



LUND
UNIVERSITY



ÖVERSLAGSDIMENSIONERING AV PLATTRAMBROAR

Optimering av produktionskostnad
och miljöpåverkan

DANIEL STENBERG och GABRIEL JOHANSSON

Structural
Mechanics

Bachelor's Dissertation

DEPARTMENT OF CONSTRUCTION SCIENCES

DIVISION OF STRUCTURAL MECHANICS

ISRN LUTVDG/TVSM--20/4008--SE (1-84) | ISSN 0281-6679

BACHELOR'S DISSERTATION | EXAMENSARBETE I HÖGSKOLEINGENJÖRSUTBILDNINGEN

ÖVERSLAGSDIMENSIONERING AV PLATTRAMBROAR

Optimering av produktionskostnad och miljöpåverkan

DANIEL STENBERG och GABRIEL JOHANSSON

Supervisors: **SUSANNE HEYDEN**, Associate Professor, Division of Structural Mechanics, LTH,
together with **LARS STEEN**, MSc, and **BEDRI SALLOVA**, MSc, Atkins Sverige AB.

Examiner: Professor **OLA DAHLBLOM**, Division of Structural Mechanics, LTH.

Copyright © 2020 Division of Structural Mechanics,
Faculty of Engineering LTH, Lund University, Sweden.

Printed by V-husets tryckeri LTH, Lund, Sweden, June 2020 (PI)

For information, address:

Division of Structural Mechanics,
Faculty of Engineering LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.

Homepage: www.byggmek.lth.se

Sammanfattning

Detta arbete behandlar överslagsdimensionering av plattrambroar, och syftar till att undersöka hur kostnads- och miljöaspekter påverkas av ramens tjocklek för vanliga spännvidder och fria höjder. Detta för att ge ett bättre utgångsläge vid dimensionering av plattrambroar för framtida projekt.

En plattrambro modelleras och analyseras med hjälp av programvaran BRIGADE/Standard och parametrarna spännvidd, höjd och ramtjocklek varieras. Åtta resultatlinjer längs och tvärs ramen väljs ut och armeras med hjälp av programvaran ConcreteDesigner beam. Dessa utgör grunden för uppskattning av ramens totala armeringsbehov.

Ramens armeringsbehov studeras för att bedöma hur de undersökta parametrarna påverkar armeringsmängden, och ifall det är möjligt att uppskatta mängden armering som går åt för en mellanliggande ram utifrån kända punkter.

Utifrån uppskattad mängd armering tillsammans med beräknad mängd betong undersöks hur kostnaden och miljöpåverkan påverkas ifall tvärsnittets tjocklek varieras.

Arbetet visar att både produktionskostnad och miljöpåverkan minskas vid ett tunnare tvärsnitt, d.v.s. det blir billigare att bygga på ett miljövänligare sätt.

Nyckelord:

- Plattrambro
- Överslagsdimensionering
- Armering
- Produktionskostnad
- Miljöpåverkan

Abstract

This study aims to make a preliminary design of an integral bridge with frame abutments, and to see how the frame's thickness for common spans and heights affects cost and environmental aspects. This is done to give a better starting point when designing slab bridges in future projects.

A slab bridge is modelled and analysed with the use of the computer software BRIGADE/standard with parameters such as length, height and frame thickness being varied. Eight result lines, along and across the bridge frame, are chosen and the reinforcement needed is calculated with the ConcreteDesigner beam software. These are used for estimating the total steel reinforcement needed for the frame.

The frame's steel reinforcement is studied to assess how the different parameters affect the amount of reinforcement needed, and if it is possible to estimate the amount of reinforcement needed for a bridge of different dimensions.

With the estimated necessary reinforcement together with the calculated amount of concrete, it is investigated how the cost and environmental effects are affected by having the cross section thinner or thicker.

The study shows that both the production cost and the environmental effects are lowered by having a thinner cross section, i.e. it is cheaper to build in a more environmentally friendly way.

Keywords:

- Integral bridge with frame abutments
- Preliminary design
- Reinforcement
- Production Cost
- Environmental effects

Förord

Detta examensarbete har skrivits som avslutning för studier på programmet Byggteknik med Arkitektur vid Lunds Tekniska Högskola, Campus Helsingborg. Arbetet har genomförts med hjälp av Atkins broavdelning i Helsingborg under våren 2020.

Vi vill tacka Docent Susanne Heyden på avdelningen för Byggnadsmekanik på Lunds Tekniska Högskola för en väldigt bra vägledning genom hela arbetet som vår handledare. Vi tackar Lars Steen och Bedri Sallova från Atkins i Helsingborg för möjligheten att göra detta arbete och för all hjälp på vägen. Vi vill även tacka Johan Kölfors, CEO från Scanscot Technology som har bistått med studentlicens till BRIGADE/Standard.

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och mål	1
1.3 Metod	2
1.4 Avgränsningar	2
1.5 Arbetsfördelning	3
2 Plattrambro	5
2.1 Utformning	6
2.2 Styrande dokument	7
3 Metod	9
3.1 Övergripande strategi	9
3.2 Bestämning av snittkrafter i BRIGADE	10
3.2.1 Geometri	11
3.2.2 FE-modell	12
3.2.3 Laster och lastkombinering	13
3.2.4 Passningsräkning.....	13
3.2.5 Resultatlinjer	14
3.3 Dimensionering av armering	22
3.4 Uppskattning av produktionskostnad	27
3.5 Miljöpåverkan	27
3.5.1 Uppskattning av miljöpåverkan från betong.....	27
3.5.2 Uppskattning av miljöpåverkan från armering	28
4 Parameterstudie	31
4.1 Geometri	31
4.2 Betong	34
4.2.1 Teknisk livslängd.....	34
4.3 Armering	34
4.4 Grundläggning	35
4.5 Laster	36
4.5.1 Säkerhetsklass.....	37
4.5.2 Egentyngd.....	37
4.5.3 Jordtryck	37
4.5.4 Vertikal trafiklast.....	37
4.5.5 Bromslast.....	39
4.5.6 Sidokraft.....	40
4.5.7 Ökat jordtryck till följd av bromsverkan.....	40
4.5.8 Överlast	41
4.5.9 Jämnt fördelad temperaturlast.....	42
4.5.10 Ojämnt fördelad temperaturlast.....	43

4.5.11 Lastkombinationer	43
5 Resultat	45
5.1 Variation av spännvidd och höjd	45
5.2 Variation av tvärsnittstjocklek	61
5.3 Beräkning betongmängd.....	66
5.4 Produktionskostnad	66
5.5 Miljöpåverkan.....	72
6 Diskussion	77
7 Slutsats	79
Referenser	81

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Platrambron är en av Sveriges vanligaste brotyper för överfarter vid gång- och cykelväg, vägtrafik och järnvägstrafik vid spännvidder upp till 25 meter. Den bygger på en ram som gjuts i slakarmerad betong och kan ta upp vertikala laster via ramverkan. Jordtrycket mot rambenen skapar ett negativt moment i broöverbyggnaden och tvärsnittet kan vanligen göras något tunnare jämfört med en brotyp där broöverbyggnaden vilar på upplagen.

Trafikverket ställer krav på att broar ska utformas på ett sådant sätt att minsta möjliga miljöpåverkan uppstår ur ett livscykelperspektiv. Detta innebär bland annat att en avvägning måste göras gällande tvärsnittets utformning, där en tunnare ram troligen ger ett ökat armeringsbehov och vice versa.

Armering har en högre miljöpåverkan än motsvarande mängd betong, och kombinationen av mängd betong och armering ger olika förutsättningar att utforma tvärsnittet. En intressant fråga är om ett tunnare tvärsnitt ger mindre miljöpåverkan, eller om det ger motsatt effekt genom det ökade armeringsbehovet.

Det är samtidigt troligt att det i alla led är av intresse att utforma bron så kostnadseffektivt som möjligt. Likt frågeställningen med miljöbelastningen så är betong betydligt billigare än motsvarande mängd armering, och kombinationen betong och armering ger olika förutsättningar vid utformning av tvärsnitt. Är det mest kostnadseffektivt att gjuta ett tunt tvärsnitt där en större mängd armering kan förväntas, eller ett tjockare tvärsnitt där en mindre mängd armering krävs?

Arbetet genomförs i samarbete med Atkins broavdelning i Helsingborg som har efterfrågat ett snabbare och mer effektivt sätt att få fram preliminära dimensioner på platrambroar, samt undersöka hur ramens tjocklek påverkar kostnad och miljöaspekter.

1.2 Syfte och mål

Arbetets syfte är att ge underlag för val av tvärsnitt vid tidig överslagsdimensionering av platrambroar för vanliga kombinationer av spännvidd och fri höjd. Olika optimeringskriterier, som låg produktionskostnad och minimerad miljöbelastning beaktas. På grund av att aktuella priser varierar med tiden samt miljöbelastningen ser olika ut beroende på tillverkningsätt och klimatkompensering varierar även priser och miljöbelastning för materialen.

Arbetets mål är

- Att för vanliga kombinationer av spännvidd och fri höjd uppskatta mängden armering som krävs för en ram, samt hur armeringsmängden varierar med tjockleken på ramen.

- Att uppskatta hur produktionskostnaden beror av spännvidd, fri höjd och ramtjocklek.
- Att uppskatta hur miljöbelastningen beror av spännvidd och ramtjocklek.
- Att undersöka om det finns något samband mellan produktionskostnad och miljöbelastning.

1.3 Metod

I den här studien analyseras en plattrambro genom att tvärsnittet varieras för flera olika spännvidder och höjder. Utifrån datan kommer om möjligt ett verktyg tas fram som skulle kunna ge ett fördelaktigt utgångsläge gällande tvärsnittets utformning vid dimensionering av ramen.

Initialt studeras plattrambrons uppbyggnad och vilka regelverk som gäller vid dimensionering. Data samlas in för uppskattning av miljöpåverkan i form av koldioxidutsläpp och hur kostnader kan bedömas. Vidare studeras de programvaror som används i arbetet.

Ett FEM-program används för att bestämma snittkrafter för en referensbro. Denna varieras med avseende på spännvidd, fri höjd under bron och tjocklek på ramen.

Åtta stycken resultatlinjer per bro väljs ut, två längs och två tvärs både ramben och broöverbyggnad. Dessa innehåller information om påverkande snittkrafter och tvärsnittets utformning. Utifrån resultatlinjerna beräknas erforderlig mängd armering för 1 meter breda plattstrimlor.

En parameterstudie genomförs för att avgöra vilken inverkan spännvidden, höjden och tjockleken har på respektive plattstrimla. Utifrån resultatet uppskattas armeringsbehovet för mellanliggande dimensioner.

Plattstrimlorna utgör grund för uppskattning av armeringsbehovet för ramen som helhet. Det uppskattade armeringsbehovet tillsammans med beräknad mängd betong används för att avgöra hur produktionskostnaden och miljöbelastningen mätt i koldioxidutsläpp varierar för olika spännvidder, tjocklekar och fria höjder på ramen.

1.4 Avgränsningar

För detta arbete har de laster som har störst inverkan på dimensioneringen valts ut i samråd med konstruktör från Atkins broavdelning i Helsingborg. Dessa begränsas till laster från egenvikt för hela ramen inklusive vingmur, laster från jordtryck verkande mot rambenen, trafiklasten uppe på och strax innan fordon når farbanan och temperaturlaster. Övriga laster anses ha mycket liten betydelse i ett tidigt skede av dimensioneringsprocessen och beaktas därför inte.

Enbart själva ramen dimensioneras, vilket innefattar broöverbyggnaden och rambenen. En vingmur finns modellerad på varje analyserad bro. Denna

dimensioneras ej och är endast till för att ge en mer rättvisande lastpåverkan på ramen. Ramen dimensioneras för att klara moment och tvärkraft i brottgränstillstånd och kvasipermanent bruksgränstillstånd. Andra ordningens teori beaktas ej. Ramen studeras endast för fallet vägtrafik på farbanan.

Vid uppskattning av kostnader räknas endast material- och arbetskostnad för betong och armering, enligt Wikells sektionsdata [1], för själva ramen. Ingen hänsyn tas till att gjutformen behöver utformas något olika vid tunnare respektive tjockare tvärsnitt.

1.5 Arbetsfördelning

Studenterna har jobbat parallellt under hela arbetets gång i framtagande och utvärdering av data. Då stora mängder data har hanterats har den ena studenten genomfört en rimlighetskontroll av den andra studentens data och vice versa. Rapporten har skrivits efter hand av bägge studenterna.

2 Plattrambro

Figur 2.1 och 2.2 visar typiskt utseende för plattrambroar. Bron i figur 2.1 har en vingmur vinklad utåt från farbanan medan vingmuren i figur 2.2 löper parallellt med farbanan.

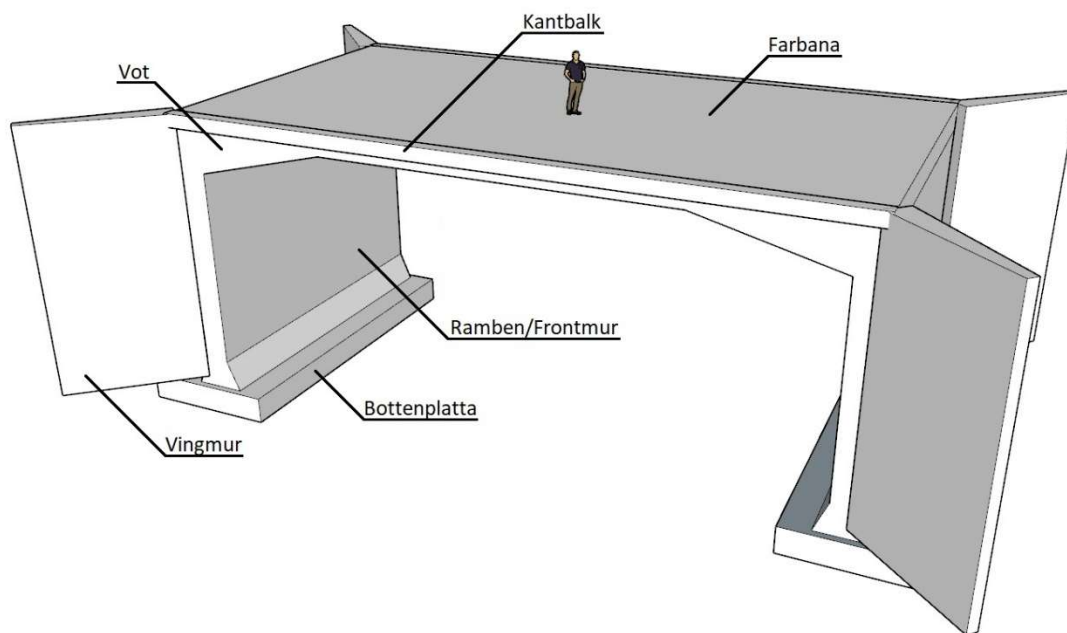


Figur 2.1 Plattrambro vid möte mellan landsväg och motorväg.



Figur 2.2 Plattrambro där gång- och cykelväg korsar järnvägsspår.

2.1 Utformning



Figur 2.3 Principiell utformning av en plattrambro.

En plattrambro är utformad enligt principskissen i figur 2.3. Trafik är tänkt att kunna färdas både under och uppe på bron. Utöver farbanans slitlager som vanligen är av asfalt är bron uteslutande konstruerad i slakarmerad betong. Farbanan avvattnas genom ett fall på ca 1% i både ram och slitlager enligt specifikationer i Råd Brobyggande [2] B.1.10.1.1.

På vardera sidan om farbanan finns en kantbalk. Denna har ingen bärande funktion utan agerar endast som infästning till räcke. Tanken är att denna ska kunna bytas ut vid till exempel en olycka utan att bronns bärförmåga äventyras.

Vid mötet mellan broöverbyggnaden och frontmuren är belastningen av moment och tvärkraft som störst. Detta hanteras genom att farbanan gjuts något tjockare i dessa punkter. Denna förstärkning kallas för vot.

Frontmuren ansluter direkt till broöverbyggnaden. Eftersom ramhörnet är momentstyvt är frontmurens tjocklek i övre delen vanligen runt samma dimension som votens tjockaste del. Frontmuren smalnar vanligen av något efter hand för att slutligen förstärkas längst ner mot grundläggningen. Denna förstärkning är huvudsakligen till för att fördela lasterna på en större yta.

Ramen är vanligtvis grundlagd på en gjuten bottenplatta. Grundläggningen är alltid placerad på frostfritt djup och ramens nedersta del är täckt av ett jordlager motsvarande minst det frostfria djupet.

Längs med frontmuren löper vingmuren. Denna har som funktion att hindra fyllningsmassan från att glida ut över vägbanan.

2.2 Styrande dokument

För dimensioneringsregler och beräkningsregler används följande dokument. Dokumenten är placerade i rangordning där det översta blir styrande ifall motsägelse finns.

1. Trafikverkets Författningssamling [3]
2. Krav Brobyggande TDOK 2016:0204 version 3.0 [4]
3. Trafikverkets krav för geokonstruktioner – TK Geo 13 [5]
4. Eurokoderna 1 och 2 [6], [7], [8], [9]

3 Metod

3.1 Övergripande strategi

För att uppskatta hur brons utformning påverkar produktionskostnad och miljöbelastning görs beräkningar med hjälp av Atkins konstruktörer och deras metoder för att delvis dimensionera en riktig bro. I samråd med dessa bestäms vilka parametrar som är intressanta att variera och dessa begränsas till spännvidd, fri höjd och ramtjocklek. Vidare bestäms en rimlig spridning för att få tillräckligt med täckande data från beräkningarna för att kunna dra en rimlig slutsats.

Parametrarna som studerats är spännvidder S på 5, 10, 15 och 20 meter, fri höjd under bron F på 3,2, 4,7 och 6,3 meter samt ramtjocklek varierande proportionellt mot votens tjocklek V i intervallet 0,5 – 1,5 meter. En exempelbeteckning S15V1.0F6.3 är en bro med 15 meter spännvidd, 1 meter vottjocklek och 6,3 meter fri höjd. Bredden hålls konstant på 10 meter, vilket ungefär motsvarar två körfält samt gång- och cykelväg.

För att begränsa arbetets omfattning har laster som anses ha en begränsad påverkan på ramens dimensioner ej beaktats, t.ex. vindlaster och krympning. Dessa laster spelar liten roll för dimensioneringen och kan försummas helt vid överslagsdimensionering i tidigt skede enligt handledare på Atkins.

Snittkrafter tas fram genom FEM-programmet BRIGADE/Standard [10], där en representativ 3D-modell byggs upp och belastas enligt gällande krav och regler. Totalt har 60 varianter på broar analyserats i BRIGADE/Standard i brottgränstillstånd samt i bruksgränstillstånd för kvasi-permanent lastkombination.

Eftersom konstruktionen är statiskt obestämd behöver passningsräkning göras för de lastfall där en ramförskjutning uppstår, i detta fall vid broms- och accelerationslaster samt vid överlast. Hur passningsräkningen utförs beskrivs under avsnitt 3.2.4.

BRIGADE/Standard ger både numerisk och en visuell representation av påverkande krafter i 3D, där påverkande snittkrafter enligt vald resultatlinje kan exporteras till Excel. Resultaten som exporteras från BRIGADE/Standard är det största respektive minsta påträffade momentet, tillhörande normalkraft och tvärkraft för varje nod längs resultatlinjen vid den värsta lastkombinationen.

Ju fler resultatlinjer som används vid uppskattning av ramens armering desto mer rättvisande blir resultatet. Denna process är dock mycket tidskrävande och 8 resultatlinjer som tros ge en relativt representativ bild av ramens armeringsbehov väljs ut i samråd med konstruktör baserat på snittkrafternas visuella fördelning enligt Figur 3.5 – 3.20.

De valda resultatlinjerna exporteras från BRIGADE/Standard till Excel och formateras för att bli kompatibla med programmet ConcreteDesigner beam [11].

ConcreteDesigner beam är en programvara som beräknar erforderlig mängd armering för ett tvärsnitt givet geometrin, påverkande snittkrafter och övriga förutsättningar. Resultatet presenteras på formen minsta erforderlig armeringsarea per snitt. Varje tvärsnitt armeras som en 1 meter bred plattstrimla enligt respektive resultatlinje. Dessa utgör sedan grund för uppskattning av ramens totala armeringsbehov. Tvärsnittens armeringsbehov beräknas för att både klara brottsgränstillståndet och minimera sprickvidden till maximalt 0,15 mm i både över- och underkant. Totalt har 480 tvärsnitt armerats.

För att underlätta dataöverföringen mellan Excel och ConcreteDesigner beam har ett script kodat i AutoIt tagits fram. Scriptet ställer även in gällande förutsättningar gällande bland annat tvärsnittets geometri och minsta täckande betongskikt. Detta eliminerar fel orsakade av den mänskliga faktorn och effektiviserar arbetsgången.

ConcreteDesigner beam beräknar erforderlig minsta mängd armering som tvärsnittet kräver och genererar en rapport i PDF-format. Data gällande armeringsbehov extraheras och förs över till ett Excelark för att kunna utvärderas. Detta har gjorts med hjälp av konverteraren SmallPDF, som gjorde det möjligt att kopiera stora delar av datan och klistra in i Excelarket. Rimlighetskontroll för varje tvärsnitt har gjorts mot närliggande dimensioner, där stora variationer eller avvikande trender tyder på miss i datahanteringen och kan åtgärdas.

Erforderlig mängd armering för varje tvärsnitt räknas om till kg / plattstrimla och används för att uppskatta ramens totala armeringsbehov. Mängden betong kontra armering kan då utvärderas för att bedöma hur produktionskostnaden och miljöbelastningen varierar vid olika tjocklekar på ramen.

Utifrån flera ramars totala uppskattade armeringsbehov undersöks det ifall mellanliggande spännvidder och höjder är möjliga att uppskatta. Om uttryck som uppskattar armeringsmängden finns undersöks hur kostnad och miljöpåverkan påverkas av ramens tjocklek.

3.2 Bestämning av snittkrafter i BRIGADE

Arbetet har genomförts med hjälp av BRIGADE/Standard [10], vilket är en FEM-programvara som används för att modellera och analysera byggnadsverk. BRIGADE finns i två utgåvor, BRIGADE/Standard och BRIGADE/Plus. Standardversionen är den som används i detta arbete och riktar sig mot enklare broar medan plusversionen kan hantera mer komplexa konstruktioner.

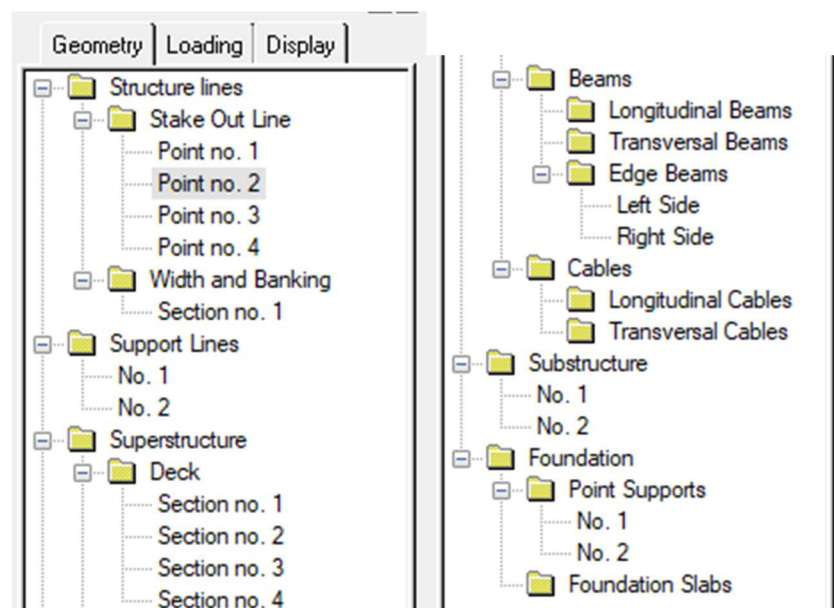
finita elementmetoden (FEM) är en approximativ numerisk metod för att lösa system av partiella differentialekvationer. Metoden bygger på att en representativ modell av det som ska analyseras byggs upp och delas upp i mindre bitar, finita element. Ekvationerna i de finita elementen löses i förhållande till varandra för att slutligen kunna ge en helhetsbild hur den undersökta kroppen påverkas.

BRIGADE/Standard modellerar och analyserar i 3D och tar hänsyn till bland annat påverkande laster som egentyngder, jordtryck och temperaturlaster. Rörliga laster

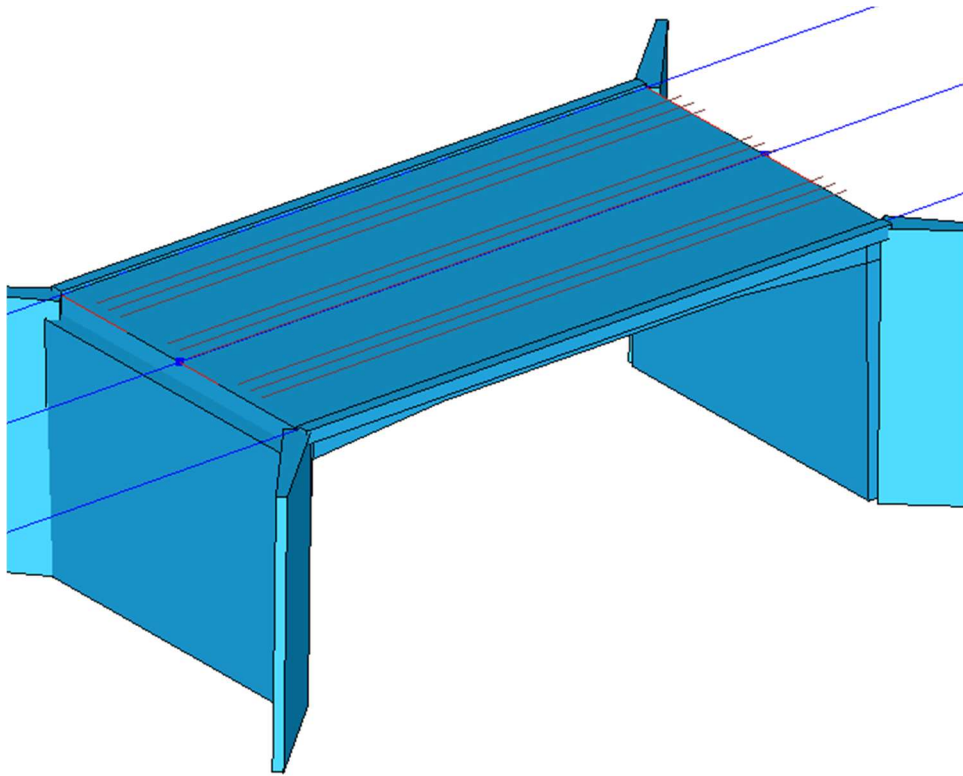
som t.ex. fordonslaster och bromslaster kan befinna sig i många olika lägen på bron samtidigt.

3.2.1 Geometri

Uppbyggnaden av en plattrambro i BRIGADE/Standard börjar med att dess geometri definieras, se figur 3.1. Först görs en *Stake Out Line* som bestämmer enligt vilken linje farbanan modelleras och hur anslutande vägar ser ut. Bredden och lutningen på farbanan anges samt var rambenen kommer att vara och deras dimensioner. Därefter delas bron upp i *Superstructure* och *Substructure* (Överbyggnad och Underbyggnad), där farbanan, kantbalkar och kablar (vilket inte är aktuellt för plattrambroar) är överbyggnad, och vingmur, ramben samt bottenplattan är underbyggnad.



Figur 3.1 Brons geometri definieras i BRIGADE/Standard.

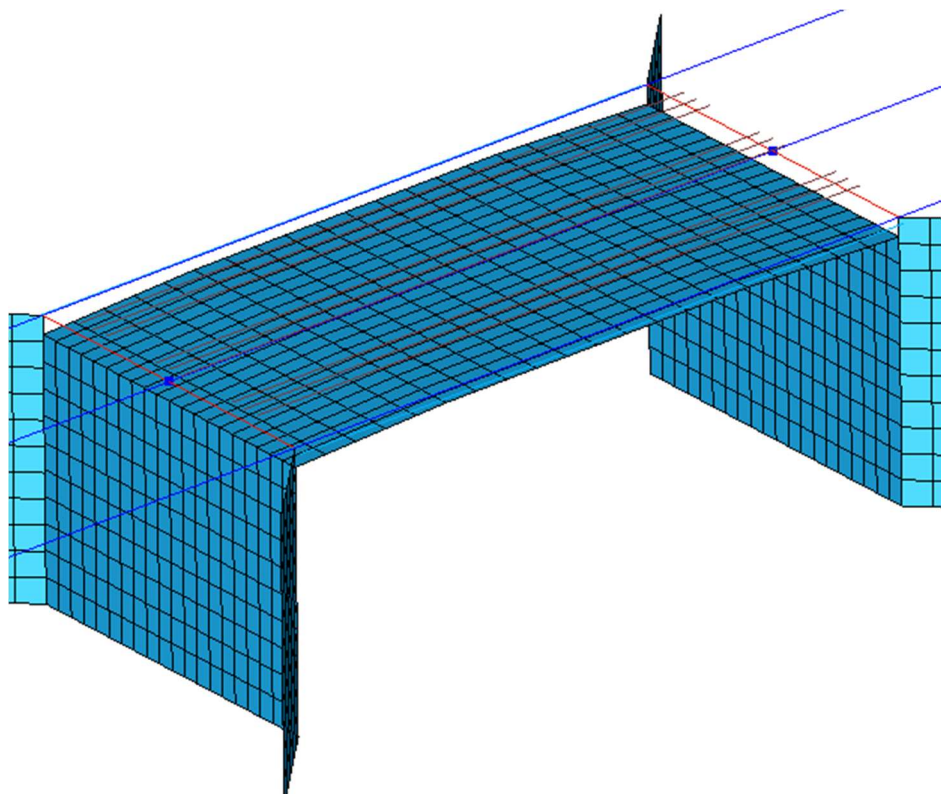


Figur 3.2 3D-Modell av en plattrambro i BRIGADE/Standard.

3.2.2 FE-modell

När alla delar har måttsatts visualiseras bron med en 3D-modell, se figur 3.2, som nu kan belastas. För att applicera krafterna behöver 3D-modellen göras om till en FE-modell, se figur 3.3. FE-modellen består av ett elementnät där varje nod kan belastas. Finare indelning av element leder till en noggrannare beräkning, men den blir samtidigt mer tidskrävande. För dessa beräkningar är varje element valt till 0.5 x 0.5 meter, eller så nära som möjligt. Ingen konvergensanalys utförs för modellen, den följer istället rekommendation från konstruktör på Atkins som nyligen beräknade en bro med snarlika dimensioner där konvergensanalys utfördes. Indelningen är dock något modifierad så att resultatlinjer för ramar med varierande spännvidd och höjd ska kunna avläsas på förhållandevis samma punkt.

Elementen som används är 4-nodiga skalelement med en centrerad integrationspunkt. BRIGADE/Plus klarar av både statiska och dynamiska beräkningar medan Standard-versionen som används bara kan hantera statiska beräkningar. Andra ordningens teori är inte något BRIGADE/Standard tar hänsyn till då programmet jobbar med linjära beräkningar. Då materialet som används är armerad betong så räknas materialmodellen som isotrop, d.v.s. att det har samma styvhetsegenskaper i alla riktningar.



Figur 3.3 FE-Modell av en plattrambro i BRIGADE/Standard.

3.2.3 Laster och lastkombinering

BRIGADE/Standard ställs in för att kombinera laster enligt Trafikverkets Krav Brobyggande 2016:204 version 3.0 [4] och med Trafikverkets Författningssamling 2018:57 [3].

Angripande lasters läge och intensitet väljs enligt kapitel 4. Dessa kombineras med standardiserade fordonslaster. Relevant för detta arbete är jordtryck, överlast, egentyngd för både ram och beläggning, bromskrafter, temperaturlaster samt olika situationer av fordonslaster. Fordonslasterna räknas inte endast som en punktlast per fordon utan det tas hänsyn till fordonens hjulaxlar, detta enligt Trafikverkets Författningssamling [3] med standarder för olika typfordon.

Ett flertal lastkombinationer analyseras, och det som blir värst för varje enskild nod blir dimensionerande vid beräkning av armeringsmängd.

3.2.4 Passningsräkning

När krafter verkar på ett sätt så att en ramförskjutning uppstår krävs en passningsräkning för att bedöma hur mycket av lasten som tas upp genom ramverkan och hur mycket som tas upp genom ökat jordtryck mot ett av rambenen. Största tillåtna ökning av mothållande jordtryck bestäms enligt Trafikverkets Råd Brobyggande [2], B.3.2.2.2.

$$\Delta p = c \cdot \gamma \cdot z \cdot \beta, \text{ där}$$

Δp är ökat jordtryck [kN/m²]

c är en konstant som sätts till 600 för ogynnsamma fall och 300 för gynnsamma fall

γ är fyllnadsmaterialets tunghet [kN/m³]

z är djup under markytan [m]

$$\beta = \frac{\delta}{h} \quad \text{där}$$

δ är ramens horisontella förskjutning [m]

h är rambenets höjd [m]

Konstanten c väljs beroende på om det ökade jordtrycket mot rambenet verkar gynnsamt eller ogynnsamt. Det mothållande jordtrycket ses som gynnsamt vid överlast och broms- och accelerationslast. Ogynnsamma fall är vid till exempel expansion till följd av en temperaturökning, där ett större mothållande jordtryck leder till värre dimensionerande lastfall.

Passningsräkningen genomförs i följande steg:

Antag initiell ramförskjutning.

Tills jämvikt uppnås:

Beräkna Δp

Analysera bron i BRIGADE/Standard

Avläs ramförskjutning i BRIGADE/Standard

Slut

3.2.5 Resultatlinjer

Resultatet från en beräkning tas fram genom att välja en linje i elementnätet som ska studeras, kallat en resultatlinje, och kan studeras för både separata laster och lastkombinationer. I detta arbete används resultaten för moment MR_{l+} , MR_{l-} , MR_{t+} och MR_{t-} tillsammans med tillhörande normalkrafter N_{s+} , N_{s-} , N_{a+} och N_{a-} samt tvärkrafterna V_{sz+} , V_{sz-} , V_{az+} och V_{az-} . BRIGADE/Standard kombinerar moment och vridmoment enligt följande:

$$MR_{l+} = M_a + |T_{sa}|$$

$$MR_{l-} = M_a - |T_{sa}|$$

$$MR_{r+} = M_s + |T_{sa}|$$

$$MR_{r-} = M_s - |T_{sa}|$$

där

M är böjmoment

T är vridmoment

N är tillhörande normalkraft

V är tvärkraft

och index

s betecknar längs planet

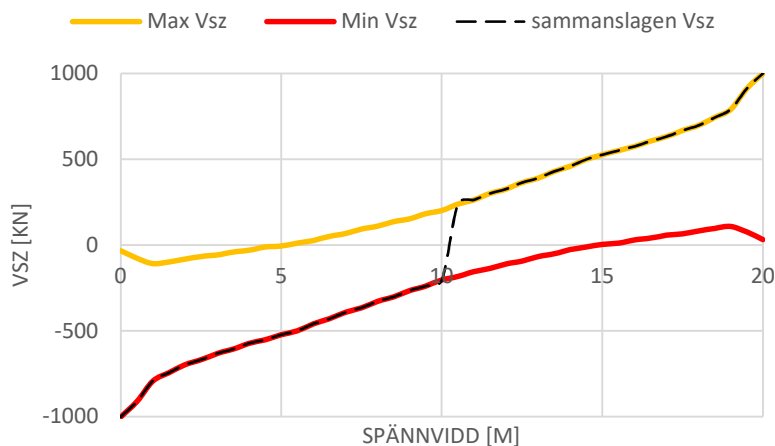
a betecknar tvärs planet

z betecknar normalen till planet

Notera att största påverkande normalkraft inte beräknats, endast tillhörande normalkrafter som uppstår när momentet är som minst/störst. BRIGADE/Standard visar största och minsta värde för samtliga laster som separata kurvor.

För att bygelarmeringen ska kunna beräknas i ConcreteDesigner beam måste kurvorna sammanfogas enligt figur 3.4. Detta sker i formateringsverktyg i Excel.

TVÄRKRAFT FÖRKLARING



Figur 3.4 Förtydligande hur tvärkraft läggs ihop till en dimensionerande linje.

Figur 3.5 – 3.20 visar påverkande snittkrafter fördelning över bro S20V0.9F6.3 tagna ur BRIGADE/Standard, samtliga värden är i kN respektive kNm. I figurena visas även hur resultatlinjerna valts. Resultatlinjer väljs proportionellt mot bronns spännvidd och höjd med placering enligt följande:

Längs farbanan:

L1: 0,5 meter från ytterkanten.

L2: Mitt på farbanan.

Tvärs farbanan:

T1: En tiondel av spännvidden räknat från vänstra upplaget.

T2: Fyra tiondelar av spännvidden räknat från vänstra upplaget.

Vertikalt på rambenen:

V1: 0,5 meter från ytterkant.

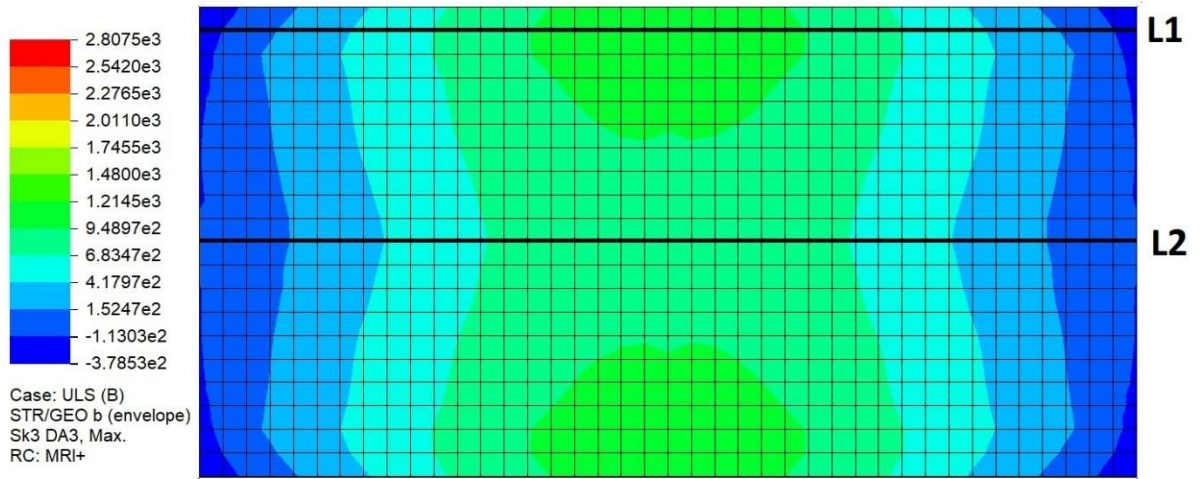
V2: Mitt på rambenet.

Horisontellt på rambenen:

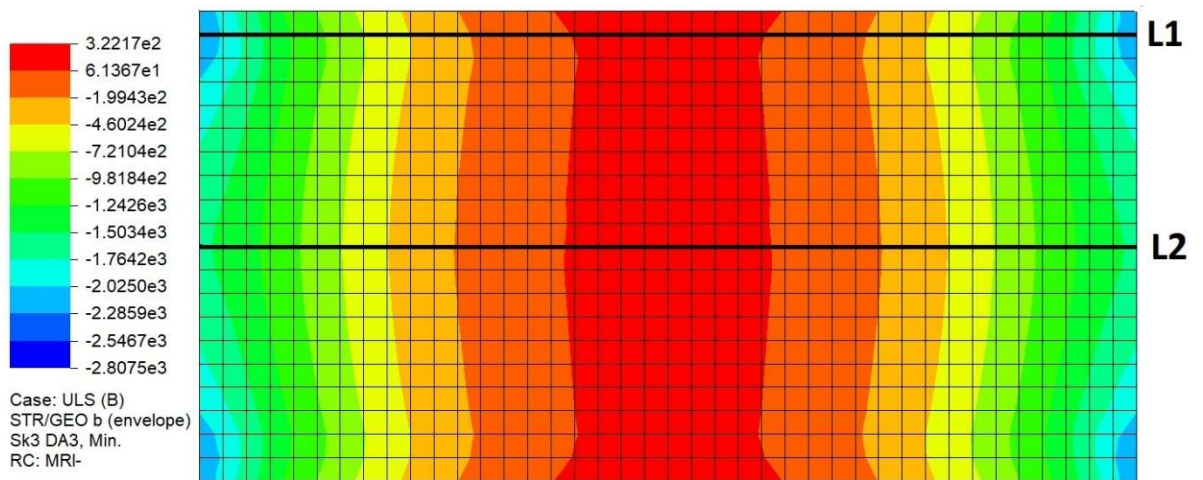
H1: En fjärdedel av totala höjden räknat uppifrån.

H2: Tre fjärdedelar av totala höjden räknat uppifrån.

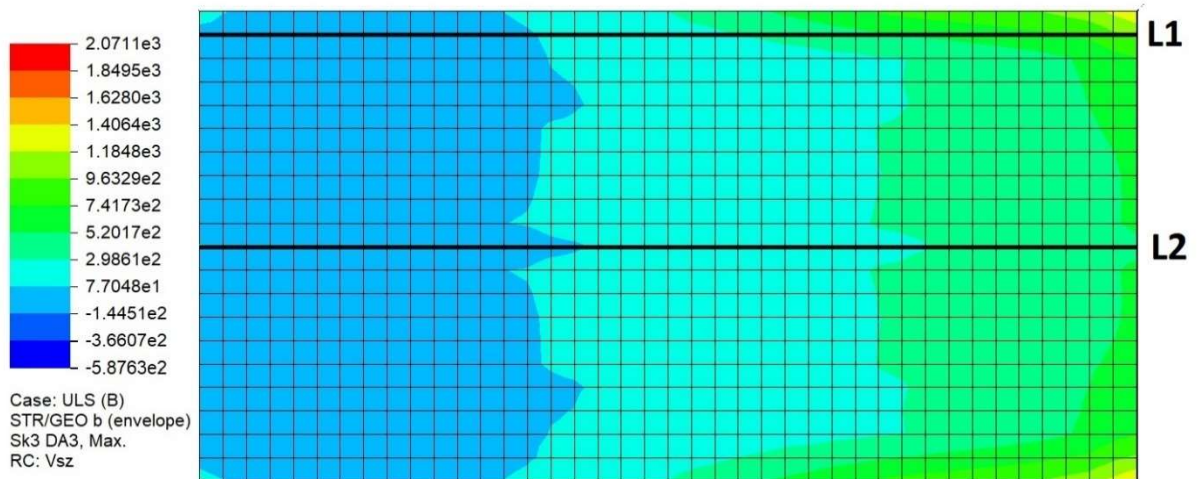
Ramen är symmetrisk och således förväntas belastande moment vara lika stort längs och tvärs broöverbyggnaden, samt tvärs rambenen. Rimlighetskontroll så detta stämmer har genomförts för varje bro. I de fall avvikelser har påträffats så har samtliga inställningar i BRIGADE/Standard setts över och bron räknats om.



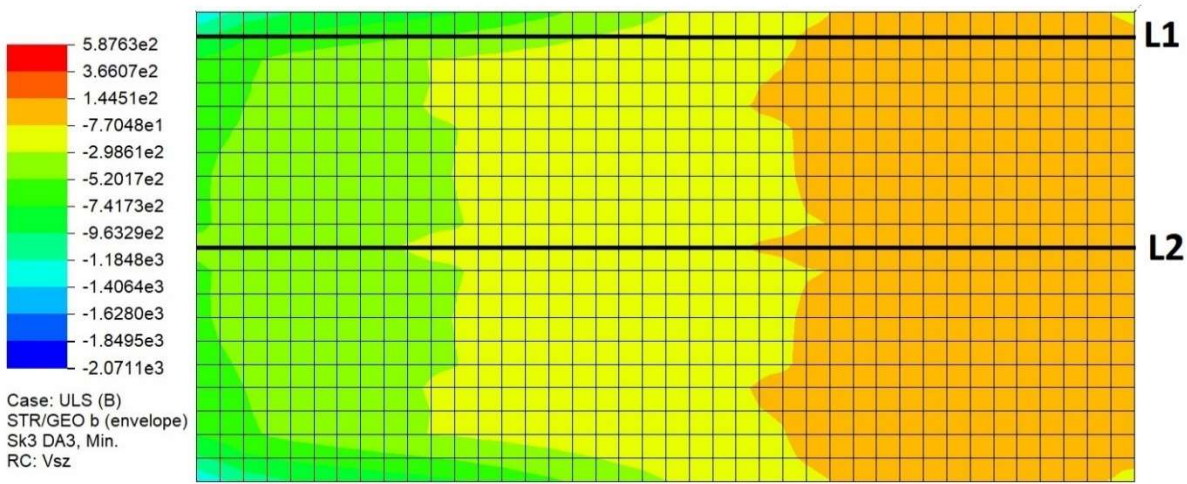
Figur 3.5 Fördelning av största moment längs farbana för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



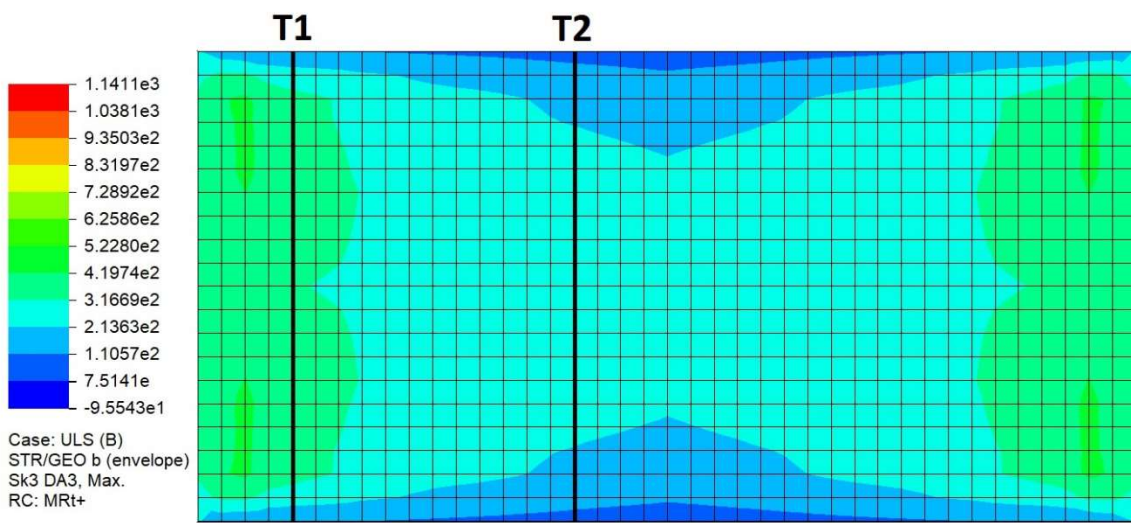
Figur 3.6 Fördelning av minsta moment längs farbana för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



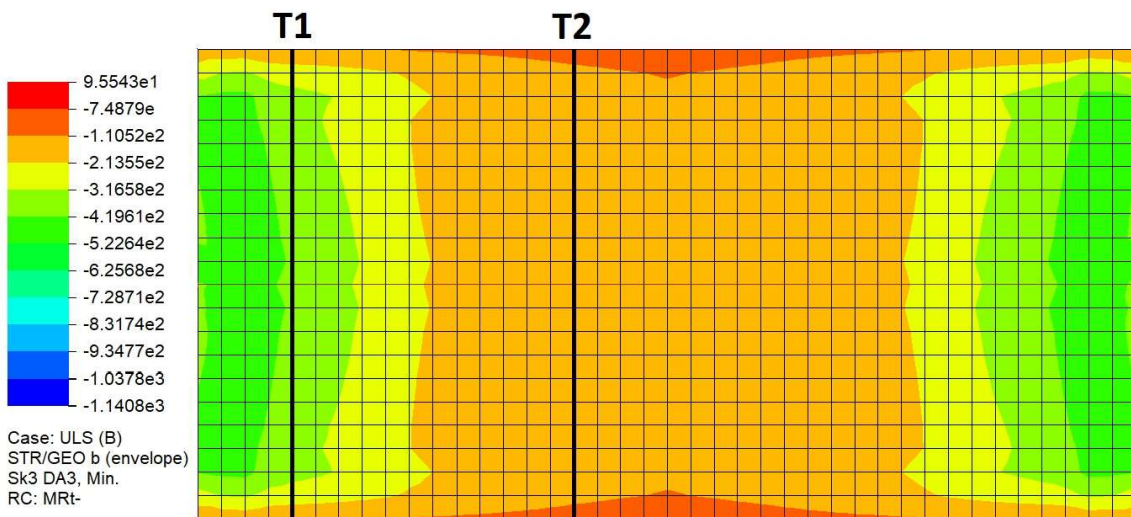
Figur 3.7 Fördelning av största tvärkraft längs farbana för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



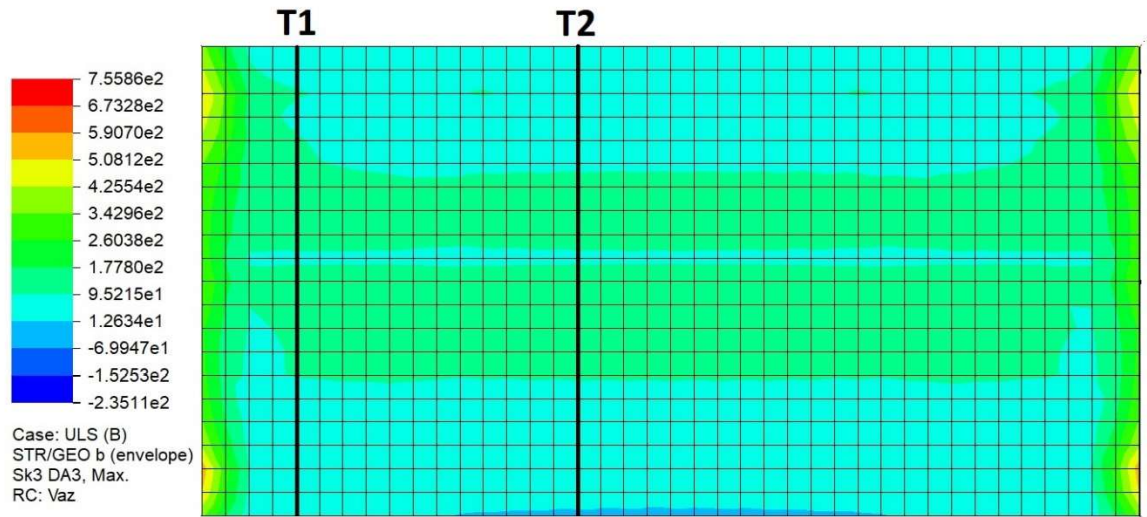
Figur 3.8 Fördelning av minsta tvärkraft längs farbana för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer



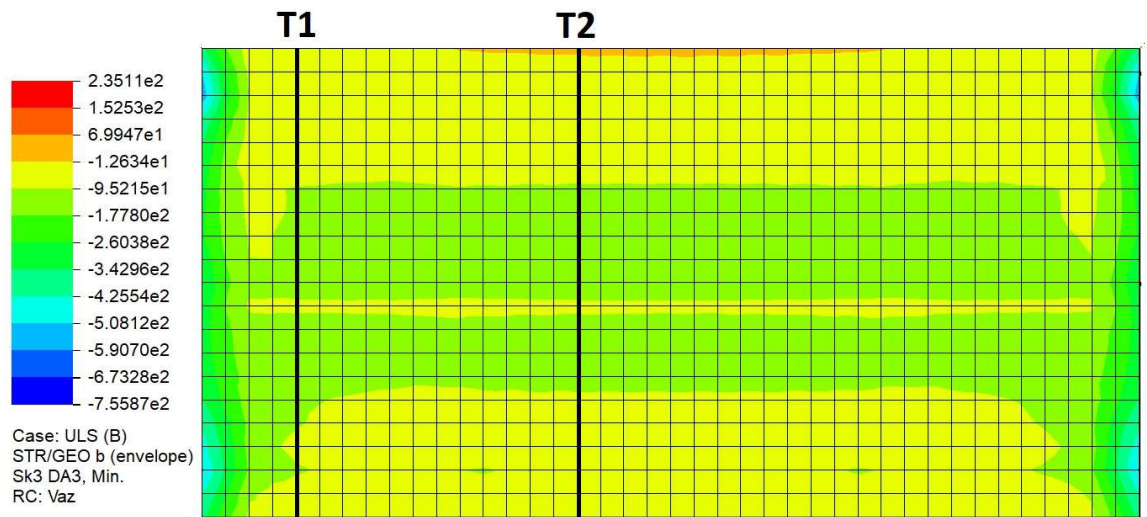
Figur 3.9 Fördelning av största moment tvärs farbana för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



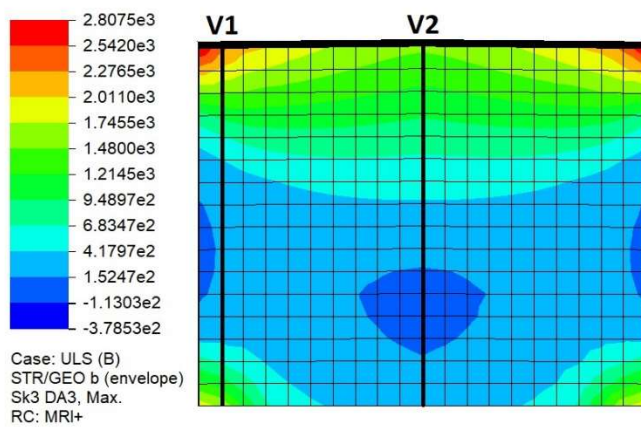
Figur 3.10 Fördelning av minsta moment tvärs farbana för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



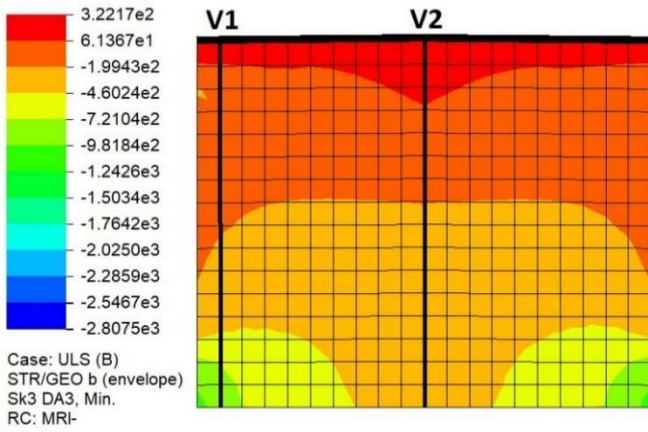
Figur 3.11 Fördelning av största tvärkraft tvärs farbana för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



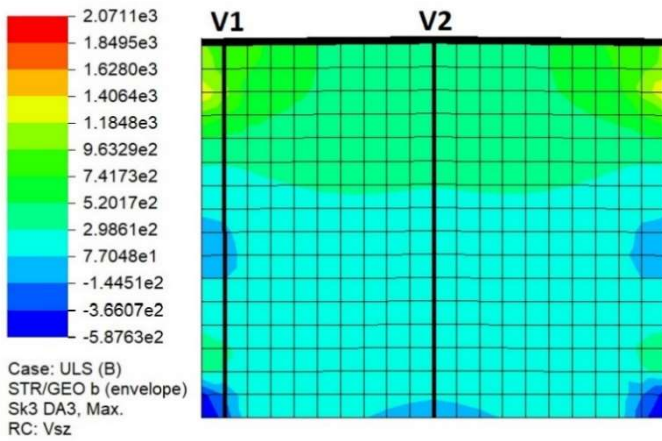
Figur 3.12 Fördelning av minsta tvärkraft tvärs farbana för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



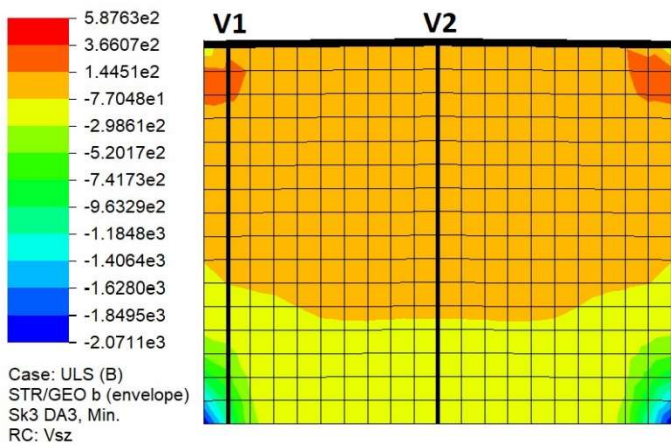
Figur 3.13 Fördelning av största moment längs ramben för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



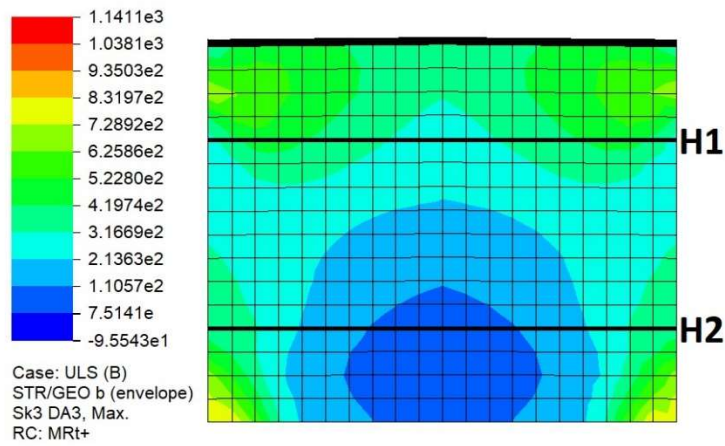
Figur 3.14 Fördelning av minsta moment längs ramben för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



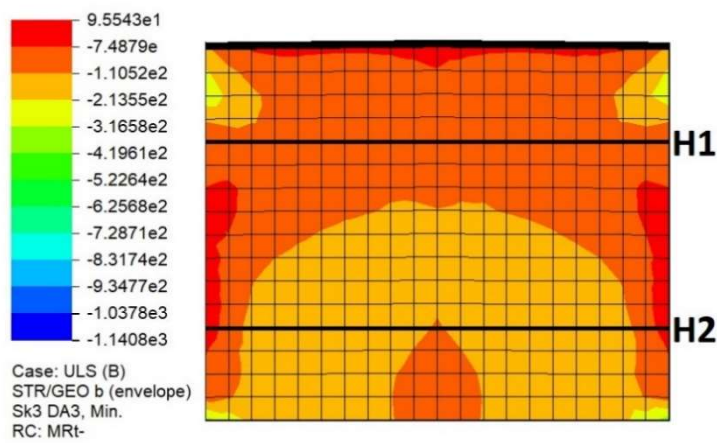
Figur 3.15 Fördelning av största tvärkraft längs ramben för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer



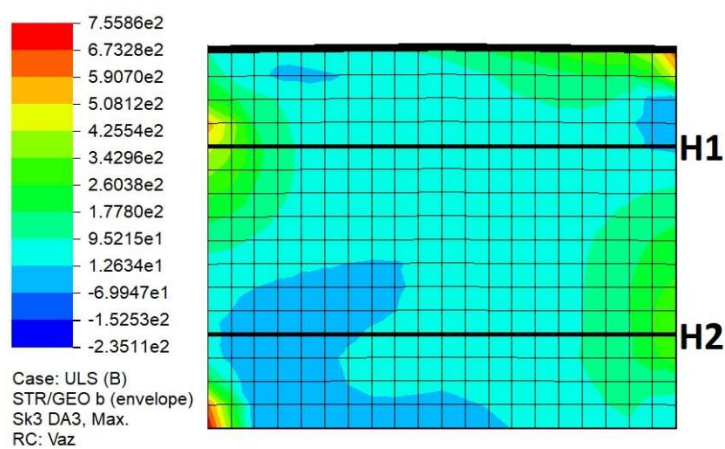
Figur 3.16 Fördelning av minsta tvärkraft längs ramben för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



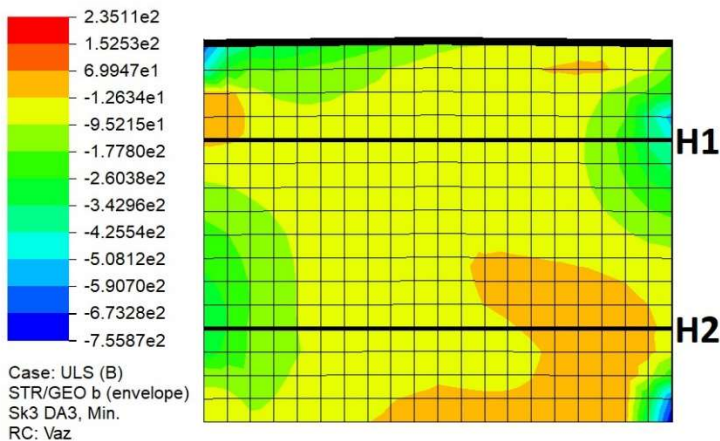
Figur 3.17 Fördelning av största moment tvärs ramben för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



Figur 3.18 Fördelning av minsta moment tvärs ramben för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



Figur 3.19 Fördelning av största tvärkraft tvärs ramben för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.



Figur 3.20 Fördelning av minsta tvärkraft tvärs ramben för bro S20V0.9F6.3 samt valda resultatlinjer.

3.3 Dimensionering av armering

Tvärsnittens armeringsbehov beräknas med programvaran ConcreteDesigner beam [11]. Programmet utför beräkningar enligt SS-EN 1992-1-1:2004 [12] och beräknar erforderlig armeringsmängd för en plattstrimla med bredden 1000 millimeter. För varje snitt kontrolleras ifall det finns behov av armering. Ifall det finns ett behov av armering läggs armeringsstänger succesivt in tills snittets armeringsbehov är uppnått. I första hand läggs armeringsstänger i det mest fördelaktiga lagret. När fler armeringsstänger inte längre får plats i ett lager läggs de i nästa. Programmet justerar för förändring i tyngdpunkt ifall armeringen inte får plats i ett lager.

Resultatet presenteras både grafiskt och numeriskt i mm^2/m armering för ett antal snitt längs linjen motsvarande FE-modellen.

I denna studie översätts moment, vridmoment, tillhörande normal- och tvärkraft enligt valda resultatlinjer från BRIGADE/Standard till armeringsbehov per snitt. Tvärsnittet armeras för att klara brottgräns- och kvasi-permanent bruksgränstillstånd enligt de förutsättningar och materialegenskaper som anges i kapitel 4. För varje beräknad punkt antar i programmet att tvärsnittet spricker och beräknar erforderlig mängd armering för att begränsa den maximala sprickvidden till 0.15 millimeter enligt SS-EN 1992-1-1:2005 [7] 7.3. Programmet tar dock inte hänsyn till andra ordningens teori.

Rimlighetskontroll har genomförts efter varje armerat tvärsnitt så att armeringsbehovet är lika stort i bägge ändar för alla resultatlinjer utom V1 och V2, där olika armeringsmängd förväntas. Broarna armeras för att begränsa sprickvidden w_{max} till 0.15 mm.

ULS och SLS i figur 3.22 och 3.24 visar armeringsbehov i brottgränstillståndet (ULS) och bruksgränstillståndet (SLS). Linjerna ovanför respektive under

snittlinjen motsvarar armeringsbehov i ovankant respektive underkant. Armeringsbehov med hänsyn till förankringslängd visas för linjen ULS displaced. Tvärsnittet måste armeras med en armering motsvarande det största värdet av ULS och SLS i varje snitt för att vara godkänt.

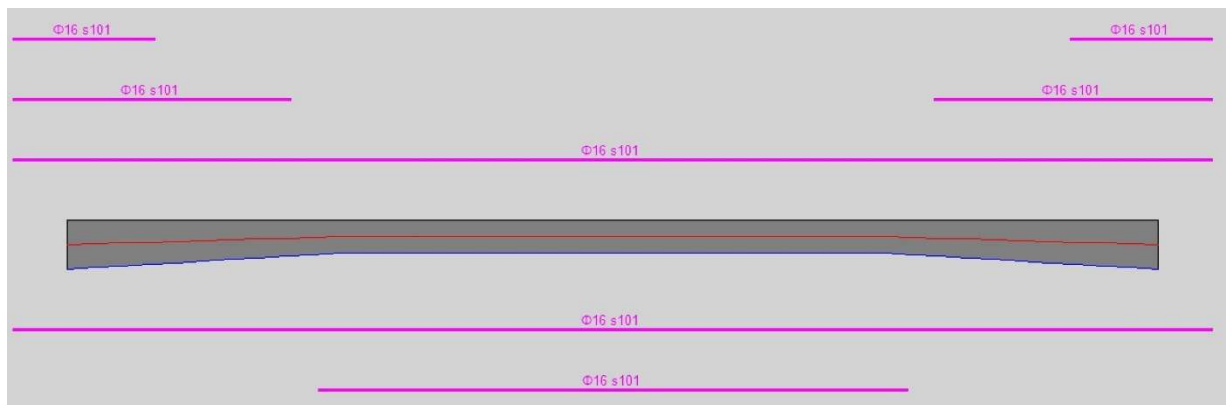
Att lägga in armering precis enligt vad programmet räknar som krav för att tvärsnittet ska vara godkänt är i praktiken omöjligt. Detta eftersom det skulle krävas allt för stor variation i armeringsstängernas längd, placering och hur tätt de ligger i lagret. Figur 3.21 – 3.24 visar hur samma tvärsnitt kan armeras på olika sätt, där figur 3.21 och 3.23 schematiskt visar inlagd armering och vilket cc-avstånd de ligger på.

De tillhörande figur 3.22 och 3.24 visar grafiskt armeringsbehov för respektive tvärsnitt. Armering enligt figur 3.23 – 3.24 följer kurvan för armeringsbehovet bättre, men ger en alltför komplicerad armering. Armering enligt figur 3.21 – 3.22 är mer realistisk, men leder till större armeringsåtgång.

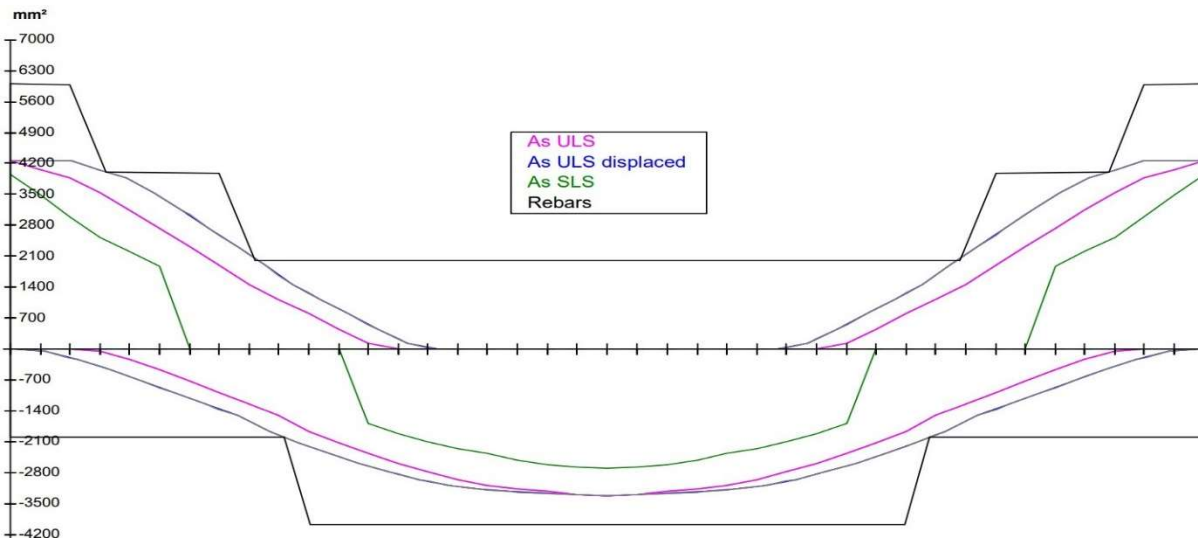
Teoretisk jämförelse av förhållandet armeringsbehov kontra praktiskt inlagd armering för ett antal olika tvärsnitt som armerats i stil med figur 3.21 och 3.23 visade att det krävs ca 30% – 60% armering utöver vad ULS-linjen visar. Samma tvärsnitt kan alltså armeras på flera olika sätt för att bli godkänt.

Vid beräkning av produktionskostnader och miljöbelastning antas därför 50% armering utöver minsta teoretiska värde.

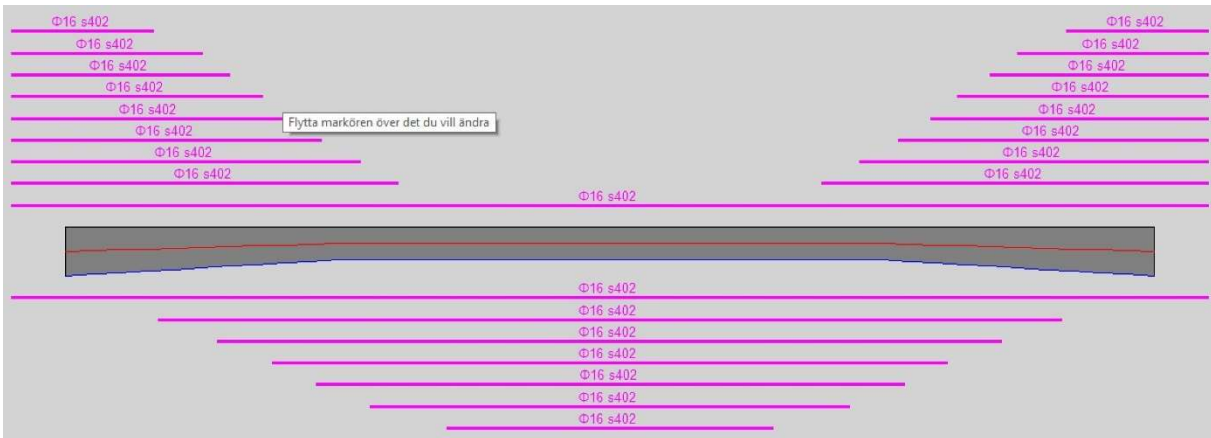
För uppskattning av en rams totala armeringsbehov används två modeller.



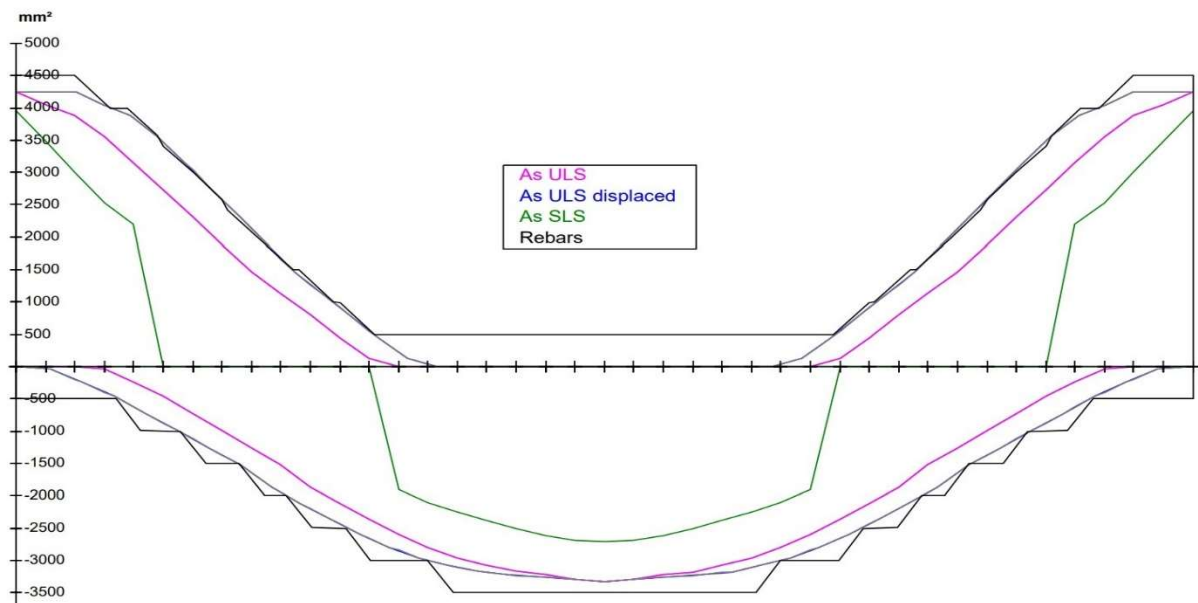
Figur 3.21 Armering inlagd för att skära ULS displaced var 2000:e mm².



Figur 3.22 Grafisk representation av inlagd armering enligt figur 3.21.



Figur 3.23 Armering inlagd för att skära ULS displaced var 500:e mm².



Figur 3.24 Grafisk representation av inlagd armering enligt figur 3.23.

Modell 1:

Här förenklas armeringens utformning i tvärled genom att samma armering väljs över hela brons bredd. Detta leder till en större åtgång av armering. Största/minsta påträffade värde för varje snitt i resultatlinjerna L1 och L2 samt V1 och V2 blir dimensionerande för hela bredden. Resultatlinjerna i tvärled, T1 och T2 samt H1 och H2, armeras som 1000 millimeters plattstrimlor och läggs ihop enligt följande:

$$\text{Tvärs farbanan: } T1 \cdot \frac{S}{2} + T2 \cdot \frac{S}{2}$$

$$\text{Horisontellt på rambenen: } H1 \cdot 2 \cdot \frac{\text{Höjd}}{2} + H2 \cdot 2 \cdot \frac{\text{Höjd}}{2}$$

Figur 3.26 illustrerar vilken del av ramen som armeras enligt vilken linje i tvärled.

Modell 2:

I denna modell väljs olika armering i brons mittled respektive kanten. För uppskattning av armeringsbehov längs och tvärs ramen armeras alla resultatlinjer som plattstrimlor på 1000 millimeter vardera. Strimlorna läggs ihop för att bilda en komplett ram enligt följande:

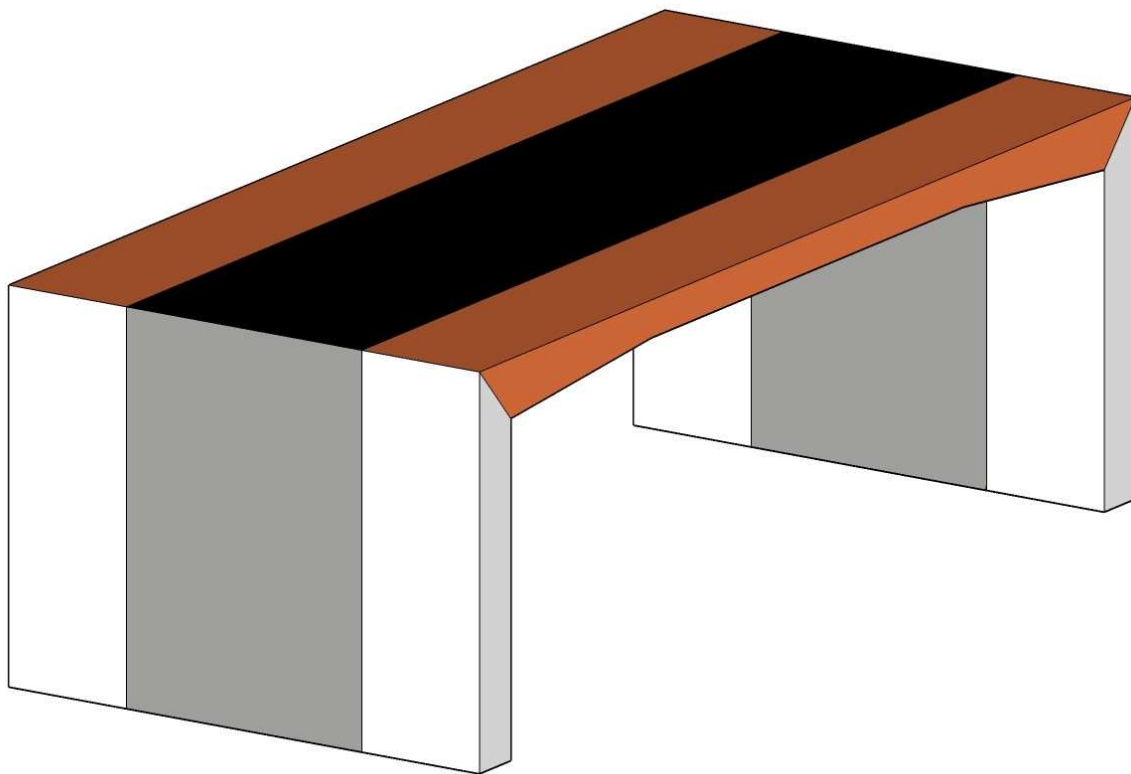
$$\text{Längs farbanan: } L1 \cdot 2 \cdot 2,5 + L2 \cdot 5$$

$$\text{Tvärs farbanan: } T1 \cdot \frac{S}{2} + T2 \cdot \frac{S}{2}$$

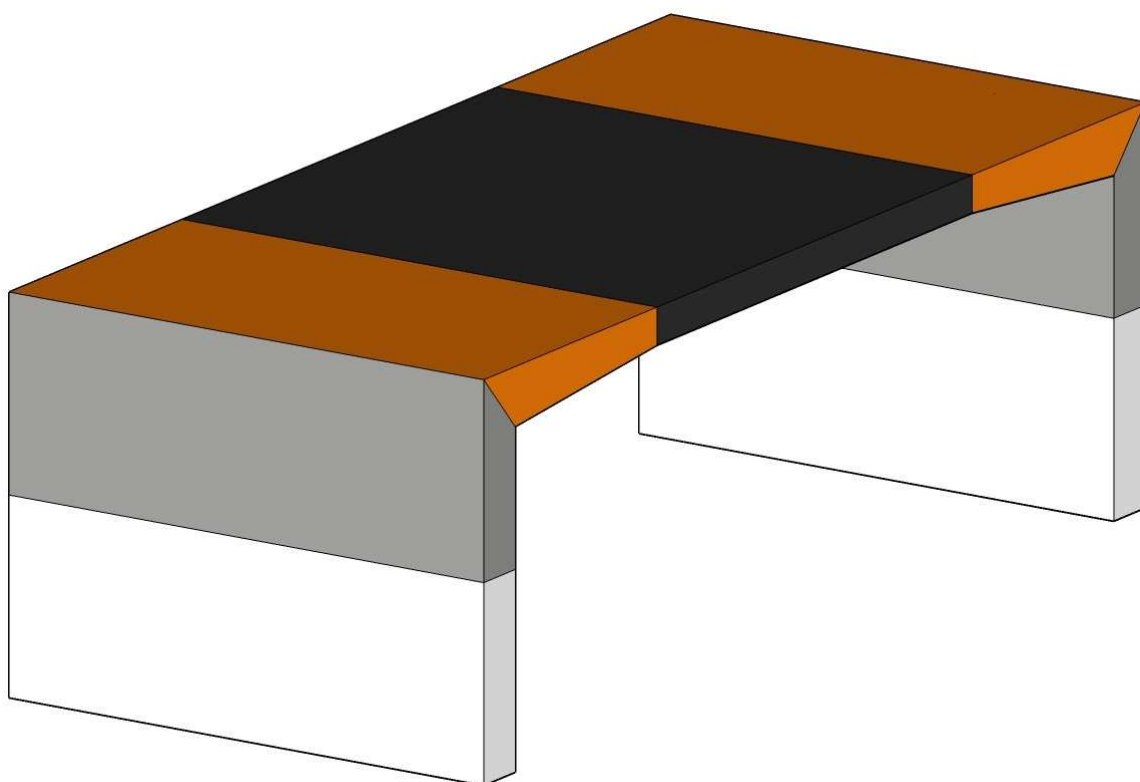
$$\text{Vertikalt på rambenen: } V1 \cdot 2 \cdot 2,5 \cdot 2 + V2 \cdot 5 \cdot 2$$

$$\text{Horisontellt på rambenen: } H1 \cdot 2 \cdot \frac{\text{Höjd}}{2} + H2 \cdot 2 \cdot \frac{\text{Höjd}}{2}$$

Figur 3.25 - 3.26 illustrerar vilken del av ramen som armeras enligt de olika linjernas armeringskurvor.



Figur 3.25 Armering längs ramen. Orange motsvarar L1, svart motsvarar L2, vit motsvarar V1 och grå motsvarar V2.



Figur 3.26 Armering tvärs ramen. Orange motsvarar T1, svart motsvarar T2, grå motsvarar H1 och vit motsvarar H2.

3.4 Uppskattning av produktionskostnad

Prisuppgifter för betong och armering hämtas ur Wikells Sektionsdata [1] 2020-05-20 som är ett, inom byggbranschen, erkänt kalkylprogram. Programmets kostnadsuppskattning bygger på långvarig erfarenhet av hur mycket tid som går åt för ett visst arbetsmoment samt aktuella prislister med standardrabatter inräknade.

Gjutformens kostnad förutsätts vara likvärdig i de fall där tvärsnittet varierar och räknas ej med i uppskattningen av pris.

Kostnad för betong och armering beräknas enligt tabell 3.1 och både material- och arbetskostnad ingår.

Tabell 3.1 Priser för betong och armering enligt Wikells sektionsdata.

Konstruktionsmaterial	Mängd	Enhet	Bruttopris/enhet (Sek)
Betong Självkompakterande	1,0	m ³	3350,9
Armering K500C-TØ12 (0,89kg/m)	1,0	ton	33290
Armering K500C-TØ16 (1,58kg/m)	1,0	ton	33390

3.5 Miljöpåverkan

För det här arbetet räknas miljöpåverkan endast som den mängd koldioxid (CO₂) som avges i samband med produktion av ramen. Detta inkluderar ej miljöpåverkan från transporter.

3.5.1 Uppskattning av miljöpåverkan från betong

Betong är en produkt som erhålls genom blandning av cement, ballast och vatten. Generellt sett gäller att en betong med mindre andel vatten har högre hållfasthet. Cement är ett bindemedel som tillverkas av finmald kalksten och lera. Materialen bränns i långa roterande ugnar vid 1450 grader Celsius och bildar cementklinker. Ca 60% av utsläppen vid cementtillverkning kommer från processen kalcinering, där koldioxid frigörs ur kalksten vid upphettning.

Cementklinkern mals och blandas med gips för att produkten cement ska erhållas. Gipsets funktion är att reglera cementens reaktion med vatten som annars skulle bli allt för snabb [13].

Livscykelanalyser av betong visar att runt 90% av koldioxidutsläppen kommer från cementtillverkningen och resterande från kringliggande verksamheter som transporter, framställning av ballast och användning av vatten och tillsatsmedel. Cementtillverkning orsakar idag ca 3 - 4% av världens totala utsläpp och bara i Sverige släpps årligen 1,65 miljoner ton koldioxid ut vid framställning av cement enligt en rapport från Svensk Betong [14].

Efter hand som betongen åldras karbonatiserar den, det vill säga den tar upp koldioxiden som frigjordes i tillverkningsprocessen. Med dessa faktorer i åtanke väljs betongens miljöbelastning enligt Svensk Betongindustris beräkning.

Enligt Svensk Betongindustri har cement en miljöpåverkan som motsvarar 709 kg koldioxid per ton. När denna blandas till betong som vanligen används vid brobyggen kan man räkna med en miljöpåverkan motsvarande 388 kg CO₂ per kubikmeter betong vid vattencementtalet 0,39 [14].

Det pågår flera satsningar för att minska betongens klimatpåverkan. Ledande aktörer bedömer att det är möjligt att räkna bort hälften av betongens miljöpåverkan genom att bland annat klimatkompensera enligt Finja [15]. En hypotetisk miljöpåverkan på 194 kg CO₂ / m³ betong antas för att undersöka hur ramens miljöpåverkan förändras, om betongens klimatpåverkan halveras.

Vid uppskattning av miljöpåverkan används normalvärde enligt ovan (B1 i tabell 3.2) samt en betong med CO₂ reducerat till hälften (B2 i tabell 3.2).

Tabell 3.2. Betongens miljöpåverkan räknat i koldioxidutsläpp.

Namn	Miljöpåverkan [kg CO ₂ / m ³ betong]
B1	388
B2	194

3.5.2 Uppskattning av miljöpåverkan från armering

Armering K500C-T är en produkt som huvudsakligen består av stål trots att det i vardagligt språk kallas järn, som är grundämnet i produkten. I Sverige utvinns järn huvudsakligen från järnmalm eller skrot, där skrot har en betydligt lägre miljöpåverkan. Tillgången på skrot är begränsad, men man kan räkna med att ca 30% av den svenska stålproduktionen är skrotbaserad. Stål har den goda egenskapen att det kan återvinnas ett oändligt antal gånger utan att kvalitén påverkas. Detta gäller även om stålet har en beläggning eller ingår i en legering [16].

I Sverige produceras årligen runt 4,5 miljoner ton stål med 5,8 miljoner ton koldioxidutsläpp som följd, motsvarande 11% av Sveriges totala koldioxidutsläpp. 85% av dessa utsläpp bildas vid processen att omvandla järnmalm till järn och

12% vid uppvärmning och bearbetning av stålet. Detta gör att armeringens miljöpåverkan är starkt beroende på stålets ursprung.

I detta arbete räknas armeringens miljöpåverkan för tre olika alternativ:

1. Masugnsbaserat stål från till största delen jungfruliga råvaror motsvarande en miljöbelastning på 2000 kg CO₂/ton stål [17]
2. Genomsnittligt europeiskt medelvärde med en motsvarande miljöbelastning på 1030 kg CO₂/ton stål [18].
3. Celsa Steelservice miljövänligaste alternativ med 370 kg CO₂/ton stål [18].

Miljövarudeklaration för Celsa Steelservice miljövänligaste alternativ är utförd, samt granskad av tredjeparten EPD International [18].

För beräkningar används benämningar för de tre alternativen enligt tabell 3.3.

Tabell 3.3 Armerings miljöpåverkan räknat i koldioxidutsläpp.

Namn	Miljöpåverkan [kg CO₂ / ton armering]
A1	2000
A2	1030
A3	370

4 Parameterstudie

I detta kapitel beskrivs laster och övriga beräkningsförutsättningar samt hur dessa varierar i parameterstudien.

4.1 Geometri

De analyserade broarnas geometri är baserade på en bro som uppfördes i Kågeröd utanför Helsingborg år 2020. Denna har spännvidden $S=20$ meter, fria höjden $F=6,3$ meter, bredden 10 meter och ramtjocklek motsvarande $V=1,1$ meter.

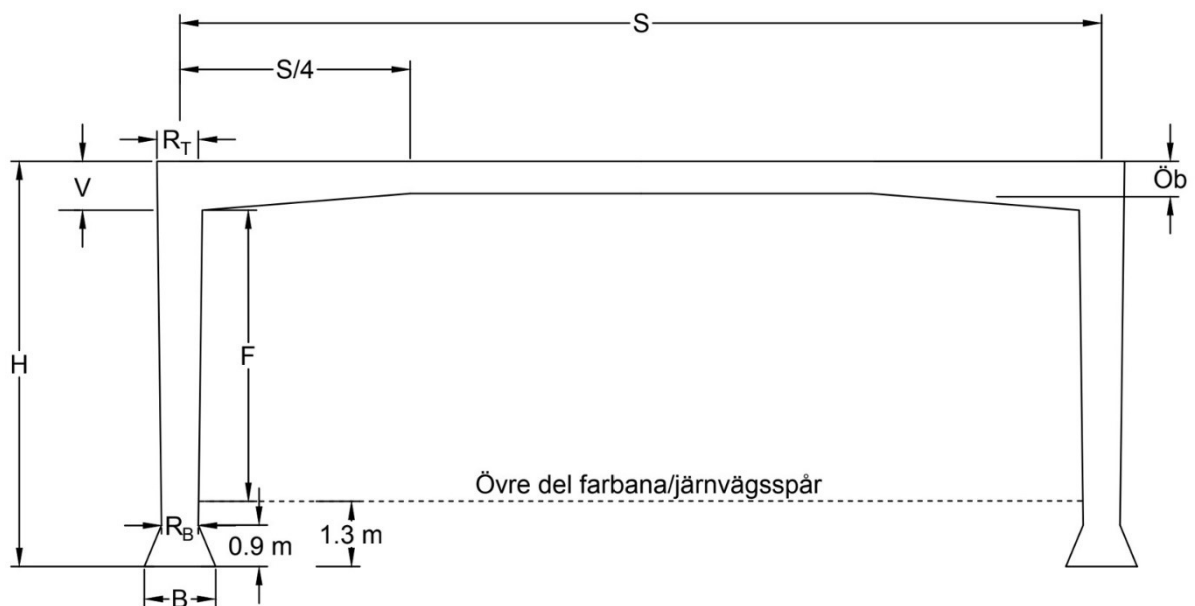
De analyserade broarnas tvärsnitt varierar proportionellt mot votens tjockaste del avrundat till närmsta 0,05 m för 4 olika spännvidder och 3 olika fria höjder.

Ramarna väljs för att klara fria höjder på 3,2, 4,7 och 6,3 meter, vilket motsvarar ungefärliga mått för gång- & cykelbana, vägtrafik samt järnvägstrafik.

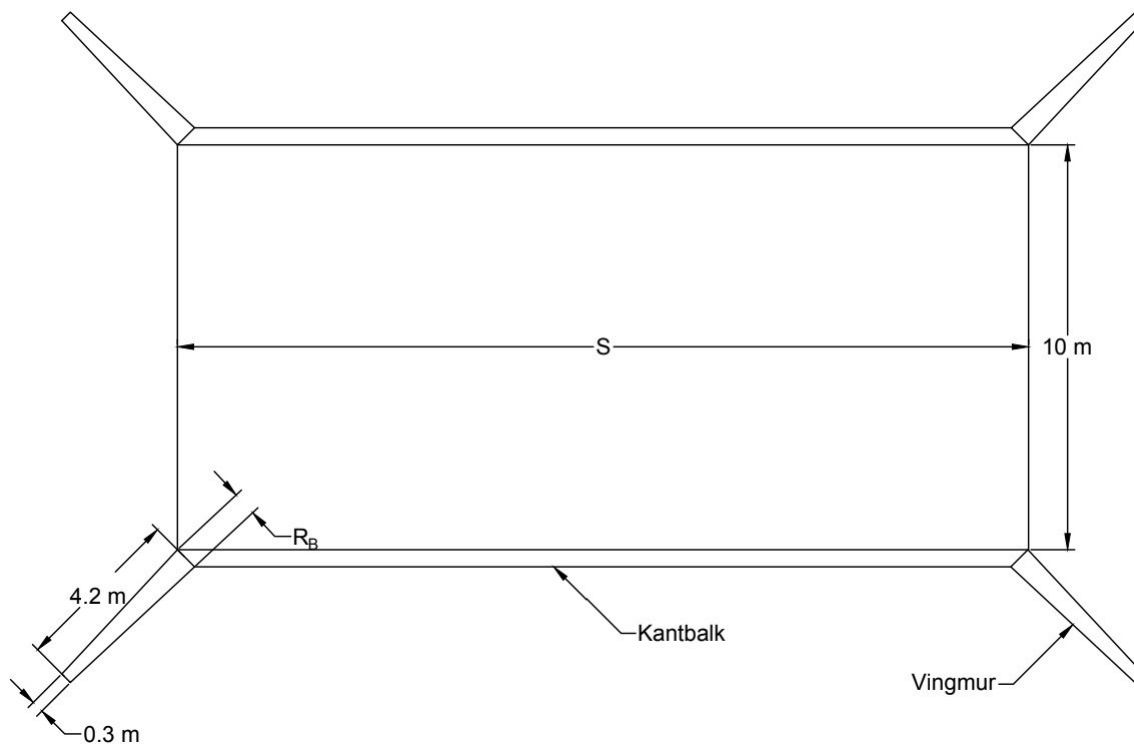
Samtliga broar är modellerade med en vingmur vinklad 45 grader ut från körbanans riktning. Vingmurens tjocklek närmast frontmuren varierar proportionellt mot frontmurens tunnaste del R_B enligt figur 4.2. Höjden för vingmuren räknas som bronns totala höjd $H - 0.5$ meter och börjar i höjd med bronns övre del.

Figur 4.1 tillsammans med tabell 4.1 beskriver hur ramens tjocklek och höjd varierar med vottjockleken som utgångspunkt. Ramens tunnaste respektive tjockaste tvärsnitt illustreras för några exempel i figur 4.3.

I tabell 4.2 redovisas samtliga testade ramar. Det ses som troligt att en större spännvidd kräver en tjockare ram, varför något tunnare ramar undersöks för kortare spännvidder.



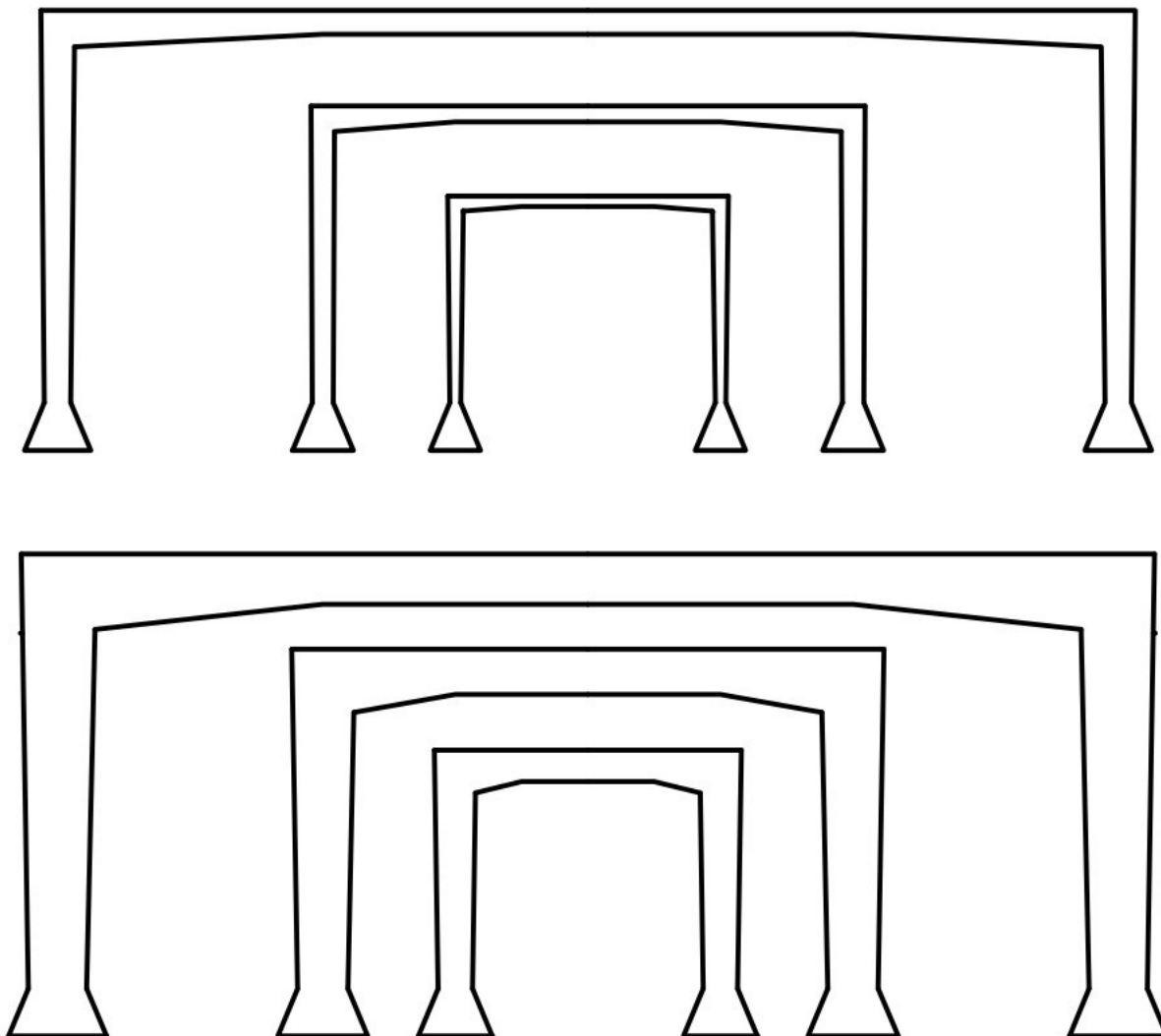
Figur 4.1 Principskiss över ramen samt mått sett från sidan.



Figur 4.2 Principskiss över plattrambro sett ovanifrån.

Tabell 4.1. Ramens mått vid olika vottjocklekar.

Vot	H (F3.2)	H (F4.7)	H (F6.3)	Öb	Rt	Rb	B
0,3	4,9	6,4	8,0	0,20	0,30	0,20	0,95
0,4	5,0	6,5	8,1	0,25	0,35	0,30	1,05
0,5	5,1	6,6	8,2	0,30	0,45	0,40	1,15
0,6	5,2	6,7	8,3	0,40	0,55	0,45	1,20
0,7	5,3	6,8	8,4	0,45	0,65	0,50	1,25
0,8	5,4	6,9	8,5	0,50	0,75	0,60	1,35
0,9	5,5	7,0	8,6	0,60	0,80	0,65	1,40
1,0	5,6	7,1	8,7	0,65	0,90	0,70	1,45
1,1	5,7	7,2	8,8	0,70	1,0	0,80	1,55
1,2	5,8	7,3	8,9	0,75	1,1	0,90	1,65
1,3	5,9	7,4	9,0	0,85	1,2	0,95	1,70
1,4	6,0	7,5	9,1	0,90	1,3	1,05	1,80
1,5	6,1	7,6	9,2	0,95	1,4	1,10	1,85



Figur 4.3 Visuellt representation av tunnaste respektive tjockaste tvärsnitt för S5F3,2, S10F4,7 och S20F6,3.

Tabell 4.2 Undersökta ramars vottjocklek vid olika värden på spännvidd och fri höjd.

	F3,2	F4,7	F6,3
S5	V0,3 – V0,9	V0,5 – V1,3	V0,9
S10	V0,9	V0,5 – V1,3	V0,9
S15	V0,7, V0,9, V1,3	V0,6 – V1,4	V0,9
S20	V0,9	V0,7 – V1,5	V0,7 – V1,5

4.2 Betong

Betong är ett väldigt vanligt material vid dagens byggnationer då det finns många fördelar med den. Den är relativt billig, har låg underhållskostnad, är mångsidig och kan kombineras med andra material för att täcka upp svagheter. Beräkningarna är genomförda för betong C35/45, som är en vanlig betongkvalitet för broar, med materialegenskaper enligt SS-EN 1992-1-1:2005-01-14, utgåva 1 [7] tabell 3.1, se tabell 4.3.

Tabell 4.3 Materialegenskaper för betongkvalitet C35/45.

Betongkvalitet	f_{ck} (MPa)	$f_{ctk0,05}$ (MPa)	$f_{ctk0,95}$ (MPa)	f_{cd} (MPa)	f_{ctd} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E_{cm} (GPa)	α (-)
C35/45	35	2,2	4,2	23,33	1,47	3,5	34	10^{-5}

4.2.1 Teknisk livslängd

Broarnas tekniska livslängdsklass sätts till L100, se tabell 4.4, 120 år. Minsta täckande betongskikt är 45 mm för samtliga beräknade brodelar.

Tabell 4.4 Förutsättningar för brons tekniska livslängd.

Brodel	Livslängdsklass	Exponeringsklass ¹	vct_{max}^2	TBM ³ [mm]	w_{max}^4 [mm]	ξ^5
Broöverbyggnad	L100	XD3	<0,40	45	0,15	1,8
Ramben	L100	XD3	<0,40	45	0,15	1,8

¹ Exponeringsklass väljs enligt Råd Brobyggande [2], tabell D1-2

² Största vattencementtal enligt Trafikverkets författningssamling TRVFS 2018:57 [3], Tabell a

³ Minsta täckande betongskikt enligt Trafikverkets författningssamling TRVFS 2018:57 [3] Tabell a

⁴ Största accepterade sprickvidd enligt Trafikverkets författningssamling TRVFS 2018:57 [3], Tabell b

⁵ Spricksäkerhetsfaktor enligt Trafikverkets författningssamling TRVFS 2018:57 [3], Tabell c

4.3 Armering

För böjarmering används armeringsstänger med diameter 16 mm och för skjuvarmering 12 mm. Beräkningarna är utförda för armeringskvalitet K500C-T med följande material-egenskaper, se tabell 4.5.

Tabell 4.5 Materialegenskaper för armeringskvalitet K500C-T.

Armeringskvalitet	f_{yk} (MPa)	f_{yd} (MPa)	E_s (GPa)	α (-)	ρ (kg/m ³)
K500C-T	500	435	200	10 ⁻⁵	7800

Tvärkraftsarmering bestäms enligt SS-EN 1992-1-1 [7] avsnitt 9.2.2, av det största av följande värden:

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s \cdot b_w} \qquad \rho_{w,min} = \frac{0,08\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$$

där

ρ_w är armeringsinnehållet

$\rho_{w,min}$ är det minsta tillåtna värdet

A_{sw} är tvärkraftsarmeringens area inom längden s

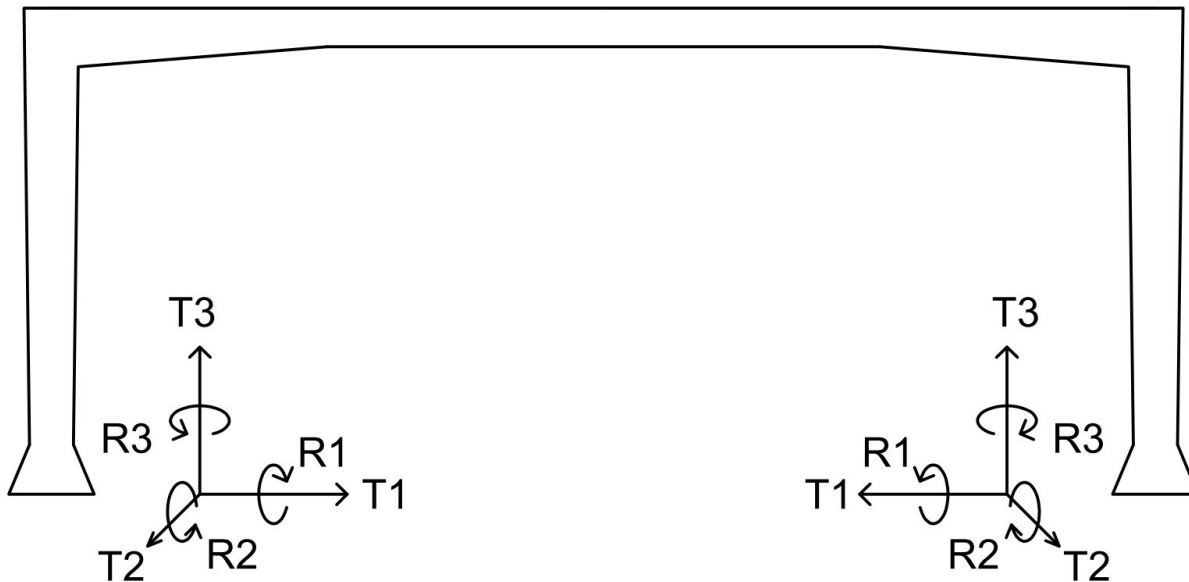
s är c/c avståndet för tvärkraftsarmeringen mätt längs bärverksdelens längd

b_w är bärverksdelens livtjocklek

I de fall tvärkraftsarmering behövs blir i detta fall minsta tillåtna mängd 947 mm²/m.

4.4 Grundläggning

Grundläggningen modelleras med fjädrar i frihetsgrader enligt figur 4.4. Fjäderstyvheter beräknas i BRIGADE/Standard genom ett integrerat verktyg där bottenplattans dimensioner och markens deformationsegenskaper anges. Eftersom de geologiska förutsättningarna är okända antas jordens elasticitetsmodul till 30 MPa, vilket är medianvärdet i tabell 5.2-2 i Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner [5] och motsvarar grovkornig mineraljord. Bottenplattorna antas ha måtten 7 x 11 meter.



Figur 4.4 Randvillkor för ramben.

T1: Fixerad

T2: Fixerad

T3: 648000 kN/m

R1: 3234000 kNm/rad

R2: 5082000 kNm/rad

R3: Fixerad

4.5 Laster

Dimensionerande laster som behandlas är egentygnd, jordtryck, trafiklast, överlast, bromslaster och temperaturlaster. Dessa delas in som permanenta laster samt variabla laster.

Till permanenta laster räknas det som alltid kommer att påverka bron, i detta fallet egentygnd för betong, armering och asfaltsbeläggning. Det är dock inte bara egentygnder som är permanenta, även jordtrycket är en permanent last.

Variabla laster är de som inte innefattas av permanenta laster och som ordet antyder definieras av att de kan variera i olika aspekter. De kan variera på olika sätt, avseende storlek, form, och belastningstid. De som behandlas är trafiklast, bromslast, överlast och temperaturlast.

Lasterna är beräknade i bruksgränstillståndet, kvasipermanent lastkombination, och brottgränstillståndet.

4.5.1 Säkerhetsklass

Ramarna är beräknade för säkerhetsklass 3, $\gamma_d = 1$, enligt Trafikverkets författningssamling TRVFS 2018:57 [3], 1 kap 9 §.

4.5.2 Egentyngd

För egentyngderna kommer armeringen och betongen att slås samman till ett totalt värde, medan beläggningen räknas separat.

Armerad konstruktionsbetong antas ha tungheten $\gamma_{btg}=25 \text{ kN/m}^3$

Beläggningens egentyngd baseras på 100 mm asfalt, $\gamma_{bel}=2,3 \text{ kN/m}^2$.

4.5.3 Jordtryck

Jordtrycket beräknas för sprängsten specificerad enligt Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner [5], med följande materialegenskaper, se tabell 4.6.

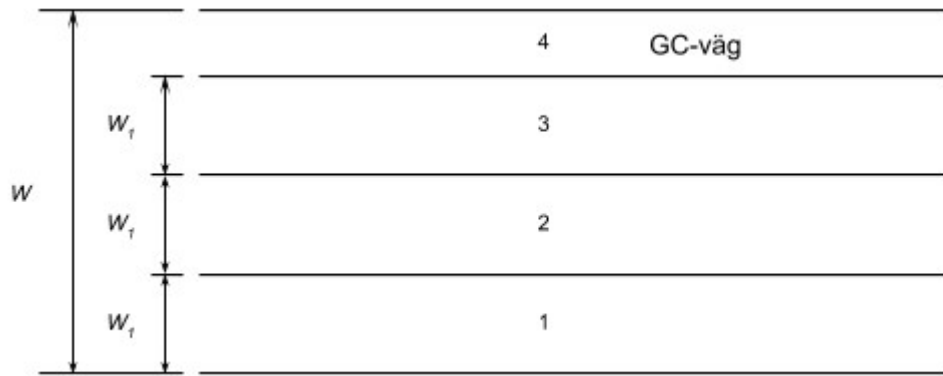
Tabell 4.6 Materialegenskaper för sprängsten.

Tunghet(kN/m ³) över/under GVY		Viljordtrycks- koefficient K_0	Partial- koefficient	Dimensionerande friktionsvinkel Φ_d
18	11	0,39	1,3	37,9°

4.5.4 Vertikal trafiklast

Samtliga broar är dimensionerade för att trafiklast ska kunna angripa över hela broöverbyggnaden, enligt tabell 4.7 – 4.8. Lastfält 1-3 utsätts för en utbredd last på körbanan samt en boggilast, två kopplade axlar som samtidigt belastas. Brobanan delas in i 3 meter breda strimlor, lastfält w_l , se figur 4.5, där Lastfält 1 har den mest ogynnsamma placeringen på bron, lastfält 2 näst mest ogynnsamma etc.

Anpassningsfaktorerna kan motsvaras av trafikklasser där $\alpha=1$ motsvarar den tyngsta trafiklasten som kan förväntas på bron. Faktorerna används för att ange förväntad trafik på bron, t.ex trafikens täthet och betingelse där ett högre värde är tyngre och tätare trafik enligt SS-EN 1991-2 [9].



Figur 4.5 Placering av lastfält där w är bronns bredd.

Tabell 4.7 Lastmodell 1: karakteristiska värden enligt SS-EN 1991-2 [9] rubrik 4.3.2.

Läge	Boggisystem Axellast Q_{ik} (kN)	Utbredd last q_{ik} (kN/m ²)
Lastfält 1	300	9
Lastfält 2	200	2,5
Lastfält 3	100	2,5
Övriga lastfält	0	2,5
Återstående yta	0	2,5

Tabell 4.8 Anpassningsfaktorer enligt VVFS [19]. α_{q1} är rekommenderat värde enligt Eurokod 1 [9].

Anpassningsfaktorer α

α_{Q1}	0,9
α_{Q2}	0,9
α_{Q3}	0
α_{q1}	0,8
α_{qi}	1,0 för $i > 1$

4.5.5 Bromslast

Bromslaster är de laster som uppstår vid till exempel fordons inbromsning på farbanan. Bromslasten antas angripa i broms ytterkanter över stöden och tas upp dels av ramverkan och dels av mothållande jordtryck. Största mothållande jordtryck beräknas enligt SS-EN 1991-2 [9], ekv 4.6. Då längden av överbyggnaden är större än cc-avståndet mellan rambenen, se S i figur 4.1, läggs det på en meter för att vara på den säkra sidan. Bromslast Q_{lk} beräknas enligt:

$$Q_{lk} = 0,6\alpha_{Q1}(2Q_{1k}) + 0,10\alpha_{q1}q_{1k}w_1L$$
$$180\alpha_{Q1}(\text{kN}) \leq Q_{lk} \leq 900(\text{kN})$$

där

Q_{lk}	är karakteristisk bromskraft i längdriktningen [kN]
α	är anpassningsfaktor, se tabell 4.8
w_1	är körfältets bredd [m]
L	är längden av överbyggnaden [m]

För spännvidd 20 meter ger detta:

$$Q_{lk} = 0,6 \cdot 0,9(2 \cdot 300) + 0,10 \cdot 0,8 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 21 = 369 \text{ kN}$$

För spännvidd 15 meter ger detta:

$$Q_{lk} = 0,6 \cdot 0,9(2 \cdot 300) + 0,10 \cdot 0,8 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 16 = 359 \text{ kN}$$

För spännvidd 10 meter ger detta:

$$Q_{lk} = 0,6 \cdot 0,9(2 \cdot 300) + 0,10 \cdot 0,8 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 11 = 348 \text{ kN}$$

För spännvidd 5 meter ger detta:

$$Q_{lk} = 0,6 \cdot 0,9(2 \cdot 300) + 0,10 \cdot 0,8 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 6 = 337 \text{ kN}$$

4.5.6 Sidokraft

Bromsverkan från fordonet förutsätts inte angripa helt parallellt med farbanan utan ger upphov till en sidokraft vid till exempel sladd.

Sidokraft Q_{trk} beräknas enligt SS-EN 1991-2 [9] 4.4.2(4) som 25% av bromskraften Q_{lk} , se tabell 4.9.

Tabell 4.9 Sidokraft för fyra olika spännvidder.

Sidokraft	S5	S10	S15	S20
Q_{trk} (kN)	84	87	90	92

4.5.7 Ökat jordtryck till följd av bromsverkan

Maximal ökning av mothållande jordtryck på motsatt ramben beräknas enligt Trafikverkets Råd Brobyggande [2], B.3.2.2.2, se även avsnitt 3.2.4.



Figur 4.6 Angripande och mothållande krafter vid broms- och accelerationslaster.

$$\Delta p = c \cdot \gamma \cdot z \cdot \beta$$

där

Δp är ökat jordtryck (kN/m²)

c är en konstant som sätts till 300 för gynnsamma fall

γ är fyllnadsmaterialets tunghet [kN/m³]

z är djup under markytan [m]

$$\beta = \frac{\delta}{h} \quad \text{där}$$

δ är ramens horisontella förskjutning, avläses i
BRIGADE/Standard

h är rambenets höjd [m]

4.5.8 Överlast

Överlast är en tillfällig last som uppkommer då trafik befinner sig intill rambenen, och ger upphov till ökat jordtryck p_t verkande horisontellt mot rambenen. Enligt TRVFS [3] kap 6, 12 § räknas trafikens belastning med 20 kN/m^2 för brobanans mittersta 6 meter och 10 kN/m^2 för de yttre delarna. I den här studien räknas det förenklat med 20 kN/m^2 för hela bredden. Lasten från trafiken översätts via vilojordtryckskoefficienten K_0 till en jämnt utbredd last verkande direkt mot rambenen enligt beräkning:

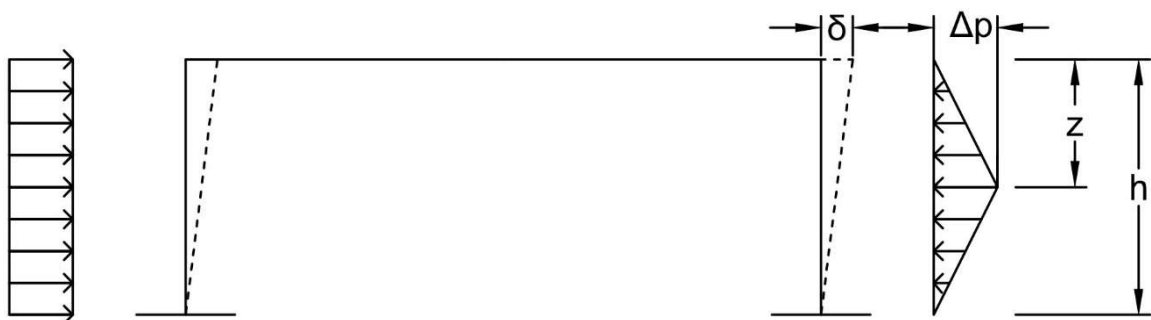
$$p_t = 20 \cdot K_0 = 7,8 \text{ kN/m}^2$$

där

p_t är ökat jordtryck mot ramben

K_0 är vilojordtryckskoefficient

En del av lasten tas upp genom mothållande jordtryck, se figur 4.7, som beräknas för gynnsamma fall, resten tas upp genom ramverkan. Maximal ökning av mothållande jordtryck Δp på motsatt ramben beräknas enligt Trafikverkets Råd Brobyggande [2], B.3.2.2.2, se avsnitt 3.2.4 och 4.5.7.



Figur 4.7 Angripande och mothållande krafter vid överlast.

4.5.9 Jämmt fördelad temperaturlast

Både jämnt och ojämnt fördelade temperaturlaster beaktas. Jämn temperaturfördelning orsakar ökad belastning till följd av expansion. Broöverbyggnaden belastas i huvudsak av en ökad normalkraft och frontmuren av en utbredd last.

Temperaturens inverkan beräknas enligt SS-EN 1991-1-5 [6], 6.1.3.

T_{max} respektive T_{min} är det värde på maximal/minimal lufttemperatur som med sannolikheten 0,02 överskrids/underskrids en gång per år. T_{max} och T_{min} är beräknade medelvärden för Sveriges samtliga kommuner enligt SS-EN 1991-1-5 [6], bilaga NB.

$T_{e,max}$ respektive $T_{e,min}$ är det maximala/minimala värdet som kommer att uppkomma i bron och avläses i SS-EN 1991-1-5 [6], figur 6.1.

T_0 är brons initiala temperatur vilken väljs till 10 °C enligt SS-EN 1991-1-5 [6], bilaga A, A.1(3).

$$T_0 = 10 \text{ °C}$$

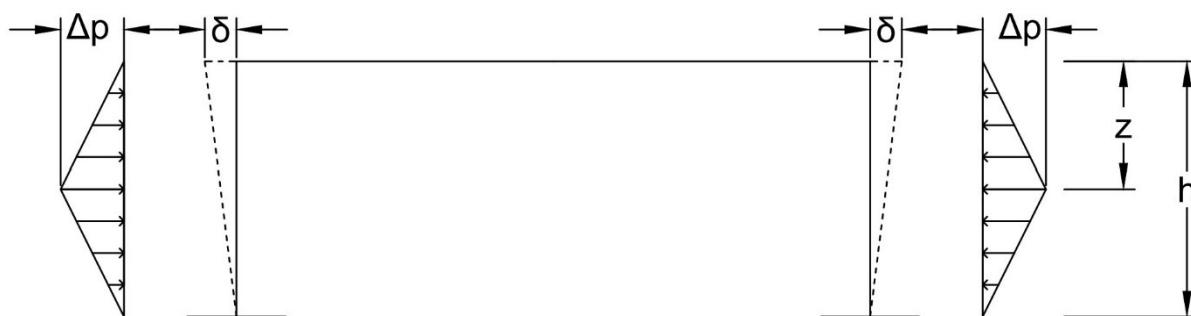
$$T_{max} = 34 \text{ °C}$$

$$T_{min} = -34 \text{ °C}$$

$$T_{e,max} = 35 \text{ °C}$$

$$T_{e,min} = -25 \text{ °C}$$

Ökning av jordtryck till följd av förskjutning av ramen beräknas enligt Trafikverkets Råd Brobyggande [2], B.3.2.2.2, se figur 4.8, samt avsnitt 3.2.4 och 4.5.7.



Figur 4.8 Ökat jordtryck vid expansion av överbyggnaden.

δ motsvarar i detta fall farbanans expansion i längsled som beräknas enligt [20]:

$$\delta = \frac{S \cdot (T_{e,max} - T_{e,min}) \cdot \alpha}{2}$$

där

S är spännvidden för bron [m]

α är utvidgningskoefficient för betong och armering

4.5.10 Ojämnt fördelad temperaturlast

Ojämn temperaturlast kan uppstå vid till exempel solstrålning mot farbana där ovansidan blir varmare än undersidan. Detta medför att den temperaturrelaterade expansionen blir större på broöverbyggnadens ovansida och detta ger upphov till ett moment.

Skillnader i broöverbyggnadens över-/undersida beräknas för broöverbyggnad typ 3, d.v.s. betongplatta, med 100 mm beläggning enligt Eurokod 1 [6], 6.1.4.1, tabell 6.1.

Översida varmare än undersida:

$$\Delta T_{M,heat} = 10,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Undersida varmare än översida:

$$\Delta T_{M,cool} = 8,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.5.11 Lastkombinationer

De lastkombinationer som används är två lastkombinationer i brottgränstillståndet och en i bruksgränstillståndet enligt nedan.

För brottgränstillstånd där egentyngd är dominerande används lastkombination enligt STR, (ekvation 6.10a enligt Byggkonstruktion [21]):

$$\gamma_d 1,35 G_{kj,sup} + \gamma_d 1,5 \psi_{0,i} Q_k$$

För brottgränstillstånd där variabel last är dominerande används lastkombination enligt STR, (ekvation 6.10b enligt Byggkonstruktion [21]):

$$\gamma_d 1,2 G_{kj, sup} + \gamma_d 1,5 Q_{k,1} + \gamma_d 1,5 \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

För bruksgränstillstånd används kvasi-permanent lastkombination enligt (ekvation 6.16b enligt Byggekonstruktion [21]):

$$1,0 G_{k,j} + \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

5 Resultat

För att flera olika spännvidder och höjder ska kunna jämföras visas i diagram armeringsbehovet i mm^2/m längs farbanans längd respektive rambenets höjd.

5.1 Variation av spännvidd och höjd

I det här avsnittet presenteras hur armeringsbehovet påverkas av förändringar i spännvidden och höjden när ramens tjocklek är konstant enligt tabell tabell 5.1.

Tabell 5.1 Undersökta ramar.

Höjd/Spännvidd	S5	S10	S15	S20
F3.2	V0.9	V0.9	V0.9	V0.9
F4.7	V0.9	V0.9	V0.9	V0.9
F6.3	V0.9	V0.9	V0.9	V0.9

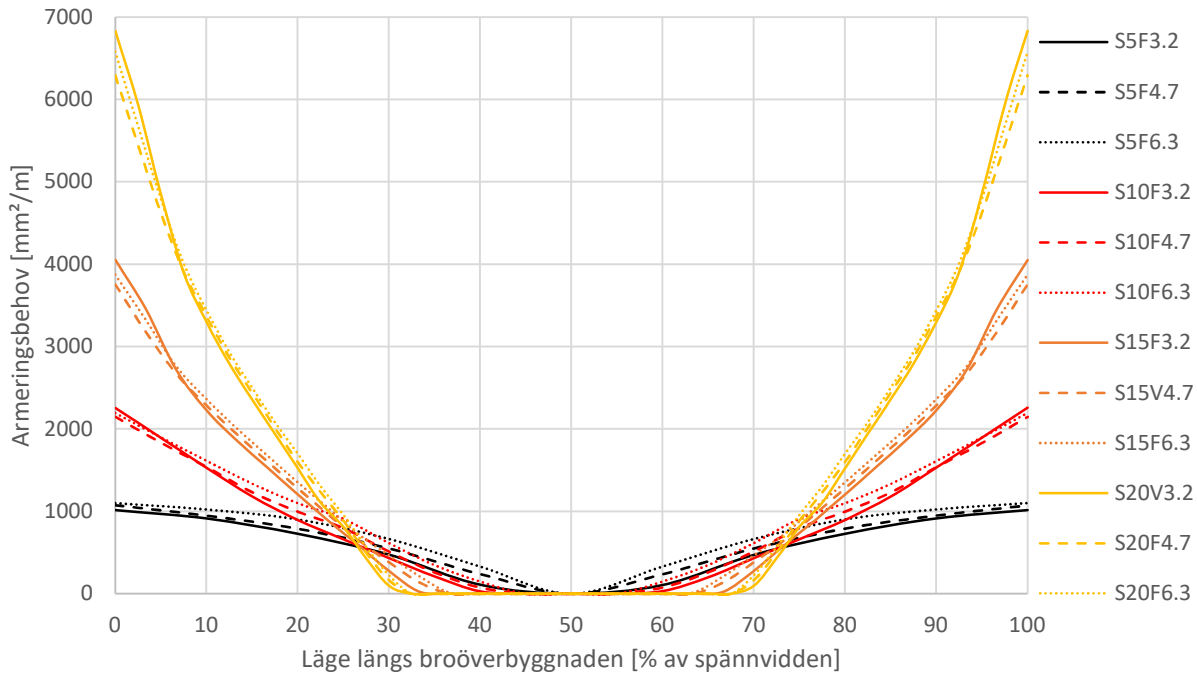
Linjerna i figur 5.1 – 5.20 har en färg och linjestruktur för att tydliggöra variationer i armeringsbehov. Spännvidden 5 meter presenteras med svarta linjer, 10 meter med röda linjer, 15 meter med orangea linjer och 20 meter med gula linjer. Heldragen linje motsvarar en fri höjd på 3.2 meter, streckad linje 4.7 meter och punktdad linje 6.3 meter.

I figur 5.1, 5.2, 5.4 och 5.5 ligger de kurvor som representerar samma spännvidd (samma färg) nästan överlappande. Detta tyder på att ramens höjd i det undersökta intervallet har en marginell inverkan på mängden böjarmering som krävs i broöverbyggnaden.

Vidare visar figurerna att det krävs en större mängd armering i brons ytterkanter (L1) jämfört med i mitten (L2).

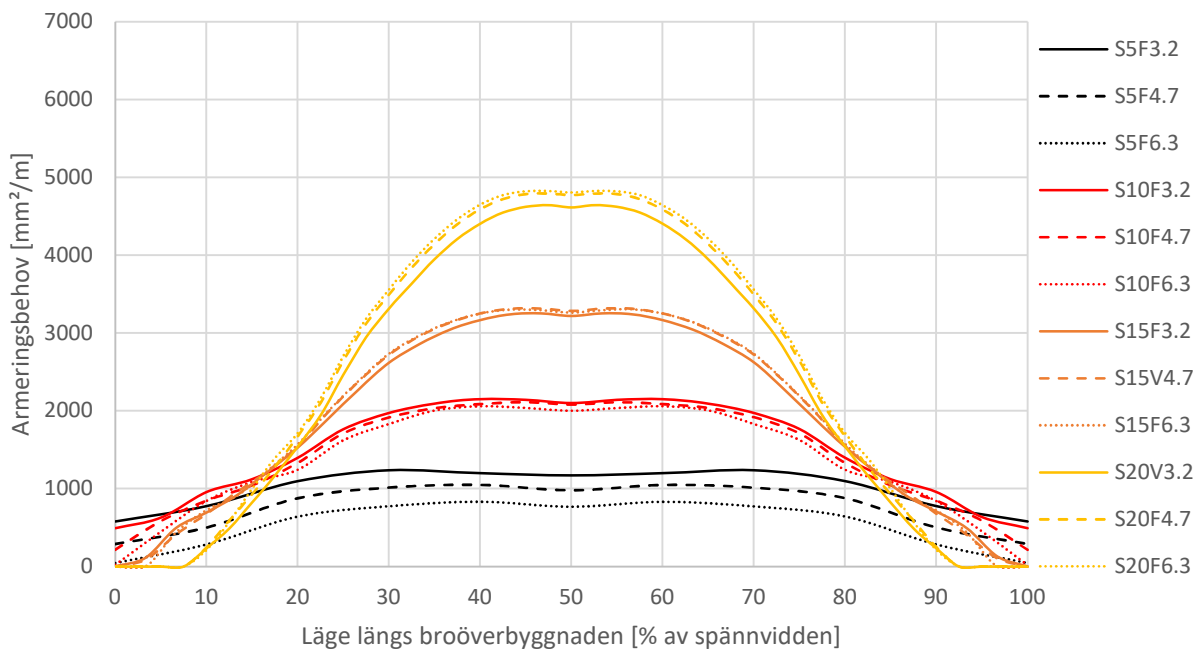
Även mängden tvärkraftsarmering enligt figur 5.3 och 5.6 visar på att bron är hårdare belastad i ytterkanterna jämfört med i mitten. Det framgår tydligt att kravet för minimiarmering beskrivet i avsnitt 4.3 sällan överskrids men ett minimum på $947 \text{ mm}^2/\text{meter}$ måste ändå läggas in enligt [12]. Oavsett spännvidd tycks behovet av tvärkraftsarmering ha näst intill likadan fördelning enligt resultatlinje L1 i figur 5.3, medan fördelningen enligt resultatlinje L2 i figur 5.6 beror på både spännvidd och höjd. Behovet av tvärkraftsarmering utgår helt för den kortaste spännvidden.

Armeringsbehov L1 Ök V0.9



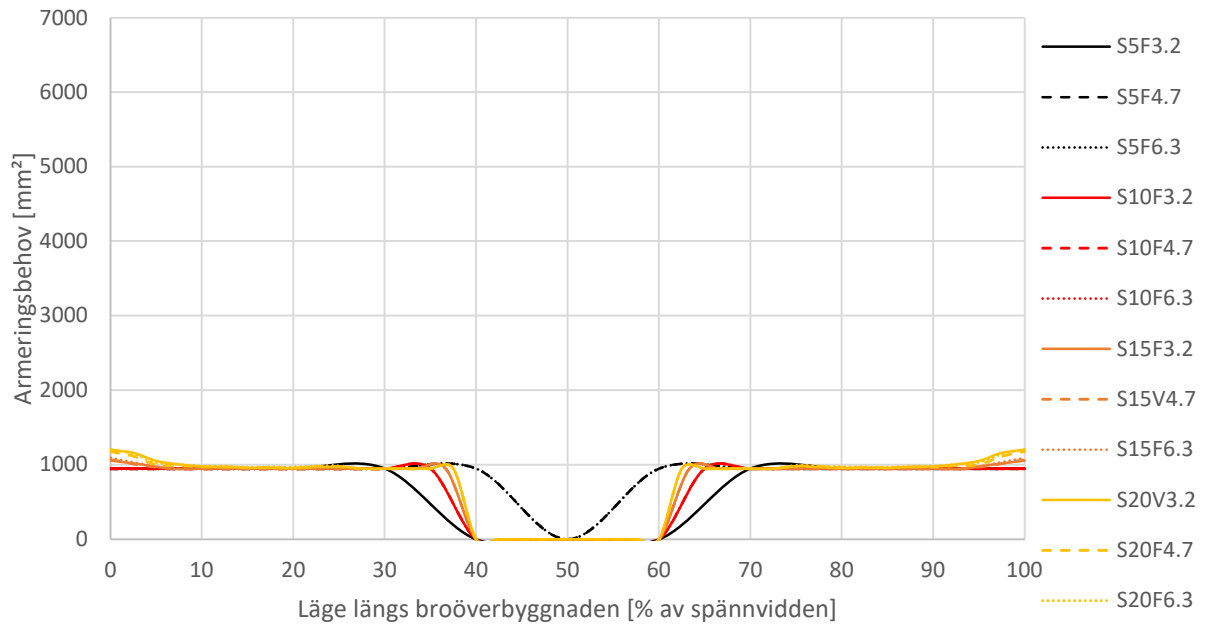
Figur 5.1 Armeringsbehov med hänsyn till moment längs broöverbyggnadens överkant.

Armeringsbehov L1 Uk V0.9



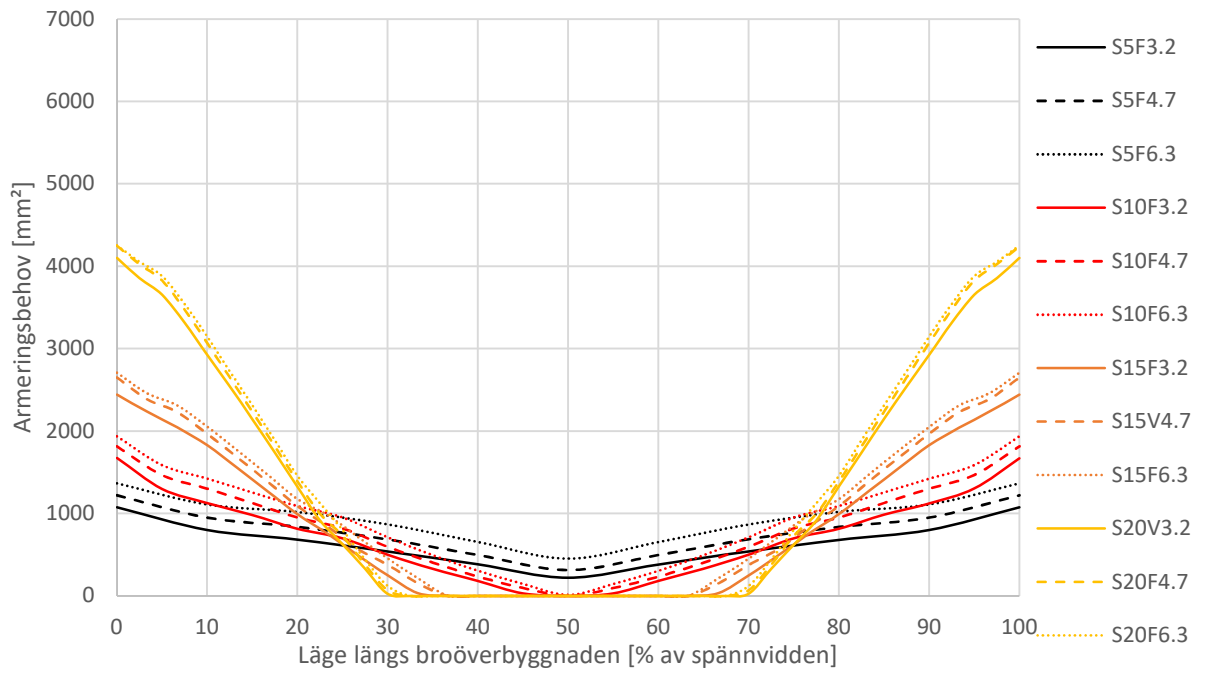
Figur 5.2 Armeringsbehov med hänsyn till moment längs broöverbyggnadens underkant.

Armeringsbehov Tvärkraft L1 V0.9



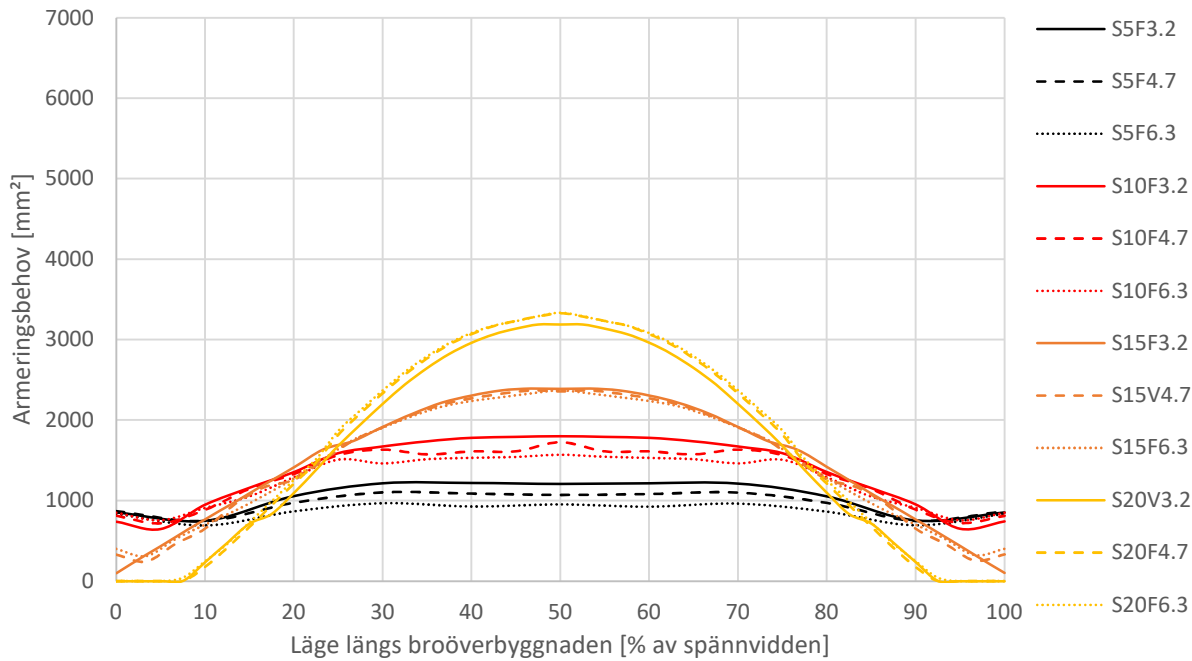
Figur 5.3 Armeringsbehov med hänsyn till tvärkraft längs broöverbyggnaden.

Armeringsbehov Ök L2 V0.9



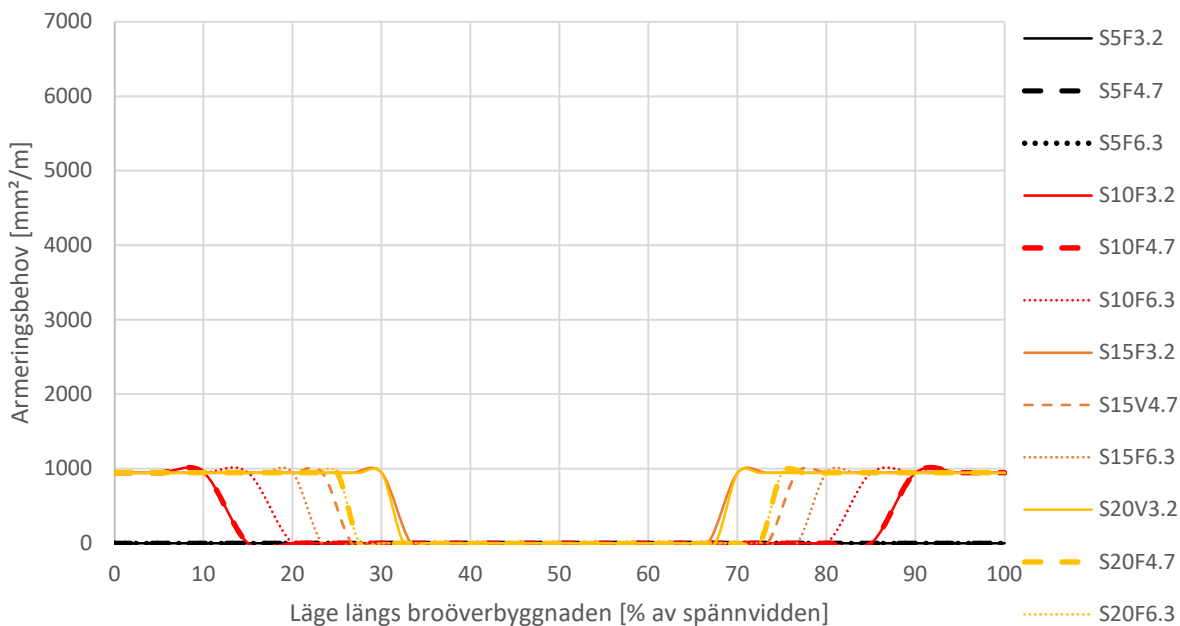
Figur 5.4 Armeringsbehov med hänsyn till moment längs broöverbyggnadens överkant.

Armeringsbehov Uk L2 V0.9



Figur 5.5 Armeringsbehov med hänsyn till moment längs broöverbyggnadens underkant.

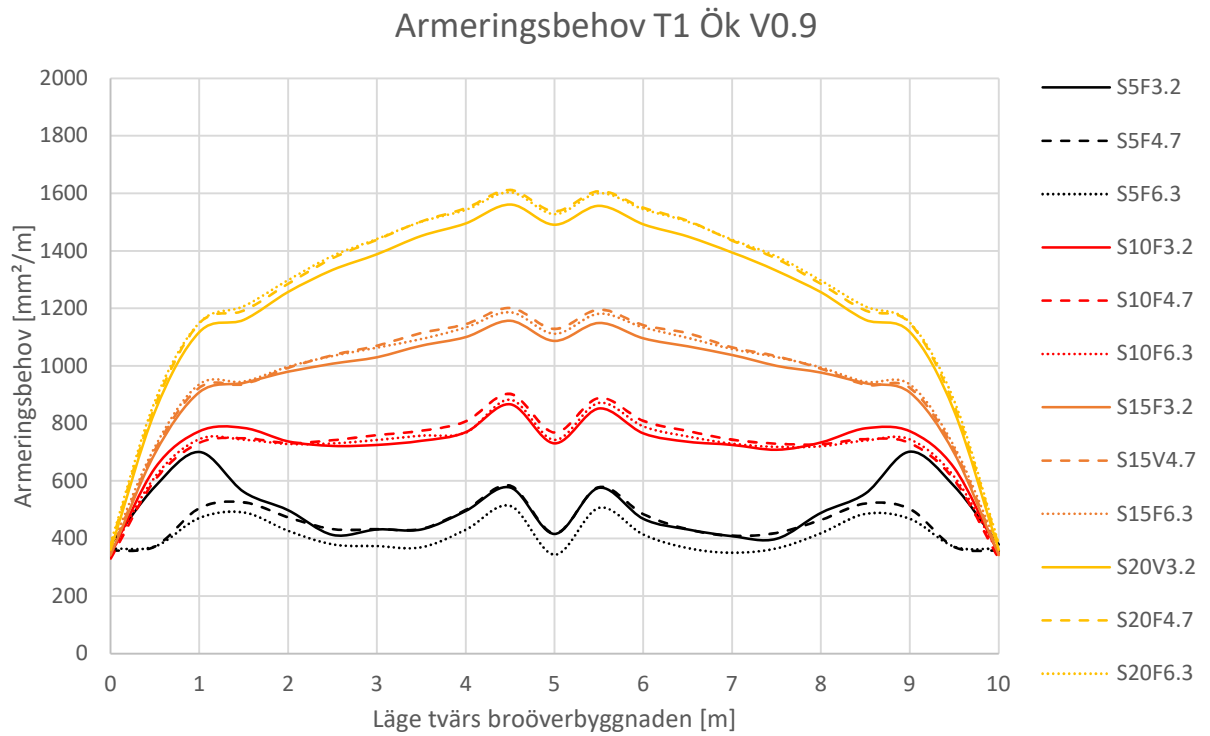
Armeringsbehov L2 Tvärkraft V0.9



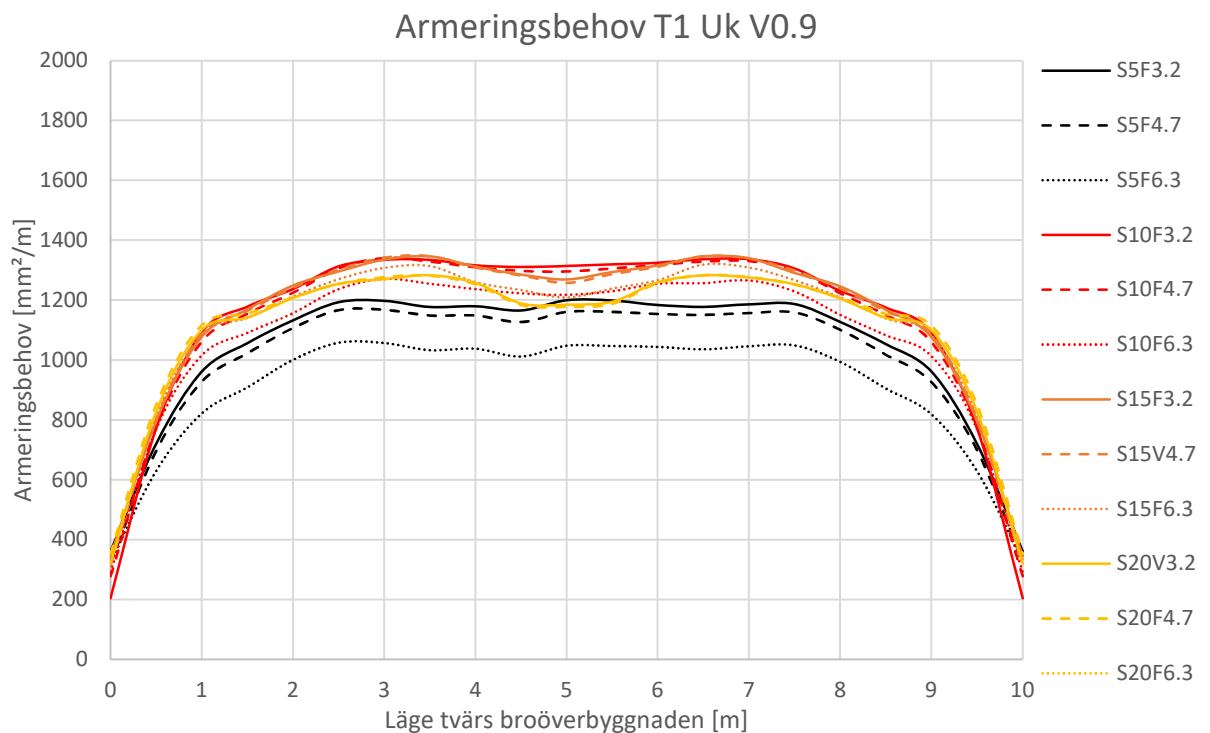
Figur 5.6 Armeringsbehov med hänsyn till tvärkraft längs broöverbyggnaden.

Behovet av armering tvärs broöverbyggnadens underkant i resultatlinjerna T1 och T2, figur 5.8 och 5.10 är mycket snarlikt fördelat oavsett spännvidd och höjd, till skillnad från armeringsbehovet i överkant, figur 5.7 och 5.9, som ser ut att uteslutande bero på spännvidden. Vidare kräver snittet över voten enligt

resultatlinje T1 mer armering än mitt på bron enligt resultatlinje T2, särskilt i överkant. Inget behov av bygelarmering finns för dessa resultatlinjer.

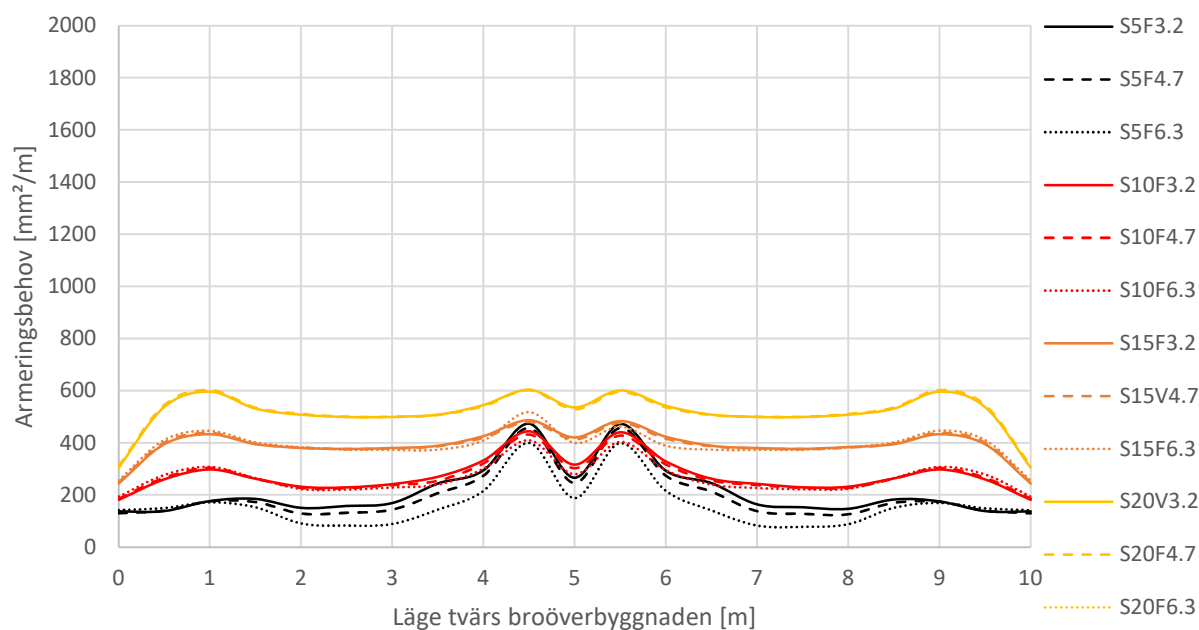


Figur 5.7 Armeringsbehov med hänsyn till moment tvärs broöverbyggnadens överkant.



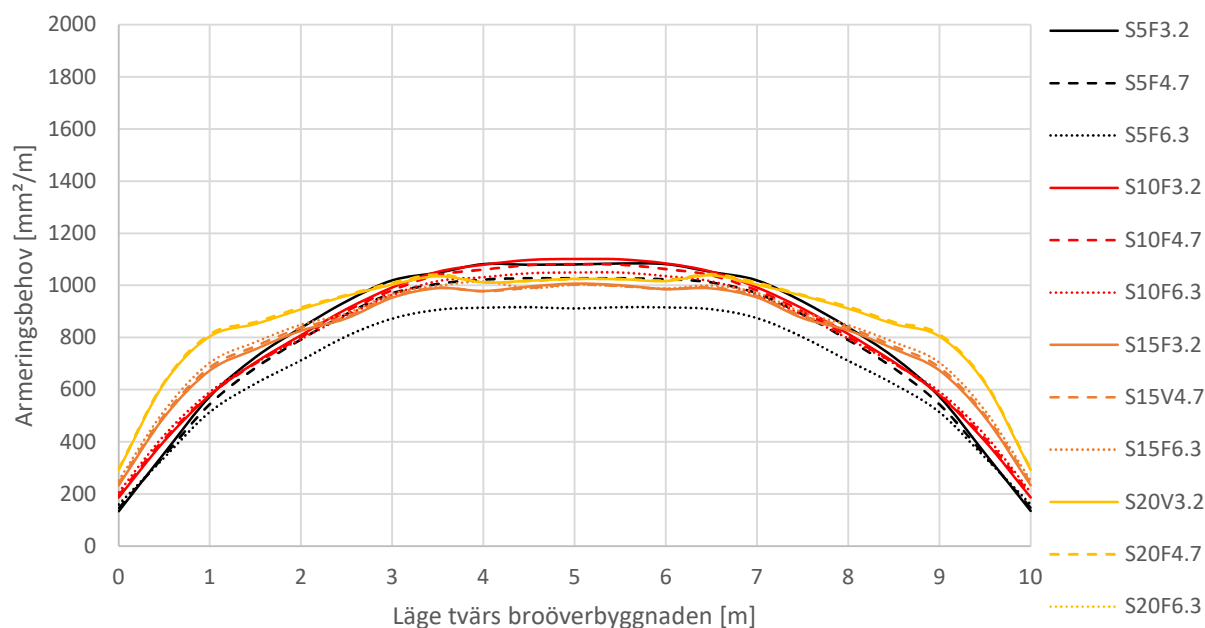
Figur 5.8 Armeringsbehov med hänsyn till moment tvärs broöverbyggnadens underkant.

Armeringsbehov T2 Ök V0.9



Figur 5.9 Armeringsbehov med hänsyn till moment tvärs broöverbyggnadens överkant.

Armeringsbehov T2 Uk V0.9

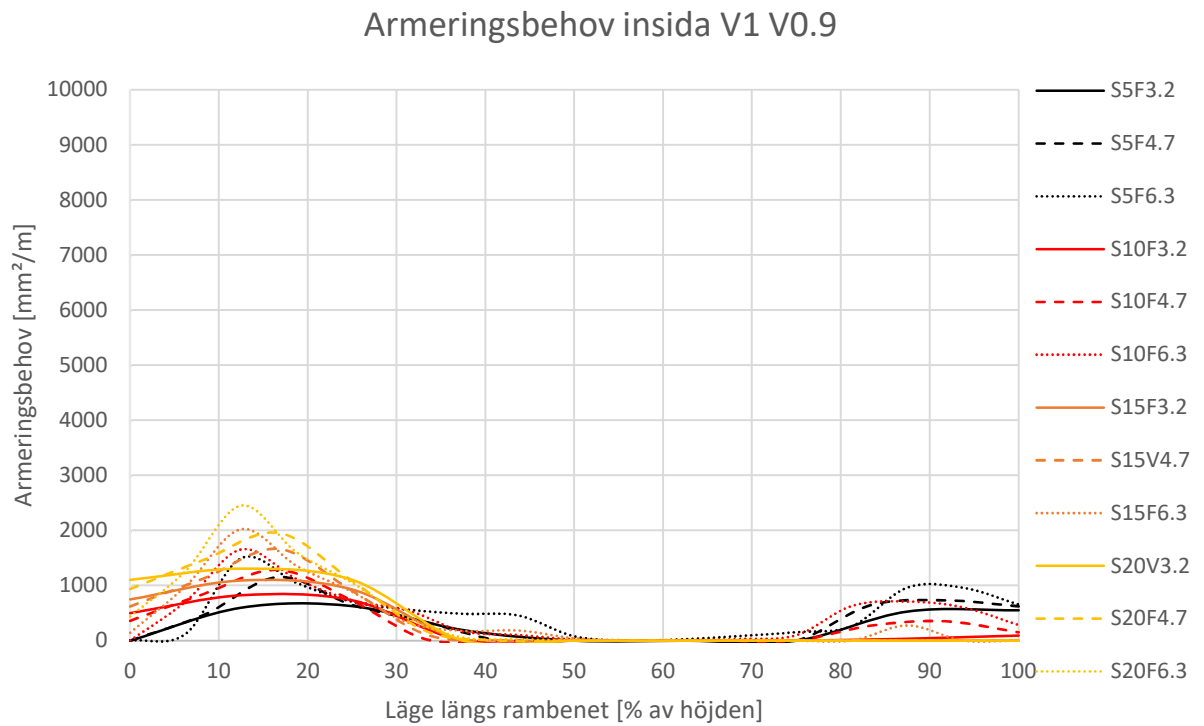


Figur 5.10 Armeringsbehov med hänsyn till moment tvärs broöverbyggnadens underkant.

I figur 5.11 – 5.15 motsvarar 0% av höjden rambenets nedre ände och 100% av höjden den övre änden. Behovet av armering med hänsyn till böjning i rambenets överkant matchar armeringsbehovet för resultatlinjerna L1 och L2 väl.

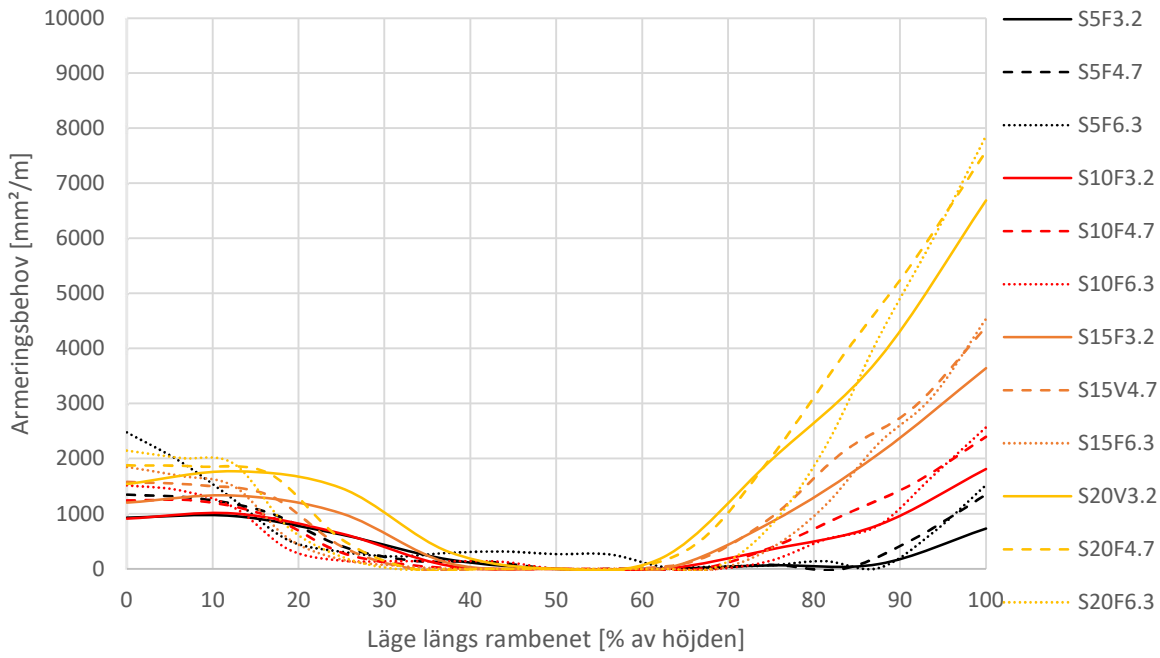
Armeringsbehovet är till största del beroende av ramens spännvidd och mest armering krävs i ramens övre delar. Armeringsbehovet med hänsyn till moment i ramens insida är relativt litet.

Det finns inget behov av tvärkraftsarmering för V2.



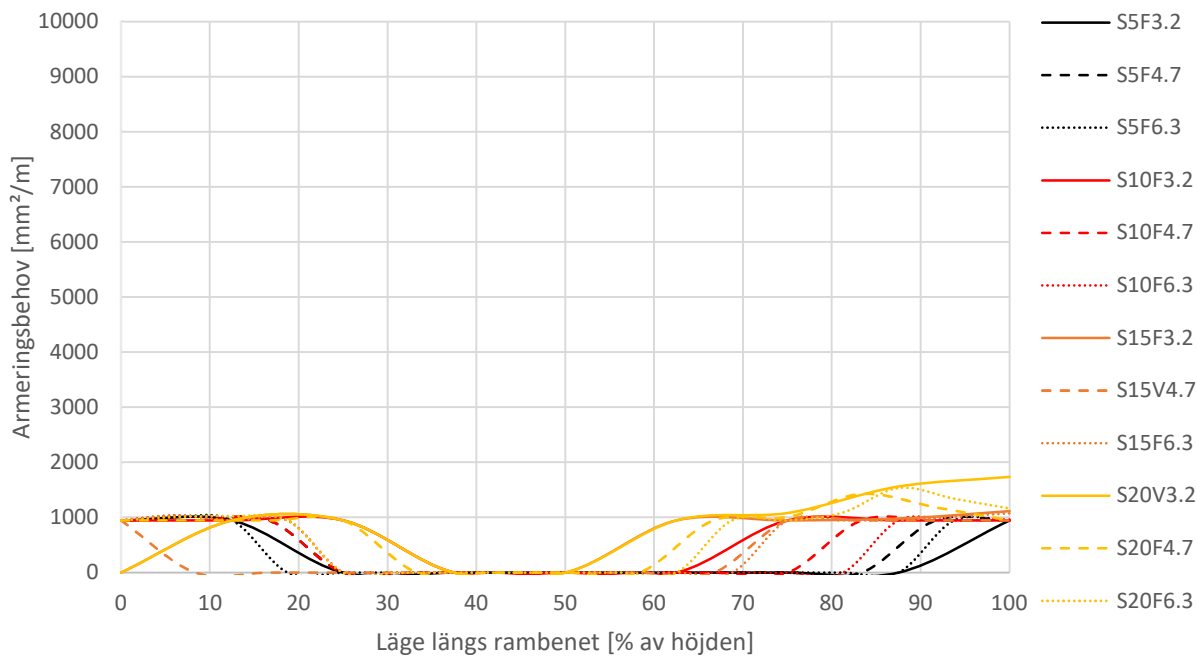
Figur 5.11 Armeringsbehov med hänsyn till moment längs rambenets insida.

Armeringsbehov utsida V1 V0.9



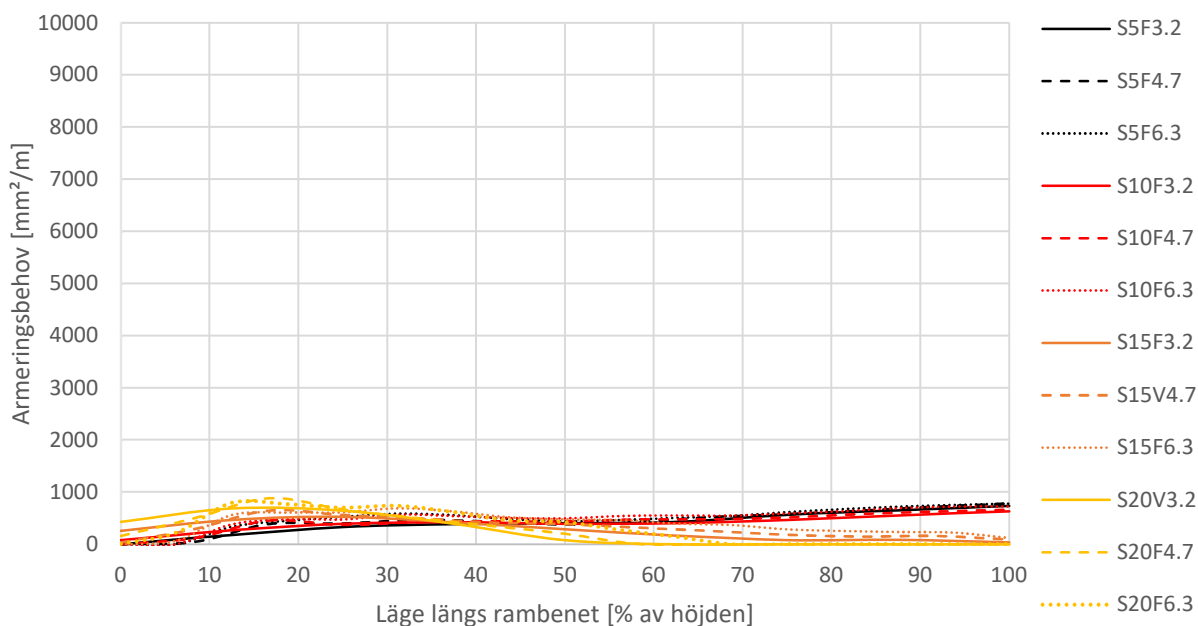
Figur 5.12 Armeringsbehov med hänsyn till moment längs rambenetts utsida.

Armeringsbehov Tvärkraft V1 V0.9



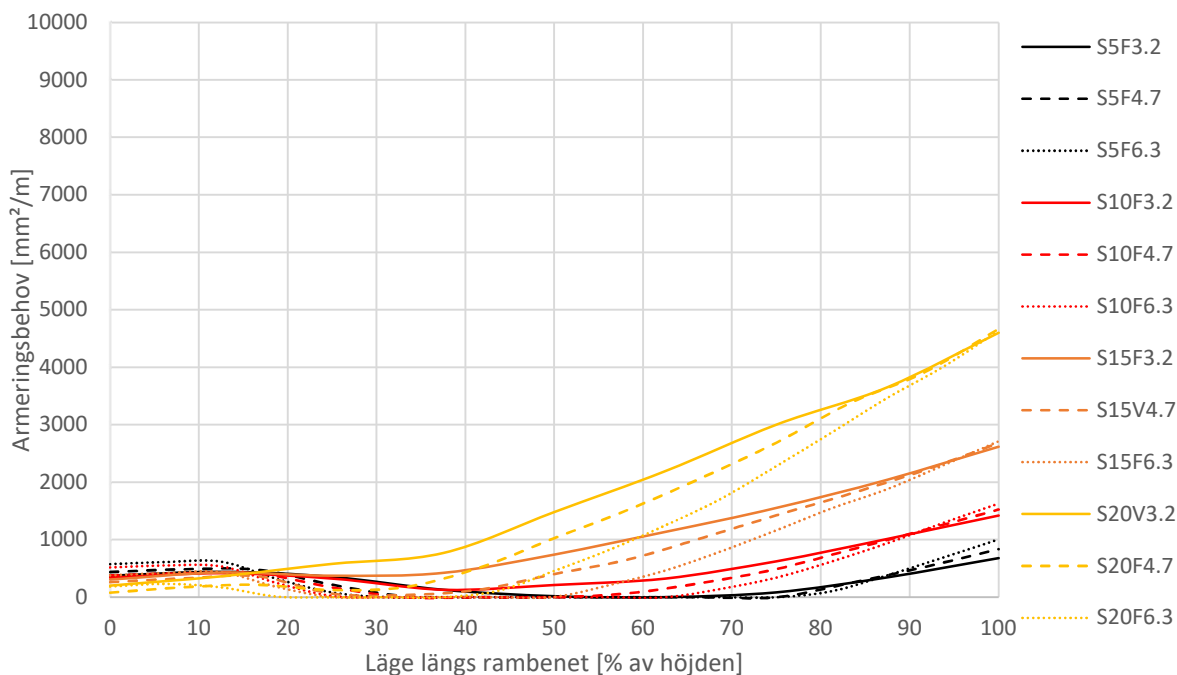
Figur 5.13 Armeringsbehov med hänsyn till tvärkraft längs rambenet.

Armeringsbehov insida V2 V0.9



Figur 5.14 Armeringsbehov med hänsyn till moment längs rambenets insida.

Armeringsbehov utsida V2 V0.9

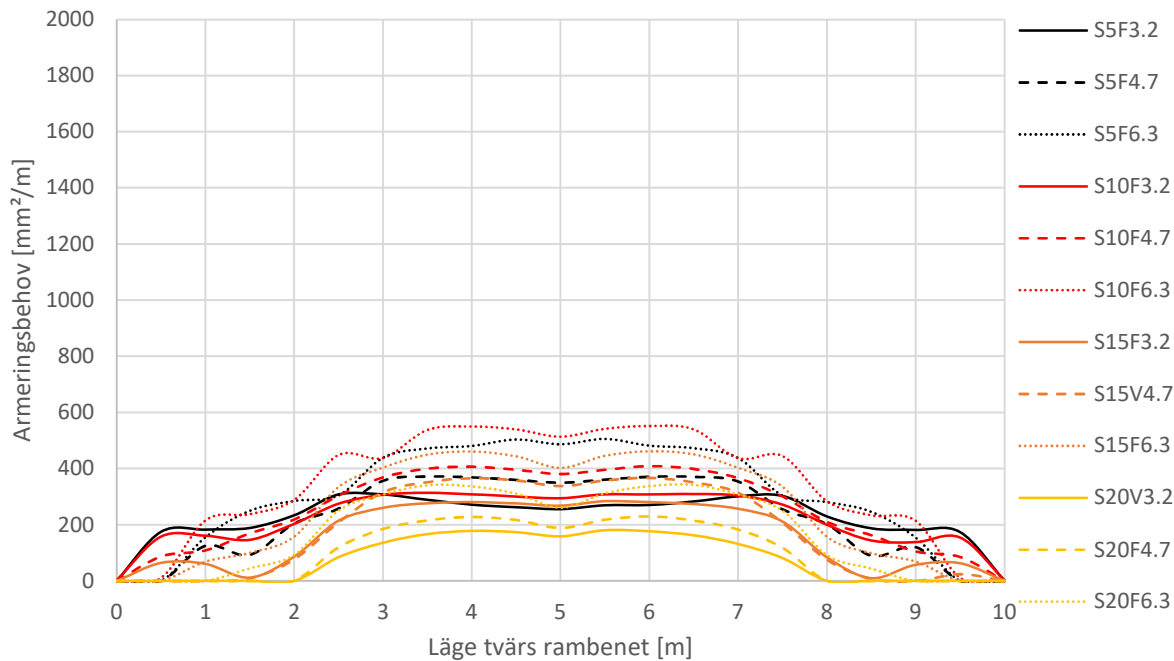


Figur 5.15 Armeringsbehov med hänsyn till moment längs rambenets utsida.

Armeringsbehovet med hänsyn till moment i rambenets insida enligt resultatlinjerna H1 och H2 i figur 5.16 och 5.19 beror av både spännvidden och ramens höjd. Detta eftersom ingen av linjerna överlappar varandra och det tycks finnas en

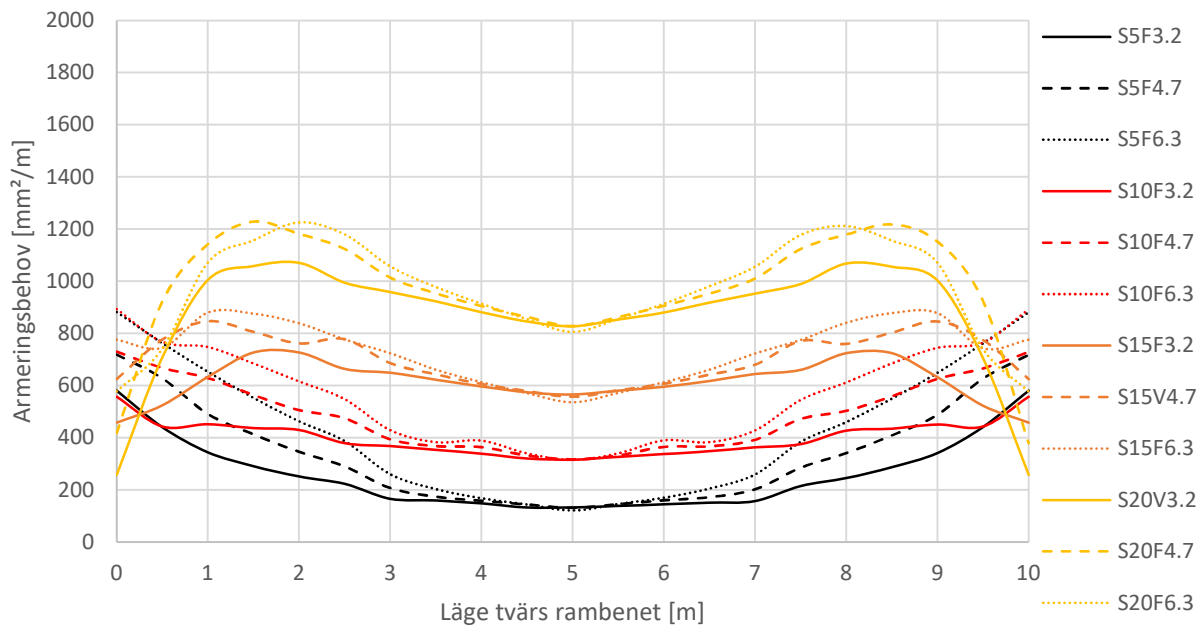
struktur där en högre höjd på ramen kräver mer armering. Samma trend kan ses för armeringsbehovet i rambenets utsida enligt figur 5.17 och 5.20. Figur 5.18 visar att armeringsbehovet för tvärkraft är mycket litet. Endast en mindre mängd behöver läggas in rambenets yttre delar för spännvidder runt >15 meter. Inget behov av tvärkraftsarmering finns för H2.

Armeringsbehov H1 insida V0.9



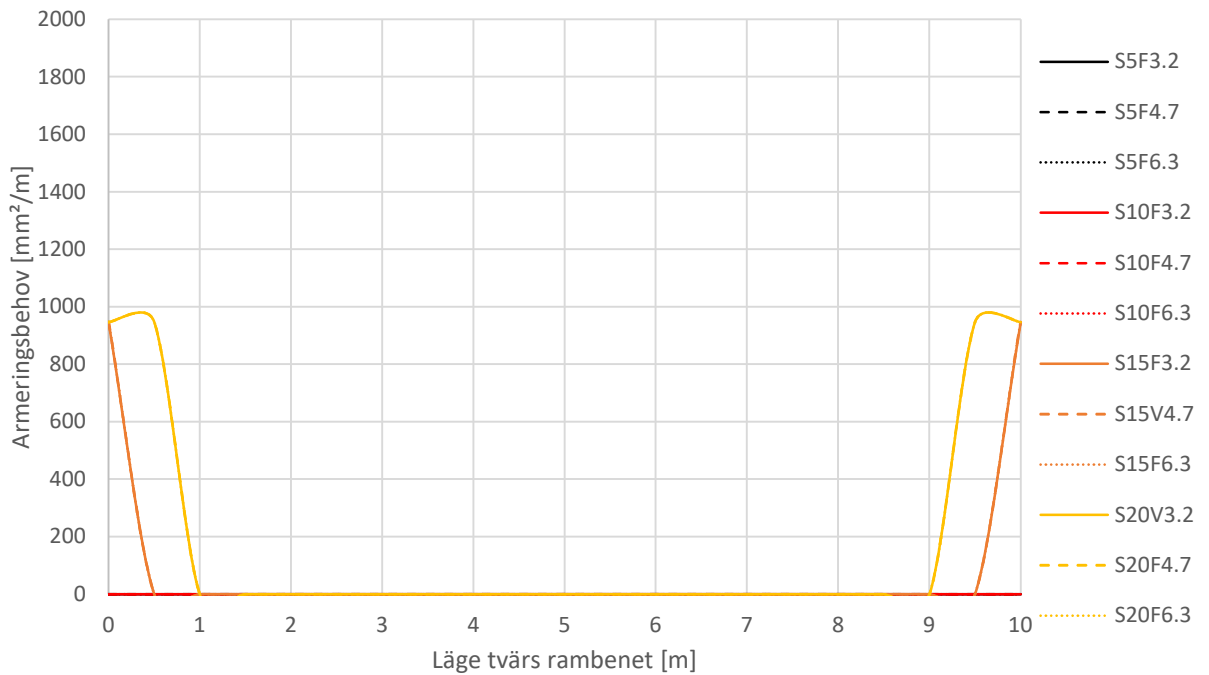
Figur 5.16 Armeringsbehov med hänsyn till moment tvärs rambenets insida.

Armeringsbehov H1 utsida V0.9



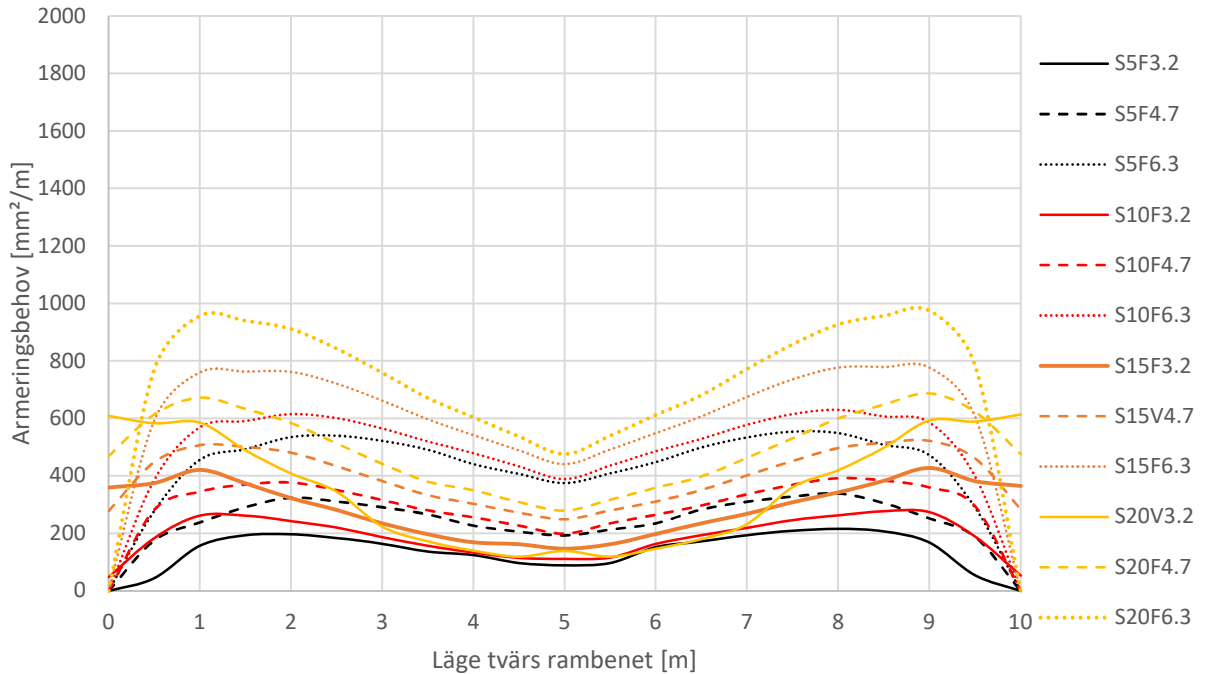
Figur 5.17 Armeringsbehov med hänsyn till moment tvärs rambenets utsida.

Armeringsbehov H1 Tvärkraft V0.9



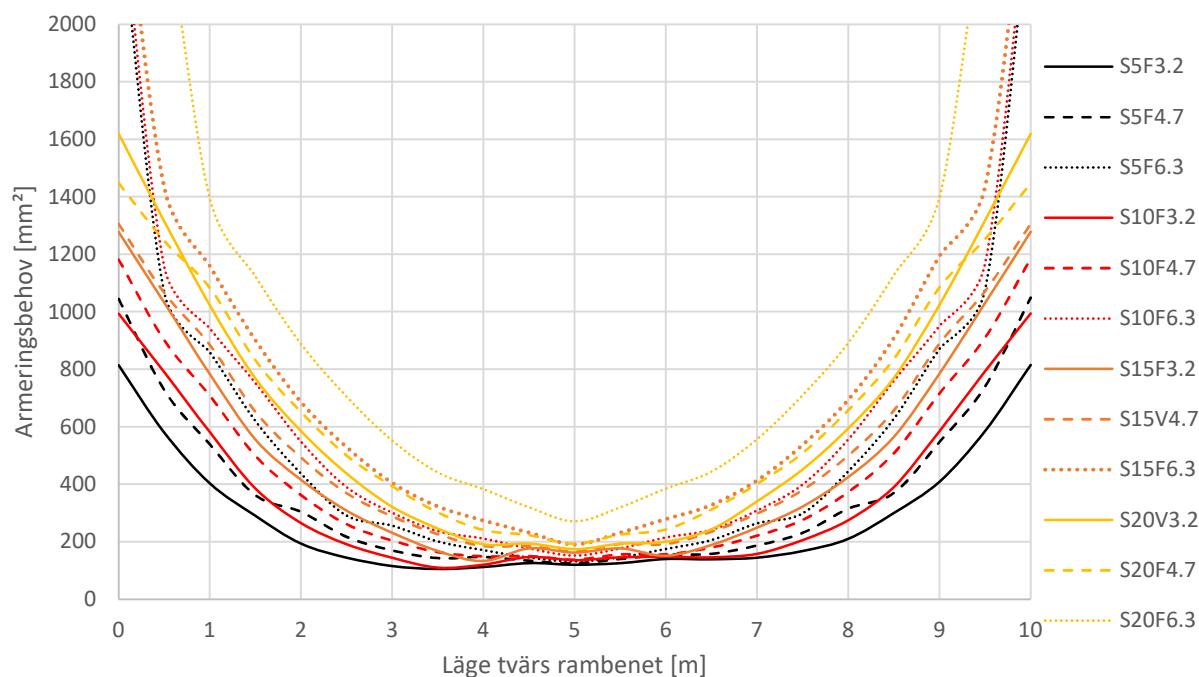
Figur 5.18 Armeringsbehov med hänsyn till tvärkraft tvärs rambenet.

Armeringsbehov H2 insida V0.9



Figur 5.19 Armeringsbehov med hänsyn till moment tvärs rambenets insida.

Armeringsbehov H2 utsida V0.9



Figur 5.20 Armeringsbehov med hänsyn till moment tvärs rambenets utsida.

För att tydliggöra det totala armeringsbehovet för en 1 meter bred plattstrimla armerad enligt respektive resultatlinje har armeringsbehovet enligt figur 5.1 – 5.20 summerats och räknats om till totalt antal kg/plattstrimla. Armering i ovankant, underkant och bygelarmering räknas in. Resultatet presenteras i tabell 5.2.

Tabell 5.2 Totalt armeringsbehov för en 1 meter bred plattstrimla omräknat till kg/plattstrimla för olika spännvidder och höjder.

Namn	L1 [kg]	L2 [kg]	T1 [kg]	T2 [kg]	V1 [kg]	V2 [kg]	H1 [kg]	H2 [kg]
S5V0.9F3.2	98	72	125	83	43	43	40	35
S5V0.9F4.7	98	75	119	78	66	38	46	50
S5V0.9F6.3	91	78	107	70	90	50	60	93
S10V0.9F3.2	253	193	150	88	65	41	51	45
S10V0.9F4.7	249	198	150	87	79	48	61	60
S10V0.9F6.3	249	210	145	86	97	60	74	104
S15V0.9F3.2	463	363	169	97	91	58	71	64

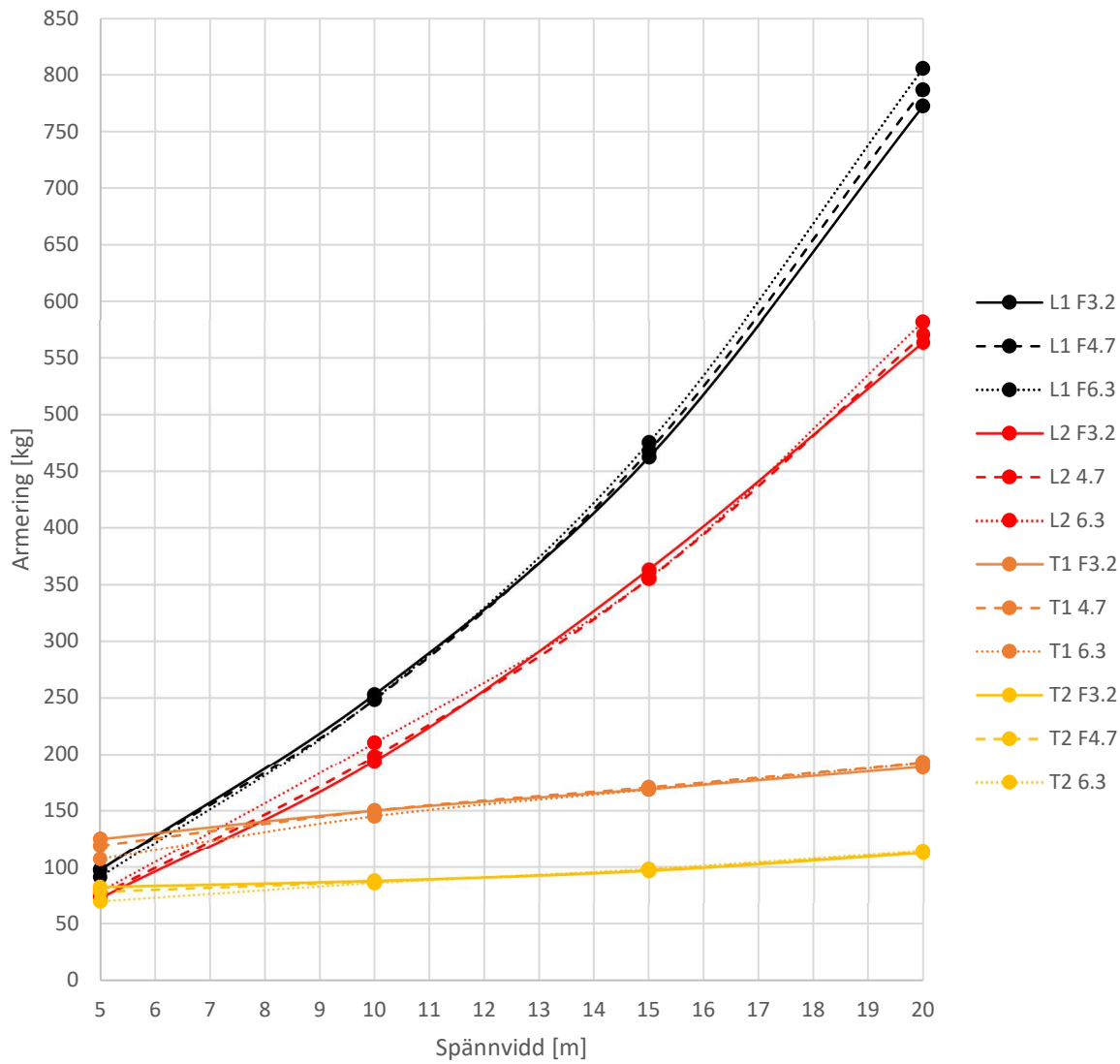
S15V0.9F4.7	468	355	171	97	103	65	79	77
S15V0.9F6.3	476	363	169	98	127	74	81	123
S20V0.9F3.2	773	556	188	113	138	92	92	83
S20V0.9F4.7	787	571	192	113	171	100	102	103
S20V0.9F6.3	787	582	192	114	181	107	108	151

Värdena enligt tabell 5.2 visualiseras i figur 5.21 – 5.23 med trendlinjer mellan punkterna. I figur 5.21 visas det tydligt att ramens höjd i det undersökta intervallet näst intill saknar betydelse för armeringsbehovet i broöverbyggnaden. Summan av dessa visas i figuren. Detta gäller både armering längs och tvärs farbanan och tolkas genom att trendlinjerna i figuren löper mycket nära eller överlappar varandra helt.

Armeringsbehovet i rambenen enligt figur 5.22 – 5.23 är beroende av både ramens höjd och spännvidd. Detta kan ses genom att trendlinjerna i figurerna dels ökar med spännvidden, dels att en ram med en högre fri höjd fordrar mer armering än en lägre för samma spännvidd.

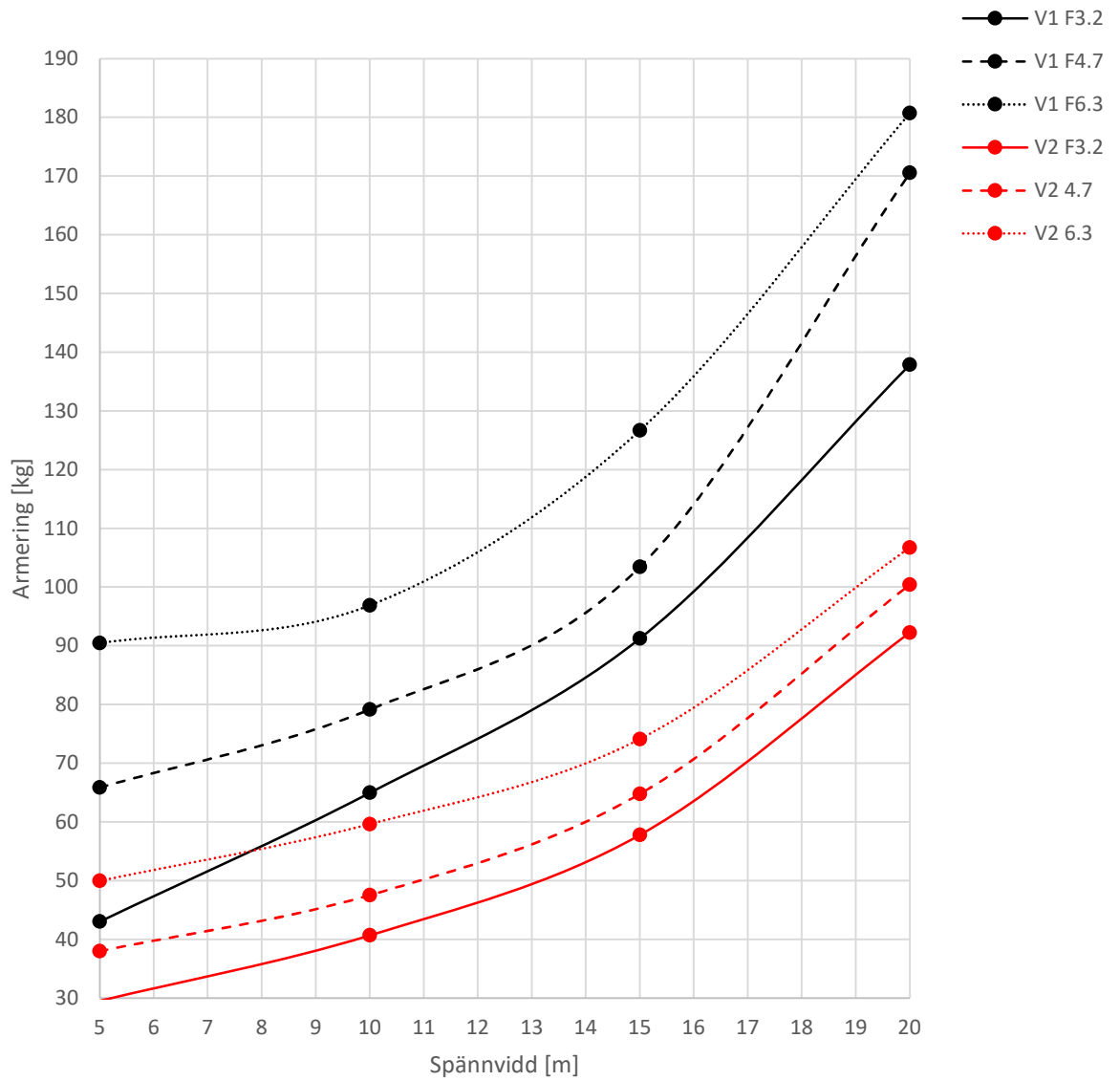
Variationer i höjden för trendlinjerna V1 och V2 i figur 5.22 samt H1 och H2 i figur 5.23 tycks löpa näst intill parallellt med varandra med en förskjutning i höjddled, vilket tyder på att ett ökat armeringsbehov i rambenet till största del är beroende av ramens höjd.

Armeringsbehov för resultatlinjer i broöverbyggnad



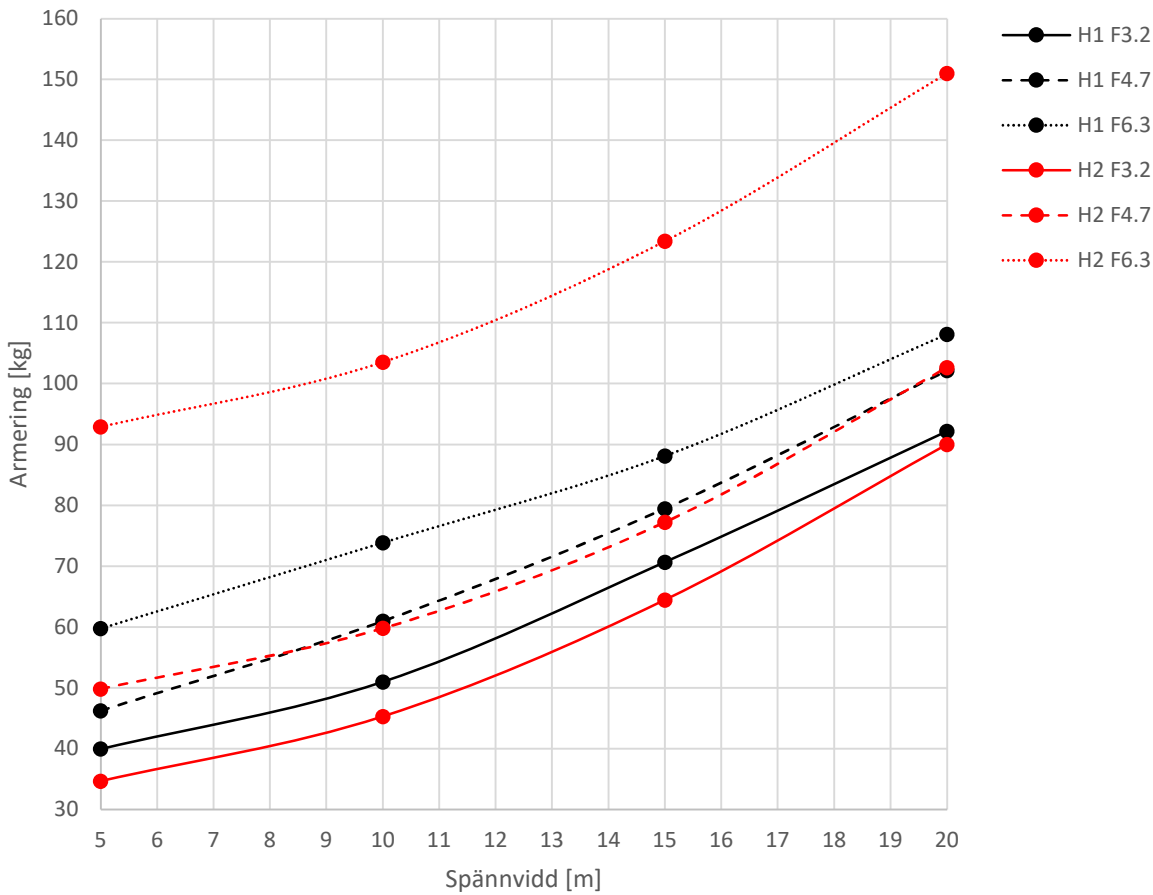
Figur 5.21 Totalt armeringsbehov för en 1000 millimeter bred plattstrimla räknat i kg för respektive resultatlinje vid varierande spännvidder och höjder.

Armeringsbehov för resultatlinjer längs ramben



Figur 5.22 Totalt armeringsbehov för en 1000 millimeter bred plattstrimla räknat i kg vid varierande spännvidder och höjder enligt resultatlinjerna V1 och V2.

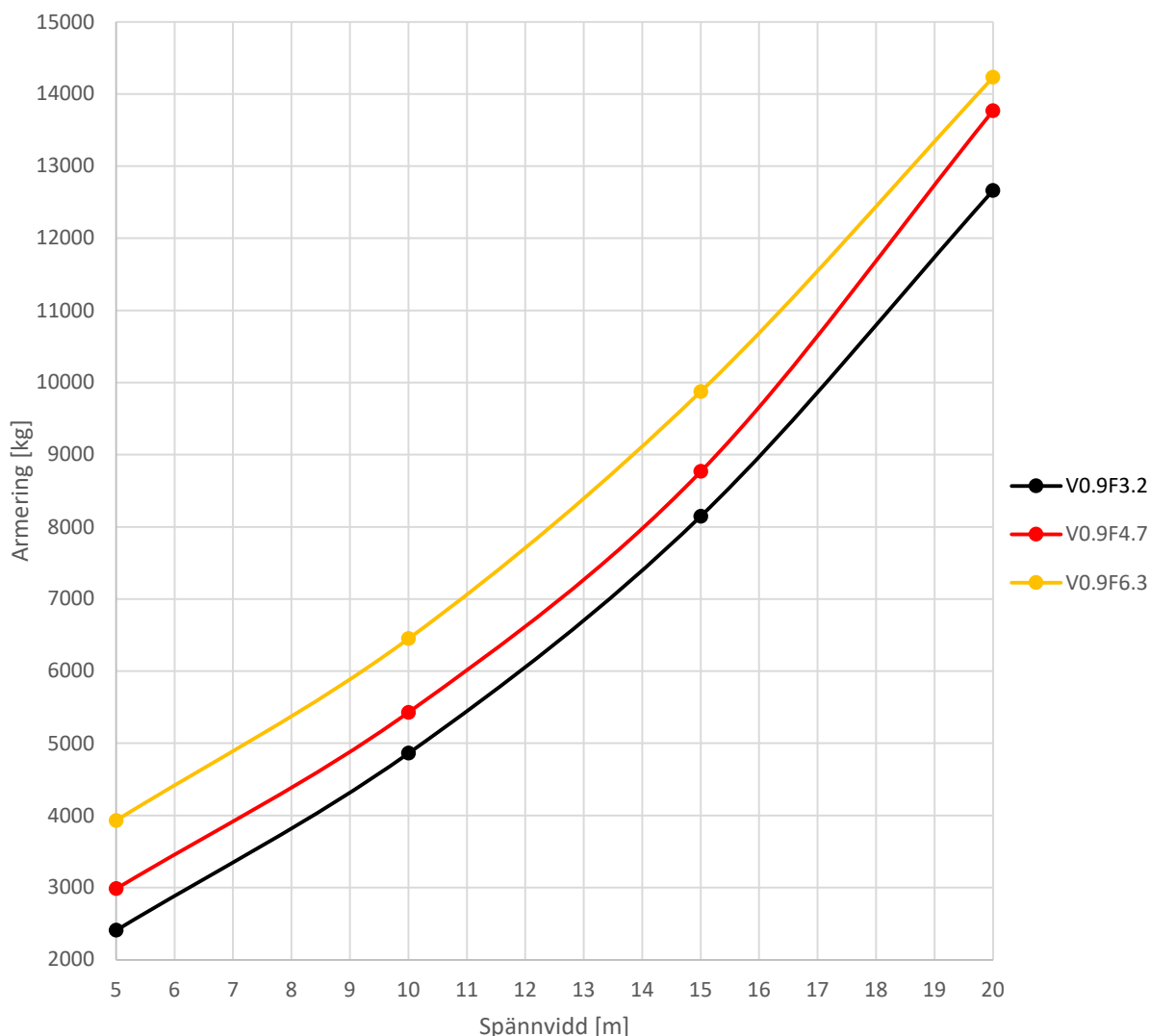
Armeringsbehov för resultatlinjer tvärs ramben



Figur 5.23 Totalt armeringsbehov för en 1000 millimeter bred plattstrimla räknat i kg / tvärsnitt vid varierade spännvidder och höjder enligt resultatlinjerna H1 och H2.

Armeringsbehovet för en ram som helhet uppskattas enligt modell 2 och presenteras i figur 5.24. Att linjerna löper näst intill parallellt med varandra indikerar att det är möjligt att uppskatta armeringsbehovet för en ram med en annan höjd inom det undersökta intervallet genom att justera linjerna i höjddled.

Armeringsbehov V0.9



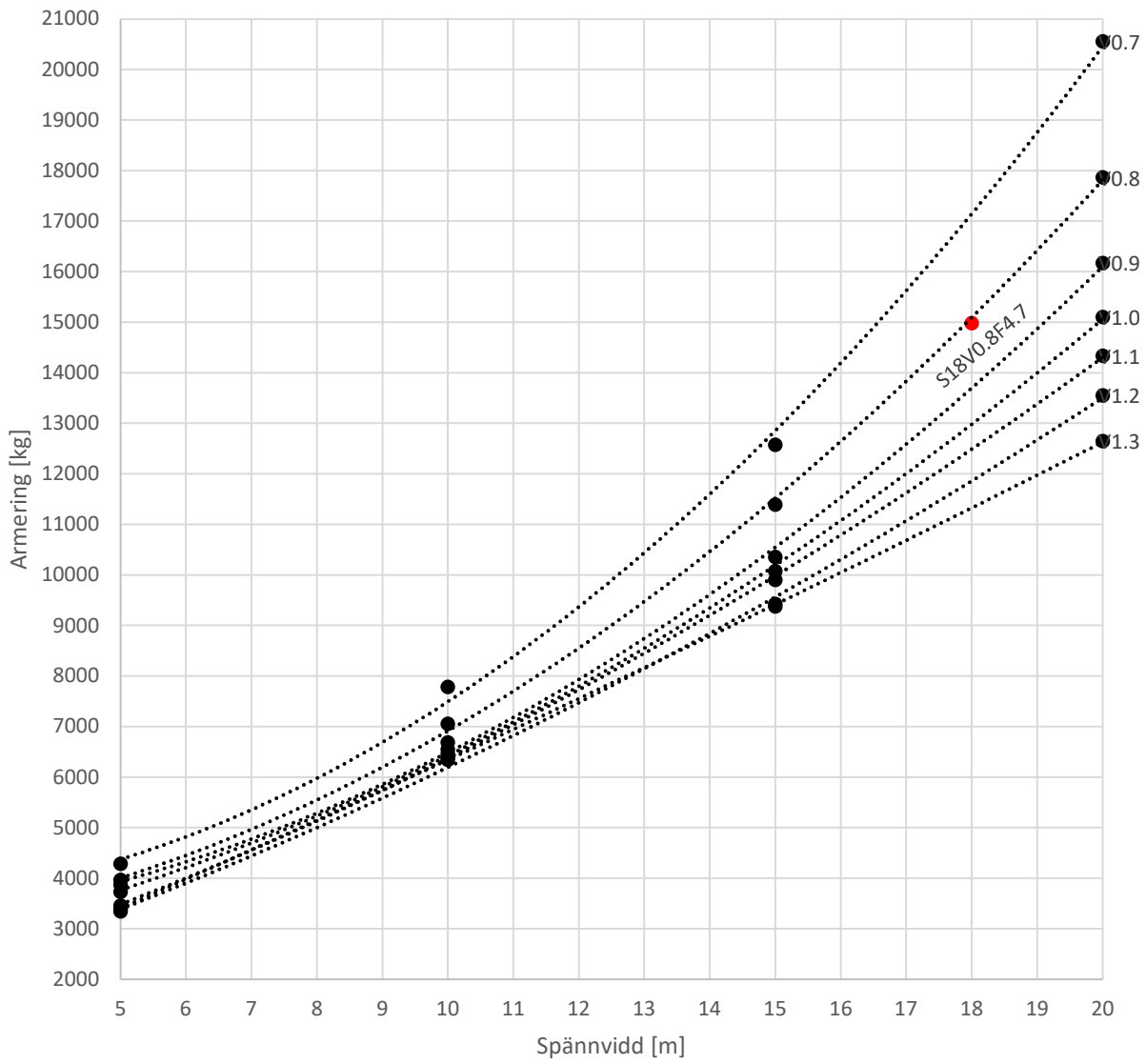
Figur 5.24 Uppskattat armeringsbehov för ram med tjocklek motsvarande V0.9 vid olika spännvidd och höjd enligt modell 2.

5.2 Variation av tvärsnittstjocklek

I det här avsnittet presenteras resultat från beräkningar där spännvidd och höjd hållits konstanta och endast tjockleken på tvärsnittet varierats. Beräkningar har gjorts för samtliga spännvidder. Armeringsbehovet för en ram uppskattas som helhet baserat på plattstrimlor armerade efter samtliga resultatlinjer.

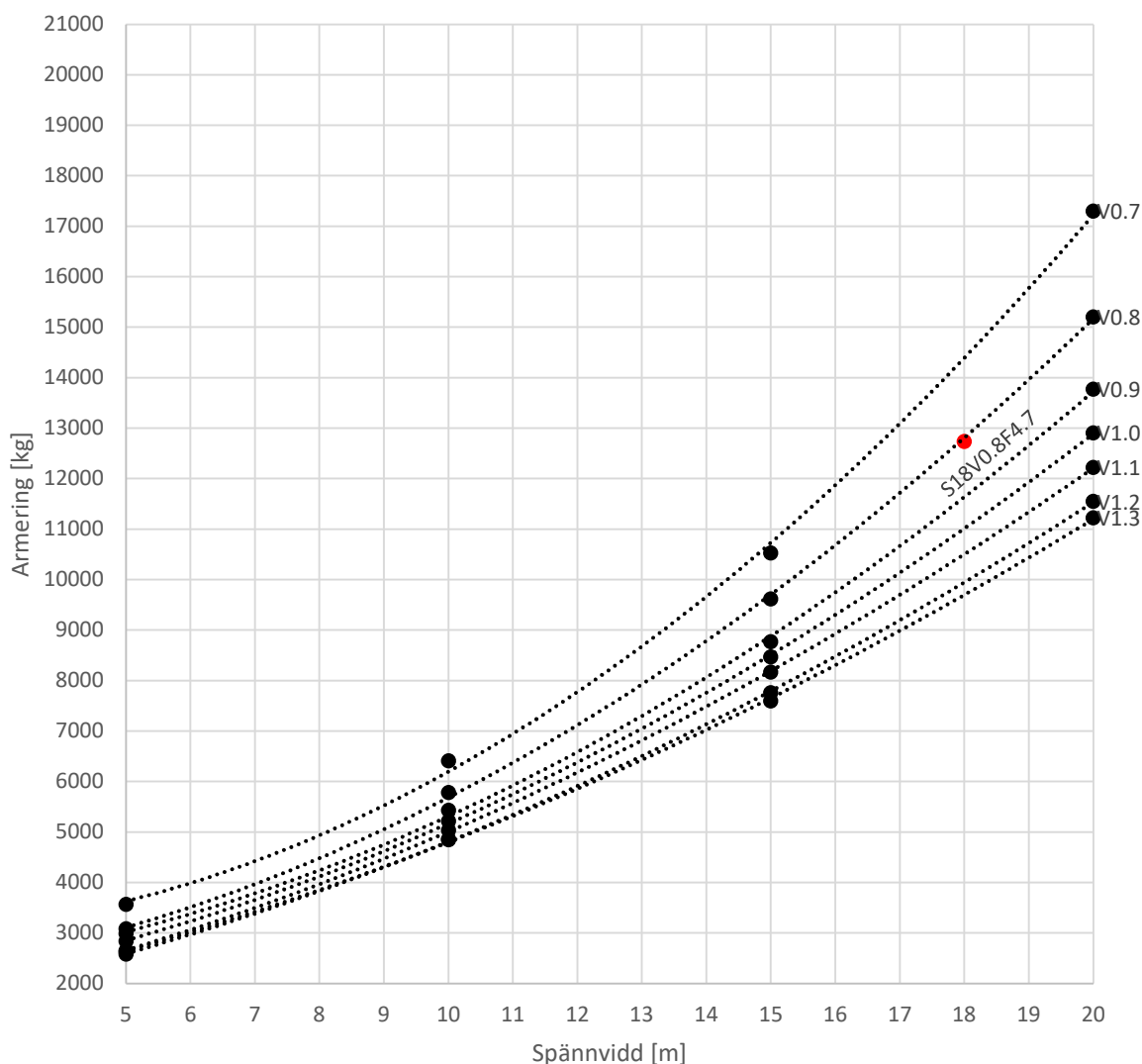
I figur 5.25 och 5.26 visas beräknade datapunkter för ramar med höjden F4.7 meter med mellanliggande värden uppskattade enligt ett andra gradens polynom. För att undersöka metodens träffsäkerhet har en ram med spännvidden 18 meter, tjocklek på ram motsvarande V0.8 och fri höjd F4.7 analyserats. Resultatet presenteras som den röda pricken i figuren och ligger väl i linje med det uppskattade värdet.

Armering ram totalt modell 1 F4.7



Figur 5.25 Samtliga datapunkter för ramar med höjden F4.7 med uppskattade trendlinjer definierade av ett andra gradens polynom.

Armering ram totalt modell 2 F4.7

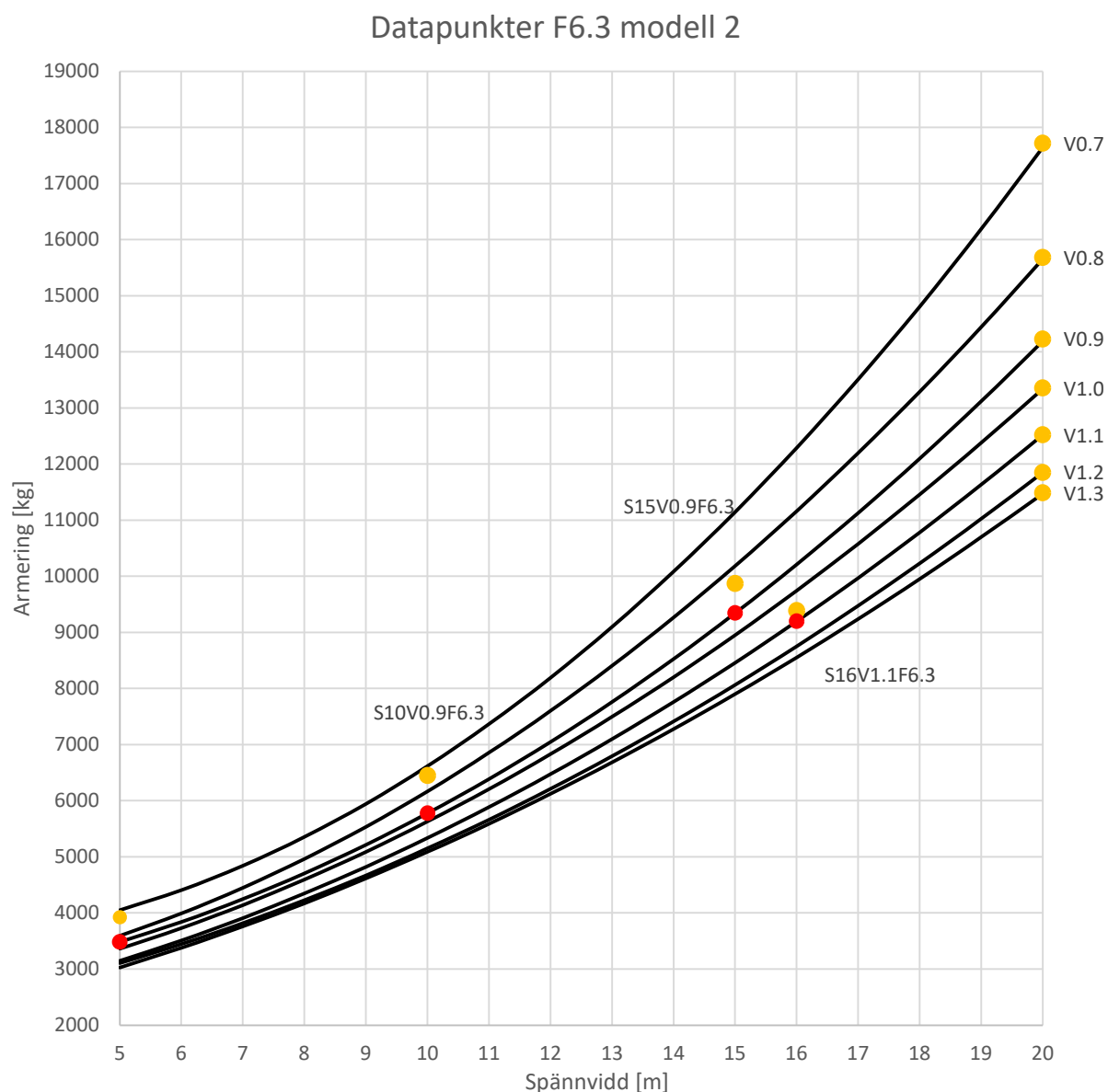


Figur 5.26 Samtliga datapunkter för ramar med höjden F4.7 med uppskattade trendlinjer definierade av ett andra gradens polynom.

I figur 5.27 justeras polynomen från Figur 5.26 i höjded för att skära de kända punkterna S20V0.7F6.3 – S20V1.3F6.3, och kontrolleras mot 4 beräknade punkter. Gula punkter är beräknade, röda punkter visar var de borde hamnat. En bedömning bör göras från fall till fall av hur stor avvikelse som är acceptabel vid en tidig överslagsdimensionering. I vidare uppskattning av produktionskostnad och miljöpåverkan undersöks endast fallet F4.7, eftersom säkrare underlag för armeringsmängd finns för denna höjd.

Referenspunkternas avvikelse mot det uppskattade armeringsbehovet redovisas i tabell 5.3. Största avvikelsen från det uppskattade armeringsbehovet finns i punkt S5V0.9F6.3 och är 11,3% jämfört med uppskattat värde.

På samma sätt uppskattas armeringsbehov för ramar med höjden F3.2 i figur 5.28 med uppmätta avvikelser enligt tabell 5.4. Största avvikelse finns i S5V0.9F3.2 och avviker med 12,2% jämfört med uppskattat värde.

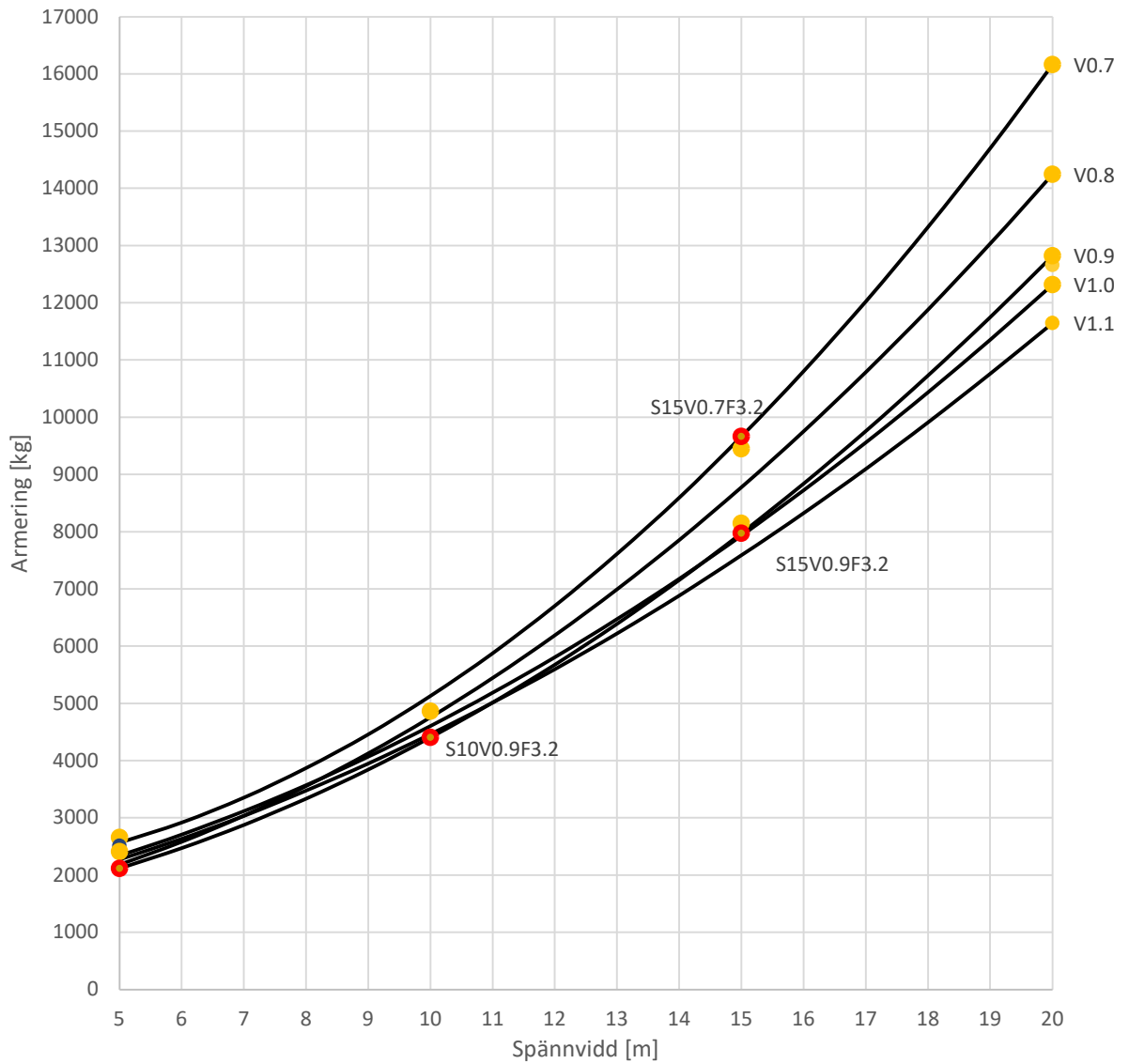


Figur 5.27 Uppskattning och kontroll av armeringsbehov för F6.3.

Tabell 5.3 Referenspunkters avvikelse mot uppskattad linje i figur 5.27.

Avvikelse	S5V0.9F6.3	S10V0.9F6.3	S15V0.9F6.3	S16V1.1F6.3
Uppskattat armeringsbehov[ton]	3,49	5,78	9,35	9,2
Beräknat armeringsbehov [ton]	3,93	6,45	9,88	9,39
Differens [kg]	-443	-673	-529	-191
Avvikelse [%]	11,3	10,4	5,4	2,0

Datapunkter F3.2 modell 2



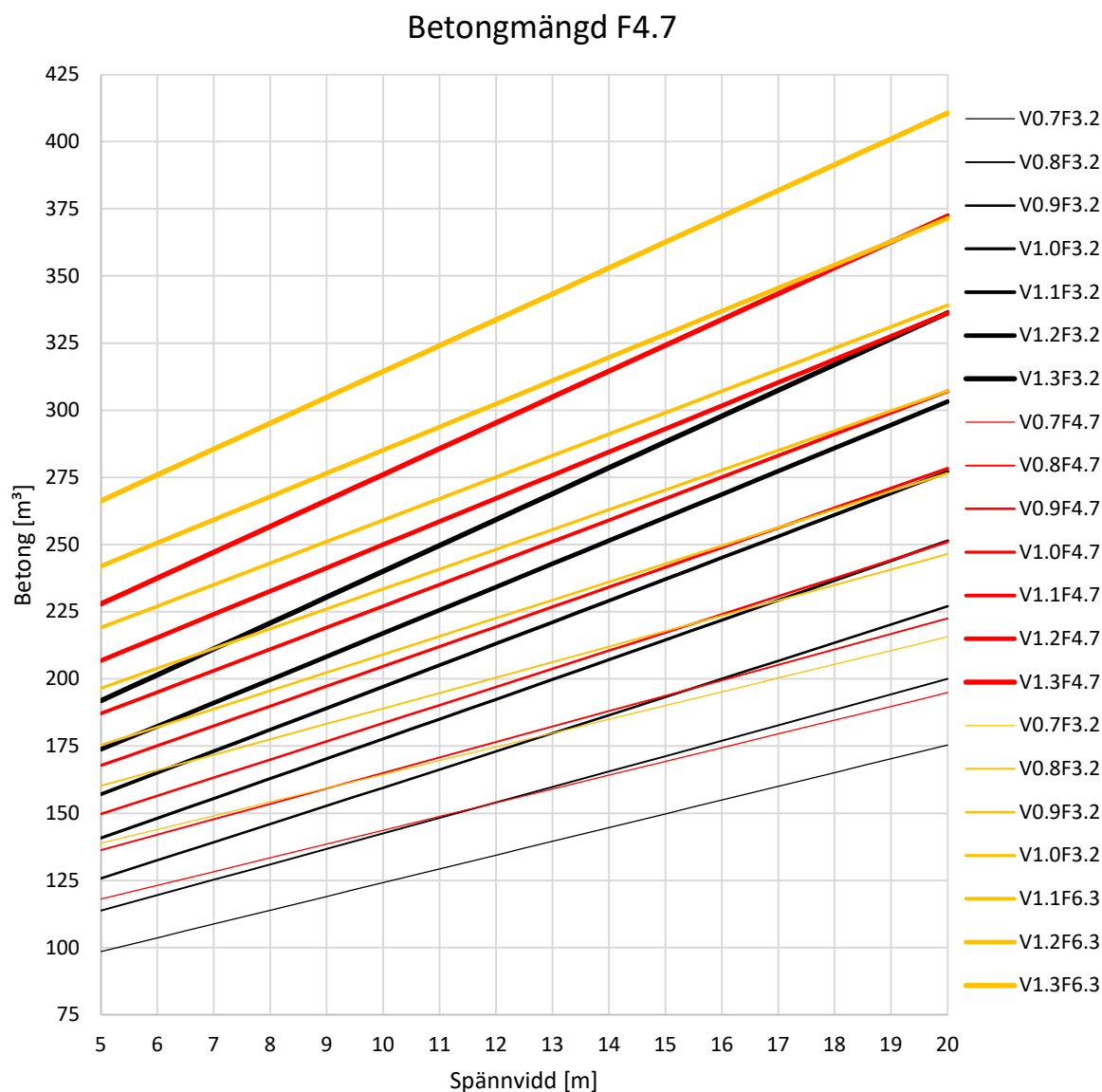
Figur 5.28 Uppskattning och kontroll av armeringsbehov för F3.2.

Tabell 5.4 Referenspunkters avvikelse mot uppskattad linje i figur 5.28.

Avvikelse	S5V0.9F3.2	S10V0.9F3.2	S15V0.9F3.2	S15V0.7F3.2
Uppskattat armeringsbehov[ton]	2,12	4,41	7,98	9,66
Beräknat armeringsbehov [ton]	2,41	4,86	8,15	9,45
Differens [kg]	-295	-458	-174	215
Avvikelse [%]	12,2	9,4	2,1	-2,3

5.3 Beräkning betongmängd

Mängden betong som krävs för att gjuta en ram illustreras i figur 5.29. Den beräknas med utgångsläge i mått angivna i figur 4.1 tillsammans med tabell 4.1.



Figur 5.29 Mängd betong som går åt vid gjutning. Svart linje motsvarar F3.2, röd linje motsvarar F4.7 och gul linje motsvarar F6.3.

5.4 Produktionskostnad

I detta avsnitt presenteras den beräknade produktionskostnaden för en ram vid varierade spännvidder, fria höjder och tjocklekar. Priset för betong räknas dels enligt Wikells Sektionsdata [1] med 3351 kr / m³ betong, dels för 1675 kr / m³ för att undersöka hur ett kraftigt reducerat pris på betong skulle påverka produktionskostnaden.

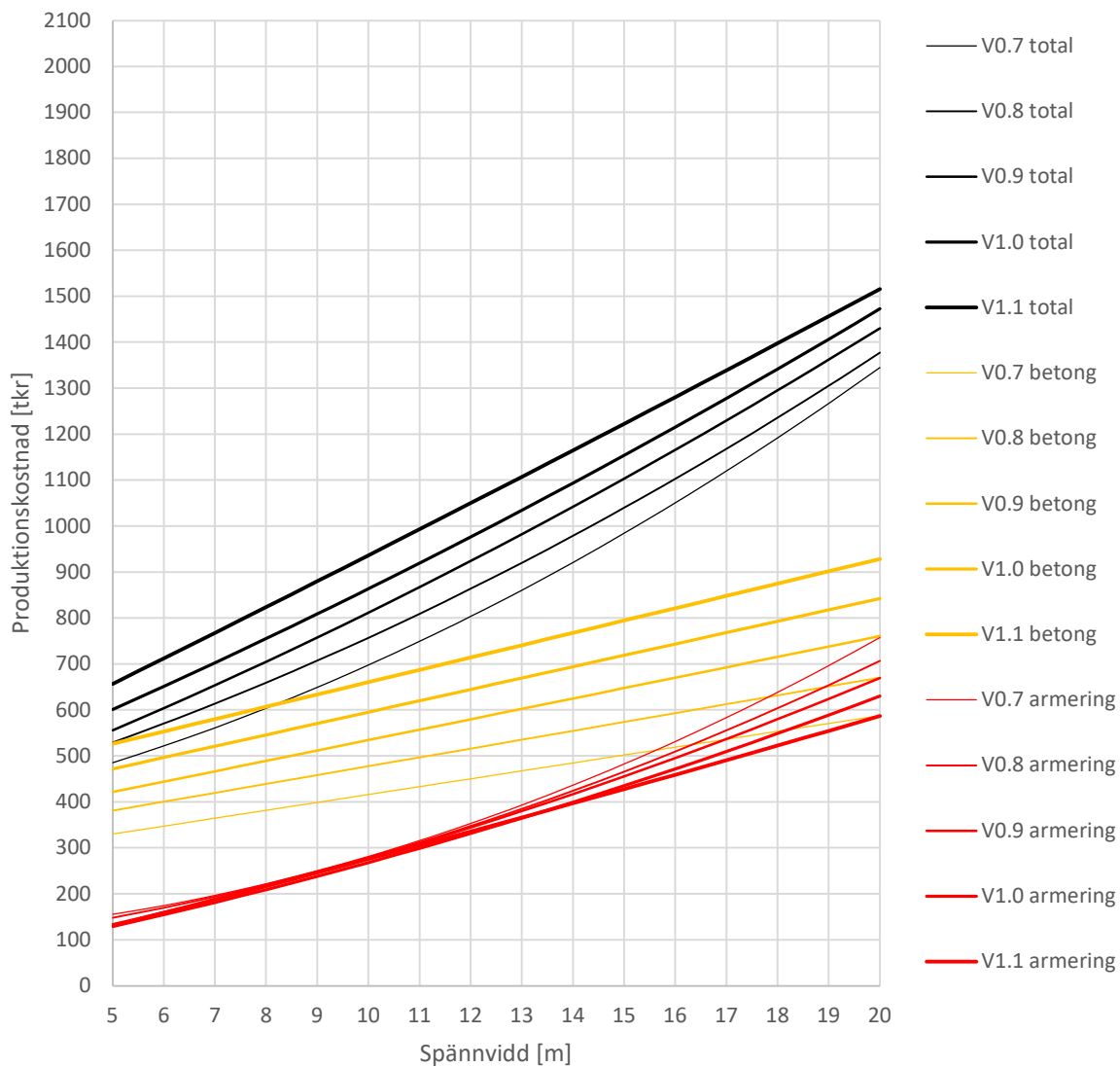
Mängden armering antas vara 50% utöver minsta teoretiska värde. Ramen är gjuten med betong C35/45 och armerad med K500C-T. Mängden armering uppskattas enligt figur 5.25 - 5.26. Mängden betong uppskattas enligt figur 5.29.

Figur 5.30 – 5.33 visar både produktionskostnaden och kostnad för betong och armering separat. Ett tunnare tvärsnitt är ekonomiskt lönsamt i de flesta fall. Dock blir det tunnaste tvärsnittet marginellt dyrare att tillverka än det näst tunnaste vid en spännvidd på runt 17 meter ifall armering sker enligt modell 1 för F4.7 och F6.3.

Figur 5.30 – 5.33 visar att även om armeringen i sig kan bära en större del av kostnaden än betongen blir ramen i regel billigare som helhet med en slankare profil. Dock kan det vara lönsamt att välja en något tjockare profil vid de större spännvidderna, men skillnaden är marginell.

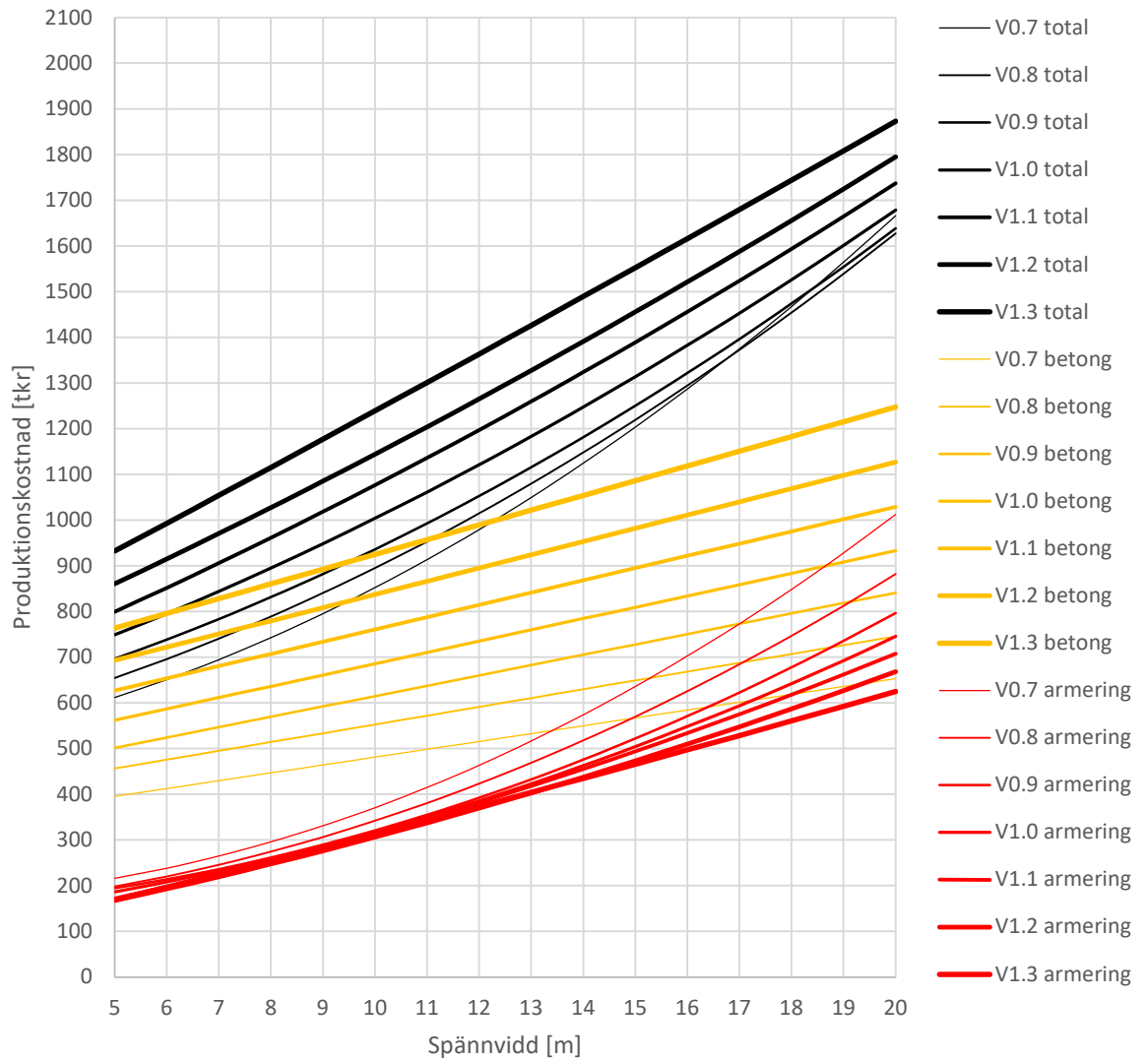
Figur 5.34 visar att om betongpriset är lägre kan det vara lönsamt att gjuta en något tjockare ram.

Produktionskostnad och kostnadsfördelning F3.2 modell 1



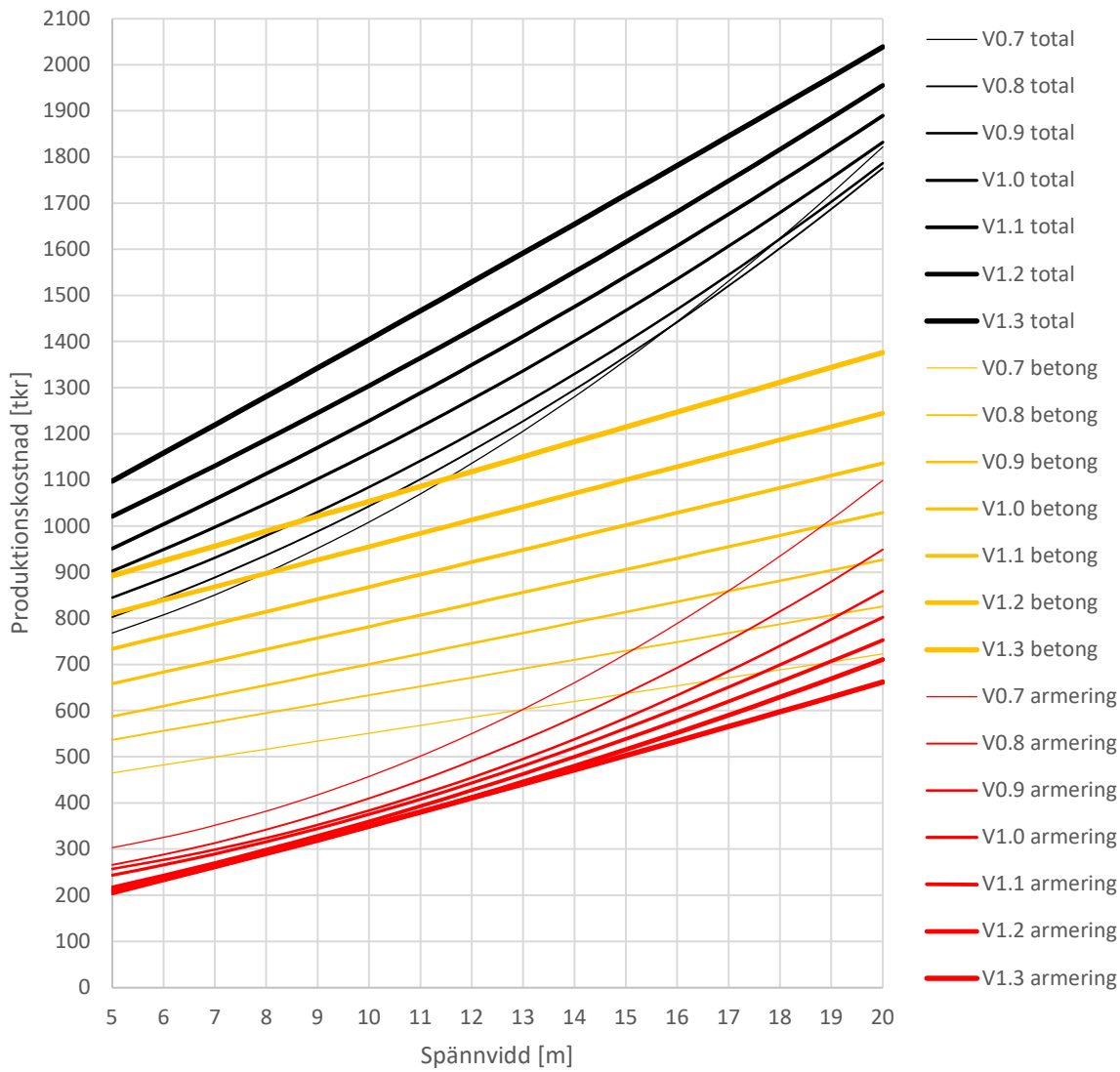
Figur 5.30 Produktionskostnad för ram enligt modell 1. Röd linje motsvarar kostnad för enbart armering, gul linje motsvarar kostnad för enbart betong och svart linje motsvarar total produktionskostnad. Armering är beräknad för 50% extra utöver teoretiskt värde.

Produktionskostnad och kostnadsfördelning F4.7 modell 1



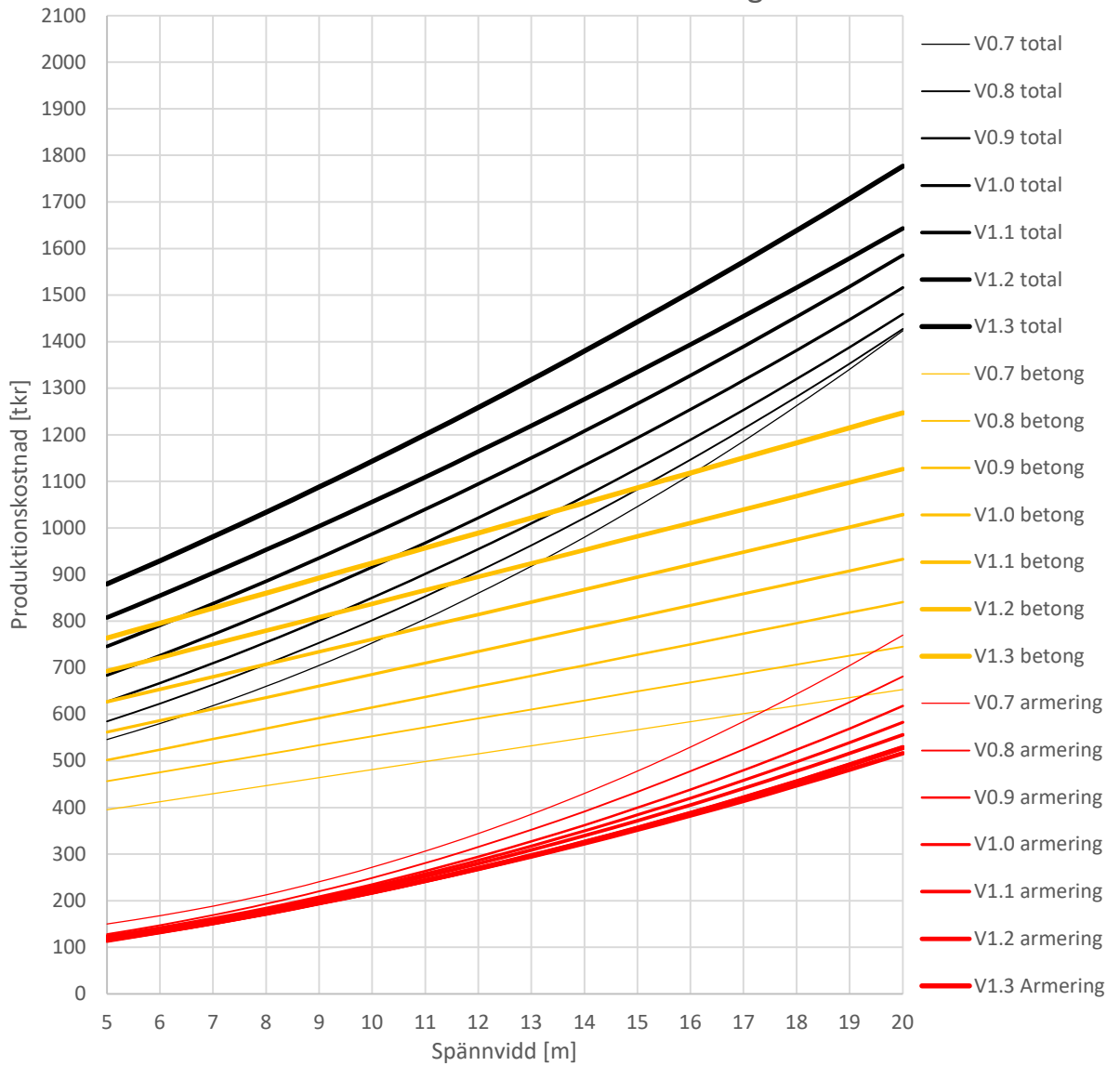
Figur 5.31 Produktionskostnad för ram enligt modell 1. Röd linje motsvarar kostnad för enbart armering, gul linje motsvarar kostnad för enbart betong och svart linje motsvarar total produktionskostnad. Armering är beräknad för 50% extra utöver teoretiskt värde.

Produktionskostnad och kostnadsfördelning F6.3 modell 1



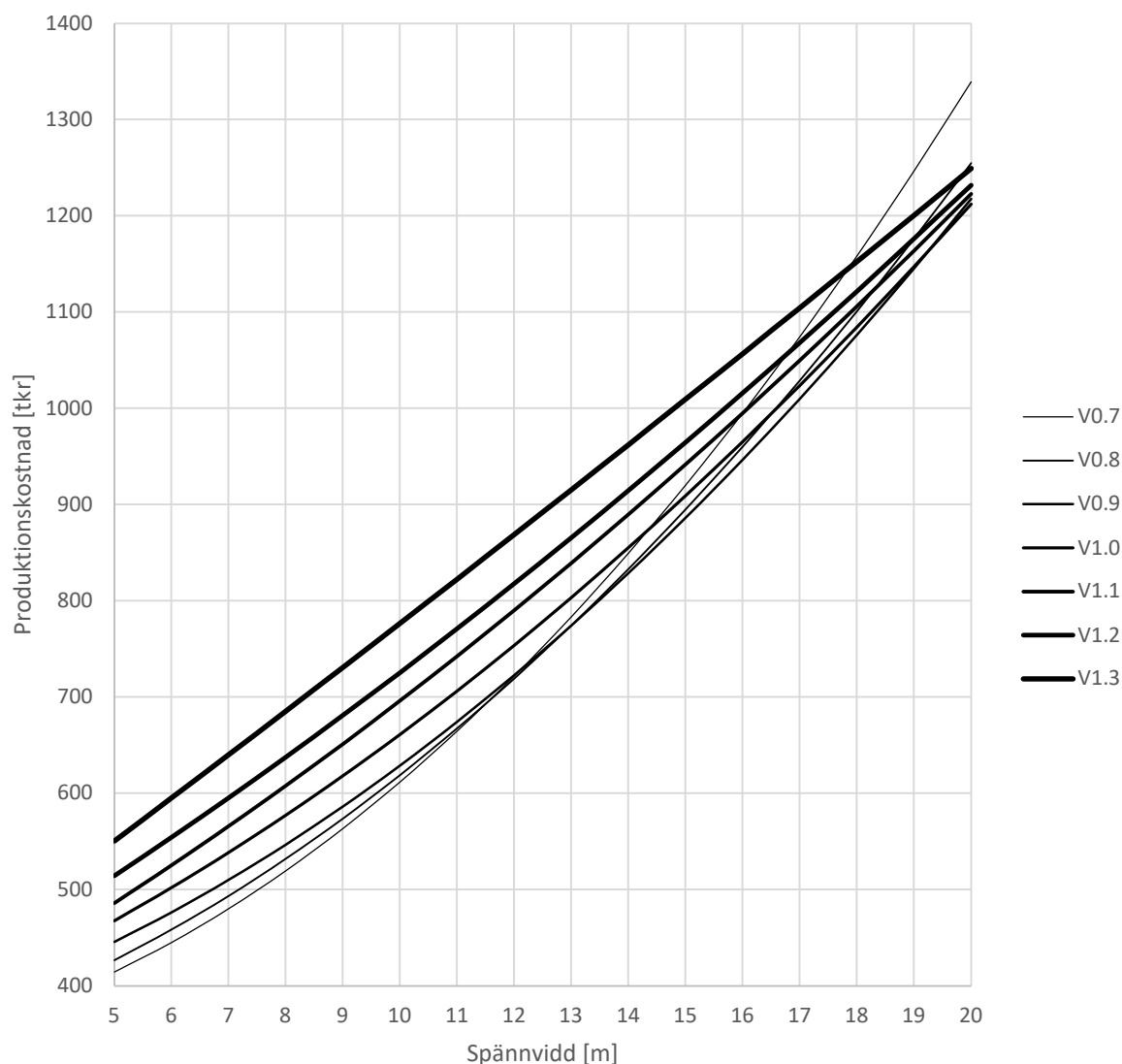
Figur 5.32 Produktionskostnad för ram enligt modell 1. Röd linje motsvarar kostnad för enbart armering, gul linje motsvarar kostnad för enbart betong och svart linje motsvarar total produktionskostnad. Armering är beräknad för 50% extra utöver teoretiskt värde.

Produktionskostnad och kostnadsfördelning F 4.7 modell 2



Figur 5.33 Produktionskostnad för ram enligt modell 2. Röd linje motsvarar kostnad för enbart armering, gul linje motsvarar kostnad för enbart betong och svart linje motsvarar total produktionskostnad. Armering är beräknad för 50% utöver teoretiskt värde.

Produktionskostnad vid halverat pris på betong F4.7 modell 1



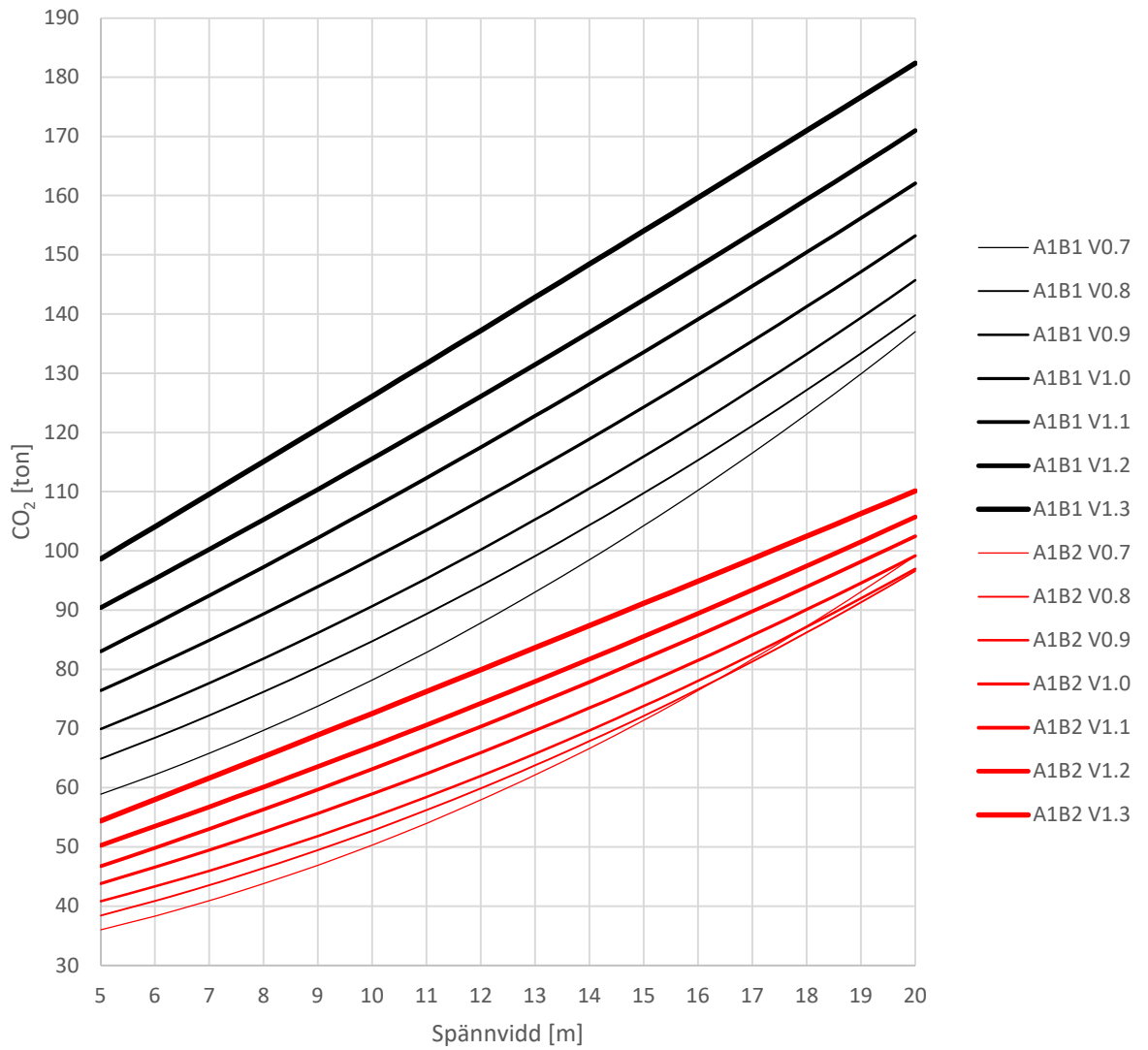
Figur 5.34 Produktionskostnad för ram enligt modell 1 där betongens pris / m^3 halverats jämfört med figur 5.31, d.v.s. 1675 kr / m^3 .

5.5 Miljöpåverkan

I detta avsnitt presenteras ramens beräknade miljöpåverkan mätt i koldioxidutsläpp för en ram med varierande spännvidder och tjocklekar. Svarta linjer motsvarar vanlig betong och röda linjer motsvarar till 50% klimatkompenserad betong.

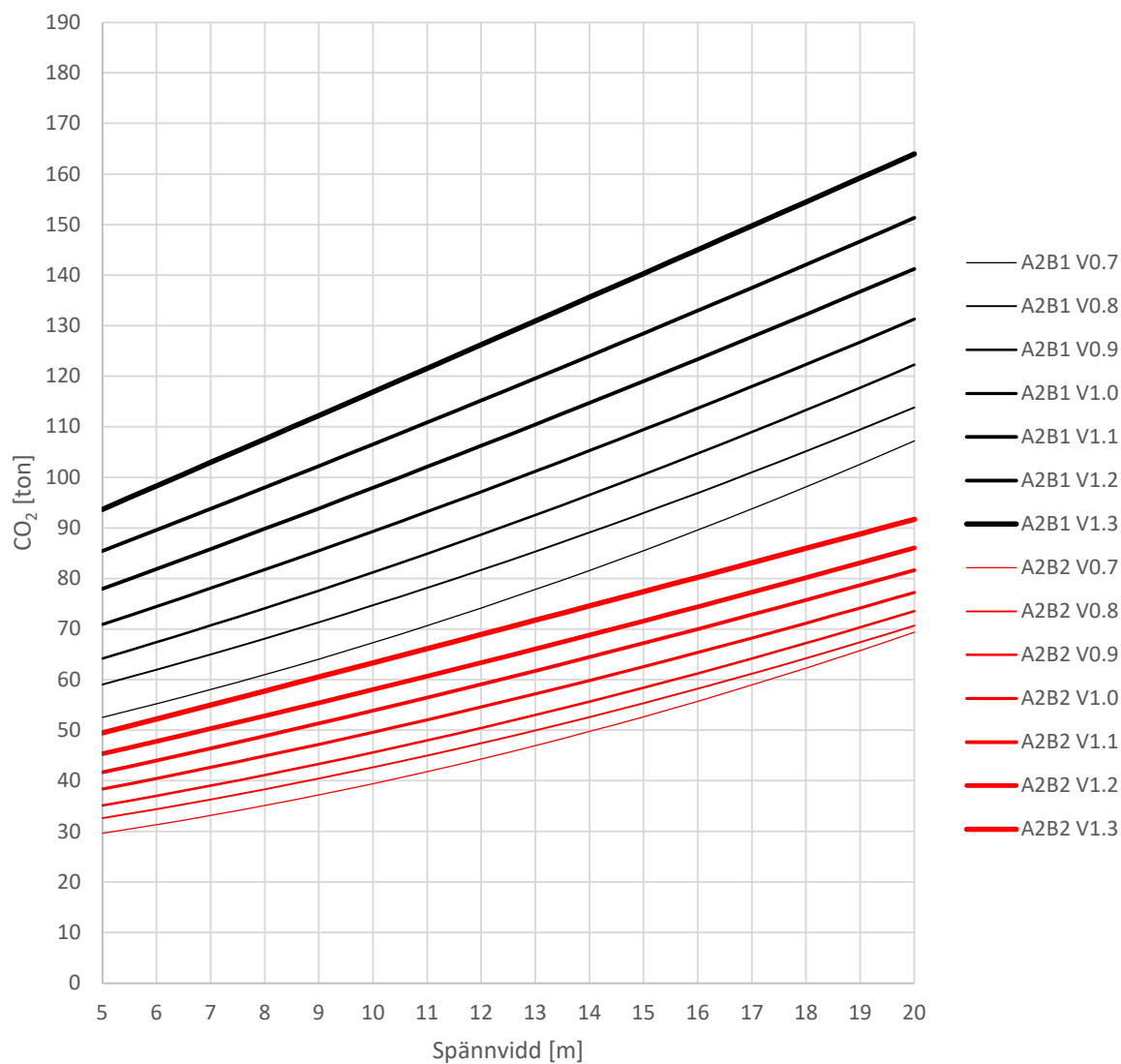
Figur 5.36 – 5.38 visar att ett tunnare tvärsnitt ger lägre miljöpåverkan för de flesta kombinationer av betong och armering. Figur 5.35 visar dock att för kombinationen A1B2 så är för spännvidder 16 m inte den tunnaste voten mest miljövänlig längre.

Miljöpåverkan F4.7 A1B1 & A1B2 modell 1



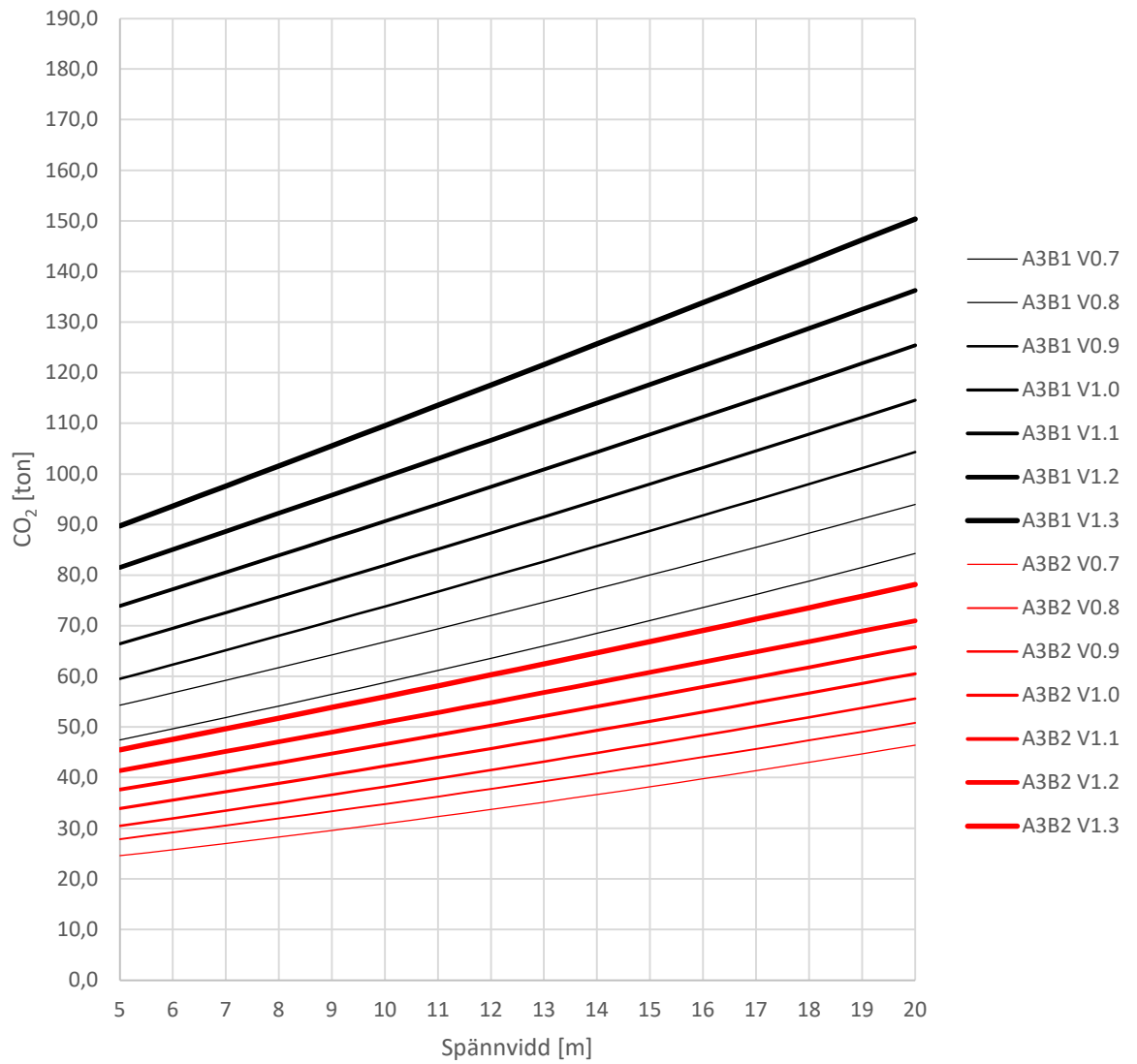
Figur 5.35 Miljöpåverkan för ram med armering huvudsakligen från jungfruliga råvaror (A1). Svarta linjer motsvarar normal betong. Röda linjer motsvarar betong klimatkompenserad med 50%.

Miljöpåverkan F4.7 A2B1 & A2B2 modell 1



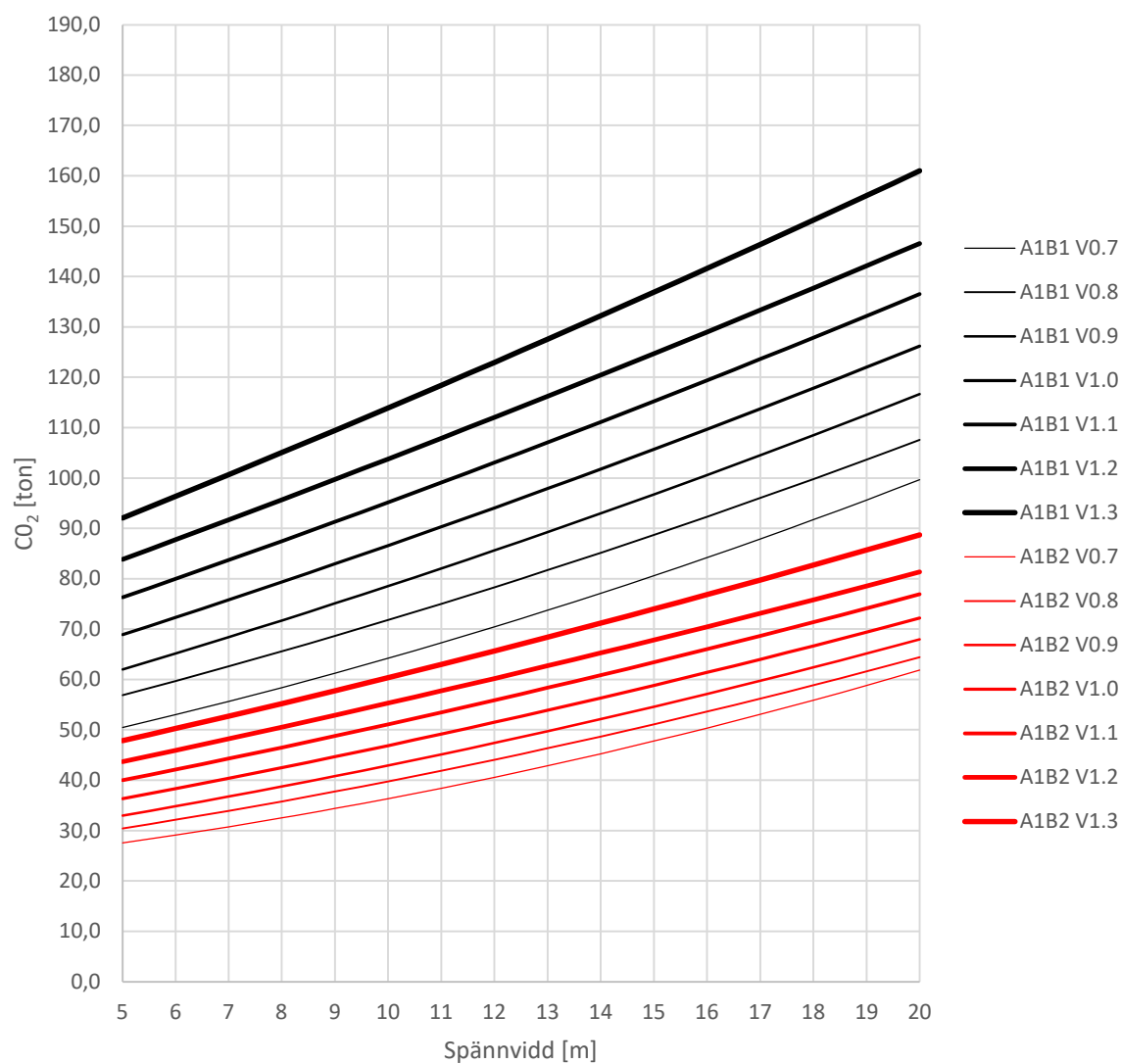
Figur 5.36 Miljöpåverkan för ram med europeisk standardarmering (A2). Svarta linjer motsvarar normal betong. Röda linjer motsvarar betong klimatkompenserad med 50%.

Miljöpåverkan F4.7 A3B1 & A3B2 modell 1



Figur 5.37 Miljöpåverkan för ram med armering huvudsakligen baserad på skrot (A3). Svarta linjer motsvarar normal betong. Röda linjer motsvarar betong klimatkompenserad med 50%.

Miljöpåverkan F4.7 A2B1 & A2B2 modell 2



Figur 5.38 Miljöpåverkan för ram med europeisk standardarmering (A2). Svarta linjer motsvarar normal betong. Röda linjer motsvarar betong klimatkompenserad med 50%.

6 Diskussion

Vid arbetets början undersöktes endast en ramtjocklek motsvarande V0.9 för samtliga spännvidder och höjder. Vi hade hoppats på att kunna hitta ett samband för hur mängden armering förändras med spännvidd och höjd samt koppla detta till punkterna där flera ramtjocklekar beräknats i punkterna S5F3.2, S10F4.7 och S20F6.3. Dock hittades inget tydligt samband och det stod klart att mer data behöver tas fram.

Arbetet fortsatte genom att mer data togs fram för ramtjocklekarna V0.7 – V1.3 för spännvidderna 5, 10, 15 och 20 meter och fri höjd F4.7. Mängden armering för ramarna beräknades och plottades i ett diagram. Först då kunde ett samband hittas, där mängden armering kan uttryckas som en funktion av spännvidden. För att ge en överblick hur armeringsbehovet varierar med spännvidden ritas behovet ut i ett diagram med spännvidd på x -axeln och armeringsbehov på y -axeln. Oavsett om armeringen beräknas efter modell 1 eller modell 2 är det möjligt att uppskatta det totala armeringsbehovet för ramar vid samtliga undersökta spännvidder med god noggrannhet.

Något tydligt samband för hur armeringsbehovet varierar med höjden hittades inte, och eftersom de flesta analyserade broar har höjden F4.7 är resultaten för F3.2 och F6.3 är mer osäkra på grund av sämre underlag i form av beräkningar. Att linjerna i figur 5.24 tycks löpa parallellt med varandra tyder på att det är möjligt att översätta polynomen framtagna i figur 5.25 och 5.26 till höjderna F3.2 och F6.3 genom att matcha dessa till beräknade punkter. Dock visar figur 5.27 – 5.28 med tillhörande tabell 5.3 och 5.4 att variationen mellan uppskattade och beräknade värden är runt 12% i de kortare spännvidderna.

Vid arbete med ConcreteDesigner beam noterades det att samma tvärsnitt kan armeras på flera olika sätt. För att jobba med så jämförbara siffror som möjligt valde vi att inte armera tvärsnitten, utan utgå från det teoretiskt beräknade minimibehovet. Ett antal tvärsnitt armerades och jämfördes mot det teoretiska värdet, varpå vi fann att det krävs ungefär 30 – 60% mer armering än vad det teoretiska värdet anger för att den inlagda armeringen ska vara rimlig. Eftersom den verkliga mängden inlagd armering är starkt beroende av hur konstruktören väljer att placera denna görs beräkningarna med ett pålägg på 50% i varje punkt utöver vad som anges i figur 5.25 - 5.26.

Mängden armering varierar även beroende på om tvärsnittet armeras efter modell 1 eller modell 2, där modell 2 gör det möjligt att använda en mindre mängd armering än i modell 1. Samtidigt ska det beaktas att detta kan göra konstruktionen mer komplicerad och risken för fel ökar. En mer komplicerad konstruktion är billigare ur materialsynpunkt men troligen dyrare för entreprenören som skall bygga bron, den kostnaden har inte beaktats.

Wikells Sektionsdata har utgjort grund för kostnadsberäkningar, och kostnaden för betong och armering därifrån ligger i linje med vad Atkins själva räknar med. Det

är dock generiska siffror och de kan variera. Viktigt att tillägga är att gjutformen troligen är något dyrare för tjockare tvärsnitt, något som inte har tagits hänsyn till i arbetet.

Armeringsmängden tillsammans med mängden betong för en ram utgör grund för uppskattning av kostnad och miljöpåverkan. Hur kostnader för betong och armering varierar påverkar vilken tjocklek på ram som är lämpligast att utgå ifrån vid dimensionering.

Figur 5.25 - 5.26 antas ge en god uppskattning för hur armeringsbehovet varierar med både spännvidd och tjocklek på ramen med fri höjd 4,7 m, och används vidare tillsammans med erforderlig mängd betong enligt figur 5.29 för att undersöka hur produktionskostnaden och miljöbelastningen varierar med ramtjockleken.

Figur 5.30 – 5.33 visar som förväntat att vid en tunnare ramtjocklek blir kostnaden för betongen lägre och armeringen högre. Dock förändras kostnaden för armering relativt lite jämfört med kostnaden för betong vid variation av ramtjocklek och i det undersökta intervallet blir ett tunnare tvärsnitt nästan alltid billigare. Trenden för figurerna tyder på att om tunnare ramtjocklekar hade undersökts så hade diagrammen tydligare visat att det tunnaste tvärsnittet inte alltid är billigast. Dock är det troligt att en allt för tunn ram inte hade klarat nästa steg i dimensioneringsprocessen.

Trots att armering har en betydligt högre miljöpåverkan än betong räknat per viktenhet visar figur 5.35 – 5.38 att ett tunnare tvärsnitt, där mer armering går åt, ger en lägre miljöpåverkan. Först när betongen klimatkompenseras till runt 50% och kombineras med masugnsproducerad armering av till största del jungfruliga råvaror kan det vara intressant att göra profilen något tjockare. Generellt visar resultaten att genom ett aktivt produktval kan ramens miljöbelastning minskas avsevärt genom att i första hand välja en klimatkompenserad betong.

Varken BRIGADE/standard eller ConcreteDesigner beam tar hänsyn till andra ordningens teori vid beräkning. Dock får det inte så stor inverkan på bron då ändstöden är så pass styva enligt konstruktör på Atkins. När broöverdelen belastas tenderar rambenen att pressas ut mot fyllnadsmassan som håller emot. Det ses ändå som en viktig punkt att ta upp som kan påverka broar med slankare konstruktion med t.ex. mittpelare.

7 Slutsats

Det är möjligt att överslagsmässigt uppskatta mängden armering som går åt vid gjutning av en plattrambro. Datan kan användas för att ta fram ett verktyg som ger ett optimalt utgångsläge vid dimensionering av ramen med avseende på både ekonomi och miljöpåverkan. Ramens kostnad styrs dels av betongens och armeringens pris, och dels av tjockleken på ramen, där det tunnaste tvärsnittet inte alltid är billigast.

Vidare kan det vara möjligt att få ner produktionskostnaden ytterligare genom att armera ramen enligt modell 2, under förutsättning att extra arbetskostnader för entreprenören ej tillkommer. Dock kan tunnare ram leda till högre konsultkostnader på grund av mer arbete med att utforma armeringen. Även miljöbelastningen minskas genom att mindre armering används, men skillnaderna är marginella.

Generellt gäller att ett tunnare tvärsnitt ger en lägre miljöpåverkan. Ramens miljöpåverkan är till stor del beroende av vilken kombination av betong och armering som används. För kombinationen masugnsproducerad armering av till största delen jungfruliga råvaror tillsammans med klimatkompenserad betong kan det gynna miljön att gjuta tvärsnittet något tjockare. Resultaten indikerar att genom att välja en betong klimatkompenserad med 50% fås en större miljövinst jämfört med att välja en miljövänligare armering.

Generellt pekar både produktionskostnaden och miljöbelastningen åt samma håll, en billigare ram är även en miljövänligare ram.

Referenser

- [1] ”Wikells sektionsdata,” Wikells byggberäkningar, 2020.
- [2] Råd Brobyggande, TDOK 2016:0203, version 3.0, Trafikverket, 2019.
- [3] Trafikverkets författningssamling TRVFS 2018:57, Borlänge: Charlotta Lindmark, Trafikverket, 2011.
- [4] Krav Brobyggande, TDOK 2016:0204, version 3.0, Trafikverket, 2019.
- [5] Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner-TK Geo 13, TDOK 2013:0667, version 2.0, Trafikverket, 2016.
- [6] Eurokod 1: Laster på bärverk, SS-EN 1991-1-5:2003-11-28, utgåva 1, Svenska Institutet för Standarder (SIS), 2005.
- [7] Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner, SS-EN 1992-1-1:2005-01-14, utgåva 1, Svenska Institutet för Standarder (SIS), 2008.
- [8] Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner-Del 1-2: Allmänna regler – Brandteknisk dimensionering. SS-EN 1992-1-1: 2004-12-30, Svenska Institutet för Standarder (SIS), 2009.
- [9] Eurokod 1: Laster på bärverk, SS-EN 1991-2:2003-10-17, utgåva 1, Svenska Institutet för Standarder (SIS), 2007.
- [10] ”BRIGADE,” Scanscot Technology, BRIGADE/Standard, version 4.3.22, 2019-12-04. [Online]. Available: <https://scanscot.com/products/bridge-design/BRIGADE-standard/>. [Använd 30 03 2020]
- [11] ”Eurocode Software, caeEc210 ConcreteDesigner beam, ver 2.0.5,” [Online]. Available: <http://www.eurocodesoftware.se/products.html>. [Använd 30 03 2020]
- [12] ”Eurocode Software AB användarmanual, Rev A,” 2013-08-22. [Online]. Available: http://www.eurocodesoftware.se/pdf/caeEc210_Concrete_Designer_Beam_Rev_B.pdf. [Använd 07 04 2020]
- [13] P. G. Burström, "Byggnadsmaterial", Studentlitteratur, 2007, upplaga 2:8, pp. 207-209.
- [14] Svenskbetong, ”Betong och klimat, En rapport om arbetet för klimatneutral betong,” Augusti 2017. [Online]. Available: <https://www.svenskbetong.se/component/edocman/betong-och-klimat/download>. [Använd 13 05 2020]

- [15] Finja, "KLIMATPOSITIVA BETONGSTOMMAR," Finja, Oktober 2019. [Online]. Available: <https://www.finjaprefab.se/wp-content/uploads/2019/10/Finja-Prefab-klimatpositiva-betongstommar-folder.pdf>. [Använd 13 05 2020]
- [16] Jernkontoret, "Klimatfärdplan, För en fossilfri och konkurrenskraftig stålindustri i Sverige," 2018. [Online]. Available: http://fossilfritt-sverige.se/wp-content/uploads/2018/04/ffs_stalindustrin.pdf. [Använd 20 05 2020]
- [17] N. Al-Ayish, "KLIMATOPTIMERAT BYGGANDE AV BETONGBROAR," SBUF, 06 2017. [Online]. Available: <https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/5091a3fe-9f6c-4f98-b1e2-c2416df0aa42/FinalReport/SBUF%2013207%20Slutrapport%20Klimat%20optimerat%20byggande%20av%20betongbroar.pdf>. [Använd 20 05 2020].
- [18] M. Almemark, "Steel reinforcement products for concrete, Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025 and EN 15804," Celsa steelservice, 2015. [Online]. Available: <https://gryphon4.environdec.com/system/data/files/6/8564/epd305%20Celsa%20Steel%20Service%202018.pdf>. [Använd 15 05 2020]
- [19] VVFS 2006:61, 2006-06-09, Vägverket, 2006.
- [20] S. Heyden, O. Dahlblom, A. Olsson och G. Sandberg, "Introduktion till strukturmekniken", Studentlitteratur. Lund, 2017.
- [21] T. Isaksson and A. Mårtensson, "Byggkonstruktion regel- och formelsamling", Lund, Studentlitteratur, Lund 2017. upplaga 3:1, pp. 2-5.