöden. Spännarmerade plattbroar är mindre vanliga men kan utföras med spännvidd upp till 35 m. De nämnda spännvidderna avser bronns innerspann. Ytterspannens spännvidd bör vara 50-90 % av innerspannens och ett lämpligt förhållande är 0,8 då detta, vid konstant konstruktionshöjd, ger lika stora påkänningar i de olika spannen. Plattbroar i trä kan utföras med spännvidd upp till 17 m (Vägverket, 2008).

Vid spännvidder över 18-20 m är broplattan ibland utformad med öppna eller slutna ursparingar, hålrum i konstruktionen, för att reducera egentygden (Vägverket, 1996). Enligt Jernström¹ är en hålursparad platta mindre lämplig att förspänna på grund av att den blir mycket tätarmerad och därför kräver ett mycket exakt utförande.

Plattbroar är aktuella då tillgänglig konstruktionshöjd är liten (Vägverket, 1996). Nödvändig konstruktionshöjd är 5 % av spännvidden i innerspann för slakarmerade plattor och 4 % för

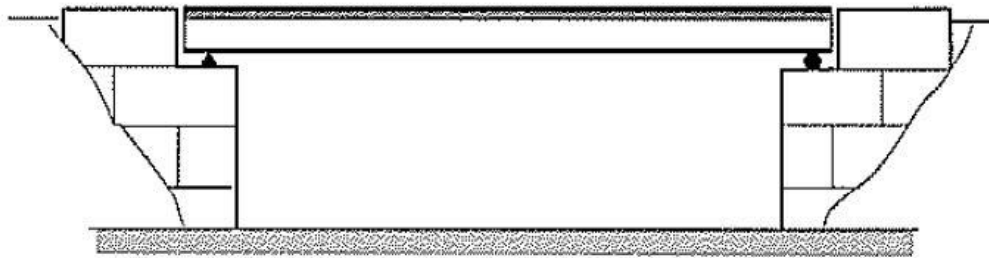
¹ Gunnar Jernström (Specialist, Broavdelningen, Inhouse Tech Infra Göteborg AB) föreläsning den 12 februari 2013

spännarmerade plattor. Vid spännvidder över 16-18 m är dock balkbron mer ekonomisk och därför vanligare.

6.1.2 Balkbro

Balkbrons huvudbärverk består av en eller flera balkar tillverkade i armerad betong, trä eller stål med en brobaneplatta som fungerar som sekundärbärverk (Vägverket, 2008).

Brobaneplattan kan placeras ovanpå eller mellan huvudbalkarna.

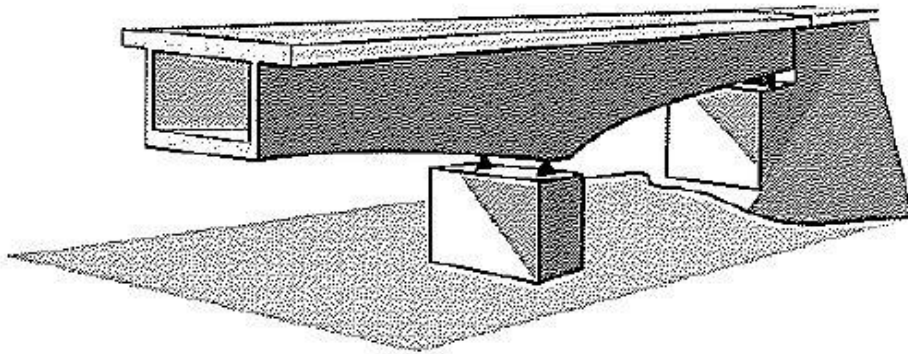


Figur 2 – Balkbro (Ahlberg, 2001, s. 90)

Broarna kan antingen vara fritt upplagda mellan stöden eller kontinuerliga över stöden (Vägverket, 2008). Fritt upplagda balkbroar är oftast enspannsbroar där överbyggnaden är upplagd direkt på ändstöden liksom i figur 2. En sådan bro kan vara lämplig om sättningar av brostöden kan befaras (Vägverket, 1996). Balkbroar utförs i slakarmerad betong med spännvidder upp till cirka 25 m och betydligt längre i spännarmerad betong. I stål utförs de med spännvidder upp till cirka 80 m och i trä 30 m (Vägverket, 2008).

Konstruktionshöjden varierar normalt mellan 7-10 % av spännvidden för slakarmerade balkbroar och 4-7 % för spännarmerade. Stålbalkbroarna kan ha en något lägre konstruktionshöjd, mellan 3,5- 6 % av spännvidden (Vägverket, 1996).

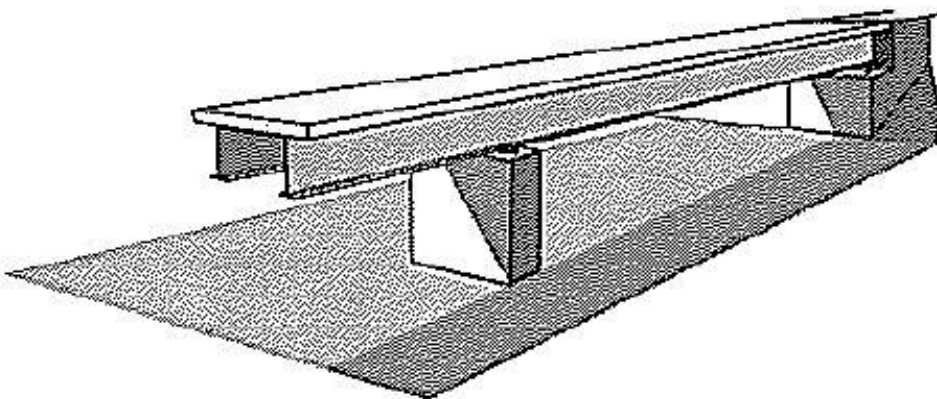
Lådtvärsnitt, som kan ses i figur 3, används för stora spännvidder (Vägverket, 1996). Det är även lämpligt att använda denna typ av balk då överbyggnaden är utsatt för stora vridande moment. Detta kan vara fallet för enpelarbroar eller då brobanan är krökt. Ibland väljs även lådbalkar av estetiska skäl. Av underhållsskäl bör den fria höjden inne i lådan inte understiga 1,8 m (Vägverket, 1996).



Figur 3 – Lådtvärsnitt (Ahlberg, 2001, s. 90)

6.1.3 Samverkansbro

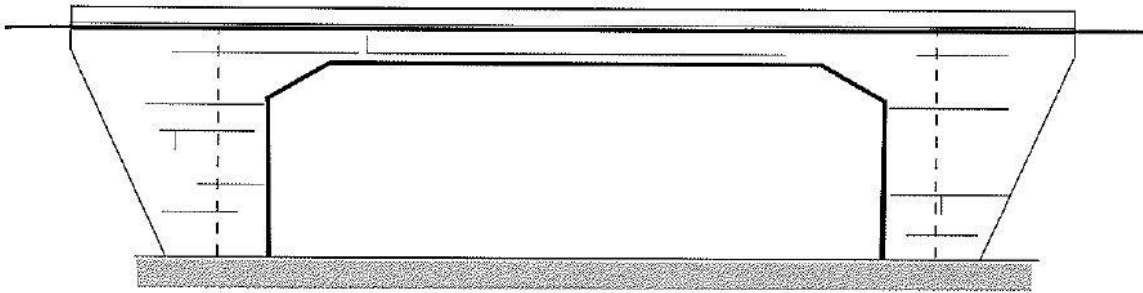
Samverkansbroar är broar där stålbeamb eller ståltråg samverkar med en brobana av betong vilket kan ses i figur 4. Detta uppnås med hjälp av exempelvis svetsbultar (Johansson, 2006). Denna konstruktion har fördelen att betongfarbanan fungerar som tryckfläns, och stålbeambarna tar dragspänningar. Enligt bronormen är det krav att använda samverkan om bron har stålbeamb och betongfarbana med undantag för små broar med valsade beamb (Johansson, 2006). Samverkansbroar är lämpliga på spännvidder upp till 60-70 m. Vid spännvidder upp till 150 m kan samverkansbroar med lådbalk av stål användas, vilket också skapar en god vridstyvhet (Trafikverket, 2012b)



Figur 4 – Samverkansbro (Ahlberg, 2001, s. 90)

6.1.4 Rambro

Rambroar tillverkas i ett element i armerad betong vilket illustreras i figur 5, det är den vanligaste brotypen i Sverige (Vägverket, 1996). De kan vara utformade i ett eller flera spann men normalt byggs de endast i ett spann eftersom det i flera spann är billigare att bygga balkbroar. En rambro konstrueras med fasta inspänningar vid ändstöden. Armeringen är kontinuerlig runt de övre ramhörnens utsidor. I en plattrambro utgörs huvudbärverket av broplattan och i en balkrambro av balkarna (Vägverket, 2008).



Figur 5 – Rambro (Ahlberg, 2001, s. 245)

Med slakarmerad betong är spännvidder upp till 20-25 m normalt ekonomiska (Vägverket, 1996). Spännarmerade rambroar kan utföras med en spännvidd upp till 35-50 m.

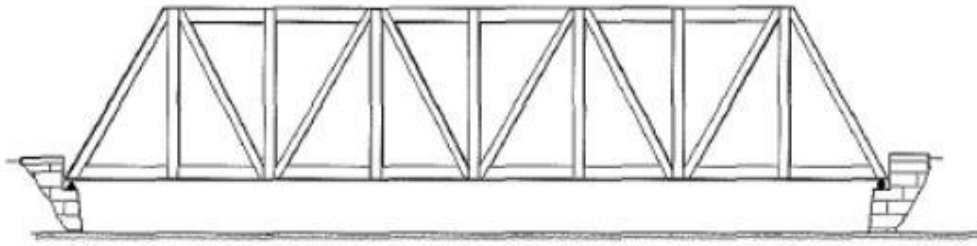
Balkrambroar kräver större konstruktionshöjd än plattrambroar men kan utföras med större spännvidder (Vägverket, 1996). Plattrambroar dominerar dock då hälften av Trafikverkets broar är utförda på detta sätt (Vägverket, 2008).

6.2 Fackverksbroar

En bro som tillämpar fackverkan tar upp rena drag- och tryckkrafter i ett mönster av stänger. Fackverket fungerar till stor del som en balk där överflödigt material har tagits bort. Enligt Plos¹ kan, vid beräkning, fackverksteori eller ramanalys användas.

Fackverksbroar i stål är dyra att underhålla, och byggs därför sällan idag (Vägverket, 2008). Mestadels används de som tillfälliga konstruktioner, eftersom de är enkla och snabba att konstruera. I fackverksbalken ingår en överarmstång och en underarmstång, med vertikala och diagonala stänger som sammanbinder dem, vilket visas i figur 6. I dessa stänger uppträder normalt endast tryckkrafter eller dragkrafter.

¹ Mario Plos (Docent, Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola) föreläsning den 4 februari 2013



Figur 6 – Fackverksbro (Ahlberg, 2001, s. 158)

6.3 Linverkansbroar

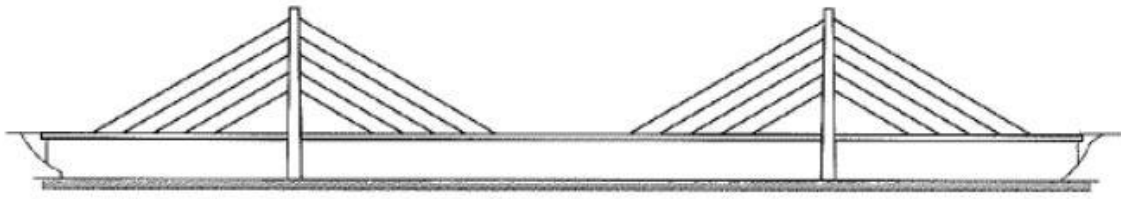
Denna typ av bro bärs upp av kablar eller linor som tar dragkrafter och en eller flera pelare, som kallas pyloner, som tar tryckkrafterna. Att tryck- och dragkrafter delas upp är positivt då pylonerna kan byggas i betong som är starkt i tryck och kablarna kan tillverkas av stål som är starkt i drag. Eftersom kraften är riktad i kabelns riktning fås alltid en horisontell kraftkomponent som måste tas upp, vilket fordrar en kraftigare grundläggning eller en motvikt. Enligt Plos¹ har brobanan i linverkansbroar, till skillnad från balkverkansbroar, ingen bärfunktion utan måste endast vara tillräckligt styv för att fördela lasterna samt vara tillräckligt styv i sig själv.

Då dessa broar ofta är mycket stora blir egentyngden den dominerande lasten. På grund av huvudbärverkets stora utsträckning i både höjd- och längdled blir även vindlasterna stora. Ofta är förstyrningsbalken speciellt utformad för att minimera påverkan av vindlast på huvudbärverket (Vägverket, 2008).

6.3.1 Snedkabelbro

Efter att Strömsundsbron stod klar 1955, som den första lyckade snedkabelbron i världen, så har snedkabelbron blivit en populär bro för spann mellan 100 och 500 m (Vägverket, 1996).

En snedkabelbro består av kablar, pyloner och förstyrningsbalk (Vägverket, 2008). Figur 7 visar en principiell skiss över hur en snedkabelbro är utformad. Snedkabelbroar är smidiga att bygga eftersom de kan byggas utan ställningar. De är också självförankrande både under byggskedet och då de är färdigbyggda (Vägverket, 1996). Detta innebär att snedkablarnas horisontella kraftkomponenter upptas inne i systemet så att endast vertikala laster uppkommer i stödpunkterna. Den successiva utbyggnaden av en snedkabelbro har emellertid vissa gränser. Innan sammanlänkning genomförs i spannets mitt kan brobanan liknas vid en konsolbalk över halva spannet och dess sidostyvhets är det enda som ger konstruktionen stabilitet (Vägverket, 1996). Till följd av detta måste ett längre spann ha en större bredd.

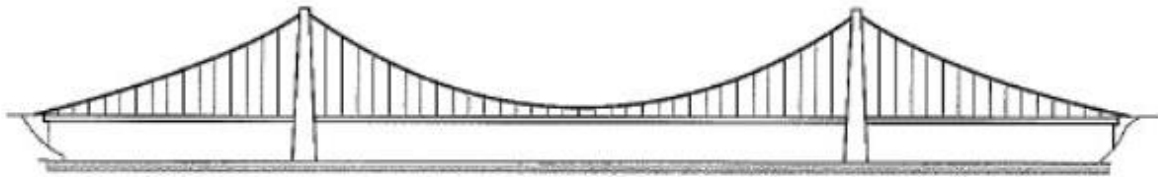


Figur 7 – Snedkabelbro (Ahlberg, 2001, s. 367)

6.3.2 Hängbro

Hängbroar används främst där stora spännvidder erfordras. Denna typ av bro lämpar sig speciellt för spann över 500 m och finns i spann upp till nästan 2000 m (Harazaki, 2000). Precis som snedkabelbroar består hängbroar av kablar, pyloner och en förstyrningsbalk. Hängbron behöver dock förankras i berg eller i stora ankarblock av betong (Vägverket, 2008).

Hängbroar konstrueras utan ställningar. Först monteras huvudkablarna, sedan hissas sektioner av förstyrningsbalken upp och fästes i dessa med hjälp av mindre kablar. Dessa kablar kallas hängare (Vägverket, 1996). Hängbronns uppbyggnad visas i figur 8.



Figur 8 - Hängbro (Ahlberg, 2001, s. 367)

6.4 Bågverkansbroar

Bågverkan fungerar som omvänd linverkan. Detta leder till att bågen, som är det huvudsakliga bärande elementet, utsätts för tryck. Precis som för hängbroar uppstår horisontella kraftkomponenter som måste tas upp med kraftig grundläggning, helst i berg, för att undvika horisontella rörelser i konstruktionen beskriver Plos¹.

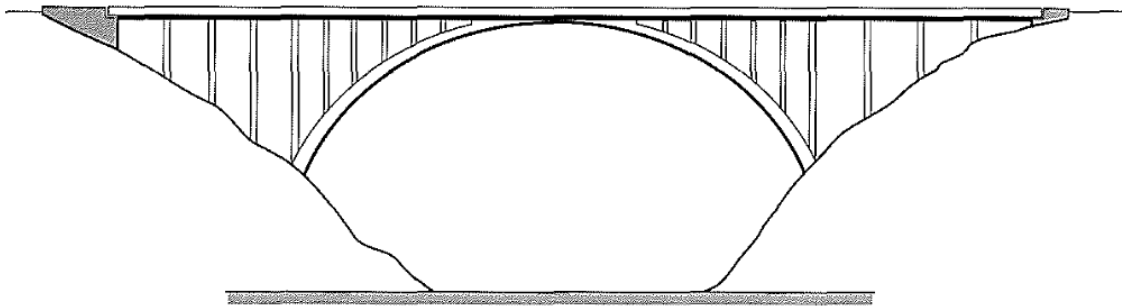
6.4.1 Bågbro

En bågbro kan vara lämplig att använda vid spännvidder över 60 m (Vägverket, 1996). Förr var de vanliga men nu är spännbetong- och stålbalkbroarna vanligare vid dessa spännvidder. Däremot kan en bågbro tyckas vara estetiskt tilltalande och väljas av just den anledningen. Vid större spännvidder byggs en bågbro i betong eller stål men vid mindre kan de även konstrueras i trä (Vägverket, 1996).

¹ Mario Plos (Docent, Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola) föreläsning den 4 februari 2013

Bågbrons huvudbärverk består av en eller flera bågar. När flera parallella bågar används är dessa alltid förbundna med tvärbalkar. Bågarnas form och egentyngd ger upphov till stora tryckkrafter i bågarna vilket starkt bidrar till bärförmågan (Vägverket, 2008). Huvudbärverket kan vara placerat helt under eller helt över brobanan eller under brobanan i kanterna och över i mitten. Pelarna eller stagen som för över krafterna från brobanan till bågen bär dragkrafter om bågen är över brobanan och tryckkrafter om den är under. Figur 9 visar hur utformningen för båge under brobanan kan se ut.

Brobanan utgör sekundärbärverket och kan vara utförd i armerad betong, stål eller trä. Den är ofta uppbyggd av tvärgående och längsgående balkar samt en brobana placerad ovanpå dessa. Den kan också vara utförd som en kontinuerlig platta vilket beskrivs i kapitel 6.1.1. När bågen är placerad över brobanan används ofta hängstag av stål för att uppta dragkrafterna (Vägverket, 2008). Om bågen istället är placerad under vägbanan kan bågpelare av armerad betong användas för att ta tryckkrafterna.

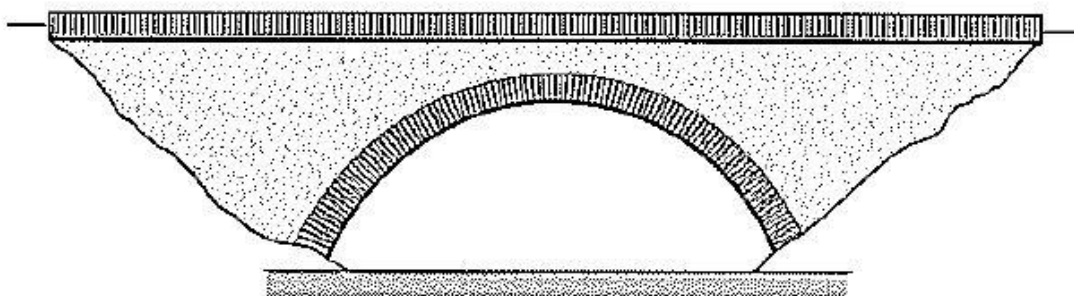


Figur 9 - Bågbro (Ahlberg, 2001, s. 296)

6.4.2 Valvbro

Valvbroar tillhör de allra äldsta brotyperna, och byggs ofta helt i sten (Vägverket, 2008). På grund av höga konstruktionskostnader byggs i princip inga nya valvbroar idag, utan endast renovering av gamla valvbroar förekommer. Valvbroar av betong kan konstrueras med spännvidder upp till 30 m, och kan även konstrueras i flera spann (Vägverket, 2008).

En valvbro fungerar på samma sätt som en bågbro som har huvudbärverket under körbanan. Skillnaden är att valvet är helt täckt med fyllning (se figur 10), som i sig ger upphov till tryckkrafter i huvudbärverket, vilket bidrar till bärförmågan (Vägverket, 2008).



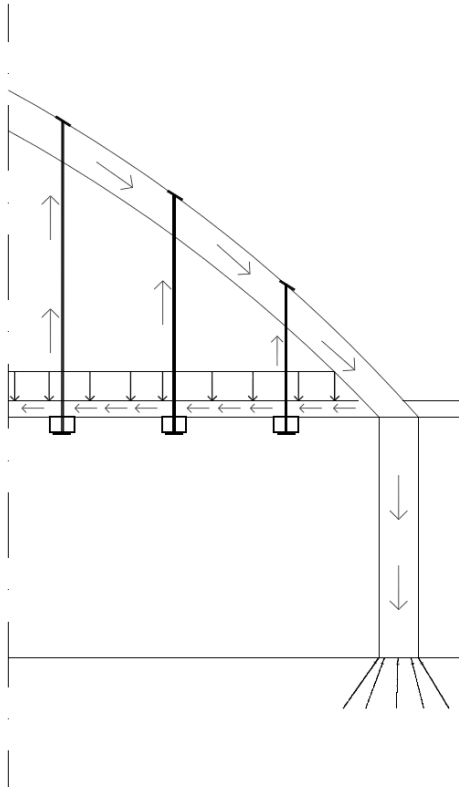
Figur 10 - Valvbro (Ahlberg, 2001, s. 57)

6.4.3 Rörbro

Rörbroar fungerar som valvbroar, där omgivande jord utgör själva valvet (Vägverket, 2008). Denna jord hålls på plats av ett rör, ofta gjort av betong eller korrugerad stål. Rörbroar förekommer vid mindre spännvidder. Den största uppförda rörbron i Sverige har en spännvidd på 15 m (Vägverket, 2008).

6.4.4 Langerbalkbro

En bågbro med förstyrningsbalk där de horisontella kraftkomponenterna i bågen tas upp av förstyrningsbalken istället för grundläggningen kallas langerbalkbro. Förstyrningsbalken fungerar då som dragband och grundläggningen blir mindre komplicerad än för en vanlig bågbro. De vertikala kraftkomponenterna i brobanan leds upp via hängstag till bågen, precis som i en bågbro med bågen över körbanan. I en langerbalkbro är dock bågens böjning beroende av förstyrningsbalken, som håller ihop bågens ändar. Bågen och balken fungerar som en pilbåge med dess sträng, där bågen belastas i tryck och strängen i drag, se figur 11. Därför kallas denna brotyp ofta för pilbågsbro. Ju högre bågen är desto mer kraft kommer gå rakt ner i stöden och då krävs en mindre förstyrningsbalk än om bågen är lägre. I det fallet blir de horisontella reaktionskrafterna, som ska tas upp av förstyrningsbalken, större. I bild 11 visas hur kraftgången i en langerbalkbro fungerar.



Figur 11 - Kraftverkan i langerbalkbro

Tack vare brotypens avsaknad av horisontella stödreaktioner behövs inga yttre horisontella kompressionskrafter för att hålla ihop konstruktionen. Enlig Plos¹ ger detta fördelen att bron kan lyftas på plats färdigbyggd vid mindre byggnationer och att bron inte blir lika begränsad av grundläggningsförhållandena som för en vanlig bågbro. Krafterna från konstruktionen förs ner i grunden på likartat sätt som för andra brotyper (Vägverket, 2008). Langerbalkbroar är fördelaktiga när broäckets konstruktionshöjd behöver begränsas samt vid stora spännvidder (Melbourne, 2008). Stålbalkar med I-, låd- eller rörtvärsnitt är det material som oftast används i bågen och förstyrningsbalken (Fox, 2000).

¹ Mario Plos (Docent, Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola) föreläsning den 4 februari 2013

7 Produktionsmetoder

Under uppresningen av en bro kan en del element utsättas för spänningar som skiljer sig från de som uppstår under användandet (Durkee, 2000). Detta är viktigt att ha i åtanke vid val och utförande av produktionsmetod och se till att rätt åtgärder vidtas. Val av produktionsmetod är beroende av bland annat brotyp, material, spännvidd och platsförutsättningar.

7.1 Betongbroar

När betong används som byggnadsmaterial finns en rad olika produktionsmetoder att välja mellan. För varje produktionsmetod är det ofta möjligt att välja mellan platsgjutning eller prefabricerade element med för- och nackdelar för båda tillvägagångssätten.

7.1.1 Korta spännvidder

Om en kort spännvidd föreligger är en platsgjuten armerad betongplatta den enklaste och mest kostnadseffektiva lösningen (Concrete Bridge Development Group, 2006). Eftersom formsättning och gjutning, vid korta spännvidder, är okomplicerade åtgärder reduceras kostnaderna. Om platsen bron byggs på inte tillåter platsgjutning finns möjligheten att använda prefabricerade betongbalkar. Dessa kan snabbt läggas på plats och är därför särskilt användbara när bron byggs över trafikerade vägar, järnvägar eller vattenvägar där störningar av trafiken måste minimeras.

7.1.2 Längre spännvidder

Med ökad spännvidd ökar också kostnaderna för ställningarna som behövs för gjutning och uppresning (Concrete Bridge Development Group, 2006). För att reducera dessa kostnader bör betongstycken i behov av stöd under härdning delas upp i kortare sektioner, så kallade segment, som antingen kan platsgjutas eller prefabriceras. Det finns ett antal metoder för att sedan sätta ihop segmenten med varandra.

Stegvis lansering

Principen för stegvis lansering är att segmenten gjuts i en anläggning vid ena änden av bron (Sauvageot, 2000). Varje nytt segment gjuts intill det föregående och flyttas, efter att det härdat, fram så det skapas plats för gjutning av nästkommande segment. Fördelen med denna metod är att ställningar kan undvikas. Dessutom behövs varken kranar eller annan tung uppresningsutrustning. Under lanseringen används en lanseringsnos för att reducera de stora moment som uppkommer innan segmenten är på plats (Sauvageot, 2000).

Tekniken är lämplig för långa broar med spännvidder från 15 till 20 m för plattor och från 60 till 70 m för lådbalkar (FIB, 2000). Spännvidderna kan ökas om tillfälliga ställningar används vid lanseringen.

Spann för spann

Spann för spann-tekniken innebär att hela spännvidder sätts samman genom att segmenten hängs upp i en ovan- eller underliggande fackverksram, stödd på bropelarna (Marklund, 2008). Spann för spann, med prefabricerade segment, kan användas när produktionstiden är en avgörande faktor (Sauvageot 2000). Metoden är mest ekonomisk för spännvidder upp till

50 m då storleken på uppresningsutrustningen minimeras vid dessa spännvidder. Det går även att gjuta spann för spann-konstruktioner på plats med hjälp av ställningar, men användning av prefabricerade segment är betydligt vanligare.

Konsoluppbyggnad

Denna teknik innebär att segmenten byggs ut som en konsol från bropelaren (FIB, 2000).

Varje segment spännarmeras så fort det kommit på plats och kan på så sätt bäras upp som en konsol från föregående segment.

Den vanligaste användningen av tekniken är så kallad balanserad konsoluppbyggnad som innebär att segmenten monteras ihop på varsin sida om bropelaren och bildar två konsoler som är i jämvikt med varandra (Sauvageot, 2000). Segmenten kan antingen platsgjutas eller prefabriceras. Platsgjutning passar bäst för långa och oregelbundna spann med få repetitioner. Med prefabricerade segment är uppresningstiden ofta 10 till 15 gånger kortare men det krävs större projekt för att metoden ska vara lönsam (Sauvageot, 2000).

Balanserad konsoluppbyggnad är lämplig för spann från 50 upp till 300 m (FIB, 2000). Det är viktigt att de prefabricerade segmenten inte är för långa, då detta kan leda till stora böjande moment vid uppresning. Vanliga längder på segmenten är 1,8 till 3,5 m. Vid platsgjutning är det vanligt med längder mellan 3 och 4 m. Även om tekniken ofta förknippas med kontinuerliga balkbroar kan den även användas för bågbroar och snedkabelbroar.

7.2 Stål- och samverkansbroar

Uppresningsfasen för en stålbro är ofta mer riskfylld än användandefasen och erfarenhet visar att stora stålbroar oftare kollapsar under uppresning än efter färdigställandet (Durkee, 2000). För stålbroar är därför noggrann planering av produktion och uppresning en av de viktigaste faktorerna för ett lyckat projekt.

Enligt Al-Emrani¹ är den vanligaste stålbrotypen en samverkansbro med farbana av betong. Den kan antingen platsgjutas eller bestå av prefabricerad betong som gjuts fast på studsarna. Stålbalkarna är ofta förhållandevis slanka och behöver därför stabiliseras innan betongen är på plats.

Majoriteten av alla samverkansbroar med måttliga spännvidder byggs med hjälp av kranar (Collings, 2008). Finns det plats och möjlighet att använda kranar är detta den enklaste och mest ekonomiska metoden. Det går även att lansera ut stålbalkarna på samma sätt som beskrivits för betongbroar. För att lansering ska vara ekonomisk behöver bron vara längre än 200 m, ha jämna spännvidder på 40 till 60 m och ha konstant vertikal och horisontell lutning (Collings, 2008). På samma sätt som vid lansering av betongbroar används en lanseringsnos för att reducera de stora moment som kan uppkomma. Även konsoluppbyggnadsmetoden, vilken beskrevs för betongbroar, kan användas vid uppresning av stålbroar.

¹ Mohammad Al-Emrani (Docent, Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola) föreläsning den 12 februari 2013

7.3 Träbroar

Byggandet av broar i trä kräver inte lika mycket utrustning som för betong och stål och kan utföras med mindre beroende av rådande väderförhållanden (Fridley, 2000). Prefabricering är för träbroar det vanligaste och mest effektiva tillverkningssättet (Pousette, 2008). Det eftersträvas att så stor del av arbetet som möjligt utförs på fabrik eftersom detta gör processen effektivare. Mindre träbroar kan levereras helt färdiga att monteras och kan lyftas på plats med kran (Pousette, 2008). Större broar tillverkas i delar anpassade till transport och arbetsplats. De kan antingen monteras bit för bit på fundamenten eller byggas ihop vid sidan om broläget för att sedan lyftas på plats.

8 Val av brokoncept

Då bästa möjliga lösning eftersträvas måste först icke genomförbara alternativ väljas bort. Efter detta första urval definieras de viktigaste egenskaperna och rankas sinsemellan. Varje kvarvarande brokoncept betygsätts sedan i respektive kategori. Betygen viktas med hjälp av rankingen för egenskaperna och summeras till ett slutbetyg.

8.1 Första urval

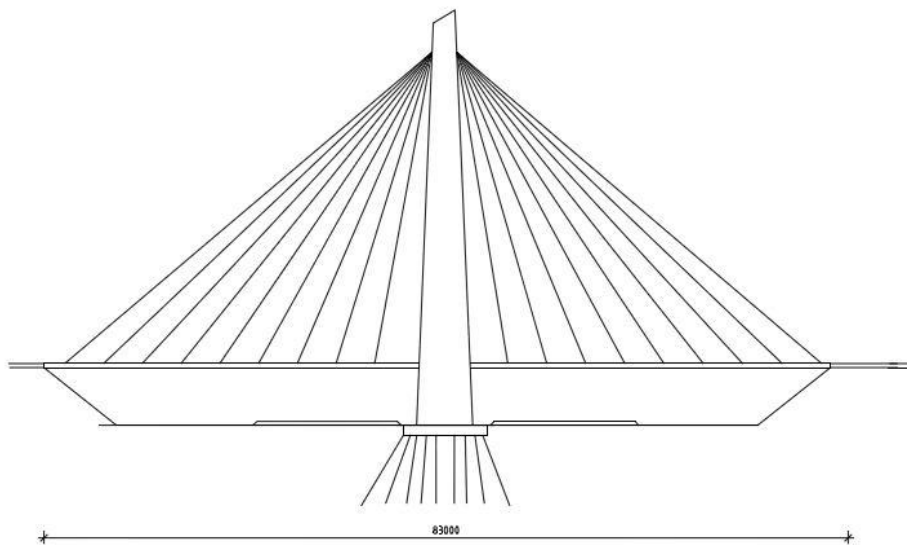
- Rambroar byggs huvudsakligen i ett spann och detta spann överstiger i allmänhet inte 50 m. Vid flerspannsbroar är det oftare aktuellt med en kontinuerlig balkbro eller plattbro. Av dessa anledningar sällas plattrambro och balkrambro bort.
- Med hjälp av kravet på fri höjd och en given vertikalradie beräknas maximal konstruktionshöjd, i bilaga 3, till 1,17 m för en betongbro och 0,77 m för en trä- eller stålbro. Plattbron väljs då bort eftersom balkbroar anses vara mer ekonomiska vid aktuella spännvidder. Eftersom lådtvärsnittet i betong kräver en invändigt fri höjd på 1,8 m utesluts detta alternativ.
- En slakarmerad betongbalkbro med ovanstående konstruktionshöjd har en maximal spännvidd på 15 m, enligt Vägverkets broprojekteringshandbok, vilket utesluter denna typ av bro. En spännarmerad bro respektive en samverkansbro kan byggas med spännvidd på 26 respektive 30 m vilket är möjligt om ett mittstöd uppförs.
- Hängbroar används främst där stora spännvidder erfordras, speciellt för spann över 500 m, och är således inte relevant då aktuell brolängd är 82,7 m.
- Fackverksbroar, som oftast är i stål, är dyra att underhålla. De konstrueras idag framförallt som tillfälliga konstruktioner och är således inte aktuella.
- Konventionella bågbroar kräver mycket goda grundläggningsförhållanden för att ta upp de horisontella krafterna från bågen. Vanligtvis fästs de direkt i berg eller pålas till berg i den vinkeln bågen ansluter till marken, och då avståndet ner till fast berg i detta fall är stort är det inte rimligt att bygga en bågbro.
- Valvbroar är materialineffektiva och därmed dyra. Dessutom är spännvidden så pass kort att stöd skulle behövas nära vägen, och troligtvis mellan körbanorna. Detta skulle medföra stora problem med den fria höjden som krävs ovanför vägbanan, och därför är det inte realistiskt med en valvbro. Rörbroar faller bort av samma anledning.
- En träbalkbro kräver ofta stora dimensioner på balkarna när spännvidden är så pass stor som i detta fall. Eftersom konstruktionshöjden är väldigt begränsad för alternativ i stål och trä så väljs denna brotyp bort.

8.2 Beskrivning av kvarstående brokoncept

Efter det första urvalet kvarstår snedkabelbro, samverkansbro, balkbro och langerbalkbro. Eftersom dessa brotyper fungerar på olika vis, är olika material lämpliga. Därför väljs i detta skede material till de olika brotyperna. Vid valet av slutgiltig brotyp ska en matrisviktning utföras där alla kvarvarande broar och materialkombinationer jämförs.

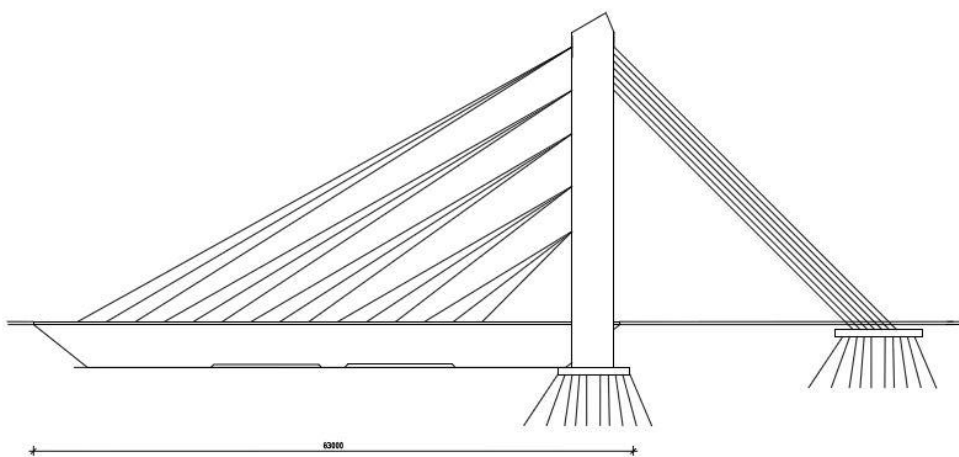
8.2.1 Snedkabelbro

En vanlig snedkabelbro med pylon i mitten, som i figur 12, väljs bort då en betongbalkbro med pelare i mitten skulle kunna ersätta denna. Snedkabelbrons hängverkansfunktion skulle inte utnyttjas på ett effektivt sätt.



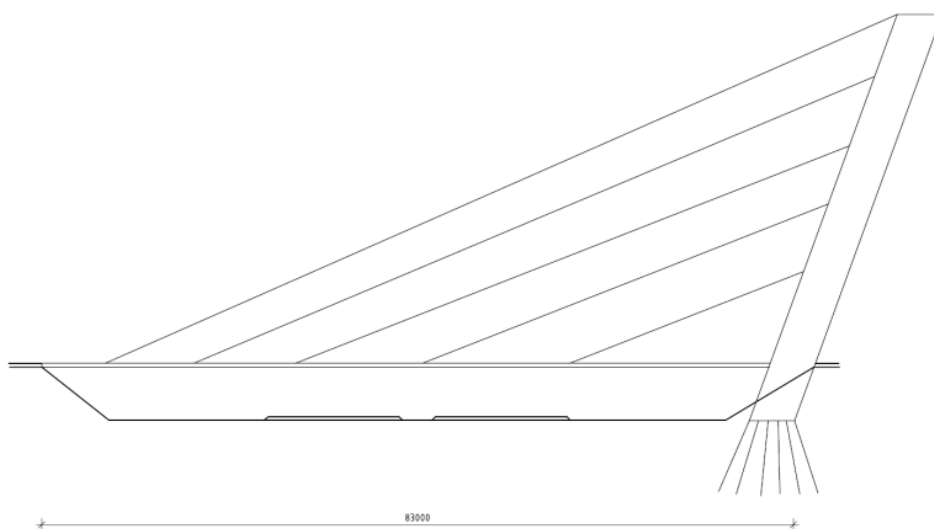
Figur 12 - Symmetrisk snedkabelbro

Ett alternativ till den vanliga snedkabelbron är en asymmetrisk snedkabelbro med pylonen på ena sidan av bron, se figur 13. Kablarna fästs sedan dels i brobanan och dels i marken på andra sidan pylonen. Denna brotyp väljs dock bort då grundläggningsförhållandena inte är tillräckligt goda.



Figur 13 - Asymmetrisk snedkabelbro

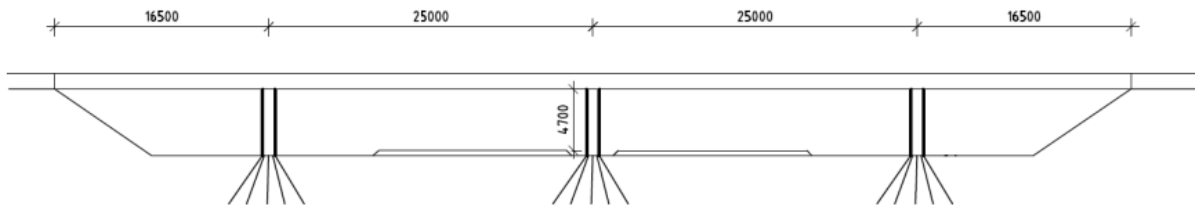
Ett snedkabelalternativ som då återstår är en asymmetrisk snedkabelbro med lutande pylon (se figur 14). Denna brotyp har valts med inspiration från bron Puente del Alamillo i Spanien som har ett huvudspann på 200 m (Casas, 1998). Bron är både estetiskt tilltalande och lämplig eftersom den kan byggas i ett spann och endast behöver kablar från en sida av pylonen för att befinna sig i jämvikt, se figur 14. Eftersom pylonen blir utsatt för tryckspänningar och kablarna dragspänningar är det mest materialeffektivt att konstruera pylonen av armerad betong och kablarna av stål.



Figur 14 - Asymmetrisk snedkabelbro, lutande pylon

8.2.2 Balkbro

Denna brotyp är vanlig i Sverige och utförs i detta fall med fördel i betong. För aktuella spännvidder behöver alternativet spännarmeras. Balkarna gjuts i ett T-tvärsnitt där överkanten, flänsen, även fungerar som körbana. Ett förslag på hur stöden kan placeras visas i figur 15.



Figur 15 – Betongbalkbro

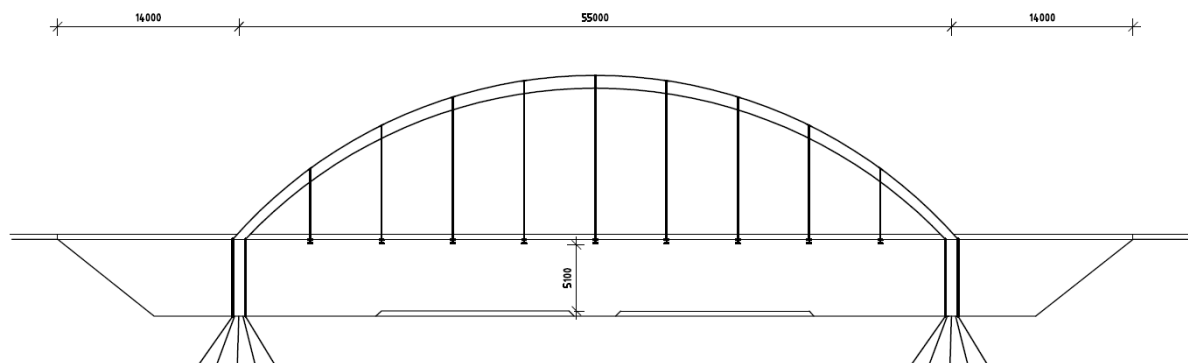
8.2.3 Samverkansbro

På samma sätt som betongbalkbron är samverkansbron lämplig för de aktuella spännvidderna om ett mittstöd uppförs. Enligt Thorsell¹ bör bron utföras som en kontinuerlig balk över stöd för att jämna ut eventuella sättningsskillnader. En samverkansbro består alltid av stålbalkar och betongfarbana och detta är fördelaktigt då balkarna i huvudsak är utsatta för dragspänningar och farbanan tryckspänningar. Stöden skulle för en samverkansbro placeras likt betongbalkbron.

8.2.4 Langerbalkbro

Denna bro anses som estetiskt tilltalande och jämfört med en vanlig bågbro kräver den inte lika goda grundläggningsförhållanden. Bågverkan gör att bron kan användas vid stora spännvidder, se figur 16. Det vanligaste materialet i langerbalkbroar är stål eftersom det är starkt i både tryck och drag. I tryck finns dock risk för buckling. Förstyvningsbalken utsätts för stora dragkrafter då den håller ihop bågen. Det är därför viktigt att materialet kan ta stora dragkrafter.

¹ Mikael Thorsell (Broprojektör, Brotteknik, COWI) handledning den 19 februari 2013



Figur 16 - Langerbalkbro

Ett annat alternativ är att bygga bågen och förstärkningsbalken i trä då det är starkt i både tryck och drag. Det är dock inte hållfast om belastningen uppkommer vinkelrätt mot fiberriktningen, vilket måste tas hänsyn till vid detaljutformningar. Trä har en mindre negativ miljöpåverkan än stål och betong vilket bör beaktas vid materialvalet. Historiskt sett är vägbroar i trä av denna typ ovanlig men de förekommer. Ett exempel på en sådan är den bro som hösten 2013 planeras vara färdigställd utanför Gislaved på väg 27. Bron får en spännvidd på 47 m och blir därmed den längsta i sitt slag i Sverige (Moelven, 2013).

8.3 Utveckling av kvarstående brokoncept

För att kunna avgöra vilket koncept som ska väljas måste olika aspekter beaktas. Brotyperna jämförs, i detta avsnitt, noggrannare än i det första urvalet utifrån produktionsmöjligheter och underhållsbehov.

8.3.1 Produktion

Då den geometriska utformningen skiljer sig kraftigt mellan de fem kvarstående brokoncepten finns stora skillnader ur ett produktionsperspektiv eftersom olika uppresningsmetoder och material kan användas.

Likheter beror framför allt på att samma grundförutsättningar föreligger på anläggningsplatsen och få begränsningar finns för var ställningar, kranar och tillfälliga konstruktioner kan stå. Upplagsmöjligheterna är goda vilket gör att någon större hänsyn inte behöver tas till förvaring av materiel och maskiner även om dessa kommer att skilja sig åt beroende av koncept.

Balkbro

För betongbalkbron kommer allting platsgjutas med formar och ställningar. Detta är den mest kostnadseffektiva lösningen då störningar på grund av byggtiden är små och eftersom platsen gör det möjligt att använda tillfälliga konstruktioner.

I fallet med samverkansbron kan stålbalkarna lyftas på plats med kranar då detta är mer ekonomiskt än lansering. Om längre balkar behövs än vad som kan transporteras svetsas segmenten ihop till större balkar vid sidan om bron innan de lyfts på plats. Betongfarbanan

gjuts på plats efter att stålbalkarna är monterade. Det är även möjligt att använda prefabricerade betongelement men det kan då enligt Thorsell¹ vara problematiskt att få till bra samverkan.

Asymmetrisk snedkabelbro med diagonal pylon

Eftersom den asymmetriska snedkabelbron skiljer sig markant från konventionella snedkabelbrokoncept kommer även produktionsordningen se annorlunda ut. I stället för att börja med att gjuta pylonerna så måste brodäcket vara på plats innan pylonerna gjuts (Casas, 1998). Första steget är att gjuta stöden och underbyggnaden för att sedan uppföra tillfälliga stöd som kan bära upp brodäckselement under uppresning. När brodäcket är på plats gjuts nedre delen av pylonen och sedan byggs resten av pylonen upp etappvis där kablarna fästs efter hand.

Langerbalkbro

Uppförandet av en langerbalkbro i stål för de spännvidder som är aktuella genomförs enligt Al-Emrani² lättast genom att bågen svetsas samman av mindre segment som hålls på plats med hjälp av ställningar. Därefter monteras hängstagen så att förstyrningsbalken kan lyftas upp och monteras med hjälp av kranar. En alternativ uppresningsmetod är att brodäcket, bågarna och hängstagen uppförs samtidigt med hjälp av bakåtförankrade kablar. (Fox, 2000).

Om langerbalkbron byggs i trä eftersträvas att så mycket som möjligt produceras i fabrik (Träguiden, 2006). Storleken på elementen begränsas av hur stora element som kan transporteras.

Om langerbalkalternativet väljs bör bågens spännvidd begränsas genom att till exempel kortare balkbroar konstrueras vid sidorna av mittspannet. Detta eftersom bågens dimensioner inte ska bli för stora.

8.3.2 Underhåll

Med en aktuell livslängd på 80 år behöver inspektioner och underhåll av olika slag utföras på bron. Vilket underhåll som behövs beror främst på aktuellt byggnadsmaterial men också av brotyp, klimat och laster. Bron bör inspekteras med regelbundna huvudinspektioner minst vart 6:e år. Vid en sådan huvudinspektion ska bland annat brister som kan orsaka funktionsnedsättning och trafiksäkerhetsbrister inom en tioårsperiod identifieras. Mellan dessa huvudinspektioner ska regelbundna inspektioner genomföras som syftar till att upptäcka akuta skador och verifiera att underhållet sköts (Pousette, 2008).

Kritiska punkter

Vid de regelbundna inspektionerna är det viktigt att kontrollera vissa kritiska punkter (Wilkes, 1978). I en balk eller pelare är dessa punkter där maximalt moment eller tvärkraft, uppkommer till exempel över mittstöd eller i mitten av ett spann. Där är det viktigt att

¹ Mikael Thorsell (Broprojektör, Brotteknik, COWI) handledning den 19 februari 2013

² Mohammad Al-Emrani (Docent, Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola) föreläsning den 12 februari 2013

kontrollera sprickbildning för broar av betong och trä. Sprickor i trä påverkar inte bärförmågan i någon större utsträckning men däremot blir det lättare för fukt att tränga in och göra skada (Pousette, 2008). I betong påverkar sprickbildningen både bärförmågan och fukttegenskaper (Engström, 2008). I en snedkabelbro är kablarnas infästning i brobanan och pylonen kritiska punkter som måste kontrolleras. Dessa utformas ofta så att skadade kablar kan ersättas utan att trafiken störs (Vägverket, 1996).

Langerbalkbroar bör konstrueras med stor tillförsikt vid förbanden mellan båge och förstyrningsbalk, då stora spänningar föreligger här. Detta är brons svagaste länk och går förbanden sönder kollapsar hela konstruktionen. Erfarenhet av langerbalkbroar i stål från USA visar att just dessa punkter kan leda till stora reparationskostnader (Wilkes, 1978).

Betong

Beständigheten för betong, som till stor del beror av aktuellt klimat, har förr varit ett problem men kunskapen om hur skador förebyggs har vuxit under de senaste åren. De största beständighetsproblemen i Sverige är korrosion av armeringsstålet, frostangrepp och kemiska angrepp (Burström, 2007).

Korrosionsangrepp leder till minskad hållfasthet i armeringsjärnen på grund av att tvärsnittsarean minskar vid oxidationen (Burström, 2007). Den kan även ge upphov till sprickbildning i betongen längs armeringsjärnen som i värsta fall kan ge kraftig spjälkning. Normalt sett är armeringsjärnen skyddade från korrosionen genom passivering på grund av betongens höga alkalinitet. Passiveringen kan dock brytas genom att antingen koldioxid eller klorid tränger in i betongen. Detta problem föreligger speciellt för vägbroar som utsätts för både förhöjda koldioxidhalter från avgaser, och kloridhalter från vägsaltning (Burström, 2007). För att förhindra korrosion är det viktigt att avståndet mellan armeringsstänger och mellan betongens ytterkant och armeringen beaktas (Engström, 2011). Dessa faktorer tar Eurokoderna hänsyn till.

Frostangrepp uppkommer när vattnet i betongens porer fryser till is (Burström, 2007). Eftersom is har lägre densitet än vatten ökar mediets volym när det fryser. Detta kan leda till inre spänningar vilket kan skada betongen. För att motverka detta kan luftporbildande medel tillsättas vid blandning av betongen vilket gör att det skapas luftporer i betongen som vattnet kan expandera i.

Inspektion ska utföras på betongen med både provbilning och bomknackning för att upptäcka urlakning, vittring och spjälkning som kan nedsätta konstruktionens funktion (Trafikverket, 2010a). Vid inspektion mäts också kloridjonhalten och kontroll av karbonatiseringsdjupet utförs. Om skador upptäcks eller karbonatiseringen gått för långt är det enligt Leppänen¹ möjligt att på exempelvis kantbalkar bila bort och gjuta ny betong men om brobanan är skadad finns det risk att hela bron måste rivas.

¹ Joosef Leppänen (Universitetslektor, Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola) intervjuad den 12 mars 2013

Stål

Korrosion utgör ett problem för stål eftersom det enda som krävs är kontakt med vätska och syre. Detta gör att rostangreppen på stål som befinner sig i både vatten och luft blir störst vid vattenytan där både vätska och syre finns (Burström, 2007). En fri stålyta börjar korrodera vid cirka 60 % relativ luftfuktighet och om ytan är smutsig kan fukten kvarhållas och förorsaka korrosion även vid torrare förhållanden (Burström, 2007). Korrosionstakten ökar då ytan utsätts för olika salter, till exempel vägsalt. Dessa förutsättningar gör att alla stålytor måste skyddas.

Underhåll av stålbroar förenklas precis som för träbroar av en genomtänkt projekterings- och produktionsfas. Avledning av vatten med hjälp av lutningar, brunnar, stänkskydd och rännor minskar risken för rostangrepp eftersom vatten inte blir stående (Reuterswärd, 2010).

Stålet skyddas oftast av en rostskyddsfärg (Burström, 2007). Det är viktigt att rätt sorts färg väljs både ur kostnads- och underhållsperspektiv samt att arbetet utförs korrekt. Förzinkning av konstruktionen kan också användas som korrosionsskydd eftersom zink korroderar långsammare än stål under de flesta förhållanden (Burström, 2007). Stålet beläggs då med ett zinkskikt. Även aluminium kan användas som beläggning. Helt slutna rörtvärsnitt på balkar är fördelaktigt då insidan inte kommer att korrodera eftersom inget nytt syre kan tillföras reaktionen. På speciellt utsatta delar av konstruktionen kan rostfritt stål användas. Detta är dock enligt Al-Emrani¹ oftast ekonomiskt ofördelaktigt och används i mycket liten utsträckning.

I underhållsfasen inspekteras främst smuts och klorider som kan leda till rostangrepp men även redan angripna punkter (Trafikverket, 2010a). Ytor av stål ska vara rena från klorider och för ögat synliga föroreningar. Är bron angripen av rost kan det blåstras bort, så länge det handlar om mindre angrepp (Reuterswärd, 2010). För att hålla bron ren tvättas den med högtryckstvätt och om färgen flagnar eller blir tunn får den målas om.

Trä

Innan byggnation kan fuktskador förebyggas genom noggrann detaljutformning som beaktar till exempel vattenavledning och uttorkningsmöjligheter. Detta kallas konstruktivt träskydd och kan till exempel innebära att de bärande delarna täcks in (Carling, 2008). Något annat som bör beaktas är att ändträ inte ska utsätts för fuktpåfrestningar eftersom träet tar upp det mesta av fukten i dessa delar då fukten transporteras i fiberriktningen, se kapitel 4.3. Om det konstruktiva träskyddet utförts på ett väl genomtänkt sätt minskar underhållet på de bärande delarna väsentligt och endast det täckande materialet behöver ersättas (Pousette, 2008).

Enligt Frödelius² är vägtrafikbroar i trä vanligare i Norge än i Sverige på grund av att där är det tillåtet att impregnera träet med Kreosot för att förhindra röta. Detta ska dock inte behövas

¹ Mohammad Al-Emrani (Docent, Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola) föreläsning den 12 februari 2013

² Tomas Frödelius (Säljare, Moelven Töreboda AB) studiebesök den 22 april 2013

för en bro med teknisk livslängd på 80 år, utan det räcker i många fall att täcka in de exponerade delarna med plåt eller träpanel.

Vid inspektion av en träbro mäts främst fukttinnehåll i materialet (Pousette, 2008). Kontroll av att bron hålls ren från vegetation, sand och annat smuts som kan binda fukt sker också. Målning kan utgöra ett skydd mot fukt och UV-strålning och det är viktigt att vid inspektion bedöma eventuellt behov av ommålning. Vägsaltning utgör inget problem för konstruktioner i trä, då materialet och således bärförmåga inte påverkas av detta (Pousette, 2008).

Underhållskostnad

Underhållskostnader för de olika brotyperna är ganska likvärdiga. Träbroar ligger på mellan 1-2 % av återanskaffningsvärdet per år, det vill säga kostnaden för att bygga aktuell bro i nutid, i underhållskostnad (Pousette, 2008). Siffran beror på om brokonstruktionen är täckt eller inte, där det täckta alternativet generellt är billigare. Stålbroad anses generellt kosta 1,4 % av återanskaffningsvärdet per år i underhållskostnad (Reuterswärd 2010).

8.4 Matriskriterier

Vid valet av bro beaktas byggkostnad, estetik och innovation, trafiksäkerhet och körkomfort, byggtid, genomförbarhet, underhållsbehov, underhållskostnader, global miljöpåverkan och lokal miljöpåverkan. Viktningen av kriterierna kan ses i figur 17.

Byggkostnad

Denna post är i de flesta broprojekt av stor vikt men kommer här att ha mindre inflytande på grund av att kostnadskraven i detta projekt inte ska vara avgörande för valet av brotyp. Matrisbetyget utgår från ett resonemang om effektiv materialanvändning, svårigheter i projektering och uppförande samt materialåtgång.

Estetik och innovation

Eftersom bron överbryggar en motorväg kommer många människor uppleva rummet som bron är med och skapar. Därför anses estetiken vara en viktig aspekt. En tekniskt innovativ bro premieras framför en konventionell bro då avsaknaden på kostnadsbegränsning tillåter ett större nytänkande. Betyget motiveras genom en subjektiv bedömning av både estetik och nivån på det innovativa.

Trafiksäkerhet och körkomfort

Kraven från Trafikverket ska uppfyllas av alla brokoncept, men olycksrisken kan ändå skilja mellan koncepten. Körkomforten regleras också den av krav men då vissa brotyper är känsliga för till exempel sättningar, vilket kan försämra körkomforten, är detta relevant att jämföra. Det kan också finnas trafikanter som känner sig osäkra då de kör över en bro. För deras skull bör en bro, som både ser stabil ut och inte nämnvärt märks av vid överfart, konstrueras. Trafiksäkerhetsaspekten har ansetts viktigare än körkomforten.

Byggtid

Valet av produktionsmetod kommer i stor grad påverka tiden som krävs för uppförandet av bron. För betongbroar är det framför allt platsgjutningen som är tidskrävande. Hur stora segment som kan gjutas i en omgång kommer också påverka byggtiden. Även för stålbroad är

byggtiden beroende av hur stora segment som kan uppföras i en etapp. Behöver mindre segment svetsas ihop kommer byggtiden att öka gentemot om de prefabriceras. Förutom att kostnaden minskar vid kortare byggtid är det relevant om trafikstörningar ska minimeras.

Genomförbarhet

Vissa brotyper kräver speciella produktionsmetoder som kan vara mer eller mindre lätta att genomföra. Det som påverkar genomförbarheten är bland annat vilken utrustning som krävs. En del produktionsmetoder kräver fler tillfälliga konstruktioner än andra och ibland krävs omfattande grundläggningsarbete för att det ska vara möjligt att använda stora tillfälliga konstruktioner. Genomförbarheten påverkas också av hur vanlig metoden är. Används ett helt nytt koncept så medföljer fler problem än om metoden är väl beprövad.

Underhållsbehov

Alla brotyper kommer behöva underhåll, men vissa kan vara praktiskt lättare att inspektera och underhålla. Även materialet kommer påverka underhållsbehovet. Eftersom många inspektioner kommer genomföras under bronns livslängd är detta en relevant post att ta hänsyn till.

Underhållskostnader

Eftersom underhållskostnader ligger på mellan 1 och 2 procent av byggkostnaderna per år och bron har en livslängd på 80 år kommer underhållskostnaderna vid slutet av bronns livslängd hamna på ungefär samma nivå som byggkostnaderna. Av denna anledning är underhållskostnaderna viktiga att ta hänsyn till.

Global miljöpåverkan

Här vägs skillnaden mellan de olika byggnadsmaterialen. Materialvalet kommer att medföra olika mycket koldioxidutsläpp beroende på hur materialet framställs och både hur många och långa transporter som krävs.

Lokal miljöpåverkan

Kriteriet tar hänsyn till miljö- och klimatpåverkan av temporära konstruktioner, upplagsplatser, maskiner och produktionsmetoder som upprättas och genomförs på byggarbetsplatsen. Om kemikalier används vid underhållsarbetet kan detta också påverka miljön lokalt.

8.5 Viktning av kriterium

Alla kriterier ställs inbördes mot varandra. Kriterierna som listas vertikalt värderas mot kriterierna som listas horisontellt. Kriteriet tilldelas ett "plus" om det anses viktigare än det horisontella, och ett "minus" om det anses mindre viktigt. Antalet "plus" för varje vertikalt kriterium adderas, och utifrån summan bestäms viktningprocenten. I figur 17 åskådliggörs sammanställningen över detta.

Kriterium	Estetisk och innovation	Trafiksäkerhet	Byggkostnad	Byggtid	Genomförbarhet	Underhållsbehov	Underhållskostnad	Lokal	Global	Summa	Ranking	Viktningprocent
Estetisk och innovation	0	-	+	+	+	+	+	+	+	7	2	18%
Trafiksäkerhet	+	0	+	+	+	+	+	+	+	8	1	20%
Byggkostnad	-	-	0	+	-	-	+	-	-	2	7	7%
Byggtid	-	-	-	0	-	-	-	-	-	0	9	2%
Genomförbarhet	-	-	+	+	0	+	+	+	+	6	3	16%
Underhållsbehov	-	-	+	+	-	0	+	-	-	3	6	9%
Underhållskostnad	-	-	-	+	-	-	0	-	-	1	8	4%
Lokal miljöpåverkan	-	-	+	+	-	+	+	0	-	4	5	11%
Global miljöpåverkan	-	-	+	+	-	+	+	+	0	5	4	13%
										29	45	100%

Figur 17 - Viktning av kriterium

8.6 Jämförelse av brokoncept

Utvalda brokoncept utreds i detta kapitel utifrån nämnda kriterier. I en utvärderingsmatris sammanfattas utredningen med en betygssättning och resultatet blir det slutgiltiga brokonceptet.

Byggkostnad

De billigaste broarna att uppföra av de fem kvarvarande är betongbalkbron och samverkansbron. Långbalkbron i stål kommer vara dyrare eftersom konstruktionen är mer komplicerad och stålåtgången blir större än för balkbroarna. Om trä väljs istället för stål kan byggkostnaden sänkas något eftersom materialkostnaden minskar och trä är enklare att hantera vid transport och byggnation. Eftersom en lutande asymmetrisk snedkabelbro är en mycket komplicerad konstruktion kommer den vara dyr att uppföra.

Enligt Thorsell¹ är grundläggningen i broprojekt ofta en stor kostnad och därför kan det i vissa fall vara värt att minimera antalet stöd som behöver pålas. I detta projekt är grundläggningsförhållandena problematiska då det är långt ner till berget och detta gör att stödplaceringen är viktig att ta hänsyn till. Eftersom balkbroarna utformas med kortare spännvidder, vilket kräver fler stöd, blir också grundläggningen dyrare. Langerbalkbroarna behöver pålas vid respektive ändstöd medan snedkabelbron endast behöver pålas under pylonen. Eftersom pylonens egenvikt blir stor kommer det dock behövas många pålar vilket fördyrar grundläggningen. Lägst egenvikt kommer langerbalkbron i trä få varför det är rimligt att anta att denna får billigast grundläggning. Vid en noggrann beräkning av grundläggningen kan det även visa sig att, för de brotyper som har lägst egenvikt, det går att använda friktionspålar istället för stödpålar. Detta skulle i så fall göra grundläggningen avsevärt billigare eftersom pålarna blir kortare.

Estetik och innovation

Snedkabelbron och langerbalkbroarna bedöms utifrån gruppens egen uppfattning vara de mest estetiskt tilltalande alternativen. Med tanke på snedkabelbrons speciella utformning och trämaterialiet i det ena langerbalkkonceptet anses dessa vara de mest innovativa. Balkbroarna däremot anses inte vara varken innovativa eller estetiska.

Trafiksäkerhet och körkomfort

Trots att kraven uppfylls för alla brokoncept blir trafiksäkerheten något sämre för balkbroarna då de kräver ett mittstöd. Detta är en säkerhetsrisk med avseende på påkörning. Enligt Thorsell¹ utformas idag allt fler broar utan mittstöd på grund av denna risk. Körkomforten bedöms vara likvärdig för alla broalternativ, dock finns personer som har brorädsla och då kan en bro som inte syns vara bra. Balkbroarna är i detta avseende bra medan de andra koncepten står ut från vägmiljön på ett tydligt sätt. Vissa människor upplever också att en träbro ger ett intryck som mindre hållbar än en stål- eller betongbro.

Genomförbarhet och byggtid

Byggtiden kommer i stor grad påverkas av genomförbarheten då problemen som kan uppstå oftast leder till att byggtiden ökar. I matrisviktningen är de dock två olika poster.

De båda balkbroalternativen är likvärdiga när det gäller genomförbarhet. Då platsförutsättningarna gör det möjligt att obehindrat använda ställningar och formar för platsgjutning och kranar för att få stålbalkarna på plats får dessa alternativ anses vara fördelaktigast när det kommer till genomförbarheten. Uppresningen av stålbalkarna kommer gå något fortare än för betongbalkarna men eftersom brobanan ändå kommer platsgutas kan de anses likvärdiga även på den punkten.

Uppresningen av langerbalkbroarna kommer kräva en mer omfattande insats då den består av fler moment. Eftersom träalternativet är lättare än stål kommer större segment kunna prefabriceras vilket förenklar och snabbar på processen.

¹ Mikael Thorsell (Broprojektör, Brotteknik, COWI) handledning den 19 februari 2013

Nya okonventionella brokoncept kräver omfattande forskningsarbete och noggrann övervakning under både byggprocessen och efter färdigställandet. Alamillobron, som är inspiration till den asymmetriska snedkabelbron, är ett exempel på ett projekt där oprövade tekniker använts. Även om det i teorin skulle vara lätt att genomföra så var det i stort sett omöjligt att lyckas i praktiken eftersom avvikelser i geometri och vikt inte kunde undvikas. Då konstruktionen är känslig för sådana avvikelser, och ett fel på 10 % i pylonens eller däckets slutvikt leder till 70 % större inre spänningarna, krävdes omfattande inspektioner och kontroller (Casas, 1998). Detta ledde till att kostnaden och svårigheterna med genomförbarheten för projektet ökade markant i jämförelse med välbeprövade koncept.

Underhållsbehov

Snedkabelbron blir mer komplicerad att inspektera och underhålla än övriga brotyper på grund av dess geometri med en hög pylon och svåråtkomliga kabelinfästningar. För att nå erforderliga höjder behövs en kran vilken täcker minst ett körfält, om inte en stege fästs på eller i pylonen. Langerbalkbron i stål kräver också förhållandevis mycket underhåll sett till erfarenheten av dessa broar i USA. Det finns inte lika mycket erfarenhet från langerbalkbroar i trä, men de är troligtvis likvärdiga med stålalternativet då de har samma kritiska punkter. Ytterligare nackdelar med underhåll av snedkabelbron och langerbalkbron är att stagen eller kablarna kräver noggrann inspektion (Vägverket, 1994). Geometriskt sett är samverkansbron och betongbalkbron de minst komplicerade att inspektera och underhålla eftersom brobanan med dess balkar är förhållandevis lättåtkomliga.

Om konstruktionen produceras på ett korrekt sätt är det inga större skillnader på underhållsbehovet. Förhoppningsvis ska det inte behövas några större reparationsåtgärder för något av de tre materialen om konstruktionen är väl genomtänkt. Målat trä och stål måste dock målas om med jämna mellanrum. Om fel uppstår så att oförutsedda skador faktiskt sker är det oftast svårast och dyrast att reparera om bron är byggd av betong; en sektion av trä eller stål är lättare att byta ut än en av betong. Av de tre materialen förefaller stål vara det alternativet som är lättast att reparera istället för att byta ut, då mindre rostfläckar går att blåstra bort och andra skador går att svetsa. I trä, vid exempelvis rötangrepp, krävs istället ofta att skadade delar byts ut.

Underhållskostnader

Underhållskostnaderna för de olika materialen är likvärdiga. Snedkabelbron blir dock dyrare att underhålla än de andra alternativen på grund av svårigheter att komma åt de kritiska punkterna. Detta gäller i viss mån även langerbalkbroarna, vilket gör balkbroarna till de bästa alternativen när det gäller underhållskostnader.

Global miljöpåverkan

Eftersom stål kräver mycket energi i framställningen och ofta behöver transporteras långa sträckor från utvinningsplatsen till byggplatsen är detta det material som släpper ut mest koldioxid. Betong kräver inte lika långa transporter men framställningen av cement är energikrävande. Cementmängden kan dock minskas för att sänka utsläppen. Betongen kräver också armering av stål. Trä är det bästa byggnadsmaterialet ur miljösynpunkt; det är lätt att transportera och det binder koldioxid under sin livslängd.

Lokal miljöpåverkan

För snedkabelbroarna och balkbroarna där betong platsgjuts kommer omfattande byggnation av tillfälliga konstruktioner och formar krävas. Langerbalkbroarna är enklare att montera och eftersom ett mellanstöd inte behövs så undviks gjutning av ett extra stöd. Elementen kan i stor grad prefabriceras vilket medför kortare monterings- och lägre utsläpp. Dessutom är träalternativet en förhållandevis lätt konstruktion som inte behöver lika stora kranar som stålalternativet.

8.7 Betygsättning av brokoncept

Varje bro får ett värde mellan ett och fem där ett är mycket dåligt och fem är mycket bra. Poängsättningen är inte relativ, vilket gör att flera broar kan få samma värde. I figur 18 kan betygsättningen och resultatet av jämförelsen ses.

Kriterium	Viktningprocent	Snedkabelbro		Samverkansbro		Betongbalkbro		Langerbalkbro, stål		Langerbalkbro, trä	
		5	0,89	2	0,36	2	0,36	4	0,71	4	0,71
Estetisk och innovation	18%	5	0,89	2	0,36	2	0,36	4	0,71	4	0,71
Trafiksäkerhet	20%	4	0,80	3	0,60	3	0,60	4	0,80	4	0,80
Byggkostnad	7%	1	0,07	4	0,27	5	0,33	2	0,13	3	0,20
Byggtid	2%	2	0,04	3	0,07	3	0,07	3	0,07	4	0,09
Genomförbarhet	16%	1	0,16	5	0,78	5	0,78	3	0,47	4	0,62
Underhållsbehov	9%	4	0,36	3	0,27	4	0,36	3	0,27	3	0,27
Underhållskostnad	4%	2	0,09	4	0,18	4	0,18	3	0,13	3	0,13
Lokal miljöpåverkan	11%	2	0,22	4	0,44	3	0,33	3	0,33	3	0,33
Global miljöpåverkan	13%	2	0,27	3	0,40	3	0,40	2	0,27	4	0,53
Total poäng	100%		2,62		2,96		3,00		2,91		3,16

Figur 18 – Betygsättning av brokoncept

9 Slutgiltigt brokoncept

Matrisviktningen och resonemanget kring detta visar att en langerbalkbro i trä är det bästa brokonceptet på den aktuella platsen.

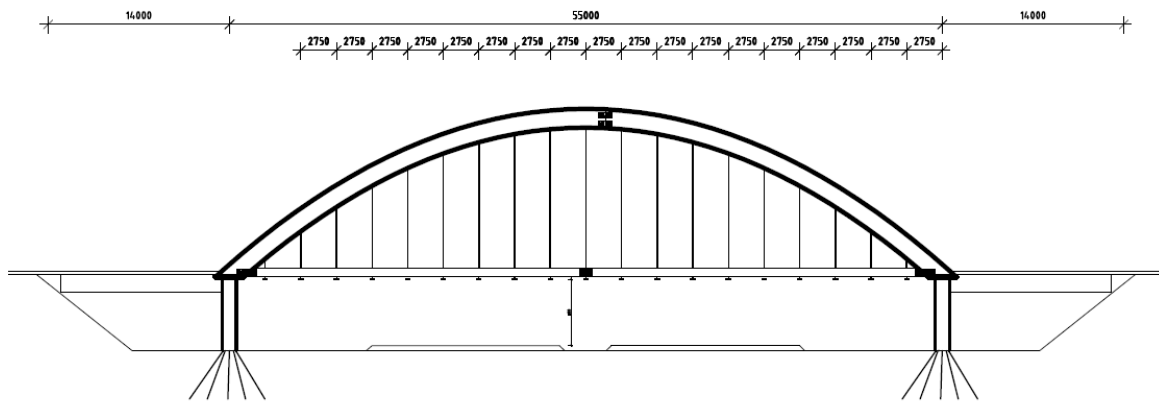
Pelare måste placeras minst 10 m från vägbanan och pelarens radie antas behöva vara 1 m (Vägverket, 1996). Då väg 40 är 33 m bred och brospannet definieras som centrumavståndet mellan pelarna blir minsta möjliga spann 55 m, vilket väljs. Detta innebär att det på vardera sida om bågen kommer vara en cirka 13 m lång balkbro på två eller flera stöd. Även denna balksektionen byggs i trä vilket bör vara genomförbart eftersom ytterspannen inte kommer ha något krav på konstruktionshöjd. Alternativet hade varit att konstruera hela bron i ett spann på 82,7 m. Detta förkastas då materialåtgången hade blivit stor. Dessutom hade varje båge fått delas i tre eller fyra delar istället för två, eftersom maximal fraktlängd är 30 m (TSFS, 2010). Det valda brokonceptet med två sidospänn anses uppfylla syftet med en innovativ och estetisk träbro lika mycket som brokonceptet utan pelare.

Med ett ÅDT på 3000, en hastighetsbegränsning på 70 km/h och en god vägstandard erfordras en vägbredd på 8 m (Trafikverket, 1994). Detta adderat med förstyrningsbalkarna som ska dimensioneras och erforderliga avstånd mellan väg och förstyrningsbalk ger bronns totala bredd på 9,1 m.

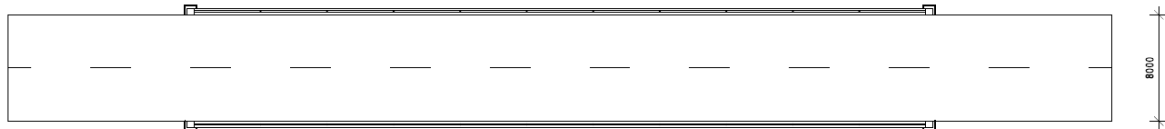
9.1 Mittspännets utformning

Brons mittspänn kommer vara en bågbro med förstyrningsbalk. Dess bärande delar fyller alla en tydlig funktion i kraftens väg genom bron. I figur 19 – 21, på nästa sida, visas det slutliga brokonceptet i profil, plan och tvärsektion.

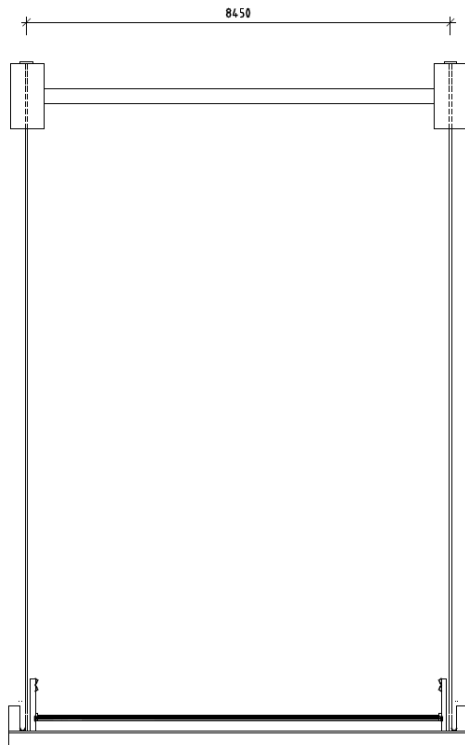
Broplattan antas uppta trafiklasten och leda den i bronns längsriktning till tvärbalkar. Dessa är infästa i bågen med hjälp av stag som för över dragkrafter till bågarna. Bågarna blir utsatta för tryck och kraften förs längs bågarna ner i stöden. Härifrån leds kraften, via pålar, till undergrunden. Eftersom horisontalkrafter i stöden ska undvikas hålls bågen ihop av en förstyrningsbalk som blir utsatt för dragspänning.



Figur 19 – Bro, profil



Figur 20 - Bro, plan



Figur 21 - Langerbalkbro, tvärsnitt

9.1.1 Broplatta

En massiv platta av Kerto antas ta upp trafiklasterna och vikten av asfaltslagren i längsriktningen. Plattan är 8 m bred, vilket är lika brett som vägen, och bör därför bestå av ett antal Kertobalkar som spänns ihop med spännstag som går genom balkarna i tvärled. Kerto väljs i plattan då det ger något lägre konstruktionshöjd, än limträ.

9.1.2 Tvärbalk

Tvärbalkarna ska bära plattan och dess trafiklast, kantbalkarna, räcken, samt avrinningsränna (Se figur 21). Utanför stagen, som bär upp tvärbalken, finns förstyrningsbalkarna. Tvärbalkarna blir då drygt 9 m långa. De antas ta stora krafter och dimensioneras till en början i det starkare trämaterial Kerto. På grund av den låga konstruktionshöjden kan det, i dimensioneringen, visa sig att en Kertobalk inte har tillräcklig kapacitet. I sådana fall krävs en stålbalk.

9.1.3 Kerto

En form av limträ med väldigt tunna lameller kallas Kerto. Det består av hoplimmade fanérlager, 3 mm tjocka, av furu eller gran (Moelven). Det finns två sorters Kerto, varav den ena, Kerto-S, har fiberriktningen i balkens längsriktning. Den andra, Kerto-Q, har vissa tvärgående lager vilket gör att den även är lämplig att använda som skiva.

Bärförmågan är 44 MPa vid böjning parallellt fibrerna vilket är bättre än vanligt limträ (Moelven). Nackdelen är att Kerto inte står emot fukt lika bra som limträ. Detta eftersom lamellerna är tunnare och fler fibrer blir exponerade för luftens fuktighet längs med balkens ovansida.

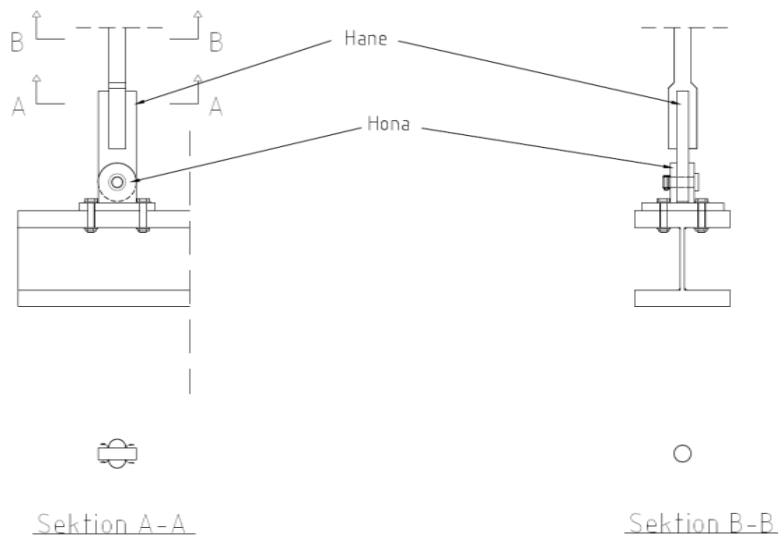
Kerto-S utvidgas relativt mycket då det utsätts för fukt, eftersom alla fanér är orienterade i samma riktning. Om risk för stora fuktrörelser föreligger är det därför bra att använda Kerto-Q där de tvärgående fanéren minskar fuktutvidgning (Moelven). Det finns risk att en balk böjer sig om det kommer väta på ena sidan av balken. Materialet ytbehandlas för att öka beständigheten på liknande sätt som konstruktionsvirke.

9.1.4 Stag

Stagen mellan bågen och tvärbalkarna kommer vara i stål och är de enda konstruktionsdelar, förutom förbanden, som från början var tänkt att konstrueras i annat material än trä. Dessa stag kommer att gå genom bågen, för att inte utsätta denna för rotationskrafter, och sedan vertikalt ner till en tvärbalk.

9.1.5 Infästning mellan tvärbalk och stag

Vid infästningen mellan stag och tvärbalk finns en kritisk punkt eftersom tvärbalken endast hålls uppe av ett stag i varje ände. Infästningen utförs som ett skruvförband mellan tvärbalken och en hängare och ett svetsförband mellan stag och en platta. Plattan och hängaren förbinds sedan med en sprint (se figur 22). Innan monteringen på byggsplatsen kan plattan svetsas till staget och skruvförbandet fästas vid tvärbalken. På byggsplatsen återstår då endast att trycka in sprinten mellan hängare och platta, vilket utförs medan en lyftkran håller tvärbalken på plats.



Figur 22 - Infästning mellan tvärbalk och stag

9.1.6 Infästning mellan båge och stag

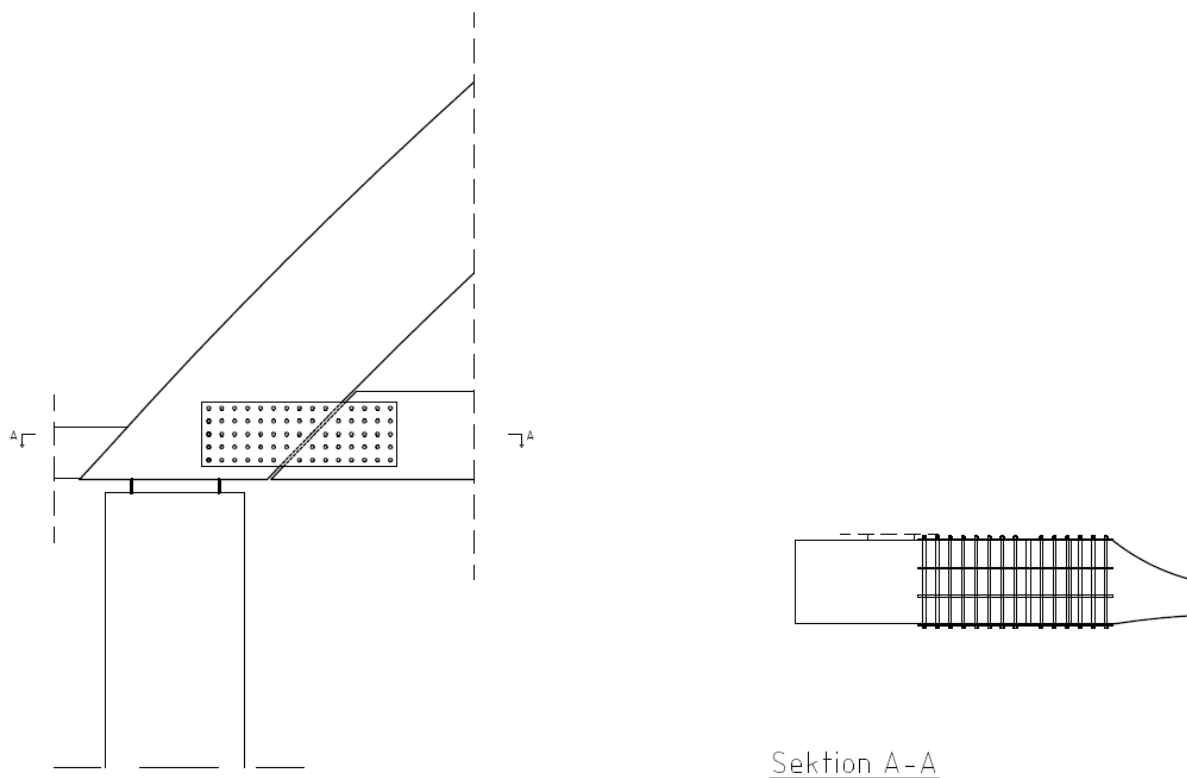
För att fästa staget i bågen krävs en infästning som omvandlar dragkraften i staget till tryckkraft bågen. I drag vinkelrät fibrerna har trä låg hållfasthet och belastning i denna riktning bör därför undvikas. Av denna anledning överförs krafterna till bågen genom tryck ovanifrån med hjälp av en platta som fästs i staget. Staget svetsas till denna platta.

9.1.7 Båge och förstyrningsbalk

Båghöjden, h , i mitten av spännlängden, L , bör vara på $L/6=9,2 \text{ m} < h < L/4,5=12,2 \text{ m}$ (FOX, 2000). Båghöjden väljs till 12,2 m eftersom en högre båge ger mindre dragkraft i förstyrningsbalken och på så sätt en mindre area på denna. Två bågar behövs, en på var sida om vägen. Detta eftersom en delad väg med båge i mitten önskas undvikas. Mellan de två bågarna erfordras horisontella stag, i detta fall av limträ. Dessa stabiliserar bågarna mot rotation kring brons längdaxel, vilket uppkommer av horisontella krafter såsom vindlast. Då stora dimensioner på bågarna förväntas, och maximal bredd på limträbågelement är 0.215 m, kommer enskilda limträbågelement limmas ihop.

9.1.8 Förband mellan båge och förstyrningsbalk

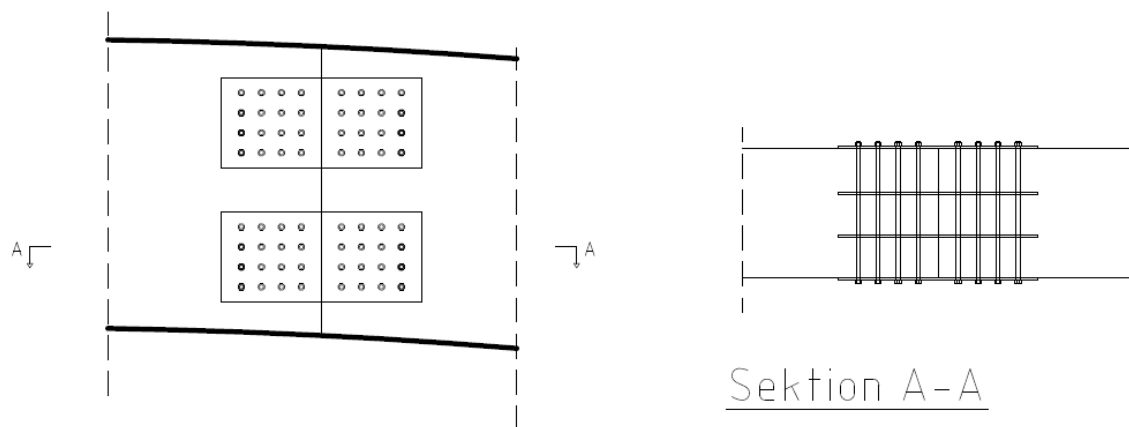
Dessa förband kommer överföra stora krafter och dessutom med en vinkel över 40 grader gentemot fiberriktningen i bågdel, vilket kräver speciell lösning. En limträleverantör kan placera skruvplåtar mellan ihoplimmade balkar vilket ger en plåt i varje springa och en på varje sida, se figur 23. Eftersom förstyrningsbalkarna enbart tar dragkraft behöver dimensionen på dessa inte vara lika stor som för bågarna. Således breddas förstyrningsbalken mellan sista staget och bågen så att den får samma bredd som bågen och kan därmed få passande hål till plåtarna. Även höjden på förstyrningsbalken kan behöva utökas på denna sträcka beroende på förbandets dimensioner. Denna lösning kommer att bilda ett flerskärigt stål-träförband med plana plåtar och genomgående skruv (Johansson, 2011c).



Figur 23 - Förband mellan båge och förstyrningsbalk

9.1.9 Skarvförband båge

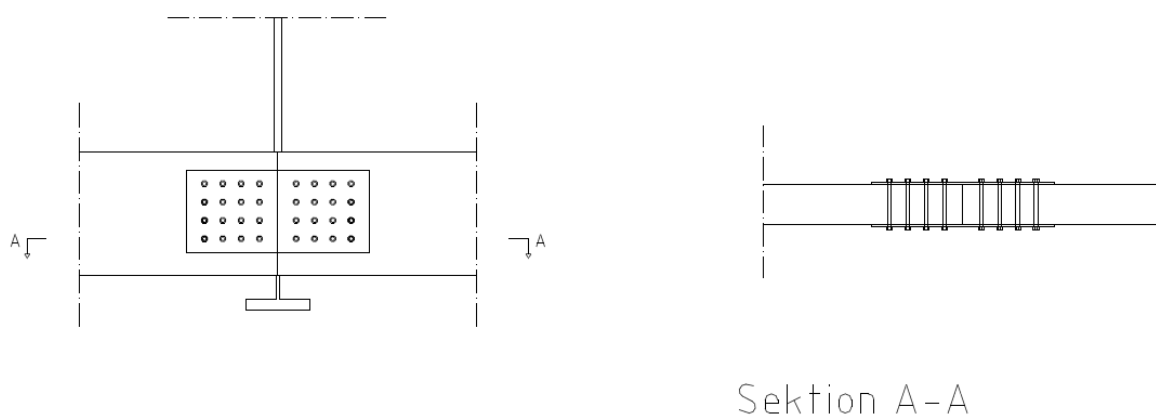
Bågen som bär upp bron är, på grund av sin längd, tvungen att tillverkas i två delar och sammanfogas på byggplatsen. Förbandet som sammanfogar delarna räknas som momentstyvt och måste därför dimensioneras för att ta upp momentet som uppstår mitt på bågen. Eftersom bågen är hög kommer förbandet kunna utformas med hjälp av en plåt i överkanten av bågen och en i underkanten. För att få tillräckligt mycket kapacitet kan plåtar slitsas in i mitten av bågen på samma sätt som förbandet mellan båge och förstyrningsbalk. Dessa plåtar kan kompletteras med andra mitt på bågen om tvärkraften så kräver, enligt figur 24.



Figur 24 - Skarvförband båge

9.1.10 Skarvförband förstyrningsbalk

Eftersom förstyrningsbalken är över 50 m lång kommer den inte kunna transporteras i ett stycke, utan delas i två lika stora element. Mellan dessa två element måste ett förband konstrueras som klarar av dragpåkänningarna som uppkommer i förstyrningsbalken. Detta löses med hjälp av ett vanligt stål-träförband med plana plåtar och genomgående skruv. Dessa plåtar placeras på de båda sidorna av förstyrningsbalkselementen, se figur 25.



Figur 25 – Skarvförband förband

9.2 Sidospänn

De två sidospänn kommer konstrueras som balkbroar, där en limträplatta bärs upp av längsgående limträbalkar. Balkarna tar upp krafterna i längsled, och plattan tar upp krafter i tvärlid. Plattan byggs i limträ då inget krav på konstruktionshöjd föreligger. Limträbalkarna i plattan spänns ihop på liknande sätt som för plattan i mittspänn.

9.3 Stöd

Bron kommer sammanlagt stå på sex stöd. Två av dessa kommer utgöras av markanslutningen i början och slutet av bron, och här kommer även en vingmur av betong konstrueras. De andra fyra placeras vid anslutningarna mellan mittspannet och sidospannen. Dessa stöd kommer konstrueras som kvadratiska pelare av limträ som placeras på betongfundament.

Betongfundamenten skapar stabilitet för pelarna, men fungerar också som konstruktivt träskydd, då de skyddar träet i pelaren från fukt i marken. Pelarna kommer vara ledade vid anslutning till bron, men fast inspända vid betongfundamenten. Eventuellt förbinds stöden med horisontella balkar för att skapa ytterligare stabilitet.

9.4 Detaljer

Utöver de bärande delarna måste bron utrustas med komponenter som upprätthåller dess funktion under livslängden. Utvalda komponenter beskrivs nedan.

9.4.1 Kantbalkar och stödräcken

Stödräcken är fästa i kantbalkarna på båda sidorna av vägen (Se figur 21). Kantbalkens främsta funktion i brokonceptet är att hålla asfaltsbeläggningen på plats. Vid olycka är det också meningen att ett fordon's hjul ska gå emot kantbalken innan bilen hålls kvar på vägbanan av räckena.

9.4.2 Ytavrinning

Vägen utformas med tvärfall så att avrinning i tvärled sker. I längsled är vägen inte horisontell utan har en vertikalradie på 1800 m, vilket motverkar vattenansamling. För att uppnå en god vattenavrinning från bron görs ett hål i kantbalken var tionde meter (Trafikverket 2011). Detta hål leder till en vattenränna som leder vattnet till pelarna respektive brons ändkanter. Rännans placering i tvärsnittet är högre i mitten av de tre brodelarna än vid ändkanterna och pelarna, för att lutning och därmed effektiv avrinning ska fås.

9.4.3 Konstruktivt träskydd

Det konstruktiva träskyddet syftar till att skydda träet från fukt och solljus, och måste utformas på ett genomtänkt sätt för att bron ska få önskad teknisk livslängd utan kemisk behandling av träet. Det viktigaste är att skydda de bärande konstruktionerna, och därför kläs bågarna och förstyrningsbalkarna med panel längs sidorna och med plåt på ovasidan, enligt Frödelius¹. Utsidan av broplattorna och utsidan av sidospannens längsgående balkar täcks också med panel. Resterande konstruktionsdelar är antingen skyddade av asfaltslagren med tillhörande isoleringsmatta eller så är de placerade under bron. Inga trädetaljer får utsättas för kontakt med marken, eller vara alltför nära denna, då de kan suga upp väta.

9.5 Produktionsgång

Produktionskedjan inleds med att erforderligt markarbete genomförs. Vid brons planerade markanslutning gjuts vingmurarna. Under platsen där brons pelare ska stå slås pålar ner till erforderligt djup, varpå betongfundamenten gjuts. När dessa härdat till tillräcklig hållfasthet kan brons limträpelare resas och fästas in i fundamentet. En tvärgående balk lyfts och

¹ Tomas Frödelius (Säljare, Moelven Töreboda AB) studiebesök den 22 april 2013

förankras ovanpå pelarna varefter samma förfarande används för de längsgående limträbalkarna mellan pelare och landfäste.

Därefter övergår produktionsgången till att montera mittspannet och brons langerbalkdel. Först sammanförs de båda bågarnas två delar med momentstyva förband. Därefter lyfts dessa på plats ovanpå pelarna och hålls fast medan infästningen mellan pelare och båge inrättas. I denna infästning ansluts även förstyrningsbalken som nu förbinder bågändarna. I nästa steg monteras hängstagen i bågen varpå de tvärgående I-balkarna hängs upp i dessa. Eftersom de tvärgående stagen inte har monterats kan det temporära systemet ännu inte anses tillräckligt styvt för att bära sin egentyngd samt vindlast och behöver därför fortsatt stabiliseras med temporära ställningar. De tvärgående stagen monteras sist eftersom broplattan lyfts på plats ovanifrån.

Nu saknas endast broplatta och tvärgående stag mellan bågarna för att alla brons bärande delar ska vara på plats. Broplattan är av transportskäl uppdelad i längsled och tvärlängd och dess delar sammanförs enklast före den lyfts på plats. Eftersom plattan består av trä och inte är särskilt tjock är själva lyftet genomförbart även om dess längd i mittspannet överstiger 50 m. Först nu kan de tvärgående stagen mellan bågarna monteras och därefter kan de temporära ställningarna tas bort. Broplattan, som hålls samman av spännstag, spänns åt i omgångar även efter att monteringen av brons bärande delar är genomförd.

För att anpassa bron för vägtrafik och skapa ett hållbart klimatskal finns flera viktiga delar kvar i produktionsgången. Exponerade konstruktionsdelar av trä kläs med plåt och panel. Enligt Frödelius¹ genomförs detta sent i produktionsledet eftersom det konstruktiva träskyddet annars kan ta skada vid montering av andra konstruktionsdelar. Ovanpå broplattan läggs först en isoleringsmatta och sedan asfalt uppdelat i bind- och slitlager. Stödräcken sätts på plats och ytavrinningsystem uppförs. Vidare målas och markeras asfalten på vägbanan och reflexsystem installeras.

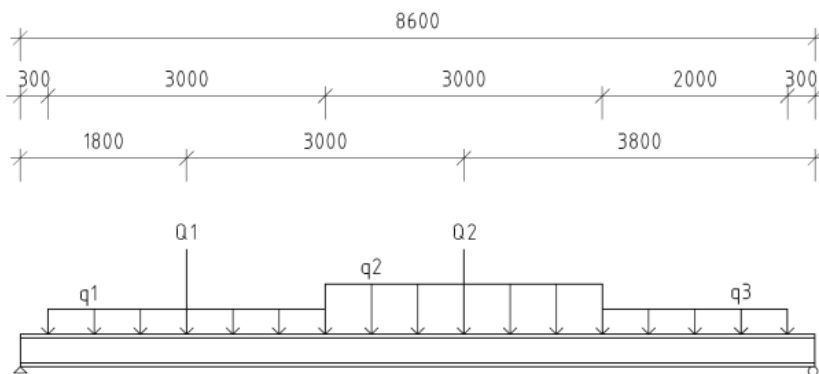
¹ Tomas Frödelius (Säljare, Moelven Töreboda AB) studiebesök den 22 april 2013

10 Dimensionering

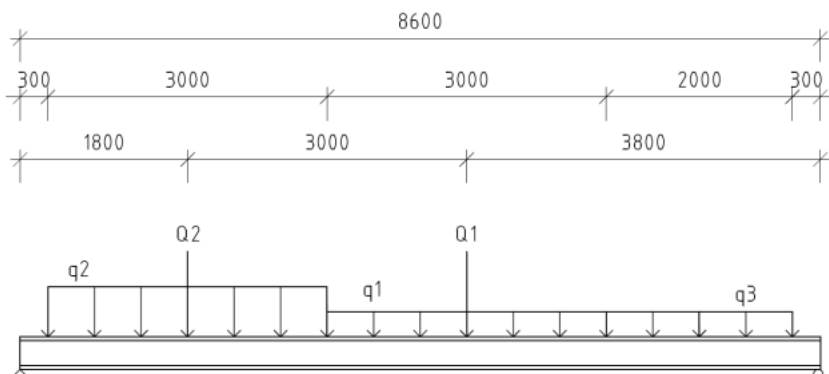
Dimensioneringsprocessen är ett iterativt arbete; från ett initialt antagande utförs finare och finare beräkningar. Under processens gång ändras ofta delar av konceptet då beräkningarna visar att vissa delar måste bytas ut. Till exempel kan materialval behöva ändras, framförallt på grund av den låga konstruktionshöjden, vilken är dimensionerande i många fall.

10.1 Lastframtagning

Den första beräkningen som behöver utföras i dimensioneringsprocessen är lastframtagningen. Bron bedöms vara som mest belastad då lastmodell 1 i EN1991-2 används. Där anges att bron ska delas in i 3 m breda lastfält. Varje lastfält belastas av två axellaster och en utbredd trafiklast. Överbliven bredd ska kunna bära endast en utbredd last. Två olika lastfall har utretts; lastfall 1 som har den största axellasten och den största utbredda lasten i mittfilen och lastfall 2 som har de största lasterna i den bredaste sidofilen. Lastfall 1 utreds eftersom det kommer ge störst moment och lastfall 2 utreds eftersom det kommer ge störst tvärkraft. Båda lastfallen exemplifieras i figur 26 och 27.



Figur 26 - Lastfall 1



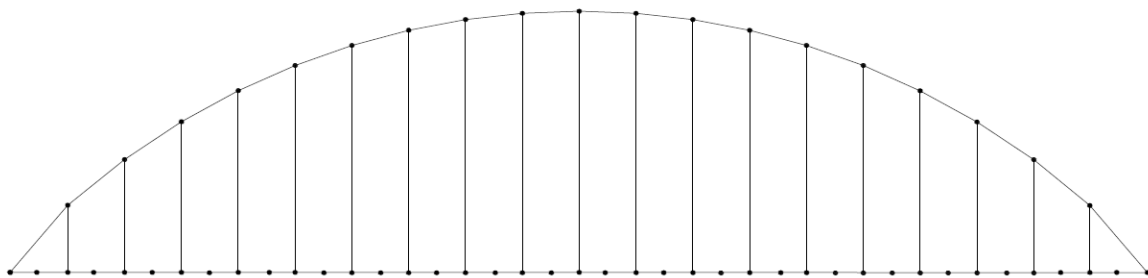
Figur 27 - Lastfall 2

De två axellasterna förenklas som en punktlast mitt i lastfältet, eftersom bronns spännvidd är mer än 10 m lång enligt SS-EN1991-2. Vidare bedöms lastfall 6.10a enligt SS-EN1990 bli dimensionerande. Detta innebär att egenvikten ska reduceras med en faktor eftersom trafiklasten är huvudlast. Alternativet, lastfall 6.10b där trafiklasten reduceras, blir inte dimensionerande eftersom trafiklasten är mycket större än egenvikten. Enligt formel 6.10b i SS-EN1990 beräknas dimensionerande laster genom att en säkerhetsfaktor multipliceras med den karaktäristiska lasten.

10.2 Broplatta och tvärbalk

Då lastmängden har beräknats fortsätter processen med att broplattan och tvärbalkarna dimensioneras. Dessa konstruktionsdelars dimensioner beror till stor del av varandra eftersom dimensionerande tvärkrafts- och momentfördelning för plattans tjocklek beror av cc-avståndet mellan tvärbalkarna och tvärbalkarnas dimensioner av broplattans egentyngd. Deras sammanlagda höjd är begränsade av den föreliggande maximala konstruktionshöjden. Således är iterering nödvändig för en optimerad lösning av problemet. För att minska belastningen på plattan och tvärbalkarna kommer cc-avståndet mellan tvärbalkarna behöva hållas nere.

När cc-avståndet mellan tvärbalkarna är framtaget kan broplattan dimensioneras för den mest belastade en-metersstrimlan. Detta utförs med en CALFEM-modell i MATLAB där hela bågsektionen av bron är inlagd. Plattan består av 40 balkelement för att axellasten ska kunna placeras både vid och mellan stagen (se figur 28). Bågen har approximerats med raka balkelement mellan stagen. Stagen och förstyrningsbalken har modellerats som stångelement eftersom de till största del kommer ta upp dragspänningar. För att ta reda på största moment och tvärkrafter studeras vilken placering av axellasten som ger det värsta fallet. För fallet med värst moment tas de utbredda trafiklasterna därefter bort i de fack där plattan har en dragen översida.



Figur 28 - Elementindelning i CALFEM-modellen

De tvärgående balkarna dimensioneras genom att beräkna tvärkraft- och momentfördelning i tvärledd. Balkarna modelleras som en fritt upplagd balk i ett spann, belastade av trafiklasterna (lastfall 1 och lastfall 2), samt dess egentyngd och tyngden från plattan och beläggningen.

Även olycksfall studeras och det innebär att ett stag går av, vilket medför att de närliggande

tvärbalkarna och stagen får ta upp större laster. De dimensionerande lasterna minskas dock i detta fall genom att säkerhetsfaktorn sätts till 1,0 samt att ett olycksreduktionstal läggs till. Balkarnas tvärkraft- och momentkapacitet kontrolleras sedan utifrån momentet och tvärkraften som uppstår i detta fall. Plattans momentkapacitet och tvärkraftskapacitet kontrolleras också för detta olycksfall.

10.3 Stag

Från dimensionering av tvärbalken med lastfall 2, fås maximala stagkraften som den största reaktionskraften på tvärbalken. Denna används för att dimensionera stagen, som antas bestå av massiva cirkulära stålstänger, och även förbandet mellan tvärbalk och stag enligt kapitel 9.1.5.

10.4 Infästning mellan båge och stag

För att staget ska kunna överföra dragkraften till bågen utan att träfibrerna i bågen lokalt går sönder väljs en lösning där staget går igenom bågen och fästs till en platta som fördelar trycket på en så stor yta att fibrerna inte trycks ihop.

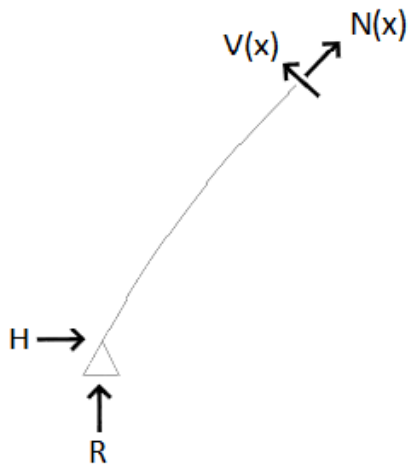
10.5 Båge och förstyrningsbalk

Den utbredda trafiklasten och trafikpunktlaster multipliceras med en filfaktor som beräknas enbart för båg- och förstyrningsbalksdimensioneringen. De två bågarna antas ta upp lika stor andel av egentyngden.

Bågen dimensioneras med hjälp av enhetslösa influenslinjer, vilka är funktioner som beror på en varierande punktlast och snittet där kraften eller momentet kontrolleras hålls konstant. I vissa av de aktuella funktionerna varierar också detta snitt och funktionerna blir således beroende av två variabler. Influenslinjer används dels eftersom tester av olika punktlastplaceringar enklare ska kunna ske, men framförallt då förstyrningsbalkens horisontalkraftsekvationer är komplexa men influenslinjen är given (Lorentsen, 1998).

För att beräkna övriga influenslinjer, används snittning (se figur 29) och inverkan av horisontalkraftens influenslinje. För normalkraften och tvärkraften ritas denna linje ut i diagram med olika värden på punktlastens placering. Dessa diagram används sedan för att kontrollera var dimensionerande krafter fås och var punktlasten då angriper. Momentet antas vara störst under punktlasten när denna är placerad i fjärde- eller femtedelspunkten (Lorentsen, 1998).

Med hjälp av influenslinjerna fås sedan krafterna och momentet av egentyngd och trafiklast. Egentyngden från bågen, som ses som en utbredd last, multipliceras med influenslinjerna som integreras över brolängden. Egentyngden från resterande brodelar ses som en punktlast i varje stag. Den utbredda trafiklasten integreras precis som bågens egenvikt och punktlaster från trafiken adderas till en enda punktlast vars placering varierar.



Figur 29 - Snittning av båge

Med hjälp av de beräknade funktionerna och diagrammen kan de dimensionerande krafterna upptäckas och kontrolleras mot motsvarande kapaciteter. Efter det kontrolleras knäckning där båglängden mellan båg- och förstavningsförbandet och första staget ses som en pelare. Detta eftersom knäckning i bågens plan begränsas till att avse bågdelarna mellan hängstagen, för båge med förstavningsbalk (Lorentsen, 1998). Att just den sektionen av bågen kontrolleras beror på att den ses som ett Eulerfall 3 och får då längre knäcklängd än de andra sektionerna som ses som Eulerfall 4. Samtidig böjning och axiellt tryck kontrolleras också.

För att kunna jämföra och verifiera resultaten från beräkningarna med influenslinjer används samma CALFEM-modell som i dimensioneringen av plattan. Plattans dimensioner kommer dock ändras från en en-metersstrimla till hela tvärsnittsarean för att styvheten ska kunna tillgodoräknas. Samma laster som för fallet med influenslinjer används.

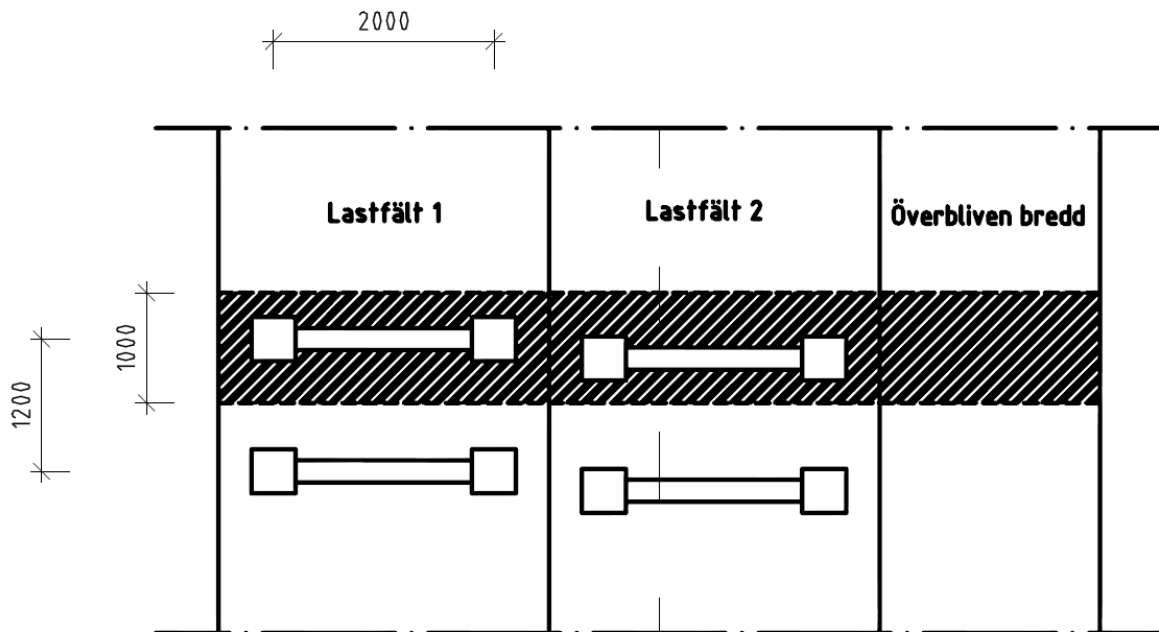
10.6 Sidospänn

Balkbroarna vid sidan om bågbron kommer ha 9 längsgående balkar, med cc-avstånd på 1 m. För att undersöka vilken av dessa balkar som blir mest belastad beräknas filfaktorer med hjälp av en CALFEM-modell i MATLAB. Detta utförs genom att studera hur mycket av axellasterna respektive de utbredda trafiklasterna som upptas av den mest belastade balken.

De längsgående balkarna ses som fritt upplagda balkar i ett fack, och belastas av de, med hjälp av filfaktorerna, framräknade trafiklasterna samt balkarnas egentyngd adderat med tyngden från plattan och beläggningen.

Den ovanpåliggande plattan dimensioneras genom att studera en en-metersstrimla i bronns tvärled och betrakta denna som en balk. Här ses de längsgående balkarna som plattan ligger på förenklat som i vertikalled fasta stöd, och plattan blir då en kontinuerlig 8-facksbalk. I sitt mest belastade fall tar en-metersstrimlan upp lasten från egentyngd och utbredd trafiklast samt två axellaster i tvärled, eftersom båda axellasterna från ett fordon inte får plats inom 1 m (se figur 30). Reaktionskrafterna för denna balk beräknas med en CALFEM-modell, och dessa

används för att snitta balken och beräkna maximal tvärkraft och maximalt moment. Utifrån dessa snittkrafter dimensioneras sedan plattan.



Figur 30 - En-metersstrimla för sidospannet

10.7 Stöd

Bron kommer att ha fyra stöd i limträ, ett i varje hörn av mittspannet. Stöden bär också upp sidospannet och dimensioneras därefter. Stöden dimensioneras genom att beräkna en axiellt tryckande last, som motsvarar en fjärdedel av mittspannets egentyngd plus en fjärdel av ett sidospans egentyngd. Den utbredda trafiklastens bidrag till denna lasten blir den utbredda lasten på halva mittspannet och halva sidospannet, multiplicerat med en filfaktor för att undersöka hur mycket av lasten som fördelas på det mest belastade stödet. Axellasterna placeras vid mittspannets ände, och med hjälp av momentjämvikt beräknas hur stor del av dessa som leds till det mest belastade stödet. Här används lastfall 2 från kapitel 10.1, vilket motsvarar det värsta fallet.

Stödet dimensioneras som en pelare belastad med ovan nämnda normalkraft, samt en påkörningslast, enligt figur 31. Kapaciteten för stödet för samtidig böjning och axiellt tryck kontrolleras, men andra ordningens effekter bortses ifrån, eftersom stödet endast beräknas uppskattningsvis.



Figur 31 - Pelare med angreppspunkter

10.8 Bruksgränstillstånd

I bruksgränstillstånd kontrolleras endast nedböjning. Den största nedböjningen på bågbrodelen är broplattans förskjutning i vertikalled från sitt ursprungsläge i obelastat tillstånd till slutläge vid full belastning. Denna nedböjning återfinns mitt i spannet av bågbrodelen på två ställen, på halva cc-avståndet både till vänster och höger om den centrumplacerade tvärbalken. Dess storlek beräknas som summan av nedböjningen av bågen, tvärbalkarna och plattan samt förlängningen av stagen. Dessa nedböjningar beräknas för maximal belastning på alla delar individuellt, vilket enligt gällande lastmodeller inte kan uppstå, och därför är beräkningen på säkra sidan. För de delar som är av trä kontrolleras både momentan nedböjning och nedböjning på grund av krypning. Eftersom trafiklasterna inte är permanenta måste nedböjning för egentygnd (permanent laster) och nedböjningen från trafiklasterna beräknas separat, då de har olika krypfaktorer.

För sidobron kontrolleras endast nedböjning på de längsgående balkarna, eftersom plattan har spann på endast 1 m och bör därför inte böjas ned nämnvärt i tvärled. Även här beräknas både momentan nedböjning och nedböjning från krypning.

10.9 Översiktlig kostnadsberäkning

De ekonomiska beräkningarna grundar sig på schablonvärden för de olika ingående byggnadsmaterialen som ingår i brokonceptet: limträ, Kerto, stål och betong (se bilaga 6). Eftersom både balkar och hålblåtar, vilka används i förbanden, kräver viss bearbetning bedöms schablonkostnaden för plåtarna vara samma som för höghållfast stål.

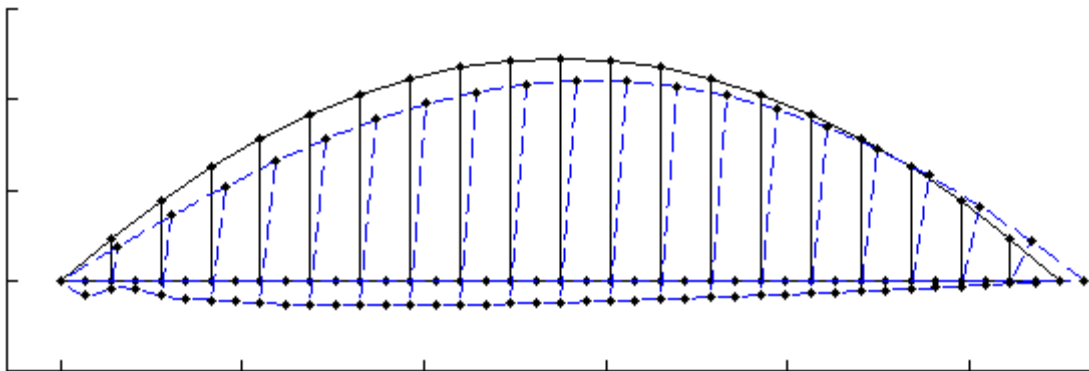
11 Resultat

Beräkningarna avser en tredelad bro med ett mittspann på 55 m som utgörs av en langerbalkbro som flankeras av två balkbroar vilket resulterar i en total brolängd på 82,7 m. Bågens pilhöjd är 12,2 m. Nedan följer resultaten av beräkningarna på dimensionerade konstruktionsdelar.

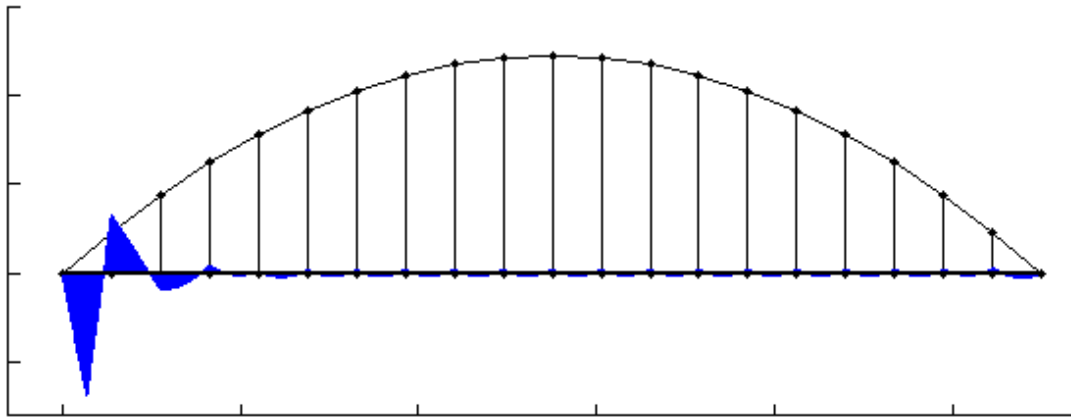
11.1 Mittspannets broplatta

Vid projekteringen dimensioneras broplattan utifrån maximala moment och tvärkrafter. Avståndet mellan hängstagen, som använts vid dimensioneringen, är framtaget genom en iterativ process där konstruktionshöjden har varit avgörande. Det slutliga avståndet blev 2,75 m. Med valt cc-avstånd blir maximala momentet 237,9 kNm och den maximala tvärkraften 256,8 kN. Figur 32-34 visar hur plattan deformeras samt hur aktuella moment- och tvärkraftsfördelningar i plattan ser ut, då axellasten angriper mellan stödet och första staget.

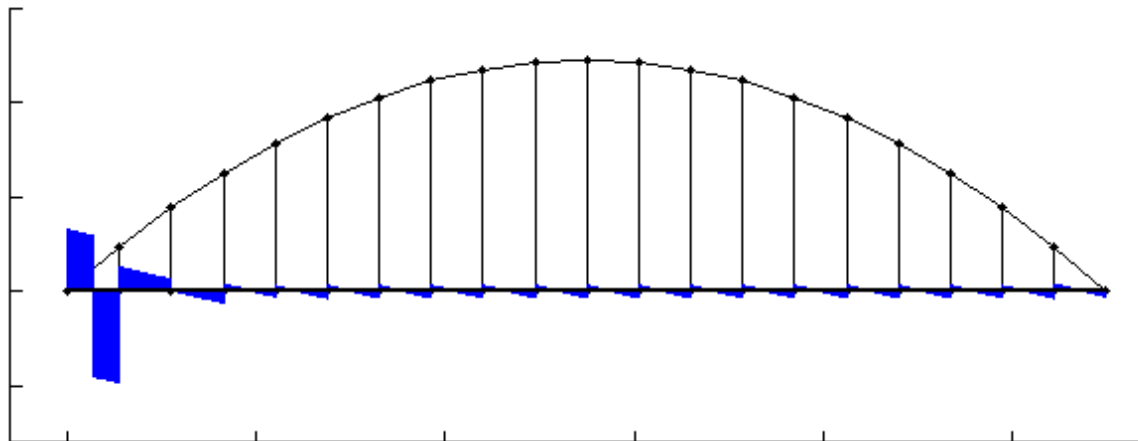
Vid beräkningar av broplattan, se bilaga 4, visar det sig att denna behöver vara 240 mm tjock för att klara dimensionerande laster. Tillsammans med 50 mm bindlager och 40 mm slitlager blir den totala tjockleken 330 mm. Valda dimensioner ger en utnyttjandegrad på 94 % för moment och 67 % för tvärkraft.



Figur 32 – Uppskalad deformationsfigur, maximalt moment och tvärkraft för mittspannets broplatta.



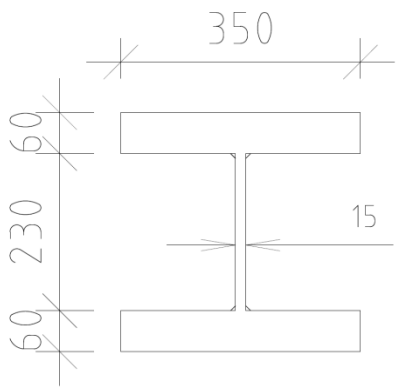
Figur 33 – Momentfördelning, maximalt moment i mittspannets broplatta.



Figur 34 – Tvärkraftsfördelning, maximal tvärkraft i mittspannets broplatta.

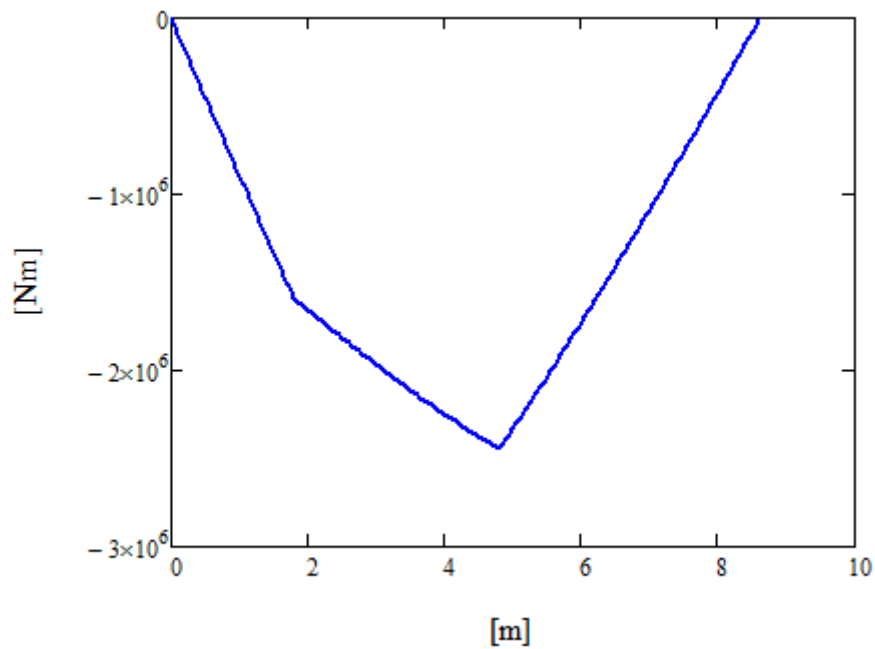
11.2 Tvärbalkar

Tvärbalkarna har dimensionerats i bilaga 4 utifrån två lastfall som ger två olika maximala moment. Lastfall 1 ger 2,45 MNm i maxmoment och 0,90 MN i maximal tvärkraft. För lastfall 2 är maxmomentet 2,04 MNm och maximala tvärkraften 1,01 MN. Första valet var att ha tvärbalkarna i trä men enligt beräkningar skulle konstruktionshöjden bli orimligt stor. En limträbalk på 450 mm skulle ha en utnyttjandegrad på över 300 % och en balk i Kerto skulle ha 280 %. Istället valdes stål och för att kunna optimera tvärsnittet krävs en svetsad profil. Stålbalkarna utförs i stålqualität S460 och har slutgiltiga dimensioner enligt figur 35.

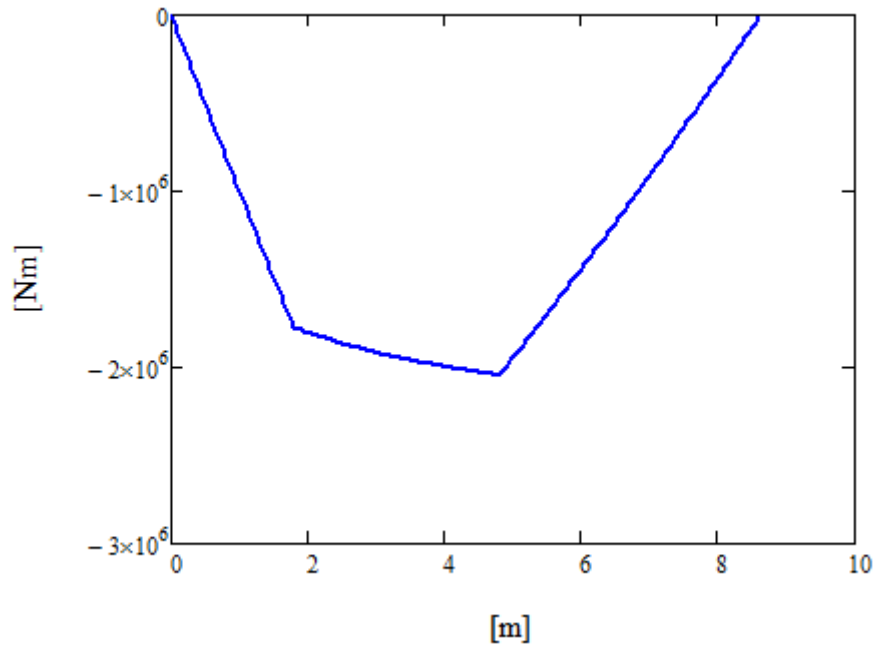


Figur 35 – Ståltvärsnitt tvärbalk

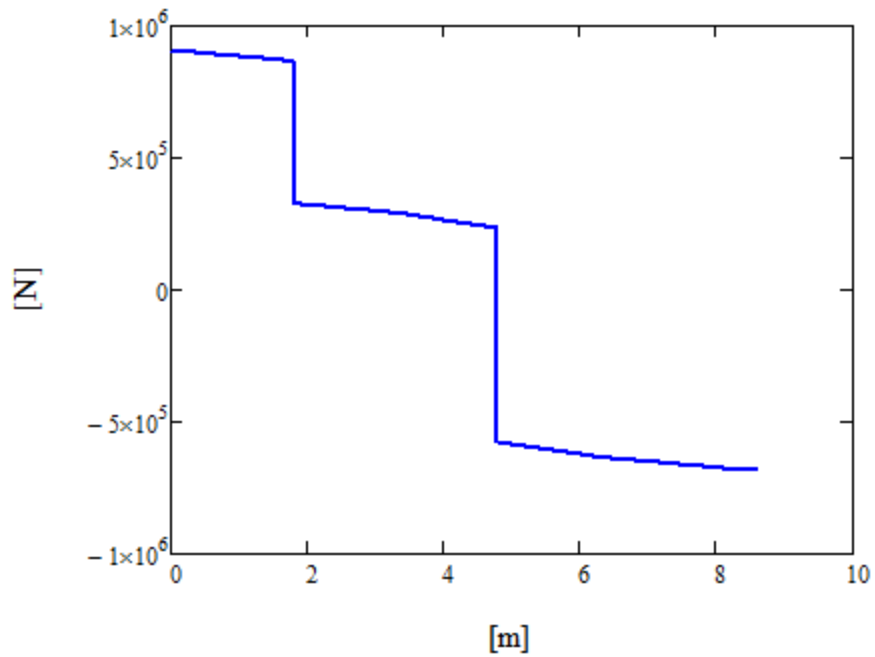
Moment- och tvärkraftsfördelningar visas för både lastfall 1 och 2 i figurerna 36-39.



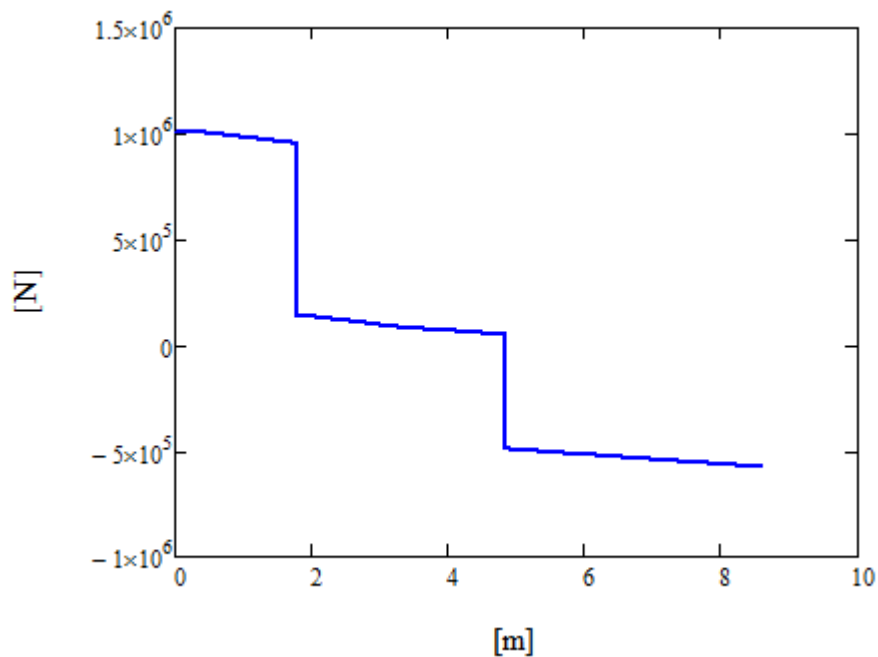
Figur 36 – Momentfördelning i tvärbalk, lastfall 1



Figur 37 - Momentfördelning i tvärbalk, lastfall 2



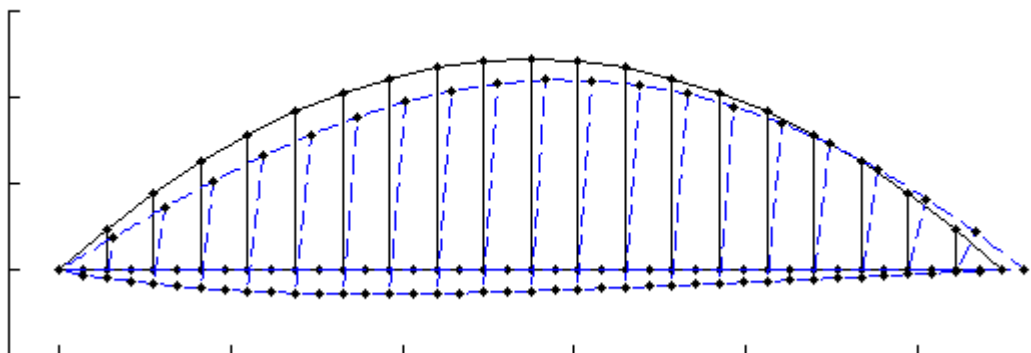
Figur 38 - Tvärkraftsfördelning i tvärbalk, lastfall 1



Figur 39 - Tvärkraftsfördelning i tvärbalk, lastfall 2

11.3 Stag

Stagen har dimensionerats utifrån en maximal normalkraft på 1,01 MN, se bilaga 4. Den givna kraften och valet av cirkulära stag ger en radie på 31 mm. Deformationsfigur för när maximal normalkraft verkar i stagen, då axellasten angriper vid första staget, kan ses i figur 40.



Figur 40 – Uppskalad deformationsfigur, maximal stagkraft.

11.3 Infästningar

Vid dimensionering av infästningar måste olika brottmoder kontrolleras och den brottmod som ger lägst hållfasthet blir dimensionerande. Beräkningar genomförs i bilaga 4.

Den ena infästningen som kontrolleras är mellan tvärbalken och staget. Fem olika komponenter dimensioneras utifrån olika brottmoder enligt resultatet nedan.

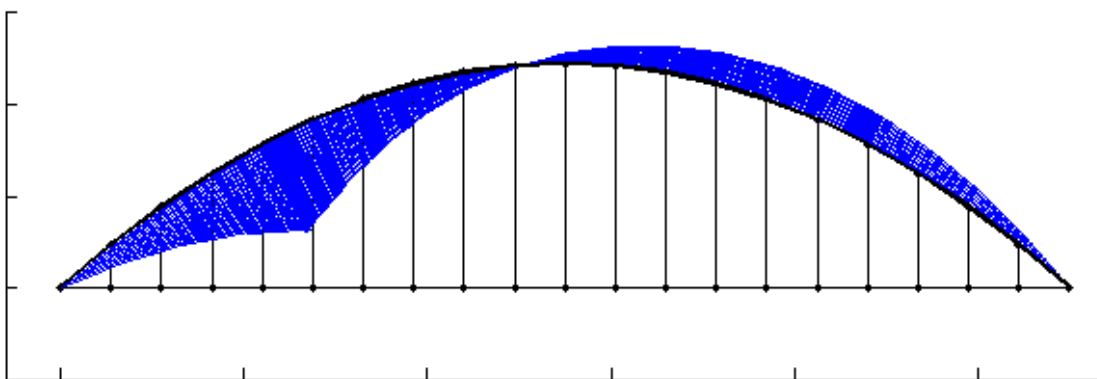
- Skruvarna dimensioneras utifrån brottmoden *dragbrott i skruv*. Med aktuella dragkrafter i förbandet så krävs 4 M24-skrivar i hållfasthet 10.9 för att uppnå tillräcklig bärlighet. Detta ger en utnyttjandegrad på 99,5 %.
- Sprintens diameter bestäms utifrån *skjuvbrott i sprinten* och ger 37 mm i diameter i kvalitet 10.9 med en utnyttjandegrad på 98,0 %.
- Platta (hane) enligt figur 22 dimensioneras utifrån brottmoden *hålkanbrott i plattan* och ger en tjocklek på 44 mm när den utförs i stålqualität S460. Utnyttjandegraden är 98,6 %.
- Platta (hona), se figur 22, dimensioneras också utifrån *hålkanbrott i plattan* och tjockleken blir 22 mm på vardera sidan om hanen. Utnyttjandegraden är 98,6 %.
- Svetsarna mellan stag och hängare dimensioneras utifrån brottmoden *brott i svetsen*. Det blir 4 svetsar på vardera 210 mm och med a-måttet 5 mm. Utnyttjandegraden är 96,6 %.

Infästningen mellan båge och stag kräver en plåt på bågens översida för att fördela trycket över en större yta. Plattans dimensioner beräknas med hänsyn till *tryckbrott i träet* och blir 650*650 mm.

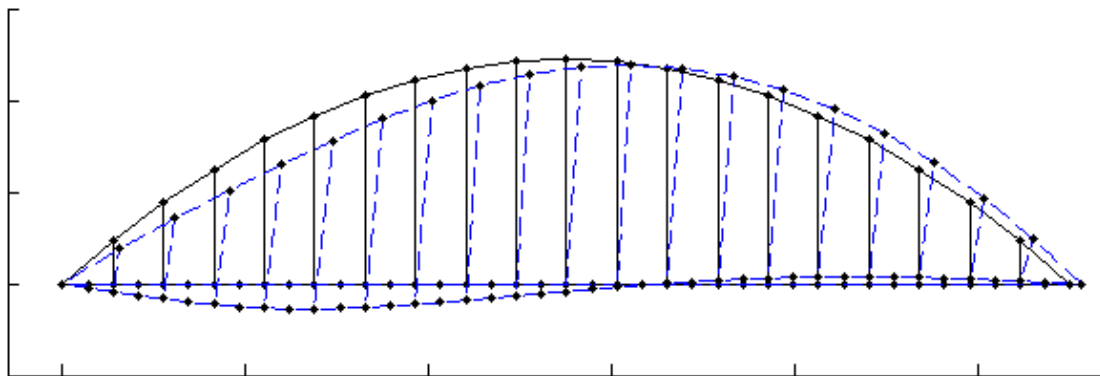
11.4 Båge och förstyrningsbalk

Båge och förstyrningsbalk har båda beräknats i Mathcad (se bilaga 4) och CALFEM (se bilaga 5) vilket har gett två snarlika resultat.

- *Maximala momentet* enligt Mathcad blir 4,4 MNm och enligt CALFEM 3,8 MNm. Detta uppkommer i femtedelspunkten, då axellasten angriper i samma punkt. Momentfördelningen enligt CALFEM kan ses i figur 41. Hur bågen deformeras vid maximalt moment med CALFEM-beräkningar visas i figur 42.

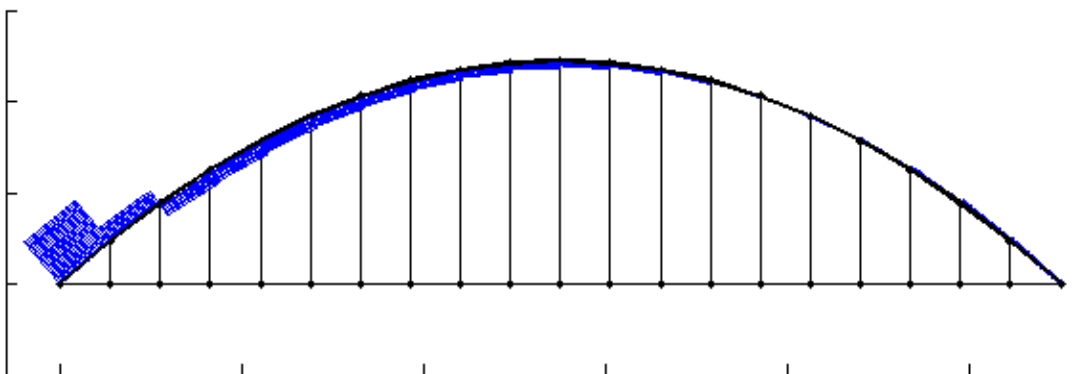


Figur 41 - Momentfördelning, maximalt moment i båge.

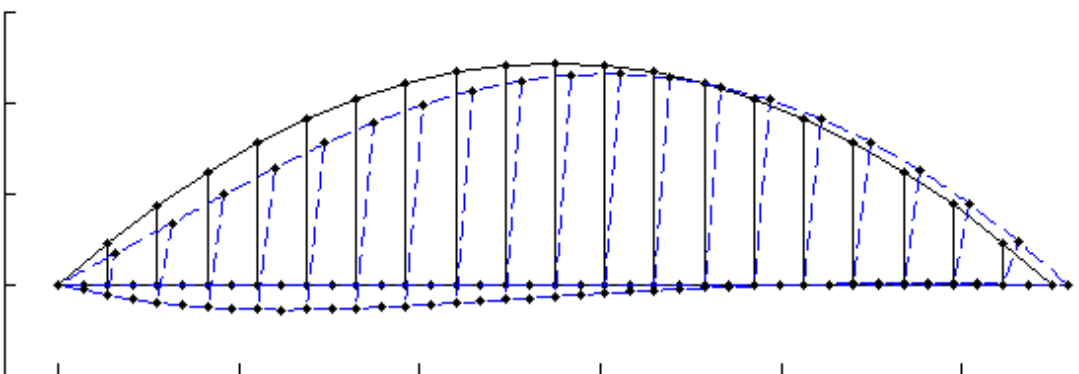


Figur 42 – Uppskalad deformationsfigur, maximalt moment i båge.

- *Maximala tvärkraften* enligt Mathcad blir 0,66 MN, och uppstår i nollpunkten med axellasten placerad i samma punkt, och enligt CALFEM 0,56 MN, och uppstår i nollpunkten då axellasten angriper mellan första och andra staget. Tvärkraftsfördelningen enligt CALFEM kan ses i figur 43. Hur bågen deformeras vid maximal tvärkraft med CALFEM-beräkningar visas i figur 44.

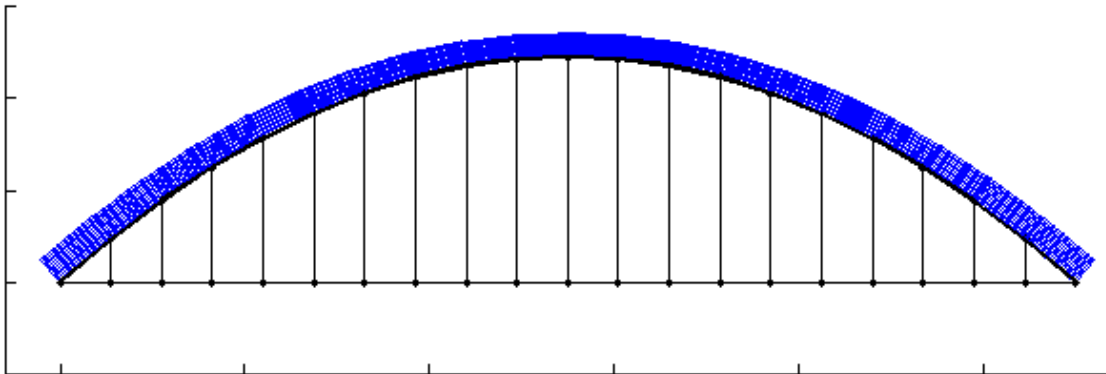


Figur 43 - Tvärkraftsfördelning, maximal tvärkraft i båge.

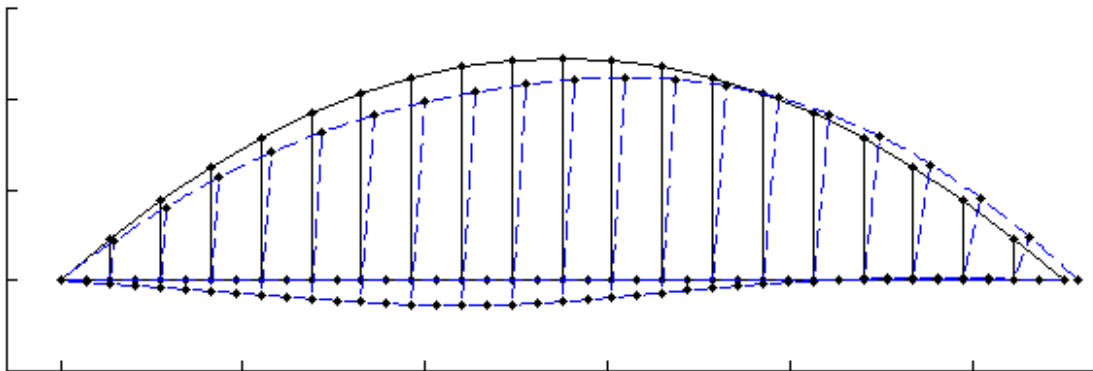


Figur 44 - Deformationsfigur, maximal tvärkraft i båge.

- *Maximala normalkraften* enligt Mathcad blir 2,7 MN, och uppstår 10 m från stödet med axellasten placerad i mittpunkten, och enligt CALFEM 3,3 MN, i nollpunkten då axellasten angriper mellan åttonde och nionde staget. Normalkraftsfördelningen enligt CALFEM kan ses i figur 45. Hur bågen deformeras vid maximal tvärkraft enligt CALFEM-modellen visas i figur 46.



Figur 45 - Normalkraftsfördelning, maximal normalkraft i båge.



Figur 46 – Uppskalad deformationsfigur, maximal normalkraft i båge.

- Den maximala horisontalkraften är den kraft som dimensionerat förstyrningsbalken. I Mathcad blir denna 2,9 MN, då axellasten angriper i mittpunkten, och i CALFEM blir den 3,3 MN, och uppträder då axellasten angriper mellan nionde och tionde staget.

Utifrån dessa beräknade krafter dimensioneras en förstyrningsbalk med höjden 900 mm och bredden 215 mm. Med dessa dimensioner erhålls en utnyttjandegrad på 93,1 %. Bågen får en höjd på 1440 mm och bredd på 645 mm. Bågens utnyttjandegrad blir 98,3 % med avseende på moment, 65,8 % med avseende på tvärkraft och 98,9 % med avseende på samtidigt axiellt tryck och böjning.

11.5 Olycksfall

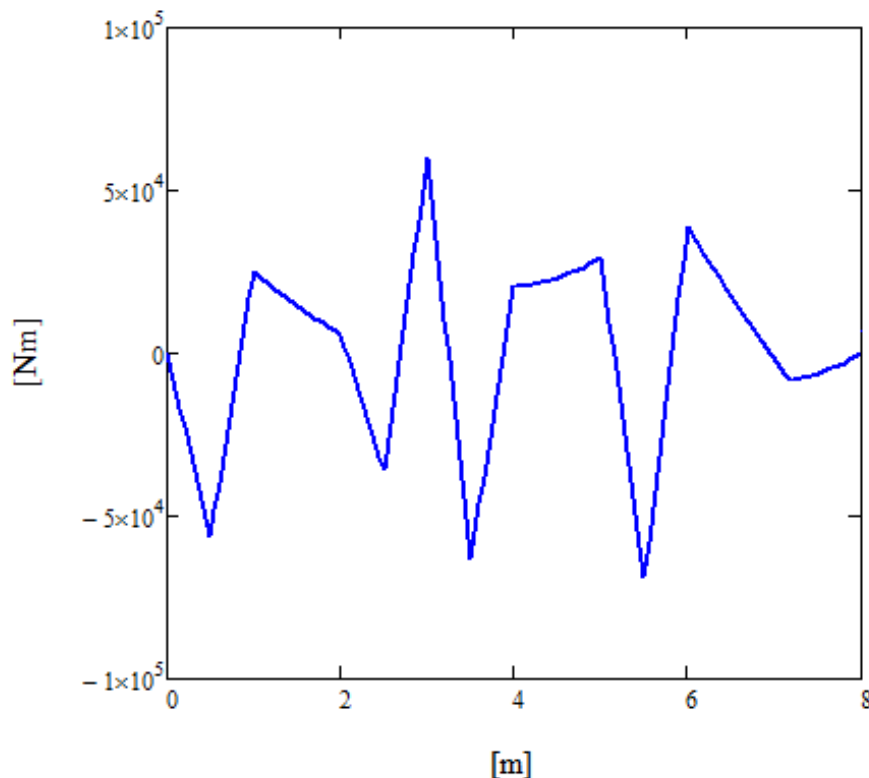
Det olycksfall som har kontrollerats tar hänsyn till att ett av stagen sätts ur funktion och resulterar i en obrukbar tvärbalk. För tvärbalkarna ger detta fall ett maximalt moment på 1,3 MNm och en tvärkraft på 0,49 MN. Båda dessa värden är lägre än i normalfallet och kommer därför inte påverka dimensionerna.

Plattan får ett moment på 0,23 MNm och en tvärkraft på 0,12 MN. Dessa är också lägre än i normalfallet och kommer således inte bli dimensionerande.

11.6 Sidospänn

Sidospännets längsgående balkar dimensioneras för ett moment på 1,3 MNm och en tvärkraft på 0,24 MN. Detta gör att det krävs 9 balkar med dimensionerna 1395*215 mm med cc-avstånd på 1 m. Utnyttjandegraden med avseende på moment är 94,9 % och för tvärkraft 74,5 %.

Plattan får tjockleken 270 mm utifrån ett moment på 69 kNm och en tvärkraft på 0,25 MN. Utnyttjandegraden med avseende på moment är 25,5 % och för tvärkraft 85,7 %.
Momentfördelningen för sidobroplattan kan ses i figur 47.



Figur 47 - Momentfördelning, sidobroplatta

11.7 Stöd

Stöden har dimensionerats utifrån en påkörningslast, som ger upphov till ett moment på 1,9 MNm, som verkar samtidigt som en axiell last på 5,5 MN. Detta medför att stöden får dimensionerna 950*950 mm. Utnyttjandegraden för samtidig böjning och axiellt tryck är 77,7 %.

11.8 Nedböjning

Den maximalt tillåtna nedböjningen i mittspannet är 138 mm. Vid beräkningar så uppgår nedböjningen i mitten till 85,0 mm och i femtedelspunkten till 77,0 mm. För sidobroarna är den maximalt tillåtna nedböjningen 33 mm och vid beräkning uppgår den till 26,0 mm.

11.9 Konstruktionshöjd

Den maximala tillåtna konstruktionshöjden är 770 mm enligt beräkning i bilaga 3. Begränsningen är endast aktuell i mittspannet och där uppgår konstruktionshöjden till 757 mm.

11.10 Kostnadsberäkning

Kostnadsberäkning har utgått ifrån schablonkostnader och beräkningen finns specificerad i bilaga 6. Den totala kostnaden uppgår till 13,1 miljoner kronor och de största posterna redovisas i figur 48.

	Mängd	Kostnad [kr]
Limträ	273 m ³	2 730 000
Kerto	106 m ³	1 272 000
Stålbalk	91 ton	7 857 000
Pålning	1239 m	805 000

Figur 48 – Dominerande kostnader

12 Diskussion

Vid den konceptframtagning och preliminärdimensionering av en bro som denna rapport behandlar genomförs många val, bedömningar och antaganden. Dessa har stor inverkan på slutresultatet. I detta avsnitt diskuteras det övergripande arbetssättet och rimligheten i erhållna resultat. Tillämpade dimensioneringsmetoder utvärderas och jämförs med alternativa tillvägagångssätt. Vidare beskrivs vad som återstår av projekteringen och använda källors tillförlitlighet kommenteras.

12.1 Framtagning av brokoncept

Att ta fram ett brokoncept och sedan dimensionera konstruktionens delar är ett öppet problem och kräver en långtgående iterativ process. Under arbetets gång har vi försökt vara öppna för nya lösningar och metoder, och ständigt eftersträvat ett innovativt arbetsätt. Vi har ersatt lösningar, om bättre lösning senare framtagits, trots att tidigare lösning varit väl genomarbetade. Vi har helt enkelt inte fullständigt bestämt oss för något innan projektet slutförts. Detta krävs om bästa möjliga resultat ska erhållas i ett projekt med ett öppet problem. Denna sortens urvalsprocess har kunnat genomföras noggrannare i detta projekt än i näringslivet, eftersom det där ställs hårdare krav på tidseffektivitet.

Vår projektgrupps roll i framtagandet av denna rapport kan jämföras med en konstruktörs arbete. Den tekniska beskrivningen är ett verkligt dokument som här såväl som i näringslivet ligger till grund för hur broprojekteringen utförs. Att gruppens medlemmar har delat upp sig i subgrupper med olika ansvarsområden kan liknas vid att konstruktörer är specialiserade på olika arbetsområden. Beräkningar och resultat redovisas i rapporten på ett strukturerat sätt med tydliga förklaringar och är anpassat för att en beställare ska kunna tillgodogöra sig informationen på ett fördelaktigt sätt. Rapporten behandlar utförligt framtagningen av det valda brokonceptet genom att beskriva ett brett antal brotyper och material. Det går att ifrågasätta om studien av framförallt brotyper är onödigt bred då flera av dessa alternativ redan tidigt kan uteslutas. Detta skulle inte efterfrågas av en beställare men kan motiveras genom att förkunskaperna hos projektgruppen var låg innan studien påbörjades.

Samspelet mellan projekteringsfasens olika aktörer är viktig. Hur väl kommunikationen mellan beställare och konstruktör genomförs har stor inverkan på projektets slutresultat. Om dialogen initialt sköts med ömsesidig respekt och lyhördhet kan problem, som senare skulle ha blivit bestående, undvikas. Även om stor vikt lagts vid att genomföra arbetet efter föreskrivna regler och på ett verklighetstroget sätt har gruppens möjlighet att själva tolka problemställningen lett till en effektivare arbetsgång än i ett verkligt projekteringsarbete. Ett exempel på detta är metoden för framtagandet av det bäst lämpade brokonceptet. Urvalet har genomförts genom betygsättning av relevanta alternativ i en utvärderingsmatrix innehållande vissa bedömningskriterier. Valet av bedömningskriterier och rankingen av dessa är framtagna för att optimera urvalsprocessen. Det är också viktigt att understryka att val, ranking och poängsättning genomförts av gruppens medlemmar och således grundar sig på deras värderingar och erfarenheter. Denna konceptframtagning är en av många alternativa lösningar

på problemställningen med just de förutsättningar som föreligger vid Ulricehamnsmotet. Med detta i åtanke kan gruppens bedömningar anses rimliga. Metoden att använda en utvärderingsmatris är ett bra verktyg för att kunna sammanväga flera olika kriterier men förutsätter god ämneskunskap, gedigna undersökningar och olika infallsvinklar.

I dagens samhällssituation prioriteras kostnadseffektivitet framför estetik och hållbara lösningar. Vid rankingen av betygskriterier i detta projekt har kostnaderna däremot bedömts relativt oviktiga. Det slutgiltiga brokonceptet, en bågbro i trä, är troligtvis inte den billigaste lösningen men det är ett miljövänligt alternativ med tilltalande gestaltning. Vid ett verkligt upphandlingsförfarande hade detta koncept stått sig väl men hade med stor sannolikhet inte vunnit om inte beställaren lämnat önskemål på ovan nämnda positiva egenskaper. I samhällsdebatten diskuteras flitigt behovet av en mer hållbar utveckling. Att i större utsträckning använda trä som byggnadsmaterial är ett sätt att bidra till denna utveckling. Med tanke på att denna bro dimensioneras för en livslängd på 80 år och är lokaliserad över en högt trafikerad farled kommer den beröra många människor under lång tid. Värdet av att dessa människor uppfattar bron som vacker är dock svårt att bedöma.

Ett av kriterierna i utvärderingsmatrisen är trafiksäkerhet. En bågbro i trä kan för vissa människor skapa ett obehag inför överfart. Konstruktionen sticker ut och det blir tydligt att byggnadsmaterialet är trä som för en del är ett material som upplevs mindre tillförlitligt säkerhetsmässigt. Trots detta har det valda konceptet ansetts vara det mest lämpliga med hänsyn till andra kriterier. Förhoppningsvis kan bågens kraftiga dimensioner ingjuta trygghet och tillförlit till konstruktionens hållfasthet.

12.2 Dimensioneringsprocessen

Vid dimensioneringen har beräkningarna genomförts i Mathcad och CALFEM-program i MATLAB. I Mathcad kodar användaren själv alla beräkningar medan det i CALFEM finns vissa inbyggda hjälpmedel för stora konstruktionssystem. För ett sådant komplext system som en bro i kombination med kandidatgruppens begränsade färdigheter krävs dock relativt stora förenklingar för att kunna genomföra beräkningar i dessa program. Det finns noggrannare teorier för systemberäkning än de som använts i denna rapport. Finita elementmetoden, som till viss del tillämpas i CALFEM-beräkningarna, är den teori som idag med störst utsträckning används. Ökad kunskap om denna teori i kombination med en avancerad programvara som tillämpar metoden hade ökat precisionen och säkerheten i beräkningarna samt haft tidsbesparande effekter.

12.2.1 Mittspannets broplatta

Vid beräkning av broplattan har en en-metersstrimla av plattan betraktats som en sammanhängande balk. I själva verket är plattan uppbyggd av Kerto-balkar som spänns samman av stålstänger. För plattans kapacitet i tvärlid beror styvheten på hur väl de längsgående balksegmenten samverkar. Förspänning medför också att balkarna samverkar i längsled och vid förenklad beräkning kan ses som en ortotrop platta. Om hänsyn ska tas till denna styvhet vid dimensionering måste erforderlig spännkraft i dessa stag beräknas.

En vertikalt belastad platta utsätts för böjning och skjuvning i dubbla riktningar vilket gör konstruktiondelen svårdimensionerad. För att förenkla beräkningsprocessen har därför antagandet gjorts att tvärbalkarna upptar alla laster i tvärled och broplattan endast tar krafter i längsled. Med tanke på att plattan inte är dimensionerad för böjning och skjuvning i tvärled är det möjligt att den är underdimensionerad. En annan approximation som gjorts är att axellasten bara kan placeras precis vid eller mitt emellan stagen. En viss ökning av det maximala momentet hade uppnåtts om axellasten kunnat placeras godtyckligt på plattan. Det faktum att plattans högst belastade en-meterstrimla dimensionerar hela plattans bredd och att plattan utanför en-metersstrimlan inte medverkar till lastupptagningen samt att spännstagen bidrar till hållfastheten borde dock kompensera för detta.

12.2.2 Infästning mellan tvärbalk och stag

Lösningen som har dimensionerats är praktisk ur ett produktionshänseende eftersom plattan kan svetsas till staget och hängaren fästas vid tvärbalken via skruvförbandet innan leveransen. På byggplatsen återstår då endast att trycka in sprinten mellan hängare och platta, vilket utförs medan en lyftkran håller tvärbalken på plats. För att minska materialåtgången och antalet steg i produktionsprocessen kan plattan som svetsas till staget och hängaren som fästs i tvärbalken vara en sammanhängande del. Tidsåtgången på byggplatsen blir dock större eftersom skruvning eller svetsning måste genomföras på plats istället för att endast förbinda delarna med en sprint.

12.2.3 Infästning mellan båge och stag

Tanken från början var att staget skulle gå genom bågen och fästas i en stålplatta som kunde trycka på bågen ovanifrån och på det viset föra över dragkraften i staget som tryck i bågen. Detta skulle göra att drag vinkelrätt fibrerna i bågen kunde undvikas. Problemet med denna lösning är att plattan blir väldigt stor, till och med bredare än bågen, och dessutom är infästningen mellan platta och stag problematisk. En bättre lösning skulle kunna vara att istället slitsa in plåtar i bågen och använda genomgående skruv för att fästa dessa till bågen. Detta ger drag i vinkel mot fibrerna men om tillräckligt många skruvar och inslitsade plåtar används bör detta inte vara något problem. Staget svetsas till plåten på ett liknande sätt som i infästningen mellan tvärbalk och stag.

12.2.4 Båge och förstyrningsbalk

Bågen var den del som var svårast att dimensionera då beräkningsteorin var helt ny för kandidatgruppen. På kort tid fick nödvändig kunskap uppsökas i en bok om bågkonstruktioner och exempel från doktorandkurser. Detta ledde till en yttlig kunskap om bågdimensionering vilket betyder att vissa antaganden och beräkningar kan vara felaktiga. Vid jämförelse med beräkningsexempel kan dock inses att rimliga värden på resulterande krafter och moment har erhållits.

De olika värdena stämde bra överens och CALFEM-modellen gav krafter och moment som nästan alla var något mindre än motsvarande för beräkningarna i Mathcad, där influenslinjer användes. Normalkraften skiljde sig dock från övriga krafter och var lite större i CALFEM-modellen. Detta tror vi beror på att CALFEM-modellen får en last som breder ut sig mer över bågen, vilket tas upp huvudsakligen av normalkraft i bågen. Influenslinjens vandrande

punktlast tas däremot upp av en större tvärkraft och ett större moment. Skillnaden kan också till viss del bero på att bågen i CALFEM-modellen är approximerad med raka balkelement mellan stagen.

I CALFEM-modellen, till skillnad från influenslinjeberäkningarna, sprids axellasten ut på alla stagen. Detta borde till viss del förklara att axellastens placering, för att maximal normal- och tvärkraft ska uppstå, inte samma i CALFEM-modellen som i Mathcad.

Förstyvningsbalken dimensioneras i första hand för att klara av horisontalkrafterna från bågen men ökade dimensioner på förstyvningsbalken kommer även ha positiv inverkan på bågens normalkraft och moment. Möjligheten finns därför att minska bågens dimensioner genom att samtidigt öka förstyvningsbalkens. Vi bedömer dock att proportionerna mellan dessa två är rimliga.

12.2.5 Sidospänn

Merparten av arbetstiden har i detta arbete lagts på att dimensionera mittspannet på bron. Beräkningarna som gäller sidospännen är därför endast översiktliga. En-metersstrimlan som används i beräkningarna är ett antagande som i ett noggrannare beräkningsprogram skulle kunna visa sig vara på osäkra sidan. Detta eftersom ett axelpar har cc-avståndet 1,2 m och om dessa två par står precis på sidorna om en-metersstrimlan skulle mer last än en axel kunna föras ner i denna strimla.

Vid dimensioneringen av sidospännen valdes en lösning med ett primärbärverk i form av längsgående balkar och ett sekundärbärverk bestående av en broplatta. På grund av att plattan ligger på längsgående balkar valdes det att lägga plattan med fiberriktningen vinkelrätt mot körriktningen. Detta eftersom plattan ska ta upp momentet som uppstår i bron tvärläng. En alternativ lösning hade varit att lägga tvärgående balkar på de längsgående och sedan plattan på dessa balkar, med fiberriktningen i plattan längs med trafiken. Det senare anser vi vara en bättre lösning med tanke på de horisontalkrafter som uppstår på grund av accelerationskrafter, vilka nu verkar vinkelrätt mot fibrerna, men det förra alternativet valdes tack vare sin enkelhet i både produktionsmöjligheter och beräkningar.

Intressant med sidospännet var att konstruktionshöjden bara blev cirka 1,5 m, trots att bron konstrueras helt i trä. Med en konstruktion med dubbla lager balkar, som beskrivits ovan, hade denna höjd dock troligtvis stigit upp mot 2 m, men detta är fortfarande inte en orimlig siffra för en bro, och det visar på vilken potential trä har som byggnadsmaterial.

12.2.6 Stöd

Pelarna som bron står på är dimensionerande i limträ, vilket är en ovanlig lösning, då pelare, även till träbroar, oftast är konstruerade i betong. Dimensioneringen av pelarna visar att de klarar att bära upp bron och samtidigt ta upp en påkörningslast, utan att dimensionerna blir överdrivet stora. Det finns dock andra problem som skulle kunna uppstå.

Eftersom limträbalkar inte tillverkas så breda som 1 m kommer pelaren bestå av fem

limträbalkar, som måste limmas ihop. Detta kommer minska pelarens kapacitet eftersom fullständig samverkan mellan dessa balkar kommer vara svårt att uppnå. Av detta skäl kanske dimensionerna behöver vara något större än uträknat.

Pelaren i sig är dimensionerad för att klara en påkörning, den kommer alltså inte gå av, men det kan vara svårare att lösa infästningarna för att klara påkörningen, och därför finns en risk att pelaren lossnar när den blir påkörd. Stora krafter parallellt fibrerna i träet riskerar också att lokalt krossa träet, och om detta sker är pelaren kanske uttjänt. Att i så fall reparera pelaren tycks uteslutet, men pelaren skulle möjligtvis kunna bytas ut. Om pelaren behöver bytas ut torde det vara möjligt att tillfälligt stänga av bron, och hålla uppe den med en tillfällig konstruktion medan pelaren byts ut. Detta skulle fungera eftersom brons egentyngd är låg, och trä är ett material med kort byggtid.

Att konstruera den fasta inspänningen så att den kan stå emot påkörningen kan bli ett stort problem. En möjlig lösning skulle kunna vara att gjuta ett betongfundament som är lika brett som bron, och sedan sätta upp ett stag från mitten av pelaren till betongfundamentet mitt under bron, vilket skulle stabilisera upp konstruktionen i påkörningsriktningen. Detta stag skulle också stabilisera bron, och hjälpa till att ta upp horisontella krafter, såsom vindlaster.

Att ha pelare utomhus i trä har vid många tillfällen visat sig problematiskt med tanke på fuktangrepp, eftersom ändträ både i ovankant och underkant kan bli exponerat. I underkant får inte pelaren heller stå på ett plant underlag, eftersom vatten där kan ansamlas, vilket sedan suggs upp i pelaren. Därför blir det här extra viktigt med konstruktivt träskydd, och regelbundna kontroller. Kostnadsmässigt är en träpelare dyrare än en i betong, eftersom betong är billigare per m^3 , och behöver troligtvis något mindre dimensioner. Med trä sparas det dock in avsevärt på byggtiden. De stora fördelarna med att ha pelarna i trä är estetik och miljövänlighet. Miljövänlighet är något som viktas allt tyngre i allt fler byggprojekt, så trots att det finns många problem att överbrygga är träpelare för vägbroar ett intressant koncept som vore spännande att vidareutveckla.

12.2.7 Konstruktionshöjden och dess inverkan

Den låga konstruktionshöjden som denna bro har, mycket på grund av att trä kräver en högre fri höjd än betong, har varit ett stort problem under dimensioneringsprocessen. Tidigt bevisades att vissa konstruktionsdelar inte skulle kunna byggas i trä, då tvärbalkarna själva skulle behöva vara högre än den totala tillgängliga konstruktionshöjden. Till och med dimensionering av en stålbalk som klarade momentet och konstruktionshöjden, var problematisk. Det finns valsade standardprofiler som klarar momentet, men samtliga dessa tar upp allt för stor del av konstruktionshöjden för att vara användbara. Det enda möjliga alternativet var alltså en svetsad profil, och den dimensioneras i höghållfast stål för att få rimliga dimensioner, något som givetvis ökar kostnaderna för projektet.

För att sänka momentet i tvärbalkarna, och därmed minska dimensionerna, var vi dessutom tvungna att sänka avståndet mellan stagen från det initialt uppskattade värdet på 5 m till 2,75 m. Detta avstånd kan tyckas lågt, och stålåtgången ökar ju kortare det blir, vilket påverkar

både kostnaden för bron och brons miljöpåverkan som vi önskar hålla till ett minimum.

Däremot är tvärbalkarna räknade på säkra sidan eftersom vi säger att en tvärbalk tar upp hela sitt cc-avstånd, alltså 2,75 m, vilket inte stämmer i verkligheten. Detta betyder att stålbalkarna skulle kunna vara mindre grova eller av icke höghållfast stål.

På grund av konstruktionshöjden har vi också valt att konstruera broplattan av Kerto istället för vanligt limträ. Detta eftersom Kerto har högre böjhållfasthet än limträ. En limträplatta hade endast behövt vara några cm tjockare, men limträ är mer bundet till standarddimensioner än Kerto, vilket gör att de extra centimetrarna tvingar upp dimensionerna till nästa standardhöjd och då blir plattan ungefär 10 cm tjockare. Om konstruktionshöjden hade varit större kunde limträ ha använts i plattan, eftersom det är något billigare och framförallt står emot fuktangrepp bättre än Kerto. Broplattan skyddas dock mot fukt av asfalt och isoleringsmatta på ovansidan, och kantbalkarna täcker sidorna.

Med avseende på den låga konstruktionshöjden och de många problem med brodimensioneringen som följer av den, kan i efterhand inses att trä inte är det bästa materialvalet med gällande förutsättningar. En möjlighet är att ändra förutsättningarna och öka den tillgängliga konstruktionshöjden genom att höja väg 46:s vertikallinje. De allra flesta broar som går över motorvägar i Sverige är betongbroar med mellanstöd och aktuell vertikallinje är antagligen anpassad efter detta. En sådan betongbro kräver en fri höjd av 4,7 m medan en träbro måste ha 5,1 m fri höjd över vägbanan. Detta leder till att en träbro får 40 cm mindre konstruktionshöjd än en betongbro med samma förutsättningar.

12.2.8 Översiktlig kostnadsberäkning

I schablonkostnaderna ingår montering, transport och dylikt, vilket gör att uppskattade kostnader blir mycket ungefärliga. Däremot anser vi att dessa skulle kunna användas som ett riktmärke, framför allt i jämförelsen mellan olika brokoncept. Enligt Frödelius¹ skulle en jämförbar bro kosta mellan 12 och 14 miljoner kronor utan grundläggningkostnader inräknade, vilket överensstämmer väl med den, i bilaga 6, framräknade totalkostnaden.

Över hälften av brons totala kostnad är inköpen av de höghållfasta stålbalkarna. Denna kostnad skulle enkelt kunna reduceras genom att öka konstruktionshöjden enligt ovan. Endast 10 cm extra hade räckt för att den svetsade I-profilen skulle kunna konstrueras av stålklass S355. Detta hade kostat 2 miljoner kronor mindre och troligtvis varit en billigare lösning totalt sett för Trafikverket, trots väghöjningen.

Anledningen till att balkarna blir så mycket dyrare beror på att vi höjer hela kostnaden med en faktor som motsvarar hur mycket dyrare materialet är. Det är givetvis inte så att monteringen är svårare för en balk med högre stålqualité men höjningen av kostnaden kan ändå motiveras av att hanteringen av byggnadsmaterial med speciella egenskaper är mer komplicerad än

¹ Tomas Frödelius (Säljare, Moelven Töreboda AB) mailkorrespondens med Jakob Brandin den 14 maj 2013

vanliga material. I detta fall blir till exempel kraven på halssvetsen större för en balk i höghållfast stål än för en i normalstål.

12.3 Återstående dimensionering och utformning

Avgränsningen av vad som dimensioneras eller tas hänsyn till är inte heltäckande och en hel del beräkningar och beskrivningar har utelämnats. Exempelvis är inte hänsyn tagen till att vertikalbanan är krökt och beräkning av lastfall med horisontella krafter sker ej. I följande avsnitt diskuteras både parametrar som beaktats men inte beräknats, samt sådana som valts bort.

12.3.1 Förband

Förbanden på en langerbalkbro är bland de viktigaste delarna och i detta projekt har det endast bestämts hur de ska utformas. Speciellt förbandet mellan båge och förstyrningsbalk är kritiskt då träet här utsätts för dragning nästan 45 grader mot fibrerna. Detta har lösts med ett fyrskärsförband, men detta kanske inte är tillräckligt, och då kan änden av bågen och förstyrningsbalken kläs in med stål, så att ett stålförband kan användas istället.

12.3.2 Detaljutformning

Förslag på hur kantbalk, räcken och vattenavrinning ska utformas i detta projekt har erhållits under kandidatgruppens studiebesök på Moelven i Töreboda. Varken vattenflöden eller om kantbalken med räcke klarar påkörning har beräknats, vilket betyder att dimensioner på ränna och kantbalk är antagna. Detta leder till att bredden på bron och därmed tvärbalkens spännvidd kan behöva minskas eller ökas. Detta är dock i sammanhanget en mycket liten förändring.

Enligt teknisk beskrivning ska varken belysning eller vägskyltning finnas på bron. Dock så kan det vara relevant att ha belysning placerad under bron som lyser upp den på natten, för att framhäva brons estetik. Detta för att ytterligare uppnå målet om ett synligt, tydligt och fint landmärke.

12.3.3 Konstruktivt träskydd

Eftersom ett av de viktigaste skälen till att bygga med trä överhuvudtaget är att det är ett miljövänligt och förnyelsebart material, tycks det något kontraproduktivt att impregnera materialet med miljöfarliga kemikalier. I situationer där det anses vara tvunget att impregnera träet anser vi det nästan inte lönt att bygga i trä överhuvudtaget. Så stora förluster i miljövänlighet som impregneringen innebär gör att annat byggnadsmaterial lika gärna hade kunnat väljas. Med ett väl genomarbetat konstruktivt träskydd ska förhoppningsvis inte många situationer där impregnering känns nödvändig uppstå, och utan impregnering är trä det mest miljövänliga byggnadsmaterial som finns att tillgå.

12.3.4 Horisontallaster och dynamik

Horisontalkrafter har tagits hänsyn till i beskrivningen av stagen mellan bågarna och i pelardimensioneringen. Vid dimensionering av övriga konstruktionsdelar tas hänsyn varken till horisontella laster i längsled eller tvärlädd. I detta specifika fall har beräkningen av horisontalkrafternas inverkan stor relevans eftersom träbron är en lätt konstruktion. Redan

tidigt under arbetsgången togs dock beslutet att avgränsa rapporten till att exkludera dessa beräkningar. Vid en mer noggrann analys bör vindlaster, accelerations- och retardationslaster från fordon samt de dynamiska effekter som dessa ger upphov till tas i beaktande. Konstruktionens verkningssätt har dock förmågan att uppta dessa laster men rapporten studerar alltså inte om kapaciteten är tillräcklig.

12.3.5 Övergång mellan sidospänn och mittspänn

För att förenkla dimensioneringen har vi i detta projekt valt att dimensionera sidospänn och mittspänn helt separat. Bättre hade varit att skapa samverkan mellan dessa genom att broplattan, som har ungefär samma dimensioner både i sido- och mittspänn, varit kontinuerligt över alla tre spänn. Detta hade dels minskat momentet i plattan, och dels hade det stabiliserat bron, och bron hade därigenom haft bättre förmåga att ta upp krafter i horisontalled.

Ett problem som uppstår vid anslutningen är att konstruktionshöjden på de olika spänn skiljer sig markant. Detta måste lösas genom att antingen halva pelaren blir högre än andra halvan, eller att en kraftöverförande konstruktion placeras på pelaren. Det förra alternativet kommer öka belastningen på pelaren eftersom normalkraften då inte angriper mitt på pelaren, så krafterna får en excentricitet som ger upphov till extra moment i pelaren. Detta problem skulle inte uppstå med den senare lösningen, men utformningen på den kraftöverförande konstruktionen behandlas ej i denna rapport.

12.3.6 Kompletterande upplag

Sidospännets längsgående balkar vilar i deras ena ände på vingmuren vid landfästet. I deras andra ände fodras ett upplag. Denna konstruktionsdel antas bli belastad med halva sidospännets lastuppsättning och bör samtidigt fungera som mittspännets yttersta tvärbalk. Med anledning av båda dessa bidrag utsätts elementet för kraftig belastning vertikalt. En passande lösning vore att utforma detta element likt en balk som sträcker sig från det ena stödet till det andra. Dess exakta utformning utreds inte i denna rapport men för en slutgiltig dimensionering måste en lösning presenteras.

För alternativet med en tvärbalk på två stöd är det största problemet att föra ner krafterna från balken till stöden. En möjlig lösning på detta problem är att såga ut ett hål i pelaren, i vilket balken förs in. Infästningen kan förstärkas med hjälp av en kraftig vinkelplåt. Detta utförande skulle skapa en fast inspänning, men momentet som uppstår kan vara svårt att hantera. Dessutom minskas pelarens förmåga att ta upp axiella laster eftersom dess tvärsnittsarea lokalt reduceras. Lösningen på detta problem är att förstora pelarens dimensioner.

En annan möjlighet är att, istället för två pelare, utforma stödet som en skiva, antingen av trä eller av betong. I detta alternativ utgör stödet i sig både funktionen av pelare och tvärbalk. Med denna lösning undviks de stora moment som uppstår i den förra utformningen. Materialåtgången blir dock avsevärt större.

12.3.7 Temperaturutvidgning

Trä är ett material som påverkas av temperaturskillnader. I en bro, där vissa delar utsätts för solljus och andra ligger i skugga kan dessa skillnader spela stor roll. Dessutom skiljer sig träets temperaturlängdutvidgningskoefficient markant i fiberriktning respektive vinkelrätt fiberriktning. Stora spänningar kan alltså uppstå i bron på grund av temperaturförändringar. Dessa spänningar kan teoretiskt sett kräva kraftigare dimensioner, men framförallt påverkar utvidgningen förbanden, som utsätts för större krafter. Vid dimensionering av förbanden tas viss hänsyn till detta genom omräkningsfaktorn k_{mod} vid beräkning av bärförmågan. Detta reducerar hållfastheten men beaktar ej volymsändringen.

12.3.8 Övriga kompletteringar till dimensioneringen

På tvärbalken är inte halssvetsen dimensionerad. Dimensionerade ekvivalent spänning för svetsen uppstår där interaktionen mellan tvärkraft och moment ger störst utslag. En rimlig gissning är att dimensionerande spänning uppkommer under den största axellasten där både moment och tvärkraft har höga värden. En annan möjlig punkt för den dimensionerande spänningen är vid kanten av tvärbalken där staget är infäst. Här är momentet mycket litet men däremot är tvärkraften mycket stor. Denna dimensionering kommer dock inte att påverka bron i övrigt.

På pelarna måste lager användas för att få en bra anslutning mellan bron och dess upplag. Dessa bör dimensioneras i brottgränstillstånd och även för en minsta last, då vissa lager kräver en minimilast för att fungera. Om kraften på lagren blir för stor kan pelarnas dimensioner behöva ökas.

Eftersom konstruktionen är mycket lätt i förhållande till exempelvis betongbroar, bör inte eventuella sättningar påverka nämnvärt. Detta kan dock inte anses vara säkert eftersom det ej har utretts.

12.4 Jämförelse med Gislavedsbron

I avsnittet om kvarstående broar presenteras en vägtrafikbro i trä som för närvarande byggs utanför Gislaved. I sambandet med studiebesöket hos Moelven i Töreboda gavs möjligheten att närmare studera denna bro. Likheter mellan denna bro och det brokoncept som denna rapport kommer fram till är många. Därför är det av intresse att jämföra dess konstruktionsdelar sinsemellan.

Bron i Gislaved kommer ha betydligt färre tvärbalkar per längdenhet men dess dimensioner är å andra sidan större. Även broplattan är tjockare och summan blir därför en högre konstruktionshöjd. Den högre konstruktionshöjden gör att färre antal hängstag är nödvändigt för hållfastheten. Resultatet är en materialeffektiv användning av stål vilket reducerar byggnadskostnaden. Som tidigare diskuterats hade en högre tillåten konstruktionshöjd varit gynnsam för vårt koncept.

Vid en jämförelse av bågens dimensioner visar det sig Gislavedsbron har något mindre dimensioner men att dessa kan förklaras med den kortare spännvidden. Då denna båge också

är av 2-ledstyp på en bågform med liknade krökning blir slutsatsen att vår dimensionering av bågen kan anses vara rimlig.

En stor skillnad mellan broarna är att Gislavedsbron utformats med ett dragstag i stål istället för en förstyrningsbalk i trä. Då de har klätt in änden av bågen i stål, får de ett relativt enkelt förband mellan dragbandet och bågen, eftersom inga krafter vinkelrätt fiberriktningen förekommer. Ett dragstag i stål har också fördelen att det tar upp mindre plats, men utrymme har inte utgjort ett större problem i vårt projekt. En förstyrningsbalk i trä anses uppfylla syftet med en miljövänlig och estetisk bro mer än ett ståldragband och kostnadsskillnaden är troligtvis inte så stor, trots det stora förbandet för träalternativet.

12.5 Tillförlitlighet av använda källor

I beskrivningen av brotyperna har endast ett fåtal källor använts; Trafikverket är den källa vi här har utnyttjat mest. Källorna i denna del är alla relativt opartiska vilket bidrar till deras trovärdighet. Att endast använda ett fåtal källor räcker i den översiktliga analysen av brotyper eftersom vilka egenskaper olika brotyper har inte är en kontroversiell fråga. Detta gäller dock inte för undersökningen av vilka material som passar för byggnation av broar. Den senare frågan kan få mycket varierande svar beroende på berörda aktörers egenintressen. Därför har fakta från flera olika källor använts vid studien av materialegenskaper. Eftersom dessa källor ofta hämtas från respektive materials tillverkare är de inte lika tillförlitliga som de mer oberoende brotypskällorna. Övergripande har en bra fördelning mellan källor från industrin och mer institutionella källor uppnåtts.

På grund av källornas tillförlitlighet och mångfald, antaganden på säkra sidan samt beräkningar som följer gällande normer, anser vi resultatet av rapporten vara tillförlitligt.

13 Slutsats

Detta projekt har visat att trä uppfyller önskemålen om estetik, innovation och miljövänlighet, samtidigt som det uppnår alla krav på bärighet. Det är alltså ett intressant material att bygga vägtrafikbroar i, även för relativt långa spännvidder. Det faktum att låga konstruktionshöjder kan begränsa broar med bärande delar helt utförda i trä kvarstår dock. I detta projekt har det resulterat i att tvärgående balkar konstruerats i stål.

Genomtänka konstruktionstekniska lösningar är en förutsättning för lyckade broprojekt i trä och skapar intressanta utmaningar för dagens konstruktörer. Den i rapporten dimensionerade bågen uppfyller väl sin funktion utan orimliga dimensioner och visar därför på att stål och betong inte behöver vara de givna konstruktionsmaterialen vid brobyggnad.

Kritiker av trä som byggnadsmaterial ifrågasätter dess livslängd, men vi anser att med rätt konstruktivt träskydd kan träet skyddas så pass väl att det ska klara långa livslängder, även utan kemisk behandling. Vissa underhållsarbeten kommer naturligtvis krävas, men så är fallet även för broar av andra material. Tack vare den senaste tidens utveckling av träprodukter samt samhällets ökade behov av förnyelsebara material kan trä vara framtidens brobyggnadsmaterial.

Källförteckning

Litteraturkällor

American Concrete Institute Committee, ACI. (1997) Routine Maintenance of Concrete Bridges http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/3451r_92.pdf (2013-03-02)

Bremner, T.W. (2001), *ENVIRONMENTAL ASPECTS OF CONCRETE: PROBLEMS AND SOLUTIONS*. University of New Brunswick.
<http://www.unb.ca/civil/materials/materialsgrp/eac.pdf> (2013-02-10)

Burström, P-G. (2007) *Byggnadsmaterial - Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*.
Upplaga 2:7. Lund: Studentlitteratur AB

Carling, O. (2008) Limträhandbok. *Lunds Universitet*.
http://www.bkl.lth.se/fileadmin/byggnadskonstruktion/education/VSMF10/referenslitteratur/Limtrahandbok_200812.pdf, (2013-03-01)

Casas, J.R. och Aparicio, A.C. (1998) Monitoring of the Alamillo cable-stayed bridge during construction. *Experimental Mechanics*, volym 38, nummer 1, s 24-28

Collings, D. (2008) Composite construction. I *ICE Manual of bridge Engineering* 2nd Edition. Red. Gerard Parke och Nigel Hewson. London: Thomas Telford publishing

Concrete Bridge Development Group. (2006) *An Introduction to Concrete Bridges*.
Trowbridge, UK: Cromwell Press

Domone, P. och Illston, J. (2010) *Construction Materials - their nature and behaviour*. 4:e upplagan. Abingdon: Spon Press.

Duan, L., Saleh, Y., Altman, S. (2000) Chapter 12. Steel-Concrete Composite I-Girder Bridges. I *Bridge Engineering Handbook*. Red. Wai-Fah Chen och Lian Duan. Boca Raton: CRC press.

Durkee, J. (2000) Chapter 45. Steel Bridge Construction. I *Bridge Engineering Handbook*. Red. Wai-Fah Chen och Lian Duan. Boca Raton: CRC press.

Engström, B. (2011) Betongbyggnad. I *Bärande konstruktioner Del 1*. Rapport: 2011:11. Göteborg: Institutionen för Bygg- och miljöteknik, Avdelningen för konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola.

Fox, G.F. (2000) Chapter 17. Arch Bridges. I *Bridge Engineering Handbook*. Red. Wai-Fah Chen och Lian Duan. Boca Raton: CRC press.

Fridley, K.J. (2000) Chapter 20. Timber bridges. I *Bridge Engineering Handbook*. Red. Wai-Fah Chen och Lian Duan. Boca Raton: CRC press.

International Federation for Structural Concrete, FIB. (2000) *Good bridge design*. Stuttgart: Sprint-Druck.

Johansson, B. (2006) Samverkansbroar enligt Eurokod 4 del 2. *Swedish Standards Institute* <http://www.sis.se/upload/632917538061993750.pdf> (2013-03-01)

Johansson, M. (2011a) Träbyggnad. I *Bärande konstruktioner Del 1*. Rapport: 2011:11. Göteborg: Institutionen för Bygg- och miljöteknik, Avdelningen för konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola.

Johansson, P. (2011b) Träbyggnad. I *Bärande konstruktioner Del 1*. Rapport: 2011:11. Göteborg: Institutionen för Bygg- och miljöteknik, Avdelningen för konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola.

Johansson, M. (2011c) Träbyggnad. I *Bärande konstruktioner Del 2*. Rapport: 2011:1. Göteborg: Institutionen för Bygg- och miljöteknik, Avdelningen för konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola.

Harazaki, I., Suzuki, S., Okukawa, A. (2000) Chapter 18. Suspension bridges. I *Bridge Engineering Handbook*. Red. Wai-Fah Chen och Lian Duan. Boca Raton: CRC press.

Larsson, M. (2011) Modern brogrundläggning - spar tid och minskar risk. *Samhällsbyggaren*, nummer 1, s 24-28

Lorentsen, M., Sundquist, H. (1998) *Bågkonstruktioner*. Utgåva nr 3. Stockholm: Institutionen för Byggkonstruktion, Kungliga Tekniska Högskolan.

- Lundberg, J.A. (2012) Snabbare och 40 % billigare. *Trafikverket*.
<http://www.trafikverket.se/Foretag/Bygga-och-underhalla/Branschsamarbete/Fornynelse-i-anlaggningsbranschen-FIA/Goda-exempel1/Struktur-Goda-exempel/Snabbare-och-40--billigare-/>. (2013-02-20)
- Lyang, J., Lee, D., Kung, J. (2000) Chapter 9. Reinforced Concrete Bridges. I *Bridge Engineering Handbook*. Red. Wai-Fah Chen och Lian Duan. Boca Raton: CRC press.
- Marklund, M., Nilsson, E. (2008) *Prefabricerade segmentbroar för väg*. Luleå: Luleå tekniska universitet. (Examensarbete inom Institutionen för Samhällsbyggnad, Avdelningen för Byggkonstruktion)
- Mattson H-Å. (2006) *Funktionsentreprenad Brounderhåll - En pilotstudie i Uppsala län* Stockholm: Kungliga Tekniska högskolan, Avdelning för brobyggnad. Trita-BKN. Bulletin, 1103-4270; 82
- Melbourne, C. (2008) Design of Arch bridges. I *ICE Manual of bridge Engineering* 2nd Edition. Red. Gerard Parke och Nigel Hewson. London: Thomas Telford publishing
- Moelven. Kerto - Teknisk handbok. *Goda Rum*. <http://www.goda-rum.se/Documents/Sverige/Produkter%20och%20tj%C3%A4nster/Industritr%C3%A4/Limtra%20Kerto/Kerto-handbok.pdf> (2013-03-22)
- Moelven (2013) Unik vägbro ökar säkerheten. *Moelven - Goda rum*.
<http://www.moelven.com/se/Produkter-och-tjanster/Limtra/Nyheter/Unik-vagbro-okar-sakerheten/> (2013-05-17)
- Peñaloza, D., Norén, J., Eriksson, P-E. (2013) *Life Cycle Assessment of Different Building Systems: The Wälludden Case Study*. Borås: SP Wood Technology. (SP Rapport 2013:07)
- Pousette, A. (2008) *Träbroar - konstruktion och dimensionering*. SP Träteknik (SP Rapport 2008:50)
- Reuterswärd, P. (2010) *Optimal skötsel av stålbroar*. Stockholm: Swerea KIMAB
- Sauvageot, G. (2000) Chapter 11. Segmental Concrete Bridges. I *Bridge Engineering Handbook*. Red. Wai-Fah Chen och Lian Duan. Boca Raton: CRC press.

Setra. (2007) Bra att veta om limträ. *Setra group*.
http://www.setragroup.com/upload/Dokument/Byggbeskrivningar/Bra_att_veta_om_limtra.pdf (2013-02-01)

Tarmac. (2012) Embodied carbon and whole-life performance. *Tarmac - Sustainability Report 2011/12*. <http://www.tarmac.co.uk/sustainability/climate-change/strategy/embodied-carbon-performance.html> (2013-02-17)

Trafikverket. (2010a) VVK Brounderhåll 2010:20. *Trafikverket*.
http://publikationswebbutik.vv.se/upload/5426/2010_20_vvk_brounderhall.pdf (2013-02-15)

Trafikverket. (2010b) VU94 version S-2. *Trafikverket*.
<http://www.trafikverket.se/Foretag/Bygga-och-underhalla/Vag/Utformning-av-vagar-och-gator/Vagar-och-gators-utformning/Aldre-versioner/VU94-version-S-21/> (2013-04-24)

Trafikverket. (2011) *Trafikverkets tekniska krav Bro*. Borlänge: Trafikverket (TRV publ nr 2011:085)

Trafikverket. (2012a) Bakgrund. *Trafikverket*.
<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Vastra-Gotaland/Vag-40-mellan-Dallebo-och-Hester/Bakgrund/>. (2013-01-30)

Trafikverket. (2012b), Järnvägsutredning Sundsvall-Härnösand. *Trafikverket*.
http://www.trafikverket.se/PageFiles/19841/ju_svall_hsd_lag.pdf (2013-02-12)

Trafikverket. (2013a), Infobroschyr. *Trafikverket*.
http://www.trafikverket.se/PageFiles/10385/Infobroschyr5_130204.pdf, (2013-02-28)

Trafikverket. (2013b) Väg 40 Ulricehamn ska byggas ut till motorväg. *Trafikverket*.
<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Vastra-Gotaland/Vag-40-mellan-Dallebo-och-Hester/>. (2013-01-30)

Träguiden. (2006), Hållfasthet. *TräGuiden*.
<http://www.traguiden.se/TGtemplates/popup1spalt.aspx?id=1105>, (2013-03-01)

TSFS 2010:142 *Transportstyrelsens föreskrifter om färd med lång odelbar last*. Norrköping, Transportstyrelsen.

Ukswedensustainability. (2006) Best practice today. *Joint UK-Sweden Initiative on Sustainable Construction*.

<http://www.ukswedensustainability.org/bestpractice/bestpractice.jsp> (2013-02-16)

Vägverket. (1994) *Handbok för broinspektion* Publ. 1993:34, Borlänge.

Vägverket. (1996) *Broprojektering - en handbok* Publ. 1996:63, Borlänge.

Vägverket. (2008) BaTMan: Kodförteckning och beskrivning av brotyper. *BaTMan*

https://batman.vv.se/batinfo/Batman/BiblioteketPDF/01_dokument%20batman/kodfoerteckning%20och%20beskrivning%20av%20brotyper.pdf (2013-02-09)

Bildkällor

Ahlberg, S-O., Spade, B. (2001) *Våra broar - en kulturskatt*. Borlänge: Vägverket

Trafikverket. (2013a), Infobroschyr. *Trafikverket*.

http://www.trafikverket.se/PageFiles/10385/Infobroschyr5_130204.pdf, (2013-02-28)

Bilagskällor

Al-Emrani, M. et al. (2011a) *Bärande konstruktioner Del 1*. Rapport: 2011:11. Göteborg: Institutionen för Bygg- och miljöteknik, Avdelningen för konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola.

Al-Emrani, M. et al. (2011b) *Bärande konstruktioner Del 2*. Rapport: 2011:1. Göteborg: Institutionen för Bygg- och miljöteknik, Avdelningen för konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola.

Lorentsen, M., Sundquist, H. (1998) *Bågkonstruktioner*. Utgåva nr 3. Stockholm: Institutionen för Byggkonstruktion, Kungliga Tekniska Högskolan.

Malm, R. (2004) Konstruktionsuppgift, Stål och samverkansbroar. I *Stål- och samverkansbroar - Seminarieuppgifter i doktorandkurs 2004*, red. Ola Enochsson. Luleå: Luleå tekniska universitet, Institutionen för Samhällsbyggnad, Avdelningen för Byggkonstruktion. Rapport 2005:13

Ruuki. (2012) *Varmvalsad grovplåt, tilläggsprislista.*

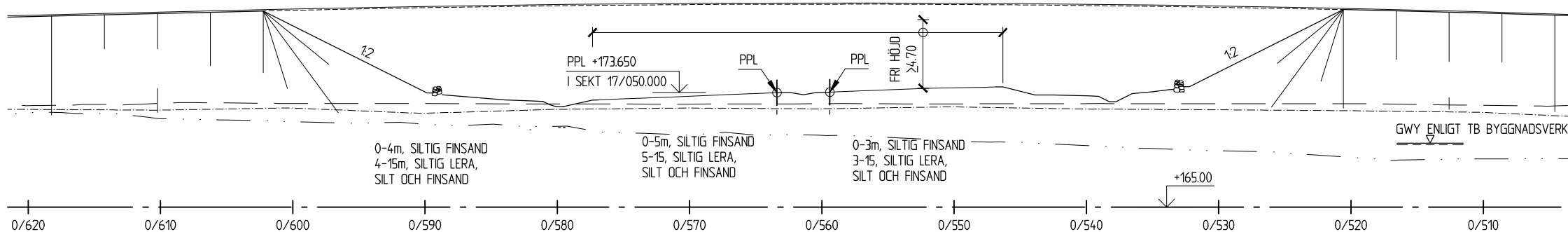
<http://www.ruukki.se/~media/Sweden/Files/Steel%20products/Pricelists/HRP%20tillggsprislista.pdf> (2013-05-18)

TRVFS 2011:12 *Trafikverkets föreskrifter om ändring i Vägverkets föreskrifter (VVFS 2004:43) om tillämpningen av europeiska beräkningsstandarder.* Borlänge, Trafikverket.

Bilaga 1: Förslagsritning

TOTAL BROLÄNGD 82,7 m I SL

- BEF MARKKONTUR 20 m Ö OM SL
- BEF MARKKONTUR I SL
- BEF MARKKONTUR 20 m V OM SL



ALLMÄNNA ANVISNINGAR

- HÖJDSYSTEM: RH 70
- KOORDINATSYSTEM: RT 90 5 gon V 0-1
- HÖJDFIX: ENLIGT MÄTPÄRM
- POLYGONPUNKTER: ENLIGT MÄTPÄRM
- NORMER, FÖRESKRIFTER OCH BESKRIVNINGAR: BRON SKALL DIMENSIONERAS OCH UTFÖRAS ENLIGT TK BRO (PUBL 2009:7) OCH TK GEO (PUBL 2009:46) SAMT TEKNISK BESKRIVNING BYGGNADSVÄRK 3K110002 UPPRÄTTAD AV COWI AB, DATERAD 2012-03-01

FÖRKLARINGAR

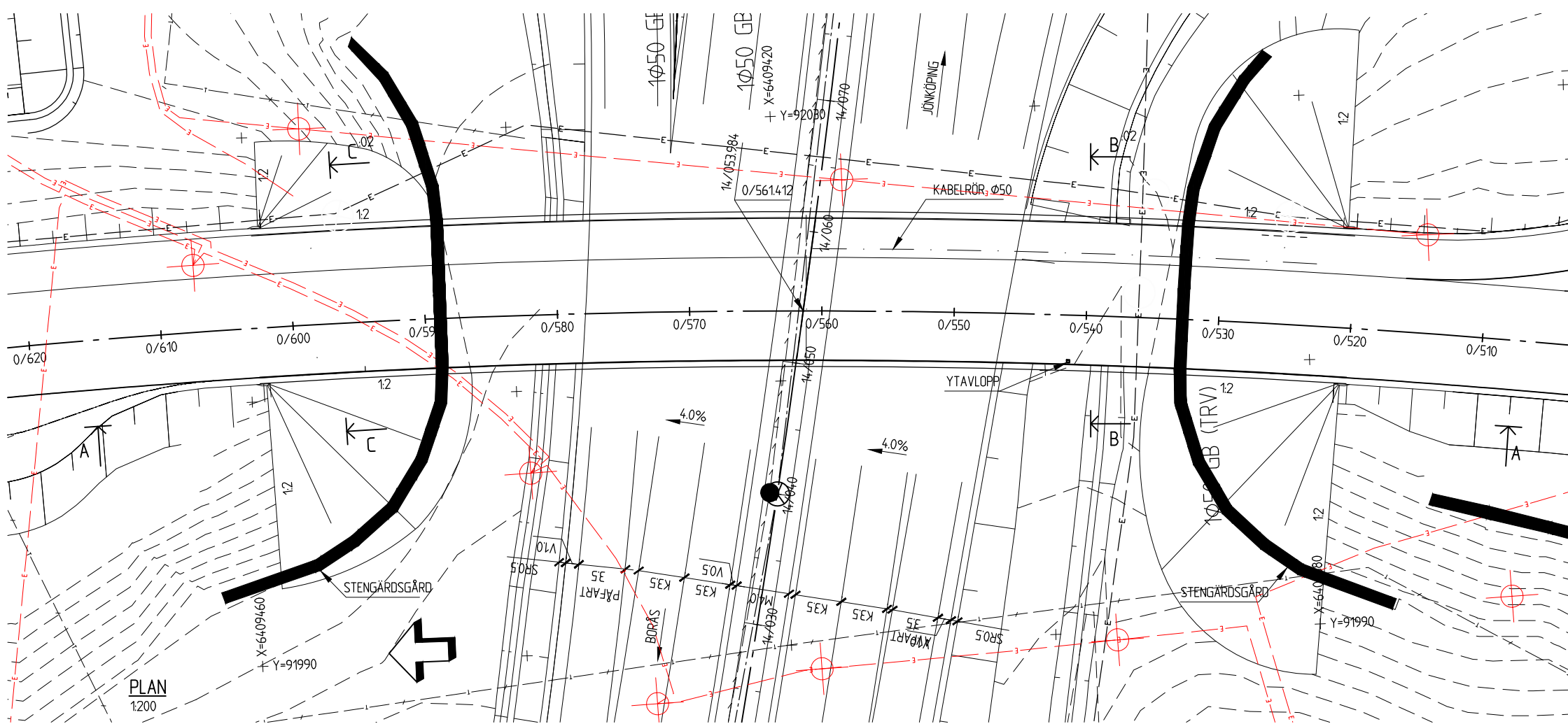
FL/RL AVSER FAST RESPEKTIVE RÖRLIGT LAGER

HÄNVISNINGAR

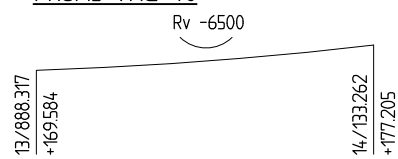
- LEDNINGAR ENLIGT RITNING 300W5101
- BANKPÅLNING ENLIGT RITNINGAR 346G1501-03
- YTSKIKT ENLIGT RITNING 300L1901
- BELYSNING ENLIGT RITNING 301E6301
- KANALISATION ENLIGT RITNING 300W6301

TECKENFÖRKLARINGAR

- E --- BEFINTLIG EL, MARKFÖRLAGD KABEL
- T --- BEFINTLIG TELE, MARKFÖRLAGD KABEL
- E --- OMLAGD EL OCH TELE, MARKFÖRLAGD KABEL
- NY --- NY DRÄNERINGSLEDNING
- NY --- NY DAGVATTENLEDNING
- ⊕ --- DAGVATTENBRUNN
- --- TILLSYNSBRUNN
- --- KABELBRUNN
- ⊕ --- BELYSNINGSFUNDAMENT



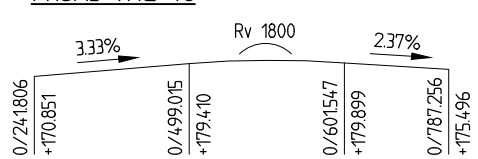
PROFIL VÄG 40



PLANDATA VÄG 40

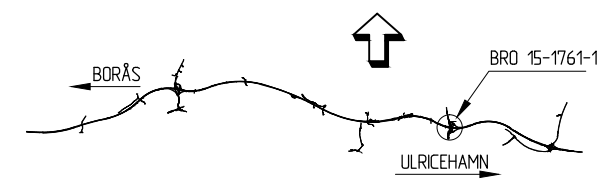
PUNKT	SEKTION	X	Y	ANM.
1	13/781.540	64094.96.705	91755.033	
2	14/597.924	64094.51.244	92553.088	R=1150

PROFIL VÄG 46



PLANDATA VÄG 46

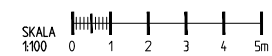
PUNKT	SEKTION	X	Y	ANM.
1	0/385.689	64092.98.144	91999.113	
2	0/709.110	64096.18.160	91992.059	R=650



SITUATIONSPLAN

REV	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	GÖDK	DATUM	VV DATUM	VV DIARENUMMER
BYGGHANDLING			FÖRFRÅGNINGSUNDERLAG			
			VÄG 40 BORÅS-ULRICEHAMN DELEN DÄLLEBO-HESTER ETAPP 3 BRÖ ÖVER ALLMÄN VÄG I ULRICEHAMN (ULRICEHAMNSMOTET)			
			KM 14/050 FÖRSLAGSRITNING			
UPPDRAGSANSVÄRIG A BERGHOLTZ			UPPDRAGSNUMMER 161 925			
KONSTR C KIVILÖO			GRANSK M BÄCKSTRÖM			
GÖTEBORG			2012-03-01			
PLAN, ELEVATION			KONSTRUKTIONSR 15-1761-1		FORMAT A1	
SKALA ENLIGT FIGUR			RITINGSNR 85 43 60 30		REV 346K2001	

Filnamn: \\cowi.net\Projects\A020000\A024770_3_Pdec\CAD\346K2001_1om.dwg, Plotad: 2012-01-19 - 10:04 / snlo, Layout: 346K2001, Format: A1



Bilaga 2: Teknisk beskrivning

**TRAFIKVERKET
PROJEKT VÄG 40 DÅLLEBO-ULRICEHAMN
DELEN DÅLLEBO-HESTER, ETAPP 3
VÄSTRA GÖTALANDS LÄN**

TEKNISK BESKRIVNING BYGGNADSVÄRK

avseende

15-1761-1

BRO ÖVER ALLMÄN VÄG I ULRICEHAMN (ULRICEHAMNSMOTET), KM 14/050

OBJEKTNR 85 43 60 30

CHAOSNR 3K110002

Handlingen upprättad 2012-03-01

Handlingen reviderad:

Innehåll

OBJEKT- OCH DOKUMENTDATA	Objektdata	4
	Dokumentdata	4
REGLER FÖR DENNA BESKRIVNING		5
	Dokumentutformning	5
	Avsnitt	5
	Rubriker enligt Dispositionen	5
	Typer av konstruktioner	5
	Kravhierarkier	6
	Förteckning över okodade underrubriker	6
B. TRAFIK		7
	B1. Vägtrafik	7
C. BEFINTLIG MARK, MILJÖ OCH KONSTRUKTIONER		8
	C1. Befintlig mark och miljö	8
	C1. Befintlig mark och miljö/ Topografiska förhållanden	8
	C1. Befintlig mark och miljö/ Geotekniska förhållanden	8
	C1. Befintlig mark och miljö/ Geohydrologiska förhållanden	9
	C2. Befintliga konstruktioner	9
	C2. Befintliga konstruktioner/ Elledning	9
	C2. Befintliga konstruktioner/ Teleledning	9
D. VÄGANLÄGGNING		10
	DB. Vägkonstruktion	12
	DB2. Underbyggnad/ Vägbro	12
	DC. Vägbro	13
	DC1. Bärverk i vägbro	13
	DC12. Balk	13
	DC12. Balk/ Kantbalk	13
	DC13c. Upplagsanordningar	14
	DC13cb. Lager	14
	DC2. Grundläggning av vägbro/ schaktning	14
	DC2. Grundläggning av vägbro/ pålning	14
	DC2. Grundläggning av vägbro/ bottenplatta	14
	DC3. Komplettering i vägbro	15
	DC31. Beläggning	15
	DC31. Beläggning/ Slitlager	15
	DC31. Beläggning/ Bindlager	15
	DC31. Beläggning/ Kantstöd	15
	DC33. Tätskikt, skyddslager	15
	DC33. Tätskikt, skyddslager/ Tätskikt	15
	DC38. Diverse kompletteringar i vägbro/ Fog med fogmassa	15
	DC38. Diverse kompletteringar i vägbro/ Avvägningsdubb	16
	DC38. Diverse kompletteringar i vägbro/ Loddubbar	16
	DC4. Slänt eller kon	16
	DC41. Slänt	16
	DC42. Kon	16

DE. Avvattningssystem	16
DE2. Dränvattensystem	16
DE21. Dränvattenledning/ Grundavlopp i bro	17
DF. Trafikskyddsanordning	17
DF2. Räcke	17
DF21. Sidoräcke	17
DF21. Sidoräcke/ Broräcke	17
DF25. Räckeskomplettering/ Skyddsnet	18
DK. Elsystem och telesystem	18
DK. Elsystem och telesystem/ Kabelskyddsror i betongkonstruktion	18
X. DOKUMENTATION	19
X. Dokumentation/ Digital dokumenthantering	19
XB. Projekteringshandling	19
XB. Projekteringshandling/ Design basis	19
XC. Arbetshandling	19
XC. Arbetshandling/ Vägbro	19
XD. Relationshandling	20
XD. Relationshandling/ Vägbro	21

OBJEKT- OCH DOKUMENTDATA Objektdata

Vägnummer: Väg 40

Vägnamn: Väg 40 Borås - Ulricehamn

Objektnamn: Delen Dällebo – Hester, Etapp 3

Objektnummer: 85 43 60 30

Kommun: Ulricehamns Kommun

Län: Västra Götaland

Dokumentdata

Titel: Teknisk Beskrivning Byggnadsverk
15-1761-1 Bro över allmän väg

Dokumentslag: 3K110002, Bygghandling

Utgivningsdatum: 2012-03-01

Utgivare: Trafikverket

Kontaktperson: Gunnar Jellbin

Konsulter: COWI AB

Carl Kiviloo Broprojektör

Lennart Johansson Geotekniker

REGLER FÖR DENNA BESKRIVNING

Dokumentutformning

Avsnitt

För denna OTB gäller att den innehåller rubriker under avsnitten:

- Objekt- och dokumentdata
- Regler för denna beskrivning
- B. Trafik
- C. Befintlig mark, miljö och konstruktioner
- D. Väganläggning
- X. Dokumentation.

I avsnitt "Objekt- och dokumentdata", anges uppgifter som en del av förvaltningsdata.

I avsnitt "Regler för denna beskrivning" anges regler för tolkning av denna beskrivning. Här anges bland annat uppdelning i avsnitt, användning av rubriker och underrubriker samt kravhierarkier (pyramidregel).

I avsnitt "B. Trafik" anges den trafik som konstruktionerna ska dimensioneras för.

I avsnitt "C. Befintlig mark, miljö och konstruktioner" beskrivs de befintliga förhållandena före entreprenadens genomförande samt eventuella krav på åtgärder.

I avsnitt "D. Väganläggning" anges förutsättningar och krav som gäller för entreprenaden avseende gestaltning, utformning och byggande.

I avsnitt "X. Dokumentation" anges krav på dokumentation m.m.

Rubriker enligt Dispositionen

Avsnitt som inleds med en bokstavskod (Exempel: "B. Trafik") är strukturerade med rubriker enligt en av Trafikverket framtagen disposition. Texterna är insorterade under dessa rubriker. Rubrikerna består av kod och benämning.

Exempel: Rubriken "D. Väganläggning", där "D" är koden och "Väganläggning" är benämningen (klartexten) för koden "D".

Typer av konstruktioner

Väganläggning (hel väganläggning) uttrycks av rubriken "D. Väganläggning". Där beskrivs det som gäller för hel väganläggning.

Konstruktion eller konstruktionsdel (del av väganläggning) uttrycks i Dispositionen av de bokstavskodade rubrikerna "DB. Vägkonstruktion", "DC. Vägbro" och så vidare inklusive deras underliggande bokstavskoder (som alltså saknar snedstreck). Under varje sådan rubrik beskrivs det som gäller för denna konstruktion.

Typ av konstruktion uttrycks i Dispositionen av rubrik för konstruktion följt av "/x" där x anger typ av konstruktion. Exempel på rubrik är "DC11. Brobanepatta/ Platsgjuten brobanepatta" där brobanepatta är konstruktion och platsgjuten brobanepatta är typ av sådan konstruktion.

Kravhierarkier

Koderna är uppbyggda så att varje tillkommande tecken, räknat från vänster till höger, anger ett begrepp på underordnad nivå. Exempelvis är ”DB” underordnad ”D” och ”D” är överordnad ”DB”.

Vissa koder innehåller dock i stället för ett tillkommande tecken ett snedstreck (’/’) följt av en benämning. Detta snedstreck och benämning motsvarar ett tillkommande tecken, det vill säga en (1) kodposition i hierarkiskt avseende.

Krav under rubrik med överordnad kod gäller även som krav under en underordnad kod. Exempelvis gäller krav under ”D” som tillägg till krav under ”DB”.

Krav under en underrubrik gäller även som krav under en mera specificerad underrubrik. Exempelvis gäller krav under ”Teknisk lösning” som tillägg till krav under ”Teknisk lösning. Märkning”.

Förteckning över okodade underrubriker

Under okodade underrubriker anges krav indelade enligt följande.

De okodade underrubrikerna är:

- Omfattning
- Funktion
- Teknisk lösning
- Kontroll

Under ”Funktion” och under ”Teknisk lösning” ställs krav och anges kvalitetsnivåer. För varje krav ställs i direkt anslutning krav på dess kontroll under rubriken ”Kontroll”.

Under ”Funktion” hanteras följande:

- Bärförmåga, stadga och beständighet
- Säkerhet vid användning
- Hälsa och miljö
- Buller
- Energihushållning
- Säkerhet vid brand

Under ”Teknisk lösning” hanteras följande:

- Material
- Vara
- Konstruktion
- Utförande
- Märkning

Under ”Kontroll” hanteras följande:

- Provning (inklusive mätning)
- Beräkning
- Besiktning

B. TRAFIK

B1. Vägtrafik

ÅDT för väg 40 beräknas till 12000 (år 2015). År 2035 beräknas ÅDT till 15100. Andel tung trafik ska förutsättas vara 22%.

Alla personbilar ska förutsättas ha dubbdäck under perioden 1 oktober till 30 april. Vidare ska förutsättas att vägbanan saltas.

C. BEFINTLIG MARK, MILJÖ OCH KONSTRUKTIONER

Omfattning

De befintliga hus, broar, vägar och andra anläggningar, som berörs eller behöver rivas eller flyttas eller mark som behöver avverkas eller röjas, beror på hur entreprenören utformar brobygget. Under ”C1. Befintlig mark och miljö” samt under ”C2. Befintliga konstruktioner” listas de objekt som kan komma att beröras med typ och läge.

Entreprenören ska för befintliga hus, broar, vägar och andra anläggningar, som berörs av entreprenaden, projektera och utföra vad som erfordras för att uppfylla angivna krav.

Där det på ritning anges att hus eller anläggning, t.ex. väg eller annan anläggning ska bortschaktas ska även berörda trafikskydds- och trafikledningsanordningar rivas. Återställning efter bortschaktning ska ske till standard lika omgivande mark.

Funktion

Befintliga funktioner på befintliga hus, broar, vägar och andra anläggningar ska vara oförändrade under byggandet av den nya bron och efter det att den har tagits i bruk.

Kontroll

Kontroll ska ske på sätt som anges under aktuell rubrik. Saknas kontrollmetod gäller att kontroll ska ske enligt vedertagna och beprövade metoder eller enligt dokumenterade vetenskapliga metoder eller genom besiktning där besiktningsmannen genom besiktning avgör om alla krav uppfyllts.

C1. Befintlig mark och miljö

Se plan, längd- och tvärsnitt på ritning nummer 3 46 G 1101, 3 46 G 1201 och 3 46 G 1301 – 3 34 G 1307.

C1. Befintlig mark och miljö/ Topografiska förhållanden

Omfattning

Bron kommer att uppföras ca 50-100 m öster om Ätran i syd-nordlig riktning där terrängen består av åker- och ängsmark. I läget för planerad bro ligger marken ungefär på nivån +172. Strax söder om bron och ca 80 m norr om bron sluttar marknivåer till nivån ca +166 för att stiga upp igen till nivån ca +170 ca 300 m söder och norr om bron.

C1. Befintlig mark och miljö/ Geotekniska förhållanden

Omfattning

Djupet till berg varierar mellan ca 45 m (+127) och 50 m (+122).

Under ett ca 0,3 m tjockt mulljordlager består jordlagren av postglaciala svämsediment med medelhög till hög relativ fasthet till ca 3-5 m djup (+167-169). Svämsediment består mestadels av siltig finsand med ställvisa inslag av torv.

Svämsediment vilar på glaciala finkorniga sediment bestående av växelvisa skikt av siltig lera, silt och finsand ned till ca 15 m djup (+157). Relativa fastheten hos glaciala finkorniga sediment är hög till nivån +169, medelhög till hög till nivån +162, låg till nivån +160 och

medelhög till hög till nivån +157. Därunder förekommer glaciala grovkorniga isälvsediment av sand och grus med mycket hög relativ fasthet till troligen mellan 45 och 50 m djup. Närmast berg finns ett lager med bottenmorän.

Den naturliga vattenkvoten är uppmätt till ca 10-25 % i svämsedimenten (siltig finsand) och ca 20-35% i glaciala finkorniga sediment.

Bedömda värden på karakteristisk inre friktionsvinkel Φ'_k . Värdena har korrigerats för siltig jord.

Låg relativ fasthet $\Phi'_k = 30^\circ$

Medelhög relativ fasthet $\Phi'_k = 33^\circ$

Hög relativ fasthet $\Phi'_k = 35^\circ$

Mycket hög relativ fasthet $\Phi'_k = 39^\circ$

Teknisk lösning

Schakt för väg kommer att utföras enligt TB/väg.

C1. Befintlig mark och miljö/ Geohydrologiska förhållanden

Omfattning

En fri vattenyta avlästes i några öppna skruvprovtagningshål i utfyllda jordlager respektive svämsediment (övre grundvattenmagasinet) på mellan ca 1,4–3,5 m under markytan.

Grundvattenrör med filterspets installerades i de fastare friktionsjordslagren (undre grundvattenmagasinet) och visade en grundvattennivå på nivå mellan ca +162,9 och +165,4. Utifrån porttrycksmätare som installerades i de löst lagrade jordlagren avlästes grundvattennivå vid nivå mellan ca +165,3 och +167,9.

C2. Befintliga konstruktioner

C2. Befintliga konstruktioner/ Elledning

Omfattning

Befintliga elledningar i anslutning till område för bro över allmän väg i km 14/050 läggs om öster om bro, se ritning 300W6301. Omläggning utförs enligt handling 10.1, MF väg40.

C2. Befintliga konstruktioner/ Teleledning

Omfattning

Befintliga teleledningar i anslutning till område för bro över allmän väg i km 14/050 om-läggs öster om bro, se ritning 300W6301. Omläggning utförs enligt handling 10.1, MF väg40.

D. VÄGANLÄGGNING

Omfattning

Denna tekniska beskrivning byggnadsverk omfattar 15-1761-1 Bro över allmän väg i Ulricehamn (Ulricehamnsmotet).

Kontroll

Kontroll ska ske på sätt som anges under aktuell rubrik. Saknas kontrollmetod gäller att kontroll ska ske enligt vedertagna och beprövade metoder eller enligt dokumenterade vetenskapliga metoder eller genom besiktning där besiktningsmannen genom besiktning avgör om alla krav uppfyllts.

Funktion

Väganläggning ska uppfylla de krav som föranleds av den trafik som framgår av avsnitt B1. Vägtrafik.

Vid dimensionering ska VVFS 2003:140 "Vägverkets föreskrifter om tekniska egenskapskrav vid byggande på vägar och gator (vägregler)" och VVFS 2004:31 "Vägverkets föreskrifter om bärförmåga, stadga och beständighet hos byggnadsverk vid byggande av vägar och gator" följas i kombination med VVFS 2004:43 "Vägverkets föreskrifter om tillämpning av europeiska beräkningsstandarder".

Vid utformning och dimensionering för bärförmåga, stabilitet och upplyftning av de delar i väganläggning som omfattas av Vägverkets publikation 2009:46, TK Geo ska minst krav i kap. 1, 2, 3, 4 och 5 uppfyllas.

Vid utformning och dimensionering av de delar i väganläggning som omfattas av Vägverkspublikation 2009:120 VVK Väg ska minst krav i kap. 1, 2 och 4 uppfyllas.

Vid utformning och dimensionering av byggnadsverk ska VV publikation 2009:27 TK Bro följas. TK Bro ska tillämpas enligt avsnitt A.1.5.3. För dimensioneringsmetoder, utformningar eller utförandemetoder och som har använts av entreprenören och som inte är beskrivna i TK Bro ska förslag till teknisk lösning innehållande en särskild kravspecifikation upprättas enligt avsnitt A.1.4 Teknisk lösning. Väganläggningens utformning, gestaltning och miljö ska uppfylla krav i denna TB.

All utformning ska utgå från ett trafiksäkerhetstänkande samt att drift och underhåll ska kunna utföras effektivt och med moderna metoder. Trafikmiljön ska utformas förlåtande. Oskyddade trafikanter ska beaktas.

Entreprenadarbeten ska bedrivas så att fornminnen inte skadas.

För del av väganläggning där krav inte ställts ska den ambitions- och kvalitetsnivå följas som uttryckts genom ställda krav för övriga delar av aktuell väganläggning.

Kontroll. Funktion

Under byggskedet ska entreprenören följa upp och kontrollera i tillräcklig omfattning att beräkningsförutsättningar, beräkningsantaganden, materialegenskaper och lagertjocklekar samt övriga produktionsresultat och gjorda utfästelser för material och varor som förutsatts vid projekteringen överensstämmer med förutsättningar och antaganden som använts vid projekteringen.

För dimensioneringsmetoder, utformningar eller utförandemetoder som inte omfattar krav på produktionsresultat som ansluter till AMA Anläggning 07 ska kontroll uppfylla krav enligt en särskild kravspekifikation som är upprättad och godtagen enligt VV publikation 2009:27 TK Bro, A.1.4 och A.1.9.

Teknisk lösning

Avvikelse från förfrågningsunderlagets profilhöjder får inte ske.

I de fall entreprenören väljer tekniska lösningar eller material ska krav enligt TK Bro, TK Geo kapitel 6-17 eller VVK Väg och krav på material eller utförande som åberopas genom hänvisning till AMA Anläggning 07 vara uppfyllda. Produktionsresultat utifrån dessa val ska uppfylla krav på kontroll enligt AMA Anläggning 07 med ändringar och tillägg enligt VV publikation 2010:094 VV AMA 09 rev.2 varvid krav ställda för bro eller kategori A i förekommande fall ska tillämpas.

Kravnivå för enskilda produkter ingående i broar och byggnadsverk ska uppfylla implementerade SS-EN standarder och där sådan saknas ska nivå på tillämplig egenskap specificerad i AMA Anläggning 07 med ändringar och tillägg enligt VV publikation 2010:094 VV AMA 09 rev.2 uppfyllas, varvid krav ställda för bro eller kategori A i förekommande fall ska uppfyllas.

Ingående material ska ha sådana egenskaper att konstruktionsdelen i allt väsentligt behåller sina hållfasthetsegenskaper under hela den dimensionerande tekniska livslängden.

Om för material och vara särskilda bestämmelser för SS-EN utgivits ska entreprenören eller dennes leverantör genom kontroll eller intyg eller genom verifiering enligt nivå 1 visa att bestämmelserna för aktuell standard tillämpas med i bestämmelserna angivna förutsättningar avseende t.ex. utförande och samhörighet med andra standarder.

Material ska vara:

- acceptabla ur miljö- och hälsosynpunkt
- sådana att de inte ger problem vid återanvändning, deponering eller destruktion.

Kontroll. Teknisk lösning

Kontroll ska ske i byggskedet enligt av entreprenören upprättat kontrollprogram

För produkt, material eller vara ska tillverkaren genom verifiering eller kontroll visa att den tekniska livslängden minst motsvarar kraven på dimensionerande livslängd för den konstruktion som material eller vara är avsedd för.

I de fall entreprenören väljer tekniska lösningar eller material ska krav enligt TK Bro, TK Geo kapitel 6-17 eller VVK Väg och krav på material eller utförande som åberopas genom hänvisning till AMA Anläggning 07 vara uppfyllda. Produktionsresultat utifrån dessa val ska uppfylla krav på kontroll enligt AMA Anläggning 07 med ändringar och tillägg enligt VV publikation 2010:094 VV AMA 09 rev.2 varvid krav ställda för bro eller kategori A i förekommande fall ska tillämpas.

Om produkter, material och varor som är beskrivna i AMA Anläggning 07 väljs för väganläggningen ska kontroll och verifiering uppfylla krav enligt AMA Anläggning 07 med ändringar och tillägg enligt VV publikation 2010:094 VV AMA 09 rev.2 varvid krav ställda för bro eller kategori A i förekommande fall ska tillämpas.

För produkter, material och varor som inte är beskrivna i AMA Anläggning 07 ska kontroll och verifiering uppfylla krav enligt en särskild kravspecifikation som är upprättad och godtagen enligt VV publikation 2009:27 TK Bro, A.1.4 och A.1.9 alternativt VVK 1.1.1. Verifiering av att sådana produkter, material och varor uppfyller ställda krav kan ske genom certifiering enligt nivå 1 enligt AMA Anläggning 07 kod YE eller genom tillverkarförsäkring enligt nivå 2-4. Att produkt, material eller vara uppfyller ställda krav kan alternativt, där en europeisk standard, SS-EN, finns, ske genom att krav i aktuell standard uppfylls till i standarden angiven bekräftelseprocedur.

Teknisk lösning. Märkning

Märkning ska överensstämma med upprättad teknisk dokumentation och däri åberopade produktstandarder.

Märkning ska utföras av beständigt material med beständig text och betryggande fastsättning. Text ska skrivas på svenska. Endast vedertagna förkortningar får användas.

Märkning ska placeras synlig.

Märkband och skyltar placerade utomhus ska vara beständiga mot UV-strålning, föroreningar m.m.

Märkkulörer ska vara enligt SS 03 14 11.

Märkning ska utföras innan installation tas i drift. Märkning ska utföras så att tvekan inte kan uppstå om vilken komponent märkningen avser och så att märktext lätt kan läsas under drift.

Märkskyltar, märkband o.d. som riskerar nedsmutsning ska förses med ytskikt eller vara behandlade med preparat som underlättar rengöring.

Kontroll. Teknisk lösning. Märkning

Kontroll ska ske genom besiktning.

DB. Vägkonstruktion

DB2. Underbyggnad/ Vägbro

Teknisk lösning

Fyllning mot bro skall utföras med förstärkningslagermaterial (0-90 mm) enligt AMA DCB.211 och enligt TK Geo, tabell 7.3-1 upp till terrassnivå för anslutande väg eller underkant släntkappor.

Fyllning skall ske med försiktighet så att betongkonstruktioner inte skadas.

Aktuell vägöverbyggnad framgår av normalsektionsritning.

Kontroll. Teknisk lösning

Kontroll ska ske genom besiktning och provning.

DC. Vägbro

Funktion

Funktionskrav utöver VV publikation 2009:27 TK Bro framgår av geometriska krav för fria utrymmen enligt förslagsritning 3 46 K 2001.

Formgivningsvillkor framgår av förslagsritning.

Bron ska ha en dimensionerade teknisk livslängd på 80 år.

Broarbetet påverkas inte av allmän trafik.

Kontroll. Funktion

Grundläggningsarbetena skall kontrolleras i Geoteknisk kategori GK2.

Teknisk lösning

Gjutfog får inte placeras i synliga ytor på vingmurar, sidoskärmar eller ändstöd.

För kantbalkars yttersidor får endast bräder som tidigare använts som formmaterial nyttjas. Kantbalkars insida formsätts med valfri form som kläs med formsättningsduk. Detta gäller även del vingmurar som formsätts med lutande överform.

Formsläppmedel ska vara av vegetabilisk art och av typ som med dokumenterat gott resultat tidigare använts vid gjutning av brokonstruktioner.

DC1. Bärverk i vägbro

Teknisk lösning

För kantbalk skall basmättet vara minst 50 mm. Måttet ska innehållas även vid droppnäsor. För övriga byggnadsverksdelar skall basmättet vara minst 40 mm.

Minsta differens mellan basmått skall vara 10 mm.

På synliga ytor ska formstag av kompositmaterial eller rostfritt material användas.

DC12. Balk

DC12. Balk/ Kantbalk

Teknisk lösning

Kantbalkens bredd ska vara 500 mm. Vid kantbalksände fasas kantbalk 100 mm i plan på 200 mm längd på sida som vetter mot överliggande väg.

Kantbalken utformas som förhöjd och med rundning i underkant enligt förslagsritning 3 46 K 2002.

DC13c. Upplagsanordningar

DC13cb. Lager

Teknisk lösning

Bron ska förutsättas med topflager. Lager ska vara CE-märkta.

DC2. Grundläggning av vägbro/ schaktning

Funktion

Krav på max tillåtna vibrationer m m framgår av Handling 13.2 ”Riskanalys Mark- och bergschaktningsarbeten”.

Teknisk lösning

Schaktningsarbetena skall utföras enligt AMA Anläggning 07 kod CBB.51.

Schaktnings- och fyllningsarbeten för bottenplattor skall ske i torrhet.

Kontroll. Teknisk lösning

Kontroll ska utföras genom besiktning.

DC2. Grundläggning av vägbro/ pålning

Omfattning

Grundläggning av bron skall ske på betongpålar där varje enskild påle är spets- och mantelburen och där huvuddelen av bärförmågan erhålls längs manteln i friktionsjord.

Kalkylförutsättningar för medelpålstoppsnivå +127

Funktion

Krav på max tillåtna vibrationer m m framgår av Handling 13.2 ”Riskanalys Mark- och bergschaktningsarbeten”.

Pålarna skall drivas ner till djup så att erforderlig geoteknisk bärförmåga kan verifieras (se även bilaga 8 till MUR Geo, handling 13.5, ”Sammanställning Provpålning Ätradalen” innehållande av Pålanalys utförd ”PDA mättningsrapport” över provpålning daterad 2009-12-15).

Teknisk lösning

Pålning skall utföras enligt AMA Anläggning 07 kod CCB.121.

Kontroll. Teknisk lösning

Produktionspålning inleds med provpålning av minst 1 påle/stöd.

Grund-och tilläggskontroll skall utföras enligt AMA Anläggning 07 kod CCB.

DC2. Grundläggning av vägbro/ bottenplatta

Teknisk lösning

Gjutningsarbete för bottenplattor skall förutsättas ske i torrhet.

Bottenplattans överyta skall ges en lutning av minst 2 % mot fri kant.

Gjutning godtas utförd mot vattenavvisande papp eller plastfolie.

I tvärled får den vertikala stödförskjutningen inte överstiga 1/500 av bottenplattans längd.

DC3. Komplettering i vägbro

Teknisk lösning

En skylt med god beständighet visande året för färdigställande ska monteras på varje bro. Placering bestäms i samråd med beställaren.

Klotterskydd av typ ”offerskydd” ska anbringas på synliga betongytor på ändstöd, mellanstöd och vingar.

Klotterskyddet ska vara utprovat tillsammans med valt ytbehandlingspreparat.

DC31. Beläggning

DC31. Beläggning/ Slitlager

Teknisk lösning

Bron ska förseas med beläggning för väg 46 med 25 mm tillfälligt slitlager TSK, permanent slitlager om 40 mm utförs i sidoentreprenad enligt normalsektion 3 34 T 0401.

Bron ska förseas med beläggning för GC-väg med 120 mm AGF och 40 mm slitlager enligt normalsektion 3 34 T 0401.

DC31. Beläggning/ Bindlager

Teknisk lösning

Kombinerat skydds- och bindlager utförs med 50 mm PGJA.

DC31. Beläggning/ Kantstöd

Teknisk lösning

Kantstöd limmas på PGJA.

DC33. Tätskikt, skyddslager

DC33. Tätskikt, skyddslager/ Tätskikt

Teknisk lösning

Bron förseas med tätskikt av isoleringsmatta på MMA-primer.

DC38. Diverse kompletteringar i vägbro/ Fog med fogmassa

Teknisk lösning

Fog med fogmassa djup 40, bredd 20, utförs i slitlagret längs kantbalkar.

DC38. Diverse kompletteringar i vägbro/ Avvägningsdubb

Teknisk lösning

Bron ska försees med avvägningsdubbar enligt TK Bro.

DC38. Diverse kompletteringar i vägbro/ Loddubbar

Teknisk lösning

Ev mellanstöd ska försees med loddubbar enligt TK Bro.

DC4. Slänt eller kon

Omfattning

Ytskikt ingår ej i broarbetet

DC41. Slänt

Teknisk lösning

Slänter runt bron (dock ej under bron) kläs med släntkappor bestående av 300 mm mineraljord som besås, GR4- och GR5-yta, enligt kap DCL.112 respektive DDB.111 och DDB.112 i Handling 11.1, TB Väg.

Slänter i anslutning till bron får inte utföras brantare än i lutning 1:1,7.

DC42. Kon

Teknisk lösning

Koner runt bron kläs med släntkappor bestående av 300 mm mineraljord som besås, GR5-yta, enligt kap DCL.112 respektive DDB.112 i Handling 11.1, TB väg.

Koner i anslutning till bron får inte utföras brantare än i lutning 1:1,7.

DE. Avvattningssystem

DE2. Dränvattensystem

Omfattning

Dränvattensystem avleder dräneringsvatten och omfattar dräneringsledningar och dräneringsbrunnar.

Funktion

Dräneringssystem ska kunna dränera väggroppen, där så är erforderligt, så att stabilitet och säkerhet mot skred eller uppflytning inte försämras samt att sättningar inte uppstår.

Kontroll. Funktion

Kontroll ska ske genom nivåkontroll och inre inspektion av dräneringsledningar och tillhörande brunnar.

Dräneringsledningar ska uppfylla krav på deformation enligt toleransklass A vid kontroll av deformation enligt Svenskt Vatten P91.

DE21. Dränvattenledning/ Grundavlopp i bro

Teknisk lösning

Grundavlopp enligt VV ritning 584:6 S-g, rev A och 584:6 S-m samt anordnas längs de norra kantbalkarna. Grundavloppsror och tratt skall utföras av syrafast rostfritt stål enligt SS-EN 10 088 i kvalitet lägst 1.4436.

DF. Trafikskyddsanordning

DF2. Räcke

DF21. Sidoräcke

Omfattning

I anslutning till broräcke ska vägräcke förses med kapacitetsutjämnande övergång enligt TK Bro G.9.1.8. Ingår i vägarbetet.

DF21. Sidoräcke/ Broräcke

Teknisk lösning

Broräcken ska utföras enligt TK Bro.

Räcken skall uppfylla funktionskrav enligt SS-EN 1317-2 samt vara CE-märkt enligt SS-EN 1317-5. Räcke skall dessutom uppfylla material- och utförandekrav enligt SS-EN ISO 1461 (1), SS-EN ISO 10684 (1), SS-EN 206-1 (1), SS 137010 (1).

Bron förses med broräcke med topp- och navföljare av rörprofil.

På broar med kantbalk ska räckesståndare skruvas fast.

Broräcken och anslutande vägräcken ska utföras med samma typ av navföljare och tillhöra samma CE-märkta räckesfamilj och ha samma tillverkare.

Fotplåtar till broytterräckets ståndare fästs till kantbalk med syrafasta rostfria skruvar, muttrar och brickor enligt SS-EN 10 088 i kvalitet lägst 1.4436. Fotplåtarnas kanter rundas till mellan 3-4 mm radie. Fotplåtarna utformas så att inte kiselutarmning av stålet uppkommer.

Fotplåtar ska inte undergjutas.

Skruvarna förses med grafitfett eller vax.

Räckesskruvar får inte komma i kontakt med kantbalkens armering.

Leverans av broräckesavslutningar ingår i broarbetet. Montage ingår i vägarbetet.

Räcken kommer att tillhandahållas från sidoentreprenör för etapp 2 på anvisad plats efter avrop enligt AFC.361.

Kontroll. Teknisk lösning

Kontroll ska ske genom besiktning och mätning.

DF25. Räckeskomplettering/ Skyddsnät

Teknisk lösning

Broräcke ska förses med skyddsnät enligt TK Bro och med utbredning enligt förslagsritning 3 46 K 2001.

DK. Elsystem och telesystem

DK. Elsystem och telesystem/ Kabelskyddsror i betongkonstruktion

Teknisk lösning

Överbyggnaden förses med ett längsgående SRN PVC $\phi 50$ med placering enligt förslagsritning 3 46 K 2001 och 3 46 K 2002. Rör ska vara försett med galvaniserad dragtråd.

X. DOKUMENTATION

X. Dokumentation/ Digital dokumenthantering

Se handling 11.1 TB Väg, YC.

XB. Projekteringshandling

XB. Projekteringshandling/ Design basis

Entreprenören ska inledningsvis lämna en redogörelse för förutsättningar och metoder vanligen benämnd ”design basis”. Denna ska minst behandla följande:

- objektspecifika förutsättningar för dimensionering och utformning
- beskrivning av beräknings- och analysmetoder som avses att användas vid dimensionering och utformning
- objektspecifika val avseende material och utförande
- beskrivning av provnings- och kontrollmetoder som avses att användas samt avstämning hur gjorda beräkningsantaganden, materialval, utförandemetod etc. säkerställs och hur avvikelser av dessa hanteras och åtgärdas
- beskrivning av rutiner för verifiering
- en redovisning av principer för hur dokumentation av provnings- och kontrollresultat samt verifiering av dessa ska utföras
- en redovisning av hur dokumentation avseende drift- och underhållsplaner upprättas.

XC. Arbetshandling

Entreprenören ska projektera och upprätta konstruktionshandlingar med beräkningar, ritningar, beskrivningar och kontrollprogram med tillhörande kontrollplaner.

Kontroll av projekteringsresultatet ska ske före arbetenas påbörjande, dels genom entreprenörens kontroll i tillräcklig omfattning och dels genom beställarens granskning. Detta ska även ske under byggskedet och för vissa delar även under garantitiden.

Kontroll av fri höjd, angiven på av beställaren godtagen arbetsritning skall utföras av entreprenör innan arbete med broöverbyggnad påbörjas. Kontroll ska utföras genom mätning och mätresultat skall protokollföras.

För de delar i väganläggningen som omfattas av VV publikation 2009:27 TK Bro ska krav på konstruktionsredovisning och kontroll av konstruktionsredovisning i denna uppfyllas.

Arbetshandlingar ska levereras digitalt.

XC. Arbetshandling/ Vägbro

I inledning av konstruktionsarbetet ska entreprenör kalla till startmöte enligt VV publikation 2009:27 TK Bro. Vid mötet skall redogörelse för förutsättningar och metoder för dimensionering presenteras. Eventuella förändringar i förhållande till förfrågningsunderlaget ska redovisas tydligt. Beställaren ska ges möjlighet att lämna remissynpunkter på handlingarna inom 10 arbetsdagar.

Konstruktionsredovisningen och eventuella remissyttranden sänds för kontroll tillsammans med den av beställaren godtagna förslagsritningen till Trafikverket, avdelning Teknik och Miljö, enhet Byggnadsverk, IVtb och till Trafikverkets projektledning.

Vid tillämpning av VV publikation 2009:84 ”Kontroll av konstruktionsredovisning” kan en indelning i grupper enligt råden i denna publikation preliminärt förutsättas. Gruppindelningen bestäms slutgiltigt efter att entreprenörens förslag till tekniska lösningar har presenterats.

En tidplan för insändandet av konstruktionsredovisning för kontroll ska upprättas av entreprenören och insändas till beställaren. Beställarens redovisningskrav och administrativa krav som ska uppfyllas framgår av VV publikation 2009:27 TK Bro, del A.

Beställarens rutiner för kontroll framgår av handling 9, AF Bilaga 3.

Kopior av märkta handlingar fördelas av entreprenören enligt följande:

- tre omgångar ritningar och beskrivningar sänds till beställarens projektledning
- en omgång handlingar enligt krav i VV publikation 2009:27 TK Bro del A sänds till Trafikverket, avdelning Teknik och Miljö, enhet Byggnadsverk, IVtb.

XD. Relationshandling

Relationshandlingar för utförda arbeten ska utgöra informationsunderlag under garantitid samt efterföljande drift och underhåll under anläggningens hela livslängd.

Alla relationshandlingar som produceras i projektet ska levereras till beställarens projekthanteringssystem och i dess struktur. Relationshandlingar ska vara daterade, granskade och godkända av ansvarig person hos entreprenören. Relationshandlingar ingår i entreprenaden och ska godkännas av beställaren. Krav på leveranstid för relationshandlingar anges i Entreprenadkontraktet § 7

Blanketterna ”Registrering av beläggningsåtgärder” och ”För rapportering av fri höjd i vägportar” ska ifyllas efter färdigställt objekt och redovisas till beställaren.

Relationshandlingar för byggnadsverk ska dokumentera lägen, dimensioner, använda material, uppmätta funktionella egenskaper, utföranden o d, med beräkningar, ritningar och beskrivningar samt protokoll för utförda kontrollmätningar.

Beställda utförandehandlingar, protokoll och intyg från beställda provningar och kontroller samt produktverifikationer i nivåer 1, 2 och 3 enligt YE i handling 11.1, TB Väg, ska bifogas relationshandlingarna.

Bestyrkta egenskaper för produkter enligt SS-EN ska vara dokumenterade.

Relationshandling ska vara daterad och signerad av ansvarig person hos entreprenören samt försedd med uppgift om vilken anläggningsdel som handlingen avser. Förteckning över aktuella relationshandlingar ska bifogas.

Relationsritning ska vara försedd med ”RELATIONS-RITNING” i statusraden i ritningshuvudet.

Symboler, beteckningar, definitioner, scheman o.d. ska vara enligt svensk standard där sådan finns.

Handlingar för drift- och underhåll ska vara skrivna på svenska.

Skalenliga ritningar ska förses med grafisk skala.

Handling ska vara i format enligt A-serien.

Inmätning för relationshandling ska utföras i för objektet gällande koordinat- och höjdsystem.

Anordning som ska fyllas över eller på annat sätt blir dold ska mätas in under arbetets gång.

Material som av miljöskäl enligt handlingarna ska hanteras på angivet sätt dokumenteras med avseende på kemisk sammansättning, placering och vidtagna skyddsåtgärder.

Material som kan orsaka skada vid oriktig behandling ska dokumenteras.

Relationshandlingar i original är beställarens egendom.

Relationshandlingar i original ska vara arkivbeständiga.

Planritningar ska vara försedda med koordinatbestämt rutnät.

Drift- och underhållsinstruktion ska upprättas enligt Arbetsmiljöverkets författningssamling AFS 1999:39 1§ rörande objektets slutliga konstruktion och utformning samt de byggprodukter som använts, i den omfattning som är av betydelse för säkerhet och hälsa vid arbete med drift, underhåll, reparation, ändring och rivning av objektet.

XD. Relationshandling/ Vägbro

För de handlingar som omfattas av kraven på konstruktionsredovisning enligt VV publikation 2009:27 TK Bro gäller denna i sin helhet.

Relationshandlingar ska bestå av:

- arbetsritningar i original (ovikta)
- under byggskedet tillkommande geotekniska utredningar, beräkningar, beskrivningar och ritningar
- betonggjutningsjournaler
- eventuella avvikelserapporter
- förteckning över aktuella handlingar
- ifyllda kontrollplaner för tilläggskontroll
- mätprotokoll avseende lagerinställningar, lod- och avvagningsdubbar
- provningsintyg
- pålningsprotokoll och pålplan
- arbetsbeskrivningar upprättade av entreprenören
- verifikat och certifikat enligt SS-EN standard alternativt YE i handling 11.1, TB Väg.

På originalexemplaret av sammanställningsritningen ska redovisas

- använd typ av tillsatsmedel i betong
- förteckning över av beställaren godtagna handlingar
- lagerinställningar

- sammansättning av injekteringsbruk med uppgift om cementfabrikat, tillsatsmedel, dosering samt $v_{ct_{ekv}}$
- typ av och beteckning på lager inklusive antal per stöd
- uppmätta värden vid inmätning av lod- och avvagningsdubbar
- vid grundläggning på berg, höjder för bottenplattas underkant.

Uppgift om valt material ska föras in på originalritningarna om det på de godtagna ritningarna

- anges att likvärdigt material kan användas
- hänvisats till material enligt av beställaren upprättad förteckning över godtagna produkter.

Uppgift om vald standardritning ska föras in på originalritningarna om hänvisning endast gjorts till beställarens standardritningar utan att precisering gjorts till speciell ritning.

Eventuella smärre avsteg från godtagen ritning ska vara införda på originalritningarna.

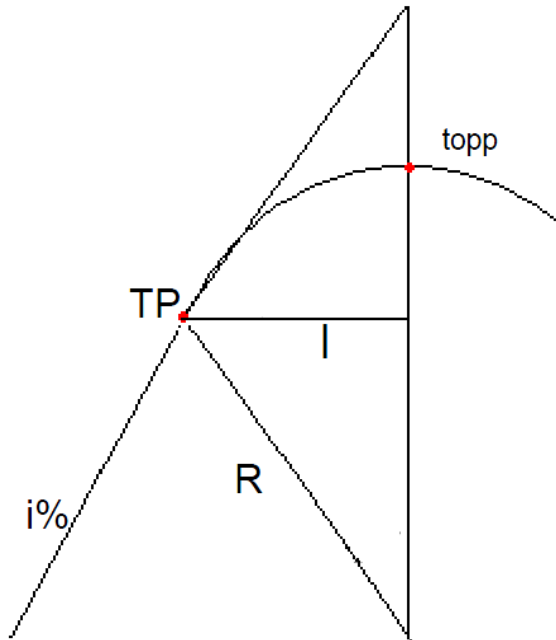
Mätprotokollen avseende inmätning av lagerinställningar och fogöppningar ska utöver mätresultaten innehålla datum för mätningen samt lufttemperaturen vid mätningen.

Mätprotokollen avseende inmätning av lod- och avvagningsdubbar ska utöver mätresultaten innehålla datum för mätningen, lufttemperaturen vid mätningen, mätmetod samt uppgift om vilken fixpunkt som använts. Inmätningen ska utföras enligt BJB.22 i handling 11.1, TB Väg.

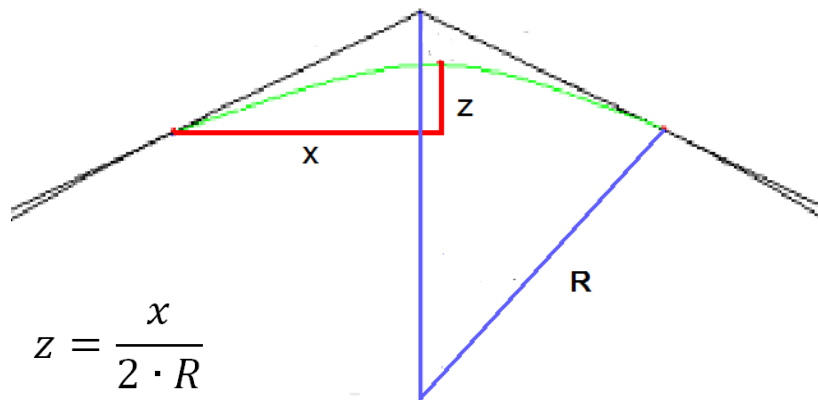
Konstruktionshandlingar för konstruktioner som ska omfattas av TK Bro ska registreras i Trafikverkets digitala register över broar och tunnlrar, BatMan.

Bilaga 3: Beräkning av konstruktionshöjd

Ekvationerna som används är hämtade från Gunnar Lannérs föreläsningar i kursen Teknisk samhällsplanering.



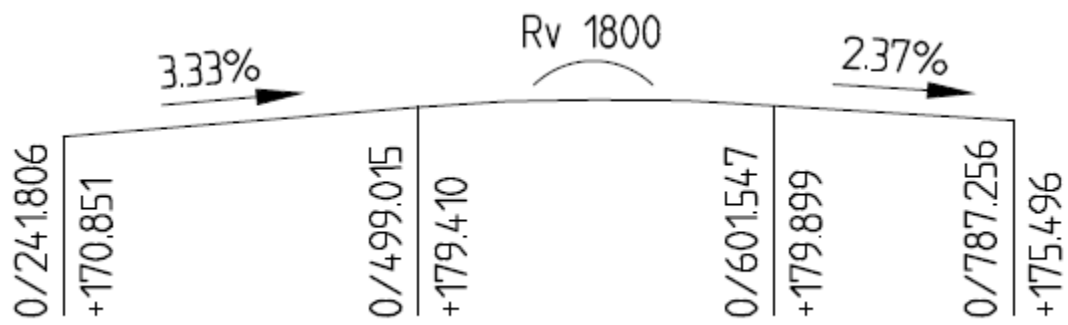
$$l = R \frac{i}{100}$$



$$z = \frac{x^2}{2 \cdot R}$$

Figur 1. Ekvationer som används vid beräkning av vertikalkurvor.

Maximal höjd väg 46



Figur 2. Profil väg 46.

Lutning: $i := 3.33\%$

Vertikalradie: $R_{46} := 1800\text{m}$

Koordinater för startpunkter

$$x_{\text{start46}} := 499.015\text{m}$$

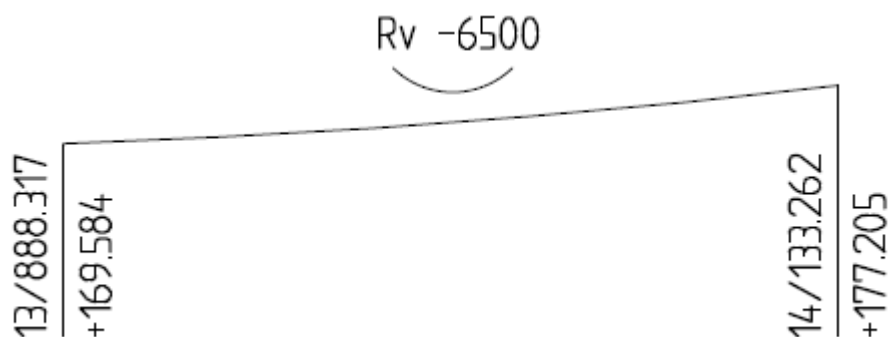
$$z_{\text{start46}} := 179.410\text{m}$$

Koordinater för maxpunkter

$$x_{\text{max}} := x_{\text{start46}} + R_{46} \cdot i \quad x_{\text{max}} = 558.955 \text{ m}$$

$$z_{\text{max}} := z_{\text{start46}} + \frac{(x_{\text{max}} - x_{\text{start46}})^2}{2 \cdot R_{46}} \quad z_{\text{max}} = 180.408 \text{ m}$$

Lägsta höjd väg 40



Figur 3. Profil väg 40.

Vertikalradie: $R_{40} := 6500\text{m}$

Följande ekvation ställs upp för att räkna fram lägsta höjd för väg 40:

$$\frac{(x_2 - x_{\min})^2}{2 \cdot R_{40}} - \frac{(x_1 - x_{\min})^2}{2 \cdot R_{40}} = z_2 - z_1$$

Koordinater för tangeringspunkter

$$x_1 := 13888.317\text{m}$$

$$z_1 := 169.584\text{m}$$

$$x_2 := 14133.262\text{m}$$

$$z_2 := 177.205\text{m}$$

Koordinater för lägsta höjd

$$x_{\min} := \frac{(z_2 - z_1) \cdot 2 \cdot R_{40} + x_1^2 - x_2^2}{2 \cdot x_1 - 2 \cdot x_2} \quad x_{\min} = 13808.554 \text{ m}$$

$$z_{\min} := z_1 - \frac{(x_1 - x_{\min})^2}{2 \cdot R_{40}} \quad z_{\min} = 169.095 \text{ m}$$

Bestämning av koordinater för kritisk punkt

För att bestämma vilken del av bron som blir dimensionerande bestäms profilhöjderna för ett antal punkter. Den östra sidan av bron kommer bli dimensionerande då väg 40 är högst i vertikalled där. Koordinaterna är uppmätta i ritningen.

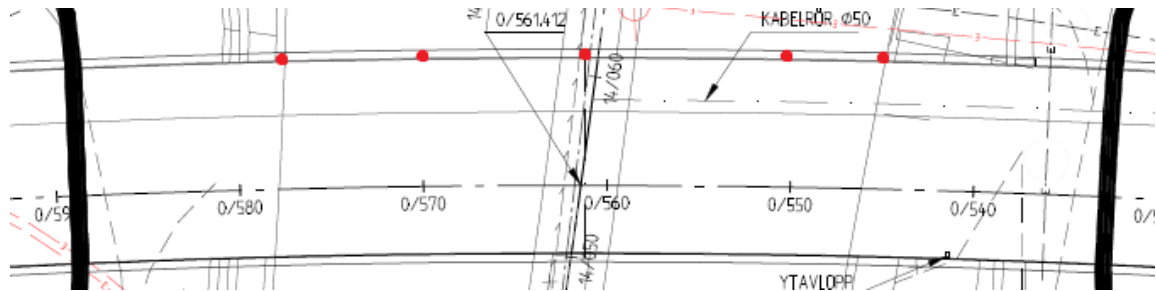


Fig 4. Uppmätta koordinater för beräkning av profilhöjder.

Koordinater för väg 46:

$$x_{46} := \begin{pmatrix} 578 \\ 570 \\ 560 \\ 550 \\ 547 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Motsvarande koordinater för väg 40:

$$x_{40} := \begin{pmatrix} 14059.4 \\ 14060.4 \\ 14060.8 \\ 14061 \\ 14061.4 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Höjdkoordinater för väg 46

$$z_1(x) := z_{\max} - \frac{(x - x_{\max})^2}{2 \cdot R_{46}}$$

$$z_{46} := z_1(x_{46}) \quad z_{46} = \begin{pmatrix} 180.307 \\ 180.374 \\ 180.408 \\ 180.386 \\ 180.368 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Motsvarande höjdkoordinater för väg 40

$$z_2(x) := z_{\min} + \frac{(x - x_{\min})^2}{2 \cdot R_{40}}$$

$$z_{40} := z_2(x_{40})$$

$$z_{40} = \begin{pmatrix} 173.935 \\ 173.974 \\ 173.989 \\ 173.997 \\ 174.012 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Tillskott på grund
av tvärfall:

$$z_{\text{tvärfall}} := \begin{pmatrix} -0.04 \cdot 12.9 \\ -0.04 \cdot 7 \\ 0.04 \cdot 0.8 \\ 0.04 \cdot 9 \\ 0.04 \cdot 12.15 \end{pmatrix} \text{ m}$$

$$z_{\text{tvärfall}} = \begin{pmatrix} -0.516 \\ -0.28 \\ 0.032 \\ 0.36 \\ 0.486 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Fri höjd:

$$z_{\text{fri}} := \begin{pmatrix} 5.1 \\ 5.1 \\ 5.1 \\ 5.1 \\ 5.1 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Konstruktionshöjd:

$$z_{\text{konstr}} := z_{46} - (z_{40} + z_{\text{tvärfall}}) - z_{\text{fri}}$$

$$z_{\text{konstr}} = \begin{pmatrix} 1.788 \\ 1.581 \\ 1.287 \\ 0.929 \\ 0.77 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Maximal konstruktionshöjd:

$$z_{\text{konstr.max}} := \min(z_{\text{konstr}})$$

$$z_{\text{konstr.max}} = 0.77 \text{ m}$$

Bilaga 4: Preliminärdimensionering

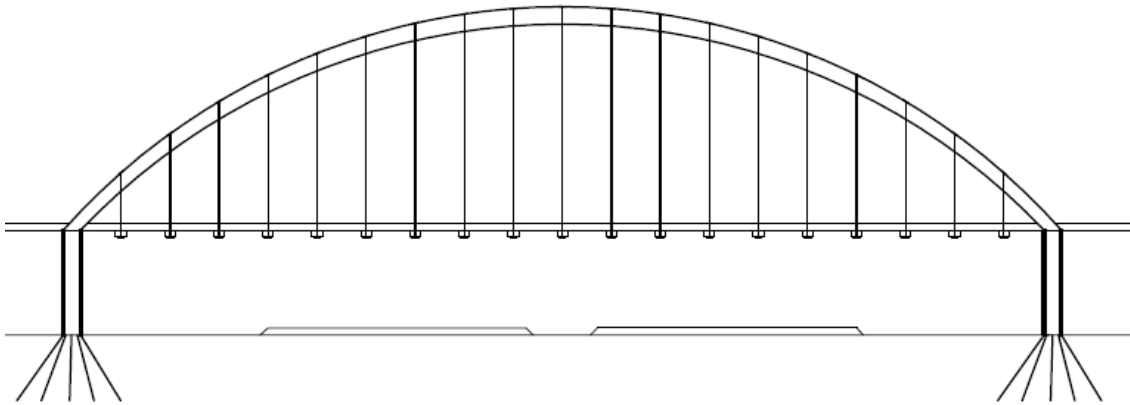
I denna bilaga kommer preliminära dimensioner av bronns olika delar och dess vikter och volymer beräknas. Tanken är att brobanans laster och egentyngd i stora drag ska tas upp av tvärbalkarna, som bärs upp av hängstagen. Stagen är fästa i bågen som i sin tur för ner de vertikala kraftkomponenterna i pelarna, och de horisontella i förstyrningsbalken. Dimensioneringen görs i enlighet med Eurocode och ekvationerna är hämtade från Bärande konstruktioner om annat ej anges.

Innehållsförteckning

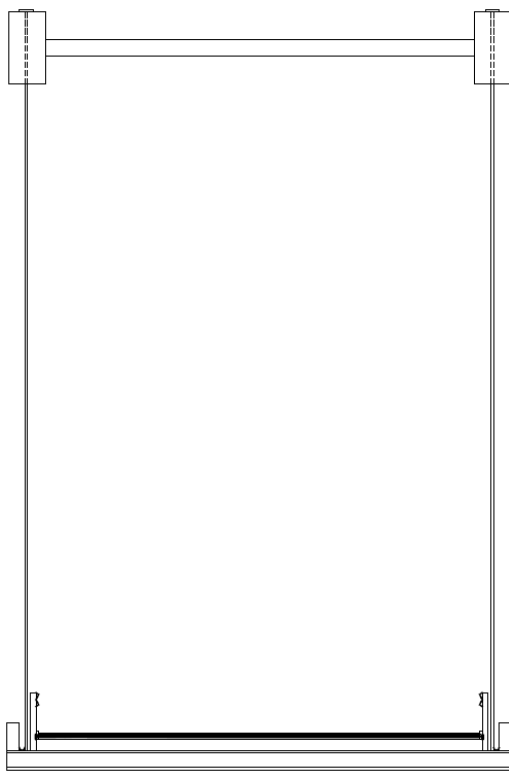
1.	Langerbalkbrons dimensioner	3
2.	Materialparametrar	5
3.	Trafiklaster	9
4.	Dimensionering av mittspannets broplatta	11
5.	Dimensionering av mittspannets tvärbalkar	14
6.	Dimensionering av hängstag och dess infästningar	41
7.	Olycksfall	48
8.	Dimensionering av båge och förstyrningsbalk	60
9.	Dimensionering av sidospann	81
10.	Dimensionering av stöd	97
11.	Kontroll i bruksgränstillstånd	101
12.	Kontroll av konstruktionshöjd	111
13.	Översiktlig längd-, vikt- och volymeräkning	112

1. Langerbalkbrons dimensioner

Från början valdes cc-avståndet mellan stagen till 5 meter. Efter iterering visar det sig att 2,75 m krävs för att klara konstruktionshöjden.



Figur 1. Mittspann i profil



Figur 2. Tvärsnitt av mittspann

Profil

Längd:	$L := 55 \cdot \text{m}$	
Vägbredd:	$B := 8 \text{m}$	
Antal stag:	$n_{\text{stag}} := 19$	
Pilhöjd:	$f := \frac{L}{4.5}$	$f = 12.22 \text{m}$
Avstånd mellan stag:	$cc_{\text{stag}} := \frac{L}{n_{\text{stag}} + 1}$	$cc_{\text{stag}} = 2.75 \text{m}$

Förstyvningsbalk

Bredd:	$b_{\text{fbalk}} := 0.215 \text{m}$	
Höjd:	$h_{\text{fbalk}} := 0.900 \text{m}$	
Tvärsnittsarea:	$A_{\text{fbalk}} := b_{\text{fbalk}} \cdot h_{\text{fbalk}}$	$A_{\text{fbalk}} = 0.194 \text{m}^2$

Tvärsektion

Bredd på avloppsränna:	$b_{\text{ränna}} := 0.1 \text{m}$	
Bredd på räcke plus kantbalk:	$b_{\text{kanträcke}} := 0.15 \text{m}$	
Säkerhetsavstånd mellan kantbalk och stag:	$a_{\text{säk}} := 0.05 \text{m}$	
Avstånd mellan stag och körbana:	$a_{\text{stag}} := a_{\text{säk}} + b_{\text{kanträcke}} + b_{\text{ränna}}$	$a_{\text{stag}} = 0.3 \text{m}$
Spännvidd tvärbalk:	$l_{\text{tbalk}} := B + 2 \cdot a_{\text{stag}}$	$l_{\text{tbalk}} = 8.6 \text{m}$
Total bredd på bron:	$B_{\text{t}} := l_{\text{tbalk}} + 2 \cdot b_{\text{fbalk}}$	$B_{\text{t}} = 9.03 \text{m}$

2. Materialparametrar

Alla materialparametrar är hämtade från Bärande konstruktioner del 1 om inget annat anges.

Tungheter

Limträ:	$\gamma_{gl} := 4.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	
Kerto:	$\gamma_{lvl} := 4.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	SS-EN 14374 Tabell 3.4.3
Stål:	$\gamma_{stål} := 77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	
Slitlager:	$\gamma_{slit} := 23 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Sören Lindgren Föreläsning 22/3 2013
Bindlager/skyddslager PGJA:	$\gamma_{PGJA} := 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Sören Lindgren Föreläsning 22/3 2013
Isoleringsmatta:	$\gamma_{iso} := 17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Sören Lindgren Föreläsning 22/3 2013

Partialkoefficienter

Limträ:	$\gamma_{M,gl} := 1.25$	
Kerto:	$\gamma_{M,lvl} := 1.2$	SS-EN 1995-1-1 Tabell 2.3
Stål:	$\gamma_{M,s} := 1.0$	
	$\gamma_{M2,s} := 1.25$	

Hållfasthetsvärden

Limträ GL36k

Böjning:	$f_{mk,gl} := 36\text{MPa}$
Drag parallellt fibrerna:	$f_{t0k,gl} := 26\text{MPa}$
Tryck parallellt fibrerna:	$f_{c0k,gl} := 31\text{MPa}$
Tryck vinkelrätt fibrerna:	$f_{c90k,gl} := 3.6\text{MPa}$
Skjuvning:	$f_{vk,gl} := 4.3\text{MPa}$

$$\text{Dimensionerande hållfasthet: } f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_M} \quad \text{T2-12}$$

k_{mod} är beroende av klimatklass och lastvaraktighet. Lastvaraktigheten är kortvarig och eftersom bron står utomhus är det klimatklass tre.

$$k_{mod} := 0.7$$

För limträbalkar som är utsatta för böjning eller drag får hållfastheten ökas med faktorn k_h , där h är tvärsnittets höjd, om $h < 600$:

$$k_h = \min \left[\left(\frac{600}{h} \right)^{0.1}, 1.1 \right] \quad \text{T2-15}$$

$$\text{Böjning: } f_{md,gl} = k_{mod} \cdot k_h \cdot \frac{f_{mk,gl}}{\gamma_{M,gl}}$$

$$\text{Drag parallellt fibrerna: } f_{td,gl} = k_{mod} \cdot k_h \cdot \frac{f_{t0k,gl}}{\gamma_{M,gl}}$$

$$\text{Tryck parallellt fibrerna: } f_{cd,gl} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c0k,gl}}{\gamma_{M,gl}} \quad f_{cd,gl} = 17.36 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Tryck vinkelrätt fibrerna: } f_{cd,gl} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c90k,gl}}{\gamma_{M,gl}} \quad f_{cd,gl} = 2.02 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Skjuvning: } f_{vd,gl} := k_{mod} \cdot \frac{f_{vk,gl}}{\gamma_{M,gl}} \quad f_{vd,gl} = 2.41 \cdot \text{MPa}$$

Kerto S

Böjning:	$f_{mk.lvl} := 44\text{MPa}$	
Drag parallellt fibrerna:	$f_{t0k.lvl} := 35\text{MPa}$	
Tryck parallellt fibrerna:	$f_{c0k.lvl} := 35\text{MPa}$	SS-EN 14374 Tabell 3.4.3
Tryck vinkelrätt fibrerna:	$f_{c90k.lvl} := 6\text{MPa}$	
Skjuvning:	$f_{vk.lvl} := 4.1\text{MPa}$	

Dimensionerande hållfasthet: $f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_M}$ T2-12

k_{mod} är beroende av klimatklass och lastvaraktighet. Lastvaraktigheten är kortvarig och eftersom bron står utomhus är det klimatklass tre.

$$k_{mod} := 0.7$$

För LVL-balkar som är utsatta för böjning får hållfastheten ökas med faktorn k_h , där h är tvärsnittets höjd, om $h \neq 300$ mm. För drag får hållfastheten ökas med k_l , där l är längden på balken, om $l \neq 3000$ mm

Böjning: $k_h = \min\left[\left(\frac{300}{h}\right)^{0.12}, 1.2\right]$ SS-EN 1995-1-1
3.3

Drag: $k_l = \min\left[\left(\frac{3000}{l}\right)^{0.6}, 1.1\right]$ SS-EN 1995-1-1
3.4

Böjning: $f_{md.lvl} = k_{mod} \cdot k_h.lvl \cdot \frac{f_{mk.lvl}}{\gamma_{M.lvl}}$

Drag parallellt fibrerna: $f_{t0d.lvl} = k_{mod} \cdot k_l.lvl \cdot \frac{f_{t0k.lvl}}{\gamma_{M.lvl}}$

Tryck parallellt fibrerna: $f_{c0d.lvl} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c0k.lvl}}{\gamma_{M.lvl}}$ $f_{c0d.lvl} = 20.42\text{MPa}$

Tryck vinkelrätt fibrerna: $f_{c90d.lvl} := k_{mod} \cdot \frac{f_{c90k.lvl}}{\gamma_{M.lvl}}$ $f_{c90d.lvl} = 3.5 \cdot \text{MPa}$

Skjuvning $f_{vd.lvl} := k_{mod} \cdot \frac{f_{vk.lvl}}{\gamma_{M.lvl}}$ $f_{vd.lvl} = 2.39 \cdot \text{MPa}$

Stål S355

Karakteristisk flytgräns: $f_{y.355} := 355 \text{MPa}$

Karakteristisk brottgräns: $f_{u.355} := 510 \text{MPa}$

Stål S460:

Karakteristisk flytgräns
 $t \leq 40 \text{ mm}$: $f_{y.460.1} := 460 \text{MPa}$

Karakteristisk flytgräns
 $40 \text{ mm} \leq t \leq 80 \text{ mm}$: $f_{y.460.2} := 430 \text{MPa}$

Karakteristisk brottgräns: $f_{u.460} := 540 \text{MPa}$

Elasticitetsmoduler

För beräkningar på träbalkar används $E_{0,05}$ för kapacitetsberäkningar och E_m för deformationsberäkningar.

Limträ GL36k: $E_{0.05.gl} := 11.9 \text{GPa}$

$E_{m.gl} := 14.7 \text{GPa}$

Kerto S: $E_{k.lvl} := 11.6 \text{GPa}$

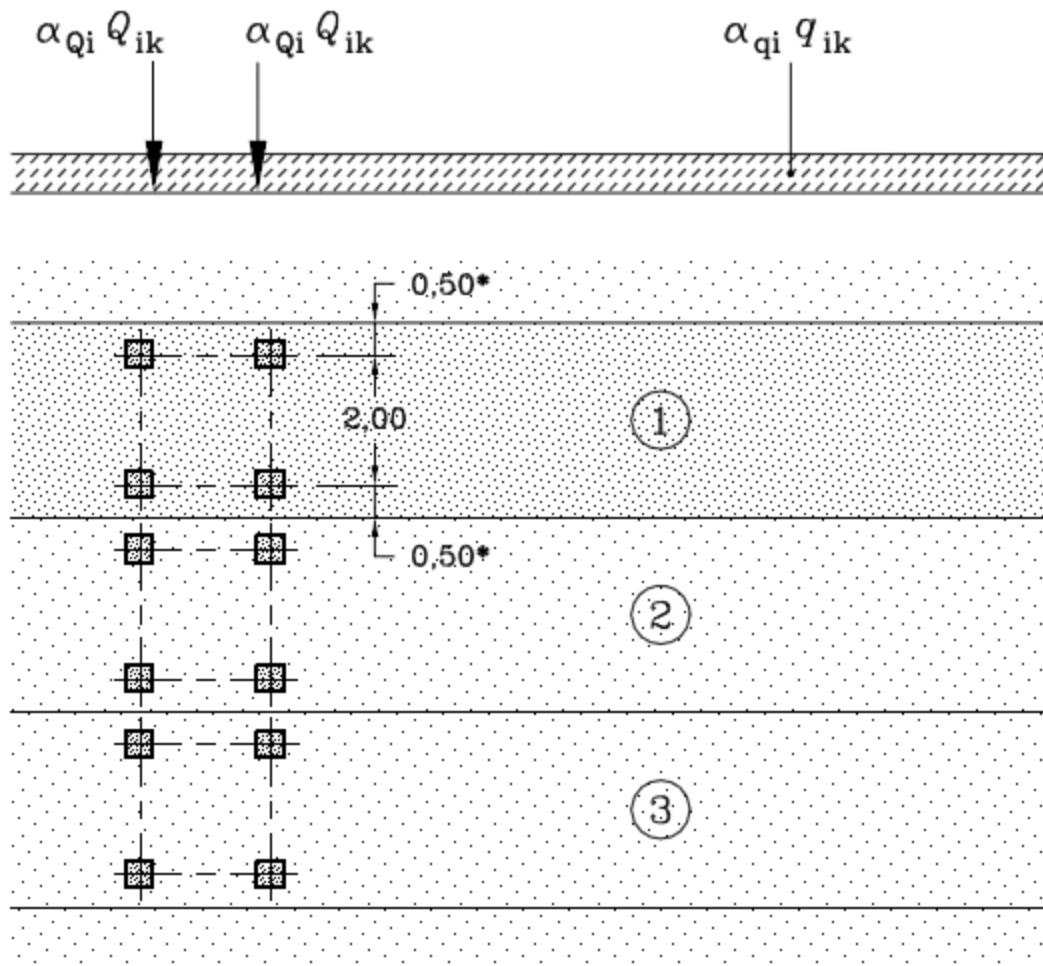
$E_{m.lvl} := 13.8 \text{GPa}$

SS-EN 14374
 Tabell 3.4.3

Stål: $E_s := 200 \text{GPa}$

3. Trafiklaster

Trafiklasterna beräknas enligt SS-EN 1991-2.



Figur 3. Trafiklaster och anpassningsfaktorer

Lastreduktionstal

$$\psi_Q := 0.75$$

$$\psi_q := 0.4$$

SS-EN 1990

Tabell A2.1

Anpassningsfaktorer

$$\alpha_{q1} := 1.0$$

$$\alpha_{q2} := 0.7$$

$$\alpha_{q3} := 1.0$$

$$\alpha_{Q1} := 0.9$$

$$\alpha_{Q2} := 0.9$$

$$\alpha_{Q3} := 0$$

TRVFS 2011:12
Tabell 7.1

Partialkoefficienter

$$\gamma_G := 1.35$$

$$\gamma_Q := 1.5$$

SS-EN 1990
Tabell A2.4(B)

Karaktäristiska trafiklaster

$$q_{1k} := 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_{2k} := 9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_{3k} := 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

SS-EN 1991-2
Tabell 4.2

$$Q_{1k} := 400\text{kN}$$

$$Q_{2k} := 600\text{kN}$$

$$Q_{3k} := 200\text{kN}$$

4. Dimensionering av mittspannets broplatta

Brodäcket kommer bestå av en tvärspänd träplatta med Kerto S-balkar. Beräkningarna görs genom den värst utsatta en-meterssektionen av plattan studeras som en balk. Snittkrafter hämtas från bilaga 5: CALFEM-beräkningar. De dimensionerande laster som använts i CALFEM-modellen beräknas i denna bilaga.

Dimensioner

Plattans bredd: $b_{\text{platta}} := 1 \text{ m}$

Plattans tjocklek: $t_{\text{platta}} := 0.240 \text{ m}$

Slitlagrets tjocklek: $t_{\text{slit}} := 0.04 \text{ m}$

PGJA-lagrets tjocklek: $t_{\text{PGJA}} := 0.05 \text{ m}$

Hämtade från bilaga 2:
Teknisk beskrivning

Laster

Egentyngder

Reduktionsfaktor för
egenvikten när trafiklasten
är huvudlast: $\xi := 0.89$

Brodäckets egentyngd: $g_{\text{däck}} := \left(\begin{array}{l} \gamma_{\text{IVI}} \cdot t_{\text{platta}} \cdot b_{\text{platta}} \cdots \\ + \gamma_{\text{slit}} \cdot t_{\text{slit}} \cdot b_{\text{platta}} \cdots \\ + \gamma_{\text{PGJA}} \cdot t_{\text{PGJA}} \cdot b_{\text{platta}} \end{array} \right) \quad g_{\text{däck}} = 2.12 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Brodäckets dimensionerande
egentyngd: $g_{\text{däck.d}} := \gamma_G \cdot \xi \cdot g_{\text{däck}} \quad g_{\text{däck.d}} = 2.55 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Trafiklaster

Dimensionerande utbredd
trafiklast: $q_{2d} := \gamma_Q \cdot \alpha_{q2} \cdot q_{2k} \cdot b_{\text{platta}} \quad q_{2d} = 9.45 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Dimensionerande axellast: $Q_{2d} := \gamma_Q \cdot \alpha_{Q2} \cdot Q_{2k} \cdot \frac{1}{2} \quad Q_{2d} = 405 \cdot \text{kN}$

Snittkrafter

Maximalt moment: $M_{\max,p} := 237.87 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Maximal tvärkraft: $V_{\max,p} := 256.75 \text{ kN}$

Momentkapacitet

För att momentkapaciteten ska vara tillräcklig måste följande villkor vara uppfyllt:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

Dimensionerande momentkapacitet: $M_{Rd} = W \cdot f_{md}$ T3-14

För rektangulära tvärsnitt: $W = \frac{b \cdot t^2}{6}$ T3-18

$$k_{h,lvl} := 1.027$$

Dimensionerande böjhållfastet: $f_{md,lvl} := k_{mod} \cdot k_{h,lvl} \cdot \frac{f_{mk,lvl}}{\gamma_{M,lvl}}$ T2-12

$$f_{md,lvl} = 26.36 \text{ MPa}$$

Momentkapacitet: $M_{Rd,p} := \frac{b_{platta} \cdot t_{platta}^2}{6} \cdot f_{md,lvl}$ $M_{Rd,p} = 253.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$

$$\frac{M_{\max,p}}{M_{Rd,p}} = 0.94$$

Kapaciteten är tillräcklig!

Tvärkraftskapacitet

För att tvärkraftskapaciteten ska vara tillräcklig måste följande villkor vara uppfyllt:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

Dimensionerande
tvärkraftskapacitet:

$$V_{Rd} = \frac{2}{3} \cdot b_{ef} \cdot t \cdot f_{vd}$$

T4
(Kombination av T4-4,
T4-5 och T4-9)

Effektiv breddparameter
för Kerto:

$$k_{cr,lvl} := 1$$

Effektiv bredd:

$$b_{ef,p} := b_{platta} \cdot k_{cr,lvl}$$

T4-9

Tvärkraftskapacitet:

$$V_{Rd,platta} := \frac{2}{3} \cdot b_{ef,p} \cdot t_{platta} \cdot f_{vd,lvl}$$

$$V_{Rd,platta} = 382.7 \cdot \text{kN}$$

$$\frac{V_{\max,p}}{V_{Rd,platta}} = 0.671$$

Kapaciteten är tillräcklig!

5. Dimensionering av mittspannets tvärbalkar

Egentyngder

Tvärbalkar

Egentyngden har räknats fram efter att tvärbalkarna dimensionerats:

$$g_{\text{fbalk}} := 4.725 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Förstyvningsbalkar

Tvårsnittets area: $A_{\text{fbalk}} = 0.194 \text{ m}^2$

Egentyngd mellan två stag: $G_{\text{fbalk}} := \gamma_{\text{gl}} \cdot A_{\text{fbalk}} \cdot c_{\text{stag}}$ $G_{\text{fbalk}} = 2.13 \cdot \text{kN}$

Brodäck

Träplattans tjocklek: $t_{\text{platta}} = 0.24 \text{ m}$

Slitlagrets tjocklek: $t_{\text{slit}} = 0.04 \text{ m}$

PGJA-lagrets tjocklek: $t_{\text{PGJA}} = 0.05 \text{ m}$

Brodäckets egentyngd: $g_{\text{däck}} := \left(\begin{array}{l} \gamma_{\text{IV1}} \cdot t_{\text{platta}} \cdot c_{\text{stag}} \dots \\ + \gamma_{\text{slit}} \cdot t_{\text{slit}} \cdot c_{\text{stag}} \dots \\ + \gamma_{\text{PGJA}} \cdot t_{\text{PGJA}} \cdot c_{\text{stag}} \dots \end{array} \right) g_{\text{däck}} = 5.83 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Broräcke

Egentyngd: $g_{\text{räcke}} := 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Dimensionerande egentyngder

Förstyvningsbalk: $G_{\text{fbalk.d}} := \gamma_G \cdot \xi \cdot G_{\text{fbalk}}$ $G_{\text{fbalk.d}} = 2.56 \cdot \text{kN}$

Tvärbalkar: $g_{\text{fbalk.d}} := \gamma_G \cdot \xi \cdot g_{\text{fbalk}}$ $g_{\text{fbalk.d}} = 5.68 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Brodäck: $g_{\text{däck.d}} := \gamma_G \cdot \xi \cdot g_{\text{däck}}$ $g_{\text{däck.d}} = 7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Broräcke: $G_{\text{räcke.d}} := \gamma_G \cdot g_{\text{räcke}} \cdot c_{\text{stag}}$ $G_{\text{räcke.d}} = 1.86 \cdot \text{kN}$

Dimensionerande trafikklaster

$$q_{1d} := \gamma_Q \cdot \alpha_{q1} \cdot q_{1k} \cdot c_{cstag} \quad q_{1d} = 10.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{2d} := \gamma_Q \cdot \alpha_{q2} \cdot q_{2k} \cdot c_{cstag} \quad q_{2d} = 26 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{3d} := \gamma_Q \cdot \alpha_{q3} \cdot q_{3k} \cdot c_{cstag} \quad q_{3d} = 10.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

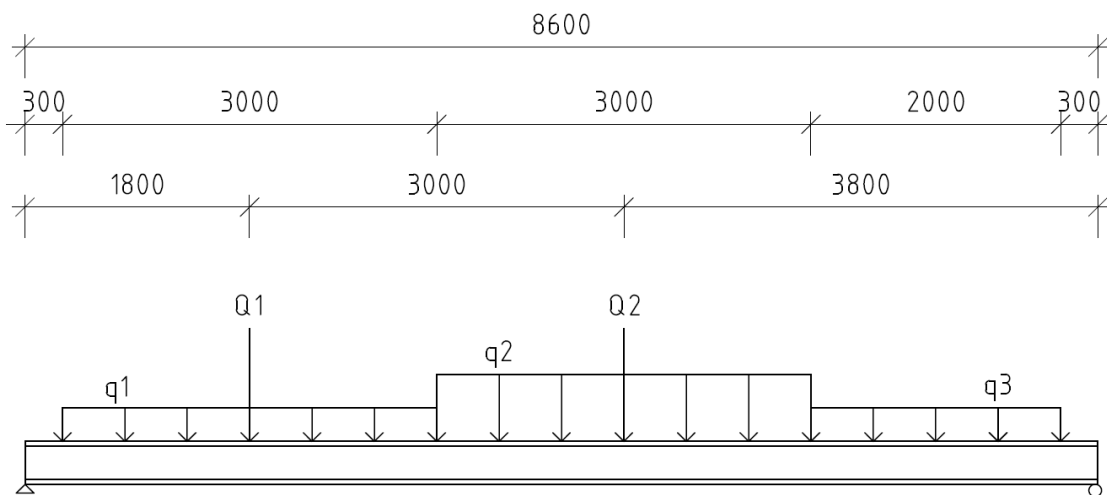
$$Q_{1d} := \gamma_Q \cdot \alpha_{Q1} \cdot Q_{1k} \quad Q_{1d} = 540 \cdot \text{kN}$$

$$Q_{2d} := \gamma_Q \cdot \alpha_{Q2} \cdot Q_{2k} \quad Q_{2d} = 810 \cdot \text{kN}$$

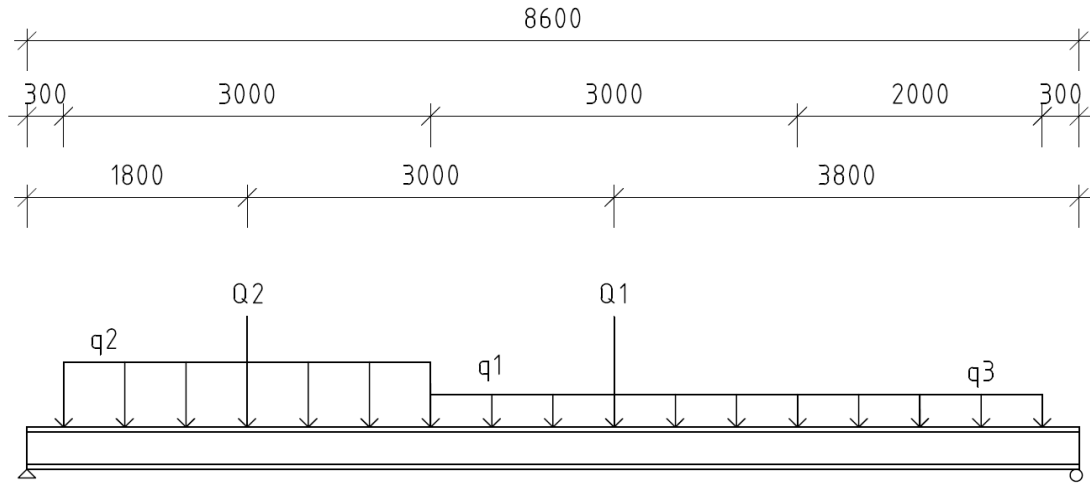
$$Q_{3d} := \gamma_Q \cdot \alpha_{Q3} \cdot Q_{3k} \quad Q_{3d} = 0$$

Reaktionskrafter

Två lastfall kommer studeras. Lastfall 1 kommer ge det största momentet och lastfall två den största tvärkraften.



Figur 4. Lastfall 1.



Figur 5. Lastfall 2.

Bredd på filer

$$b_{q1} := 3\text{ m}$$

$$b_{q1} = 3\text{ m}$$

$$b_{q2} := 3\text{ m}$$

$$b_{q2} = 3\text{ m}$$

$$b_{q3} := B - b_{q1} - b_{q2}$$

$$b_{q3} = 2\text{ m}$$

Hävarmar

$$l_{Q1Tp} := a_{\text{stag}} + \frac{b_{q1}}{2}$$

$$l_{Q1Tp} = 1.8\text{ m}$$

$$l_{Q2Tp} := a_{\text{stag}} + b_{q1} + \frac{b_{q2}}{2}$$

$$l_{Q2Tp} = 4.8\text{ m}$$

$$l_{Q3Tp} := a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2} + \frac{b_{q3}}{2}$$

$$l_{Q3Tp} = 7.3\text{ m}$$

$$l_{q1Tp} := l_{Q1Tp}$$

$$l_{q1Tp} = 1.8\text{ m}$$

$$l_{q2Tp} := l_{Q2Tp}$$

$$l_{q2Tp} = 4.8\text{ m}$$

$$l_{q3Tp} := l_{Q3Tp}$$

$$l_{q3Tp} = 7.3\text{ m}$$

Lastfall 1

Momentjämvikt

Given

$$R_{B1} := 1 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} R_{B1} \cdot l_{\text{tbalk}} = & Q_{1d} \cdot l_{Q1Tp} \dots \\ & + Q_{2d} \cdot l_{Q2Tp} + Q_{3d} \cdot l_{Q3Tp} \dots \\ & + q_{1d} \cdot b_{q1} \cdot l_{q1Tp} + q_{2d} \cdot b_{q2} \cdot l_{q2Tp} \dots \\ & + q_{3d} \cdot b_{q3} \cdot l_{q3Tp} + \xi_{\text{tbalk.d}} \cdot \frac{l_{\text{tbalk}}^2}{2} \dots \\ & + G_{\text{r\u00e4cke.d}} \cdot (B + a_{\text{stag}} + a_{\text{stag}}) \dots \\ & + \xi_{\text{d\u00e4ck.d}} \cdot B \cdot \frac{l_{\text{tbalk}}}{2} \end{aligned}$$

$$R_{B1} := \text{Find}(R_{B1})$$

$$R_{B1} = 686.9 \cdot \text{kN}$$

Vertikal kraftjämvikt

$$\begin{aligned} R_{A1} := & -R_{B1} + Q_{1d} \dots & R_{A1} = 901.2 \cdot \text{kN} \\ & + Q_{2d} + Q_{3d} + q_{1d} \cdot b_{q1} \dots \\ & + q_{2d} \cdot b_{q2} + q_{3d} \cdot b_{q3} \dots \\ & + \xi_{\text{tbalk.d}} \cdot l_{\text{tbalk}} + 2G_{\text{r\u00e4cke.d}} \dots \\ & + \xi_{\text{d\u00e4ck.d}} \cdot B \end{aligned}$$

Lastfall 2

Momentjämvikt

Given

$$R_{B2} := 1 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} R_{B2} \cdot l_{\text{tbalk}} = & Q_{2d} \cdot l_{Q1Tp} \dots \\ & + Q_{1d} \cdot l_{Q2Tp} + Q_{3d} \cdot l_{Q3Tp} \dots \\ & + q_{2d} \cdot b_{q1} \cdot l_{q1Tp} + q_{1d} \cdot b_{q2} \cdot l_{q2Tp} \dots \\ & + q_{3d} \cdot b_{q3} \cdot l_{q3Tp} + \xi_{\text{tbalk.d}} \cdot \frac{l_{\text{tbalk}}^2}{2} \dots \\ & + G_{\text{r\u00e4cke.d}} \cdot (B + a_{\text{stag}} + a_{\text{stag}}) \dots \\ & + \xi_{\text{d\u00e4ck.d}} \cdot B \cdot \frac{l_{\text{tbalk}}}{2} \end{aligned}$$

$$R_{B2} := \text{Find}(R_{B2})$$

$$R_{B2} = 576.3 \cdot \text{kN}$$

Vertikal kraftjämvikt

$$\begin{aligned} R_{A2} &:= -R_{B2} + Q_{1d} \dots & R_{A2} &= 1.01 \cdot \text{MN} \\ &+ Q_{2d} + Q_{3d} + q_{1d} \cdot b_{q1} \dots \\ &+ q_{2d} \cdot b_{q2} + q_{3d} \cdot b_{q3} \dots \\ &+ g_{\text{tbalk.d}} \cdot l_{\text{tbalk}} + 2G_{\text{rücke.d}} \dots \\ &+ g_{\text{däck.d}} \cdot B \end{aligned}$$

Snittkrafter

Lastfall 1

Snitt 1: $0 \text{ m} < x < 0,3 \text{ m}$

$$x_{1.1} := 0 \text{ m}, 0.05 \text{ m} \dots a_{\text{stag}}$$

$$M_{1.1}(x_{1.1}) := R_{A1} \cdot x_{1.1} - G_{\text{rücke.d}} \cdot x_{1.1}$$

$$V_{1.1}(x_{1.1}) := \frac{d}{dx_{1.1}} M_{1.1}(x_{1.1})$$

Snitt 2: $0,3 \text{ m} < x < 1,8 \text{ m}$

$$x_{2.1} := a_{\text{stag}}, a_{\text{stag}} + 0.05 \text{ m} \dots l_{Q1Tp}$$

$$\begin{aligned} M_{2.1}(x_{2.1}) &:= R_{A1} \cdot x_{2.1} - G_{\text{rücke.d}} \cdot x_{2.1} \dots \\ &+ -g_{\text{tbalk.d}} \cdot \frac{(x_{2.1} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ &+ -q_{1d} \cdot \frac{(x_{2.1} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ &+ -g_{\text{däck.d}} \cdot \frac{(x_{2.1} - a_{\text{stag}})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{2.1}(x_{2.1}) := \frac{d}{dx_{2.1}} M_{2.1}(x_{2.1})$$

Snitt 3: 1,8 m < x < 3,3 m

$$x_{3.1} := l_{Q1Tp} + 0,05m \cdot a_{stag} + b_{q1}$$

$$\begin{aligned} M_{3.1}(x_{3.1}) := & R_{A1} \cdot x_{3.1} - G_{r\ddot{a}cke.d} \cdot x_{3.1} \dots \\ & + -Q_{1d} \cdot (x_{3.1} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{tbalk.d} \cdot \frac{(x_{3.1} - a_{stag})^2}{2} \dots \\ & + -q_{1d} \cdot \frac{(x_{3.1} - a_{stag})^2}{2} \dots \\ & + -g_{d\ddot{a}ck.d} \cdot \frac{(x_{3.1} - a_{stag})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{3.1}(x_{3.1}) := \frac{d}{dx_{3.1}} M_{3.1}(x_{3.1})$$

Snitt 4: 3,3 m < x < 4,8 m

$$x_{4.1} := a_{stag} + b_{q1} + 0,05m \cdot l_{Q2Tp}$$

$$\begin{aligned} M_{4.1}(x_{4.1}) := & R_{A1} \cdot x_{4.1} - G_{r\ddot{a}cke.d} \cdot x_{4.1} \dots \\ & + -Q_{1d} \cdot (x_{4.1} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{tbalk.d} \cdot \frac{(x_{4.1} - a_{stag})^2}{2} \dots \\ & + -q_{1d} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{4.1} - \left(a_{stag} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{2d} \cdot \frac{[x_{4.1} - (a_{stag} + b_{q1})]^2}{2} \dots \\ & + -g_{d\ddot{a}ck.d} \cdot \frac{(x_{4.1} - a_{stag})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{4.1}(x_{4.1}) := \frac{d}{dx_{4.1}} M_{4.1}(x_{4.1})$$

Snitt 5: 4,8 m < x < 6,3 m

$$x_{5.1} := l_{Q2Tp}, l_{Q2Tp} + 0.05m \cdot a_{stag} + b_{q1} + b_{q2}$$

$$\begin{aligned} M_{5.1}(x_{5.1}) := & R_{A1} \cdot x_{5.1} - G_{r\ddot{a}cke.d} \cdot x_{5.1} \dots \\ & + -Q_{1d} \cdot (x_{5.1} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{tbalk.d} \cdot \frac{(x_{5.1} - a_{stag})^2}{2} \dots \\ & + -q_{1d} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{5.1} - \left(a_{stag} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{2d} \cdot \frac{\left[x_{5.1} - (a_{stag} + b_{q1}) \right]^2}{2} \dots \\ & + -Q_{2d} \cdot (x_{5.1} - l_{Q2Tp}) \dots \\ & + -g_{d\ddot{a}ck.d} \cdot \frac{(x_{5.1} - a_{stag})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{5.1}(x_{5.1}) := \frac{d}{dx_{5.1}} M_{5.1}(x_{5.1})$$

Snitt 6: 6,3 m < x < 7,3 m

$$x_{6.1} := a_{stag} + b_{q1} + b_{q2}, a_{stag} + b_{q1} + b_{q2} + 0.05m \cdot l_{Q3Tp}$$

$$\begin{aligned} M_{6.1}(x_{6.1}) := & R_{A1} \cdot x_{6.1} - G_{r\ddot{a}cke.d} \cdot x_{6.1} \dots \\ & + -Q_{1d} \cdot (x_{6.1} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{tbalk.d} \cdot \frac{(x_{6.1} - a_{stag})^2}{2} \dots \\ & + -q_{1d} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{6.1} - \left(a_{stag} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{2d} \cdot b_{q2} \cdot \left[x_{6.1} - \left(a_{stag} + b_{q1} + \frac{b_{q2}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -Q_{2d} \cdot (x_{6.1} - l_{Q2Tp}) \dots \\ & + -q_{3d} \cdot \frac{\left[x_{6.1} - (a_{stag} + b_{q1} + b_{q2}) \right]^2}{2} \dots \\ & + -g_{d\ddot{a}ck.d} \cdot \frac{(x_{6.1} - a_{stag})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{6.1}(x_{6.1}) := \frac{d}{dx_{6.1}} M_{6.1}(x_{6.1})$$

Snitt 7: 7,3 m < x < 8,3 m

$$x_{7.1} := l_{Q3Tp}, l_{Q3Tp} + 0.05m.. a_{stag} + B$$

$$\begin{aligned} M_{7.1}(x_{7.1}) := & R_{A1} \cdot x_{7.1} - G_{r\ddot{a}cke.d} \cdot x_{7.1} \dots \\ & + -Q_{1d} \cdot (x_{7.1} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{tbalk.d} \cdot \frac{(x_{7.1} - a_{stag})^2}{2} \dots \\ & + -q_{1d} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{7.1} - \left(a_{stag} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{2d} \cdot b_{q2} \cdot \left[x_{7.1} - \left(a_{stag} + b_{q1} + \frac{b_{q2}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -Q_{2d} \cdot (x_{7.1} - l_{Q2Tp}) \dots \\ & + -q_{3d} \cdot \frac{\left[x_{7.1} - (a_{stag} + b_{q1} + b_{q2}) \right]^2}{2} \dots \\ & + -Q_{3d} \cdot (x_{7.1} - l_{Q3Tp}) \dots \\ & + -g_{d\ddot{a}ck.d} \cdot \frac{(x_{7.1} - a_{stag})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{7.1}(x_{7.1}) := \frac{d}{dx_{7.1}} M_{7.1}(x_{7.1})$$

Snitt 8: 8,3 m < x < 8,6 m

$$x_{8.1} := a_{stag} + B, a_{stag} + B + 0.05m.. l_{tbalk}$$

$$\begin{aligned} M_{8.1}(x_{8.1}) := & R_{A1} \cdot x_{8.1} - G_{r\ddot{a}cke.d} \cdot x_{8.1} \dots \\ & + -Q_{1d} \cdot (x_{8.1} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{tbalk.d} \cdot \frac{(x_{8.1} - a_{stag})^2}{2} \dots \\ & + -q_{1d} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{8.1} - \left(a_{stag} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{2d} \cdot b_{q2} \cdot \left[x_{8.1} - \left(a_{stag} + b_{q1} + \frac{b_{q2}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -Q_{2d} \cdot (x_{8.1} - l_{Q2Tp}) \dots \\ & + -q_{3d} \cdot b_{q3} \cdot \left[x_{8.1} - \left(a_{stag} + b_{q1} \dots \right) \right] \dots \\ & \quad \left[+ b_{q2} + \frac{b_{q3}}{2} \right] \dots \\ & + -Q_{3d} \cdot (x_{8.1} - l_{Q3Tp}) \dots \\ & + -g_{d\ddot{a}ck.d} \cdot \frac{(x_{8.1} - a_{stag})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{8.1}(x_{8.1}) := \frac{d}{dx_{8.1}} M_{8.1}(x_{8.1})$$

Lastfall 2

Snitt 1: $0 \text{ m} < x < 0,3 \text{ m}$

$$x_{1,2} := 0 \text{ m}, 0,05 \text{ m} \dots a_{\text{stag}}$$

$$M_{1,2}(x_{1,2}) := R_{A2} \cdot x_{1,2} - G_{\text{r\"acke.d}} \cdot x_{1,2}$$

$$V_{1,2}(x_{1,2}) := \frac{d}{dx_{1,2}} M_{1,2}(x_{1,2})$$

Snitt 2: $0,3 \text{ m} < x < 1,8 \text{ m}$

$$x_{2,2} := a_{\text{stag}}, a_{\text{stag}} + 0,05 \text{ m} \dots l_{Q1Tp}$$

$$\begin{aligned} M_{2,2}(x_{2,2}) := & R_{A2} \cdot x_{2,2} \dots \\ & + -G_{\text{r\"acke.d}} \cdot x_{2,2} - g_{\text{tbalk.d}} \cdot \frac{(x_{2,2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ & + -q_{2d} \cdot \frac{(x_{2,2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ & + -g_{\text{d\"ack.d}} \cdot \frac{(x_{2,2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{2,2}(x_{2,2}) := \frac{d}{dx_{2,2}} M_{2,2}(x_{2,2})$$

Snitt 3: $1,8 \text{ m} < x < 3,3 \text{ m}$

$$x_{3,2} := l_{Q1Tp}, l_{Q1Tp} + 0,05 \text{ m} \dots a_{\text{stag}} + b_{q1}$$

$$\begin{aligned} M_{3,2}(x_{3,2}) := & R_{A2} \cdot x_{3,2} - G_{\text{r\"acke.d}} \cdot x_{3,2} \dots \\ & + -Q_{2d} \cdot (x_{3,2} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{\text{tbalk.d}} \cdot \frac{(x_{3,2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ & + -q_{2d} \cdot \frac{(x_{3,2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ & + -g_{\text{d\"ack.d}} \cdot \frac{(x_{3,2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{3,2}(x_{3,2}) := \frac{d}{dx_{3,2}} M_{3,2}(x_{3,2})$$

Snitt 4: 3,3 m < x < 4,8 m

$$x_{4.2} := a_{\text{stag}} + b_{q1} \cdot a_{\text{stag}} + b_{q1} + 0.05m \cdot l_{Q2Tp}$$

$$\begin{aligned} M_{4.2}(x_{4.2}) := & R_{A2} \cdot x_{4.2} - G_{\text{r\ddot{a}cke.d}} \cdot x_{4.2} \dots \\ & + -Q_{2d} \cdot (x_{4.2} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{\text{tbalk.d}} \cdot \frac{(x_{4.2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ & + -q_{2d} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{4.2} - \left(a_{\text{stag}} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{1d} \cdot \frac{\left[x_{4.2} - (a_{\text{stag}} + b_{q1}) \right]^2}{2} \dots \\ & + -g_{\text{d\ddot{a}ck.d}} \cdot \frac{(x_{4.2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{4.2}(x_{4.2}) := \frac{d}{dx_{4.2}} M_{4.2}(x_{4.2})$$

Snitt 5: 4,8 m < x < 6,3 m

$$x_{5.2} := l_{Q2Tp} \cdot l_{Q2Tp} + 0.05m \cdot a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2}$$

$$\begin{aligned} M_{5.2}(x_{5.2}) := & R_{A2} \cdot x_{5.2} - G_{\text{r\ddot{a}cke.d}} \cdot x_{5.2} \dots \\ & + -Q_{2d} \cdot (x_{5.2} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{\text{tbalk.d}} \cdot \frac{(x_{5.2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ & + -q_{2d} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{5.2} - \left(a_{\text{stag}} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{1d} \cdot \frac{\left[x_{5.2} - (a_{\text{stag}} + b_{q1}) \right]^2}{2} \dots \\ & + -Q_{1d} \cdot (x_{5.2} - l_{Q2Tp}) \dots \\ & + -g_{\text{d\ddot{a}ck.d}} \cdot \frac{(x_{5.2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{5.2}(x_{5.2}) := \frac{d}{dx_{5.2}} M_{5.2}(x_{5.2})$$

Snitt 6: 6,3 m < x < 7,3 m

$$x_{6.2} := a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2}, a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2} + 0.05\text{m}..l_{Q3Tp}$$

$$\begin{aligned} M_{6.2}(x_{6.2}) := & R_{A2} \cdot x_{6.2} - G_{\text{r\ddot{a}cke.d}} \cdot x_{6.2} \dots \\ & + -Q_{2d} \cdot (x_{6.2} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{\text{tbalk.d}} \cdot \frac{(x_{6.2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ & + -q_{2d} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{6.2} - \left(a_{\text{stag}} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{1d} \cdot b_{q2} \cdot \left[x_{6.2} - \left(a_{\text{stag}} + b_{q1} + \frac{b_{q2}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -Q_{1d} \cdot (x_{6.2} - l_{Q2Tp}) \dots \\ & + -q_{3d} \cdot \frac{[x_{6.2} - (a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2})]^2}{2} \dots \\ & + -g_{\text{d\ddot{a}ck.d}} \cdot \frac{(x_{6.2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{6.2}(x_{6.2}) := \frac{d}{dx_{6.2}} M_{6.2}(x_{6.2})$$

Snitt 7: 7,3 m < x < 8,3 m

$$x_{7.2} := l_{Q3Tp}, l_{Q3Tp} + 0.05\text{m}..a_{\text{stag}} + B$$

$$\begin{aligned} M_{7.2}(x_{7.2}) := & R_{A2} \cdot x_{7.2} - G_{\text{r\ddot{a}cke.d}} \cdot x_{7.2} \dots \\ & + -Q_{2d} \cdot (x_{7.2} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{\text{tbalk.d}} \cdot \frac{(x_{7.2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ & + -q_{2d} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{7.2} - \left(a_{\text{stag}} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{1d} \cdot b_{q2} \cdot \left[x_{7.2} - \left(a_{\text{stag}} + b_{q1} + \frac{b_{q2}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -Q_{1d} \cdot (x_{7.2} - l_{Q2Tp}) \dots \\ & + -q_{3d} \cdot \frac{[x_{7.2} - (a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2})]^2}{2} \dots \\ & + -Q_{3d} \cdot (x_{7.2} - l_{Q3Tp}) \dots \\ & + -g_{\text{d\ddot{a}ck.d}} \cdot \frac{(x_{7.2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{7.2}(x_{7.2}) := \frac{d}{dx_{7.2}} M_{7.2}(x_{7.2})$$

Snitt 8: 8,3 m < x < 8,6 m

$$x_{8.2} := a_{\text{stag}} + B, a_{\text{stag}} + B + 0.05\text{m}.. l_{\text{tbalk}}$$

$$\begin{aligned} M_{8.2}(x_{8.2}) := & R_{A2} \cdot x_{8.2} - G_{\text{r\"acke.d}} \cdot x_{8.2} \dots \\ & + -Q_{2d} \cdot (x_{8.2} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{\text{tbalk.d}} \cdot \frac{(x_{8.2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ & + -q_{2d} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{8.2} - \left(a_{\text{stag}} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{1d} \cdot b_{q2} \cdot \left[x_{8.2} - \left(a_{\text{stag}} + b_{q1} + \frac{b_{q2}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -Q_{1d} \cdot (x_{8.2} - l_{Q2Tp}) \dots \\ & + -q_{3d} \cdot b_{q3} \cdot \left[x_{8.2} - \left(a_{\text{stag}} + b_{q1} \dots \right) \right] \dots \\ & \quad \left[+ b_{q2} + \frac{b_{q3}}{2} \right] \dots \\ & + -Q_{3d} \cdot (x_{8.2} - l_{Q3Tp}) \dots \\ & + -g_{\text{d\"ack.d}} \cdot \frac{(x_{8.2} - a_{\text{stag}})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{8.2}(x_{8.2}) := \frac{d}{dx_{8.2}} M_{8.2}(x_{8.2})$$

Maximalt moment

Lastfall 1

Snitt 1

$$x_{\text{max}} := 0\text{m}$$

Given

$$0\text{m} < x_{\text{max}} < a_{\text{stag}}$$

$$x_{\text{max.m.1.1}} := \text{Maximize}(M_{1.1}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.m.1.1}} = 0.3\text{m}$$

$$M_{\text{max.1.1}} := M_{1.1}(x_{\text{max.m.1.1}}) \quad M_{\text{max.1.1}} = 269.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Snitt 2

Given

$$a_{\text{stag}} < x_{\text{max}} < l_{Q1Tp}$$

$$x_{\text{max.m.2.1}} := \text{Maximize}(M_{2.1}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.m.2.1}} = 1.8\text{m}$$

$$M_{\text{max.2.1}} := M_{2.1}(x_{\text{max.m.2.1}}) \quad M_{\text{max.2.1}} = 1.59 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 3

Given

$$l_{Q1Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + b_{q1}$$

$$x_{\max.m.3.1} := \text{Maximize}(M_{3.1}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.3.1} = 3.3 \text{ m}$$

$$M_{\max.3.1} := M_{3.1}(x_{\max.m.3.1}) \quad M_{\max.3.1} = 2.05 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 4

Given

$$a_{\text{stag}} + b_{q1} < x_{\max} < l_{Q2Tp}$$

$$x_{\max.m.4.1} := \text{Maximize}(M_{4.1}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.4.1} = 4.8 \text{ m}$$

$$M_{\max.4.1} := M_{4.1}(x_{\max.m.4.1}) \quad M_{\max.4.1} = 2.45 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 5

Given

$$l_{Q2Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2}$$

$$x_{\max.m.5.1} := \text{Maximize}(M_{5.1}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.5.1} = 4.8 \text{ m}$$

$$M_{\max.5.1} := M_{5.1}(x_{\max.m.5.1}) \quad M_{\max.5.1} = 2.45 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 6

Given

$$a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2} < x_{\max} < l_{Q3Tp}$$

$$x_{\max.m.6.1} := \text{Maximize}(M_{6.1}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.6.1} = 6.3 \text{ m}$$

$$M_{\max.6.1} := M_{6.1}(x_{\max.m.6.1}) \quad M_{\max.6.1} = 1.54 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 7

Given

$$l_{Q3Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + B$$

$$x_{\max.m.7.1} := \text{Maximize}(M_{7.1}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.7.1} = 7.3 \text{ m}$$

$$M_{\max.7.1} := M_{7.1}(x_{\max.m.7.1}) \quad M_{\max.7.1} = 889.3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Snitt 8

Given

$$a_{\text{stag}} + B < x_{\text{max}} < l_{\text{tbalk}}$$

$$x_{\text{max.m.8.1}} := \text{Maximize}(M_{8.1}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.m.8.1}} = 8.3 \text{ m}$$

$$M_{\text{max.8.1}} := M_{8.1}(x_{\text{max.m.8.1}}) \quad M_{\text{max.8.1}} = 219.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Lastfall 2

Snitt 1

Given

$$0 \text{ m} < x_{\text{max}} < a_{\text{stag}}$$

$$x_{\text{max.m.1.2}} := \text{Maximize}(M_{1.2}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.m.1.2}} = 0.3 \text{ m}$$

$$M_{\text{max.1.2}} := M_{1.2}(x_{\text{max.m.1.2}}) \quad M_{\text{max.1.2}} = 303 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Snitt 2

Given

$$a_{\text{stag}} < x_{\text{max}} < l_{Q1Tp}$$

$$x_{\text{max.m.2.2}} := \text{Maximize}(M_{2.2}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.m.2.2}} = 1.8 \text{ m}$$

$$M_{\text{max.2.2}} := M_{2.2}(x_{\text{max.m.2.2}}) \quad M_{\text{max.2.2}} = 1.77 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 3

Given

$$l_{Q1Tp} < x_{\text{max}} < a_{\text{stag}} + b_{q1}$$

$$x_{\text{max.m.3.2}} := \text{Maximize}(M_{3.2}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.m.3.2}} = 3.3 \text{ m}$$

$$M_{\text{max.3.2}} := M_{3.2}(x_{\text{max.m.3.2}}) \quad M_{\text{max.3.2}} = 1.94 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 4

Given

$$a_{\text{stag}} + b_{q1} < x_{\text{max}} < l_{Q2Tp}$$

$$x_{\text{max.m.4.2}} := \text{Maximize}(M_{4.2}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.m.4.2}} = 4.8 \text{ m}$$

$$M_{\text{max.4.2}} := M_{4.2}(x_{\text{max.m.4.2}}) \quad M_{\text{max.4.2}} = 2.04 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 5

Given

$$l_{Q2Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2}$$

$$x_{\max.m.5.2} := \text{Maximize}(M_{5.2}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.5.2} = 4.8 \text{ m}$$

$$M_{\max.5.2} := M_{5.2}(x_{\max.m.5.2}) \quad M_{\max.5.2} = 2.04 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 6

Given

$$a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2} < x_{\max} < l_{Q3Tp}$$

$$x_{\max.m.6.2} := \text{Maximize}(M_{6.2}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.6.2} = 6.3 \text{ m}$$

$$M_{\max.6.2} := M_{6.2}(x_{\max.m.6.2}) \quad M_{\max.6.2} = 1.28 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 7

Given

$$l_{Q3Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + B$$

$$x_{\max.m.7.2} := \text{Maximize}(M_{7.2}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.7.2} = 7.3 \text{ m}$$

$$M_{\max.7.2} := M_{7.2}(x_{\max.m.7.2}) \quad M_{\max.7.2} = 745.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Snitt 8

Given

$$a_{\text{stag}} + B < x_{\max} < l_{\text{tbalk}}$$

$$x_{\max.m.8.2} := \text{Maximize}(M_{8.2}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.8.2} = 8.3 \text{ m}$$

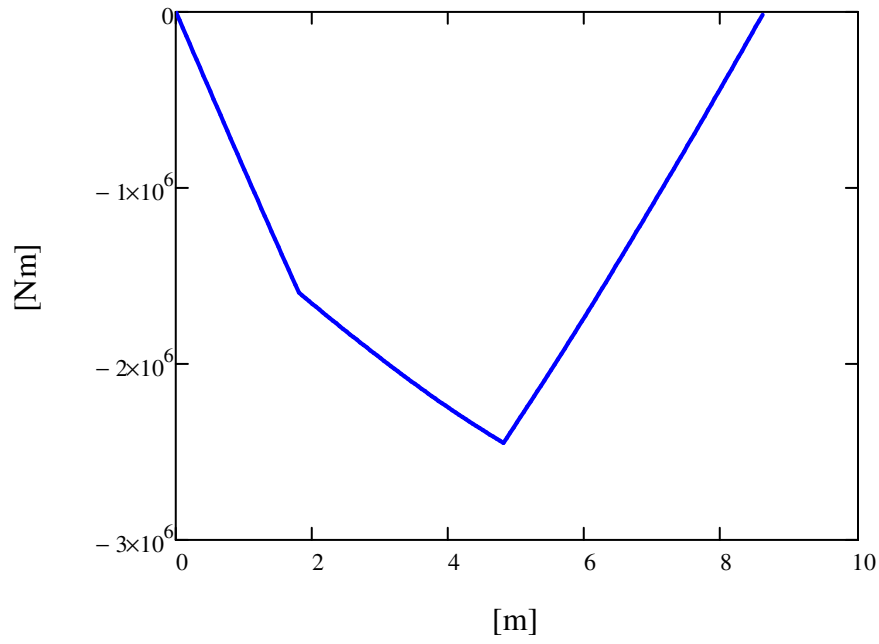
$$M_{\max.8.2} := M_{8.2}(x_{\max.m.8.2}) \quad M_{\max.8.2} = 186 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\max.1} := \max(M_{\max.1.1}, M_{\max.2.1}, M_{\max.3.1}, M_{\max.4.1}, M_{\max.5.1}, M_{\max.6.1}, M_{\max.7.1}, M_{\max.8.1})$$

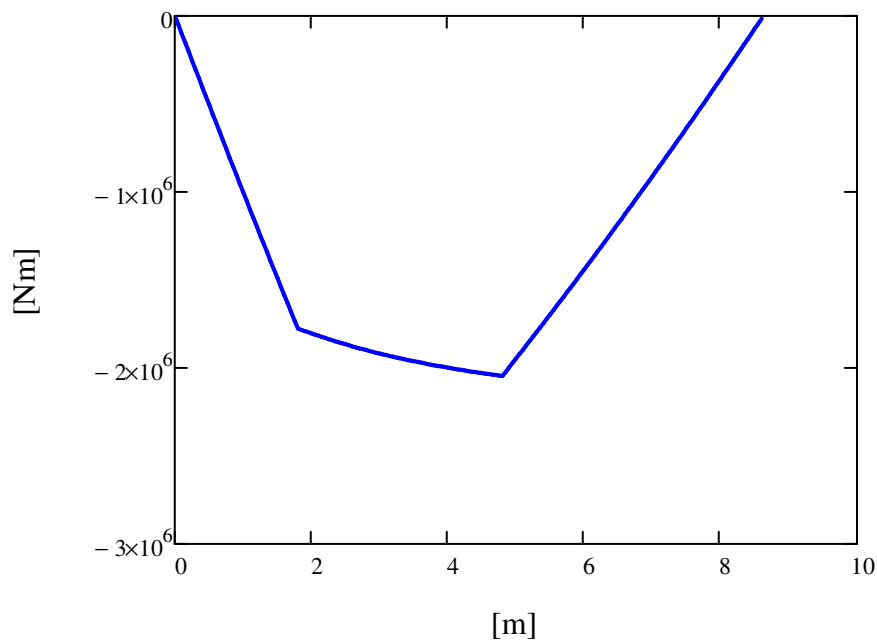
$$M_{\max.2} := \max(M_{\max.1.2}, M_{\max.2.2}, M_{\max.3.2}, M_{\max.4.2}, M_{\max.5.2}, M_{\max.6.2}, M_{\max.7.2}, M_{\max.8.2})$$

Maximalt moment i
tvärbalkarna:

$$M_{\max.t} := \max(M_{\max.1}, M_{\max.2}) \quad M_{\max.t} = 2.446 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$



Figur 6. Momentdiagram för lastfall 1.



Figur 7. Momentdiagram för lastfall 2.

Maximal tvärkraft

Lastfall 1

Snitt 1

Given

$$0\text{m} < x_{\max} < a_{\text{stag}}$$

$$x_{\max.v.1.1} := \text{Maximize}(V_{1.1}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.1.1} = 0 \text{ m}$$

$$V_{\max.1.1} := V_{1.1}(x_{\max.v.1.1}) \quad V_{\max.1.1} = 899.3 \text{ kN}$$

Snitt 2

Given

$$a_{\text{stag}} < x_{\max} < l_{Q1Tp}$$

$$x_{\max.v.2.1} := \text{Maximize}(V_{2.1}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.2.1} = 0.3 \text{ m}$$

$$V_{\max.2.1} := V_{2.1}(x_{\max.v.2.1}) \quad V_{\max.2.1} = 899.3 \text{ kN}$$

Snitt 3

Given

$$l_{Q1Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + b_{q1}$$

$$x_{\max.v.3.1} := \text{Maximize}(V_{3.1}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.3.1} = 1.8 \text{ m}$$

$$V_{\max.3.1} := V_{3.1}(x_{\max.v.3.1}) \quad V_{\max.3.1} = 324.9 \text{ kN}$$

Snitt 4

Given

$$a_{\text{stag}} + b_{q1} < x_{\max} < l_{Q2Tp}$$

$$x_{\max.v.4.1} := \text{Maximize}(V_{4.1}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.4.1} = 3.3 \text{ m}$$

$$V_{\max.4.1} := V_{4.1}(x_{\max.v.4.1}) \quad V_{\max.4.1} = 290.4 \text{ kN}$$

Snitt 5

Given

$$l_{Q2Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2}$$

$$x_{\max.v.5.1} := \text{Minimize}(V_{5.1}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.5.1} = 6.3 \text{ m}$$

$$V_{\max.5.1} := |V_{5.1}(x_{\max.v.5.1})| \quad V_{\max.5.1} = 635.6 \text{ kN}$$

Snitt 6

Given

$$a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2} < x_{\text{max}} < l_{Q3Tp}$$

$$x_{\text{max.v.6.1}} := \text{Minimize}(V_{6.1}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.v.6.1}} = 7.3 \text{ m}$$

$$V_{\text{max.6.1}} := |V_{6.1}(x_{\text{max.v.6.1}})| \quad V_{\text{max.6.1}} = 658.6 \text{ kN}$$

Snitt 7

Given

$$l_{Q3Tp} < x_{\text{max}} < a_{\text{stag}} + B$$

$$x_{\text{max.v.7.1}} := \text{Minimize}(V_{7.1}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.v.7.1}} = 8.3 \text{ m}$$

$$V_{\text{max.7.1}} := |V_{7.1}(x_{\text{max.v.7.1}})| \quad V_{\text{max.7.1}} = 681.6 \text{ kN}$$

Snitt 8

Given

$$a_{\text{stag}} + B < x_{\text{max}} < l_{\text{tbalk}}$$

$$x_{\text{max.v.8.1}} := \text{Minimize}(V_{8.1}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.v.8.1}} = 8.6 \text{ m}$$

$$V_{\text{max.8.1}} := |V_{8.1}(x_{\text{max.v.8.1}})| \quad V_{\text{max.8.1}} = 685.4 \text{ kN}$$

Lastfall 2

Snitt 1

Given

$$0 \text{ m} < x_{\text{max}} < a_{\text{stag}}$$

$$x_{\text{max.v.1.2}} := \text{Maximize}(V_{1.2}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.v.1.2}} = 0 \text{ m}$$

$$V_{\text{max.1.2}} := V_{1.2}(x_{\text{max.v.1.2}}) \quad V_{\text{max.1.2}} = 1.01 \cdot \text{MN}$$

Snitt 2

Given

$$a_{\text{stag}} < x_{\text{max}} < l_{Q1Tp}$$

$$x_{\text{max.v.2.2}} := \text{Maximize}(V_{2.2}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.v.2.2}} = 0.3 \text{ m}$$

$$V_{\text{max.2.2}} := V_{2.2}(x_{\text{max.v.2.2}}) \quad V_{\text{max.2.2}} = 1.01 \cdot \text{MN}$$

Snitt 3

Given

$$l_{Q1Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + b_{q1}$$

$$x_{\max.v.3.2} := \text{Maximize}(V_{3.2}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.3.2} = 1.8 \text{ m}$$

$$V_{\max.3.2} := V_{3.2}(x_{\max.v.3.2}) \quad V_{\max.3.2} = 141.9 \cdot \text{kN}$$

Snitt 4

Given

$$a_{\text{stag}} + b_{q1} < x_{\max} < l_{Q2Tp}$$

$$x_{\max.v.4.2} := \text{Maximize}(V_{4.2}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.4.2} = 3.3 \text{ m}$$

$$V_{\max.4.2} := V_{4.2}(x_{\max.v.4.2}) \quad V_{\max.4.2} = 83.9 \cdot \text{kN}$$

Snitt 5

Given

$$l_{Q2Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2}$$

$$x_{\max.v.5.2} := \text{Minimize}(V_{5.2}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.5.2} = 6.3 \text{ m}$$

$$V_{\max.5.2} := |V_{5.2}(x_{\max.v.5.2})| \quad V_{\max.5.2} = 525.1 \cdot \text{kN}$$

Snitt 6

Given

$$a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2} < x_{\max} < l_{Q3Tp}$$

$$x_{\max.v.6.2} := \text{Minimize}(V_{6.2}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.6.2} = 7.3 \text{ m}$$

$$V_{\max.6.2} := |V_{6.2}(x_{\max.v.6.2})| \quad V_{\max.6.2} = 548.1 \cdot \text{kN}$$

Snitt 7

Given

$$l_{Q3Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + B$$

$$x_{\max.v.7.2} := \text{Minimize}(V_{7.2}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.7.2} = 8.3 \text{ m}$$

$$V_{\max.7.2} := |V_{7.2}(x_{\max.v.7.2})| \quad V_{\max.7.2} = 571 \cdot \text{kN}$$

Snitt 8

Given

$$a_{\text{stag}} + B < x_{\text{max}} < l_{\text{tbalk}}$$

$$x_{\text{max.v.8.2}} := \text{Minimize}(V_{8.2}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.v.8.2}} = 8.6 \text{ m}$$

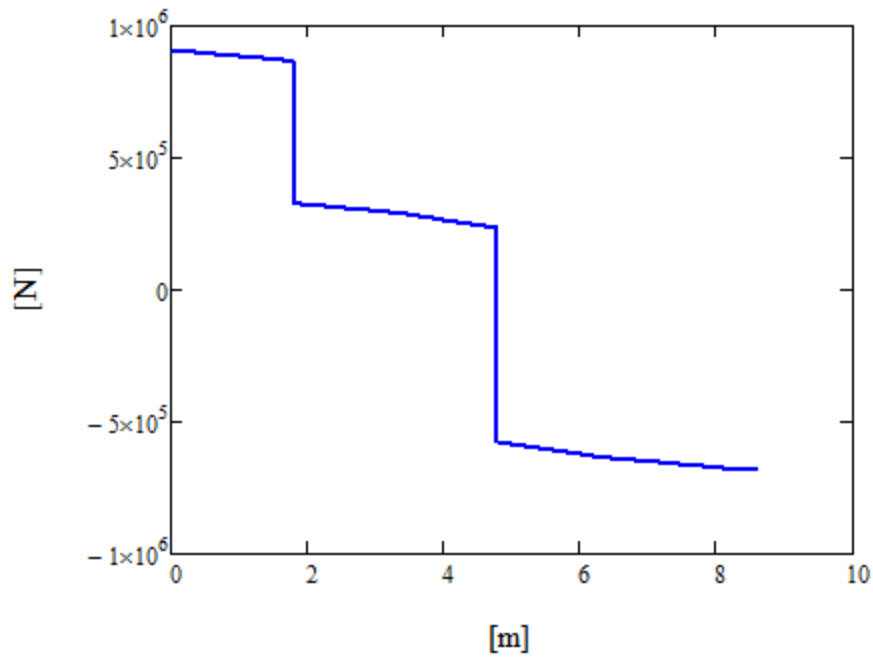
$$V_{\text{max.8.2}} := |V_{8.2}(x_{\text{max.v.8.2}})| \quad V_{\text{max.8.2}} = 574.9 \text{ kN}$$

$$V_{\text{max.1}} := \max(V_{\text{max.1.1}}, V_{\text{max.2.1}}, V_{\text{max.3.1}}, V_{\text{max.4.1}}, V_{\text{max.5.1}}, V_{\text{max.6.1}}, V_{\text{max.7.1}}, V_{\text{max.8.1}})$$

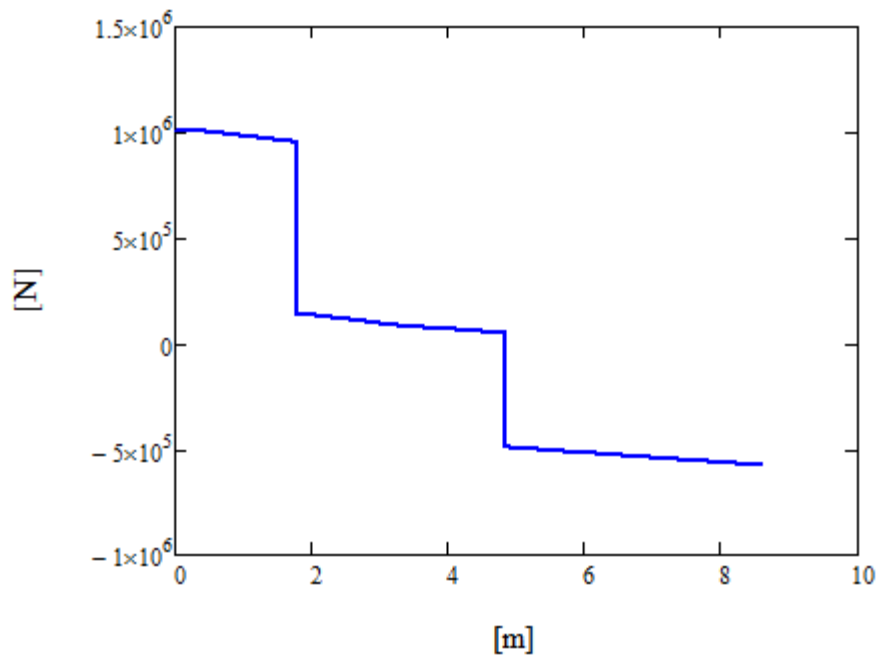
$$V_{\text{max.2}} := \max(V_{\text{max.1.2}}, V_{\text{max.2.2}}, V_{\text{max.3.2}}, V_{\text{max.4.2}}, V_{\text{max.5.2}}, V_{\text{max.6.2}}, V_{\text{max.7.2}}, V_{\text{max.8.2}})$$

Maximal tvärkraft i
tvärbalkarna:

$$V_{\text{max.t}} := \max(V_{\text{max.1}}, V_{\text{max.2}}) \quad V_{\text{max.t}} = 1.01 \cdot \text{MN}$$



Figur 8. Tvärkraftsdiagram för lastfall 1.



Figur 9. Tvärkraftsdiagram för lastfall 2.

Kontroll av kapacitet

Trä

Dimensionerande

momentkapacitet:

$$M_{Rd} = W \cdot f_{md}$$

T3-14

För rektangulära tvärsnitt:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

T3-18

Då konstruktionshöjden är begränsad till 0,77 m och plattan är 0,25 m tjock antas att tvärbalkarna inte kan vara högre än 0,45 m.

Limträ

$$k_{h,gl} := 1.04$$

Dimensionerade

böjhållfasthet:

$$f_{md,gl} := k_{mod} \cdot k_{h,gl} \cdot \frac{f_{mk,gl}}{\gamma_{M,gl}}$$

T2-12

$$f_{md,gl} = 21 \cdot \text{MPa}$$

Bredd:

$$b_{tbalk,gl} := 1 \text{ m}$$

Höjd:

$$h_{tbalk,gl} := 0.45 \text{ m}$$

Momentkapacitet:

$$M_{Rd,gl} := \frac{b_{tbalk,gl} \cdot h_{tbalk,gl}^2}{6} \cdot f_{md,gl}$$

$$\frac{M_{max,t}}{M_{Rd,gl}} = 3.457$$

Kapaciteten är ej tillräcklig!

Kerto S

$$k_{h,lvls} := 1$$

Dimensionerande

böjhållfasthet:

$$f_{md,lvls} := k_{mod} \cdot k_{h,lvls} \cdot \frac{f_{mk,lvls}}{\gamma_{M,lvl}}$$

$$f_{md,lvls} = 25.7 \cdot \text{MPa}$$

Bredd:

$$b_{tbalk,lvl} := 1 \text{ m}$$

Höjd:

$$h_{tbalk,lvl} := 0.45 \text{ m}$$

Momentkapacitet: $M_{Rd.lvl} := \frac{b_{tbalk.lvl} \cdot h_{tbalk.lvl}^2}{6} \cdot f_{md.lvl}$

$$\frac{M_{max.t}}{M_{Rd.lvl}} = 2.824$$

Kapaciteten är ej tillräcklig!

Stål

För att momentkapaciteten ska vara tillräcklig måste följande villkor vara uppfyllt:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

Dimensionerande momentkapacitet:

$$M_{b.Rd} = \chi_{LT} \cdot W \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad S4-41$$

Eftersom tvärbalkarna är stadgade mot vippning är $\chi_{LT}=1,0$.

Dimensionerande tvärkraftskapacitet om tvärsnittet inte riskerar skjuvbuckling:

$$V_{pl.Rd} = A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad S5-18$$

Dimensionerande tvärkraftskapacitet om tvärsnittet riskerar skjuvbuckling:

$$V_{bw.Rd} = \chi_w \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad S5-20$$

Dimensionerande momentkapacitet med hänsyn till interaktion:

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

S5-22

Valsad profil

För den valsade profilen kommer HEM-balkar undersökas. Eftersom de finns i stålorter upp till S355 kommer den att användas.

Minsta böjmotstånd som krävs för tillräcklig momentkapacitet:

$$W_{\min.t.355} := \left(\frac{M_{\max.t}}{f_{y.355}} \right) \quad W_{\min.t.355} = 6.9 \times 10^6 \cdot \text{mm}^3$$

För att kapaciteten ska vara uppfylld måste HEM500 väljas vilket gör att kravet på konstruktionshöjd inte kommer uppfyllas.

Svetsad profil

För den svetsade profilen kommer S460 att användas.

Minsta böjmotstånd som krävs för tillräcklig momentkapacitet:

$$W_{\min.t.460} := \left(\frac{M_{\max.t}}{f_{y.460.2}} \right) \quad W_{\min.t.460} = 5.7 \times 10^6 \cdot \text{mm}^3$$

Dimensioner

Maximal höjd för att klara konstruktionshöjden antas vara 0,35 m. Resten av dimensionerna kommer sedan itereras fram för att klara kraven på konstruktionshöjden.

Total höjd: $h_{\text{svetsp}} := 0.35\text{m}$

Flänstjocklek: $t_{f.\text{svetsp}} := 60\text{mm}$

Flänsbredd: $b_{f.\text{svetsp}} := 350\text{mm}$

Livhöjd: $h_{w.\text{svetsp}} := h_{\text{svetsp}} - 2t_{f.\text{svetsp}} \quad h_{w.\text{svetsp}} = 0.23\text{ m}$

Livtjocklek: $t_{w.\text{svetsp}} := 15\text{mm}$

Svetsens a-mått: $a_{\text{svets}} := 5\text{mm}$

Tvårsnittsarea: $A_{\text{svetsp}} := 2 \cdot t_{f.\text{svetsp}} \cdot b_{f.\text{svetsp}} \dots$
 $+ h_{w.\text{svetsp}} \cdot t_{w.\text{svetsp}}$

Egentyngd:

$$g_{\text{tbalk}} := \gamma_G \cdot A_{\text{svetsp}} \cdot \gamma_{\text{stål}}$$

$$g_{\text{tbalk}} = 4.72 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Yttroghetsmoment:

$$I_{\text{svetsp}} := \frac{t_{\text{w.svetsp}} \cdot h_{\text{w.svetsp}}^3}{12} \dots$$
$$+ 2 \cdot \left[\frac{b_{\text{f.svetsp}} \cdot t_{\text{f.svetsp}}^3}{12} \dots \right]$$
$$+ b_{\text{f.svetsp}} \cdot t_{\text{f.svetsp}} \cdot \left(\frac{h_{\text{w.svetsp}} \dots + t_{\text{f.svetsp}}}{2} \right)^2$$

Kontroll av tvärsnittsklass

$$\epsilon_{460} := \sqrt{\frac{235 \text{MPa}}{f_{y,460.2}}}$$

$$c := \frac{b_{\text{f.svetsp}} - t_{\text{w.svetsp}}}{2} \dots$$
$$+ -2 \cdot \sqrt{a_{\text{svets}} \cdot \text{mm}}$$

$$c = 0.163 \text{m}$$

$$\frac{c}{t_{\text{f.svetsp}}} \leq 9 \cdot \epsilon_{460} = 1$$

Tvärsnittsklass 1

Momentkapacitet

$$W_{\text{pl.svetsp}} := t_{\text{f.svetsp}} \cdot b_{\text{f.svetsp}} \cdot (t_{\text{f.svetsp}} + h_{\text{w.svetsp}}) \dots$$
$$+ t_{\text{w.svetsp}} \cdot \frac{h_{\text{w.svetsp}}^2}{4}$$

$$\frac{W_{\text{min.t.460}}}{W_{\text{pl.svetsp}}} = 0.905$$

Tillräcklig
momentkapacitet!

Kontroll av tvärkraftskapacitet

För oavstyvade livplåtar måste följande villkor vara uppfyllt för att tvärsnittet inte ska riskera skjuvbuckling:

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\epsilon}{\eta} \quad \text{S5-19}$$

För stålqualitéer upp till och med S460:

$$\eta := 1.2$$

$$\frac{h_{w,svetsp}}{t_{w,svetsp}} < 72 \cdot \frac{\epsilon_{460}}{\eta} = 1 \quad \text{Skjuvbuckling riskeras inte!}$$

Skjuvarea:

$$A_{v,svetsp} := \eta \cdot h_{w,svetsp} \cdot t_{w,svetsp}$$

Tvärfkraftskapacitet:

$$V_{pl,Rd,svetsp} := A_{v,svetsp} \cdot \frac{f_{y,460.2}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M,s}}$$

$$\frac{V_{max,t}}{V_{pl,Rd,svetsp}} = 0.983$$

Tvärfkraftskapaciteten är tillräcklig!

Kontroll av interaktion

$$\frac{V_{max,t}}{V_{pl,Rd,svetsp}} < 0.5 = 0$$

Interaktionskontroll behöver utföras!

Flänsarnas böjmotstånd:

$$W_{pl,f} := t_{f,svetsp} \cdot b_{f,svetsp} \cdot (t_{f,svetsp} + h_{w,svetsp})$$

Flänsarnas momentkapacitet: $M_{f,Rd} := W_{pl,f} \cdot f_{y,460.2}$

$$\frac{M_{max,t}}{M_{f,Rd}} = 0.934$$

Kapaciteten är tillräcklig!

Utnyttjandegrad

Moment:
$$\frac{M_{\max.t}}{W_{\text{pl.svetsp}} \cdot f_y \cdot 460.2} = 0.905$$

Tvärkraft:
$$\frac{V_{\max.t}}{V_{\text{pl.Rd.svetsp}}} = 0.983$$

6. Dimensionering av hängstag och dess infästningar

Dimensionering av hängstag

Normalkraften som används för dimensionering av hängstagen är samma som största reaktionskraften vid dimensionering av tvärbalkarna. Detta innebär att stagen antas ta upp lasterna för ett helt cc-avstånd och blir därmed på säker sida jämfört med om hänsyn tas till att lasterna sprids ut på alla stagen. Materialparametrar för skruvarna är hämtade från Bärande konstruktioner del 2

Dimensionerande normalkraft: $N_{Ed.s} := R_{A2}$

$$N_{Ed.s} = 1.01 \cdot MN$$

Tvärsnittsarea:

$$A_{stag} := \frac{N_{Ed.s}}{f_{y.355}}$$

$$A_{stag} = 2.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Radie:

$$r_{stag} := \sqrt{\frac{A_{stag}}{\pi}}$$

$$r_{stag} = 30.12 \text{ mm}$$

Radien väljs till:

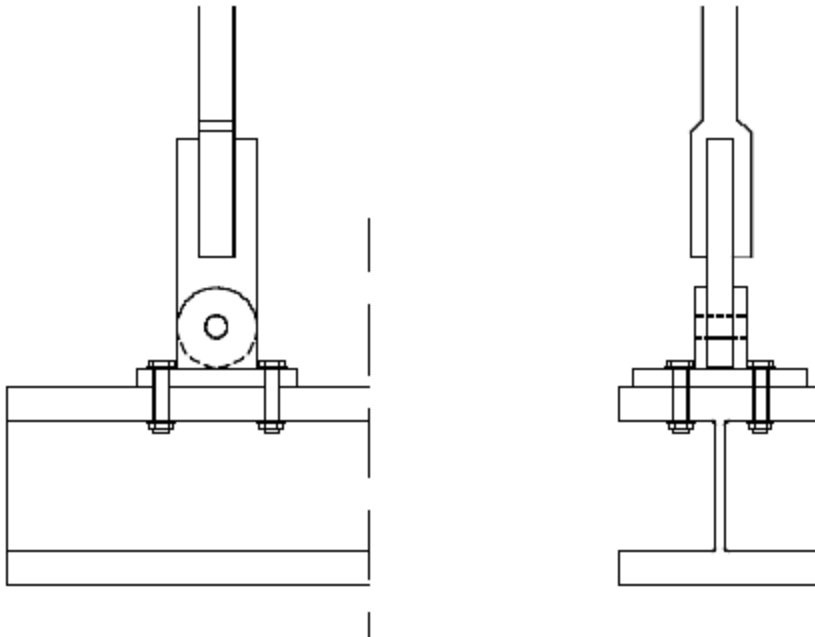
$$r_{stag} := 31 \text{ mm}$$

Tvärsnittsarea:

$$A_{stag} := r_{stag}^2 \cdot \pi$$

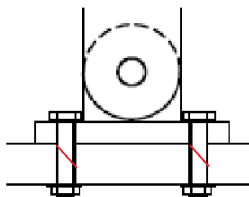
$$A_{stag} = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Dimensionering av infästning mellan hängstag och tvärbalk



Figur 10. Utformning av infästning mellan hängstag och tvärbalk.

Brottnod 1: Dragbrott i skruv



Figur 11. Brottnod 1.

Beaktar effekter av bändning: $k_2 := 0.9$

Skruvens spänningsarea: $A_s := 353\text{mm}^2$

Skruvens brottspänning $f_{ub} := 1000\text{MPa}$

Antal skruvar:

$$n_{\text{skruv}} := 4$$

Dimensionerande kraft på
varje skruv:

$$F_{t,Ed} := \frac{N_{Ed,s}}{n_{\text{skruv}}} \quad F_{t,Ed} = 252.9 \cdot \text{kN}$$

Kapacitet:

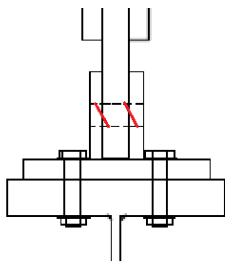
$$F_{t,Rd} := k_2 \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_s}{\gamma_{M2,s}} \quad \text{S8-2}$$

$$F_{t,Rd} = 254.2 \cdot \text{kN}$$

$$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} = 0.995$$

Kapaciteten är tillräcklig!

Brottnod 2: Skjuvbrott i sprint



Figur 12. Brottnod 2.

Diameter:

$$d_{\text{sprint}} := 37 \text{mm}$$

Tvärsnittsarea:

$$A_{\text{sprint}} := \pi \cdot \frac{d_{\text{sprint}}^2}{4} \quad A_{\text{sprint}} = 1.08 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

Antal skär:

$$n_{\text{skär}} := 2$$

Då sprinten inte är gängad:

$$\alpha_v := 0.6$$

Bärförmåga per skär:

$$F_{v,Rd} := \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_{\text{sprint}}}{\gamma_{M2,s}} \quad \text{S8-20}$$

$$F_{v,Rd} = 516.1 \cdot \text{kN}$$

Total bärförmåga:

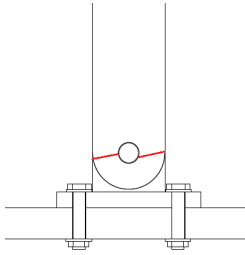
$$F_{v,Rd,tot} := n_{\text{skär}} \cdot F_{v,Rd}$$

$$F_{v,Rd,tot} = 1.03 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$\frac{N_{Ed,s}}{F_{v,Rd,tot}} = 0.98$$

Kapaciteten är tillräcklig!

Brottnod 3: Hålkantbrott i platta (hane)



Figur 13. Brottnod 3.

Hålets diameter: $d_0 := d_{\text{sprint}} + 3\text{mm}$ $d_0 = 40\text{mm}$

Antal skär: $n_{\text{skär}} := 1$

Plattans tjocklek: $t := 44\text{mm}$

Avstånd från hålets centrum till plåtens kant, parallellt kraftens riktning: $e_1 := 70\text{mm}$

Avstånd från hålets centrum till plåtens kant, vinkelrätt kraftens riktning: $e_2 := 70\text{mm}$

$$k_1 := \min\left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 2.5\right) \quad k_1 = 2.5$$

$$\alpha_d := \frac{e_1}{3 \cdot d_0}$$

$$\alpha_b := \min\left(1, \alpha_d, \frac{f_{ub}}{f_{u,460}}\right) \quad \text{S8-22}$$

$\alpha_b = 0.583$

Bärförmåga per skär: $F_{b,Rd} := k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_{u,460} \cdot d_{\text{sprint}} \cdot \frac{t}{\gamma_{M2,s}}$ S8-21

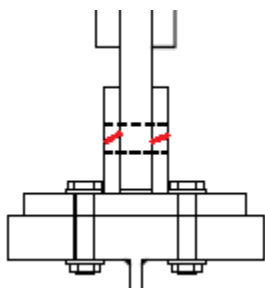
$$F_{b,Rd} = 1.03 \cdot \text{MN}$$

Total bärförmåga: $F_{b,Rd,tot} := F_{b,Rd} \cdot n_{\text{skär}}$ $F_{b,Rd,tot} = 1.03 \cdot \text{MN}$

$$\frac{N_{Ed,s}}{F_{b,Rd,tot}} = 0.986$$

Kapaciteten är tillräcklig!

Brottnod 4: Hålkantbrott i hängare (hona)



Figur 14. Brottnod 4.

Hålets diameter: $d_0 := d_{\text{sprint}} + 3\text{mm}$ $d_0 = 40\text{mm}$

Antal skär: $n_{\text{skär}} := 2$

Plattans tjocklek: $t := 22\text{mm}$

Avstånd från hålets centrum
till plåtens kant,
parallellt kraftens riktning: $e_1 := 70\text{mm}$

Avstånd från hålets centrum
till plåtens kant,
vinkelrätt kraftens riktning: $e_2 := 70\text{mm}$

$$k_1 := \min\left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 2.5\right) \quad k_1 = 2.5$$

$$\alpha_d := \frac{e_1}{3 \cdot d_0}$$

$$\alpha_b := \min\left(1, \alpha_d, \frac{f_{ub}}{f_{u,460}}\right) \quad \alpha_b = 0.583$$

Bärförmåga per skär: $F_{b,Rd} := k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_{u,460} \cdot d_{\text{sprint}} \cdot \frac{t}{\gamma_{M2,s}}$ $F_{b,Rd} = 512.8 \cdot \text{kN}$

Total bärförmåga: $F_{b,Rd,tot} := F_{b,Rd} \cdot n_{\text{skär}}$ $F_{b,Rd,tot} = 1.03 \cdot \text{MN}$

$$\frac{N_{Ed,s}}{F_{b,Rd,tot}} = 0.986$$

Kapaciteten är tillräcklig!

Brottmod 5: Brott i svetsen mellan stag och hängare

Svetsens a-mått: $a_{\text{svets}} := 5\text{mm}$

Antal svetsar: $n_{\text{svets}} := 4$

Svetsens längd: $L_{\text{svets}} := 210\text{mm}$

Skjuvspänning vinkelrätt
svetsen:

$$\tau_{\text{svets.90}} := 0$$

Normalspänning vinkelrätt
svetsen:

$$\sigma_{\text{svets.90}} := \tau_{\text{svets.90}}$$

S9-1

$$\sigma_{\text{svets.90}} = 0$$

Skjuvspänning parallellt
svetsen:

$$\tau_{\text{svets.0}} := \frac{N_{\text{Ed.s}}}{n_{\text{svets}} \cdot a_{\text{svets}} \cdot L_{\text{svets}}}$$

S9-4

$$\tau_{\text{svets.0}} = 240.9 \cdot \text{MPa}$$

Svetsens effektivspänning:

$$\sigma_{\text{ef}} := \sqrt{\sigma_{\text{svets.90}}^2 + 3 \cdot (\tau_{\text{svets.90}}^2 + \tau_{\text{svets.0}}^2)}$$

$$\sigma_{\text{ef}} = 417.3 \cdot \text{MPa}$$

$$\beta_{\text{w}} := 1.0$$

$$\frac{\sigma_{\text{ef}}}{\beta_{\text{w}} \cdot \gamma_{\text{M2.s}} \cdot \frac{f_{\text{u.460}}}{1.0}} = 0.966$$

Kapaciteten är tillräcklig!

$$\frac{\sigma_{\text{svets.90}}}{\left(0.9 \cdot \frac{f_{\text{u.460}}}{\gamma_{\text{M2.s}}}\right)} = 0$$

Dimensionering av infästning mellan båge och stag

Tryck vinkelrätt
fibrektningen:

$$F_{c90d} := N_{Ed,s}$$

$$F_{c90d} = 1.01 \cdot MN$$

Förhöjningsfaktor då
 $l > 400\text{mm}$:

$$k_{c90} := 1.0$$

Maximal tillåten
tryckspänning:

$$\sigma_{c90d} := k_{c90} \cdot f_{c90d,gl}$$

T6-2

$$\sigma_{c90d} = 2.02 \cdot \text{MPa}$$

Given

$$A_{ef} := 1 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{c90d} = \frac{F_{c90d}}{A_{ef}}$$

T6-1

Plattans area:

$$A_{ef} := \text{Find}(A_{ef})$$

$$A_{ef} = 0.502 \text{ m}^2$$

Plattan antas vara kvadratisk.

Effektiv bredd:

$$b_{ef} := \sqrt{A_{ef}}$$

$$b_{ef} = 0.708 \text{ m}$$

Effektiv längd:

$$l_{ef} := b_{ef}$$

$$l_{ef} = 0.708 \text{ m}$$

Längd platta:

$$l_{\text{stålplatta}} := l_{ef} - 60\text{mm} = 0.648 \text{ m}$$

Detta gäller under
förutsättningen att bågen
är minst 60 mm bredare
än plattan.

Vald längd:

$$l_{\text{stålplatta}} := 0.65 \text{ m}$$

Vald bredd:

$$b_{\text{stålplatta}} := l_{\text{stålplatta}} = 0.65 \text{ m}$$

7. Olyckslastfall

Bron skall också hålla för att ett stag går av. Detta görs med att öka cc med en faktor 1,5 och reducera lasten med faktorn 0,7. Lastfall 1 var dimensionerande och därför används det vid olyckslast..

Olyckslastsreduktionstal: $\psi_{1,1} := 0.7$

cc-avstånd: $cc_{ol} := 1.5 \cdot cc_{stag}$ $cc_{ol} = 4.125 \text{ m}$

Partialkoefficienter

$$\gamma_G = 1.35$$

$$\gamma_{Q,ol} := 1.0$$

Karatäristiska egentyngder

Brodäcket:
$$g_{däck,ol} := \gamma_G \left(\begin{array}{l} \gamma_{g1} \cdot t_{platta} \cdot cc_{ol} \dots \\ + \gamma_{slit} \cdot t_{slit} \cdot cc_{ol} \dots \\ + \gamma_{PGJA} \cdot t_{PGJA} \cdot cc_{ol} \end{array} \right) g_{däck,ol} = 11.8 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Dimensionerande trafiklaster

$$q_{1d,ol} := \gamma_{Q,ol} \cdot \psi_{1,1} \cdot \alpha_{q1} \cdot q_{1k} \cdot cc_{ol} \quad q_{1d,ol} = 7.22 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{2d,ol} := \gamma_{Q,ol} \cdot \psi_{1,1} \cdot \alpha_{q2} \cdot q_{2k} \cdot cc_{ol} \quad q_{2d,ol} = 18.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{3d,ol} := \gamma_{Q,ol} \cdot \psi_{1,1} \cdot \alpha_{q3} \cdot q_{3k} \cdot cc_{ol} \quad q_{3d,ol} = 7.22 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{1d,ol} := \gamma_{Q,ol} \cdot \psi_{1,1} \cdot \alpha_{Q1} \cdot Q_{1k} \quad Q_{1d,ol} = 252 \cdot \text{kN}$$

$$Q_{2d,ol} := \gamma_{Q,ol} \cdot \psi_{1,1} \cdot \alpha_{Q2} \cdot Q_{2k} \quad Q_{2d,ol} = 378 \cdot \text{kN}$$

$$Q_{3d,ol} := \gamma_{Q,ol} \cdot \psi_{1,1} \cdot \alpha_{Q3} \cdot Q_{3k} \quad Q_{3d,ol} = 0$$

Dimensionerande egentyngder

Tvärbalkar:	$g_{\text{tbalk.d.ol}} := \gamma_G \cdot \xi \cdot g_{\text{tbalk}}$	$g_{\text{tbalk.d.ol}} = 5.68 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Brodäck:	$g_{\text{däck.d.ol}} := \gamma_G \cdot \xi \cdot g_{\text{däck.ol}}$	$g_{\text{däck.d.ol}} = 14.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Broräcke:	$G_{\text{räcke.d.ol}} := \gamma_G \cdot g_{\text{räcke}} \cdot c_{\text{ol}}$	$G_{\text{räcke.d.ol}} = 2.78 \cdot \text{kN}$

Reaktionskrafter

Momentjämvikt

Given

$$R_{B1.ol} := 1 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 R_{B1.ol} \cdot l_{\text{tbalk}} = & Q_{1d.ol} \cdot l_{Q1Tp} \dots \\
 & + Q_{2d.ol} \cdot l_{Q2Tp} + Q_{3d.ol} \cdot l_{Q3Tp} \dots \\
 & + q_{1d.ol} \cdot b_{q1} \cdot l_{q1Tp} + q_{2d.ol} \cdot b_{q2} \cdot l_{q2Tp} \dots \\
 & + q_{3d.ol} \cdot b_{q3} \cdot l_{q3Tp} + g_{\text{tbalk.d.ol}} \cdot B_t \cdot \frac{l_{\text{tbalk}}}{2} \dots \\
 & + G_{\text{räcke.d.ol}} \cdot (B + a_{\text{stag}} + a_{\text{stag}}) \dots \\
 & + g_{\text{däck.d.ol}} \cdot B \cdot \frac{l_{\text{tbalk}}}{2}
 \end{aligned}$$

$$R_{B1.ol} := \text{Find}(R_{B1.ol}) \quad R_{B1.ol} = 396.1 \cdot \text{kN}$$

Vertikal kraftjämvikt

$$\begin{aligned}
 R_{A1.ol} := & -R_{B1.ol} \dots \\
 & + Q_{1d.ol} + Q_{2d.ol} \dots \\
 & + Q_{3d.ol} + q_{1d.ol} \cdot b_{q1} \dots \\
 & + q_{2d.ol} \cdot b_{q2} + q_{3d.ol} \cdot b_{q3} \dots \\
 & + g_{\text{tbalk.d.ol}} \cdot B_t \dots \\
 & + 2G_{\text{räcke.d.ol}} + g_{\text{däck.d.ol}} \cdot B
 \end{aligned}
 \quad R_{A1.ol} = 494.9 \cdot \text{kN}$$

Snittkrafter

Snitt 1: $0 \text{ m} < x < 0,3 \text{ m}$

$$x_{1.ol} := 0\text{m}, 0,05\text{m}.. a_{\text{stag}}$$

$$M_{1.ol}(x_{1.ol}) := R_{A1.ol} \cdot x_{1.ol} \dots \\ + -G_{\text{r\u00e4cke.d.ol}} \cdot x_{1.ol}$$

$$V_{1.ol}(x_{1.ol}) := \frac{d}{dx_{1.ol}} M_{1.ol}(x_{1.ol})$$

Snitt 2: $0,3 \text{ m} < x < 1,8 \text{ m}$

$$x_{2.ol} := a_{\text{stag}}, a_{\text{stag}} + 0,05\text{m}.. l_{Q1Tp}$$

$$M_{2.ol}(x_{2.ol}) := R_{A1.ol} \cdot x_{2.ol} \dots \\ + -G_{\text{r\u00e4cke.d.ol}} \cdot x_{2.ol} \dots \\ + -g_{\text{tbalk.d.ol}} \cdot \frac{(x_{2.ol} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ + -q_{1d.ol} \cdot \frac{(x_{2.ol} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ + -g_{\text{d\u00e4ck.d.ol}} \cdot \frac{(x_{2.ol} - a_{\text{stag}})^2}{2}$$

$$V_{2.ol}(x_{2.ol}) := \frac{d}{dx_{2.ol}} M_{2.ol}(x_{2.ol})$$

Snitt 3: $1,8 \text{ m} < x < 3,3 \text{ m}$

$$x_{3.ol} := l_{Q1Tp}, l_{Q1Tp} + 0,05\text{m}.. a_{\text{stag}} + b_{q1}$$

$$M_{3.ol}(x_{3.ol}) := R_{A1.ol} \cdot x_{3.ol} \dots \\ + -G_{\text{r\u00e4cke.d.ol}} \cdot x_{3.ol} \dots \\ + -Q_{1d.ol} \cdot (x_{3.ol} - l_{Q1Tp}) \dots \\ + -g_{\text{tbalk.d.ol}} \cdot \frac{(x_{3.ol} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ + -q_{1d.ol} \cdot \frac{(x_{3.ol} - a_{\text{stag}})^2}{2} \dots \\ + -g_{\text{d\u00e4ck.d.ol}} \cdot \frac{(x_{3.ol} - a_{\text{stag}})^2}{2}$$

$$V_{3.ol}(x_{3.ol}) := \frac{d}{dx_{3.ol}} M_{3.ol}(x_{3.ol})$$

Snitt 4: 3,3 m < x < 4,8 m

$$x_{4.ol} := a_{stag} + b_{q1} \cdot a_{stag} + b_{q1} + 0.05m \cdot l_{Q2Tp}$$

$$\begin{aligned} M_{4.ol}(x_{4.ol}) := & R_{A1.ol} \cdot x_{4.ol} - G_{r\ddot{a}cke.d.ol} \cdot x_{4.ol} \dots \\ & + -Q_{1d.ol} \cdot (x_{4.ol} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{tbalk.d.ol} \cdot \frac{(x_{4.ol} - a_{stag})^2}{2} \dots \\ & + -q_{1d.ol} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{4.ol} - \left(a_{stag} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{2d.ol} \cdot \frac{[x_{4.ol} - (a_{stag} + b_{q1})]^2}{2} \dots \\ & + -g_{d\ddot{a}ck.d.ol} \cdot \frac{(x_{4.ol} - a_{stag})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{4.ol}(x_{4.ol}) := \frac{d}{dx_{4.ol}} M_{4.ol}(x_{4.ol})$$

Snitt 5: 4,8 m < x < 6,3 m

$$x_{5.ol} := l_{Q2Tp} \cdot l_{Q2Tp} + 0.05m \cdot a_{stag} + b_{q1} + b_{q2}$$

$$\begin{aligned} M_{5.ol}(x_{5.ol}) := & R_{A1.ol} \cdot x_{5.ol} - G_{r\ddot{a}cke.d.ol} \cdot x_{5.ol} \dots \\ & + -Q_{1d.ol} \cdot (x_{5.ol} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{tbalk.d.ol} \cdot \frac{(x_{5.ol} - a_{stag})^2}{2} \dots \\ & + -q_{1d.ol} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{5.ol} - \left(a_{stag} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{2d.ol} \cdot \frac{[x_{5.ol} - (a_{stag} + b_{q1})]^2}{2} \dots \\ & + -Q_{2d.ol} \cdot (x_{5.ol} - l_{Q2Tp}) \dots \\ & + -g_{d\ddot{a}ck.d.ol} \cdot \frac{(x_{5.ol} - a_{stag})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{5.ol}(x_{5.ol}) := \frac{d}{dx_{5.ol}} M_{5.ol}(x_{5.ol})$$

Snitt 6: 6,3 m < x < 7,3 m

$$x_{6.ol} := a_{stag} + b_{q1} + b_{q2} \cdot a_{stag} + b_{q1} + b_{q2} + 0.05m \cdot l_{Q3Tp}$$

$$\begin{aligned} M_{6.ol}(x_{6.ol}) := & R_{A1.ol} \cdot x_{6.ol} \dots \\ & + -G_{r\ddot{a}cke.d.ol} \cdot x_{6.ol} \dots \\ & + -Q_{1d.ol} \cdot (x_{6.ol} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{tbalk.d.ol} \cdot \frac{(x_{6.ol} - a_{stag})^2}{2} \dots \\ & + -q_{1d.ol} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{6.ol} - \left(a_{stag} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{2d.ol} \cdot b_{q2} \cdot \left[x_{6.ol} - \left(a_{stag} + b_{q1} + \frac{b_{q2}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -Q_{2d.ol} \cdot (x_{6.ol} - l_{Q2Tp}) \dots \\ & + -q_{3d.ol} \cdot \frac{\left[x_{6.ol} - (a_{stag} + b_{q1} + b_{q2}) \right]^2}{2} \dots \\ & + -g_{d\ddot{a}ck.d.ol} \cdot \frac{(x_{6.ol} - a_{stag})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{6.ol}(x_{6.ol}) := \frac{d}{dx_{6.ol}} M_{6.ol}(x_{6.ol})$$

Snitt 7: 7,3 m < x < 8,3 m

$$x_{7.ol} := l_{Q3Tp} \cdot l_{Q3Tp} + 0.05m \cdot a_{stag} + B$$

$$\begin{aligned} M_{7.ol}(x_{7.ol}) := & R_{A1.ol} \cdot x_{7.ol} \dots \\ & + -G_{r\ddot{a}cke.d.ol} \cdot x_{7.ol} \dots \\ & + -Q_{1d.ol} \cdot (x_{7.ol} - l_{Q1Tp}) \dots \\ & + -g_{tbalk.d.ol} \cdot \frac{(x_{7.ol} - a_{stag})^2}{2} \dots \\ & + -q_{1d.ol} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{7.ol} - \left(a_{stag} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -q_{2d.ol} \cdot b_{q2} \cdot \left[x_{7.ol} - \left(a_{stag} + b_{q1} + \frac{b_{q2}}{2} \right) \right] \dots \\ & + -Q_{2d.ol} \cdot (x_{7.ol} - l_{Q2Tp}) \dots \\ & + -q_{3d.ol} \cdot \frac{\left[x_{7.ol} - (a_{stag} + b_{q1} + b_{q2}) \right]^2}{2} \dots \\ & + -Q_{3d.ol} \cdot (x_{7.ol} - l_{Q3Tp}) \dots \\ & + -g_{d\ddot{a}ck.d.ol} \cdot \frac{(x_{7.ol} - a_{stag})^2}{2} \end{aligned}$$

$$V_{7.ol}(x_{7.ol}) := \frac{d}{dx_{7.ol}} M_{7.ol}(x_{7.ol})$$

Snitt 8: 8,3 m < x < 8,6 m

$$x_{8.ol} := a_{stag} + B, a_{stag} + B + 0.05m..l_{tbalk}$$

$$\begin{aligned}
 M_{8.ol}(x_{8.ol}) := & R_{A1.ol} \cdot x_{8.ol} \dots \\
 & + -G_{r\ddot{a}cke.d.ol} \cdot x_{8.ol} \dots \\
 & + -Q_{1d.ol} \cdot (x_{8.ol} - l_{Q1Tp}) \dots \\
 & + -g_{tbalk.d.ol} \cdot \frac{(x_{8.ol} - a_{stag})^2}{2} \dots \\
 & + -q_{1d.ol} \cdot b_{q1} \cdot \left[x_{8.ol} - \left(a_{stag} + \frac{b_{q1}}{2} \right) \right] \dots \\
 & + -q_{2d.ol} \cdot b_{q2} \cdot \left[x_{8.ol} - \left(a_{stag} + b_{q1} + \frac{b_{q2}}{2} \right) \right] \dots \\
 & + -Q_{2d.ol} \cdot (x_{8.ol} - l_{Q2Tp}) \dots \\
 & + -q_{3d.ol} \cdot b_{q3} \cdot \left[x_{8.ol} - \left(a_{stag} + b_{q1} \dots \right) \right] \dots \\
 & \quad \left[+ b_{q2} + \frac{b_{q3}}{2} \right] \\
 & + -Q_{3d.ol} \cdot (x_{8.ol} - l_{Q3Tp}) \dots \\
 & + -g_{d\ddot{a}ck.d.ol} \cdot \frac{(x_{8.ol} - a_{stag})^2}{2}
 \end{aligned}$$

$$V_{8.ol}(x_{8.ol}) := \frac{d}{dx_{8.ol}} M_{8.ol}(x_{8.ol})$$

Maximalt moment

Snitt 1

$$x_{\max} := 0\text{m}$$

Given

$$0\text{m} < x_{\max} < a_{\text{stag}}$$

$$x_{\max.m.1.ol} := \text{Maximize}(M_{1.ol}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.1.ol} = 0.3\text{ m}$$

$$M_{\max.1.ol} := M_{1.ol}(x_{\max.m.1.ol}) \quad M_{\max.1.ol} = 147.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Snitt 2

Given

$$a_{\text{stag}} < x_{\max} < l_{Q1Tp}$$

$$x_{\max.m.2.ol} := \text{Maximize}(M_{2.ol}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.2.ol} = 1.8\text{ m}$$

$$M_{\max.2.ol} := M_{2.ol}(x_{\max.m.2.ol}) \quad M_{\max.2.ol} = 855.3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Snitt 3

Given

$$l_{Q1Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + b_{q1}$$

$$x_{\max.m.3.ol} := \text{Maximize}(M_{3.ol}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.3.ol} = 3.3\text{ m}$$

$$M_{\max.3.ol} := M_{3.ol}(x_{\max.m.3.ol}) \quad M_{\max.3.ol} = 1.12 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 4

Given

$$a_{\text{stag}} + b_{q1} < x_{\max} < l_{Q2Tp}$$

$$x_{\max.m.4.ol} := \text{Maximize}(M_{4.ol}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.4.ol} = 4.8\text{ m}$$

$$M_{\max.4.ol} := M_{4.ol}(x_{\max.m.4.ol}) \quad M_{\max.4.ol} = 1.32 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 5

Given

$$l_{Q2Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2}$$

$$x_{\max.m.5.ol} := \text{Maximize}(M_{5.ol}, x_{\max}) \quad x_{\max.m.5.ol} = 4.8\text{ m}$$

$$M_{\max.5.ol} := M_{5.ol}(x_{\max.m.5.ol}) \quad M_{\max.5.ol} = 1.32 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Snitt 6

Given

$$a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2} < x_{\text{max}} < l_{Q3Tp}$$

$$x_{\text{max.m.6.ol}} := \text{Maximize}(M_{6.ol}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.m.6.ol}} = 6.3 \text{ m}$$

$$M_{\text{max.6.ol}} := M_{6.ol}(x_{\text{max.m.6.ol}}) \quad M_{\text{max.6.ol}} = 862.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Snitt 7

Given

$$l_{Q3Tp} < x_{\text{max}} < a_{\text{stag}} + B$$

$$x_{\text{max.m.7.ol}} := \text{Maximize}(M_{7.ol}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.m.7.ol}} = 7.3 \text{ m}$$

$$M_{\text{max.7.ol}} := M_{7.ol}(x_{\text{max.m.7.ol}}) \quad M_{\text{max.7.ol}} = 515.3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Snitt 8

Given

$$a_{\text{stag}} + B < x_{\text{max}} < l_{\text{tbalk}}$$

$$x_{\text{max.m.8.ol}} := \text{Maximize}(M_{8.ol}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.m.8.ol}} = 8.3 \text{ m}$$

$$M_{\text{max.8.ol}} := M_{8.ol}(x_{\text{max.m.8.ol}}) \quad M_{\text{max.8.ol}} = 141.4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{max.ol.1}} := \max(M_{\text{max.1.ol}}, M_{\text{max.2.ol}}, M_{\text{max.3.ol}}, M_{\text{max.4.ol}}, M_{\text{max.5.ol}})$$

$$M_{\text{max.ol.2}} := \max(M_{\text{max.6.ol}}, M_{\text{max.7.ol}}, M_{\text{max.8.ol}})$$

Maximalt moment
i tvärbalkarna:

$$M_{\text{max.ol}} := \max(M_{\text{max.ol.1}}, M_{\text{max.ol.2}}) \quad M_{\text{max.ol}} = 1.32 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{max.ol}} < M_{\text{max.t}} = 1$$

Olycksfallet blir inte
dimensionerande!

Maximalt tvärkraft

Snitt 1

$$x_{\max} := 0\text{m}$$

Given

$$0\text{m} < x_{\max} < a_{\text{stag}}$$

$$x_{\max.v.1.ol} := \text{Maximize}(V_{1.ol}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.1.ol} = 0\text{ m}$$

$$V_{\max.1.ol} := V_{1.ol}(x_{\max.v.1.ol}) \quad V_{\max.1.ol} = 492.1 \cdot \text{kN}$$

Snitt 2

Given

$$a_{\text{stag}} < x_{\max} < l_{Q1Tp}$$

$$x_{\max.v.2.ol} := \text{Maximize}(V_{2.ol}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.2.ol} = 0.3\text{ m}$$

$$V_{\max.2.ol} := V_{2.ol}(x_{\max.v.2.ol}) \quad V_{\max.2.ol} = 492.1 \cdot \text{kN}$$

Snitt 3

Given

$$l_{Q1Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + b_{q1}$$

$$x_{\max.v.3.ol} := \text{Maximize}(V_{3.ol}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.3.ol} = 1.8\text{ m}$$

$$V_{\max.3.ol} := V_{3.ol}(x_{\max.v.3.ol}) \quad V_{\max.3.ol} = 199.4 \cdot \text{kN}$$

Snitt 4

Given

$$a_{\text{stag}} + b_{q1} < x_{\max} < l_{Q2Tp}$$

$$x_{\max.v.4.ol} := \text{Maximize}(V_{4.ol}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.4.ol} = 3.3\text{ m}$$

$$V_{\max.4.ol} := V_{4.ol}(x_{\max.v.4.ol}) \quad V_{\max.4.ol} = 158.8 \cdot \text{kN}$$

Snitt 5

Given

$$l_{Q2Tp} < x_{\max} < a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2}$$

$$x_{\max.v.5.ol} := \text{Minimize}(V_{5.ol}, x_{\max}) \quad x_{\max.v.5.ol} = 6.3\text{ m}$$

$$V_{\max.5.ol} := |V_{5.ol}(x_{\max.v.5.ol})| \quad V_{\max.5.ol} = 333.3 \cdot \text{kN}$$

Snitt 6

Given

$$a_{\text{stag}} + b_{q1} + b_{q2} < x_{\text{max}} < l_{Q3Tp}$$

$$x_{\text{max.v.6.ol}} := \text{Minimize}(V_{6.ol}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.v.6.ol}} = 7.3 \text{ m}$$

$$V_{\text{max.6.ol}} := |V_{6.ol}(x_{\text{max.v.6.ol}})| \quad V_{\text{max.6.ol}} = 360.4 \cdot \text{kN}$$

Snitt 7

Given

$$l_{Q3Tp} < x_{\text{max}} < a_{\text{stag}} + B$$

$$x_{\text{max.v.7.ol}} := \text{Minimize}(V_{7.ol}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.v.7.ol}} = 8.3 \text{ m}$$

$$V_{\text{max.7.ol}} := |V_{7.ol}(x_{\text{max.v.7.ol}})| \quad V_{\text{max.7.ol}} = 387.5 \cdot \text{kN}$$

Snitt 8

Given

$$a_{\text{stag}} + B < x_{\text{max}} < l_{\text{tbalk}}$$

$$x_{\text{max.v.8.ol}} := \text{Minimize}(V_{8.ol}, x_{\text{max}}) \quad x_{\text{max.v.8.ol}} = 8.6 \text{ m}$$

$$V_{\text{max.8.ol}} := |V_{8.ol}(x_{\text{max.v.8.ol}})| \quad V_{\text{max.8.ol}} = 393.4 \cdot \text{kN}$$

$$V_{\text{max.ol.1}} := \max(V_{\text{max.1.ol}}, V_{\text{max.2.ol}}, V_{\text{max.3.ol}}, V_{\text{max.4.ol}}, V_{\text{max.5.ol}})$$

$$V_{\text{max.ol.2}} := \max(V_{\text{max.6.ol}}, V_{\text{max.7.ol}}, V_{\text{max.8.ol}})$$

Maximal tvärkraft
i tvärbalkarna:

$$V_{\text{max.ol}} := \max(V_{\text{max.ol.1}}, V_{\text{max.ol.2}}) \quad V_{\text{max.ol}} = 492.1 \cdot \text{kN}$$

$$V_{\text{max.ol}} < V_{\text{max.t}} = 1$$

Olycksfallet blir inte
dimensionerande!

Olycksfall för plattan

Maxmoment för olycksfalet beräknas i Matlab.

$$V_{\text{max.ol.platta}} := 123.04\text{kN}$$

$$M_{\text{max.ol.platta}} := 228.71\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$V_{\text{max.ol.platta}} < V_{\text{max.p}} = 1$$

$$M_{\text{max.ol.platta}} < M_{\text{max.p}} = 1$$

Olycksfallet blir inte dimensionerande!

8. Dimensionering av båge och avstyvningsbalk

Största delen av ekvationerna som används är hämtade från *Bågkonstruktioner* (Lorentsen, 1998) . När hänvisning till ekvation, figur eller kapiter sker i bågdimensioneringsavsnittet syftar den till denna bok om inget annat anges. Beräkningsgången följer mestadels *Stål- och samverkansbroar* (Malm, 2005) som hänvisar till *Bågkonstruktioner*.

Dimensioner

Pilhöjd: $f = 12.22\text{m}$

Längd i horisontalld: $L = 55\text{ m}$

Antal stag: $n_{\text{stag}} = 19$

Båge

Höjd: $h_{b\grave{a}} := 1.440\text{m}$

Bredd: $b_{b\grave{a}} := 0.645\text{m}$

Tvårsnittsarea: $A_{b\grave{a}} := h_{b\grave{a}} \cdot b_{b\grave{a}}$ $A_{b\grave{a}} = 0.929\text{m}^2$

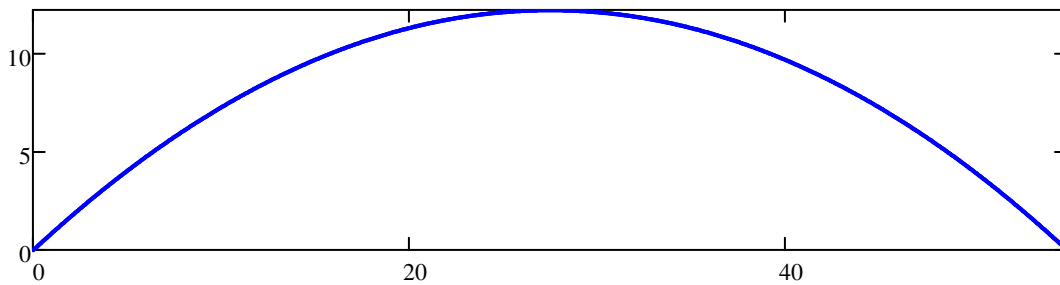
Tröghetsmoment: $I_{b\grave{a}} := \frac{b_{b\grave{a}} \cdot h_{b\grave{a}}^3}{12}$ $I_{b\grave{a}} = 0.16\text{ m}^4$

Böjstyvhet: $D_{b\grave{a}} := I_{b\grave{a}} \cdot E_{0.05.gI}$ $D_{b\grave{a}} = 1909.9 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}^2$

En tvåledsbåge väljs där trycklinjen är parabolisk och har konstant tyngd per längdenhet, dvs bå garean $b \cdot h = b \cdot h \cdot \cos(\theta)$, där b och h är bredd respektive höjd i hjässan.

Bågen antas parabelformad med kurvan:

$$y(x) := -4 \frac{f \cdot x^2}{L^2} + 4 \frac{f \cdot x}{L}$$



Figur 15. Bågens form.

Lutningen i godtycklig punkt: $y_{\text{prim}}(x) := -8 \frac{f \cdot x}{L^2} + 4 \frac{f}{L}$

Bågvinkel: $\theta(x) := \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{1 + y_{\text{prim}}(x)^2}}\right)$

Båglängd: $L_{\text{båge}} := \left(\int_0^L \sqrt{1 + y_{\text{prim}}(x)^2} dx \right) = 61.56 \text{ m}$

Dimensionerande laster

Bågens egentyngd

$$\gamma_G = 1.35$$

$$\xi = 0.89$$

Egentyngd: $g_{b\grave{a}} := \gamma_G \cdot \xi \cdot A_{b\grave{a}} \cdot \gamma_{gl}$ $g_{b\grave{a}} = 4.46 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Filfaktor för axellast

För kunna räkna på den mest utsatta bågen måste filfaktorer tas fram så att det går att beräkna hur stor del av lasterna den mest utsatta bågen tar upp.

Momentjämvikt

Given

$$R_{PB2} := 1 \text{ kN}$$

$$R_{PB2} \cdot l_{tbalk} = Q_{2d} \cdot l_{Q1Tp} + Q_{1d} \cdot l_{Q2Tp} \dots \\ + Q_{3d} \cdot l_{Q3Tp}$$

$$R_{PB2} := \text{Find}(R_{PB2}) \quad R_{PB2} = 470.9 \cdot \text{kN}$$

Vertikal kraftjämvikt

$$R_{PA2} := -R_{PB2} + Q_{1d} \dots \quad R_{PA2} = 879.1 \cdot \text{kN} \\ + Q_{2d} + Q_{3d}$$

Filfaktor:

$$\xi_P := \frac{R_{PA2}}{R_{PA2} + R_{PB2}} = 0.651$$

Axellast som verkar på
den mest utsatta bågen:

$$P := (Q_{1d} + Q_{2d} + Q_{3d}) \cdot \xi_P \quad P = 879.1 \cdot \text{kN}$$

Filfaktor för utbredd last

Momentjämvikt

Given

$$R_{pB2} := 1 \text{ kN}$$

$$R_{pB2} \cdot l_{tbalk} = q_{2d} \cdot b_{q1} \cdot l_{q1Tp} + q_{1d} \cdot b_{q2} \cdot l_{q2Tp} \dots \\ + q_{3d} \cdot b_{q3} \cdot l_{q3Tp}$$

$$R_{pB2} := \text{Find}(R_{pB2}) \quad R_{pB2} = 51.09 \cdot \text{kN}$$

Vertikal kraftjämvikt

$$R_{pA2} := \left(\begin{array}{l} q_{1d} \cdot b_{q1} \dots \\ + q_{2d} \cdot b_{q2} + q_{3d} \cdot b_{q3} \end{array} \right) \quad R_{pA2} = 129.5 \cdot \text{kN}$$

$$\xi_{\text{utbredd}} := \frac{R_{pA2}}{R_{pA2} + R_{pB2}} = 0.717$$

$$q_{p1d} := \gamma_Q \cdot \alpha_{q1} \cdot q_{1k} \cdot b_{q1} \quad q_{p1d} = 11.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{p2d} := \gamma_Q \cdot \alpha_{q2} \cdot q_{2k} \cdot b_{q2} \quad q_{p2d} = 28.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

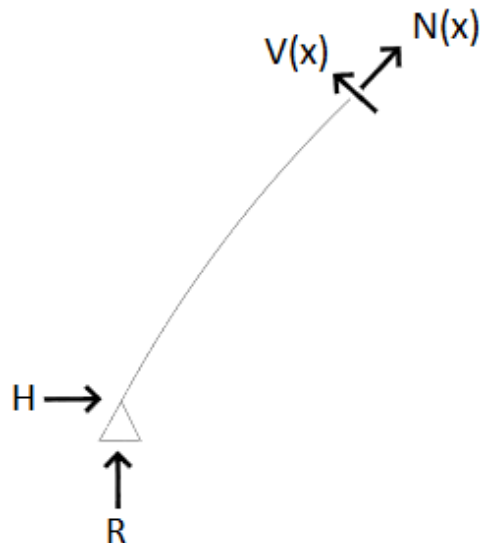
$$q_{p3d} := \gamma_Q \cdot \alpha_{q3} \cdot q_{3k} \cdot b_{q3} \quad q_{p3d} = 7.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Utbredd last som verkar på
den mest utsatta bågen:

$$p := (q_{p1d} + q_{p2d} + q_{p3d}) \cdot \xi_{\text{utbredd}} \quad p = 33.8 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Snittkrafter

Moment, normalkraft, horisontella och vertikala stödreaktioner beräknas med hjälp av influenslinjer så att förflyttning av punktlast enkelt kan ske. Momentet kommer undersökas i $L/4$ och $L/5$, med punktlasten i samma punkt, då dessa anses kritiska (Lorentsen, 1998). Tvärkraften kommer vara störst i $0L$ med punktlasten i $0L$ och största normalkraften kommer vara i mellan $0L$ och $L/2$ med punktlasten i $L/2$. Detta inses genom att studera influenslinjerna för dessa punkter.



Figur 16. Snittkrafter i bågen

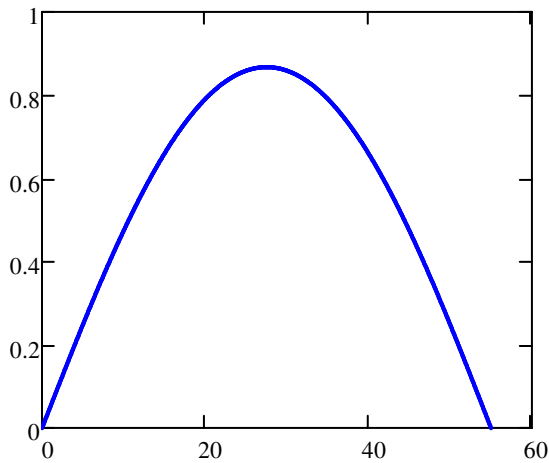
Influenslinjer

Horisontalkraft

$$x := 0\text{m}, 0.05\text{m}.. L$$

Ekvation 5-46:

$$iH(x) := \frac{5 \cdot L}{8 \cdot f} \cdot \frac{\frac{x}{L} - 2 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^3 + \left(\frac{x}{L}\right)^4}{1 + \frac{15 \cdot D_{b\ddot{a}}}{8 \cdot f^2} \cdot \left(\frac{1}{E_{0.05} \cdot gI \cdot A_{b\ddot{a}}} + \frac{1}{E_{0.05} \cdot gI \cdot A_{fbalk}} \right)}$$



Figur 17. Influenslinje för horisontalkraft.

Moment

$$M_x = M_{0x} - H \cdot y \quad 5-10$$

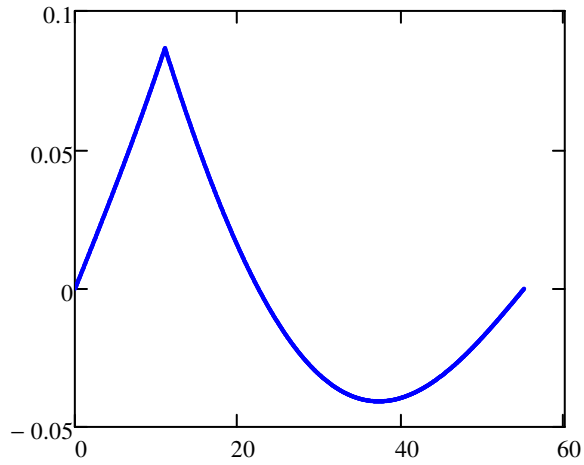
Där M_{0x} är momentet för en fritt upplagd balk

$$x := 0\text{m}, 0.05\text{m}.. L$$
$$d := 0\text{m}, 0.05\text{m}.. L$$

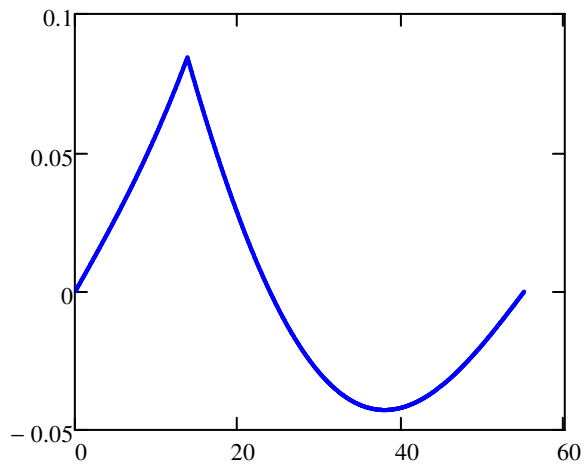
$$M_{0x}(x, d) := \begin{cases} \frac{(L-d)}{L} \cdot \frac{x}{L} & \text{if } 0 \leq \frac{x}{L} \leq \frac{d}{L} \\ \frac{d}{L} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) & \text{if } \frac{d}{L} \leq \frac{x}{L} \leq 1 \end{cases}$$

Influenslinje:

$$M_x(x, d) := M_{0x}(x, d) - iH(x) \cdot \frac{y(d)}{L}$$



Figur 18. Influenslinje för momentet i femtedelspunkten.



Figur 19. Influenslinje för momentet i fjärdedelspunkten.

Normalkraft

$$N_x = N_{0x} - H \cdot \cos(\theta) \quad 5-11$$

$$x_1 := 0\text{m}, 0.05\text{m}.. \frac{L}{2}$$

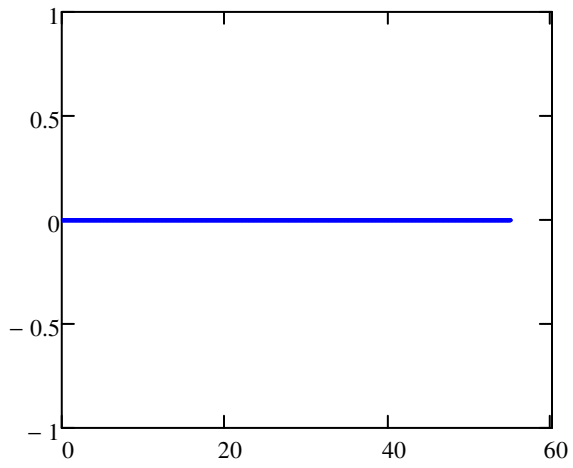
$$x_2 := \frac{L}{2}, \frac{L}{2} + 0.05\text{m}.. L$$

$$d := 0\text{m}, 0.05\text{m}.. L$$

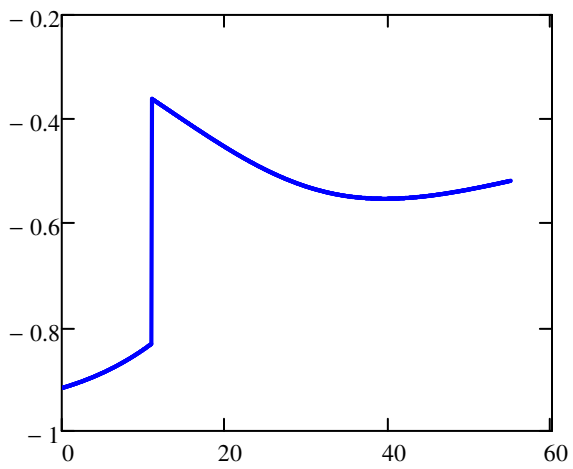
Influenslinje:

$$N_{xv}(x_1, d) := \begin{cases} -\sin(\theta(x_1)) \cdot \left(\frac{L-d}{L}\right) \dots & \text{if } 0 \leq \frac{x_1}{L} \leq \frac{d}{L} \\ + -iH(d) \cdot \cos(\theta(x_1)) \\ \sin(\theta(x_1)) \cdot \left(\frac{d}{L}\right) \dots & \text{if } \frac{d}{L} \leq \frac{x_1}{L} \leq \frac{1}{2} \\ + -iH(d) \cdot \cos(\theta(x_1)) \end{cases}$$

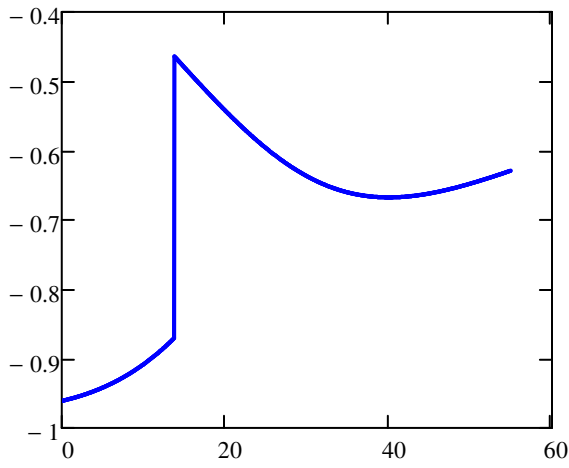
$$N_{xh}(x_2, d) := \begin{cases} \sin(\theta(x_2)) \cdot \left(\frac{L-d}{L}\right) \dots & \text{if } \frac{1}{2} \leq \frac{x_2}{L} \leq \frac{d}{L} \\ + -iH(d) \cdot \cos(\theta(x_2)) \\ -\sin(\theta(x_2)) \cdot \left(\frac{d}{L}\right) \dots & \text{if } \frac{d}{L} \leq \frac{x_2}{L} \leq 1 \\ + -iH(d) \cdot \cos(\theta(x_2)) \end{cases}$$



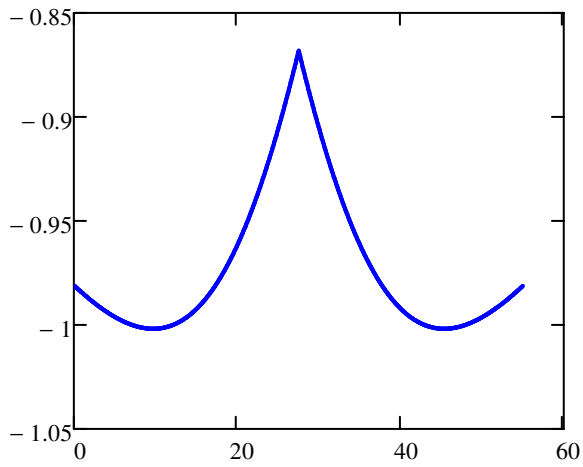
Figur 20. Influenslinje för normalkraften i nollpunkten.



Figur 21. Influenslinje för normalkraften i femtedelspunkten.



Figur 22. Influenslinje för normalkraften i fjärdedelspunkten.



Figur 23. Influenslinje för normalkraften i mittpunkten.

Tvärkraft

$$\text{För } x < L/2: \quad V_x = V_{0x} + H \cdot \sin(\theta)$$

$$\text{För } x > L/2: \quad V_x = V_{0x} - H \cdot \sin(\theta)$$

Där V_{0x} är momentet för en fritt upplagd balk

$$x_1 := 0\text{m}, 0.05\text{m}.. \frac{L}{2}$$

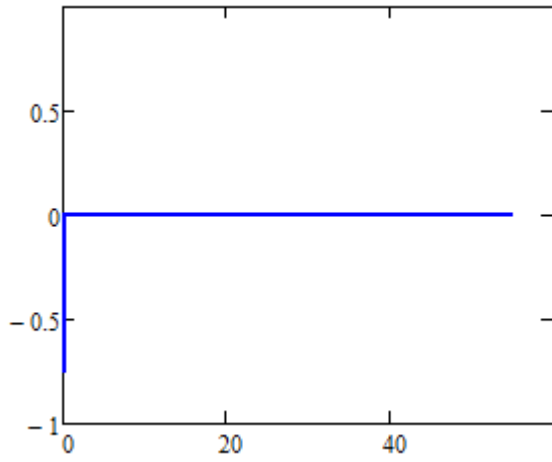
$$x_2 := \frac{L}{2}, \frac{L}{2} + 0.05\text{m}.. L$$

$$d := 0\text{m}, 0.05\text{m}.. L$$

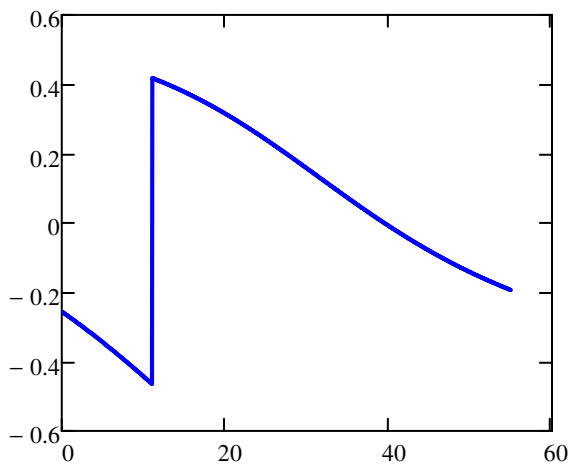
Influenslinje:

$$V_{xv}(x_1, d) := \begin{cases} iH(d) \cdot \sin(\theta(x_1)) \dots & \text{if } 0 \leq \frac{x_1}{L} \leq \frac{d}{L} \\ + \left(\frac{L-d}{L} \right) \cdot \cos(\theta(x_1)) & \\ \\ iH(d) \cdot \sin(\theta(x_1)) \dots & \text{if } \frac{d}{L} < \frac{x_1}{L} \leq \frac{1}{2} \\ + \frac{d}{L} \cdot \cos(\theta(x_1)) & \end{cases}$$

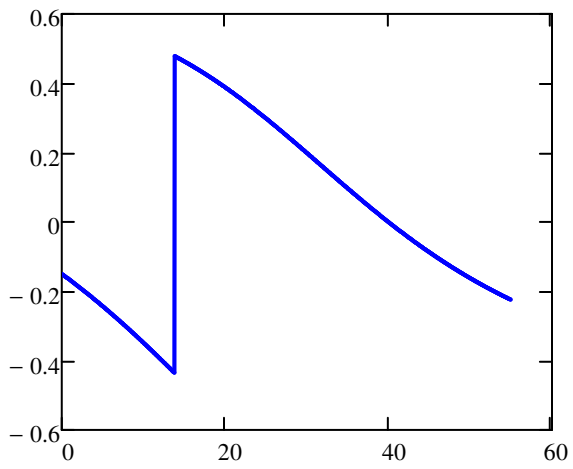
$$V_{xh}(x_2, d) := \begin{cases} -iH(d) \cdot \sin(\theta(x_2)) \dots & \text{if } \frac{1}{2} \leq \frac{x_2}{L} \leq \frac{d}{L} \\ + \left(\frac{L-d}{L} \right) \cdot \cos(\theta(x_2)) & \\ \\ -iH(d) \cdot \sin(\theta(x_2)) \dots & \text{if } \frac{d}{L} < \frac{x_2}{L} \leq 1 \\ + \frac{d}{L} \cdot \cos(\theta(x_2)) & \end{cases}$$



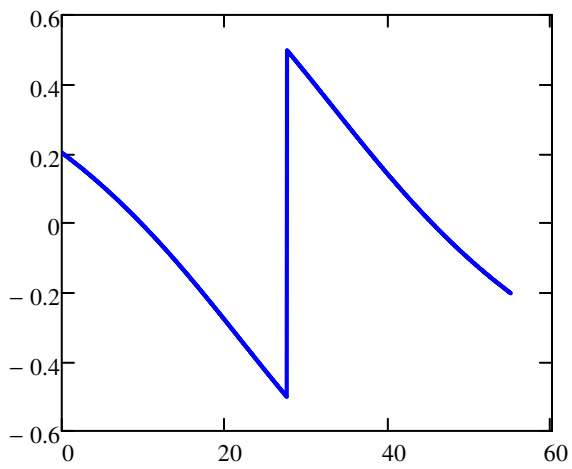
Figur 24. Influenslinje för tvärkraften i nollpunkten.



Figur 25. Influenslinje för tvärkraften i femtedelspunkten.



Figur 26. Influenslinje för tvärkraften i fjärdedelspunkten.



Figur 27. Influenslinje för tvärkraften i mittpunkten.

Moment och krafter av egentygnd

Brodäckets, tvärbalkarna och stagens egentygnd ses som punktlaster från stagen och läggs ihop med bågens egentygnd. Ekvationerna är hämtade från *Stål- och samverkansbroar*.

Medellängd stag:
$$h_{\text{stag.m}} := \sum_{n=1}^{n_{\text{stag}}} \frac{y(\text{cc}_{\text{stag}} \cdot n)}{n_{\text{stag}}} = 8.556 \text{ m}$$

Medelegentygnd stag:
$$G_{\text{medel}} := \gamma_{\text{stål}} \cdot \left[(r_{\text{stag}})^2 \cdot \pi \cdot h_{\text{stag.m}} \right] \quad G_{\text{medel}} = 1.99 \cdot \text{kN}$$

Total reaktionskraft från stagen:
$$R_{\text{et}} := g_{\text{däck.d}} \cdot \frac{(B + 2 \cdot a_{\text{säk}})}{2} \dots \quad R_{\text{et}} = 86 \cdot \text{kN}$$

$$+ G_{\text{medel}} + g_{\text{tbalk.d}} \cdot B_{\text{t}} \dots$$

$$+ G_{\text{fbalk.d}} + G_{\text{række.d}}$$

Moment av egentygnd:
$$M_{\text{bå.e}}(d) := \left(\sum_{n=1}^{n_{\text{stag}}} M_{\text{x}}(n \cdot \text{cc}_{\text{stag}}, d) \right) \cdot R_{\text{et}} \cdot L \dots$$

$$+ g_{\text{bå}} \cdot \left(\int_0^L M_{\text{x}}(x, d) \, dx \right) \cdot L$$

Normalkraft av egentygnd:
$$N_{\text{bå.e}}(d) := \left(\sum_{n=1}^{10} N_{\text{xv}}(n \cdot \text{cc}_{\text{stag}}, d) \right) \cdot R_{\text{et}} \dots \quad \text{if } 0 \leq d \leq \frac{L}{2}$$

$$+ g_{\text{bå}} \cdot \left(\int_0^{\frac{L}{2}} N_{\text{xv}}(x, d) \, dx \right)$$

$$\left(\sum_{n=10}^{19} N_{\text{xh}}(n \cdot \text{cc}_{\text{stag}}, d) \right) \cdot R_{\text{et}} \dots \quad \text{if } \frac{L}{2} < d \leq L$$

$$+ g_{\text{bå}} \cdot \left(\int_{\frac{L}{2}}^L N_{\text{xh}}(x, d) \, dx \right)$$

Tvärkraft av egentygnd:
$$V_{b\grave{a}.e}(d) := \left\{ \begin{array}{l} \left(\sum_{n=1}^{10} V_{xv}(n \cdot cc_{stag}, d) \right) \cdot R_{et} \dots \quad \text{if } 0 \leq d \leq \frac{L}{2} \\ + g_{b\grave{a}} \cdot \left(\int_0^{\frac{L}{2}} V_{xv}(x, d) dx \right) \\ \left(\sum_{n=11}^{19} V_{xh}(n \cdot cc_{stag}, d) \right) \cdot R_{et} \dots \quad \text{if } \frac{L}{2} < d \leq L \\ + g_{b\grave{a}} \cdot \left(\int_{\frac{L}{2}}^L V_{xh}(x, d) dx \right) \end{array} \right.$$

Horisontalkraft av egentygnd:
$$H_{b\grave{a}.e} := \left[\sum_{n=1}^{n_{stag}} (iH(n \cdot cc_{stag})) \right] \cdot R_{et} \dots \quad H_{b\grave{a}.e} = 1.09 \cdot MN$$

$$+ g_{b\grave{a}} \cdot \int_0^L iH(x) dx$$

Moment och krafter av trafiklast

Moment

Utbredd trafiklast:
$$M_{b\grave{a}.tr.p}(d) := p \cdot \left(\int_0^L M_x(x, d) dx \right) \cdot L$$

Axellast:
$$M_{b\grave{a}.tr.P}(d) := P \cdot L \cdot (M_x(x, d))$$

Totalt moment av trafiklast:
$$M_{b\grave{a}.tr}(d) := M_{b\grave{a}.tr.p}(d) + M_{b\grave{a}.tr.P}(d)$$

Normalkraft

Utbredd trafiklast:
$$N_{b\grave{a}.tr.p.v}(d) := p \cdot \left(\int_0^{\frac{L}{2}} N_{xv}(x_1, d) dx_1 \right)$$

$$N_{b\grave{a}.tr.p.h}(d) := p \cdot \left(\int_{\frac{L}{2}}^L N_{xh}(x_2, d) dx_2 \right)$$

Axellast: $N_{b\grave{a}.tr.P.v}(d) := P \cdot (N_{xv}(x_1, d))$

$$N_{b\grave{a}.tr.P.h}(d) := P \cdot (N_{xh}(x_2, d))$$

Total normalkraft av trafiklast:

$$N_{b\grave{a}.tr.v}(d) := N_{b\grave{a}.tr.p.v}(d) + N_{b\grave{a}.tr.P.v}(d)$$

Tv\vrkraft

Utbredd trafiklast:

$$V_{b\grave{a}.tr.p.v}(d) := P \cdot \left(\int_0^{\frac{L}{2}} V_{xv}(x_1, d) dx_1 \right)$$

$$V_{b\grave{a}.tr.p.h}(d) := P \cdot \left(\int_{\frac{L}{2}}^L V_{xh}(x_2, d) dx_2 \right)$$

Axellast: $V_{b\grave{a}.tr.P.v}(d) := P \cdot (V_{xv}(x_1, d))$

$$V_{b\grave{a}.tr.P.h}(d) := P \cdot (V_{xh}(x_2, d))$$

Total tv\vrkraft av trafiklast: $V_{b\grave{a}.tr.v}(d) := V_{b\grave{a}.tr.p.v}(d) + V_{b\grave{a}.tr.P.v}(d)$

Horisontalkraft

Utbredd trafiklast:

$$H_{b\grave{a}.tr.p}(x) := P \cdot \int_0^L iH(x) dx$$

Axellast: $H_{b\grave{a}.tr.P}(x) := P \cdot iH(x)$

Total horisontalkraft av trafiklast: $H_{b\grave{a}.tr}(x) := H_{b\grave{a}.tr.p}(x) + H_{b\grave{a}.tr.P}(x)$

Moment i femtedelspunkten

Snitt som studeras: $a := \frac{L}{5}$

Av egentyngd

$$M_{b\grave{a}.e.0.2L} := M_{b\grave{a}.e}(a) \quad M_{b\grave{a}.e.0.2L} = 123.1 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

Av trafiklast

$$M_{b\grave{a}.tr.P.0.2L}(d) := P \cdot L \cdot (M_x(a, d))$$

$$M_{b\grave{a}.tr.0.2L}(d) := M_{b\grave{a}.tr.p}(d) \dots \\ + M_{b\grave{a}.tr.P.0.2L}(d)$$

$$M_{b\grave{a}.tr.0.2L} := M_{b\grave{a}.tr.0.2L}(a) \quad M_{b\grave{a}.tr.0.2L} = 4.29 \cdot \text{MN}\cdot\text{m}$$

Totalt moment: $M_{b\grave{a}.0.2L} := M_{b\grave{a}.tr.0.2L} + M_{b\grave{a}.e.0.2L} \quad M_{b\grave{a}.0.2L} = 4.42 \cdot \text{MN}\cdot\text{m}$

Moment i fjärdedelspunkten

Snitt som studeras: $a := \frac{L}{4}$

Av egentyngd

$$M_{b\grave{a}.e.0.25L} := M_{b\grave{a}.e}(a) \quad M_{b\grave{a}.e.0.25L} = 144.2 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

Av trafiklast

$$M_{b\grave{a}.tr.P.0.25L}(d) := P \cdot L \cdot (M_x(a, d))$$

$$M_{b\grave{a}.tr.0.25L}(d) := M_{b\grave{a}.tr.p}(d) \dots \\ + M_{b\grave{a}.tr.P.0.25L}(d)$$

$$M_{b\grave{a}.tr.0.25L} := M_{b\grave{a}.tr.0.25L}(a) \quad M_{b\grave{a}.tr.0.25L} = 4.2 \cdot \text{MN}\cdot\text{m}$$

Totalt moment: $M_{b\grave{a}.0.25L} := M_{b\grave{a}.tr.0.25L} \dots \\ + M_{b\grave{a}.e.0.25L} \quad M_{b\grave{a}.0.25L} = 4.35 \cdot \text{MN}\cdot\text{m}$

Tvärkraft i nollpunkten

Snitt som studeras: $a := 0\text{m}$

Punktlastens placering: $b := 0\text{m}$

Av egentyngd

$$V_{b\hat{a}.e.0L} := V_{b\hat{a}.e}(b) \qquad V_{b\hat{a}.e.0L} = 0 \cdot \text{kN}$$

Av trafiklast

$$V_{b\hat{a}.tr.P.v.0L}(d) := P \cdot (V_{XV}(a, d))$$

$$V_{b\hat{a}.tr.v.0L}(d) := V_{b\hat{a}.tr.p.v}(d) \dots \\ + V_{b\hat{a}.tr.P.v.0L}(d)$$

$$V_{b\hat{a}.tr.v.0L} := V_{b\hat{a}.tr.v.0L}(b) \qquad V_{b\hat{a}.tr.v.0L} = -657 \cdot \text{kN}$$

Total tvärkraft: $V_{b\hat{a}.0L} := V_{b\hat{a}.tr.v.0L} + V_{b\hat{a}.e.0L} \qquad V_{b\hat{a}.0L} = -657 \cdot \text{kN}$

Normalkraft

Snitt som studeras: $a := 10\text{m}$

Punktlastens placering: $b := \frac{L}{2}$

Av egentyngd

$$N_{b\hat{a}.e.0L} := N_{b\hat{a}.e}(b) \qquad N_{b\hat{a}.e.0L} = -950.2 \cdot \text{kN}$$

Av trafiklast

$$N_{b\hat{a}.tr.P.v.0L}(d) := P \cdot (N_{XV}(a, d))$$

$$N_{b\hat{a}.tr.v.0L}(d) := N_{b\hat{a}.tr.p.v}(d) \dots \\ + N_{b\hat{a}.tr.P.v.0L}(d)$$

$$N_{b\hat{a}.tr.v.0L} := N_{b\hat{a}.tr.v.0L}(b) \qquad N_{b\hat{a}.tr.v.0L} = -1.78 \cdot \text{MN}$$

Total normalkraft: $N_{b\hat{a}.0L} := N_{b\hat{a}.tr.v.0L} + N_{b\hat{a}.e.0L} \qquad N_{b\hat{a}.0L} = -2.73 \cdot \text{MN}$

Horisontalkraft med punktlast i mitten

Snitt som studeras: $a := 0\text{m}$

Punktlastens placering: $b := \frac{L}{2}$

$$H_{b\grave{a}.0.5L} := H_{b\grave{a}.e} + H_{b\grave{a}.tr}(b) \quad H_{b\grave{a}.0.5L} = 2.89 \cdot \text{MN}$$

Dimensionerande snittkrafter och moment:

Då normalkraften i CALFEM-modellen (se bilaga 5: CALFEM-beräkningar) är större än de som beräknats med influenslinjen kommer denna att vara dimensionerande.

Moment:

$$M_{\text{Ed}.b\grave{a}} := \max(M_{b\grave{a}.0.2L}, M_{b\grave{a}.0.25L}) \quad M_{\text{Ed}.b\grave{a}} = 4.416 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Tvärkraft:

$$V_{\text{Ed}.b\grave{a}} := |V_{b\grave{a}.0L}| \quad V_{\text{Ed}.b\grave{a}} = 657 \cdot \text{kN}$$

Normalkraft:

$$N_{\text{Ed}.b\grave{a}} := 3.333 \text{MN} \quad N_{\text{Ed}.b\grave{a}} = 3.333 \cdot \text{MN}$$

Horisontalkraft:

$$H_{\text{Ed}.b\grave{a}} := H_{b\grave{a}.0.5L} \quad H_{\text{Ed}.b\grave{a}} = 2.885 \cdot \text{MN}$$

Förstyvningsbalkens dragkraftskapacitet

$$k_{h,gl} := 1.1$$

Dimensionerande draghållfasthet: $f_{t0d,gl} := k_{mod} \cdot k_{h,gl} \cdot \frac{f_{t0k,gl}}{\gamma_{M,gl}}$ T2-12

Dimensionerande dragkraftskapacitet: $H_{Rd.fbalk} := f_{t0d,gl} \cdot A_{fbalk}$ $H_{Rd.fbalk} = 3.099 \cdot MN$

Utnyttjandegrad: $\frac{H_{Ed.bå}}{H_{Rd.fbalk}} = 0.931$ Kapaciteten är tillräcklig!

Bågens momentkapacitet

$$k_{h,gl} := 1$$

Dimensionerande böjhållfasthet: $f_{md,gl} := k_{mod} \cdot k_{h,gl} \cdot \frac{f_{mk,gl}}{\gamma_{M,gl}}$ $f_{md,gl} = 20.2 \cdot MPa$

Dimensionerande momentkapacitet: $M_{Rd.bå} := \frac{(b_{bå} \cdot h_{bå}^2 \cdot f_{md,gl})}{6}$ T3-18
 $M_{Rd.bå} = 4.49 \cdot MN \cdot m$

Utnyttjandegrad: $\frac{M_{Ed.bå}}{M_{Rd.bå}} = 0.983$ Kapaciteten är tillräcklig!

Bågens tvärkraftskapacitet

Effektiv breddparameter: $k_{cr,gl} := 0.67$

Effektiv bredd: $b_{ef,bå} := k_{cr,gl} \cdot b_{bå}$ $b_{ef,bå} = 0.432 \cdot m$

Effektiv area: $A_{bå,ef} := b_{ef,bå} \cdot h_{bå}$ $A_{bå,ef} = 0.622 \cdot m^2$

Dimensionerande dragkraftskapacitet: $V_{Rd.bå} := \frac{2}{3} \cdot A_{bå,ef} \cdot f_{vd,gl}$ $V_{Rd.bå} = 999 \cdot kN$

Utnyttjandegrad: $\frac{V_{Ed.bå}}{V_{Rd.bå}} = 0.658$ Kapaciteten är tillräcklig!

Instabilitetskontroll

Enligt 2.3.3 i *Bågkonstruktioner* är knäckning i bågens plan begränsad till att avse bågdelarna mellan hängstagen, för bågar med förstyrningsbalk. Kontroll av samtidig böjning kring y-axeln och axiellt tryck enligt eurokod 5 i Bärande konstruktioner del 2 kapitel T6.2.2 och T6.3:

Faktor som beskriver

rakheten: $\beta_c := 0.1$

Antar eulerfall 3 med fast inspänning på ena sidan, och led på andra. Detta eftersom det är det första bågsegmentet som kommer bli dimensionerande.

Längden av det första bågsegmentet, som också är längst:

Knäcklängd:
$$L_c := 0.85 \int_0^{cc_{stag}} \sqrt{1 + y_{prim}(x)^2} dx \quad L_c = 3.06 \text{ m}$$

Slankhet:
$$\lambda_y := \frac{L_c}{\sqrt{\frac{I_{bå}}{A_{bå}}}} \quad \text{T6-14 och T6-15}$$

$$\lambda_y = 7.36$$

Relativ slankhet:
$$\lambda_{rel,y} := \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0k,gl}}{E_{0.05,gl}}} \quad \text{T6-17}$$

$$\lambda_{rel,y} = 0.12$$

$$k_y := 0.5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) \dots \right] \quad \text{T6-21}$$

$$\left[+ \lambda_{rel,y}^2 \right] \quad k_y = 0.498$$

Reduceringsfaktor:
$$k_{c,y} := \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad \text{T6-19}$$

$$k_{c,y} = 1.02$$

Maximal tryckspänning
i bågen:

$$\sigma_{c.0.d} := \frac{N_{Ed,bå}}{A_{bå}} \quad \sigma_{c.0.d} = 3.59 \cdot \text{MPa}$$

$$\frac{\sigma_{c.0.d}}{k_{c,y} \cdot f_{c0d,gl}} = 0.203 \quad \text{T6-13}$$

Tillräcklig kapacitet!

$\lambda_{rel,y} < 0,3$ vilket betyder att det är en kort pelare och T6-25 och T6-26 i Bärande konstruktioner del 2 används:

Maximal böjspänning
i bågen:

$$\sigma_{m,y,d} := \frac{M_{Ed,bå} \cdot h_{bå}}{I_{bå} \cdot 2}$$

$$\sigma_{m,y,d} = 19,8 \cdot \text{MPa}$$

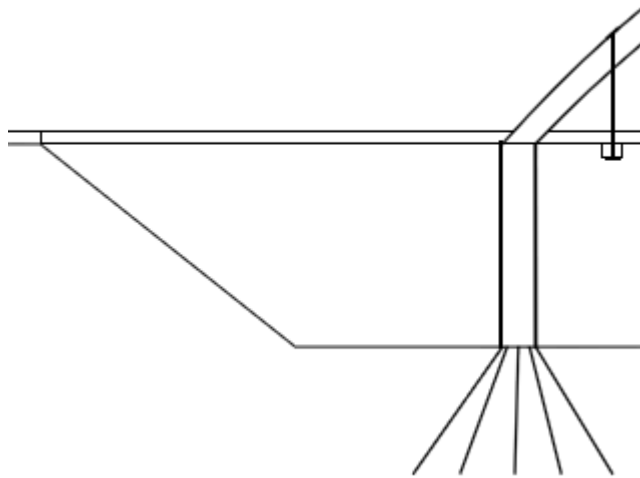
$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c0d,gl}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{md,gl}} = 0,989$$

T6-25
Tillräcklig kapacitet!

Knäckning vinkelrätt bågens plan

Bågens kritiska bärförmåga N_{cr} , med hänsyn till knäckning enligt elasticitetsteori, ska vad gäller knäckning vinkelrätt mot bågplanet vara minst dubbelt så stor som tryckkraften i bågen, enligt TRVK Bro 2011. Enligt kapitel 6.1 och figur 6.3 i bågkonstruktioner skall vindförband i form av fackverk eller ramverk dimensioneras mellan de två bågarna för att förhindra knäckning vinkelrätt bågens plan. I aktuell dimensionering görs dock inte detta.

9. Dimensionering av sidospänn



Figur 28. Sidospänn i profil.

Dimensioner

Höjd balk: $h_{\text{balk}} := 1.395\text{m}$

Bredd balk: $b_{\text{balk}} := 0.215\text{m}$

Antal balkar: $n_{\text{balk}} := 9$

cc-avstånd mellan balkar: $cc_{\text{balk}} := \frac{B}{n_{\text{balk}} - 1}$ $cc_{\text{balk}} = 1\text{ m}$

Höjd platta: $t_{\text{pl}} := 0.270\text{m}$

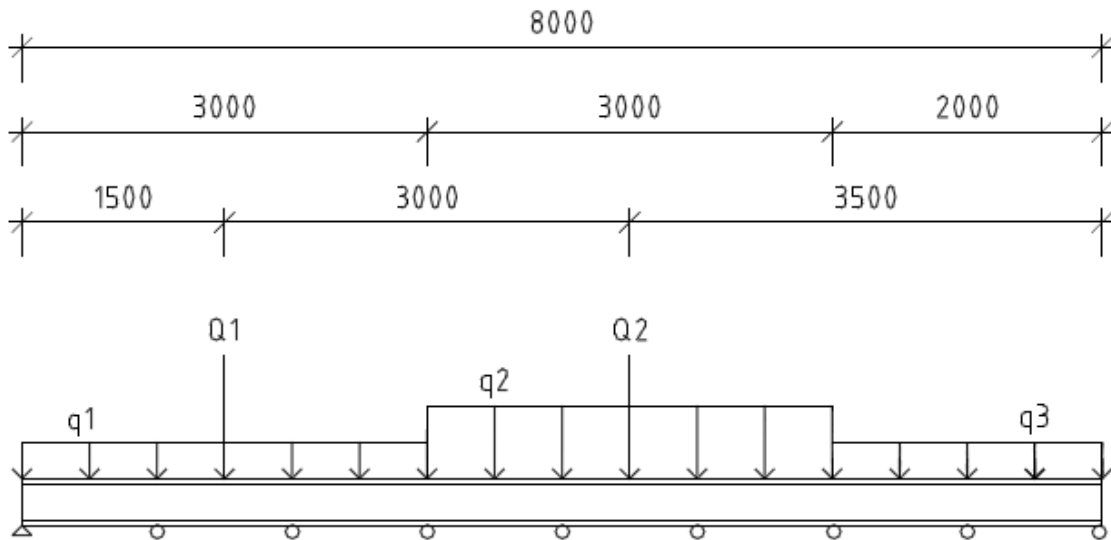
Bredd platta: $b_{\text{pl}} := 1\text{m}$

Enligt ritning är lutningen i båda ändar 1:2

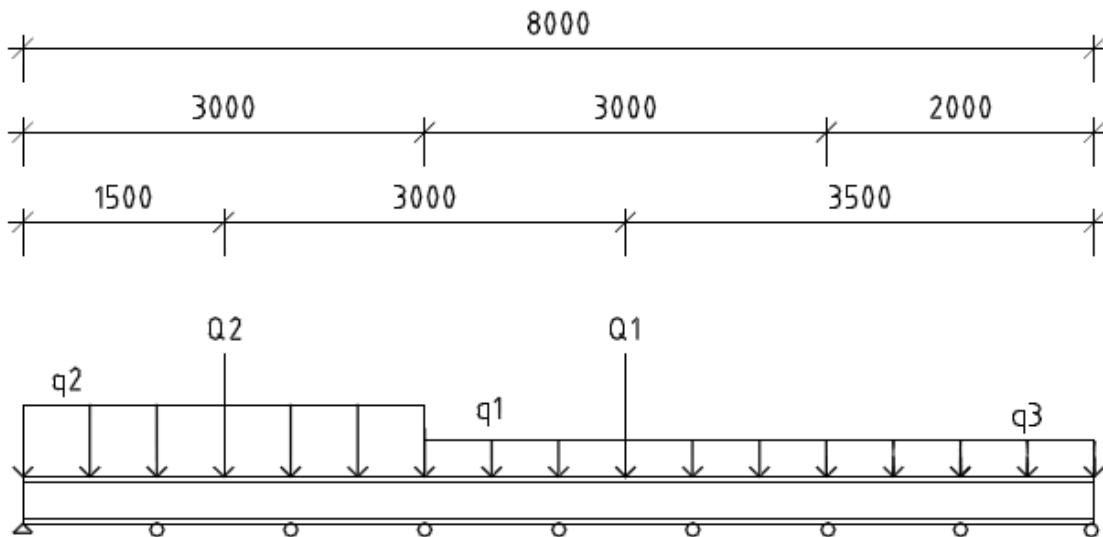
Längd balk: $l_{\text{balk}} := 13.85\text{m} - \frac{h_{\text{balk}} + t_{\text{pl}}}{2}$ $l_{\text{balk}} = 13.018\text{ m}$

Dimensionering av balkar

Dimensionerande laster



Figur 29. Lastfall 1 För sidobron.



Figur 30. Lastfall 2 för sidobron.

Filfaktorer hämtade från bilaga 5: Beräkningar i CALFEM

$$f_{1,Q} := 0.25$$

$$f_{1,q} := 0.1401$$

$$f_{2,Q} := 0.15$$

$$f_{2,q} := 0.2006$$

Balk 1 kommer utsättas för störst axellast och balk 2 för störst utbredd last. Båda kommer kontrolleras.

Trafiklaster

$$q_{1d,b} := \begin{pmatrix} \gamma_Q \cdot \alpha_{q1} \cdot q_{1k} \cdot b_{q1} \dots \\ + \alpha_{q2} \cdot q_{2k} \cdot b_{q2} \dots \\ + \gamma_Q \cdot \alpha_{q3} \cdot q_{3k} \cdot b_{q3} \end{pmatrix} \cdot f_{1,q} \quad q_{1d,b} = 5.27 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{2d,b} := \begin{pmatrix} \gamma_Q \cdot \alpha_{q1} \cdot q_{1k} \cdot b_{q1} \dots \\ + \alpha_{q2} \cdot q_{2k} \cdot b_{q2} \dots \\ + \gamma_Q \cdot \alpha_{q3} \cdot q_{3k} \cdot b_{q3} \end{pmatrix} \cdot f_{2,q} \quad q_{2d,b} = 7.55 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{1d,b} := (Q_{1d} + Q_{2d} + Q_{3d}) \cdot f_{1,Q} \quad Q_{1d,b} = 337.5 \cdot \text{kN}$$

$$Q_{2d,b} := (Q_{1d} + Q_{2d} + Q_{3d}) \cdot f_{2,Q} \quad Q_{2d,b} = 202.5 \cdot \text{kN}$$

Egentyngder

Kvadratmeterssektion
av plattan:

$$g_{pl,kv} := \gamma_G \cdot \gamma_{gl} \cdot t_{pl} \quad g_{pl,kv} = 1.46 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Balk:

$$g_{balk} := \gamma_G \cdot \gamma_{gl} \cdot h_{balk} \cdot b_{balk} \quad g_{balk} = 1.62 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Beläggning:

$$g_{bel} := \gamma_G \cdot \begin{pmatrix} \gamma_{slit} \cdot t_{slit} \dots \\ + \gamma_{PGJA} \cdot t_{PGJA} \end{pmatrix} \quad g_{bel} = 2.86 \cdot \text{kPa}$$

Sidobro:

$$g_{sido} := \begin{pmatrix} g_{pl,kv} \dots \\ + g_{bel} \end{pmatrix} \cdot cc_{balk} \dots + g_{balk} \quad g_{sido} = 5.94 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g_{pl,sido} := \gamma_G \cdot \gamma_{gl} \cdot t_{pl} \cdot b_{pl} \dots + g_{bel} \cdot b_{pl} \quad g_{pl,sido} = 4.32 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Räcke: $g_{\text{räcke}} = 0.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Reaktionskrafter

Symmetri ger:

Balk 1: $R_{B1.b} := \left(Q_{1d.b} + q_{1d.b} \cdot l_{\text{balk}} \dots \right) \cdot \frac{1}{2} + g_{\text{sid}o} \cdot l_{\text{balk}}$ $R_{B1.b} = 241.7 \cdot \text{kN}$

$R_{A1.b} := R_{B1.b}$ $R_{A1.b} = 241.7 \cdot \text{kN}$

Balk 2: $R_{B2.b} := \left(Q_{2d.b} + q_{2d.b} \cdot l_{\text{balk}} \dots \right) \cdot \frac{1}{2} + g_{\text{sid}o} \cdot l_{\text{balk}}$ $R_{B2.b} = 189.1 \cdot \text{kN}$

$R_{A2.b} := R_{B2.b}$ $R_{A2.b} = 189.1 \cdot \text{kN}$

Maximala moment

Elementarfall ger:

Balk 1: $M_{\text{max.sido.1}} := \frac{(Q_{1d.b})}{4} \cdot l_{\text{balk}} \dots + \left(q_{1d.b} \dots \right) \cdot \frac{l_{\text{balk}}^2}{8} + g_{\text{sid}o}$ $M_{\text{max.sido.1}} = 1.34 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$

Balk 2: $M_{\text{max.sido.2}} := \frac{(Q_{2d.b})}{4} \cdot l_{\text{balk}} \dots + \left(q_{2d.b} \dots \right) \cdot \frac{l_{\text{balk}}^2}{8} + g_{\text{sid}o}$ $M_{\text{max.sido.2}} = 944.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Dimensionerande moment: $M_{\text{Ed.sido}} := \max(M_{\text{max.sido.1}}, M_{\text{max.sido.2}}) = 1.336 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$

Kontroll av momentkapacitet

$$k_h := 1$$

Dimensionerande
böjhållfasthet:

$$f_{md,gl} := k_{mod} \cdot k_h \cdot \frac{f_{mk,gl}}{\gamma_{M,gl}}$$

T2-12

$$f_{md,gl} = 20.2 \cdot \text{MPa}$$

Momentkapacitet:

$$M_{Rd,sido} := \frac{(b_{balk} \cdot h_{balk}^2 \cdot f_{md,gl})}{6}$$

T3-18

$$M_{Rd,sido} = 1.41 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Utnyttjandegrad:

$$\frac{M_{Ed,sido}}{M_{Rd,sido}} = 0.95$$

Kapaciteten är tillräcklig!

Maximala tvärkrafter

Tvärkraften är max antingen vid stöden eller vid punktlasten. Symmetri ger att stödkrafterna lika och tvärkraften vid punktlasten är halva punktlasten.

Balk 1: $V_{\max,sido.1} := \max\left(R_{A1,b}, \frac{Q_{1d,b}}{2}\right)$ $V_{\max,sido.1} = 241.7 \cdot \text{kN}$

Balk 2: $V_{\max,sido.2} := \max\left(R_{A2,b}, \frac{Q_{2d,b}}{2}\right)$ $V_{\max,sido.2} = 189.1 \cdot \text{kN}$

Dimensionerande tvärkraft: $V_{Ed,sido} := \max(V_{\max,sido.1}, V_{\max,sido.2}) = 241.7 \cdot \text{kN}$

Kontroll av tvärkraftkapacitet

Effektiv bredd:

$$b_{ef,balk} := k_{cr,gl} \cdot b_{balk}$$

T4-9

$$b_{ef} = 0.708 \text{ m}$$

Effektiv area:

$$A_{ef,balk} := b_{ef,balk} \cdot h_{balk}$$

$$A_{ef,balk} = 0.201 \text{ m}^2$$

Tvärkraftskapacitet:

$$V_{Rd,sido} := \frac{2}{3} \cdot A_{ef,balk} \cdot f_{vd,gl}$$

T4

$$V_{Rd,sido} = 322.6 \cdot \text{kN}$$

Utnyttjandegrad:

$$\frac{V_{Ed,sido}}{V_{Rd,sido}} = 0.749$$

Kapaciteten är tillräcklig!

Dimensionering av platta

Reaktionskrafter hämtade från bilaga 5: Beräkningar i CALFEM:

$$R_1 := 114.64\text{kN}$$

$$R_2 := 187.33\text{kN}$$

$$R_3 := 69.99\text{kN}$$

$$R_4 := 441.74\text{kN}$$

$$R_5 := 167.73\text{kN}$$

$$R_6 := 215.83\text{kN}$$

$$R_7 := 263.69\text{kN}$$

$$R_8 := -42.15\text{kN}$$

$$R_9 := 12.27\text{kN}$$

Dimensionerande laster

Trafiklaster

$$q_{1d,pl} := \gamma_Q \cdot \alpha_{q1} \cdot q_{1k} \cdot b_{pl} \qquad q_{1d,pl} = 3.75 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{2d,pl} := \gamma_Q \cdot \alpha_{q2} \cdot q_{2k} \cdot b_{pl} \qquad q_{2d,pl} = 9.45 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{3d,pl} := \gamma_Q \cdot \alpha_{q3} \cdot q_{3k} \cdot b_{pl} \qquad q_{3d,pl} = 3.75 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{1d,pl} := \gamma_Q \cdot \alpha_{Q1} \cdot \frac{Q_{1k}}{2} \qquad Q_{1d,pl} = 270 \cdot \text{kN}$$

$$Q_{2d,pl} := \gamma_Q \cdot \alpha_{Q2} \cdot \frac{Q_{2k}}{2} \qquad Q_{2d,pl} = 405 \cdot \text{kN}$$

$$Q_{3d,pl} := \gamma_Q \cdot \alpha_{Q3} \cdot \frac{Q_{3k}}{2} \qquad Q_{3d,pl} = 0$$

Egentyngder

$$g_{\text{pl.sido}} = 4.32 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$G_{\text{r\u00e4cke.pl}} := \gamma_G \cdot g_{\text{r\u00e4cke}} \cdot b_{\text{pl}}$$

$$G_{\text{r\u00e4cke.pl}} = 675 \text{ N}$$

Snittkrafter

Snitt 1: $0 \text{ m} < x < 0,5 \text{ m}$

$$x_1 := 0\text{m}, 0,05\text{m}.. 0,5\text{m}$$

$$M_{\text{sid.o.1}}(x_1) := R_1 \cdot x_1 - G_{\text{r\u00e4cke.pl}} \cdot x_1 - g_{\text{pl.sido}} \cdot \frac{x_1^2}{2} \dots \\ + -q_{1\text{d.pl}} \cdot \frac{x_1^2}{2}$$

$$V_{\text{sid.o.1}}(x_1) := \frac{d}{dx_1} M_{\text{sid.o.1}}(x_1)$$

Snitt 2: $0,5 \text{ m} < x < 1 \text{ m}$

$$x_2 := 0,5\text{m}, 0,5\text{m} + 0,05\text{m}.. 1\text{m}$$

$$M_{\text{sid.o.2}}(x_2) := R_1 \cdot x_2 - g_{\text{pl.sido}} \cdot \frac{x_2^2}{2} - q_{1\text{d.pl}} \cdot \frac{x_2^2}{2} \dots \\ + -G_{\text{r\u00e4cke.pl}} \cdot x_2 - Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_2 - 0,5\text{m})$$

$$V_{\text{sid.o.2}}(x_2) := \frac{d}{dx_2} M_{\text{sid.o.2}}(x_2)$$

Snitt 3: $1 \text{ m} < x < 2 \text{ m}$

$$x_3 := 1\text{m}, 1\text{m} + 0,05\text{m}.. 2\text{m}$$

$$M_{\text{sid.o.3}}(x_3) := R_1 \cdot x_3 + R_2 \cdot (x_3 - 1\text{m}) - g_{\text{pl.sido}} \cdot \frac{x_3^2}{2} \dots \\ + -q_{1\text{d.pl}} \cdot \frac{x_3^2}{2} - G_{\text{r\u00e4cke.pl}} \cdot x_3 \dots \\ + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_3 - 0,5\text{m})$$

$$V_{\text{sid.o.3}}(x_3) := \frac{d}{dx_3} M_{\text{sid.o.3}}(x_3)$$

Snitt 4: $2 \text{ m} < x < 2,5 \text{ m}$

$$x_4 := 2\text{m}, 2\text{m} + 0,05\text{m}.. 2,5\text{m}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{sid.4}}(x_4) := & R_1 \cdot x_4 + R_2 \cdot (x_4 - 1\text{m}) + R_3 \cdot (x_4 - 2\text{m}) \dots \\ & + -g_{\text{pl.sido}} \cdot \frac{x_4^2}{2} - G_{\text{r\u00e4cke.pl}} \cdot x_4 \dots \\ & + -q_{1\text{d.pl}} \cdot \frac{x_4^2}{2} \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_4 - 0,5\text{m}) \end{aligned}$$

$$V_{\text{sid.4}}(x_4) := \frac{d}{dx_4} M_{\text{sid.4}}(x_4)$$

Snitt 5: $2,5 \text{ m} < x < 3 \text{ m}$

$$x_5 := 2,5\text{m}, 2,5\text{m} + 0,05\text{m}.. 3\text{m}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{sid.5}}(x_5) := & R_1 \cdot x_5 + R_2 \cdot (x_5 - 1\text{m}) + R_3 \cdot (x_5 - 2\text{m}) \dots \\ & + -g_{\text{pl.sido}} \cdot \frac{x_5^2}{2} - G_{\text{r\u00e4cke.pl}} \cdot x_5 \dots \\ & + -q_{1\text{d.pl}} \cdot \frac{x_5^2}{2} \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_5 - 0,5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_5 - 2,5\text{m}) \end{aligned}$$

$$V_{\text{sid.5}}(x_5) := \frac{d}{dx_5} M_{\text{sid.5}}(x_5)$$

Snitt 6: 3 m < x < 3,5 m

$$x_6 := 3\text{m}, 3\text{m} + 0.05\text{m}.. 3.5\text{m}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{sid.o.6}}(x_6) := & R_1 \cdot x_6 + R_2 \cdot (x_6 - 1\text{m}) + R_3 \cdot (x_6 - 2\text{m}) \dots \\ & + R_4 \cdot (x_6 - 3\text{m}) - g_{\text{pl.sido}} \cdot \frac{x_6^2}{2} \dots \\ & + -G_{\text{r\u00e4cke.pl}} \cdot x_6 \dots \\ & + -q_{1\text{d.pl}} \cdot b_{q1} \cdot \left(x_6 - \frac{b_{q1}}{2} \right) \dots \\ & + -q_{2\text{d.pl}} \cdot \frac{(x_6 - 3\text{m})^2}{2} \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_6 - 0.5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_6 - 2.5\text{m}) \end{aligned}$$

$$V_{\text{sid.o.6}}(x_6) := \frac{d}{dx_6} M_{\text{sid.o.6}}(x_6)$$

Snitt 7: 3,5 m < x < 4 m

$$x_7 := 3.5\text{m}, 3.5\text{m} + 0.05\text{m}.. 4\text{m}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{sid.o.7}}(x_7) := & R_1 \cdot x_7 + R_2 \cdot (x_7 - 1\text{m}) + R_3 \cdot (x_7 - 2\text{m}) \dots \\ & + R_4 \cdot (x_7 - 3\text{m}) - g_{\text{pl.sido}} \cdot \frac{x_7^2}{2} \dots \\ & + -G_{\text{r\u00e4cke.pl}} \cdot x_7 \dots \\ & + -q_{1\text{d.pl}} \cdot b_{q1} \cdot \left(x_7 - \frac{b_{q1}}{2} \right) \dots \\ & + -q_{2\text{d.pl}} \cdot \frac{(x_7 - 3\text{m})^2}{2} \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_7 - 0.5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_7 - 2.5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{2\text{d.pl}} \cdot (x_7 - 3.5\text{m}) \end{aligned}$$

$$V_{\text{sid.o.7}}(x_7) := \frac{d}{dx_7} M_{\text{sid.o.7}}(x_7)$$

Snitt 8: 4 m < x < 5 m

$$x_8 := 4\text{m}, 4\text{m} + 0.05\text{m}.. 5\text{m}$$

$$\begin{aligned}M_{\text{sid.o.8}}(x_8) := & R_1 \cdot x_8 + R_2 \cdot (x_8 - 1\text{m}) + R_3 \cdot (x_8 - 2\text{m}) \dots \\& + R_4 \cdot (x_8 - 3\text{m}) + R_5 \cdot (x_8 - 4\text{m}) \dots \\& + -g_{\text{pl.sido}} \cdot \frac{x_8^2}{2} \dots \\& + -(G_{\text{r\u00e4cke.pl}} \cdot x_8) \dots \\& + -q_{1\text{d.pl}} \cdot b_{q1} \cdot \left(x_8 - \frac{b_{q1}}{2}\right) \dots \\& + -q_{2\text{d.pl}} \cdot \frac{(x_8 - 3\text{m})^2}{2} \dots \\& + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_8 - 0.5\text{m}) \dots \\& + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_8 - 2.5\text{m}) \dots \\& + -Q_{2\text{d.pl}} \cdot (x_8 - 3.5\text{m})\end{aligned}$$

$$V_{\text{sid.o.8}}(x_8) := \frac{d}{dx_8} M_{\text{sid.o.8}}(x_8)$$

Snitt 9: 5 m < x < 5,5 m

$$x_9 := 5\text{m}, 5\text{m} + 0.05\text{m}.. 5.5\text{m}$$

$$\begin{aligned}M_{\text{sid.o.9}}(x_9) := & R_1 \cdot x_9 + R_2 \cdot (x_9 - 1\text{m}) + R_3 \cdot (x_9 - 2\text{m}) \dots \\& + R_4 \cdot (x_9 - 3\text{m}) + R_5 \cdot (x_9 - 4\text{m}) \dots \\& + R_6 \cdot (x_9 - 5\text{m}) - g_{\text{pl.sido}} \cdot \frac{x_9^2}{2} \dots \\& + -(G_{\text{r\u00e4cke.pl}} \cdot x_9) \dots \\& + -q_{1\text{d.pl}} \cdot b_{q1} \cdot \left(x_9 - \frac{b_{q1}}{2}\right) \dots \\& + -q_{2\text{d.pl}} \cdot \frac{(x_9 - 3\text{m})^2}{2} \dots \\& + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_9 - 0.5\text{m}) \dots \\& + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_9 - 2.5\text{m}) \dots \\& + -Q_{2\text{d.pl}} \cdot (x_9 - 3.5\text{m})\end{aligned}$$

$$V_{\text{sid.o.9}}(x_9) := \frac{d}{dx_9} M_{\text{sid.o.9}}(x_9)$$

Snitt 10: 5,5 m < x < 6 m

$$x_{10} := 5.5\text{m}, 5.5\text{m} + 0.05\text{m}.. 6\text{m}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{side.10}}(x_{10}) := & R_1 \cdot x_{10} + R_2 \cdot (x_{10} - 1\text{m}) + R_3 \cdot (x_{10} - 2\text{m}) \dots \\ & + R_4 \cdot (x_{10} - 3\text{m}) + R_5 \cdot (x_{10} - 4\text{m}) \dots \\ & + R_6 \cdot (x_{10} - 5\text{m}) - g_{\text{pl.side}} \cdot \frac{x_{10}^2}{2} \dots \\ & + -G_{\text{r\u00e4cke.pl}} \cdot x_{10} \dots \\ & + -q_{1\text{d.pl}} \cdot b_{q1} \cdot \left(x_{10} - \frac{b_{q1}}{2} \right) \dots \\ & + -q_{2\text{d.pl}} \cdot \frac{(x_{10} - 3\text{m})^2}{2} \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_{10} - 0.5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_{10} - 2.5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{2\text{d.pl}} \cdot (x_{10} - 3.5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{2\text{d.pl}} \cdot (x_{10} - 5.5\text{m}) \end{aligned}$$

$$V_{\text{side.10}}(x_{10}) := \frac{d}{dx_{10}} M_{\text{side.10}}(x_{10})$$

Snitt 11: 6 m < x < 7 m

$$x_{11} := 6\text{m}, 6\text{m} + 0.05\text{m}.. 7\text{m}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{sid.11}}(x_{11}) := & R_1 \cdot x_{11} + R_2 \cdot (x_{11} - 1\text{m}) + R_3 \cdot (x_{11} - 2\text{m}) \dots \\ & + R_4 \cdot (x_{11} - 3\text{m}) + R_5 \cdot (x_{11} - 4\text{m}) \dots \\ & + R_6 \cdot (x_{11} - 5\text{m}) + R_7 \cdot (x_{11} - 6\text{m}) \dots \\ & + -g_{\text{pl.sido}} \cdot \frac{x_{11}^2}{2} \dots \\ & + -G_{\text{r\u00e4cke.pl}} \cdot x_{11} \dots \\ & + -q_{1\text{d.pl}} \cdot b_{q1} \cdot \left(x_{11} - \frac{b_{q1}}{2} \right) \dots \\ & + -q_{2\text{d.pl}} \cdot b_{q2} \cdot \left(x_{11} - 3\text{m} - \frac{b_{q2}}{2} \right) \dots \\ & + -q_{3\text{d.pl}} \cdot \frac{(x_{11} - 6\text{m})^2}{2} \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_{11} - 0.5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_{11} - 2.5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{2\text{d.pl}} \cdot (x_{11} - 3.5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{2\text{d.pl}} \cdot (x_{11} - 5.5\text{m}) \end{aligned}$$

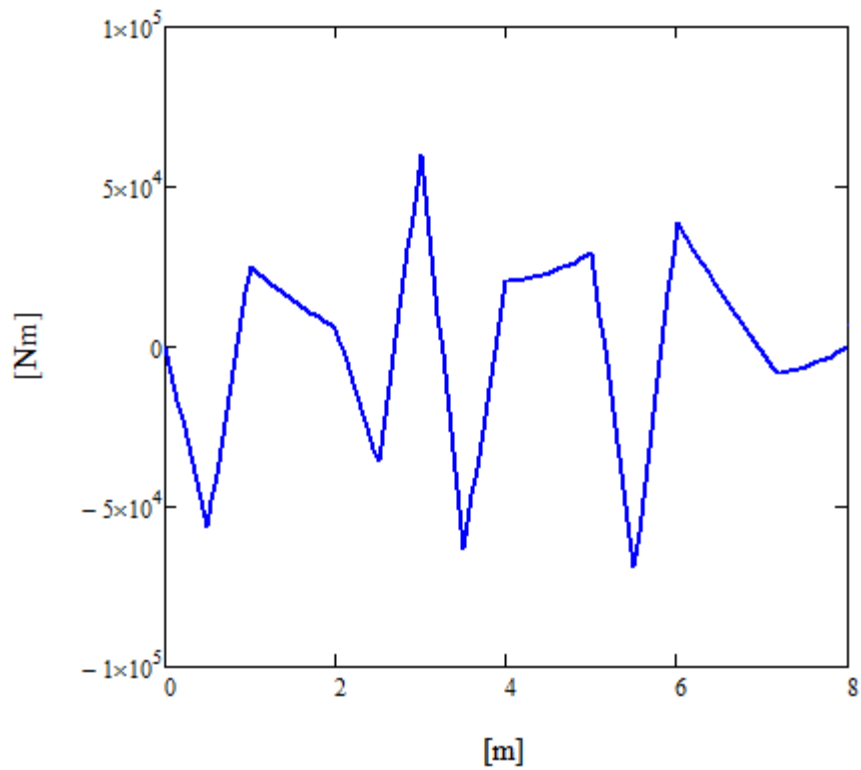
$$V_{\text{sid.11}}(x_{11}) := \frac{d}{dx_{11}} M_{\text{sid.11}}(x_{11})$$

Snitt 12: 7 m < x < 8 m

$$x_{12} := 7\text{m}, 7\text{m} + 0.05\text{m}.. 8\text{m}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{side.12}}(x_{12}) := & R_1 \cdot x_{12} + R_2 \cdot (x_{12} - 1\text{m}) + R_3 \cdot (x_{12} - 2\text{m}) \dots \\ & + R_4 \cdot (x_{12} - 3\text{m}) + R_5 \cdot (x_{12} - 4\text{m}) \dots \\ & + R_6 \cdot (x_{12} - 5\text{m}) + R_7 \cdot (x_{12} - 6\text{m}) \dots \\ & + R_8 \cdot (x_{12} - 7\text{m}) - g_{\text{pl.side}} \cdot \frac{x_{12}^2}{2} \dots \\ & + -G_{\text{r\u00e4cke.pl}} \cdot x_{12} \dots \\ & + -q_{1\text{d.pl}} \cdot b_{q1} \cdot \left(x_{12} - \frac{b_{q1}}{2} \right) \dots \\ & + -q_{2\text{d.pl}} \cdot b_{q2} \cdot \left(x_{12} - 3\text{m} - \frac{b_{q2}}{2} \right) \dots \\ & + -q_{3\text{d.pl}} \cdot \frac{(x_{12} - 6\text{m})^2}{2} \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_{12} - 0.5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{1\text{d.pl}} \cdot (x_{12} - 2.5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{2\text{d.pl}} \cdot (x_{12} - 3.5\text{m}) \dots \\ & + -Q_{2\text{d.pl}} \cdot (x_{12} - 5.5\text{m}) \end{aligned}$$

$$V_{\text{side.12}}(x_{12}) := \frac{d}{dx_{12}} M_{\text{side.12}}(x_{12})$$



Figur 31. Momentdiagram sidobroplatta.

Dimensionerande moment

Störst moment uppstår under punktlasterna.

$$M_{Ed, \text{sid.o.pl}} := \max(M_{\text{sid.o.1}}(0.5\text{m}), M_{\text{sid.o.4}}(2.5\text{m}), M_{\text{sid.o.6}}(3.5\text{m}), M_{\text{sid.o.9}}(5.5\text{m}))$$

$$M_{Ed, \text{sid.o.pl}} = 68.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Dimensionerande tvärkraft

Störst tvärkraft uppstår vid punktlasterna.

$$\text{Max}_{V.1} := \max(|V_{\text{sid.o.1}}(0\text{m})|, |V_{\text{sid.o.1}}(0.5\text{m})|, |V_{\text{sid.o.2}}(0.5\text{m})|, |V_{\text{sid.o.2}}(1\text{m})|)$$

$$\text{Max}_{V.2} := \max(|V_{\text{sid.o.3}}(1\text{m})|, |V_{\text{sid.o.3}}(2\text{m})|, |V_{\text{sid.o.4}}(2\text{m})|, |V_{\text{sid.o.4}}(2.5\text{m})|)$$

$$\text{Max}_{V.3} := \max(|V_{\text{sid.o.5}}(2.5\text{m})|, |V_{\text{sid.o.5}}(3\text{m})|, |V_{\text{sid.o.6}}(3\text{m})|, |V_{\text{sid.o.6}}(3.5\text{m})|)$$

$$\text{Max}_{V.4} := \max(|V_{\text{sid.o.7}}(3.5\text{m})|, |V_{\text{sid.o.7}}(4\text{m})|, |V_{\text{sid.o.8}}(4\text{m})|, |V_{\text{sid.o.8}}(5\text{m})|)$$

$$\text{Max}_{V.5} := \max(|V_{\text{sid.o.9}}(5\text{m})|, |V_{\text{sid.o.9}}(5.5\text{m})|, |V_{\text{sid.o.10}}(5.5\text{m})|, |V_{\text{sid.o.10}}(6\text{m})|)$$

$$\text{Max}_{V.6} := \max(|V_{\text{sid.o.11}}(6\text{m})|, |V_{\text{sid.o.11}}(7\text{m})|, |V_{\text{sid.o.12}}(7\text{m})|, |V_{\text{sid.o.12}}(8\text{m})|)$$

$$V_{\text{Ed.sido.pl}} := \max(\text{Max}_{V.1}, \text{Max}_{V.2}, \text{Max}_{V.3}, \text{Max}_{V.4}, \text{Max}_{V.5}, \text{Max}_{V.6})$$

$$V_{\text{Ed.sido.pl}} = 248.8 \cdot \text{kN}$$

Kontroll av momentkapacitet

$$k_{h.gl} := 1.1$$

Dimensionerande
böjhållfasthet:

$$f_{\text{md.gl}} := k_{\text{mod}} \cdot k_{h.gl} \cdot \frac{f_{\text{mk.gl}}}{\gamma_{\text{M.gl}}} \quad \text{T2-12}$$

Dimensionerande
momentkapacitet:

$$M_{\text{Rd.sido.pl}} := \frac{(b_{\text{pl}} \cdot t_{\text{pl}}^2 \cdot f_{\text{md.gl}})}{6} \quad \text{T3-18}$$

$$M_{\text{Rd.sido.pl}} = 269.44 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Utnyttjandegrad:

$$\frac{M_{\text{Ed.sido.pl}}}{M_{\text{Rd.sido.pl}}} = 0.255$$

Kapaciteten är tillräcklig!

Kontroll av tvärkraftkapacitet

Effektiv bredd:	$b_{\text{ef.sido.pl}} := k_{\text{cr.gl}} b_{\text{pl}}$	T4-9
		$b_{\text{ef.sido.pl}} = 0.67 \text{ m}$
Effektiv area:	$A_{\text{ef.sido.pl}} := b_{\text{ef.sido.pl}} \cdot t_{\text{pl}}$	$A_{\text{ef.sido.pl}} = 0.181 \text{ m}^2$
Tvärkraftskapacitet:	$V_{\text{Rd.sido.pl}} := \frac{2}{3} \cdot A_{\text{ef.sido.pl}} \cdot f_{\text{vd.gl}}$	T4
		$V_{\text{Rd.sido.pl}} = 290.4 \text{ kN}$
Utnyttjandegrad:	$\frac{V_{\text{Ed.sido.pl}}}{V_{\text{Rd.sido.pl}}} = 0.857$	Kapaciteten är tillräcklig!

10. Dimensionering av stöd

Dimensioner

Höjden på stöden är uppmätt i ritning.

$$\text{Höjd:} \quad h_{\text{stöd}} := 6.616\text{m} - \left(\begin{array}{l} t_{\text{platta}} \dots \\ + t_{\text{slit}} \dots \\ + t_{\text{PGJA}} \dots \\ + h_{\text{svetsp}} \end{array} \right) \quad h_{\text{stöd}} = 5.94 \text{ m}$$

Ett kvadratisk stöd väljs.

$$\text{Bredd:} \quad b_{\text{stöd}} := 5 \cdot 0.190\text{m} \quad b_{\text{stöd}} = 0.95 \text{ m}$$

$$\text{Ytttröghetsmoment:} \quad I_{\text{stöd}} := \frac{b_{\text{stöd}}^4}{12} \quad I_{\text{stöd}} = 0.068 \text{ m}^4$$

$$\text{Neutrallager:} \quad z_{\text{stöd}} := \frac{b_{\text{stöd}}}{2} \quad z_{\text{stöd}} = 0.475 \text{ m}$$

Last på stödet

Egentyngder

$$\text{Total egentyngd mittspann:} \quad G_{\text{mittsp}} := \left(g_{\text{däck}} + g_{\text{række}} \right) \cdot L \dots \quad G_{\text{mittsp}} = 1.8 \cdot \text{MN} \\ + 2 \cdot G_{\text{fbalk}} \dots \\ + 2 \cdot g_{\text{bå}} \cdot L_{\text{båge}} \dots \\ + G_{\text{medel}} \dots \\ + g_{\text{tbalk}} \cdot B_t \cdot (n_{\text{stag}} + 2)$$

$$\text{Total egentyngd sidospänn:} \quad G_{\text{sidosp}} := 2 \left[\begin{array}{l} g_{\text{pl.kv}} \dots \\ + g_{\text{bel}} \end{array} \right] \cdot B \dots \cdot l_{\text{balk}} \quad G_{\text{sidosp}} = 1.29 \cdot \text{MN} \\ + 9 g_{\text{balk}} + g_{\text{række}}$$

Vertikal last

Ytterfil mest belastad (lastfall 2) ger störst vertikalkraft på pelaren

Momentjämvikt med
endast axellast:

$$R_{A,Q} := \frac{1}{B} \left[Q_{2d} \cdot \left(B - \frac{b_{q1}}{2} \right) \dots \right. \\ \left. + Q_{1d} \cdot \left(B - \frac{b_{q2}}{2} \right) \dots \right. \\ \left. + Q_{3d} \cdot \left(B - \frac{b_{q3}}{2} \right) \dots \right. \\ \left. + b_{q1} \right] \quad R_{A,Q} = 1.3 \cdot \text{MN}$$

Momentjämvikt med
endast utbredd trafiklast:

$$R_{A,q} := \frac{1}{B} \left[q_{2d} \cdot b_{q1} \cdot \left(B - \frac{b_{q1}}{2} \right) \dots \right. \\ \left. + q_{1d} \cdot b_{q2} \cdot \left(B - \frac{b_{q2}}{2} \right) \dots \right. \\ \left. + q_{3d} \cdot b_{q3} \cdot \left(B - \frac{b_{q3}}{2} \right) \dots \right] \quad R_{A,q} = 106.5 \cdot \text{kN}$$

Filfaktor:

$$f_q := \frac{R_{A,q}}{q_{2d} \cdot b_{q1} + q_{1d} \cdot b_{q2} + q_{3d} \cdot b_{q3}} \quad f_q = 0.822$$

Utbredd last som tas
upp av ett stöd:

$$q_{\text{stöd}} := (q_{2d} \cdot b_{q1} + q_{1d} \cdot b_{q2} + q_{3d} \cdot b_{q3}) \cdot \frac{\left(cc_{\text{stag}} \cdot 10 + \frac{l_{\text{balk}}}{2} \right)}{1 \text{ m}} \cdot f_q$$

$$q_{\text{stöd}} = 3.62 \cdot \text{MN}$$

Total last på ett stöd:

$$Q_{\text{stöd}} := \frac{G_{\text{mittsp}}}{4} + \frac{G_{\text{sidosp}}}{8} \dots \\ + R_{A,Q} + q_{\text{stöd}} \quad Q_{\text{stöd}} = 5.53 \cdot \text{MN}$$

Påkörningslast

Påkörningslast: $P_{\text{på}} := 1000\text{kN}$

Kraftens angreppspunkt: $h_{\text{på}} := 1.5\text{m}$

Kapacitet

Pelaren antas vara ledad i ena änden och fast instpänd i andra. Moment fås från elementarfall.

Dimensionerande moment: $M_{\text{Ed.stöd}} := P_{\text{på}} \cdot \frac{h_{\text{på}} \cdot (h_{\text{stöd}} + h_{\text{på}})}{h_{\text{stöd}}}$ $M_{\text{Ed.stöd}} = 1.88 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$

Knäcklängd: $L_{\text{c.stöd}} := 0.85 \cdot h_{\text{stöd}}$ **Figur T6.8**

$$L_{\text{c.stöd}} = 5.05 \text{ m}$$

Tröghetsradie: $i := \frac{b_{\text{stöd}}}{\sqrt{12}}$ **T6-15**

$$i = 0.274 \text{ m}$$

Slankhetstal: $\lambda := \frac{L_{\text{c.stöd}}}{i}$ **T6-14**

$$\lambda = 18.4$$

Relativt slankhetstal: $\lambda_{\text{rel}} := \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{\text{c0k,gl}}}{E_{0.05,gl}}}$ **T6-17**

$$\lambda_{\text{rel}} = 0.299$$

$$\lambda_{\text{rel}} < 0.3 = 1$$

**Kapitlet T6.2.2
Pelaren riskerar
inte knäckning!**

Spänning på grund
av axellast:

$$\sigma_Q := \frac{Q_{\text{stöd}}}{b_{\text{stöd}}^2} = 6.132 \cdot \text{MPa}$$

Spänning på grund
av moment:

$$\sigma_M := \frac{M_{\text{Ed, stöd}}}{I_{\text{stöd}}} \cdot z_{\text{stöd}} = 13.15 \cdot \text{MPa}$$

Draghållfasthet:

$$f_{c0d} := k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{c0k, gl}}{\gamma_{M, gl}} = 17.36 \cdot \text{MPa} \quad \text{T2-12}$$

$$k_{h, \text{stöd}} := 1$$

Böjhållfasthet:

$$f_{md} := k_{\text{mod}} \cdot k_{h, \text{stöd}} \cdot \frac{f_{mk, gl}}{\gamma_{M, gl}} \quad f_{md} = 20.16 \cdot \text{MPa}$$

$$\left(\frac{\sigma_Q}{f_{c0d}} \right)^2 + \frac{\sigma_M}{f_{md}} = 0.777$$

T6-25
Kapaciteten är
tillräcklig!

11. Kontroll i bruksgränstillstånd

Kontroll av nedböjning sker först i mitten av spannet mellan staget i mitten och staget till vänster om det och sedan i femtedelspunkten då momentet i bågen är maximalt där, och dessutom är denna punkt över motorvägens körbana. För bruksgränstillstånd används ej partialkoefficienterna, så därför delas de bort från krafterna. (Bärande konstruktioner Del 1, K1.4.2)

Nedböjning under mittpunkten

Tvärbalk

Använder elementarfall. De utbredda lasterna ersätts med en utbredd last och den utbredda lasten i mittfacket som blir över ersätts med en punktlast. Detta blir värre än verkligheten och därmed är beräkningen på säkra sidan.

Laster

Utbredd last

$$q_{0.tbalk} := \frac{q_{tbalk}}{\gamma_G} \dots \quad q_{0.tbalk} = 13.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$
$$+ t_{platta} \cdot c_{stag} \cdot \gamma_{1vl} \dots$$
$$+ \frac{q_{1d}}{\gamma_Q}$$

Punktlaster

$$P_{1.tbalk} := \frac{Q_{1d}}{\gamma_Q} \quad P_{1.tbalk} = 360 \cdot \text{kN}$$

$$P_{2.tbalk} := \frac{1}{\gamma_Q} \left[Q_{2d} \dots \right. \quad \left. + (q_{2d} - q_{1d}) \cdot b_{q2} \right] \quad P_{2.tbalk} = 571.4 \cdot \text{kN}$$

$$P_{3.tbalk} := \frac{Q_{3d}}{\gamma_Q} = 0 \cdot \text{kN}$$

Nedböjning

Antar störst nedböjning i mitten:

$$P_{tbalk} := P_{1.tbalk} \cdot \frac{l_{Q1Tp} \cdot B^2}{48 \cdot E_s \cdot I_{svetsp}} \left(3 - \frac{4 \cdot l_{Q1Tp}^2}{B^2} \right) \dots$$
$$+ P_{2.tbalk} \cdot \frac{(B - l_{Q2Tp}) \cdot B^2}{48 \cdot E_s \cdot I_{svetsp}} \left[3 - \frac{4 \cdot (B - l_{Q2Tp})^2}{B^2} \right] \dots$$
$$+ P_{3.tbalk} \cdot \frac{(B - l_{Q3Tp}) \cdot B^2}{48 \cdot E_s \cdot I_{svetsp}} \left[3 - \frac{4 \cdot (B - l_{Q3Tp})^2}{B^2} \right] \dots$$
$$+ q_{0.tbalk} \cdot \frac{5 \cdot B^4}{384 \cdot E_s \cdot I_{svetsp}}$$

$$P_{tbalk} = 0.049 \text{ m}$$

Stag

Normalspänning i stag:

$$\sigma_{stag} := \frac{N_{Ed,s}}{r_{stag}^2 \cdot \pi}$$

$$\sigma_{stag} = 335.1 \cdot \text{MPa}$$

Töjning:

$$\epsilon_{stag} := \frac{\sigma_{stag}}{E_s}$$

$$\epsilon_{stag} = 1.676 \times 10^{-3}$$

Nedböjning:

$$P_{stag} := \epsilon_{stag} \cdot f$$

$$P_{stag} = 0.02 \text{ m}$$

Platta

Enligt Bärande konstruktioner del 2 kapitel T9.3.3 delas nedböjningen från den permanenta lasten och den variabla lasten upp. Detta görs eftersom krympningen för den variabla lasten kan reduceras.

Permanent laster

Omräkningsfaktor:

$$k_{def} := 2$$

Bärande konstruktioner
del 1
Tabell T2.9

Uppskattad nedräkningsfaktor
som ligger mellan vindlast
och snölast:

$$\psi_2 := 0.1$$

Bärande konstruktioner
del 2
Tabell T9.2

Ytttröghetsmoment:

$$I_{\text{platta}} := \frac{b_{\text{pl}} \cdot t_{\text{platta}}^3}{12}$$

$$I_{\text{platta}} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

Egentyngd:

$$\begin{aligned} \xi_{\text{platta}} := & \gamma_{\text{IVI}} \cdot t_{\text{platta}} \cdot b_{\text{pl}} \dots \\ & + \gamma_{\text{PGJA}} \cdot t_{\text{PGJA}} \cdot b_{\text{pl}} \dots \\ & + \gamma_{\text{slit}} \cdot t_{\text{slit}} \cdot b_{\text{pl}} \end{aligned}$$

$$\xi_{\text{platta}} = 3.27 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Utbredd trafiklast:

$$q_{\text{platta}} := \alpha_{q2} \cdot q_{2k} \cdot b_{\text{pl}}$$

$$q_{\text{platta}} = 6.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Variabel last

På en-metersstrimlan som studeras verkar den största axellasten. Dock får endast två av fyra
hjul plats på remsan, och därför delas kraften på 2:

$$P_{\text{platta}} := \frac{Q_{2d}}{\gamma_Q} \cdot \frac{1}{2}$$

$$P_{\text{platta}} = 270 \cdot \text{kN}$$

Stödmoment hämtade från bilaga 5: CALFEM-beräkningar:

$$M_{1,G} := 1.412 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{2,G} := 1.422 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{1,Q} := 57.714 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{2,Q} := 57.814 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Nedböjning

Nedböjningen fås av elementarfall.

Av egenvikt

Momentan:

$$P_{\text{inst.G}} := M_{1.G} \cdot \frac{cc_{\text{stag}}^2}{16 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}} \dots \quad P_{\text{inst.G}} = 0.238 \cdot \text{mm}$$
$$+ M_{2.G} \cdot \frac{cc_{\text{stag}}^2}{16 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}} \dots$$
$$+ g_{\text{platta}} \cdot \frac{5 \cdot cc_{\text{stag}}^4}{384 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}}$$

Slutlig:

$$P_{\text{fin.G}} := P_{\text{inst.G}} \cdot (1 + k_{\text{def}}) \quad \text{T9-8}$$

$$P_{\text{fin.G}} = 7.13 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Av trafiklast

Momentan:

$$P_{\text{inst.Q}} := M_{1.Q} \cdot \frac{cc_{\text{stag}}^2}{16 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}} \dots \quad P_{\text{inst.Q}} = 11.09 \cdot \text{mm}$$
$$+ M_{2.Q} \cdot \frac{cc_{\text{stag}}^2}{16 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}} \dots$$
$$+ q_{\text{platta}} \cdot \frac{5 \cdot cc_{\text{stag}}^4}{384 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}} \dots$$
$$+ P_{\text{platta}} \cdot \frac{cc_{\text{stag}}^3}{48 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}}$$

Slutlig:

$$P_{\text{fin.Q}} := P_{\text{inst.Q}} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{\text{def}}) \quad \text{T9-9}$$

$$P_{\text{fin.Q}} = 13.31 \cdot \text{mm}$$

Total nedböjning i plattan

$$P_{\text{platta}} := P_{\text{fin.G}} + P_{\text{fin.Q}} \quad \text{T9-10}$$

$$P_{\text{platta}} = 1.4 \cdot \text{cm}$$

Bågarna och förstyrningsbalkarna

Beräkningsgången för nedböjning av båge och förstyrningsbalk följer *Stål- och samverkans broar*.

Tyngdpunkt:
$$h_{tp} := \frac{y\left(\frac{L}{2}\right) \cdot A_{bå} + \frac{h_{fbalk}}{2} \cdot A_{fbalk}}{A_{bå} + A_{fbalk}} \quad h_{tp} = 10.2 \text{ m}$$

Yttröghetsmoment:
$$I_{tot} := I_{bå} + A_{bå} \cdot \left(y\left(\frac{L}{2}\right) - h_{tp} \right)^2 \dots \quad I_{tot} = 22.4 \text{ m}^4$$

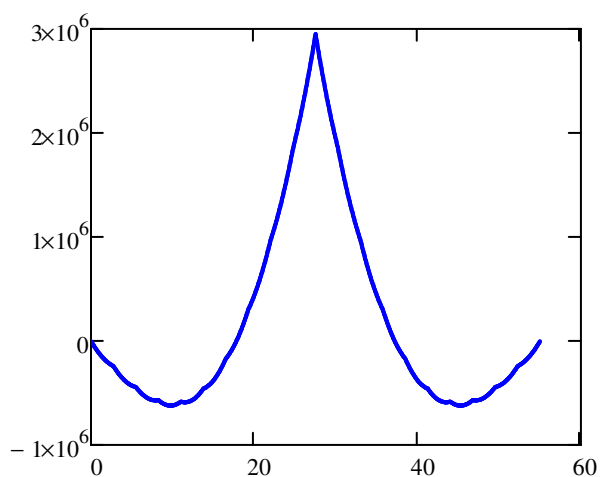
$$+ \frac{b_{fbalk} \cdot h_{fbalk}^3}{12} \dots$$

$$+ A_{fbalk} \cdot \left(h_{tp} - \frac{h_{fbalk}}{2} \right)^2$$

Influenslinje för momentet
i mittpunkten:

$$M_{bå}(d) := M_{bå,e}(d) \dots$$

$$+ P \cdot L \cdot (M_x(d, 0.5 \cdot L))$$



Figur 32. Influenslinje för momentet i mittpunkten

Elastiska linjens ekvation ger: $w_I(d) := \int_0^L \int_0^L M_{b\grave{a}}(d) \, dd \, dd$

Nedböjning: $P_{b\grave{a}} := \frac{w_I(0.5 \cdot L)}{E_{m,gl} \cdot I_{tot}}$ $P_{b\grave{a}} = 1.688 \cdot \text{mm}$

Total nedböjning mittpunkten

$$P_{0.5} := P_{platta} + P_{tbalk} \dots + P_{stag} + P_{b\grave{a}} \quad P_{0.5} = 8.5 \cdot \text{cm}$$

Maximal tillåten nedböjning: $P_{dim} := \frac{L}{400}$ $P_{dim} = 13.75 \cdot \text{cm}$

$$\frac{P_{0.5}}{P_{dim}} = 0.618 \quad \text{Nedböjningen är acceptabel!}$$

Nedböjning i femtedelspunkten

Tvärbalk

Samma som för fallet med nedböjning i mitten, förutom längden på staget.

$$P_{tbalk,0.2L} := P_{tbalk} = 4.88 \cdot \text{cm}$$

Stag

Annan längd på stag på stag ger annan nedböjning.

$$P_{stag,0.2L} := \epsilon_{stag} \cdot y(0.2 \cdot L) = 1.31 \cdot \text{cm}$$

Platta

Stödmoment hämtade från bilaga 5: CALFEM-beräkningar:

$$M_{1,G,0.2L} := 1.207 \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{2,G,0.2L} := 1.181 \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{1,Q,0.2L} := 40.319 \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{2,Q,0.2L} := 50.042 \text{kN} \cdot \text{m}$$

Nedböjning

Nedböjningen fås från elementarfall.

Av egenvikt

Momentan:

$$P_{\text{inst.G.0.2L}} := M_{1.\text{G.0.2L}} \cdot \frac{cc_{\text{stag}}^2}{16 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}} \dots$$
$$+ M_{2.\text{G.0.2L}} \cdot \frac{cc_{\text{stag}}^2}{16 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}} \dots$$
$$+ g_{\text{platta}} \cdot \frac{5 \cdot cc_{\text{stag}}^4}{384 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}}$$

$$P_{\text{inst.G.0.2L}} = 0.22 \cdot \text{mm}$$

Slutlig:

$$P_{\text{fin.G.0.2L}} := P_{\text{inst.G.0.2L}} \cdot (1 + k_{\text{def}}) \quad \text{T9-8}$$

$$P_{\text{fin.G.0.2L}} = 0.67 \cdot \text{mm}$$

Av trafiklast

Momentan:

$$P_{\text{inst.Q.0.2L}} := M_{1.\text{Q.0.2L}} \cdot \frac{cc_{\text{stag}}^2}{16 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}} \dots$$
$$+ M_{2.\text{Q.0.2L}} \cdot \frac{cc_{\text{stag}}^2}{16 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}} \dots$$
$$+ q_{\text{platta}} \cdot \frac{5 \cdot cc_{\text{stag}}^4}{384 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}} \dots$$
$$+ P_{\text{platta}} \cdot \frac{cc_{\text{stag}}^3}{48 \cdot E_{\text{m.lvls}} \cdot I_{\text{platta}}}$$

$$P_{\text{inst.Q.0.2L}} = 1.03 \cdot \text{cm}$$

$$P_{\text{fin.Q.0.2L}} := P_{\text{inst.Q.0.2L}} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{\text{def}}) \quad \text{T9-9}$$

$$P_{\text{fin.Q.0.2L}} = 1.241 \cdot \text{cm}$$

Total nedböjning för plattan

$$P_{\text{platta.0.2L}} := P_{\text{fin.G}} + P_{\text{fin.Q}} \quad \text{T9-10}$$

$$P_{\text{platta.0.2L}} = 1.4 \cdot \text{cm}$$

Bågarna och förstärkningsbalkarna

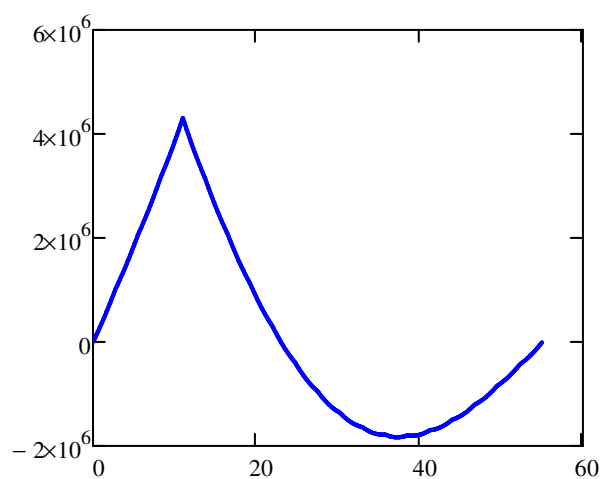
Tyngpunkt:
$$h_{tp.0.2L} := \frac{y\left(\frac{L}{5}\right) \cdot A_{bå} \dots + \frac{h_{fbalk}}{2} \cdot A_{fbalk}}{A_{bå} + A_{fbalk}} \quad h_{tp.0.2L} = 6.55 \text{ m}$$

Yttröghetsmoment:
$$I_{tot.0.2L} := I_{bå} \dots + A_{bå} \cdot \left(y\left(\frac{L}{5}\right) \dots + h_{tp.0.2L} \right)^2 \dots + \frac{b_{fbalk} \cdot h_{fbalk}^3}{12} \dots + A_{fbalk} \cdot \left(h_{tp} - \frac{h_{fbalk}}{2} \right)^2$$

$$I_{tot.0.2L} = 210.4 \text{ m}^4$$

Influenslinje för momentet i femtedelspunkten:

$$M_{bå.0.2L}(d) := M_{bå.e}(d) \dots + P \cdot L \cdot (M_x(d, 0.2 \cdot L))$$



Figur 32. Influenslinje för momentet i mittpunkten

Elastiska linjens ekvation ger: $w_{I.0.2L}(d) := \int_0^L \int_0^L M_{b\grave{a}.0.2L}(d) \, dd \, dd$

$$P_{b\grave{a}.0.2L} := \frac{w_{I.0.2L}(0.2 \cdot L)}{E_{m,gl} \cdot I_{tot}} \quad P_{b\grave{a}.0.2L} = 1.44 \cdot \text{mm}$$

Total nedböjning i femtedelspunkten

$$P_{0.2} := P_{platta.0.2L} + P_{tbalk.0.2L} \dots \quad P_{0.2} = 7.74 \cdot \text{cm}$$

$$+ P_{stag.0.2L} + P_{b\grave{a}.0.2L}$$

$$\frac{P_{0.2}}{P_{dim}} = 0.563 \quad \text{Nedböjning är acceptabel!}$$

Sidobro

Kontroll utförs på endast längsgående balkar eftersom det i tvärled endast är en-metersspann.

Yttröghetsmoment: $I_{sidob} := \frac{b_{balk} \cdot h_{balk}^3}{12} \quad I_{sidob} = 0.049 \text{m}^4$

Laster

Egentyngd: $g_{sidob.nb} := \frac{g_{sidob}}{\gamma_G} \quad g_{sidob.nb} = 4.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Lastfall 1 för sidobron är värst för nedböjning

Utbredd trafiklast: $q_{1d.b.nb} := \frac{q_{1d.b}}{\gamma_Q} \quad q_{1d.b.nb} = 3.52 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Axellast: $Q_{1d.b.nb} := \frac{Q_{1d.b}}{\gamma_Q} = 225 \cdot \text{kN} \quad Q_{1d.b.nb} = 225 \cdot \text{kN}$

Nedböjning

Nedböjning fås av elementarfall.

Av egentyngd

Momentan:
$$P_{\text{inst.G.sido}} := g_{\text{sidob}} \cdot \frac{5 \cdot l_{\text{balk}}^4}{384 \cdot E_{\text{m.gl}} \cdot I_{\text{sidob}}}$$

$P_{\text{inst.G.sido}} = 2.3 \cdot \text{mm}$

Slutlig:
$$P_{\text{fin.G.sido}} := P_{\text{inst.G.sido}} \cdot (1 + k_{\text{def}}) \quad \text{T9-8}$$

$P_{\text{fin.G.sido}} = 6.9 \cdot \text{mm}$

Av trafiklast

Momentan:
$$P_{\text{inst.Q.sid}} := q_{1\text{d.b.nb}} \cdot \frac{5 \cdot l_{\text{balk}}^4}{384 \cdot E_{\text{m.gl}} \cdot I_{\text{sidob}}} + Q_{1\text{d.b.nb}} \cdot \frac{l_{\text{balk}}^3}{48 \cdot E_{\text{m.gl}} \cdot I_{\text{sidob}}}$$

$P_{\text{inst.Q.sid}} = 1.63 \cdot \text{cm}$

Slutlig:
$$P_{\text{fin.Q.sid}} := P_{\text{inst.Q.sid}} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{\text{def}}) \quad \text{T9-9}$$

$P_{\text{fin.Q.sid}} = 1.96 \cdot \text{cm}$

Total nedböjning

$$P_{\text{sidob}} := P_{\text{fin.G.sido}} + P_{\text{fin.Q.sid}} \quad \text{T9-10}$$

$P_{\text{sidob}} = 2.65 \cdot \text{cm}$

Maximal tillåten nedböjning:
$$P_{\text{dim.sido}} := \frac{l_{\text{balk}}}{400}$$

$P_{\text{dim.sido}} = 3.254 \cdot \text{cm}$

$$\frac{P_{\text{sidob}}}{P_{\text{dim.sido}}} = 0.813$$

Nedböjning är acceptabel!

12. Kontroll av konstruktionshöjd

Konstruktionshöjd hämtas från bilaga 3: Beräkning av konstruktionshöjd:

$$z_{\text{konstr.max}} := 0.77\text{m}$$

I konstruktionshöjden inkluderas plattan, tvärbalkarna, beläggningen, och nedböjningen i femtedelspunkten, vilken ligger över vägbanan.

$$z_{\text{khojd}} := t_{\text{platta}} + t_{\text{slit}} \dots \quad z_{\text{khojd}} = 0.757\text{m}$$
$$+ t_{\text{PGJA}} + h_{\text{svetsp}} + p_{0.2}$$

$$\frac{z_{\text{khojd}}}{z_{\text{konstr.max}}} = 0.984$$

Kravet på
konstruktionshöjd
uppnås!

13. Översiktlig längd-, vikt- och volymeräkning

Tvärbalkar

Antal tvärbalkar:	$n_{\text{tbalk}} := n_{\text{stag}} + 2$	$n_{\text{tbalk}} = 21$
Egentyngd:	$g_{\text{tbalk}} = 4.725 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	
Längd tvärbalk	$B_t = 9.03 \text{ m}$	
Egentyngd tvärbalkar:	$G_{\text{tbalk.tot}} := n_{\text{tbalk}} g_{\text{tbalk}} \cdot B_t$	$G_{\text{tbalk.tot}} = 895.9 \cdot \text{kN}$

Broplatta mittspann

Tjocklek:	$t_{\text{platta}} = 0.24 \text{ m}$	
Bredd:	$B = 8 \text{ m}$	
Längd:	$L = 55 \text{ m}$	
Volym:	$V_{\text{platta}} := t_{\text{platta}} \cdot B \cdot L$	$V_{\text{platta}} = 105.6 \cdot \text{m}^3$

Stag

Tvärsnittsarea:	$A_{\text{stag}} = 3.019 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	
Medelhöjd:	$h_{\text{stag.m}} = 8.556 \text{ m}$	
Egentyngd:	$G_{\text{stag}} := n_{\text{stag}} \cdot A_{\text{stag}} \cdot h_{\text{stag.m}} \cdot \gamma_{\text{stål}}$	$G_{\text{stag}} = 37.8 \cdot \text{kN}$

Förstyvningsbalk

Antal balkar:	$n_{\text{fbalk}} := 2$	
Tvärsnittsarea:	$A_{\text{fbalk}} = 0.194 \text{ m}^2$	
Längd:	$L = 55 \text{ m}$	
Volym:	$V_{\text{fbalk}} := n_{\text{fbalk}} \cdot A_{\text{fbalk}} \cdot L$	$V_{\text{fbalk}} = 21.3 \cdot \text{m}^3$

Båge

Antal bågar:	$n_{\text{båge}} := 2$	
Tvårsnittarean:	$A_{\text{bå}} = 0.929 \text{ m}^2$	
Längd:	$L_{\text{båge}} = 61.562 \text{ m}$	
Volym:	$V_{\text{båge}} := n_{\text{båge}} \cdot A_{\text{bå}} \cdot L_{\text{båge}}$	$V_{\text{båge}} = 114.4 \text{ m}^3$

Längsgående balkar sidospänn

Antal balkar:	$n_{\text{balk}} := 18$	
Längd:	$l_{\text{balk}} = 13.018 \text{ m}$	
Höjd:	$h_{\text{balk}} = 1.395 \text{ m}$	
Bredd:	$b_{\text{balk}} = 0.215 \text{ m}$	
Volym:	$V_{\text{balk}} := n_{\text{balk}} \cdot l_{\text{balk}} \cdot h_{\text{balk}} \cdot b_{\text{balk}}$	$V_{\text{balk}} = 70.3 \cdot \text{m}^3$

Broplatta sidospänn

Antal sidospänn:	$n_{\text{sidospänn}} := 2$	
Tjocklek:	$t_{\text{pl}} = 0.27 \text{ m}$	
Volym:	$V_{\text{platta.sido}} := n_{\text{sidospänn}} \cdot t_{\text{pl}} \cdot B \cdot l_{\text{balk}}$	$V_{\text{platta.sido}} = 56.2 \cdot \text{m}^3$

Stöd

Antal stöd:	$n_{\text{stöd}} := 4$	
Höjd:	$h_{\text{stöd}} = 5.936 \text{ m}$	
Bredd:	$b_{\text{stöd}} = 0.95 \text{ m}$	
Tvårsnittarean:	$A_{\text{stöd}} := b_{\text{stöd}}^2$	
Volym:	$V_{\text{stöd}} := n_{\text{stöd}} \cdot A_{\text{stöd}} \cdot h_{\text{stöd}}$	$V_{\text{stöd}} = 21.4 \cdot \text{m}^3$

Grundläggning

Grundläggningsdimensioneringen genomförs mycket översiktligt för att få fram en ungefärlig kostnad. För att vara på säkra sidan grundläggs för maximal last på varje stöd.

Maximal last på ett stöd: $Q_{\text{stöd}} = 5.534 \cdot \text{MN}$

Kapacitet för en stödpåle: $f_{\text{påle}} := 800 \text{ kN}$

Antal pålar per stöd: $n_{\text{påle}} := \frac{Q_{\text{stöd}}}{f_{\text{påle}}}$ $n_{\text{påle}} = 6.9$

Valt antal pålar per stöd: $n_{\text{påle}} := 7$

Sträcka till fast berg: $s_{\text{påle}} := 45 \text{ m}$

Total längd på pålar: $S_{\text{påle}} := n_{\text{påle}} \cdot n_{\text{stöd}} \cdot s_{\text{påle}}$ $S_{\text{påle}} = 1.26 \cdot \text{km}$

Stålplåtar i förband

Förband mellan båge och förstyrningsbalk

Antal plåtar: $n_{\text{plåt}} := 8$

Tjocklek: $t_{\text{plåt}} := 10 \text{ mm}$

Bredd: $b_{\text{plåt}} := 1500 \text{ mm}$

Höjd: $h_{\text{plåt}} := 500 \text{ mm}$

Volym: $V_{\text{plåt}} := n_{\text{plåt}} \cdot t_{\text{plåt}} \cdot b_{\text{plåt}} \cdot h_{\text{plåt}}$ $V_{\text{plåt}} = 0.06 \cdot \text{m}^3$

Tyngd: $\xi_{\text{plåt},1} := V_{\text{plåt}} \cdot \gamma_{\text{stål}}$ $\xi_{\text{plåt},1} = 4.62 \cdot \text{kN}$

Förband mellan bågdelar

Antal plåtar:	$n_{\text{plåt}} := 8$	
Tjocklek:	$t_{\text{plåt}} := 10\text{mm}$	
Bredd:	$b_{\text{plåt}} := 1000\text{mm}$	
Höjd:	$h_{\text{plåt}} := 450\text{mm}$	
Volym:	$V_{\text{plåt}} := n_{\text{plåt}} \cdot t_{\text{plåt}} \cdot b_{\text{plåt}} \cdot h_{\text{plåt}}$	$V_{\text{plåt}} = 0.036 \cdot \text{m}^3$
Tyngd:	$g_{\text{plåt},2} := V_{\text{plåt}} \cdot \gamma_{\text{stål}}$	$g_{\text{plåt},2} = 2.77 \cdot \text{kN}$

Förband mellan förstyrningsbalkens delar

Antal plåtar:	$n_{\text{plåt}} := 2$	
Tjocklek:	$t_{\text{plåt}} := 10\text{mm}$	
Bredd:	$b_{\text{plåt}} := 1000\text{mm}$	
Höjd:	$h_{\text{plåt}} := 450\text{mm}$	
Volym:	$V_{\text{plåt}} := n_{\text{plåt}} \cdot t_{\text{plåt}} \cdot b_{\text{plåt}} \cdot h_{\text{plåt}}$	$V_{\text{plåt}} = 9 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$
Tyngd:	$g_{\text{plåt},3} := V_{\text{plåt}} \cdot \gamma_{\text{stål}}$	$g_{\text{plåt},3} = 693 \text{ N}$

Infästning mellan stag och tvärbalk

Antal plåtar: $n_{\text{stag}} = 19$

Tjocklek: $t_1 := 30\text{mm}$

$$t_2 := 22\text{mm}$$

$$t_3 := 44\text{mm}$$

Bredd: $b_1 := 278\text{mm}$

$$b_2 := 140\text{mm}$$

$$b_3 := 140\text{mm}$$

Längd: $l_1 := 302\text{mm}$

$$l_2 := 45\text{mm}$$

$$l_3 := 403\text{mm}$$

Volym: $V_{\text{inf}} := 2 \cdot n_{\text{stag}} \left(\begin{array}{l} t_1 \cdot b_1 \cdot l_1 \dots \\ + 2 \cdot t_2 \cdot b_2 \cdot l_2 \dots \\ + t_3 \cdot b_3 \cdot l_3 \end{array} \right) \quad V_{\text{inf}} = 0.201 \cdot \text{m}^3$

Tyngd: $g_{\text{plåt.4}} := V_{\text{plåt}} \cdot \gamma_{\text{stål}} = 0.693 \cdot \text{kN}$

Total ståltyngd

$$g_{\text{stål}} := g_{\text{plåt.1}} + g_{\text{plåt.2}} \dots + g_{\text{plåt.3}} + g_{\text{plåt.4}} \quad g_{\text{stål}} = 8.78 \cdot \text{kN}$$

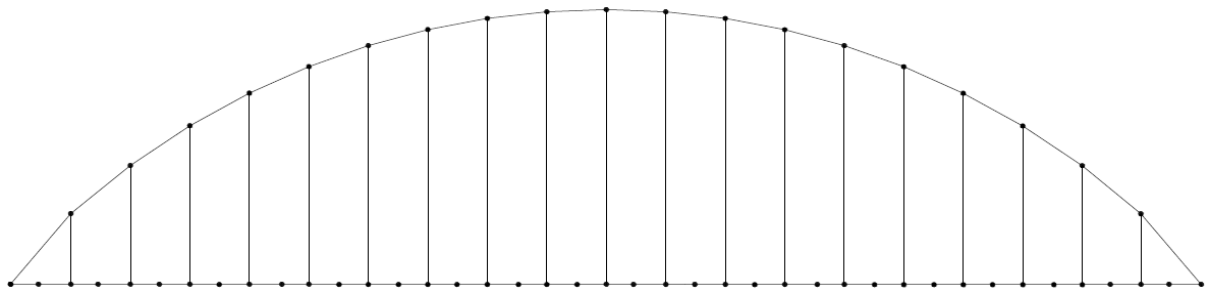
Bilaga 5: Beräkningar i CALFEM

Innehållsförteckning

1. Beräkning av maximal tvärkraft och moment i mittspannets broplatta	1
2. Beräkning av snittkrafter och moment i bågen	12
3. Beräkning av filfaktorer för ytterspannets balkbro	23
4. Beräkning av reaktionskrafter för ytterspannets broplatta	27

1. Beräkning av maximal tvärkraft och moment i mittspannets broplatta

Beräkningar av tvärkraft och moment kan göras i samma program. Det som skiljer beräkningarna åt är att de utbredda trafiklasterna inte ska verka på alla element för att ge maximalt moment. Detta leder till att assembleringen av styvhetsmatrisen på sidan 9 kommer skilja sig åt i respektive fall. Även olycksfallet där ett hängstag går sönder har beräknats i programmet genom att första stagelementet plockats. Nedan redovisas normalfallet som ger maximalt moment.



Figur 1. Beräkningsmodell.

```
%-----  
% Indata  
% Hämtade från bilaga 4: Preliminärdimensionering  
%-----  
  
%E-modul limträ  
Egl=11.8e9;  
%E-modul Kerto  
Elv1=11.6e9;  
%E-modul stål  
Es=210e9;  
  
%Tvärsnittsarea broplatta  
Ap=0.24;  
%Tvärsnittsarea hängstag  
As=3.019e-3;  
%Tvärsnittsarea förstyrningsbalk  
Af=0.194;  
%Tvärsnittsarea båge  
Ab=0.929;  
  
%Yttröghetsmoment broplatta  
Ip=1.152e-3;  
%Yttröghetsmoment båge  
Ib=0.16;  
  
%Längd balkelement platta  
Lp=1.375;  
%Längd balkelement båge  
L2=2.75;
```

```

%Längd bro
Lbro=55;

%Pilhöjd båge
ph=Lbro/4.5;
%Bågens form
y=@(x) -4*((ph*x.^2)/Lbro^2)+4*((ph*x)/Lbro);
yprim=@(x) -8*((ph*x)/Lbro^2)+4*(ph/Lbro);

%Utbredd trafiklast
q=9.45e3;
%Axellast
Q=405e3;
%Egentyngd platta inklusive beläggning
gp=2.547e3;
%Egentyngd tvärbalk
gt=17.902e3;
%Egentyngd hängstag
gs=0.279e3;
%Egentyngd båge
gb=4.465e3;

%Antal balkelement i plattan
nep=40;
%Antal balkelement i bågen
neb=20;
%Antal stag
nes=19;

%Definerar broplattans egenskaper
epp=[Elvl Ap Ip];
%Definerar bågens egenskaper
epb=[Egl Ab Ib];
%Definerar förstavningsbalkens egenskaper
epf=[Egl Af];
%Definerar hängstagens egenskaper
eps=[Es As];

%Definerar utbredd last på broplattans element
eqp1=[0 -q-gp];
eqp2=[0 -gp];
%Definerar utbredd last på bågens element
eqb=[0 -gb];

%-----
% For-loop som tar fram var axellasten ska placeras för att ge maximala
% snittkrafter och moment i plattan
%-----

%Preallokerar utrymme för vektorer där maximala snittkrafterna ska placeras
Mpmax=zeros(1,nep);
Vpmax=zeros(1,nep);

%Första frihetsgraden som lasten placeras på
j=2;
for i=1:nep+1

    %Placerar tvärbalkarnas och hängstagens egentyngder som nodlaster
    f=zeros(3*(nep+nes+3),1);

```

```

k=125;
for l=1:nes
    f(k)=-gt-gs*y(l*L2);
    k=k+3;
end

%Placerar axellasten som nodlast
f(j)=-Q;

%Broplattelementens topologimatrix
Edofp=zeros(nep,7);

k=1;
for l=1:nep
    Edofp(l,1)=1;
    Edofp(l,2)=k;
    Edofp(l,3)=k+1;
    Edofp(l,4)=k+2;
    Edofp(l,5)=k+3;
    Edofp(l,6)=k+4;
    Edofp(l,7)=k+5;

    k=k+3;
end

%Hängstagelementens topologimatrix
Edofs=zeros(nes,5);

k=41;
l=7;
m=124;
for n=1:nes
    Edofs(n,1)=k;
    Edofs(n,2)=l;
    Edofs(n,3)=l+1;
    Edofs(n,4)=m;
    Edofs(n,5)=m+1;

    k=k+1;
    l=l+6;
    m=m+3;
end

%Bågelementens topologimatrix
Edofb=zeros(neb,7);

Edofb(1,1)=60;
Edofb(1,2)=181;
Edofb(1,3)=182;
Edofb(1,4)=183;
Edofb(1,5)=124;
Edofb(1,6)=125;
Edofb(1,7)=126;

k=124;
l=61;

```

```

for m=2:neb
    Edofb(m,1)=1;
    Edofb(m,2)=k;
    Edofb(m,3)=k+1;
    Edofb(m,4)=k+2;
    Edofb(m,5)=k+3;
    Edofb(m,6)=k+4;
    Edofb(m,7)=k+5;

    k=k+3;
    l=1+1;
end

Edofb(20,1)=79;
Edofb(20,2)=178;
Edofb(20,3)=179;
Edofb(20,4)=180;
Edofb(20,5)=184;
Edofb(20,6)=185;
Edofb(20,7)=186;

%Förstyvningsbalkelementens topologimatrix
Edoff=zeros(1,5);

Edoff(1,1)=80;
Edoff(1,2)=181;
Edoff(1,3)=182;
Edoff(1,4)=184;
Edoff(1,5)=185;

%Broplattelementens x-koordinatvektor
Exp=zeros(nep,2);

k=0;
for l=1:nep
    Exp(l,1)=k*Lp;
    Exp(l,2)=(k+1)*Lp;

    k=k+1;
end

%Broplattelementens y-koordinatvektor
Eyp=zeros(nep,2);

%Bågelementens x-koordinatvektor
Exb=zeros(neb,2);

k=0;
for l=1:neb
    Exb(l,1)=k*L2;
    Exb(l,2)=(k+1)*L2;

    k=k+1;
end

```

```

%Bågelementens y-koordinatvektorer
Eyb=zeros (neb, 2) ;

for k=1:neb
    Eyb (k, 1)=y (Exb (k, 1)) ;
    Eyb (k, 2)=y (Exb (k, 2)) ;
end

%Hängstagelementens x-koordinatvektorer
Exs=zeros (nes, 2) ;

k=2*Lp;
for l=1:nes
    Exs (l, 1)=k;
    Exs (l, 2)=k;

    k=k+2*Lp;
end

%Hängstagelementens y-koordinatvektorer
Eys=zeros (nes, 2) ;

for k=1:nes
    Eys (k, 1)=0;
    Eys (k, 2)=y (Exs (k, 1)) ;
end

%Förstyvningsbalkens x-koordinatvektor
Exf=[0 Lbro];
%Förstyvningsbalkens y-koordinatvektor
Eyf=[0 0];

%Assemblerar broplattelementens styvhetsmatrix
K=zeros (3* (nep+nes+3) , 3* (nep+nes+3)) ;

for k=1:2
    [Ke, fe]=beam2e (Exp (k, :), Eyp (k, :), epp, eqp1) ;
    [K, f]=assem (Edofp (k, :), K, Ke, f, fe) ;
end

for k=3:4
    [Ke, fe]=beam2e (Exp (k, :), Eyp (k, :), epp, eqp2) ;
    [K, f]=assem (Edofp (k, :), K, Ke, f, fe) ;
end

for k=5:nep
    [Ke, fe]=beam2e (Exp (k, :), Eyp (k, :), epp, eqp1) ;
    [K, f]=assem (Edofp (k, :), K, Ke, f, fe) ;
end

%Assemblerar bågelementens styvhetsmatrix
for k=1:neb
    [Ke, fe]=beam2e (Exb (k, :), Eyb (k, :), epb, eqb) ;
    [K, f]=assem (Edofb (k, :), K, Ke, f, fe) ;
end

```



```

%Assemblerar hängstagelementens styvhetsmatris
for k=1:nes
    Ke=bar2e(Exs(k,:),Eys(k,:),eps);
    K=assem(Edofs(k,:),K,Ke);
end

%Assemblerar förstyrningsbalkens styvhetsmatris
Ke=bar2e(Exf,Eyf,epf);
K=assem(Edoff,K,Ke);

%Anger randvillkoren
bc=[1 0; 2 0; 122 0; 181 0; 182 0; 185 0;];

%Beräknar nodförskjutningar och reaktionskrafter
[a,r]=solveq(K,f,bc);

%Beräknar broplattans elementförskjutningar
Edp=extract(Edofp,a);
%Beräknar bågens elementförskjutningar
Edb=extract(Edofb,a);
%Beräknar hängstagens elementförskjutningar
Eds=extract(Edofs,a);
%Beräknar förstyrningsbalkens elementförskjutningar
Edf=extract(Edoff,a);

%Beräknar normalkrafter i broplattan
Vp=zeros(40,nep);
Mp=zeros(40,nep);

for k=1:2
    es=beam2s(Exp(k,:),Eyp(k,:),epp,Edp(k,:),eqp1,40);
    Vp(:,k)=es(:,2);
    Mp(:,k)=es(:,3);
end

for k=3:4
    es=beam2s(Exp(k,:),Eyp(k,:),epp,Edp(k,:),eqp2,40);
    Vp(:,k)=es(:,2);
    Mp(:,k)=es(:,3);
end

for k=5:nep
    es=beam2s(Exp(k,:),Eyp(k,:),epp,Edp(k,:),eqp1,40);
    Vp(:,k)=es(:,2);
    Mp(:,k)=es(:,3);
end

%Placerar broplattans maximala snittkrafter i vektorer
Vpmax(i)=max(max(abs(Vp)));
Mpmax(i)=max(max(abs(Mp)));

%Anger vilken frihetsgrad axellasten ska placeras i
j=j+3;
end

```

```

%-----
% Samma beräkningar utförs igen för fallet som ger störst moment
%-----

%Tar fram vilken frihetsgrad axellasten ska placeras i för att ge maximalt
%moment i broplattan
Mpmmaxposition=max(Mpmax);
mposition=find(Mpmax==Mpmmaxposition);
%Tar fram vilken frihetsgrad axellasten ska placeras i för att ge maximal
%tvärkraft i bågen
Vpmmaxposition=max(Vpmax);
vposition=find(Vpmax==Vpmmaxposition);

%Placerar tvärbalkarnas och hängstagens egentyngder som nodlaster
f=zeros(3*(nep+nes+3),1);

k=125;
for l=1:nes
    f(k)=-gt-gs*y(l*L2);
    k=k+3;
end

%Placerar axellasten som nodlast
f(2+3*(mposition(1)-1))=-Q;

%Broplattelementens topologimatrix
Edofp=zeros(nep,7);

k=1;
for l=1:nep
    Edofp(l,1)=1;
    Edofp(l,2)=k;
    Edofp(l,3)=k+1;
    Edofp(l,4)=k+2;
    Edofp(l,5)=k+3;
    Edofp(l,6)=k+4;
    Edofp(l,7)=k+5;

    k=k+3;
end

%Hängstagelementens topologimatrix
Edofs=zeros(nes,5);

k=41;
l=7;
m=124;
for n=1:nes
    Edofs(n,1)=k;
    Edofs(n,2)=1;
    Edofs(n,3)=l+1;
    Edofs(n,4)=m;
    Edofs(n,5)=m+1;

    k=k+1;
    l=l+6;
    m=m+3;
end

```

```

%Bågelementens topologimatrix
Edofb=zeros (neb, 7) ;

Edofb (1, 1)=60;
Edofb (1, 2)=181;
Edofb (1, 3)=182;
Edofb (1, 4)=183;
Edofb (1, 5)=124;
Edofb (1, 6)=125;
Edofb (1, 7)=126;

k=124;
l=61;
for m=2:neb
    Edofb (m, 1)=1;
    Edofb (m, 2)=k;
    Edofb (m, 3)=k+1;
    Edofb (m, 4)=k+2;
    Edofb (m, 5)=k+3;
    Edofb (m, 6)=k+4;
    Edofb (m, 7)=k+5;

    k=k+3;
    l=l+1;
end

Edofb (20, 1)=79;
Edofb (20, 2)=178;
Edofb (20, 3)=179;
Edofb (20, 4)=180;
Edofb (20, 5)=184;
Edofb (20, 6)=185;
Edofb (20, 7)=186;

%Förstyvningsbalkelementens topologimatrix
Edoff=zeros (1, 5) ;

Edoff (1, 1)=80;
Edoff (1, 2)=181;
Edoff (1, 3)=182;
Edoff (1, 4)=184;
Edoff (1, 5)=185;

%Broplattelementens x-koordinatvektor
Exp=zeros (nep, 2) ;

k=0;
for l=1:nep
    Exp (l, 1)=k*Lp;
    Exp (l, 2)=(k+1) *Lp;

    k=k+1;
end

%Broplattelementens y-koordinatvektor
Eyp=zeros (nep, 2) ;

```

```

%Bågelementens x-koordinatvektor
Exb=zeros (neb, 2);

k=0;
for l=1:neb
    Exb (l, 1)=k*L2;
    Exb (l, 2)=(k+1) *L2;

    k=k+1;
end

%Bågelementens y-koordinatvektorer
Eyb=zeros (neb, 2);

for k=1:neb
    Eyb (k, 1)=y (Exb (k, 1));
    Eyb (k, 2)=y (Exb (k, 2));
end

%Hängstagelementens x-koordinatvektorer
Exs=zeros (nes, 2);

k=2*Lp;
for l=1:nes
    Exs (l, 1)=k;
    Exs (l, 2)=k;

    k=k+2*Lp;
end

%Hängstagelementens y-koordinatvektorer
Eys=zeros (nes, 2);

for k=1:nes
    Eys (k, 1)=0;
    Eys (k, 2)=y (Exs (k, 1));
end

%Förstyvningsbalkens x-koordinatvektor
Exf=[0 Lbro];
%Förstyvningsbalkens y-koordinatvektor
Eyf=[0 0];

%Assemblerar broplattelementens styvhetsmatris med hänsyn till vilka
%element de utbredda trafiklasterna ska verka på för maximalt moment
K=zeros (3* (nep+nes+3), 3* (nep+nes+3));

for k=1:2
    [Ke, fe]=beam2e (Exp (k, :), Eyp (k, :), epp, eqp1);
    [K, f]=assem (Edofp (k, :), K, Ke, f, fe);
end

for k=3:4
    [Ke, fe]=beam2e (Exp (k, :), Eyp (k, :), epp, eqp2);
    [K, f]=assem (Edofp (k, :), K, Ke, f, fe);
end

```

```

for k=5:nep
    [Ke, fe]=beam2e (Exp (k, :), Eyp (k, :), epp, eqp1);
    [K, f]=assem (Edofp (k, :), K, Ke, f, fe);
end

%Assemblerar broplattelementens styvhetsmatrix
for k=1:neb
    [Ke, fe]=beam2e (Exb (k, :), Eyb (k, :), epb, eqb);
    [K, f]=assem (Edofb (k, :), K, Ke, f, fe);
end

%Assemblerar hängstagelementens styvhetsmatrix
for k=1:nes
    Ke=bar2e (Exs (k, :), Eys (k, :), eps);
    K=assem (Edofs (k, :), K, Ke);
end

%Assemblerar förstyrningsbalkens styvhetsmatrix
Ke=bar2e (Exf, Eyf, epf);
K=assem (Edoff, K, Ke);

%Anger randvillkoren
bc=[1 0; 2 0; 122 0; 181 0; 182 0; 185 0;];

%Beräknar nodförskjutningar och reaktionskrafter
[a, r]=solveq (K, f, bc);

%Beräknar broplattans elementförskjutningar
Edp=extract (Edofp, a);
%Beräknar bågens elementförskjutningar
Edb=extract (Edofb, a);
%Beräknar hängstagens elementförskjutningar
Eds=extract (Edofs, a);
%Beräknar förstyrningsbalkens elementförskjutningar
Edf=extract (Edoff, a);

%Beräknar snittkrafter i broplattan
Vp=zeros (40, nep);
Mp=zeros (40, nep);

for k=1:2
    es=beam2s (Exp (k, :), Eyp (k, :), epp, Edp (k, :), eqp1, 40);
    Vp (:, k)=es (:, 2);
    Mp (:, k)=es (:, 3);
end

for k=3:4
    es=beam2s (Exp (k, :), Eyp (k, :), epp, Edp (k, :), eqp2, 40);
    Vp (:, k)=es (:, 2);
    Mp (:, k)=es (:, 3);
end

for k=5:nep
    es=beam2s (Exp (k, :), Eyp (k, :), epp, Edp (k, :), eqp1, 40);
    Vp (:, k)=es (:, 2);
    Mp (:, k)=es (:, 3);
end

```

```

%Plottar förskjutningar
figure(1)
sfac=scalfact2(Exb,Eyb,Edb,0.5);
eldraw2(Exs,Eys,[1 1 0]);
eldraw2(Exb,Eyb,[1 1 0]);
eldraw2(Exf,Eyf,[1 1 0]);
eldraw2(Exp,Eyp,[1 1 0]);
eldisp2(Exb,Eyb,Edb,[2 2 0],sfac);
eldisp2(Exs,Eys,Eds,[2 2 0],sfac);
eldisp2(Exf,Eyf,Edf,[2 2 0],sfac);
eldisp2(Exp,Eyp,Edp,[2 2 0],sfac);
axis([-3 57 -5 15])

%Plottar momentdiagram
figure(2)
eldraw2(Exs,Eys,[1 1 0]);
eldraw2(Exb,Eyb,[1 1 0]);
eldraw2(Exf,Eyf,[1 1 0]);
sfac=scalfact2(Exp,Eyp,Mp(:,2),5);
for i=1:nep
    eldia2(Exp(i,:),Eyp(i,:),Mp(:,i),[2 1],sfac);
end
axis([-3 57 -8 15])

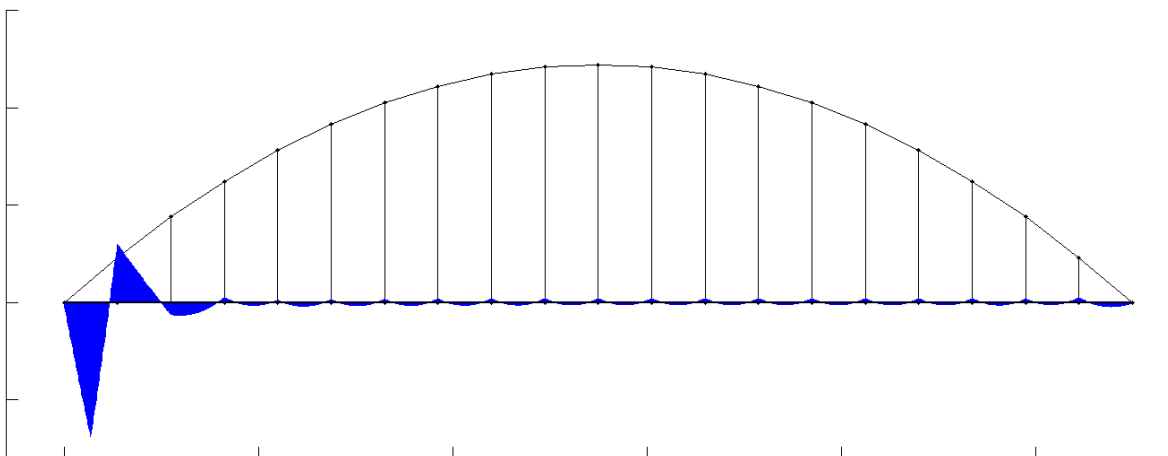
%Plottar tvärkraftsdiagram
figure(3)
eldraw2(Exs,Eys,[1 1 0]);
eldraw2(Exb,Eyb,[1 1 0]);
eldraw2(Exf,Eyf,[1 1 0]);
sfac=scalfact2(Exp,Eyp,Vp(:,2),5);
for i=1:nep
    eldia2(Exp(i,:),Eyp(i,:),Vp(:,i),[2 1],sfac);
end
axis([-3 57 -8 15])

%Största momentet och tvärkraften i plattan
Mmax=max(max(abs(Mp)))

```

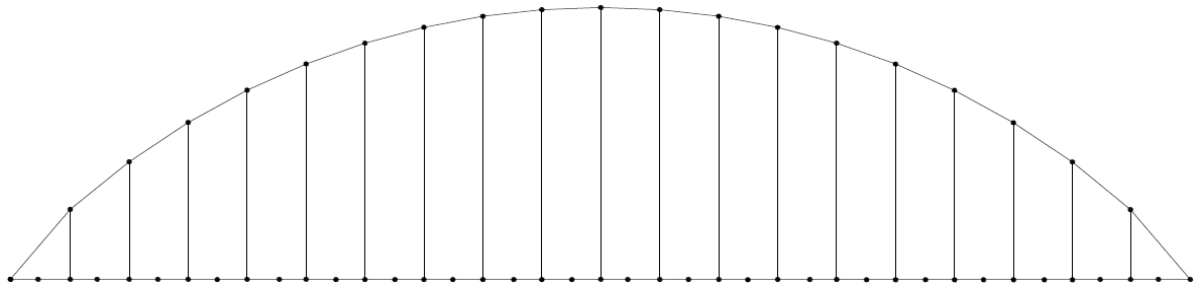
Mmax =

2.3787e+005



Figur 2. Momentdiagram för fallet med störst moment i plattan.

2. Beräkning av snittkrafter och moment i bågen



Figur 3. Beräkningsmodell.

```
%-----  
% Indata  
% Hämtade från bilaga 4: Preliminärdimensionering  
%-----  
  
%E-modul limträ  
Egl=11.8e9;  
%E-modul Kerto  
Elvl=11.6e9;  
%E-modul stål  
Es=210e9;  
  
%Tvärsnittsarea broplatta  
Ap=1.92;  
%Tvärsnittsarea hängstag  
As=3.019e-3;  
%Tvärsnittsarea förstyrningsbalk  
Af=0.194;  
%Tvärsnittsarea båge  
Ab=0.929;  
  
%Yttröghetsmoment broplatta  
Ip=9.216e-3;  
%Yttröghetsmoment båge  
Ib=0.16;  
  
%Längd balkelement platta  
lp=1.375;  
%Längd balkelement båge  
L2=2.75;  
%Längd bro  
Lbro=55;  
  
%Pilhöjd båge  
ph=Lbro/4.5;  
%Bågens form  
y=@(x) -4*((ph*x.^2)/Lbro^2)+4*((ph*x)/Lbro);  
yprim=@(x) -8*((ph*x)/Lbro^2)+4*(ph/Lbro);  
%Vinkel mellan bågen och horisontallinjen  
theta=@(x) acos(1/sqrt(1+yprim(x)^2));
```

```

%Utbredd trafiklast
q=0.717*47.1e3;
%Axellast
Q=0.651*1.35e6;
%Egentyngd platta inklusive beläggning
gp=0.717*2.038e4;
%Egentyngd tvärbalk
gt=17.902e3;
%Egentyngd hängstag
gs=0.279e3;
%Egentyngd båge
gb=4.465e3;

%Antal balkelement i plattan
nep=40;
%Antal balkelement i bågen
neb=20;
%Antal stag
nes=19;

%Definerar broplattans egenskaper
epp=[Elv1 Ap Ip];
%Definerar bågens egenskaper
epb=[Egl Ab Ib];
%Definerar förstyrningsbalkens egenskaper
epf=[Egl Af];
%Definerar hängstagens egenskaper
eps=[Es As];

%Definerar utbredd last på broplattans element
eqp=[0 -q-gp];
%Definerar utbredd last på bågens element
eqb=[0 -gb];

%-----
% For-loop som tar fram maximala snittkrafter och moment
%-----

%Preallokerar utrymme för kraft- och momentvektorer
Nsmax=zeros(neb,1);
Nfmax=zeros(neb,1);
Nbmax=zeros(neb,1);
Mbmax=zeros(neb,1);
Vbmax=zeros(neb,1);

figure(1)
figure(2)
figure(3)
figure(4)

%Första frihetsgraden som lasten placeras på
j=2;
for i=1:nep+1

    %Placerar tvärbalkarnas egentyngd som nodlaster
    f=zeros(3*(nep+nes+3),1);

```



```

k=8;
for l=1:nes
    f(k)=-gt;
    k=k+6;
end

%Placerar hängstagens egentyngd som nodlaster
k=125;
for l=1:nes
    f(k)=-gs*y(1*L2);
    k=k+3;
end

%Placerar axellasten som nodlast
f(j)=-gt-Q;

%Broplattelementens topologimatrix
Edofp=zeros(nep,7);

k=1;
for l=1:nep
    Edofp(1,1)=1;
    Edofp(1,2)=k;
    Edofp(1,3)=k+1;
    Edofp(1,4)=k+2;
    Edofp(1,5)=k+3;
    Edofp(1,6)=k+4;
    Edofp(1,7)=k+5;

    k=k+3;
end

%Hängstagelementens topologimatrix
Edofs=zeros(nes,5);

k=41;
l=7;
m=124;
for n=1:nes
    Edofs(n,1)=k;
    Edofs(n,2)=l;
    Edofs(n,3)=l+1;
    Edofs(n,4)=m;
    Edofs(n,5)=m+1;

    k=k+1;
    l=l+6;
    m=m+3;
end

%Bågelementens topologimatrix
Edofb=zeros(neb,7);

Edofb(1,1)=60;
Edofb(1,2)=181;
Edofb(1,3)=182;
Edofb(1,4)=183;
Edofb(1,5)=124;
Edofb(1,6)=125;
Edofb(1,7)=126;

```

```

k=124;
l=61;
for m=2:neb
    Edofb(m,1)=1;
    Edofb(m,2)=k;
    Edofb(m,3)=k+1;
    Edofb(m,4)=k+2;
    Edofb(m,5)=k+3;
    Edofb(m,6)=k+4;
    Edofb(m,7)=k+5;

    k=k+3;
    l=l+1;
end

Edofb(20,1)=79;
Edofb(20,2)=178;
Edofb(20,3)=179;
Edofb(20,4)=180;
Edofb(20,5)=184;
Edofb(20,6)=185;
Edofb(20,7)=186;

%Förstyvningsbalkelementens topologimatrix
Edoff=zeros(1,5);

Edoff(1,1)=80;
Edoff(1,2)=181;
Edoff(1,3)=182;
Edoff(1,4)=184;
Edoff(1,5)=185;

%Broplattelementens x-koordinatvektor
Exp=zeros(nep,2);

k=0;
for l=1:nep
    Exp(l,1)=k*Lp;
    Exp(l,2)=(k+1)*Lp;

    k=k+1;
end

%Broplattelementens y-koordinatvektor
Eyp=zeros(nep,2);

%Bågelementens x-koordinatvektor
Exb=zeros(neb,2);

k=0;
for l=1:neb
    Exb(l,1)=k*L2;
    Exb(l,2)=(k+1)*L2;

    k=k+1;
end

```

```

%Bågelementens y-koordinatvektorer
Eyb=zeros (neb, 2) ;

for k=1:neb
    Eyb (k, 1)=y (Exb (k, 1)) ;
    Eyb (k, 2)=y (Exb (k, 2)) ;
end

%Hängstagelementens x-koordinatvektorer
Exs=zeros (nes, 2) ;

k=2*Lp;
for l=1:nes
    Exs (l, 1)=k;
    Exs (l, 2)=k;

    k=k+2*Lp;
end

%Hängstagelementens y-koordinatvektorer
Eys=zeros (nes, 2) ;

for k=1:nes
    Eys (k, 1)=0;
    Eys (k, 2)=y (Exs (k, 1)) ;
end

%Förstyvningsbalkens x-koordinatvektor
Exf=[0 Lbro];
%Förstyvningsbalkens y-koordinatvektor
Eyf=[0 0];

%Assemblerar broplattelementens styvhetsmatris
K=zeros (3* (nep+nes+3) , 3* (nep+nes+3)) ;

for k=1:nep
    [Ke, fe]=beam2e (Exp (k, :), Eyp (k, :), epp, eqp) ;
    [K, f]=assem (Edofp (k, :), K, Ke, f, fe) ;
end

%Assemblerar bågelementens styvhetsmatris
for k=1:neb
    [Ke, fe]=beam2e (Exb (k, :), Eyb (k, :), epb, eqb) ;
    [K, f]=assem (Edofb (k, :), K, Ke, f, fe) ;
end

%Assemblerar hängstagelementens styvhetsmatris
for k=1:nes
    Ke=bar2e (Exs (k, :), Eys (k, :), eps) ;
    K=assem (Edofs (k, :), K, Ke) ;
end

%Assemblerar förstyvningsbalkens styvhetsmatris
Ke=bar2e (Exf, Eyf, epf) ;
K=assem (Edoff, K, Ke) ;

%Anger randvillkoren
bc=[1 0; 2 0; 122 0; 181 0; 182 0; 185 0;];

%Beräknar nodförskjutningar och reaktionskrafter
[a, r]=solveq (K, f, bc) ;

```

```

%Beräknar broplattans elementförskjutningar
Edp=extract(Edofp,a);
%Beräknar bågens elementförskjutningar
Edb=extract(Edofb,a);
%Beräknar hängstagens elementförskjutningar
Eds=extract(Edofs,a);
%Beräknar förstyrningsbalkens elementförskjutningar
Edf=extract(Edoff,a);

%Beräknar normalkrafter i bågelementen
Nb=zeros(40,neb);

for k=1:neb
    es=beam2s(Exb(k,:),Eyb(k,:),epb,Edb(k,:),eqb,40);
    Nb(:,k)=es(:,1);
end

%Beräknar tvärkrafter i bågelementen
Vb=zeros(40,neb);

for k=1:neb
    es=beam2s(Exb(k,:),Eyb(k,:),epb,Edb(k,:),eqb,40);
    Vb(:,k)=es(:,2);
end

%Beräknar moment i bågelementen
Mb=zeros(40,neb);

for k=1:neb
    es=beam2s(Exb(k,:),Eyb(k,:),epb,Edb(k,:),eqb,40);
    Mb(:,k)=es(:,3);
end

%Beräknar normalkrafterna i hängstagen
Ns=zeros(nes,1);

for k=1:nes
    Ns(k,:)=bar2s(Exs(k,:),Eys(k,:),eps,Eds(k,:));
end

%Beräknar normalkrafterna i förstyrningsbalken
Nf=zeros(1,1);

for k=1:nes
    Nf=bar2s(Exf,Eyf,epf,Edf);
end

%Bågens maximala snittkrafter
Nbmax1=max(max(abs(Nb)));
Mbmax1=max(max(abs(Mb)));
Vbmax1=max(max(abs(Vb)));
Nsmax1=max(max(abs(Nb)));

```

```

%Plottar förskjutningar
if Nsmxl>max(Nsmx)+100
    close (1)
    figure(1)
    sfac=scalfact2(Exb,Eyb,Edb,0.5);
    eldraw2(Exs,Eys,[1 1 0]);
    eldraw2(Exb,Eyb,[1 1 0]);
    eldraw2(Exf,Eyf,[1 1 0]);
    eldraw2(Exp,Eyp,[1 1 0]);
    eldisp2(Exb,Eyb,Edb,[2 2 0],sfac);
    eldisp2(Exs,Eys,Eds,[2 2 0],sfac);
    eldisp2(Exf,Eyf,Edf,[2 2 0],sfac);
    eldisp2(Exp,Eyp,Edp,[2 2 0],sfac);
    axis([-3 57 -5 15])
end

%Plottar normalkraftsdiagram
if Nbmax1>max(Nbmax)+100
    close (2)
    figure(2)
    eldraw2(Exs,Eys,[1 1 0]);
    eldraw2(Exb,Eyb,[1 1 0]);
    eldraw2(Exf,Eyf,[1 1 0]);
    sfac=scalfact2(Exb,Eyb,Nb(:,7),0.5);
    for k=1:neb
        eldia2(Exb(k,:),Eyb(k,:),Nb(:,k),[2 1],sfac);
    end
    axis([-3 57 -5 15])
end

%Plottar momentdiagram
if Mbmax1>max(Mbmax)+100
    close (3)
    figure(3)
    eldraw2(Exs,Eys,[1 1 0]);
    eldraw2(Exb,Eyb,[1 1 0]);
    eldraw2(Exf,Eyf,[1 1 0]);
    sfac=scalfact2(Exb,Eyb,Mb(:,20),0.15);
    for k=1:neb
        eldia2(Exb(k,:),Eyb(k,:),Mb(:,k),[2 1],sfac);
    end
    axis([-3 57 -5 15])
end

%Plottar tvärkraftsdiagram
if Vbmax1>max(Vbmax)+100
    close (4)
    figure(4)
    eldraw2(Exs,Eys,[1 1 0]);
    eldraw2(Exb,Eyb,[1 1 0]);
    eldraw2(Exf,Eyf,[1 1 0]);
    sfac=scalfact2(Exb,Eyb,Vb(:,10),0.15);
    for k=1:neb
        eldia2(Exb(k,:),Eyb(k,:),Vb(:,k),[2 1],sfac);
    end
    axis([-3 57 -5 15])
end

```

```

    %Placerar bågens maximala snittkrafter i vektorer
    Nbmax(i)=max(max(abs(Nb)));
    Mbmax(i)=max(max(abs(Mb)));
    Vbmax(i)=max(max(abs(Vb)));
    %Placerar förstavningsbalkens maximala normalkraft i en vektor
    Nfmax(i)=max(abs(Nf));
    %Placerar hängstagens maximala normalkraft i en vektor
    Nsmax(i)=max(abs(Ns));

    %Anger vilken frihetsgrad axellasten ska placeras i
    j=j+3;
end

%Maximalt moment i bågen
Mmax=max(Mbmax)

Mmax =

    3.8630e+006

%Maximal tvärkraft i bågen
Vmax=max(Vbmax)

Vmax =

    5.6308e+005

%Maximal normalkraft i bågen
Nmax=max(Nbmax)

Nmax =

    3.3326e+006

%Maximal normalkraft i förstavningsbalken
Hmax=max(Nfmax)

Hmax =

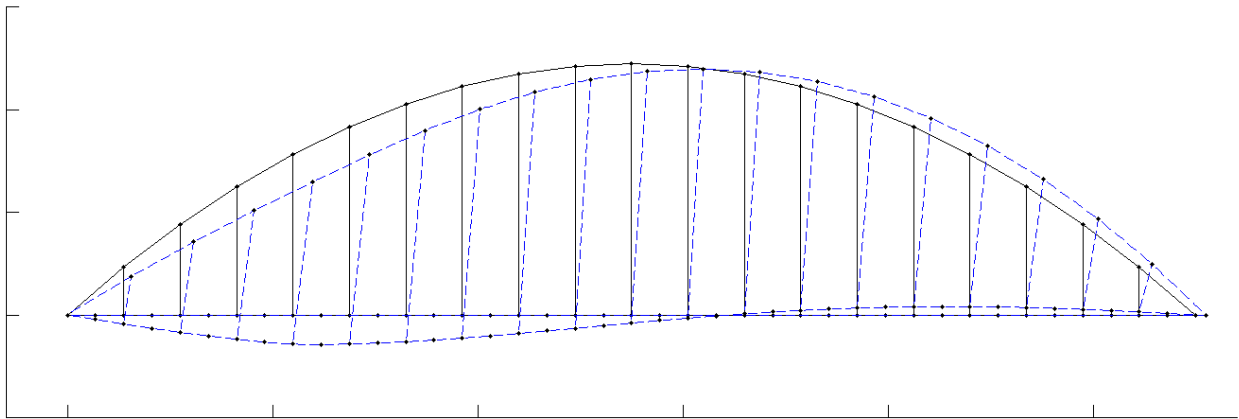
    2.5958e+006

%Maximal normalkraft i stagen
Smax=max(Nsmax)

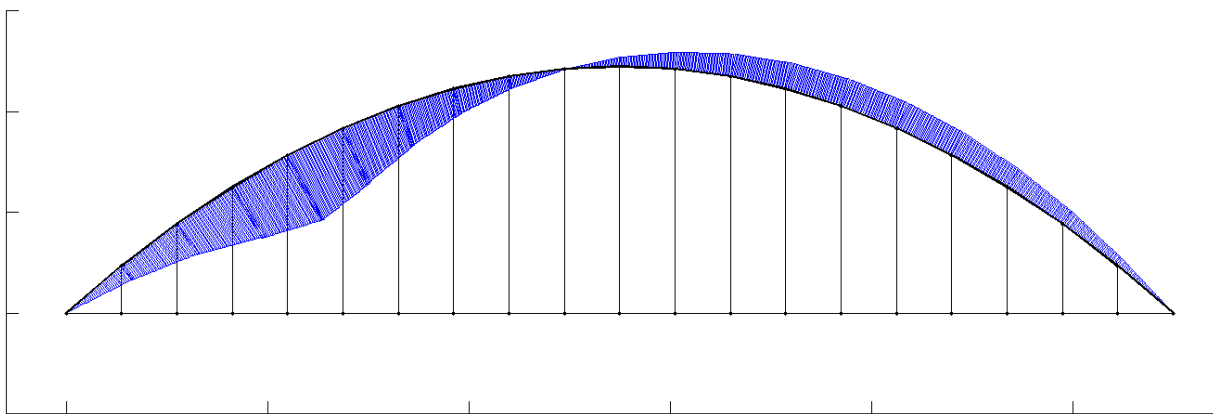
Smax =

    8.8233e+005

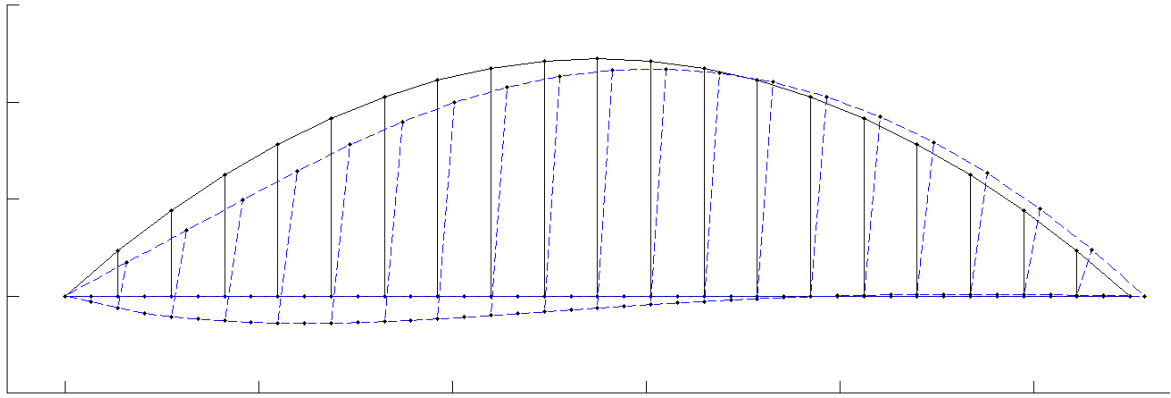
```



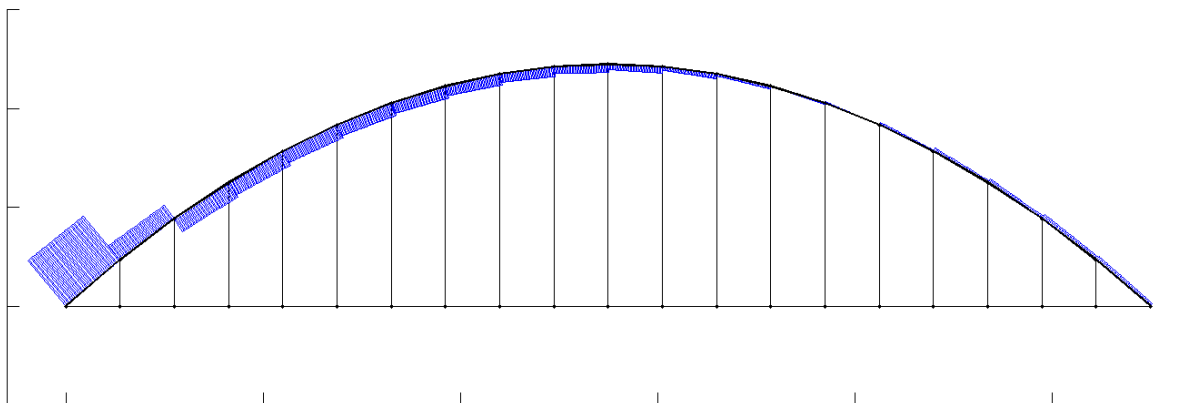
Figur 4. Deformationsmönster för fallet med maximalt moment i bågen.



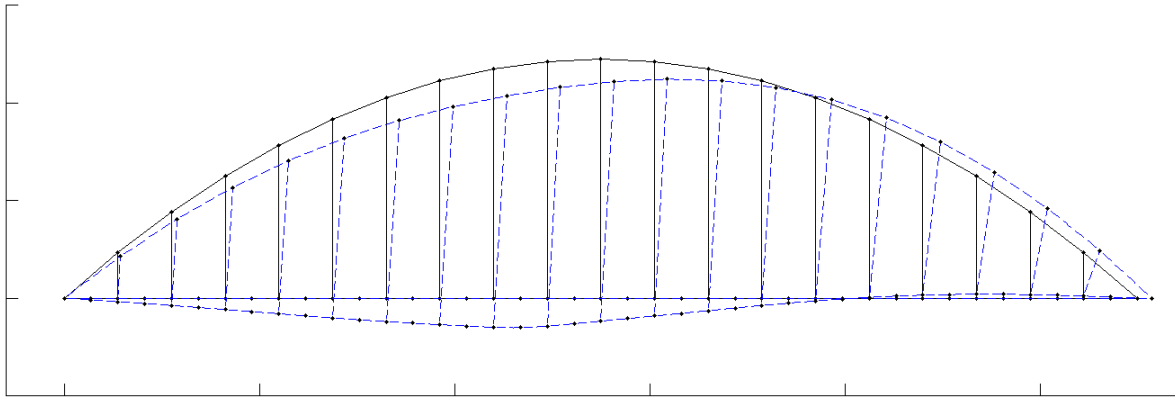
Figur 5. Momentdiagram för fallet med maximalt moment i bågen.



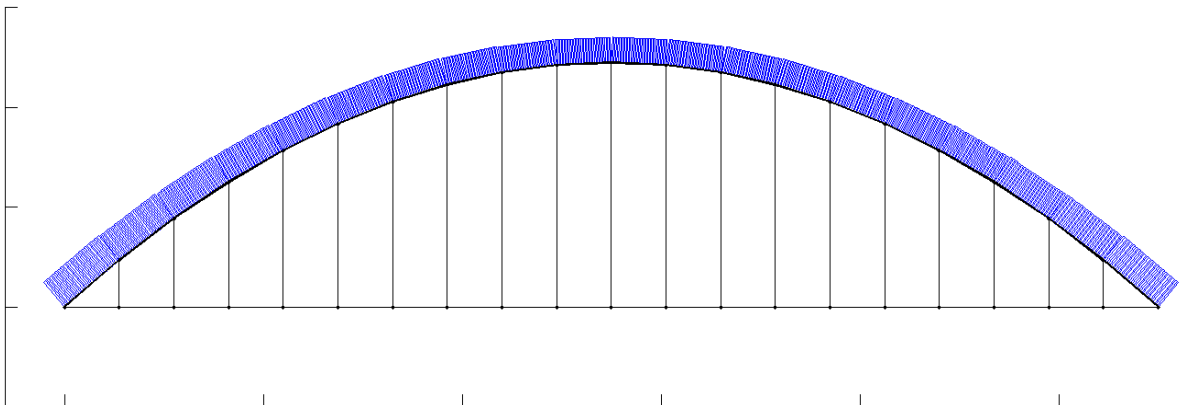
Figur 6. Deformationsmönster för fallet med maximal tvärkraft i bågen.



Figur 7. Tvärkraftsdiagram för fallet med maximal tvärkraft i bågen.



Figur 8. Deformationsmönster för fallet med maximal normalkraft i bågen.



Figur 9. Normalkraftsdiagram för fallet med maximal normalkraft i bågen.

3. Beräkning av filfaktorer för ytterspannets balkbro

```
%-----  
% Indata  
% Programmet beräknar hur kraften fördelas och är oberoende av dimensioner  
% Laster är hämtade från bilaga 4: Preliminärdimensionering  
%-----  
  
%Definierar materialegenskaper och tvärsnitt  
L=1;  
E=1;  
A=1;  
I=1;  
ep=[E A I];  
  
%Dimensionerande axellaster  
P1=-270e3;  
P2=-405e3;  
%Dimensionerande utbredda laster  
q1=-3.75e3;  
q2=-9.45e3;  
  
%-----  
% Beräknar filfaktorer för punktlaster  
%-----  
  
%Definierar koordinater för systemets delar  
ex1=[0 0.5*L];  
ex2=[0.5*L L];  
ex3=[L 2*L];  
ex4=[2*L 2.5*L];  
ex5=[2.5*L 3*L];  
ex6=[3*L 3.5*L];  
ex7=[3.5*L 4*L];  
ex8=[4*L 5*L];  
ex9=[5*L 5.5*L];  
ex10=[5.5*L 6*L];  
ex11=[6*L 7*L];  
ex12=[7*L 8*L];  
ey=[0 0];  
  
%Preallokerar utrymme  
K=zeros(39);  
f1=zeros(39,1);  
  
%Axellasterna angriper i nod 4, 13, 19 och 28  
%Lastfall 1  
f1(4)=P1;  
f1(13)=P1;  
f1(19)=P2;  
f1(28)=P2;
```

```

%Skapar elementmatriser
[Ke1, fe1]=beam2e(ex1, ey, ep);
[Ke2, fe2]=beam2e(ex2, ey, ep);
[Ke3, fe3]=beam2e(ex3, ey, ep);
[Ke4, fe4]=beam2e(ex4, ey, ep);
[Ke5, fe5]=beam2e(ex5, ey, ep);
[Ke6, fe6]=beam2e(ex6, ey, ep);
[Ke7, fe7]=beam2e(ex7, ey, ep);
[Ke8, fe8]=beam2e(ex8, ey, ep);
[Ke9, fe9]=beam2e(ex9, ey, ep);
[Ke10, fe10]=beam2e(ex10, ey, ep);
[Ke11, fe11]=beam2e(ex11, ey, ep);
[Ke12, fe12]=beam2e(ex12, ey, ep);

%Skapar topologimatrix
Edof=[1 1 2 3 4 5 6;
      2 4 5 6 7 8 9;
      3 7 8 9 10 11 12;
      4 10 11 12 13 14 15;
      5 13 14 15 16 17 18;
      6 16 17 18 19 20 21;
      7 19 20 21 22 23 24;
      8 22 23 24 25 26 27;
      9 25 26 27 28 29 30;
      10 28 29 30 31 32 33;
      11 31 32 33 34 35 36;
      12 34 35 36 37 38 39];

%Assemblerar elementmatriserna
[K, fl]=assem(Edof(1, :), K, Ke1, fl, fe1);
[K, fl]=assem(Edof(2, :), K, Ke2, fl, fe2);
[K, fl]=assem(Edof(3, :), K, Ke3, fl, fe3);
[K, fl]=assem(Edof(4, :), K, Ke4, fl, fe4);
[K, fl]=assem(Edof(5, :), K, Ke5, fl, fe5);
[K, fl]=assem(Edof(6, :), K, Ke6, fl, fe6);
[K, fl]=assem(Edof(7, :), K, Ke7, fl, fe7);
[K, fl]=assem(Edof(8, :), K, Ke8, fl, fe8);
[K, fl]=assem(Edof(9, :), K, Ke9, fl, fe9);
[K, fl]=assem(Edof(10, :), K, Ke10, fl, fe10);
[K, fl]=assem(Edof(11, :), K, Ke11, fl, fe11);
[K, fl]=assem(Edof(12, :), K, Ke12, fl, fe12)

%Anger randvillkor
bc=[1 0;
    2 0;
    7 0;
    10 0;
    16 0;
    22 0;
    25 0;
    31 0;
    34 0;
    37 0];

%Beräknar stödkrafter och deformationer
[a, r]=solveq(K, fl, bc);

```

```
%Beräknar filfaktorer
filfaktor_P=-max(r)/(P1*2+P2*2)
```

```
filfaktor_P =
```

```
0.2500
```

```
filfaktor_P2=-r(22)/(P1*2+P2*2)
```

```
filfaktor_P2 =
```

```
0.1500
```

```
%-----
% Beräknar filfaktorer för utbredda laster
%-----
```

```
%Definierar koordinater för systemets delar
```

```
ex1=[0 L];
ex2=[L 2*L];
ex3=[2*L 3*L];
ex4=[3*L 4*L];
ex5=[4*L 5*L];
ex6=[5*L 6*L];
ex7=[6*L 7*L];
ex8=[7*L 8*L];
ey=[0 0];
```

```
%Definierar de utbredda lasterna
```

```
eq1=[q1 0];
eq2=[q2 0];
```

```
%Preallokerar utrymme
```

```
K=zeros(27);
f1=zeros(27,1);
```

```
%Skapar elementmatriser
```

```
%Lastfall 1
```

```
[Ke1, fe1]=beam2e(ex1, ey, ep, eq1);
[Ke2, fe2]=beam2e(ex2, ey, ep, eq1);
[Ke3, fe3]=beam2e(ex3, ey, ep, eq1);
[Ke4, fe4]=beam2e(ex4, ey, ep, eq2);
[Ke5, fe5]=beam2e(ex5, ey, ep, eq2);
[Ke6, fe6]=beam2e(ex6, ey, ep, eq2);
[Ke7, fe7]=beam2e(ex7, ey, ep, eq1);
[Ke8, fe8]=beam2e(ex8, ey, ep, eq1);
```

```
%Skapar topologimatrix
```

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

```

%Assemblerar elementmatriserna
[K,fl]=assem(Edof(1,:),K,Ke1,fl,fe1);
[K,fl]=assem(Edof(2,:),K,Ke2,fl,fe2);
[K,fl]=assem(Edof(3,:),K,Ke3,fl,fe3);
[K,fl]=assem(Edof(4,:),K,Ke4,fl,fe4);
[K,fl]=assem(Edof(5,:),K,Ke5,fl,fe5);
[K,fl]=assem(Edof(6,:),K,Ke6,fl,fe6);
[K,fl]=assem(Edof(7,:),K,Ke7,fl,fe7);
[K,fl]=assem(Edof(8,:),K,Ke8,fl,fe8);

%Anger randvillkor
bc=[1 0;
    2 0;
    4 0;
    7 0;
    10 0;
    13 0;
    16 0;
    19 0;
    22 0;
    25 0];

%Beräknar stödkrafter och deformationer
[a,r]=solveq(K,fl,bc)

%Beräknar filfaktorer
filfaktor_q=-max(r)/(q1*5+q2*3)

filfaktor_q =

    0.2006

filfaktor_q2=-r(10)/(q1*5+q2*3)

filfaktor_q2 =

    0.1401

```

4. Beräkning av reaktionskrafter för ytterspannets broplatta

```
%-----  
% Indata  
% Hämtade från bilaga 4: Preliminärdimensionering  
%-----  
  
%E-modul för limträ  
E=11.8e9;  
  
%Plattan delas in i enmeterssektioner och beräknas som en balk  
b=1;  
%Tvärsnittskonstanter för plattan definieras  
h=0.225;  
A=b*h;  
I=(b*h^3)/12;  
ep=[E A I];  
  
%Avstånd mellan varje stöd  
L=1;  
  
%Dimensionerande axellaster  
P1=-270e3;  
P2=-405e3;  
%Dimensionerande utbredda laster  
q1=-3.75e3;  
q2=-9.45e3;  
%Räckets tyngd  
g_racke=-675;  
%Egentyngd för plattan och beläggning  
g=-4.077e3;  
  
%-----  
% Beräknar reaktionskrafter  
%-----  
  
%Definierar koordinater för systemets delar  
ex1=[0 0.5*L];  
ex2=[0.5*L L];  
ex3=[L 2*L];  
ex4=[2*L 2.5*L];  
ex5=[2.5*L 3*L];  
ex6=[3*L 3.5*L];  
ex7=[3.5*L 4*L];  
ex8=[4*L 5*L];  
ex9=[5*L 5.5*L];  
ex10=[5.5*L 6*L];  
ex11=[6*L 7*L];  
ex12=[7*L 8*L];  
ey=[0 0];  
  
%Definierar de utbredda lasterna  
eq1=[0 q1+g];  
eq2=[0 q2+g];
```

```

%Preallokerar utrymme
K=zeros(39);
f1=zeros(39,1);

%Axellasterna angriper i nod 4, 13, 19 och 28
%Räcket angriper i nod 1 och 37
f1(2)=g_racke;
f1(5)=P1;
f1(14)=P1;
f1(20)=P2;
f1(29)=P2;
f1(38)=g_racke;

%Skapar elementmatriser
[Ke1,fe1]=beam2e(ex1,ey,ep,eq1);
[Ke2,fe2]=beam2e(ex2,ey,ep,eq1);
[Ke3,fe3]=beam2e(ex3,ey,ep,eq1);
[Ke4,fe4]=beam2e(ex4,ey,ep,eq1);
[Ke5,fe5]=beam2e(ex5,ey,ep,eq1);
[Ke6,fe6]=beam2e(ex6,ey,ep,eq2);
[Ke7,fe7]=beam2e(ex7,ey,ep,eq2);
[Ke8,fe8]=beam2e(ex8,ey,ep,eq2);
[Ke9,fe9]=beam2e(ex9,ey,ep,eq2);
[Ke10,fe10]=beam2e(ex10,ey,ep,eq2);
[Ke11,fe11]=beam2e(ex11,ey,ep,eq1);
[Ke12,fe12]=beam2e(ex12,ey,ep,eq1);

%Skapar topologimatrix
Edof=[1 1 2 3 4 5 6;
      2 4 5 6 7 8 9;
      3 7 8 9 10 11 12;
      4 10 11 12 13 14 15;
      5 13 14 15 16 17 18;
      6 16 17 18 19 20 21;
      7 19 20 21 22 23 24;
      8 22 23 24 25 26 27;
      9 25 26 27 28 29 30;
      10 28 29 30 31 32 33;
      11 31 32 33 34 35 36;
      12 34 35 36 37 38 39];

%Assemblerar elementmatriserna
[K,f1]=assem(Edof(1,:),K,Ke1,f1,fe1);
[K,f1]=assem(Edof(2,:),K,Ke2,f1,fe2);
[K,f1]=assem(Edof(3,:),K,Ke3,f1,fe3);
[K,f1]=assem(Edof(4,:),K,Ke4,f1,fe4);
[K,f1]=assem(Edof(5,:),K,Ke5,f1,fe5);
[K,f1]=assem(Edof(6,:),K,Ke6,f1,fe6);
[K,f1]=assem(Edof(7,:),K,Ke7,f1,fe7);
[K,f1]=assem(Edof(8,:),K,Ke8,f1,fe8);
[K,f1]=assem(Edof(9,:),K,Ke9,f1,fe9);
[K,f1]=assem(Edof(10,:),K,Ke10,f1,fe10);
[K,f1]=assem(Edof(11,:),K,Ke11,f1,fe11);
[K,f1]=assem(Edof(12,:),K,Ke12,f1,fe12)

```

```

%Skapar upplagsvillkorsmatris
bc=[1 0;
    2 0;
    8 0;
    11 0;
    17 0;
    23 0;
    26 0;
    32 0;
    35 0;
    38 0];

%Beräknar stödkrafter och deformationer
[a,r]=solveq(K,fl,bc);

```

```

r =
1.0e+005 *
    1.1464
         0
         0
   -0.0000
         0
         0
    1.8783
         0
         0
    0.6999
         0
         0
   -0.0000
         0
         0
    4.4174
         0
         0
   -0.0000
         0
         0
    1.6773
         0
         0
    2.1583
         0
         0
   -0.0000
         0
         0
    2.6369
         0
         0
   -0.4215
         0
         0
    0.1227
         0
         0

```


Bilaga 6: Kostnadsberäkning

Kostnadsberäkning

Materialmängder (se bilaga 5)

Mittspann

Limträ		Volym [m3]	
	Bågar		114
	Förstyvningsbalkar		21 ¹
	Balkar mellan bågar		20
Kerto		Volym [m3]	
	Broplattan		106
Stål		Tyngd [kN]	
	Tvärbalkar		896
	Hängstag		38

Sidospann

Limträ		Volym [m3]	
	Längsgående balkar		70
	Plattan		47
Stål		Tyngd [kN]	
	Spännstag		

Stöd

Limträ		Volym [m3]	
	Pelare		21
Betong		Volym [m3]	
	Vingmur		30
	Fundament		20

Förband

Stål		Tyngd [kN]	
	Plåtar		9

Grundläggning

Stödpålning		Sträcka [m]	
	Betongpålar		1239

Beläggning

Asfaltering		Yta [m2]	
			664

Materialkostnader med montering

Limträ	7 000-9 000 kr/m3	2
Kerto	8 400-10 800 kr/m3	2
Stålbalk, svetsad	6000 kr/kg	3
Betong	2500 kr/m3	3
Stödpålning	650 kr/m	3
Asfaltering	290 kr/m2	4

Uppräkning av kostnad för höghållfast stål

Då vi använder höghållfast stål i tvärbalkarna räknar vi upp kostnaden från schablonkostnaden med en faktor som fås från prisförhållandet mellan höghållfast och normalt stål.

Pris för normalstål S355N [SEK/enhet]	650 (ruuki)
Pris för höghållfast stål S460N [SEK/enhet]	950 (ruuki)
Förhållande	1,46

Kostnadsberäkning

	Materialmängd	Pris per enhet	Kostnad
Limträ [m3]	293	9000	2457000
Kerto [m3]	106	10800	1144800
Stålbalk, normal [kN]	0	6000	0
Stålbalk, höghållfast [kN]	905	8769	7857231
Övrigt stål [kN]	38	6000	282000
Betong [m3]	50	2500	125000
Pålning [m]	1239	650	805350
Asfaltering [m2]	664	290	192560
			12863941

¹ Uppskattat värde

² Tomas Frödelius (Säljare, Broar, Moelven) mailkorrespondens med Jakob Brandin

³ Mikael Thorsell (Broprojektör, Broteknik, COWI) handledning den 19 februari 2013

⁴ Roland Moström (Kalkylingenjör, Skanska anläggning) telefonintervju med Henrik Wallerman den 20 maj 2013