

Gång- och cykelbro i rostfritt duplexstål

En utredning genom livscykelanalys,
kostnadsanalys och konstruktionstekniska
beräkningar

Matilda Frantzich

Examensarbete 2019
Miljö- och Energisystem
Institutionen för Teknik och samhälle
Lunds Tekniska Högskola



LUNDS UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

Gång- och cykelbro i rostfritt duplexstål

En utredning genom livscykelanalys, kostnadsanalys och
konstruktionstekniska beräkningar

Matilda Frantzich

Examensarbete

Juni 2019

| | |
|--|-------------------|
| Dokumentutgivare, Dokumentet kan erhållas från LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA vid Lunds universitet Institutionen för teknik och samhälle Miljö- och energisystem Box 118 221 00 Lund Telefon: 046-222 00 00 Telefax: 046-222 86 44 | Dokumentnamn |
| | Examensarbete |
| | Utgivningsdatum |
| | Författare |
| | Matilda Frantzich |

Dokumenttitel och undertitel

Gång- och cykelbro i rostfritt duplexstål
En utredning genom livscykelanalys, kostnadsanalys och konstruktionstekniska beräkningar

Sammandrag

Rostfritt duplexstål är ett konstruktionsmaterial som skulle kunna tänkas vara konkurrenskraftigt i förhållande till konventionella material inom brobyggnad med tanke på dess höga hållfasthet, marginella underhållsbehov och möjlighet till återvinning. Hittills har det dock inte använts i någon större utsträckning inom brobyggnad framför allt på grund av dess högre kostnad i förhållande till traditionellt kolstål. I denna studie analyseras en gång- och cykelbro av fackverkstyp tillverkad av rostfri duplexstålplåt utifrån tre perspektiv: miljöpåverkan, ekonomiska kostnader och konstruktionsteknisk utformning. Syftet är dels att utreda materialets potential inom brobyggnad dels att undersöka den aktuella brotformningens möjligheter och begränsningar med hänsyn till dimensioner och detaljutformning. För att göra en samlad bedömning av bron vägs resultat från livscykelanalys och kostnadsanalys samman i en samhällsekonomisk bedömning.

Resultatet visar på att det är möjligt att uppnå längre spännvidder än 20 m med tunna stålplåtar men att bucklingsfenomen är kritiskt för bärförmågan och måste beaktas noggrant. Det är dock möjligt att med mindre förändringar av utformningen av knutpunkterna i fackverket både öka styvheten i tvärled och reducera spänningsnivåerna i områden med lokalt höga värden.

Livscykelanalysen visade i sin tur att det rostfria duplexstålet ger upphov till mindre utsläpp av växthusgaser än traditionellt konstruktionsstål under förutsättning att dess höga hållfasthet kan leda till en reduktion av mängden använt material. Produktion av rostfritt stål från jungfruliga råvaror ger dock upphov till större växthusgasutsläpp per ton än kolstål. Om stålet genom framtida återvinning kan ersätta nyproducerat material kan den rostfria bron få en miljöpåverkan som är jämförbar med en träbro, dock under antagandet att den senare har kortare teknisk livslängd.

Kostnadsanalysen visade att den rostfria bron är likvärdig med motsvarande kolstålbro sett till kostnaderna över hela livslängden men att träbron får betydligt högre kostnad på grund av stort underhållsbehov. Inkluderas också kostnader som uppstår på grund av störningar av trafiken vid underhållsåtgärderna i den samhällsekonomiska bedömningen faller dock den rostfria bron ut som det bästa alternativet. Utfallet av kostnadsanalysen är starkt beroende av vilken kalkylränta som tillämpas. Miljökostnader utgör endast en liten del av den samhällsekonomiska kostnaden, ca 6% för den rostfria bron om Trafikverkets rekommenderade värderingsmetod används.

Nyckelord

Brobyggnad, rostfritt duplexstål, livscykelanalys, miljöpåverkan, samhällsekonomisk analys, finit elementmodellering

| | | |
|-----------|---------|---------------------------------------|
| Sidomfång | Språk | ISRN |
| 139 | Svenska | ISRN LUTFD2/TFEM—19/5145—SE + (1-139) |

| | |
|--|-------------------|
| Organisation, The document can be obtained through LUND UNIVERSITY Department of Technology and Society Environmental and Energy Systems Studies Box 118 SE - 221 00 Lund, Sweden Telephone: int+46 46-222 00 00 Telefax: int+46 46-222 86 44 | Type of document |
| | Master thesis |
| | Date of issue |
| | Authors |
| | Matilda Frantzich |

Title and subtitle

Pedestrian bridge in duplex stainless steel
 A study through life cycle analysis, socio-economic assessment and structural analysis

Abstract

Duplex stainless steel is a construction material that could possibly prove competitive in relation to conventional materials in bridge design, given its high strength, marginal maintenance needs and the possibility of recycling. To date, however, it has not been used to any great extent in bridge constructions, mainly because of its higher cost in relation to traditional carbon steel. In this study, a pedestrian bridge of truss type made from duplex stainless steel sheet is analyzed from three perspectives: environmental impact, economic costs and structural design. The purpose is to investigate the potential of the steel type in bridge design and to examine the possibilities and limitations of the current bridge design with respect to dimensions and detail design. To make an overall assessment of the bridge, results from life cycle analysis and cost analysis are weighted together in a socio-economic assessment.

The result shows that it is possible to achieve longer span width than 20 m with thin steel plates, but that buckling phenomena is critical to the bearing capacity and must be carefully considered. However, it is possible to increase the stiffness in the transverse direction and reduce the stress levels in areas with locally high values with minor design changes of the nodes of the truss structure.

The life cycle analysis, in turn, showed that the duplex stainless steel gives rise to less climate impact than traditional structural steel, provided that its high strength can lead to a reduction in the amount of material used. However, the production of stainless steel from virgin raw materials gives rise to larger greenhouse gas emissions per tonne compared to carbon steel. If the steel through future recycling can replace newly produced material, the stainless steel bridge can have an environmental impact that is comparable to a bridge with wood as primary material assuming the latter has a shorter technical service life.

The cost analysis showed that the stainless steel bridge is equivalent to the corresponding carbon steel bridge with respect to cost over the entire service life, but that the wooden bridge has a considerably higher cost due to large maintenance needs. However, if costs that arise from traffic disruptions connected to maintenance related activities are included, the stainless steel bridge can be considered as the best alternative from a socio-economic point of view. The outcome of the cost analysis is strongly dependent on the discount rate applied. Environmental costs represent only a small part of the total socio-economic cost, about 6% for the stainless-steel bridge if the Swedish Transport Administration's recommended valuation method is used.

Keywords

Bridge design, duplex stainless steel, life cycle analysis, environmental impact, socio-economic assessment, finite element modelling

| | | |
|-----------------|----------|---------------------------------------|
| Number of pages | Language | ISRN |
| 139 | Swedish | ISRN LUTFD2/TFEM—19/5145—SE + (1-139) |

Förord

Detta examensarbete har genomförts som avslutning på mina studier på civilingenjörsprogrammet ekosystemteknik vid Lunds tekniska högskola under våren 2019. Arbetet har genomförts i samarbete med ingenjörskonsultfirman Centerlöf och Holmberg. Under studiernas gång har jag fått ett växande intresse för konstruktionsteknik och byggande och ämnet för examensarbetet har därför varit ett ypperligt sätt att kombinera detta med inriktningen för programmet. Teknik, miljö och ekonomi som är de tre grundstenarna i examensarbetet är också områden som tydligt kännetecknar just ekosystemteknik.

Jag vill rikta ett stort tack till mina handledare Mikael Lantz och Per Svenningsson på Avdelningen för miljö- och energisystem för goda råd och kommentarer under arbetets gång. Centerlöf och Holmberg är också värda ett mycket stort tack för både handledning, speciellt av Ola Bengtsson, och möjlighet att utföra arbetet på plats på kontoret i Malmö med tillgång till nödvändiga datorprogram. Jag vill även tacka Ronny Södergren vid Stål och Rörmontage AB i Sölvesborg för rundvisning i företagets verkstad och för allmän information kring den studerade bron. Examinator för arbetet har varit Pål Börjesson på Avdelningen för miljö- och energisystem som jag till sist också vill tacka för värdefulla synpunkter inför den slutgiltiga versionen av examensarbetsrapporten.

Matilda Frantzich

Innehållsförteckning

| | |
|--|-----------|
| 1. INLEDNING | 5 |
| 1.1 BAKGRUND..... | 5 |
| 1.2 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR | 5 |
| 1.3 ÖVERGRIPANDE METODIK OCH STRUKTUR | 6 |
| 2. BESKRIVNING AV BRO | 9 |
| 2.1 ROSTFRITT DUPLEXSTÅL SOM KONSTRUKTIONSMATERIAL..... | 9 |
| 2.2 TEKNISK UTFORMNING..... | 10 |
| 2.2 JÄMFÖRELSEALTERNATIV..... | 12 |
| 2.2.1 Bro i kolstål | 12 |
| 2.2.2 Bro i trä | 12 |
| 3. METODIK | 15 |
| 3.1 KONSTRUKTIONSBERÄKNING | 15 |
| 3.1.1 Dimensioneringsregler..... | 15 |
| 3.1.2 Laster..... | 15 |
| 3.1.4 Kontroll av spänningar | 18 |
| 3.1.5 Kontroll av andra ordningens effekter..... | 18 |
| 3.1.6 Kontroll av tvärsnittsklass..... | 19 |
| 3.1.6 Komfortkrav..... | 22 |
| 3.1.7 Kontroll av knutpunkternas styvhet..... | 22 |
| 3.2 LIVSCYKELANALYS..... | 23 |
| 3.2.1 LCA enligt ISO 14 044 | 23 |
| 3.2.2 Studiespecifik indelning av processer | 24 |
| 3.2.3 Beräkningsmetod för återvinning av material..... | 25 |
| 3.3 KOSTNADSANALYS | 26 |
| 3.3.1 Ekonomisk beräkningsmetodik | 26 |
| 3.3.2 Nuvärdesmetoden..... | 27 |
| 4. KONSTRUKTIONSBERÄKNINGAR | 29 |
| 4.1 SYFTE OCH FÖRUTSÄTTNINGAR | 29 |
| 4.1.1 Analyserade parametrar..... | 29 |
| 4.1.2 Modellering | 30 |
| 4.2 RESULTAT | 33 |
| 4.2.1 Beräkningsfall..... | 34 |
| 4.2.2 Resultat nedböjning SLS..... | 35 |
| 4.2.3 Resultat frekvens SLS | 36 |
| 4.2.4 Resultat spänningar SLS | 37 |
| 4.2.5 Resultat spänningar ULS..... | 39 |
| 4.2.6 Excentricitet..... | 41 |
| 4.2.7 Infästning av tvärbalk..... | 43 |
| 4.2.8 Andra ordningens teori | 45 |
| 4.2.9 Resultat utböjning vid enhetslastfall..... | 46 |
| 4.2.10 Mängdning till livscykelanalys och kostnadsanalys | 48 |

| | |
|--|-----------|
| 5. LIVSCYKELANALYS..... | 49 |
| 5.1 MÅL OCH OMFATTNING..... | 49 |
| 5.1.1 Syfte..... | 49 |
| 5.1.2 Studerat system och funktionell enhet..... | 49 |
| 5.1.3 Processdiagram..... | 50 |
| 5.1.5 Cut-offkriterier..... | 52 |
| 5.1.6 Datakällor..... | 52 |
| 5.1.7 Miljöpåverkanskategorier..... | 54 |
| 5.1.8 Systembeskrivning..... | 55 |
| 5.2 INVENTERING..... | 59 |
| 5.2.1 Mängder..... | 59 |
| 5.2.2 LCI materialtillverkning..... | 59 |
| 5.2.3 LCI konstruktion och underhåll..... | 60 |
| 5.2.4 LCI Rivning, avfallshantering och återvinning..... | 60 |
| 5.2.5 LCI transporter och trafikstörning..... | 61 |
| 5.3 MILJÖPÅVERKANSBEDÖMNING..... | 61 |
| 5.3.1 Klimatförändring..... | 61 |
| 5.3.2 Nedbrytning av stratosfäriskt ozon..... | 62 |
| 5.3.3 Förurning..... | 63 |
| 5.3.4 Övergödning..... | 64 |
| 5.3.5 Fotokemisk oxidation..... | 65 |
| 5.3.6 Trafikomledning..... | 66 |
| 5.4 TOLKNING..... | 67 |
| 5.4.1 Analys av miljöpåverkansbedömning..... | 67 |
| 5.4.2 Datakvalitet och osäkerhetsfaktorer..... | 74 |
| 6. KOSTNADSANALYS..... | 77 |
| 6.1 INDATA TILL KOSTNADSANALYS..... | 77 |
| 6.1.1 Kostnad för material och konstruktion..... | 77 |
| 6.1.2 Kostnader för underhåll..... | 78 |
| 6.1.3 Kostnader för avfallshantering..... | 80 |
| 6.1.4 Kostnader för frakt..... | 80 |
| 6.1.5 Kostnader för trafikomledning..... | 81 |
| 6.1.6 Omräkning till reallpris..... | 82 |
| 6.2 RESULTAT..... | 83 |
| 6.2.1 Grundinvestering..... | 83 |
| 6.2.3 Livscykelkostnad..... | 83 |
| 6.2.3 Variation av kalkylränta..... | 86 |
| 6.2.4 Trafikantkostnader..... | 87 |
| 7. SAMHÄLLSEKONOMISK ANALYS..... | 89 |
| 7.1 KOSTNADSVÄRDERING AV MILJÖPÅVERKAN..... | 89 |
| 7.1.1 Värderingsmetoder..... | 89 |
| 7.1.2 Resultat omräkning av LCA-resultat..... | 91 |
| 7.1.3 Samlad värdering av miljöpåverkan..... | 92 |
| 7.1.4 Samlad värdering av miljöpåverkan, högsta värdering..... | 94 |
| 7.2 SAMLAD SAMHÄLLSEKONOMISK ANALYS..... | 95 |
| 7.2.1 Basfall..... | 95 |
| 7.2.2 Basfall högsta värdering av miljöpåverkan..... | 97 |
| 7.2.3 Basfall inklusive trafikpåverkan..... | 99 |

| | |
|--|------------|
| 7.2.4 Ommålning av kolstålbros utomhus, inklusive trafikantkostnader | 101 |
| 8. SLUTSATSER OCH DISKUSSION..... | 105 |
| 8.1 KONSTRUKTIONSBERÄKNINGAR | 105 |
| 8.2 LIVSCYKELANALYS..... | 107 |
| 8.3 KOSTNADSANALYS | 110 |
| 8.4 SAMHÄLLSEKONOMISK ANALYS | 111 |
| 8.5 DISKUSSION KRING FUNKTIONELL ENHET..... | 113 |
| 8.6 ÖVERGRIPANDE BEDÖMNING AV DEN ROSTFRIA BRON..... | 114 |
| 9. SAMMANFATTANDE REKOMMENDATIONER OCH SLUTSATSER..... | 115 |
| 10. REFERENSER | 119 |
| 11. BILAGA 1 | 125 |
| INVENTERINGSDATAKÄLLOR FÖR LIVSCYKELANALYS: MATERIAL, PROCESSER OCH TRANSPORTER | 125 |

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Broar är en mycket väsentlig del av infrastrukturnätverket både för väg-, järnvägs- och cykel- och gångtrafik. Konstruktion av broar är dock en gren inom byggsektorn som generellt är förknippad med både stora kostnader och hög materialåtgång. Detta kan i sin tur hänföras till de omfattande krav som ställs på bärförmågan för att bron ska uppfylla tillräcklig säkerhet och funktionalitet. Den långa livslängden för broar gör också att materialval får långsiktiga konsekvenser både ur kostnads- och miljösynpunkt med hänsyn till eventuellt behov av underhållsåtgärder. Av denna anledning finns motiv till att både utreda potentialen hos mindre konventionella konstruktionsmaterial och att försöka optimera den strukturella utformningen hos nya broar i syfte att minska materialåtgången.

Ett material som potentiellt skulle kunna visa sig konkurrenskraftigt inom brokonstruktion är rostfritt duplexstål. Hittills har det dock inte använts i någon större utsträckning inom brobyggnad framför allt på grund av dess högre kostnad i förhållande till traditionellt konstruktionsstål (Hechler och Collin 2008). Duplexstålet karakteriseras av sin höga hållfasthet kombinerat med marginella underhållsbehov och möjlighet till återvinning (Andersson 2009). Detta examensarbete ämnar utreda det rostfria duplexstålets potential genom en analys av en gång- och cykelbro tillverkad av detta material. Bron är av fackverkstyp och marknadsförs av tillverkaren som miljömässigt fördelaktig i förhållande till likvärdiga broar i kolstål och trä (SRM AB 2018). I dagsläget har ett exemplar av brotypen blivit aktuell för produktion och uppförts i Södertälje kommun.

I detta examensarbete kommer det att undersökas huruvida det finns en grund för att hävda att den rostfria bron är ett miljömässigt såväl som ekonomiskt konkurrenskraftigt alternativ till broar i kolstål och trä. Konstruktionsberäkningar kommer även att göras för den rostfria bron med avsikt att dels utreda om och hur längre spännvidder på 20-30 m kan uppnås utan att plåttjockleken behöver ökas dels undersöka hur viss detaljutformning kan förbättras för bron.

1.2 Syfte och frågeställningar

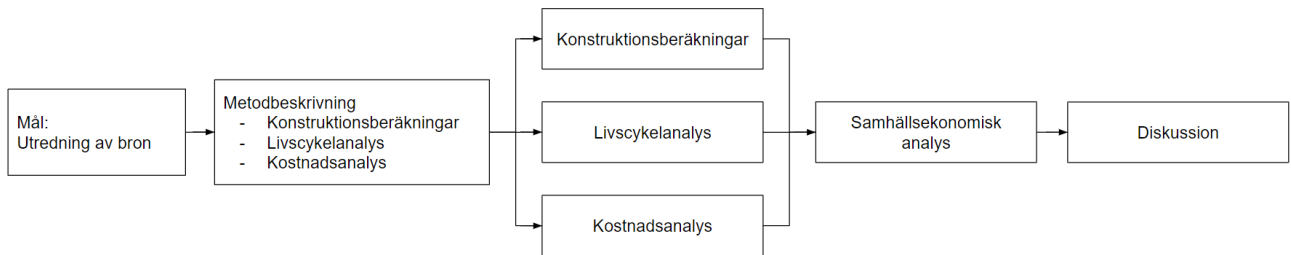
Syftet med examensarbetet är att i fråga om kostnader och miljöbelastning jämföra den rostfria bron med likvärdiga broar i dels målat kolstål dels i trä samt att undersöka hur den tekniska utformningen av bron kan förändras och eventuellt förbättras. Ytterligare syfte är också att undersöka huruvida samhällsekonomisk analys är en tillämpbar metod för att kombinera resultat från kostnadsanalys och livscykelanalys. Frågeställningar som ligger till grund för arbetet och som ämnas att besvaras är följande:

- Hur kan spännvidd, fri bredd och fackverkshöjd på den rostfria bron varieras utan att plåttjockleken och därmed materialåtgången behöver ökas?
- Kan knutpunkterna i fackverket utformas med högre styvhet och vad får excentriciteter i knutpunkterna för effekter?
- Vilken miljöpåverkan genererar den rostfria bron under sin livscykel och hur förhåller sig resultatet till miljöpåverkan från jämförbara broar i kolstål och trä?
- Vilka kostnader kan knytas till den rostfria bron samt broar i kolstål och trä och hur fördelar sig kostnaderna över livslängden?
- Hur kan resultatet från livscykelanalysen värderas i ekonomiska termer och kombineras med kostnadsanalysen? Hur stort genomslag får då miljökostnaderna sett till totalkostnaden?
- Finns det belägg för att hävda att den rostfria bron är ett mer miljöanpassat alternativ till jämförbar träbro och bro i kolstål?

För både kostnads- och livscykelanalys kommer den funktionella enheten att vara gång- och cykelbroöverbyggnad med spännvidd 26,1 m och fri bredd 3 m med en teknisk livslängd på 80 år. Valet av funktionell enhet är gjord för att dels överensstämna med måtten för jämförelsealternativet i trä dels motsvara en spännvidd som bedöms vara kritisk för den rostfria brons bärförmåga.

1.3 Övergripande metodik och struktur

Utvärderingen av den rostfria bron i enighet med studiens mål och syfte kommer att genomföras med den arbetsgång som presenteras i figur 1.1.



Figur 1.1 Metodologisk struktur för examensarbetet och utredningen av bron

De olika delavsnitten i examensarbetet följer enligt nedan med kortfattad beskrivning av metodik för de olika analysområdena:

- Avsnittet *Beskrivning av bron* ger en inledande presentation av den studerade brotypen med avseende på den tekniska utformningen liksom presentation av jämförelsealternativen i kolstål och trä. Det ges även en introduktion till det rostfria stålet som konstruktionsmaterial inom brobyggnad.
- I avsnitt *Metodik* beskrivs mer utförligt principer och tillvägagångssätt som kommer att följas under studiens kommande avsnitt konstruktionsberäkningar, livscykelanalys och kostnadsanalys.
- Avsnittet *konstruktionsberäkningar* redovisar beräkningar gällande undersökning av olika spännvidd, bredd och höjd på bron samt resultatet av försöket att hitta optimeringar gällande utformning av knutpunkter i fackverksramarna. Beräkningarna görs med 3D finit-elementmodellering datorprogrammet Sofistik i enighet med Eurocode.
- I avsnittet *livscykelanalys* identifieras och kvantifieras den miljöpåverkan som kan knytas till den rostfria bron samt de två jämförelsealternativen i kolstål och trä, från utvinning av råmaterial till slutlig kvittblivning efter passerad livslängd. Livscykelanalysen utförs enligt ISO 14044.
- I avsnittet *kostnadsanalys* genomförs den ekonomiska bedömningen av den rostfria bron, kolstålsbron och träbron ur ett livscykelperspektiv. Beräkningsgången följer nuvärdemetoden vilket också används av Trafikverket för samhällsekonomiska kalkyler.
- I avsnittet *samhällsekonomisk analys* kombineras resultat från livscykelanalys och kostnadsanalys. Miljöpåverkan räknas om till monetärt värde utifrån värderingsrekommendationer från Trafikverket och Naturvårdsverket. Dessa miljökostnader läggs till resultatet från den ordinarie kostnadsanalysen från tidigare avsnitt. Även kostnader för trafikstörningar relaterat till montage och underhåll beaktas i ett antal olika scenarion.

- Resultaten från samtliga delstudier diskuteras och summeras under kapitlet *Diskussion*. Här förs även en diskussion kring den funktionella enheten som tillämpas i livscykelanalys och kostnadsanalys.
- I det avslutande kapitlet *Slutsatser* presenteras kortfattat, i punktform de viktigaste resultaten från studien.

2. Beskrivning av bro

2.1 Rostfritt duplexstål som konstruktionsmaterial

Rostfritt stål är ett material med hög hållfasthet som till skillnad från kolstål samtidigt besitter god beständighet mot korrosion (Andersson 2009). Vid tillverkning av rostfritt stål tillsätts minst 12% krom i järnlegeringen vilket får ett tunt lager kromoxid att bildas på ytan av den färdiga metallen vid oxidation av syret i luften. Kromoxidskiktet förhindrar att järnet korroderar, i vardagligt tal, rostar. För att öka styrkan på det skyddande lagret kan högre halt av krom nyttjas, upp till 17-18% är vanligt förekommande för konstruktionsstål. Vid inblandning av krom förändras också kristallstrukturen i järnet helt eller delvis till en så kallad austenitisk (kubiskt tätpackad) konfiguration vilket innebär en tätare atomstruktur. För att stabilisera denna kristallstruktur, vilken ökar formbarheten och underlättar svetsning av stålet, kan ett par procentandelar nickel tillsättas till legeringen, runt 8-9% vid hög kromhalt. Även molybden används som ytterligare legeringsmetall för att öka korrosionsbeständigheten och framför allt förhindra lokala frätskador om kromoxidskiktet skadas så att icke-oxiderad metall blottas (Andersson 2009).

Rostfritt stål kan ytterligare delas in i underkategorier beroende på dess kristallstruktur där de tre typerna ferritiska, austenitiska och duplexa stålen är de som vanligtvis förekommer inom stålbyggnad (Andersson 2009). Rostfritt stål av ferritisk typ har en låg halt av krom och andra legeringsmetaller och har till största del kvar den ursprungliga kristallstrukturen som återfinns i vanligt kolstål. Det har lägre korrosionsbeständighet, är svårt att svetsa och förekommer därför endast i tunnare godstjocklekar. Austenitiska rostfria stål har, som namnet antyder, däremot fullt ut den täta austenitiska kristallstrukturen på grund av den höga legeringshalten. Det är därför lättare att svetsa och bearbeta än de ferritiska stålen och formas ofta till rör och profiler för användning i stålkonstruktioner. Korrosionsbeständigheten är också mycket god. Duplext rostfritt stål har en kombination av kristallstrukturen hos ferritiskt och austenitiskt stål. Detta resulterar i att hållfastheten blir osedvanligt hög, upp mot det dubbla som för austenitiskt rostfritt stål. Halten av krom är hög, med detta också motståndskraften mot korrosion, samtidigt som nickelhalten är förhållandevis låg. Stålet är fullt ut svetsbart även om det inte är lika lättbearbetat som austenitiskt stål. På grund av beständigheten och den höga hållfastheten används duplext rostfritt stål i stor utsträckning för olika typer av cisterner och trycktankar för vätskor med frätande egenskaper, tex inom massaindustrin. Det lämpar sig också väl för brobyggnad där den höga hållfastheten gör att tunnare gods kan användas och därmed material- och viktbesparingar göras (Andersson 2009).

Användning av rostfritt stål inom byggkonstruktion är av allt större intresse på grund av dess beständighet och därmed låga underhållsbehov (Hechler och Collin 2008). Ofta är korrosion av stål den huvudsakliga orsaken till att underhållsåtgärder behöver sättas in för olika typer av konstruktioner. Detta leder oundvikligen till kostnader i form av exempelvis blästring- och måleriarbete, byte av detaljer etc. För broar tenderar underhållsarbete att leda till mycket höga kostnader, inte bara för arbetet i sig utan också relaterat till trafikstörningar (Hechler och Collin 2008). Studier har visat att underhållskostnader kan uppnå 4 gånger den ursprungliga investeringskostnaden (Whiteway 1998). Broar som är belägna i korrosiva miljöer exempelvis nära industriområden eller ännu vanligare nära havsmiljöer med saltvatten är speciellt utsatta (Hechler och Collin 2008). Tösalter är också frekvent använt i vägmiljö vilket lätt leder till angrepp från kloridjoner. Det är inte enbart broar konstruerade primärt av stål som är i risk för rostskador utan också sådana i armerad betong. Sprickbildning och med tiden försämrade kemiska egenskaper hos betongen exempelvis karbonatisering kan leda till

korrosion på armering om inte underhållsarbete såsom impregnering eller påbättring av täcksikt utförs. Korrosionsbeständiga material skulle därför kunna medföra stora besparingar men trots att rostfritt stål förefaller som ett mycket bra exempel på sådant för brokonstruktion är det fortfarande inte använt i stor omfattning. Detta kan primärt relateras till de höga materialkostnader som uppstår i förhållande till kolstål men också till begränsad omfattning av långtidsstudier på materialets egenskaper tex utmattningsfenomen. Just initialkostnaden gör att utförandealternativ i rostfritt stål tenderar att falla bort i projekteringsstadiet för broar vilket dock på längre sikt skulle kunna vara ekonomiskt gynnsamt. Studier visar på att kostnader som uppstår under användningsfasen bör uppskattas och beaktas i större utsträckning för att det mest kostnadseffektiva materialvalet ska göras, något som med stor sannolikhet skulle gynna det rostfria stålet som konstruktionsmaterial (Hechler och Collin 2008).

2.2 Teknisk utformning

Gång- och cykelbron som denna studie avser är tillverkad i rostfritt duplexstål av kvalitet EN 1.4462 med en sträckgräns på 460 MPa. Stålet utgörs av varmvalsad stålplåt från Outokumpu Stainless AB vars produktion är förlagd i Sverige (Outokumpu 2019). Det första och hittills enda exemplaret av bron tillverkades under 2018 och uppfördes vid trafikplats Södertälje Syd över väg E4, av företaget Stål och Rörmontage AB, se figur 2.1. Bron ersatte en tidigare gång- och cykelbro tillverkad av trä som bedömts inte uppfylla nödvändiga bärighetskrav (SRM AB 2018). Den rostfria bron dimensionerades för en teknisk livslängd på 80 år (C&H 2017).



Figur 2.1 Existerande exemplar av den rostfria bron vid trafikplats Södertälje Syd

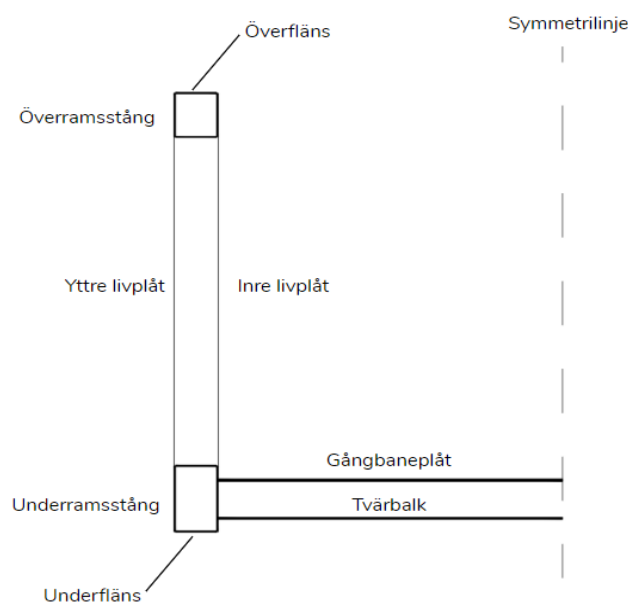
Sidorna på bron är utformade som fackverk då detta ger god stabilitet för konstruktionen samtidigt som vikten och materialåtgången hålls nere. Principen bakom en fackverksstruktur är ett antal stänger som förbinds i knutpunkter till en bärande konstruktion. Vid belastning kommer stängerna att utsättas för, i ett idealt fall, antingen rena drag- eller tryckkrafter. För den aktuella bron innebär detta att de diagonala balkarna som överför krafter mellan övre och undre ramstängerna som går i horisontalled (Moström 2013). För fackverkskonstruktioner används vanligtvis stålprofiler och inte sammansvetsade

plåtar som i fallet för denna bro. Anledningen till att man från tillverkarens sida valt detta utförande är strävan efter att uppnå en mer estetiskt tilltalande design i kombination med möjlighet till tidsbesparing i tillverkningsprocessen (Södergren 2019). Då tillskärningen av plåtarna sköts digitalt går det att utföra detta arbete med hög precision samtidigt som arbetstiden minskas. Det går även optimera materialanvändningen mer vid användning av plåtar gentemot fackverksstänger av plåtprofiler eftersom plåttjockleken kan varieras i stor grad på de olika delarna av bron, tex övre och undre flänsplåt på sidoramarna. Materialbesparing blir av stor betydelse vid arbete i rostfritt stål då kostnaden för det inköpta råmaterialet förhåller sig betydligt högre än för kolstål (Södergren 2019).

Vid tillverkning av bron skärs plåtarna först till rätt dimensioner med vatten- eller plasmaskärare och svetsas sedan samman. Bron utanför Södertälje svetsades primärt manuellt men visionen från Stål- och Rörmontage AB är att merparten av svetsarbetet kan utföras med industrirobot om framtida produktion blir aktuell (Södergren 2019). Den plåt som skurits ut ur livplåtarna för att åstadkomma de diagonala ramstängerna kan återanvändas som skoning inuti trianglarna för att utnyttja plåtarna maximalt. På den färdiga brokonstruktionen fästs skivor av hammergeglas i de triangulära ursparingarna för att sidorna på bron ska vara täckta (Södergren 2019). Ramsidorna sammanbinds med tvärbalkar utav plåtar som bockats till trapetsprofiler och på vilka gångbaneplåten sedan också vilar. Som beläggning på gångbaneplåten används en typ av akrylat (C&H, 2017). Hela tillverkningsprocessen av bron kan utföras i mekanisk verkstad vilket underlättar vid slutgiltigt montage då svetsarbete ute på byggplatsen kan undvikas. Den färdiga bron kan sedan transporteras med lastbil och lyftas på plats på fundamenten. (Södergren 2019). För principiell utformning av bron hänvisas till figur 2.2 och 2.3 nedan. Ytterligare figurer återfinns i kapitel 4.



Figur 2.2 Utformning av fackverksram för rostfri bro



Figur 2.3 Tvärsektion för rostfri bro

2.2 Jämförelsealternativ

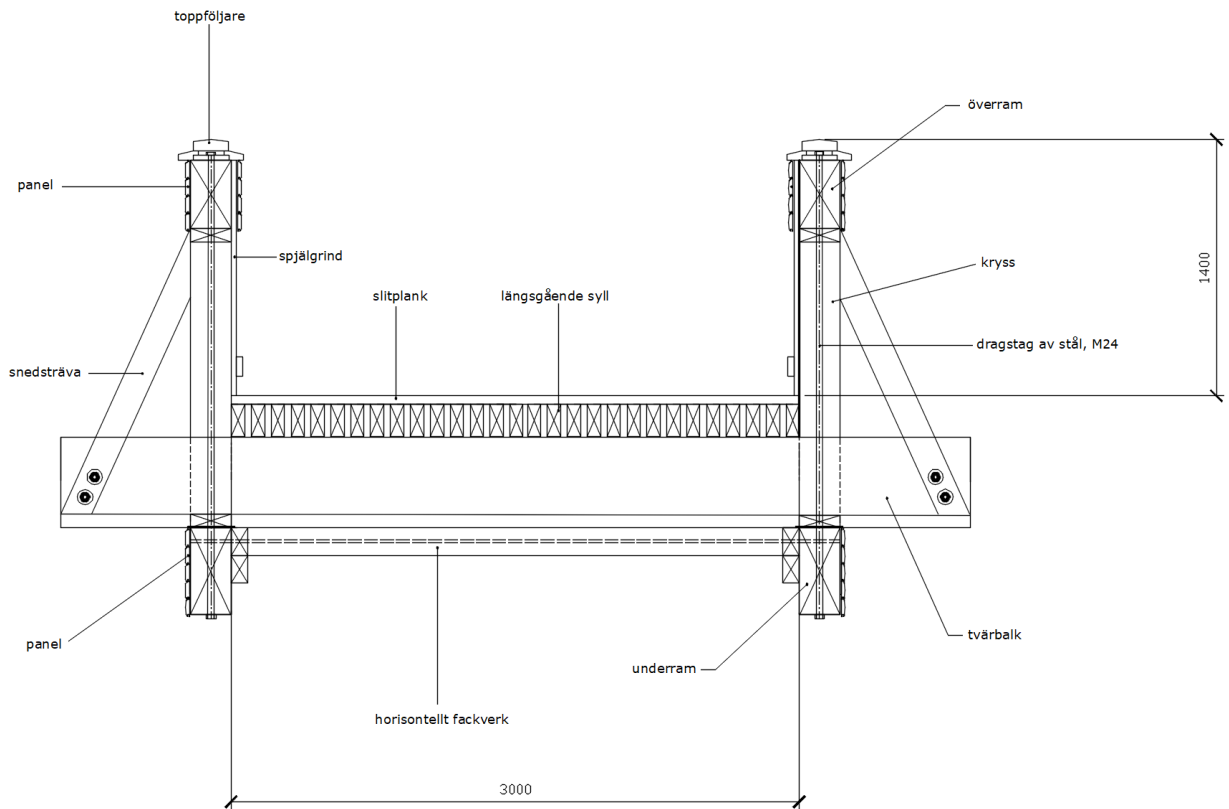
För att kunna sätta resultatet från såväl ekonomisk och miljömässig bedömning av bron i rostfritt stål i förhållande till mer konventionella materialval kommer två jämförelsealternativ att inkluderas i studien. Dessa alternativ är valda för att både produktionsmässigt och tekniskt vara lika den rostfria bron. Detta innebär att samtliga tre broar är av fackverksmodell och antas vara producerade i Sverige utav material som huvudsakligen tillverkas i Sverige eller de nordiska länderna. Samtliga tre alternativ ska uppfylla den funktionella enheten som definierats i avsnitt 1.3.

2.2.1 Bro i kolstål

Den ena alternativa utformningen utgörs av samma brotyp som den rostfria bron men tillverkad av traditionellt konstruktionsstål av kvalitet EN 10025-2, även benämnt S355J2. Stålråvaran antas till kolstålplåt från SSAB med tillverkning i finska Raabe (SSAB 2014). Med en sträckgräns på 355 MPa innebär detta att kolstålet har en lägre hållfasthetsgrad än det rostfria duplexstålet vilket kommer att beaktas i konstruktionsberäkningarna. Det är möjligt att tillverka även extra höghållfast kolstål (Tibnor 2019) men ovan nämnda stålqualität väljs för att kunna sätta den rostfria bron i jämförelse med ett typiskt konventionellt konstruktionsmaterial. För att ta fram erforderlig plåttjocklek för kolstålet och därmed materialmängd för livscykelanalysen och kostnadsanalysen kommer beräkningar med finit elementmetod som utförs för den rostfria bron även att göras för bron i kolstål. Liksom den rostfria bron har bron i kolstål infattade hammergeglasskivor i fackverksramarna och en gångbanebeläggning av akrylat. Till skillnad mot den rostfria bron kommer bron i kolstål att behöva målas om med korrosionsbeständig färg för att inte funktionen ska försämrats över tid på grund av rostangrepp. Målning av bron sker initialt i verkstad innan montage men kommer också att behöva upprepas flertalet gånger under brons livslängd för att nödvändigt korrosionsskydd ska vara intakt. Kolstålbron antas vara dimensionerad för en teknisk livslängd på 80 år.

2.2.2 Bro i trä

Den andra alternativa utformningen utgörs av en träbro som liksom de två stålbroarna är av fackverkstyp. I denna studie utförs inga konstruktionsberäkningar på träbron utan detta jämförelsealternativ antas till en färdigdimensionerad bro. Mått och materialmängder för en träbro som uppfyller den funktionella enheten baseras på en beställningsbar bro (Martinssons 2019a) från företaget Martinssons trä och som nära överensstämmer med det konstruktionsexempel på träfackverksbro (Träguiden 2007) som presenteras av branschorganisationen Svenskt Trä. Bron från Martinssons går under benämningen MGC FV 30-269. Materialmässigt är träbron tillverkad av limträbalkar samt sågat furuvirke där samtlig trävara är tryckimpregnerad. Spännstag och övriga ståldetaljer är av förzinkat kolstål (Träguiden 2007). Gångbanan utgörs av slitplank (Martinssons 2019a). Bron är målad med träolja och alkydfärg och liksom för kolstålbron kommer målning att behöva upprepas under brons livslängd som underhållsåtgärd (Martinssons 2019a). Tillverkning av bron sker i Sverige med svensk träråvara. Den teknisk livslängden för träbron är 40 år (Martinssons 2019a). För principiell utformning av tvärsnitt se figur 2.4.



Figur 2.4 Tvärsektion för träbro. Skiss efter (Träguiden 2007, Martinssons 2015)

3. Metodik

3.1 Konstruktionsberäkning

Syftet med konstruktionsberäkningarna är att analysera effekterna av olika förändringar i bronns geometri jämfört med Södertäljebro. En fullständig dimensioneringsberäkning såsom skulle krävas för uppförandet av en ny konstruktion kommer inte att utföras i denna studie. Det ligger utanför studiens omfattning att räkna på samtliga aspekter som krävs för att bestämma om tillräcklig bärförmåga är uppfyllt. Konstruktionsberäkningarna syftar i stället primärt till att undersöka brotypens möjliga förbättringsområden och begränsningar, under förutsättning av tunna plåttjocklekar och längre spännvidder eftersträvas.

3.1.1 Dimensioneringsregler

För konstruktionstekniska beräkningar med avseende på byggnader och anläggningar gäller övergripande de dimensioneringskrav som beskrivs i den europeiska standarden Eurocode (EN). Eurocode är resultatet av ett samarbete mellan medlemsländerna i EU där syftet har varit att göra den europeiska byggnadsindustrin mer harmoniserad vad gäller dimensioneringsmetoder och säkerhetskrav (Altea AB 2010). Till Eurocode följer också vissa nationella tilläggsregler samt nationsspecifika bestämmelser såsom Trafikverkets författningssamling TRVFS och publikationer för krav och råd inom brobyggnad, TK Bro och TR Bro. Dimensionering av stålkonstruktioner beskrivs i Eurocode kapitel 3 där broar behandlas specifikt i kapitel 3-2 (EN1993-2). Allmänna regler vid dimensionering av stålkonstruktioner återfinns i EN1993-1-1 med specifika regler för rostfritt stål i EN1993-1-4. Förutom dimensioneringsregler återfinns i dessa kapitel också materialparametrar såsom hållfasthetsvärden, utvidgningskoefficienter och elasticitetsmoduler beskrivna för olika stålqualiteter vilka blir relevanta för beräkningarna.

3.1.2 Laster

Vid dimensioneringsberäkning blir det i inledningsvis nödvändigt att bestämma vilka laster som kommer att verka på bron. Här gäller enligt Eurocode att partialkoefficientmetoden ska tillämpas (EN1993-1-1 2.2). Principen för partialkoefficientmetoden kan summeras med formeln nedan:

$$f_{RD} = \sum \gamma_d * \gamma_{Gj} * G_k + \gamma_d * \gamma_Q * Q_{kl} + \sum \gamma_d * \gamma_Q * \psi_{0i} * Q_{ki}$$

Den dimensionerande lasteffekten kan skrivas som summan av de permanenta lasterna G_k , den variabla huvudlasten Q_{kl} och summan av övriga variabla laster Q_{ki} . Samtliga laster, med sina karakteristiska värden, ska multipliceras med säkerhetskoefficienten för den gällande säkerhetsklassen, γ_d samt med en partialkoefficient beroende på lasttyp. De permanenta lasterna multipliceras med γ_{Gj} som varierar beroende på om lasten är gynnsam eller ogynnsam för stabiliteten eller bärförmågan. De variabla lasterna multipliceras samtliga med samma partialkoefficient γ_Q . De variabla lasterna som inte räknas till huvudlasten multipliceras dessutom med respektive lasts kombinationsfaktor ψ_{0i} för att beakta sannolikheten att de variabla lasterna inträffar samtidigt.

För att identifiera den kombination av laster som ger värst utfall, och således är dimensionerande, kan det bli nödvändigt att testa olika varianter av huvudlast respektive övriga laster om det finns flera variabla laster (Isaksson och Mårtensson 2008). Materialegenskaper som har betydelse för bärförmågan ges också värde baserat på partialkoefficientmetoden, där X_d blir det dimensionerande

värdet utifrån det karakteristiska värdet X_k , partialkoefficient γ_m och en eventuell reduktionsfaktor k (Isaksson och Mårtensson 2008) enligt nedan:

$$X_d = k * X_k / \gamma_m$$

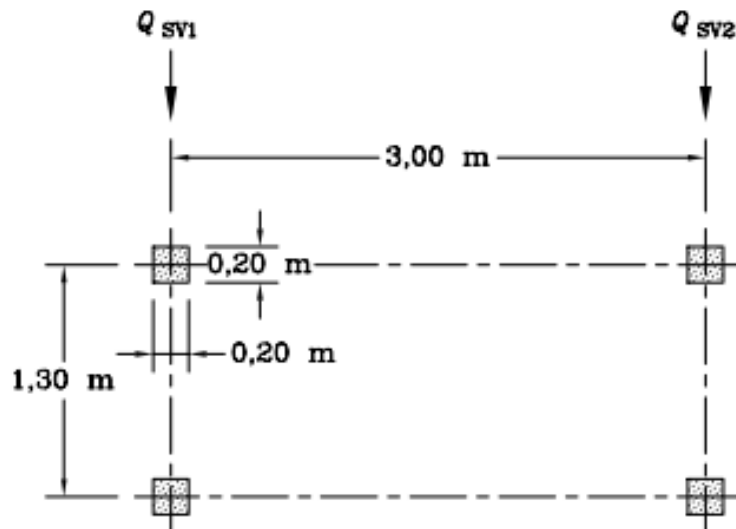
Dimensioneringen av bron i denna studie kommer att göras för fallen brottgränstillstånd och bruksgränstillstånd. Brottgränstillstånd innebär val av säkerhetsfaktorer och kombinerings av laster på ett sådant sätt att tillräckligt liten risk för brott, dvs förlorad bärförmåga, i konstruktionen kan säkerställas. Den dimensionerande bärförmågan ska vara större än den dimensionerande lasteffekten, $f_{Rd} < f_{Ed}$ (Träguiden 2003). Beräkningar i bruksgränstillstånd å andra sidan innebär säkerhetsfaktorer och lastkombinering på ett sådant sätt att tillräcklig komfort kan förutsättas vid normal användning av konstruktionen (Träguiden 2017). Dimensioneringen av bron görs i säkerhetsklass 3 vilket är klassen med högst säkerhetskrav enligt Eurocode med faktor $\gamma_d = 1,0$ på samtliga laster.

Samtliga laster som beaktas vid dimensioneringsberäkningarna för bron i denna studie presenteras i tabell 3.1.

Tabell 3.1 Beskrivning av laster

| Last | Storlek | Utbredning |
|------------------------------------|---|---|
| Egenvikt stål | 77 kN/m ³ | Vertikalt på stålkonstruktion |
| Egenvikt glaspaneler | 15 kN/m | Vertikal linjelast på överramsstång |
| Egenvikt beläggning | 0,22 kN/m ² | Vertikal ytlast på belagd yta |
| Trafik, GC-trafik | 2.0 + 120 / (30 + l) kN/m ² , där l är bronns spännvidd (EN1991-2 5.3.2.1) | Vertikal ytlast på belagd yta |
| Trafik, servicefordon | Q ₁ = 80 kN Q ₂ = 40 kN (EN1991-2 5.3.2.3) | Diskreta ytlaster motsv. hjultryck, se figur 3.1 nedan |
| Vind | F _w ≈ 2 kN/m (EN1991-1-4 8) | Horisontell linjelast centriskt på över- och underramsstång |
| Enhetslast för stabilitetskontroll | 100 kN | Punktlaster i båda överramarnas samtliga knutpunkter |

För trafiklasten placeras hjultrycken från servicefordonet diskret i steg lika med halva centrumavståndet för tvärbalkarna. Två filer används, en där fordonen står längs med bronns centrumlinje och en där fordonen står med minsta avstånd mot bronns ramsida dvs med centrum av hjultrycken 35 cm ut.



Figur 3.1 Lastbeskrivning servicefordon på gång- och cykelbro. (EN1991-2 5.6.3 fig 5.2)

Lastfallet med enhetslaster på överramen ingår inte i den ordinarie lastkombineringen utan är enbart till för att kunna jämföra utböjningen mellan olika utformningsalternativ för bron dvs analysera styvheten i kopplingen mellan tvärbalkarna och fackverksramen. 3.1.3 Modellering

Förhållningsregler vid modellering av dels stålet som material dels konstruktionen framgår av EN1993-2 som berör bärverksanalys av stålbroar med allmänna dimensioneringsregler för stålkonstruktioner i EN1993-1. En global, elastisk analys kan genomföras för konstruktionen i syfte att bestämma inre krafter och moment och om så är relevant också under beaktande av instabilitet. Vid behov görs analys enligt andra ordningens teori vilket innebär beräkningar utifrån en initialt deformerad geometri på grund av imperfektioner som uppstår vid belastning av tryck- eller skjuvkrafter (EN1993-1-1 5.2 samt 5.4). I verkligheten kan sådana imperfektioner uppstå på grund av egenspanningar samt oavsiktliga symmetri- och dimensionsavvikelse, excentriciteter, krokighet och bucklighet som härrör från tillverkningen redan innan bärverket belastas (EN1993-1-1 5.3).

Beräkningarna på bronns bärrighet kommer i detta arbete primärt att göras med hjälp av finit elementanalys med linjärelastisk modellering av materialet. Analys med hjälp av finita-elementmetoden innebär, mycket kortfattat, att strukturen modelleras i form av diskreta element som sammanbinds i nodpunkter (Ottosen och Petersson 1992). Efter introduktion av randvillkor och laster beräknas sedan resultat numeriskt, baserat på partiell integration av den konstitutiva lag som beskriver det fysikaliska sambandet för den egenskap som avses att modelleras. I detta fallet utgörs den konstitutiva lagen av Hookes lag som beskriver spännings-töjningssamband för ett linjärelastiskt material, där spänningen σ beror av materialets elasticitetsmodul E och töjningen ε enligt:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Töjningen ε är i sin tur relaterad till nodförskjutningen genom den deformation som uppstår. Beroende på hur de olika elementen i sin tur genom noderna är kopplade till varandra kan en global styvhetsmatris utformas som beskriver den kompletta strukturens mekaniska verkningsätt (Ottosen och Petersson 1992).

3.1.4 Kontroll av spänningar

Såsom tidigare beskrivet gäller att den kritiska bärförmågan för en viss egenskap inte får underskrida den dimensionerande lasteffekten (EN1993-1-1 6.2.1). I första hand kommer bron att utvärderas utifrån analys av spänningar som uppstår i konstruktionen på grund av lasterna i brott- respektive bruksgränstillstånd. Kriteriet för tillräcklig bärlighet baseras då på stålets sträckgräns f_y , även kallat flytgräns. Flytgränsen markerar den spänningsnivå där materialet plasticerar dvs där ett linjärelastiskt spännings-töjningssamband inte längre kan anses korrekt beskriva materialegenskaperna (Torstensson 2019). Överstiger spänningarna som uppstår på grund av belastning denna gräns kommer materialet inte att återfå sin ursprungliga form efter att avlastning skett, en permanent plastisk deformation uppstår. (Torstensson 2019). De två stålqualiteter som modelleras i studien har tekniska egenskaper enligt i tabell 3.2, med materialparametrar enligt EN1993-1-1 och EN1993-2.

Tabell 3.2. Materialparametrar för rostfritt duplexstål och konstruktionsstål S355J

| Kvalitet | Rostfritt duplex, 1.4462 | Kolstål, 10025-2 |
|---|--------------------------|--------------------|
| Sträckgräns, f_y | 460 MPa | 355 MPa |
| Brottgräns, f_u | 640 MPa | 510 MPa |
| Elasticitetsmodul, E_s | 200 GPa | 210 GPa |
| Termisk längdutvidgningskoefficient α_t | $13 \cdot 10^{-6}$ | $12 \cdot 10^{-6}$ |

I finita-elementanalysen kommer plasticering antas inträffa om den maximala von Mises-spänningen överskrider den definierade flytgränsen för materialet i tabell 3.2. von Mises flytkriterier är en vanligt förekommande modell för att beskriva elastiska material där spänningstillståndet flytgränsen definieras i form av förhållandet mellan normalspänningar och skjuvspänningar i en viss snittyta (SimScale 2009).

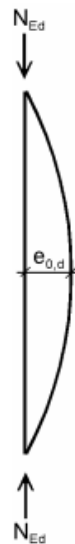
I analysen av bron accepteras ingen plasticering, dvs överskridande av flytgränsen, bruksgränstillstånd och i brottgränstillstånd endast mycket lokalt. Undantaget är dock gångbaneplåten som i brottgränstillstånd tillåts att plasticera inom större områden.

Partialkoefficient för materialegenskaper sätts till $\gamma_m = 1,1$ för dragbrott, i övrigt gäller $\gamma_m = 1,0$ enligt EN1993-2 6.1 samt TRVFS 2011:12, kap 8. Detta ger för det rostfria stålet dimensionerande värde på flytgräns: $f_{yd} = 418,2$ MPa och för kolstål $f_{yd} = 322,7$ MPa vid dragbrott.

3.1.5 Kontroll av andra ordningens effekter

Utöver kontroll av spänningstillståndet vid statisk jämvikt kommer det att undersökas vilken inverkan andra ordningens effekter har. För att utreda effekterna av geometriska imperfektioner kan en dynamisk analys att göras av finita-elementmodellen för att identifiera möjliga bucklingsmoder, dvs vilka deformationsformer geometrin kan anta (Kurowski et. al. 2011). Moderna ger enbart information om formen på den deformerade strukturen, inte om storleken av spänningar eller utböjning. Matematiskt innebär bucklingsmoderna representationer av egenvektorer till den globala styvhetsmatrisen i finita elementmodellen. De tio första bucklingsmoderna med lägst frekvens kommer i denna studie att beräknas. Successivt högre modformer innebär också högre frekvens och är således mindre sannolika varvid de också blir mindre relevanta att studera (Kurowski et. al. 2011).

Den mest ofördelaktiga bucklingsformen appliceras sedan som en initialdeformation av geometrin där den maximala deformationen kan sättas till en amplitud på $e_0 = 1/500$, se figur 3.3, för att i en rimlig grad beakta inverkan av de potentiella imperfektionerna i konstruktionen (EN1993-1-1 5.3.3). Maxamplituden utifrån normalläget och sätts i brons tvärled då deformationer ut ur planet bör vara de mest kritiska för fackverksramens stabilitet. Därefter görs finita-elementberäkningen på nytt med den dimensionerande lastkombinationen med utgångsläge i den deformerade geometrin varefter spänningarna åter analyseras i förhållande till flytkriterierna. Spänningarna jämförs i förhållande till resultatet från beräkningen enligt första ordningens teori för att se skillnaden mellan de två analyserna.

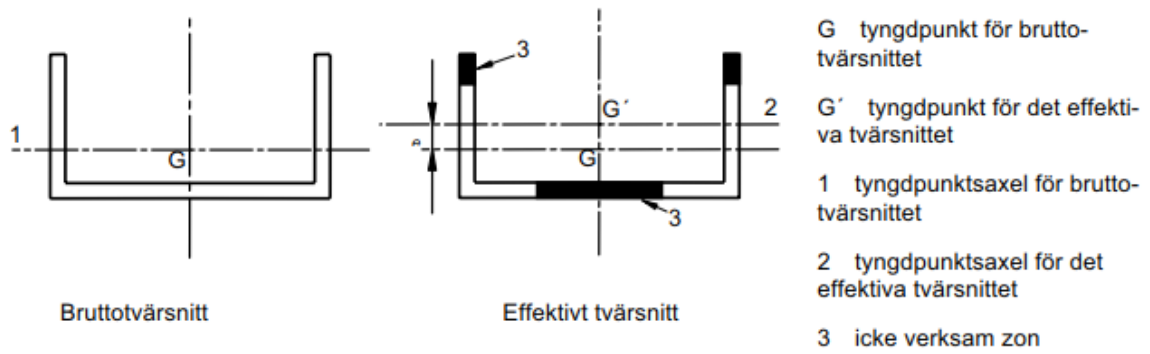


Figur 3.3 Principskiss för applicering av initialkrokighet $e_{0,d}$ för en tryckt bärverksdel (EN1993-1-1 5.3.3 fig 5.4)

För att ta reda på vid vilken belastning som knäckning kan förväntas kommer också den kritiska knäcklasten att bestämmas med bucklingsanalys. För att få fram den kritiska knäckningslasten appliceras dimensionerande lastkombination med avseende på normalspänningar i överramsstången. Den resulterande belastningen på strukturen successivt ökas med en faktor $\alpha_{cr,op}$ till dess att instabilitet uppstår. Denna lastökningsfaktor innebär den ökning av laster som verkar i planet som krävs för att konstruktionen ska uppnå den kritiska bärförmågan, i det mest kritiska tvärsnittet, med hänsyn till deformation ut ur planet. Lastökningsfaktorn motsvarar matematiskt det första positiva egenvärdet som uppstår, som i sin tur korresponderar till en egenvektor som beskriver bucklingsmoden (Kurowski et. al. 2011).

3.1.6 Kontroll av tvärsnittsklass

Vid bedömning av bärförmågan kommer eventuell buckling av de enskilda plåtarna som tvärsnittet byggs upp av att behöva beaktas för bron (EN1993-1-5 2). Buckling är ett instabilitetsfenomen på grund av tryckkrafter eller skjuvkrafter som uppstår specifikt för tunna plattor och skal (Pettersson 1974). Denna deformation av plåtarna leder beräkningsmässigt till att hela tvärsnittsarean inte kan tillgodoräknas för bärförmågan (EN1993-1-5 4.3). Den bucklade delen av plåten sätts som en icke-verksam zon se figur 3.5.



Figur 3.5 Effektivt tvärsnitt i jämförelse med ursprungligt bruttotvärsnitt med illustration av de icke-verksamma zonernas placering (EN1991-1-5 fig 4.1)

Tvärsnittsreducering på grund av plåtarnas buckling täcks dock inte in i finita-elementberäkningen. För att avgöra risken för buckling delas tryckta tvärsnittsdelar in i fyra olika klasser där gränsindelningen för rostfritt stål framgår av tabellen i figur 3.6 nedan från EN1993-1-4 5.2.

Tabell 5.2 (blad 1 av 3) – Största bredd-tjockleksförhållande för tryckta tvärsnittsdelar

| Inre tryckta delar | | | | |
|--|------------------------------------|----------------------------------|--|--------|
| | | | | |
| | | | | |
| Klass | Tvärsnittsdela påverkad av böjning | Tvärsnittsdela påverkad av tryck | Tvärsnittsdela påverkad av böjning och tryck | |
| Spänningsfördelning i tvärsnittsdelarna (tryck positivt) | | | | |
| 1 | $c/t \leq 56,0\varepsilon$ | $c/t \leq 25,7\varepsilon$ | $om \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{308\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $om \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{28\varepsilon}{\alpha}$ | |
| 2 | $c/t \leq 58,2\varepsilon$ | $c/t \leq 26,7\varepsilon$ | $om \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{320\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $om \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{29,1\varepsilon}{\alpha}$ | |
| Spänningsfördelning i tvärsnittsdelarna (tryck positivt) | | | | |
| 3 | $c/t \leq 74,8\varepsilon$ | $c/t \leq 30,7\varepsilon$ | $c/t \leq 15,3\varepsilon \sqrt{k_\sigma}$ Beträffande k_σ , se EN 1993-1-5 | |
| $\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$ | Stålsort | 1.4301 | 1.4401 | 1.4462 |
| | f_y (MPa) | 210 | 220 | 460 |
| | ε | 1,03 | 1,01 | 0,698 |
| ANM. För rörprofiler får c på säkra sidan sättas lika med (h-2t) eller (b-2t). | | | | |

Figur 3.6 Tabell över kriterier för bestämning av tvärsnittsklass för tvärsnittsdelar i rostfritt stål (EN1993-1-4 5.2 tabell 5.2)

Som visas i figur 3.6 beror aktuell klass av förhållandet mellan tjocklek och längd på de ingående tvärsnittsdelarna. För sammansatta tvärsnitt, vilket är fallet för brons ramstänger som är uppbyggda utav sammansvetsade plåtar, gäller för hela tvärsnittet den högsta klassen för någon av de ingående delarna (EN1993-1-5 5.2.1). Om det visas sig att ett tvärsnitt faller inom klass 4 dvs inte uppfyller villkoren för klass 3, måste tvärsnittets area reduceras till den effektiva arean A_{eff} för varje tryckt tvärsnittsdela, i detta fallet var och en av plåtarna i tvärsnittet. Med tvärsnittsreduceringen följer att det område för varje plåt som förväntas buckla och inte bidra till tvärsnittets bärförmåga och styvhet försummas. Den effektiva arean måste därefter beaktas i beräkningar för bärförmågeegenskaper. Tvärsnittsparametrar såsom yttröghetsmoment och böjmotstånd behöver exempelvis justeras med hänsyn till med den reducerade tvärsnittsarean eftersom styvheten minskar. Tillhör tvärsnittet klass 4

innebär detta att plåtarna kommer att buckla innan materialets fulla elastiska kapacitet är uppnådd, dvs buckling blir den begränsande bärförmågeegenskapen i stället för materialets flytgräns.

3.1.6 Komfortkrav

I bruksgränstillstånd sätts kriteriet för bron att ingen plasticering får förekomma i någon utsträckning, varken för fackverksramen eller gångbanepålan. För stålbroar blir det även relevant att beakta dynamiska effekter såsom egenfrekvens vilket inverkar på brons komfort (EN1993-2 7.1). Gränsvärde för egenvängningsfrekvens är 2,5 Hz enligt praxis (SETRA 2006). Frekvensen beräknas enligt:

$$f = \pi/2 * \sqrt{(EI/ml^4)}$$

där E är elasticitetsmodul, I är yttröghetsmomentet, l är spännvidden och m är konstruktionens egenvikt inklusive en trafiklast på en person per 2 m^2 med en genomsnittlig vikt på 70 kg.

Yttröghetsmomentet I avser brons tvärsnitt och beräknas med hjälp av Steiners sats.

Yttröghetsmomentet för ett sammansatt tvärsnitt kring dess tyngdpunkt ges av summan av alla deltvärsnittets yttröghetsmoment kring dess egna tyngdpunkt (Isaksson och Mårtensson 2017).

Yttröghetsmomentet I_y runt vridningsaxeln y för ett rektangulärt tvärsnitt, vilket därmed applicerbart på alla ingående plåtar, ges av

$$I_y = b * h^3 / 12$$

För det sammansatta tvärsnittet blir yttröghetsmomentet I_y :

$$I_y = \Sigma(I_{yi} + A_i * e_i^2)$$

där I_{yi} är yttröghetsmomentet för deltvärsnittet i vars area är A_i och e_i är avståndet mellan delarens tyngdpunkt och hela tvärsnittets tyngdpunkt (Isaksson och Mårtensson 2017). På grund av tvärsnittets symmetri görs beräkningarna per brohalva dvs över- och underramstång för den ena fackverksramen samt 1 m av gångbanepålan. Deltvärsnittet utgörs av de plåtar som bygger upp överramens och underramens tvärsnitt, samt gångbanepålan. Då enbart halva tvärsnittets yttröghetsmoment beräknas gäller massa och laster därmed också för en brohalva.

Ytterligare en parameter att beakta vid dimensionering i bruksgränstillstånd är nedböjning dvs vertikala deformationer (EN1993-2-7 7.1). Detta kontrolleras för karakteristisk lastkombination dvs egentygnd av stål, beläggning och glasskivor samt det frekventa värdet på utbredd trafiklast för att bedöma deformationerna i vertikalled som kan uppstå vid normal användning. Nedböjningen ska enligt TK Bro 11 B.3.4.2.2 begränsas till under $l/400$ där l är brons spännvidd. Således får summan av nedböjningen vid ovan nämnda lastkombination inte överskrida detta värde.

3.1.7 Kontroll av knutpunkternas styvhet

Styvheten i infästningen mellan tvärbalk och underram undersöks också i beräkningarna. För att utformningsmässigt minska risken för knäckning av brons överram, dvs utböjning ut ur vertikalplanet, är en styv infästning mellan tvärbalkar och fackverksram vital (C&H 2017). Knutpunkterna där tvärbalken svetsas mot underramsstången måste således dimensioneras med tillräcklig hög styvhet. För att undersöka detta appliceras punktlaster på 100 kN centriskt i varje knutpunkt mellan överramsstången och diagonalerna, på båda fackverkssidorna. Den maximala utböjningen kontrolleras

sedan och jämförs mellan de olika broutformningsalternativen för att få den relativa förändringen i styvhet beroende på knutpunktsutformning mellan tvärbalk och underramsstång.

3.2 Livscykelanalys

3.2.1 LCA enligt ISO 14 044

För att bedöma miljöpåverkan för den rostfria bron och de två jämförelsealternativen i kolstål och trä kommer metoden livscykelanalys att tillämpas. Livscykelanalys, förkortat LCA, är en arbetsmetodik som beskrivs i ISO 14 040 och ISO 14 044 vars syfte är att på ett standardiserat sätt beräkna och analysera miljöpåverkan från en produkt eller tjänst. Omfattningen är i det ideala fallet vad som brukar benämnas som "från vagg till grav" vilket innebär identifiering av relevanta miljöaspekter under samtliga faser i livscykeln, från anskaffning av råvarumaterial till produktion, användning och slutgiltig kvittblivning. Livscykelanalys inkluderar principiellt enbart den miljömässiga bedömningen av studieobjektet, ekonomiska eller sociala aspekter beaktas ej (ISO 14040:2006).

En livscykelanalys utgörs enligt standarden av fyra huvuddelar vilka är följande:

- Mål och omfattning
- Inventering
- Miljöpåverkansbedömning
- Tolkning

Under den första rubriken ska gränserna för det studerade systemet definieras och alla förutsättningar för studien redogöras för (ISO 14040:2006). Först och främst ska det studerade produktsystemet förklaras och de olika enhetsprocesserna redogöras för. Enhetsprocesser är på varandra följande aktiviteter i en produkts livscykel som omformar inflöden till utflöden, vilket kan vara såväl material som energi eller andra produkter. Avgränsningen i storlek på flöden för att de inte längre är relevanta att inkludera i studien benämns vanligtvis cut-off-kriterier. I de fall som rest- eller biprodukter uppstår kan antingen allokering eller systemutvidgning göras. Allokering innebär att en del av miljöbelastningen hänförs till en annan produkt som uppkommer i produktsystemet än huvudprodukten för att göra en mer rättvis fördelning. Uppdelningen kan göras baserat på flera grunder såsom massa, ekonomiskt värde eller miljömässig relevans i förhållande till huvudprodukten. Att föredra framför allokering är dock att göra systemutvidgning, vilket innebär att den uppkomna rest- eller biprodukten antas ersätta en produkt i ett annat produktsystem som inte naturligt faller innanför studiens systemgränser. Det egna systemet kan då krediteras motsvarande den miljöpåverkan som kan hänföras till ersatta produktens livscykel. Denna metod förutsätter dock att ersättningsproduktens livscykel är tillräckligt noga studerat för att uppfylla samma krav på datakvalitet och antaganden som det primära systemet. I mål och omfattning ska också framgå vad som är den funktionella enheten. Funktionell enhet är en mätbar egenskap hos den studerade produkten som tydligt relaterar till dess funktion och som används som referensenhet i studien till vilka de olika flödena kopplas. Det ska också redovisas vilka datakvalitetskrav som ställs på datan såsom tidsmässig-, teknisk- och geografisk täckning, fullständighet och överensstämmelse. Inför miljöpåverkansbedömningen ska de miljöpåverkans kategorier som avses att inkluderas framgå samt vilken metod som ska användas för att räkna om in- och utflöden till belastning för dessa kategorier, så kallad LCIA-metod (ISO 14040:2006).

Andra stadiet av en livscykelanalys utgörs av livscykelinventering, LCI (ISO 14040:2006). Denna fas åsyftar insamling av data enligt de krav som angivits i mål och omfattning. In- och utflöden av energi,

massa och produkter ska kvantifieras till varje enhetsprocess. Allokeringmetoder och relevanta systemutvidgningar som definierats tidigare tillämpas också i detta steg. Att genomföra en livscykelanalys är av sin natur en iterativ process. Detta innebär att i takt med att data samlas in i inventeringsfasen kan det komma att bli nödvändigt att justera det som angivits i mål och omfattning kring exempelvis vilka enhetsprocesser som inkluderas och hur de avgränsas, vilka cut-offkriterier som ska tillämpas och hur datakrav ska formuleras. Då huvudsyftet med att genomföra en livscykelanalys ofta är att kartlägga ett produktsystem är det i början av arbetsprocessen inte nödvändigtvis känt hur dessa förutsättningar kan och bör definieras. Vilken data som är nödvändig att inkludera kan med fördel undersökas med hjälp av känslighetsanalys för att bestämma dess inverkan på resultatet. Som sista steg i inventeringsfasen ska all data som inhämtats och som anses vara av relevans att ta vidare i studien räknas om till den funktionella enheten för att skapa ett så kallat referensflöde genom alla enhetsprocesser för produktens livscykel (ISO 14040:2006).

Efter avslutad inventering följer miljöpåverkansbedömning, LCIA (Life Cycle Impact Assessment) (ISO 14040:2006). Här beräknas miljöbelastningen för produktsystemet med hänsyn till de miljöpåverkanskategorier som valts tidigare, dvs den funktionella enhetens LCIA-profil tas fram. En miljöpåverkanskategori definieras som ett miljöproblem dit resultat från inventeringsanalysen kan hänföras baserat på vedertagna vetenskapliga modeller. Till varje miljöpåverkanskategori hör också kategoriutpunkter som är egenskaper hos naturmiljö, hälsa eller resurs som identifierats som en angelägen miljöfråga. Den kvantifierbara enheten för en miljöpåverkanskategori benämns kategoriindikator, exempelvis CO₂-ekvivalenter för klimatförändring. De två huvudstegen i miljöpåverkansbedömningen kallas klassificering och karakterisering. Klassificering innebär att inventeringsresultatet dvs de olika in- och utflödena i produktsystemet tilldelas till en eller flera miljöpåverkanskategorier. Därefter räknas för varje miljöpåverkanskategori inventeringsresultatet om till respektive kategoriindikator genom multiplikation med faktorer enligt karakteriseringsmodellen. Klassificeringen och karakteriseringen resulterar i indikatorresultat dvs mätbara representationer för samtliga miljöpåverkanskategorier och på så sätt en beräkning av den funktionella enhetens inverkan på de senare (ISO 14040:2006).

Det sista steget i livscykelanalysen är tolkningen (ISO 14040:2006). I detta skede ska de mest betydande resultaten utifrån inventering och miljöpåverkansbedömning identifieras, datans fullständighet, känslighet och överensstämmelse verifieras och slutsatser, begränsningar och rekommendationer tas fram. Analys av resultat kan exempelvis resultera i identifiering av de enhetsprocesser eller faser under livscykeln som bidrar mest till miljöpåverkan, så kallade hot-spots. Slutsatser och rekommendationer ska vara rimliga och kunna förankras i det framtagna resultatet. Generellt gäller att tolkningsfasen ska vara en kritisk granskning av den metodik som använts under studiens genomförande exempelvis hur allokeringmetoder och cut-offkriterier definierats och tillämpats samt om datakvalitetskraven följts (ISO 14040:2006).

3.2.2 Studiespecifik indelning av processer

Vid livscykelanalys av de tre broarna i denna studie kommer resultatet att vara uppdelat i fem övergripande faser som omfattar de olika enhetsprocesserna som inventeringsdata insamlas för. Dessa är materialtillverkning, konstruktionsfas, underhåll, rivning samt återvinning. De två sistnämnda livscykelfaserna går också tillsammans under benämningen end-of-life-stadiet, dvs processer som inträffar efter den studerade produktens livslängd. Avfallshantering som sker i anknytning till underhållsfasen kommer dock att räknas till denna även om enhetsprocesserna är desamma som vid rivnings- och återvinningsfaserna. Miljöpåverkan för transporter som sker under hela livscykeln

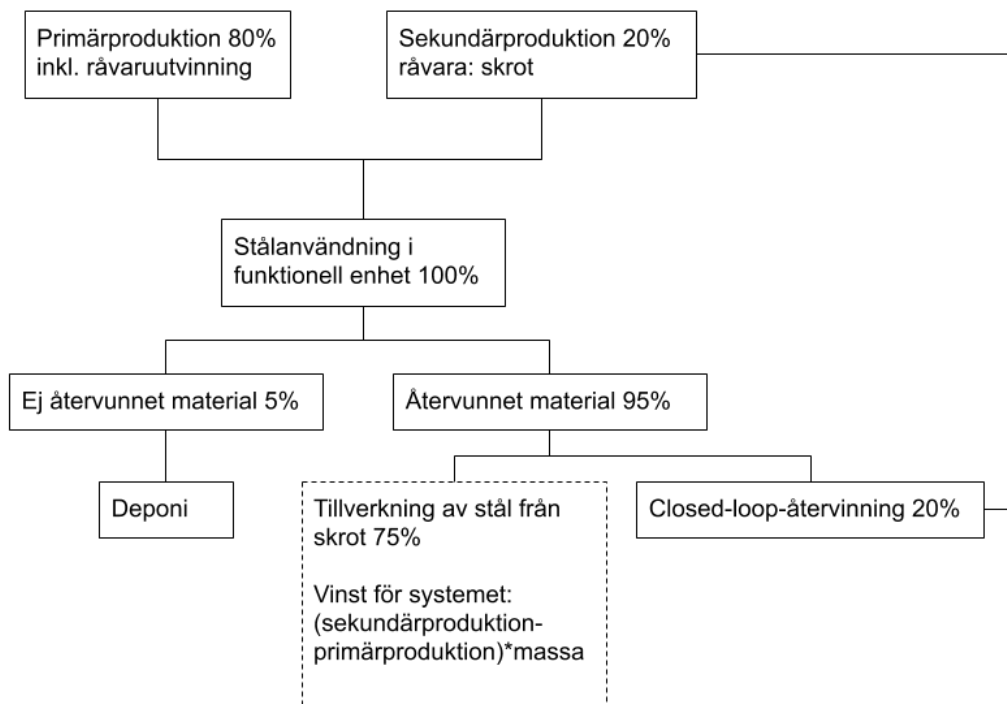
kommer att beräknas som en separat kategori, bortsett interna transporter i materialtillverkningsfasen som är inkluderade i denna. Träbron har bara halva tekniska livslängden jämfört med de två stålbroarna, 40 år i förhållande till 80 år som också är den tidsmässiga omfattningen för livscykelanalysen. Med hänsyn till detta kommer träbron att bytas ut fullständigt en gång under livscykeln för att uppfylla den funktionella enheten. För att beakta detta multipliceras LCA-resultatet för träbron samtliga livscykelfaser med en faktor 2. Produktion av ersättningsbron räknas således inte som en underhållsåtgärd i den grad att det inkluderas i underhållsfasen.

3.2.3 Beräkningsmetod för återvinning av material

På grund av broarnas långa livslängd som också anknyter till den funktionella enheten är det till viss del osäkert exakt vilka händelser som kommer att inträffa under broarnas respektive livscykler. Exempel på detta kan vara med vilket intervall olika underhållsåtgärder genomförs och hur avfallshantering och vidare bearbetning av avfallet genomförs. Här får rimliga antaganden göras baserat på rekommendationer och tidigare erfarenhet från tillverkare och vad som anges i andra tidigare genomförda livscykelanalyser inom området. Med hänsyn till end-of-life-stadiet i fråga om återvinning har systemutvidgning valts som metod för att beakta vinster som systemet kan tillgodoräknas i form av återvinning av material utanför systemgränserna. Detta innebär att återstoden av materialet från de rivna broarna kan komma till användning i andra produktsystem och då ersätta nyproducerat material (World Steel Association 2017). Beräkningsgången blir för varje uppmätt flöde av återvunnet material som följande:

$$\text{Kreditering} = (\text{belastning sekundärproduktion [kg]} - \text{belastning primärproduktion [kg]}) * \text{nettoutflöde avfall [kg]}$$

Innebär produktion av stål från skrot mindre miljöbelastning än primärproduktion kommer således detta att ge upphov till negativa värden för återvinningsfasen. Beräkningsprincipen är baserad på rekommendation från World Steel Association, global branschorganisation för stålproducenter, för hur inflöde av skrot i produktionen samt återvinning bör inkluderas i livscykelanalys. Med den beskrivna metodiken krediteras systemet den undvikta miljöpåverkan från den primära råvaruutvinningen och produktionen samtidigt som påverkan från den sekundära produktionsprocessen, exempelvis tillverkning av konstruktionsstål från skrot, tas i beaktning. Här antas processdata från i dagsläget tillgänglig teknik även om återvinningen inte inträffar förrän i slutet av livslängden. Flertalet av de nyttjade materialen för broarna har också redan en andel återvunnet material redan i inflödet. För att ta hänsyn till detta antas denna återvinning ske innanför systemgränserna, dvs att avfall i motsvarande andel som det ingående återvunna materialet leds tillbaka till tillverkningsfasen. Denna closed-loopåtervinning gör att systemet kan belastas för en mindre mängd råvaror och primärproducerat material men gör samtidigt att denna mängd avfall inte kan räknas med i systemutvidgningen eftersom inget materialflöde lämnar systemet (World Steel Association 2017). En schematisk skiss över beräkningsprincipen för återvinning i och utanför det egna systemet visas i figur 3.8 med återvinningsgrader för kolstålet i LCA-studien som exempel. Alla procentangivelser i figuren utgår från att 100% motsvarar mängden material som behövs för tillverkning av en funktionell enhet. Metodiken kommer att diskuteras i tolkningen av livscykelanalysen.



Figur 3.8 Flödesschema för beaktning av materialåtervinning innanför och utanför systemgränser (streckad linje). Beräkningsprincip enligt World Steel Association.

3.3 Kostnadsanalys

3.3.1 Ekonomisk beräkningsmetodik

För att utvärdera den rostfria bron ur ett ekonomiskt perspektiv kommer en livscykelkostnadsanalys att utföras. Detta innebär att alla de intäkter och kostnader som kan förknippas med en studerat objekt tex en produkt, tjänst eller åtgärd under dess livslängd identifieras (Folkbro 2019). Syftet är att därigenom få en uppskattning om dels hur stor totalkostnaden kommer att bli sett till hela livslängden dels hur de olika ekonomiska händelserna fördelar sig i tid. Ett exempel då livscykelkostnadsanalys kan vara användbart är inför val mellan olika investeringsalternativ (Ronnebrant 1999). Beslut kan därmed tas inte bara baserat på investeringskostnaden utan även på de framtida kostnader som kan uppstå exempelvis relaterat till underhåll, drift och reparation. Genom att ha kännedom om de ekonomiska konsekvenser det val som görs nu får längre fram i tiden finns möjligheter till kostnadsoptimering både på kortare och längre sikt (Ronnebrant 1999). Beaktas kostnader över hela livslängden är det mycket väl möjligt att ett utredningsalternativ som medför en större investeringskostnad än ett jämförelsealternativ faller ut bättre i ett livscykelperspektiv om det senare är förknippat med höga driftskostnader. Det är också möjligt att använda sig av livscykelkostnadsanalys för redan existerande objekt som ett sätt att bedöma dess framtida lönsamhet dvs beräkna om framtida intäkter och nyttor kommer att överstiga kostnaderna. Detta kan ligga till grund för beslut huruvida underhållsåtgärder är ekonomiskt försvarbara eller om en nyinvestering bör göras och i sådana fall när detta är mest lämpligt (Ronnebrant 1999).

I denna studie kommer livscykelkostnadsanalysen att utföras som en samhällsekonomisk analys. Detta innebär således att även kostnader som anses "betalas av samhällsmedborgarna" inkluderas i den ekonomiska kalkylen. Sådana kostnader kan inte direkt krediteras till en enskild betalningsansvarig men inkluderas i en samhällsekonomisk kostnadsanalys (Bångman 2012). Inledningsvis kommer enbart kostnaderna specifikt förknippade med de tre studerade brouformningsalternativen att inkluderas i den ekonomiska beräkningen. Med detta avses de initiala material- och produktionskostnaderna, kostnader för montage, för underhåll och för rivning. För att sedan göra en utvidgad samhällsekonomisk analys kommer därefter, i kapitel 7, även andra kostnader att inkluderas. Härtill räknas för infrastrukturprojekt dels trafikantkostnader såsom förseningskostnader och förlorade skatte- och företagsintäkter relaterat till detta dels samhälleliga kostnader i form av försämrad miljö på grund av buller, förorenande utsläpp etc samt olyckor (Bångman 2012).

Trafikverkets rekommendationer för samhällsekonomiska analyser beskrivs i publikationen ASEK 6.1 (Analysmetoder och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn). I denna studie har enbart delar i ASEK 6.1 som anses vara relevanta såsom värdering av miljö- och klimateffekter och trafikomledningskostnader inkluderats och inte exempelvis samhällsekonomiska intäkter på grund av förändrat trafikbeteende. Det senare hade dock varit relevant att göra vid analys av bron som en del av en ny trafikled. Då hade exempelvis intäkter på grund av ökad cykel- och gångtrafik såsom minskade resekostnader samt eventuell ökad trafiksäkerhet kunnat inkluderas i den samhällsekonomiska analysen. I denna studie kommer enbart kostnader och inte intäkter att beaktas, bortsett eventuellt restvärde hos kvarvarande material efter rivning av broarna. Intäkter i övrigt såsom beskrivet ovan bör vara samma oavsett vilken typ av konstruktionsmaterial som väljs för gång- och cykelbron och således inte tillföra något till den jämförande analysen.

I samhällsekonomiska analyser beaktas alla ekonomiska händelser utifrån dess reala värde dvs inflation och prisförändringar som inte är kopplade till denna allmänna prisutveckling ska räknas bort (Trafikverket 2018). Detta görs genom omräkning till ett gemensamt prisbasår som i denna studien sätts till år 2019. Omräkningen med hänsyn till inflation baseras på ett inflationsindex som uttrycker den relativa förändringen i valutans värde mellan två tidpunkter (Trafikverket 2018). Multipliceras prisuppgiften från ett visst år för en produkt med det inflationsindex som gäller mellan detta år och prisbasåret kommer resultatet att bli produktens reala pris, uttryckt i basårets penningvärde. Samtliga kostnader och intäkter måste i en samhällsekonomisk analys vara uttryckta i det gemensamma prisbasårets penningvärde för att vara jämförbara (Trafikverket 2018). I denna studie används konsumentprisindex KPI som inflationsindex vid omräkning till realt pris. Ingen förändring av reala priser under kalkylperioden inkluderas.

För att beakta att det finns en osäkerhet i framtida ekonomiska händelsers värde, liksom en osäkerhet om och när de faktiskt inträffar, bör räntesatser införas i kalkylen som kompenserar för detta. Trafikverket förespråkar en samhällsekonomisk kalkylränta på 3,5% (Trafikverket 2018)).

3.3.2 Nuvärdesmetoden

I denna studie kommer nuvärdesmetoden att tillämpas för den samhällsekonomiska analysen då detta är den ekonomiska beräkningsmetod som föreskrivs i ASEK 6.1. Nuvärdesmetoden är lämplig när kassaflöden som sträcker sig långt fram i tiden ska värderas varför den passar bra för livscykelkostnadsanalys av produkter med lång livslängd (Salemyr 2018), såsom broar. Principen bakom metoden bygger på att samtliga ekonomiska händelser som inträffar under den ekonomiska kalkylperioden räknas om till motsvarande värde vid tidpunkten för grundinvesteringen, basåret, med

hjälp av en vald räntesats (Trafikverket 2018). Detta kallas för att de framtida kostnader och intäkterna diskonteras, räntesatsen benämns vanligen diskonteringsränta eller kalkylränta. Värdet som blir efter diskontering kallas nuvärde, dvs så mycket som den framtida händelsen värderas till i dagsläget vid kalkylperiodens basår (Trafikverket 2018). Nuvärdet NV för en enskild kostnad eller intäkt beräknas enligt formeln nedan:

$$NV = B/(1+r)^n$$

där B är en intäkt eller kostnad som inträffar år n med en diskonteringsränta på r %. Kvoten $1/(1+r)^n$ kallas diskonteringsfaktor (Trafikverket 2018). Nuvärdesmetoden beaktar således inte bara att framtida händelser inträffar utan också när i tiden detta sker, vilket påverkar nuvärdet genom räntesatsen (Salemyr 2018). Beräkningsmetoden gör att händelser som inträffar framåt i tiden får ett lägre värde än vad värdet vid basåret är (Trafikverket 2018). Ju mer framtida en händelse är desto lägre kommer den att värderas i kalkylen och ju högre diskonteringsränta desto snabbare sker denna årliga nedräkning. Införandet av räntan ska dels motsvara real prisförändring på grund av allmän inflation, vilket kan relateras till den uppskattade årliga tillväxten i konsumtion per capita, dels ta hänsyn till osäkerheter i bedömningen av framtida händelser. Anledningen till det senare är att kostnader både på individ- och samhällsnivå tenderar att värderas högre om de är mer närstående i tid då säkerheten för att de inträffar, med det antagna värdet, också är högre (Trafikverket 2018).

Även händelser som inträffar före kalkylperiodens start kan inkluderas med nuvärdesmetoden genom motsvarande framräkning, så kallad kapitalisering (Trafikverket 2018). Detta blir aktuellt för exempelvis projekterings- och tillverkningskostnader när byggtiden sträcker sig över flera år. Då starten av kalkylperioden sätts till trafiköppningsdatumet för bron dvs när den börjar generera en nytta beräknas nuvärdet av de redan inträffade händelserna upp med hjälp av kalkylräntan. Detta gör att samtliga ekonomiska händelser, både framtida och de som redan inträffat värderas vid samma tidpunkt vilket således gör att deras värde kan jämföras. Efter att alla framtida ekonomiska händelser har diskonterats till sitt nuvärde och eventuella kapitaliseringar gjorts för investeringskostnaden kan nettonuvärdet bestämmas. Nettonuvärdet NNV är summan av alla nuvärden plus investeringskostnaden (Trafikverket 2018). Då enbart kostnader beaktas i denna analys kommer de olika broalternativen rangordnas där det mest ekonomiskt fördelaktiga alternativet är det med lägst nettonuvärde, där kostnader har positivt tecken och intäkter negativa.

Med kalkylperiod menas det tidsspänn som kostnader och intäkter för studieobjektet beaktas (Trafikverket 2018). Denna tidsperiod sammanfaller ofta, men inte alltid med den ekonomiska livslängden vilket är den period som objektet förväntas generera nytta dvs anses ha ett ekonomiskt värde. Om den ekonomiska livslängden är längre än kalkylperioden beaktas detta i modellen som att objektet har ett restvärde vid kalkylperiodens slut som diskonteras till nuvärde på samma sätt som övriga ekonomiska händelser räknat från sista året av kalkylperioden (Trafikverket 2018). I ASEK 6.1 rekommenderas att den ekonomiska livslängden sätts till 60 år och kalkylperioden till 40 år för broar. Detta kommer dock inte att följas i denna studie utan både ekonomisk livslängd och kalkylperiod kommer att sättas till 80 år för att överensstämja med den funktionella enheten i livscykelanalysen som grundas i den tekniska livslängd som broarna är dimensionerade för. ASEK:s rekommenderade kalkylränta på 3,5% att användas i studien men också en ränta på 0% vilket innebär att nettonuvärdet överensstämmer med samtliga kostnader som ackumuleras under livslängden, utan någon nedräkning på grund av kalkylränta. Detta inses genom att studera diskonteringsfaktorn $1/(1+r)^n$ som blir lika med 1 då kalkylräntan r sätts till 0%.

4. Konstruktionsberäkningar

4.1 Syfte och förutsättningar

4.1.1 Analyserade parametrar

Konstruktionsberäkningarna görs med avsikt att utreda effekten av förändrad spännvidd, fri bredd och höjd på fackverksramen jämfört med måtten för Södertäljebro utan att öka plåttjockleken över 6 mm. Södertäljebro hade en spännvidd på 24,5 m och fri bredd 3,0 m. Gångbanelplåtens tjocklek är 10 mm. Effekterna av olika varianter av detaljutformning av knutpunkterna i fackverket kommer också att undersökas. Kortare spännvidder än 20 m kontrolleras inte då detta inte bör ge upphov till kritiska spänningsnivåer trots tunna plåtar. Basfallet är 26,1 m då detta är vad som definieras i livscykelanalysens funktionella enhet och överensstämmer med den träbro som utgör jämförelsealternativ i kostnads- och livscykelanalysen. I beräkningarna förändras spännvidden i steg om 2,6 m per fackverksenhet. Olika alternativ vad gäller spännvidd har enbart förändrat antal fackverksenheter, längden av dessa är densamma. Gällande höjd på sidoramen är begränsande mått 1,4 m från ovansida beläggning till överkant ram enligt gällande regelverk. Södertäljebro var dimensionerad med 2 m höga fackverksramar vilket dock medförde att överramsstågen låg i höjd med siktlinjen för gångtrafikanter vilket bör undvikas om möjligt. Varierande höjd på fackverksramarna liksom introduktion av excentricitet i knutpunkterna innebär att de diagonala ramstängerna får något olika lutning. Lutningen mot de horisontella ramstängerna är dock för samtliga fall mellan 35° och 40°.

Sammanfattningsvis kommer dimensionerna på bron att varieras enligt nedan:

- Spännvidd, mellan ca 20-30 m
- Fri bredd, mellan ca 2,5-3,5 m
- Höjd på fackverksramen, överkant minst 1,4 m ovan beläggning

Den detaljutformning som kommer att undersökas avser dels knutpunkterna där de diagonala ramstängerna ansluter mot de horisontella undre ramstången dels infästningen av tvärbalkarna mot den inre livplåten. För bron som uppfördes utanför Södertälje visade dimensioneringsberäkningarna på vekhet i det senare fallet (C&H 2017). För att öka styvheten kan antingen livplåtarna ökas i tjocklek, vilket dock bör undvikas ur materialåtgångssynpunkt, eller knutpunkterna utformas med högre styvhet. För Södertäljebro valdes det senare, med påsvetsning av invändiga avstyvningsplåtar. Då denna lösning innebär oönskade svetsar ur ett estetiskt perspektiv är målsättningen att hitta en möjlig utformning av knutpunkterna där synliga avstyvningar undviks. För att kontrollera styvheten jämförs utböjningen vid enhetslastfallet med punktlast längs överramsstången för de olika alternativen.

Det som undersöks med avseende på utformning av knutpunkter är:

- Nivån på den undre flänsen på fackverksramarna i förhållande till tvärbalkarnas underkant.
- Förstyvande plåt i knutpunkter, enbart svets mot inre plåt.
- Excentricitet på systemlinjernas koppling i knutpunkterna.

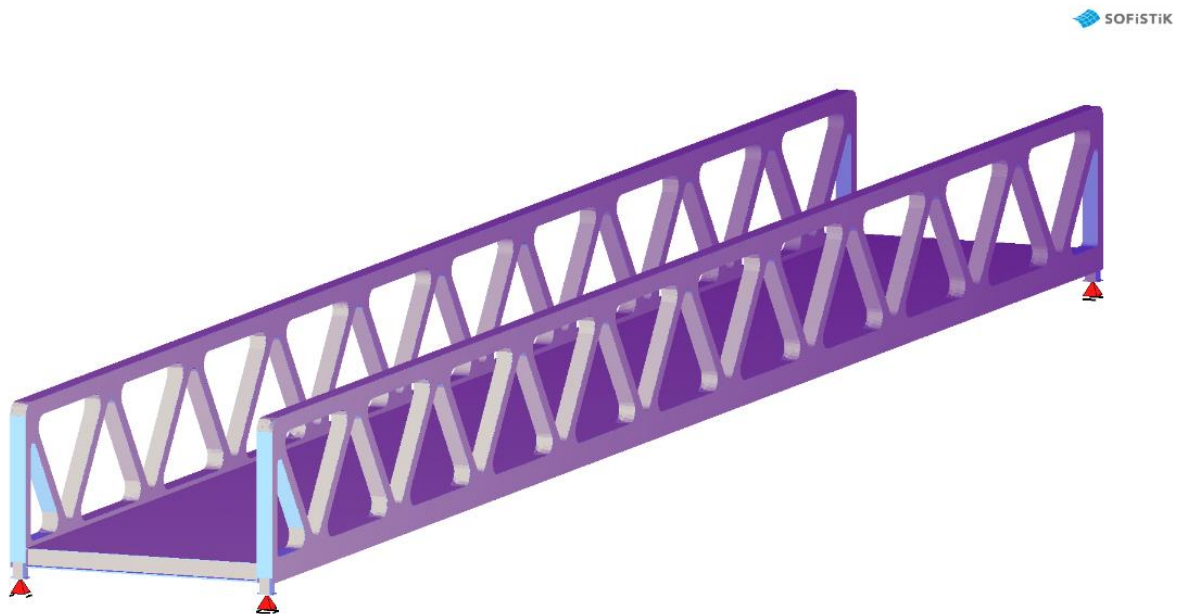
För illustration av dessa varianter se avsnitt 4.1.1.

Konstruktionsberäkningarna leder även till mängdning av stålet för den funktionella enheten vilket är nödvändigt för kommande kostnads- och livscykelanalys. Beräkning med geometri som har den mest gynnsamma knutpunktsutformningen kommer även att göras med materialegenskaper som för kolstål S355J. Avsikten med detta är att få en indikation om hur mycket plåttjockleken behöver ökas för att

kompensera för den lägre sträckgränsen hos den valda kolståltypen jämfört med det rostfria stålet. Det bör noteras att fullständiga dimensioneringsberäkningar som skulle krävas för att uppföra en ny bro inte utförs utan beräkningarna syftar enbart till att jämföra olika förändringar i geometrin i förhållande till Södertäljebroen baserat på finit-elementanalys.

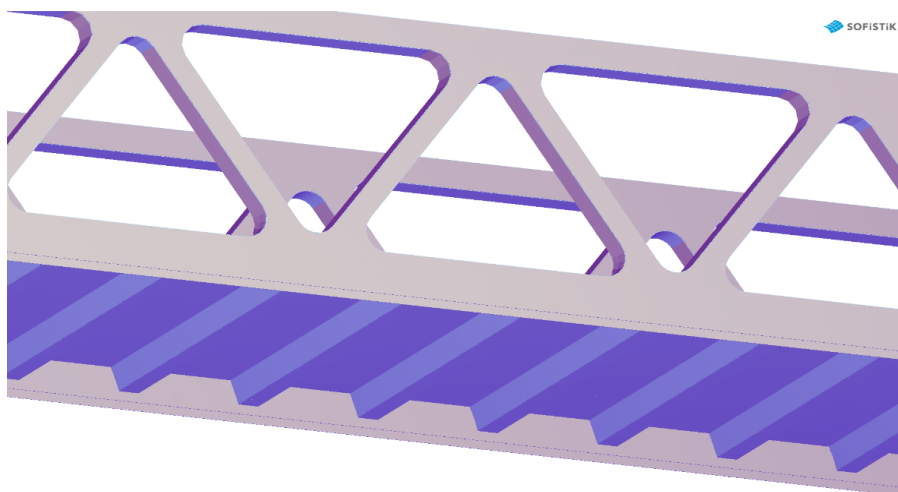
4.1.2 Modellering

Beräkningarna med finit-elementanalys är gjorda i programmet Sofistik där bron modellerats i 3D med 4-nods skalelement. Modellen som används visas grafiskt i figur 4.1 där dimensionerna specifikt överensstämmer med beräkningsfall 12, se vidare under avsnitt 4.2.1.



Figur 4.1 3D-modell av broöverbyggnad

Figur 4.2 visar en del av bronns undersida för att tydliggöra tvärbalkarnas utseende och infästning mot fackverksramen.



Figur 4.2 Undersida av broöverbyggnad, illustrerar tvärbalkarnas placering

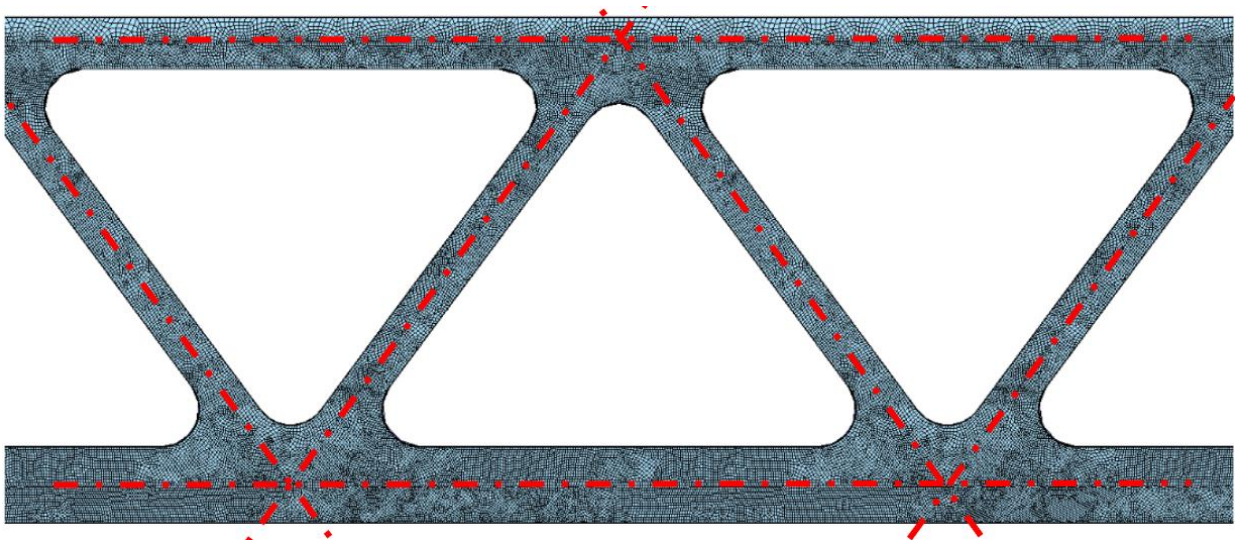
Elementstorleken är för modellen satt till 0,025 m med en förtätning till 0,01 m vid fältmitt och det ena av bronns två upplag för att öka beräkningsnoggrannheten vid de mest kritiska områdena men samtidigt hålla nere beräkningstiden. Områden med finare elementnät visas som mörkare områden i figur 4.3 som grafiskt illustrerar beräkningsfall 13.



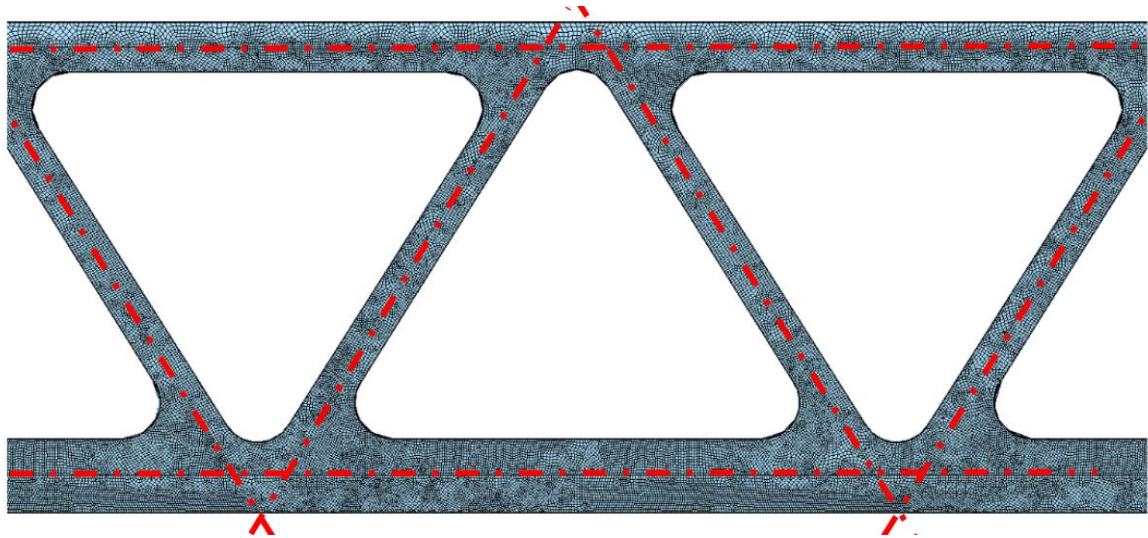
Figur 4.3 Principiell visualisering av meshning för fackverksram

Randvillkoren utgörs av fyra punktupplag med placeringar motsvarande brolagren. Samtliga upplagspunkter är låsta i höjdlid (z-led). Upplagen vid bronns ena kortsida tillåter förskjutningar i längdriktningen (x-led) och upplagen vid den ena långsidan tillåter förskjutningar i tvärriktningen (y-led).

Figur 4.4 visar modellering av fackverksram utan excentricitet i knutpunkterna och figur 4.5 med excentricitet i knutpunkterna. Excentricitet innebär att de diagonala ramstängernas systemlinjer inte möter varandra och den undre respektive övre ramstångens systemlinjer i samma punkt.

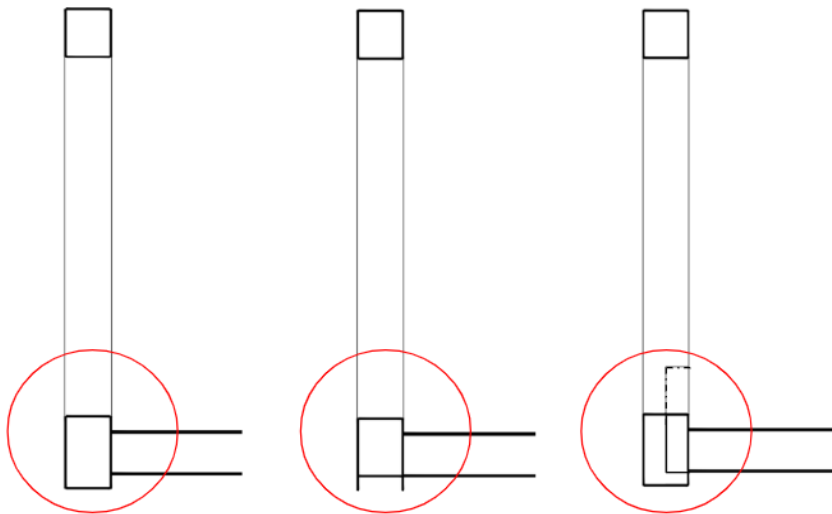


Figur 4.4 Knutpunkter i fackverksram utan excentricitet

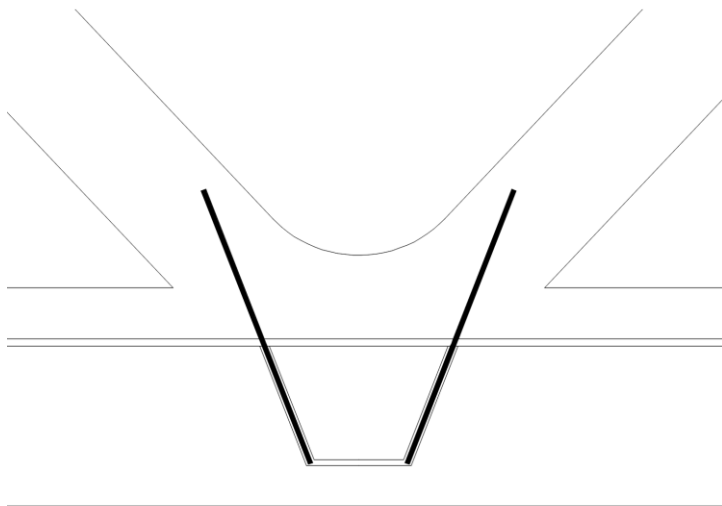


Figur 4.5 Knutpunkter i fackverksram med excentricitet

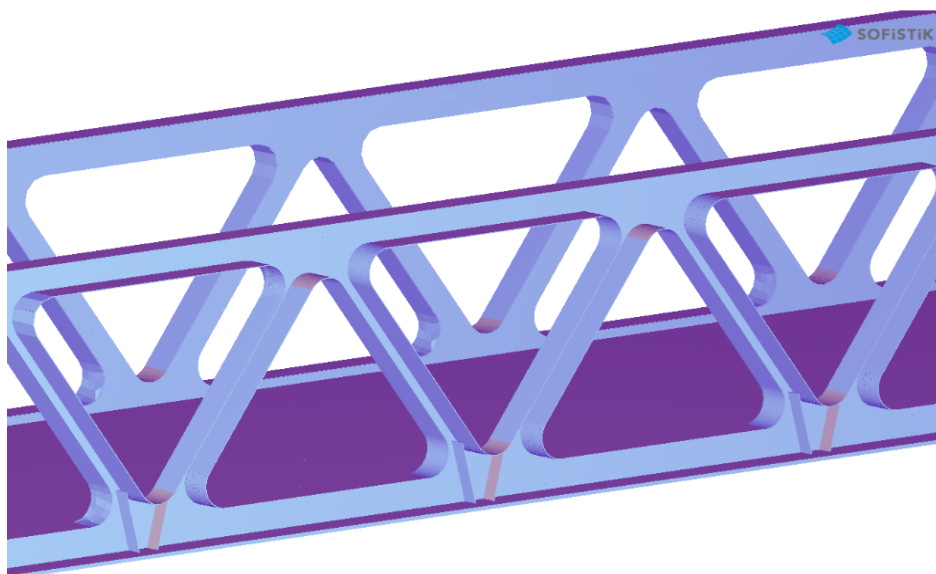
Figur 4.6 och 4.7 visar skisser av fackverksramens tvärsektion med de olika typerna av knutpunktsutformning som modelleras i syfte att skapa en styvare infästning mellan tvärbalk och fackverksram. I figur 4.8 visas även en illustration av finita elementmodellen med avstyvningsplåtar i knutpunkterna.



Figur 4.6a,b,c Tvärsektion för fackverksram med ursprunglig knutpunktsutformning (a), tvärsektion för fackverksram med knutpunktsutformning där nedre fläns flyttats upp (b) samt tvärsektion för fackverksram med knutpunktsutformning med avstyvningsplåt (c)



Figur 4.7 Skiss över placering av avstyvningsplåtar i knutpunkt



Figur 4.8 3D-modell av bro med avstyvningsplåtar i knutpunkter. Yttre livplåt har dolts i grafiken.

4.2 Resultat

I detta kapitel redovisas resultat från både finita elementanalysen och de kompletterande beräkningarna i enlighet med de bärlighets- och komfortkrav som presenterats i metodavsnittet för konstruktionsberäkningarna i kapitel 3.1. Resultat som redovisas grafiskt i form av figurer med beräknade spänningar visar den spänningsnivå som uppkommer vid den dimensionerande lastkombinationen för samtliga möjliga lastplaceringar som inkluderas i beräkningen för de variabla lasterna för vart och ett element i FE-modellen.

4.2.1 Beräkningsfall

Beskrivning av de olika variationerna av broutformningar som beräkningar har gjorts för presenteras i tabell 4.1. Beräkningsfall 13 är modellerat med materialparametrar för kolstål.

Tabell 4.1 Beskrivning av beräkningsfall

| Beräkningsfall | Spännvidd [m] | Fackverkshöjd [m] | Fri bredd [m] | Knutpunktstyp | Vikt stål [ton] |
|-----------------|---------------|-------------------|---------------|----------------------------------|-----------------|
| 1 | 26,1 | 2,0 | 3,0 | | 15,200 |
| 2 | 26,1 | 2,0 | 3,5 | | 16,580 |
| 3 | 20,9 | 1,7 | 2,5 | | 10,820 |
| 4 | 26,1 | 1,7 | 3,5 | | 16,190 |
| 5 | 26,1 | 2,0 | 3,0 | Excentricitet | 15,120 |
| 6 | 26,1 | 2,0 | 3,5 | Nedre fläns flyttad | 16,580 |
| 7 | 26,1 | 2,0 | 3,5 | Förstyvning | 16,660 |
| 8 | 26,1 | 2,0 | 3,5 | Förstyvning, nedre fläns flyttad | 16,660 |
| 9 | 23,5 | 1,7 | 3,0 | Nedre fläns flyttad | 13,370 |
| 10 | 26,1 | 2,0 | 3,0 | Förstyvning, nedre fläns flyttad | 15,280 |
| 11 | 28,7 | 2,0 | 3,0 | Nedre fläns flyttad | 16,660 |
| 12 | 26,1 | 1,7 | 3,0 | Förstyvning, nedre fläns flyttad | 15,040 |
| 13 ¹ | 26,1 | 1,7 | 3,0 | Förstyvning, nedre fläns flyttad | 19,140 |

¹ Modellerat med materialparametrar som för kolstål

4.2.2 Resultat nedböjning SLS

Resultat för de olika beräkningsfallen med avseende på nedböjning i bruksgränstillstånd redovisas i tabell 4.2. Den totala nedböjningen utgörs av summan av nedböjningen vid karakteristisk lastkombination av lastfall egentyngd stål, egentyngd glas, egentyngd beläggning och utbredd trafiklast. Samtliga beräknade värden ligger under hälften av den maximalt tillåtna nedböjningen. Nedböjning är i och med detta resultat inte kritiskt för något av beräkningsfallen. Principiell illustration av hur strukturen deformeras i z-led vid lastfallet egentyngd visas i figur 4.9, för beräkningsfall 12. Nedböjningen är i figuren förstord med en faktor 50.

Tabell 4.2 Tillåten respektive beräknad nedböjning

| Beräkningsfall | Max tillåten nedböjning [mm] | Beräknad nedböjning [mm] |
|-----------------|------------------------------|--------------------------|
| 1 | 65,0 | 19,7 |
| 2 | 65,0 | 21,9 |
| 3 | 52,0 | 10,8 |
| 4 | 65,0 | 29,8 |
| 5 | 65,0 | 23,5 |
| 6 | 65,0 | 22,0 |
| 7 | 65,0 | 21,9 |
| 8 | 65,0 | 22,0 |
| 9 | 58,5 | 18,5 |
| 10 | 65,0 | 19,4 |
| 11 | 71,5 | 22,2 |
| 12 | 65,0 | 27,4 |
| 13 ¹ | 65,0 | 15,7 |

¹ Modellerat med materialparametrar som för kolstål



Figur 4.9 Principiell illustration av vertikal deformation av bro vid lastfall egentyngd stål.

4.2.3 Resultat frekvens SLS

För kontroll av frekvens beräknas det ytttröghetsmoment som resulterar i en frekvens på 2.5 Hz med insättning av aktuell massa och laster för varje enskilt beräkningsfall i formeln beskriven i metodavsnitt 3.1.6. Detta värde kontrolleras mot det faktiska ytttröghetsmoment som tvärsnittet uppvisar vilket beräknas med Steiners sats. Enligt vad som anges i 3.1.6 motsvarar de beräknade värdena enbart ytttröghetsmoment för tvärsnittet av en brohalva. Resultat redovisas i tabell 4.3. För samtliga fall 1-13 är det verkliga ytttröghetsmomentet ca en faktor 4 högre än det som krävs för att generera en frekvens 2.5 Hz. Således är inte egensvängningsfrekvensen kritisk för något av de kontrollerade beräkningsfallen.

Tabell 4.3 Ytttröghetsmoment motsvarande gräns för tillåten egensvängningsfrekvens samt beräknat ytttröghetsmoment

| Beräkningsfall | Ytttröghetsmoment för 2.5 Hz [kg*mm ² *10 ⁹] | Ytttröghetsmoment tvärsnitt [kg*mm ² *10 ⁹] |
|-----------------|--|---|
| 1 | 1,8 | 10,2 |
| 2 | 2,4 | 10,2 |
| 3 | 0,8 | 7,3 |
| 4 | 2,4 | 7,3 |
| 5 | 2,4 | 10,2 |
| 6 | 2,4 | 10,2 |
| 7 | 2,4 | 10,2 |
| 8 | 2,4 | 10,2 |
| 9 | 1,5 | 7,3 |
| 10 | 2,3 | 10,2 |
| 11 | 3,3 | 10,2 |
| 12 | 2,3 | 10,2 |
| 13 ¹ | 2,7 | 96,0 |

¹ Modellerat med materialparametrar som för kolstål

4.2.4 Resultat spänningar SLS

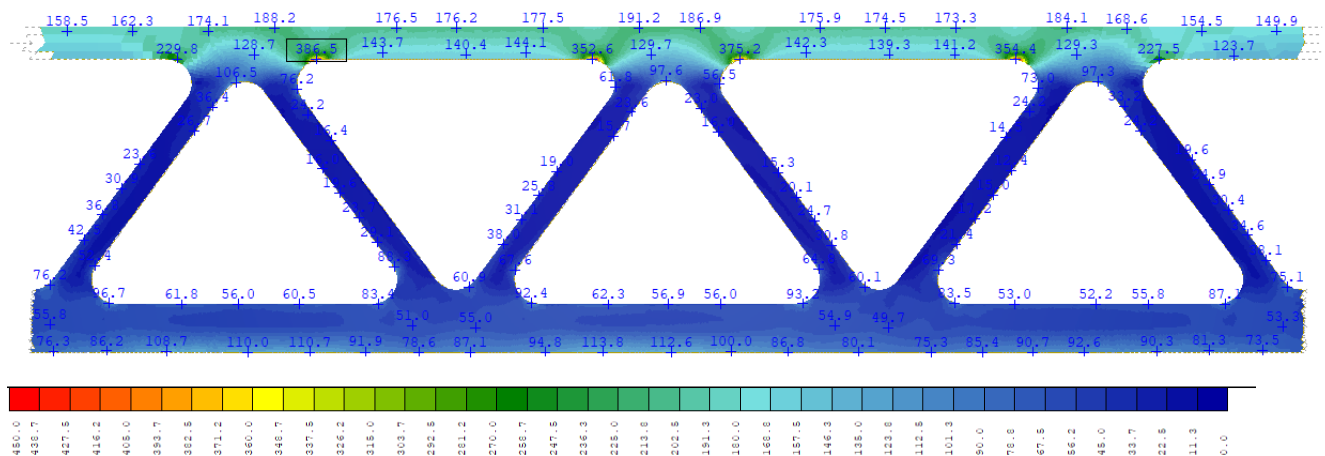
Resultat från kontroll av spänningar i bruksgränstillstånd SLS visas i tabell 4.4 där den maximala von-Misesspänningen som beräknats för varje konstruktionsdel har sammanställts. Notera åter att för fall 13 är $f_{yd} = 322,7$ MPa för dragbrott då broarna är modellerade med materialparametrar som för kolstål. För övriga fall är $f_{yd} = 418,2$ MPa.

Tabell 4.4. Max von-Misesspänning i bruksgränstillstånd för utvalda konstruktionsdelar

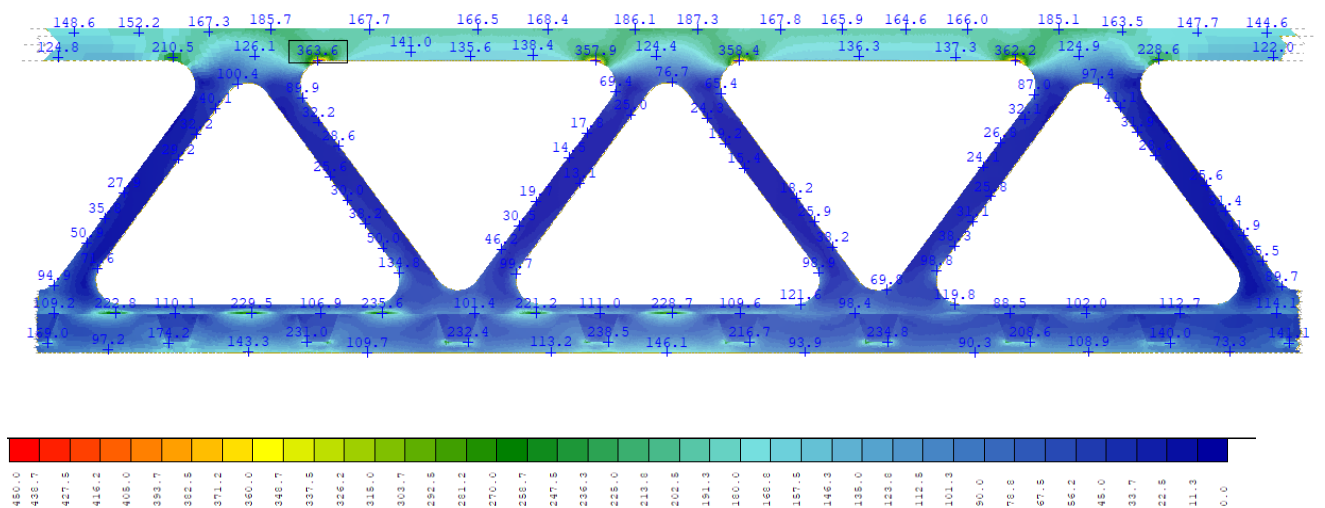
| Beräkningsfall | Gångbaneplåt | Tvärbalk | Infästning tvärbalk (inre livplåt) | Överram knutpunkt inre livplåt | Överram knutpunkt yttre livplåt | Överfläns | Underfläns | Avstyvningsplåt |
|-----------------|--------------|----------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------|------------|-----------------|
| 1 | 346,4 | 183,8 | 238,5 | 363,6 | 386,5 | 192,4 | 168,6 | - |
| 2 | 346,3 | 181,9 | 298,6 | 406,6 | 420,4 | 214,3 | 185,1 | - |
| 3 | 340,7 | 187,0 | 179,5 | 245,9 | 266,9 | 134,4 | 96,2 | - |
| 4 | 351,0 | 181,1 | 276,7 | 489,7 | 478,7 | 255,1 | 196,2 | - |
| 5 | 346,3 | 182,2 | 312,7 | 409,7 | 429,9 | 229,2 | 190,1 | - |
| 6 | 347,0 | 182,3 | 239 | 410,2 | 430,9 | 215,3 | 176,6 | - |
| 7 | 346,4 | 181,1 | 249,8 | 419,0 | 427,9 | 213,4 | 179,6 | 274,1 |
| 8 | 347,9 | 181,8 | 248,9 | 422,1 | 429,2 | 214,6 | 209,1 | 259,6 |
| 9 | 347,4 | 185,4 | 128,4 | 340,3 | 347,3 | 180,5 | 154,4 | - |
| 10 | 345,7 | 183,5 | 243,9 | 366,7 | 383,5 | 192,6 | 136,3 | 156,3 |
| 11 | 350,2 | 185,1 | 134,7 | 397,1 | 409,2 | 204,3 | 158,9 | - |
| 12 | 351,3 | 182,8 | 244,2 | 389,4 | 395,2 | 207,1 | 169 | 115,1 |
| 13 ¹ | 248,5 | 133,6 | 160,6 | 275,3 | 289,3 | 151,4 | 136,2 | 114,6 |

¹ Modellerat med materialparametrar som för kolstål

Området där maximala spänningar uppstår inträffar är för samtliga beräkningsfall där de diagonala ramstängerna ansluter till överramsstängens, se principiellt figur 4.10 och 4.11 som visar området närmast fältmitt för fall 1. Spänningstoppar är generellt något högre i den yttre livplåten än i den inre. Flytgränsen överskrids klart för fall 2 samt 4-8.

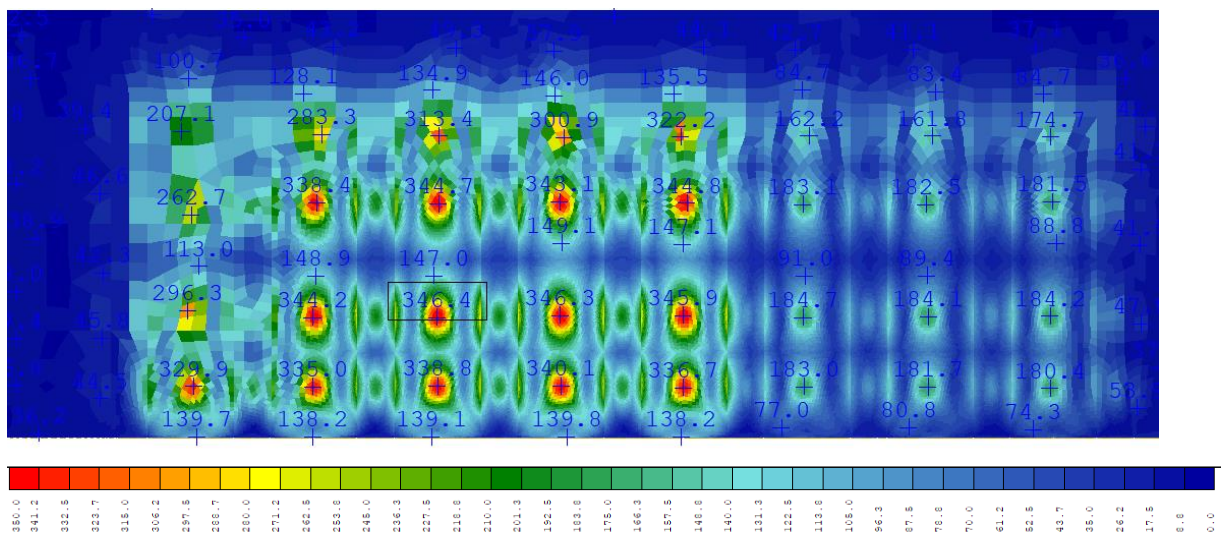


Figur 4.10 Spänningsfördelning i yttre livplåt i bruksgränstillstånd, fall 1 fältmitt



Figur 4.11 Spänningsfördelning i inre livplåt i bruksgränstillstånd, fall 1 fältmitt

Bortsett överamsstången och infästningen mellan tvärbalkarna och den undre ramstången är spänningsnivåerna låga i livplåtarna. I över- och underfläns, i avstyvningsplåtarna samt i tvärbalkarna är spänningarna på icke-kritiska nivåer i bruksgränstillståndet för samtliga beräkningsfall. Med hänsyn till spänningsnivåerna i fall 12 ökades livplåttjockleken i fackverksramarna till 8 mm och gångbanepåtens tjocklek till 12 mm för fall 13 där bron har modellerats med materialparametrar som för kolstål. I gångbanepåtens uppnås höga spänningar på grund av servicefordonets hjultryck. Grafisk illustration av spänningsfördelningen i gångbanepåtens i bruksgränstillstånd visas i figur 4.12 för området vid fältmitt för fall 8 vars fria bredd är 3,5 m. Spänningarna blir högst när servicefordonet står placerat med den större axellasten på gångbanepåtens mitt mellan tvärbalkarna. Spänningarna i gångbanepåtens närmare bronns upplag är runt 250 MPa jämfört med vid fältmitt där de uppgår till ca 350 MPa för samtliga beräkningsfall.



Figur 4.12 Spänningsfördelning i gångbanepått i bruksgränstillstånd, fall 1 fältmitt

4.2.5 Resultat spänningar ULS

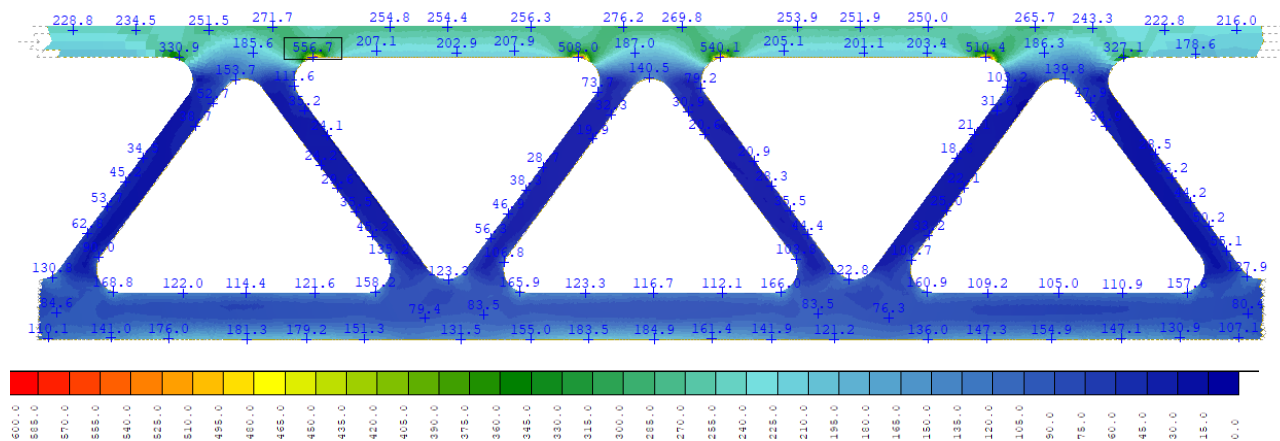
Resultat från kontroll av spänningar i brottgränstillstånd ULS visas i tabell 4.5. Enbart toppvärden från en FE-analys bör inte användas för att dra några slutsatser på grund av beräknings sättet med uppdelning av strukturen i diskreta element. Värdena i tabell 4.5 har dock använts för att få en indikation om hur broarna förhåller sig till varandra i fråga om spänningsnivåer och därefter har spänningsfördelningen studerats genom grafisk illustration av resultatet.

Tabell 4.5 Max von-Misesspänning i brottgränstillstånd för utvalda konstruktionsdelar

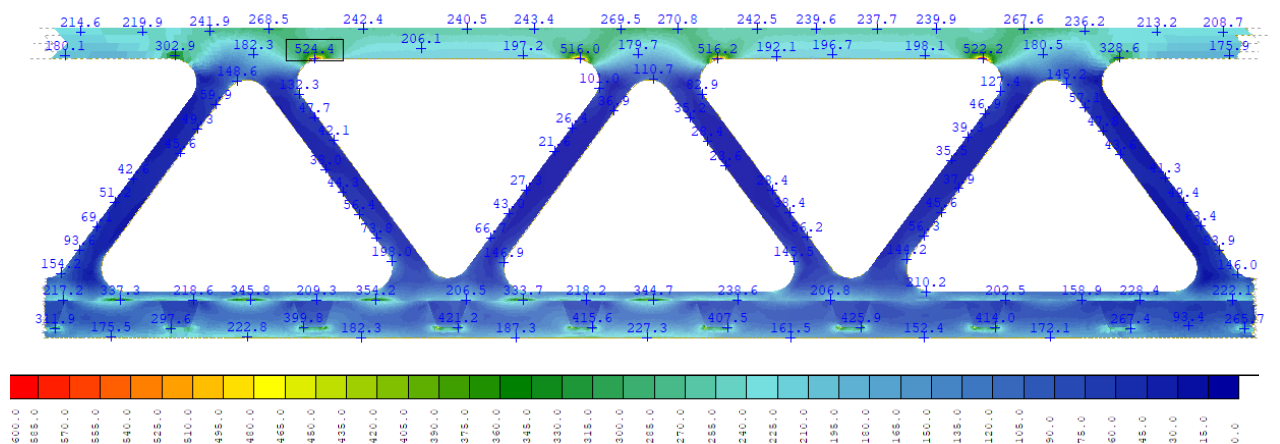
| Beräkningsfall | Gångbanepått | Tvärbalk | Infästning tvärbalk (inre livplåt) | Överram knutpunkt inre livplåt | Överram knutpunkt yttre livplåt | Överfläns | Underfläns | Avstyvningsplåt |
|-----------------|--------------|----------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------|------------|-----------------|
| 1 | 519,1 | 275,5 | 425,9 | 524,4 | 556,7 | 253,3 | 278,0 | - |
| 2 | 517,7 | 272,7 | 470,6 | 586,3 | 596,4 | 309,5 | 277,3 | - |
| 3 | 510,0 | 280,5 | 294,2 | 352,7 | 383,9 | 194,3 | 144,7 | - |
| 4 | 524,0 | 271,6 | 467,4 | 705,4 | 689,1 | 367,9 | 293,0 | - |
| 5 | 517,7 | 273,2 | 557,7 | 590,5 | 620,3 | 331,7 | 284,9 | - |
| 6 | 518,7 | 273,6 | 360,2 | 592,9 | 622,7 | 311,9 | 325,3 | - |
| 7 | 517,8 | 272,4 | 460,4 | 605,5 | 618,1 | 308,9 | 268,8 | 532,7 |
| 8 | 518,5 | 272,8 | 373,7 | 611,1 | 620,8 | 311,2 | 260,0 | 489,9 |
| 9 | 520,4 | 278,2 | 193,6 | 490,3 | 500,5 | 260,6 | 270,6 | - |
| 10 | 518,1 | 275,1 | 365,9 | 531,6 | 554,7 | 279,4 | 206,4 | 340,6 |
| 11 | 524,8 | 277,8 | 209 | 571,4 | 587,6 | 294,3 | 286,0 | - |
| 12 | 525,9 | 274,6 | 365,9 | 532,8 | 559,9 | 299,6 | 307,3 | 229,1 |
| 13 ¹ | 372,1 | 200,3 | 240,6 | 396 | 415,3 | 217,9 | 162,4 | 235,1 |

¹ Modellerat med materialparametrar som för kolstål

Även i brottgränstillstånd uppkommer de högsta spänningarna i livplåtarna mellan överramen och diagonalerna, vid tvärbalkarnas infästning samt i gångbaneplåten. Maxspänningar i livplåtarna överskrider för samtliga kontrollerade spännvidder, utom 20,9 m, stålets flytgräns. Detta gäller såväl med 3,5 m som 3 m fri bredd även om spänningarna i det senare fallet är lägre. För beräkningsfallen med 3,5 m fri bredd och 26,1 m spännvidd samt med excentriciteter i knutpunkterna överskrids även brottgränsen. Vid kontroll av de enskilda lasternas effekt i brottgränstillståndet kan det konstateras att det är den utbredda trafiklasten som primärt ger upphov till de lokalt höga spänningsnivåerna i överramsstången. Områdena med höga spänningar och plasticering är mycket lokala för samtliga fall, se principiellt figur 4.13 och 4.14 som visar yttre respektive inre livplåt för fall 1 när maxspänningar uppträder i överramsstångens knutpunkter.



Figur 4.13 Spänningsfördelning i yttre livplåt i brottgränstillstånd, fall 1 fältmitt



Figur 4.14 Spänningsfördelning i inre livplåt i brottgränstillstånd, fall 1 fältmitt

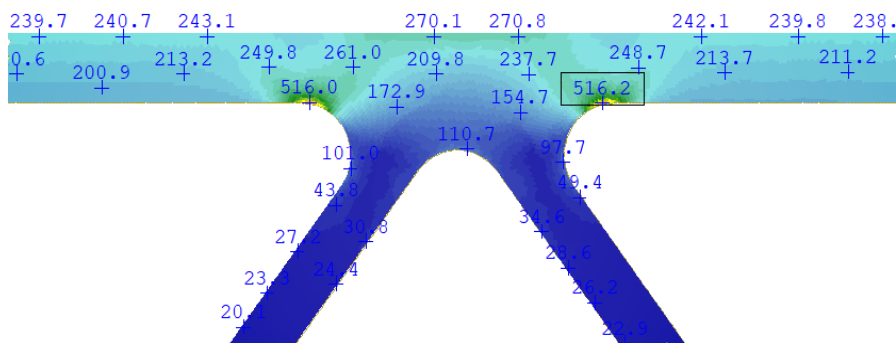
Bredd-tjockleksförhållandet för plåtarna i överramsstångens tvärsnitt beräknas till $200/6 = 33,2$. Detta medför att tvärsnittet hamnar i klass 4 enligt figur 3.6. Således kan bärförmågan överskridas redan innan flytgränsen uppnås på grund av plåtbuckling. Det går därför inte enbart utifrån resultatet ovan säga om övriga beräkningsfall är acceptabla. Kontroll av utnyttjandegraden för de kritiska tvärsnitten med avseende på både böjning och normalkraft är nödvändig. För kolstål gäller dock andra materialparametrar för tvärsnittsklassificering och för beräkningsfall 13 tillhör överramsstången

tvärsnittklass 1 då $200/8 = 25$, således tillräckligt för att lokalt kunna acceptera plasticering (EN1993-1-1).

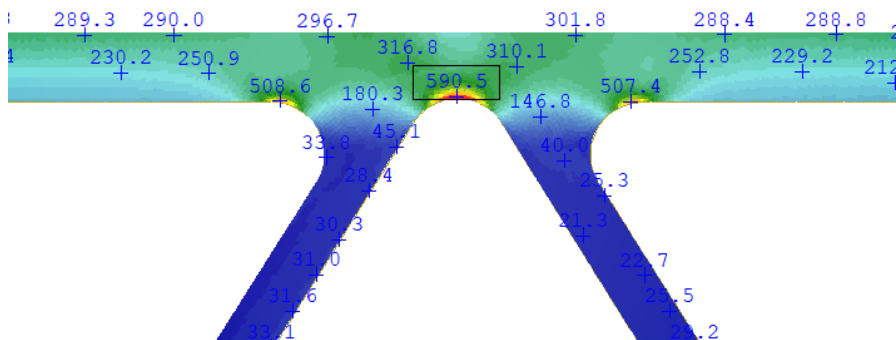
I gångbaneplåten sker plasticering för samtliga beräkningsfall för lastplaceringar nära fältmitt, oberoende av spännvidd och fri bredd. I över- och underfläns samt tvärbalkar är spänningsnivåerna genomgående på icke-kritiska nivåer i brottgränstillståndet för samtliga beräkningsfall. För både fall 7 och 8 förekommer en lokal spänningstopp i avstyvningsplåtarna, se tabell 4.5.

4.2.6 Excentricitet

I detta avsnitt kommer effekterna av excentriciteter i fackverkets knutpunkter att studeras. I figurerna 4.15 och 4.16 visas speciellt övergången mellan diagonala ramstänger och överramsstång för den inre livplåten, i fältmitt, för fall 1 respektive fall 5. Båda dessa beräkningsfall är i övrigt lika med avseende på spännvidd (26,1 m), fri bredd (3,0 m) och höjd på ramsidorna (2,0 m).



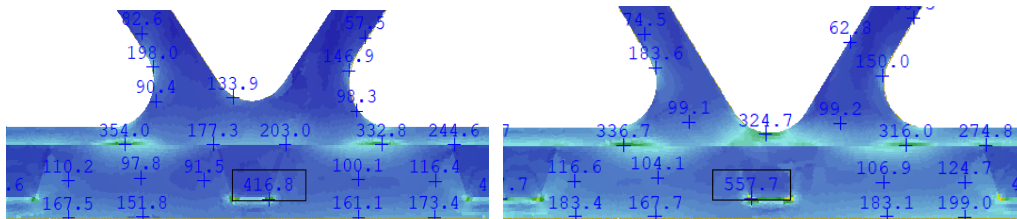
Figur 4.15 Knutpunkt vid överramsstång, normal utformning, inre livplåt, fall 1



Figur 4.16 Knutpunkt vid överramsstång, utformning med excentricitet, inre livplåt, fall 5

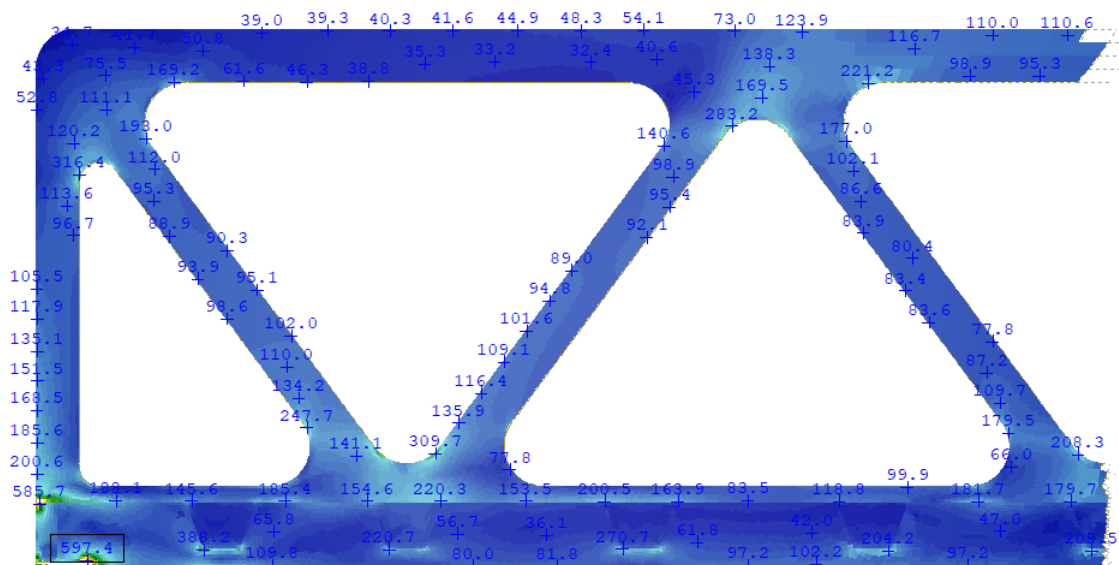
Som figurerna visar leder utformning med excentricitet till att spänningarna generellt ökar i området runt knutpunkterna. I figur 4.16 ses också att områden med höga spänningar och i detta fallet plasticering av materialet uppkommer även mellan de diagonala ramstängerna. Med normal knutpunktsutformning är spänningarna i detta område på en icke-kritisk nivå. Excentriciteter leder inte bara till att de kritiska områdena ökar i utbredning utan också att de högsta spänningsnivåerna som beräknas här blir högre. I fall 1 är högsta spänning i den inre livplåten 524,4 MPa, se tabell 4.5, medan den i fall 5 med excentricitet uppgår till 590,5 MPa. Detta motsvarar en ökning på 13%. Trots brister i

att jämföra toppvärden från två olika finita-elementmodeller visar dock resultatet fortfarande på att en spänningsökning klart kan förväntas med excentriska knutpunkter. Samma effekt ses vid knutpunkterna vid underramsstången även om spänningarna är betydligt lägre än vid överramsstången, se figur 4.17a och 4.17b med respektive utan excentricitet. Det kan även noteras i figur 4.17b att spänningsnivåerna ökat väsentligt vid tvärbalkinfästningarna jämfört med det oförändrade fallet i figur 4.17a vilket bör indikera sämre styvhet i tvärled.

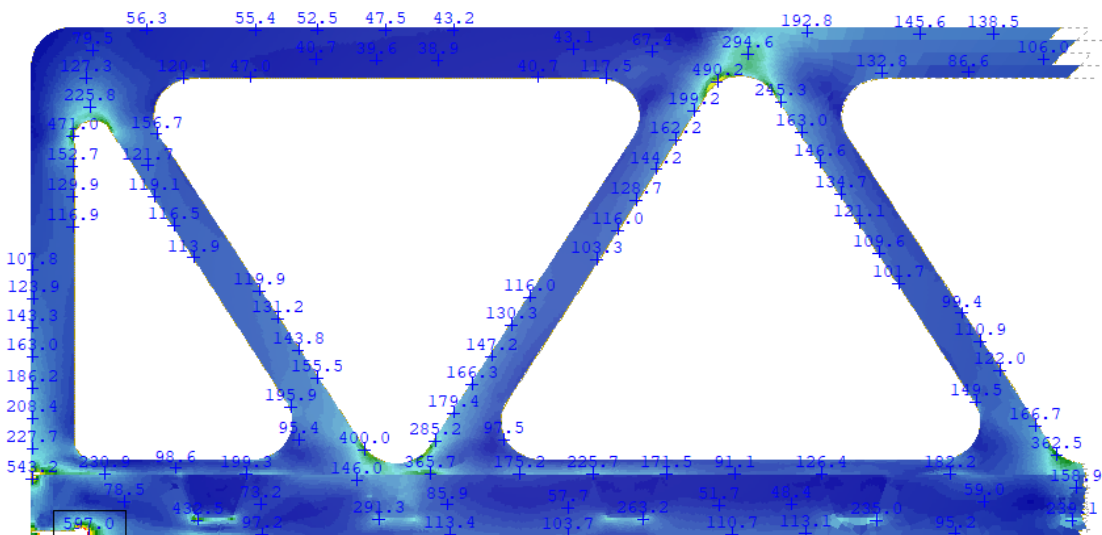


Figur 17a,b. Knutpunkt vid underramsstång, normal utformning, inre livplåt, fall 1(a) och knutpunkt vid underramsstång, utformning med excentricitet, inre livplåt, fall 5 (b)

Studeras även området nära brons upplag ses vidare konsekvenser av den excentriska utformningen. I figur 4.18 visas den inre livplåten vid upplaget för beräkningsfall 1 och i figur 4.19 den inre livplåten för fall 5. Spänningsresultaten visar på att betydligt högre spänningar uppkommer runt den första knutpunkten i fackverkets hörn med excentricitet jämfört med den normala utformningen. Sett till toppvärdena inom området uppnås ett värde på 316,4 MPa för den icke-excentriska utformningen i figur 4.18 medan 471,0 MPa uppnås i figur 4.19. Spänningarna i de kritiska områdena är således betydligt lägre vid upplaget än vid fältmitt för utformningen med icke-excentriska knutpunkter men att en minskning i samma omfattning inte kan ses om knutpunkterna har excentrisk utformning. I beräkningsfall 2 är spänningarna i livplåten nära upplaget klart under materialets sträckgräns medan det för beräkningsfall 5 förekommer plasticering även vid knutpunkterna här. Vid den första knutpunkten där två diagonaler möter överramsstången kan också ses en stor skillnad i spänningsnivåer mellan de två fallen, 283,2 för fall 1 och 490,2 för fall 5.



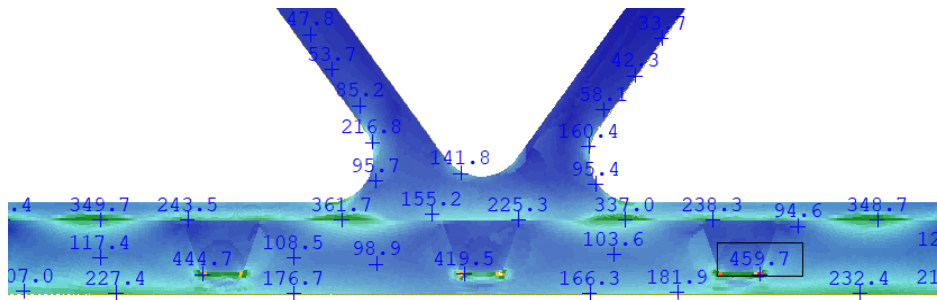
Figur 4.18 Spänningsfördelning i inre livplåt, normal knutpunktsutformning, fall 1 upplag



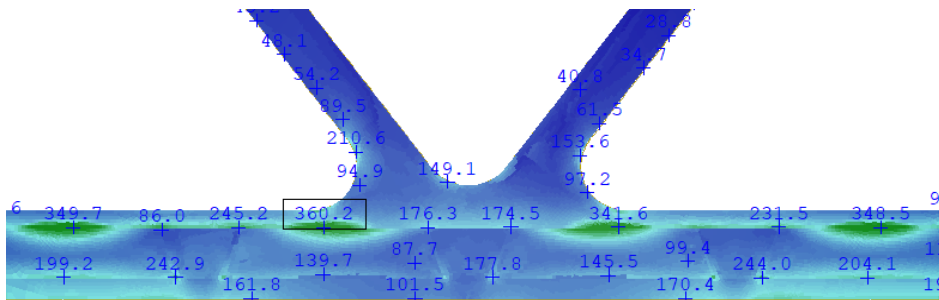
Figur 4.19 Spänningsfördelning i inre livplåt, knutpunktsutformning med excentricitet, fall 5 upplag

4.2.7 Infästning av tvärbalk

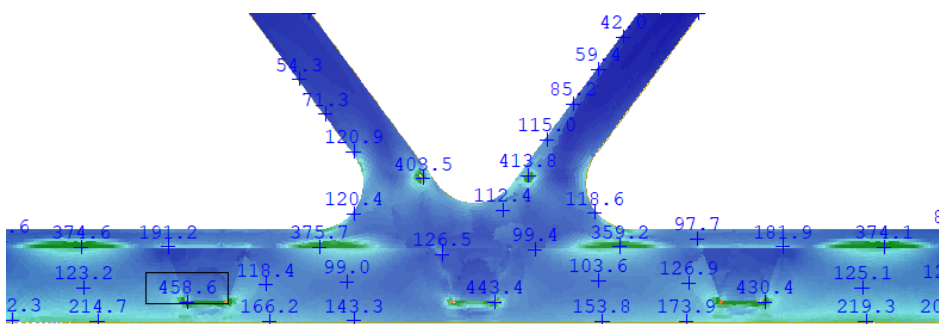
För att studera spänningarna för de olika varianterna av utformning av infästningen mellan tvärbalk och inre livplåt visas resultat för beräkningsfall 2, 6, 7, och 8 i figur 4.20-4-23. Dessa har samma spännvidd (26,1 m), fri bredd (3,5 m) och höjd på ramsidorna (2 m). Figurerna visar en av knutpunkterna vid underramsstängan närmast fältmitt när maxspänningar uppkommer för infästningen.



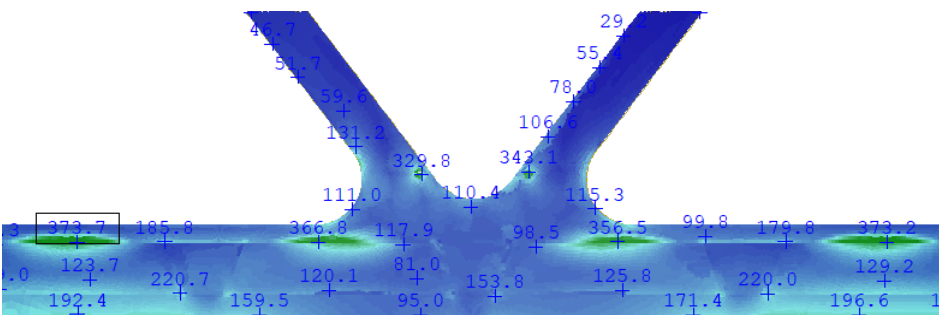
Figur 4.20 Knutpunkt underramsstång, normal utformning, inre livplåt fall 2



Figur 4.21 Knutpunkt underramsstång, flyttad nedre fläns, inre livplåt fall 6



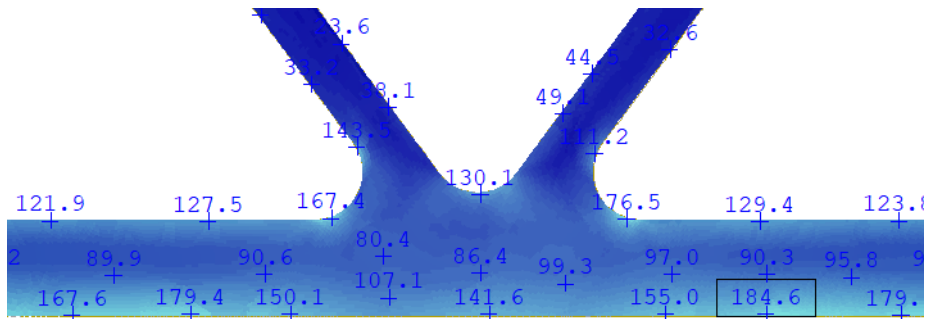
Figur 4.22 Knutpunkt underramsstång, avstyvningsplåtar, inre livplåt fall 7



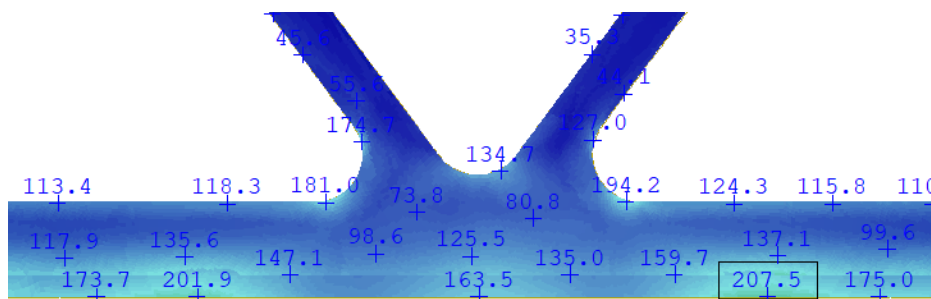
Figur 4.23 Knutpunkt underramsstång, avstyvningsplåtar och flyttad nedre fläns, inre livplåt fall 8

Med olika utformning i syfte att göra knutpunkten styvare i tvärled förändras både spänningsfördelningen och toppvärdena i infästningen. Resultatet tyder på en klar minskning av de högsta spänningsnivåerna när underflänsen flyttas till samma nivå som tvärbalkarnas underkant, fall 6. Detta kan ses i figur 4.21 (fall 6) vid jämförelse med den oförändrade utformningen i figur 4.20 (fall 2). När underflänsen flyttas försvinner det kritiska området i livplåten vid underramsstången där

tvärbalkarna svetsas. De maximala spänningarna minskar från ca 460 MPa till 180 MPa inom det berörda området från fall 2 till fall 6, se tabell 4.5. I detta fallet leder det således till att plasticering undviks. Flyttad underfläns åtföljs av en mindre spänningsökning i underramens yttre livplåt och i underflänsen men nivåerna här är fortfarande väl under flytgränsen, se figur 4.24 och 4.25.



Figur 4.24. Knutpunkt underramsstång, normal utformning, yttre livplåt fall 2



Figur 4.25 Knutpunkt underramsstång, flyttad nedre fläns, yttre livplåt fall 6

När avstyvningsplåtarna införs, i fall 7, ses en viss minskning av spänningarna generellt i området runt knutpunkten, jämför figur 4.22 (fall 7) med den oförändrade utformningen i figur 4.20 (fall 2) men är i princip oförändrade vid tvärbalksinfästningen. Lokala spänningstoppar kan ses i den inre livplåten där avstyvningsplåtarna avslutas. Spänningsnivåerna är dock högre vid tvärbalkarna.

Spänningsfördelningen när både underflänsen flyttats och avstyvningsplåtar införts, fall 8, visas i figur 4.23. Här ses kombinationen av båda lösningarnas effekt, lokala spänningstoppar där avstyvningsplåtarna avslutas samt en klar minskning av spänningarna vid tvärbalksinfästningen. Toppvärdena vid avstyvningsplåtarna är något lägre här än i fall 7. Slutsatsen gällande knutpunktsmodelleringen är att det är fördelaktigt att placera underramsstångens nedre fläns i linje med tvärbalkarnas underkant då det leder till att krafter och moment från tvärbalkarna överförs till underflänsen i stället för det vekare området mitt på underramens livplåt. Avstyvningsplåtar leder till lokala toppvärden som bör beaktas vid tillämpning av knutpunktsutformningen då de är nära kritiska nivåer.

4.2.8 Andra ordningens teori

Resultat från analys av spänningar enligt andra ordningens teori visas i tabell 4.6 som den procentuella skillnaden mot analys enligt första ordningen. Värdena som jämförts är de maximala spänningarna som uppkommer i de kritiska områdena mellan diagonaler och överramsstång. Lastökningsfaktor som krävs för att knäckning ska uppstå redovisas också.

Tabell 4.6 Spänningsökning i kritiska områden vid andra ordningens analys, samt lastökningsfaktor för bucklingsmod 1

| Beräkningsfall | Skillnad i % från 1:a ordningens analys | Lastökningsfaktor |
|-----------------|---|-------------------|
| 1 | 5% | 2,673 |
| 2 | 3% | 2,326 |
| 3 | 3% | 3,966 |
| 4 | 4% | 1,962 |
| 5 | 17% | 2,758 |
| 6 | 3% | 2,367 |
| 7 | 3% | 2,359 |
| 8 | 4% | 2,341 |
| 9 | 4% | 2,758 |
| 10 | 5% | 2,667 |
| 11 | 14% | 2,305 |
| 12 | 4% | 2,717 |
| 13 ¹ | 3% | 6,177 |

¹ Modellerat med materialparametrar som för kolstål

Resultatet visar på förändring av spänningarnas toppvärde med under 5% utom för fall 5 och 11 där en ökning på 17% respektive 14% kan ses. Den större förändringen för fall 5 tyder på att andra ordningens effekter ger upphov till högre spänningsnivåer om knutpunkterna har utformning med excentricitet. Det högre värdet för fall 11 bör kunna hänföras till dess längre spännvidd. Lastökningsfaktorn för att knäckning ska uppstå ligger mellan 2 och 3 gånger lasten i brottgränstillstånd, dock högre för fall 3 och 13 som har kortare spännvidd respektive ökad plåttjocklek.

4.2.9 Resultat utböjning vid enhetslastfall

Utböjningen i tvärled vid applicering av enhetslast på överramen redovisas i tabell 4.7. För att underlätta tolkning av resultatet visas även här förklaring av eventuell knutpunktsförändring som initialt presenteras i tabell 4.1. I figur 4.26 visas principiellt hur deformationen ser ut.

Tabell 4.7 Deformation i tvärled vid applicering av enhetslast i knutpunkt

| Beräkningsfall | Deformation av punklaster [mm] | Knutpunkt, data från tabell 4.1 |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 631,9 | |
| 2 | 711,6 | |
| 3 | 413,9 | |
| 4 | 487,7 | |
| 5 | 736,3 | Excentricitet |
| 6 | 616,3 | Nedre fläns flyttad |
| 7 | 434,1 | Avstyvning |
| 8 | 351,3 | Avstyvning, nedre fläns flyttad |
| 9 | 402,8 | Nedre fläns flyttad |
| 10 | 334,5 | Avstyvning, nedre fläns flyttad |
| 11 | 608,8 | Nedre fläns flyttad |
| 12 | 187,3 | Avstyvning, nedre fläns flyttad |
| 13 ¹ | 182,5 | Avstyvning, nedre fläns flyttad |

¹ Modellerat med materialparametrar som för kolstål



Figur 4.26 Principiell illustration av utböjning i tvärled

Beräkningsfall 2, 6, 7 och 8 motsvarar samma globala geometri men med de olika varianterna av knutpunktsutformning. När den nedre flänsen flyttas så att den ligger i linje med tvärbalkarnas underkant minskar utböjningen 13,4% mot den ursprungliga utformningen, jämför fall 6 med det oförändrade fall 2. Således leder en förflyttning av underflänsen till nivån på tvärbalkarnas underkant till att infästningen mellan tvärbalk och ramsida blir något styvare.

Introduceras avstyvningsplåtar på insidan av fackverksidorna sker dock en än mer markant reduktion av utböjningen, ca 39,0% om nu fall 7 jämförs med fall 2. Kombinerar de två ovan nämnda

varianterna reduceras utböjningen till under hälften av den initiala, en minskning av utböjningen på 50,6% från fall 2 till fall 8 kan noteras. Den procentuella förändringen är liknande för bron med fri bredd på 3 m och ligger på 47,1 % dvs fall 1 med den oförändrade utformningen jämfört med fall 10. När knutpunkterna utformas med excentricitet minskar också styvheten i tvärled, mellan fall 1 och fall 5 ses en ökning motsvarande ca 16%

Generellt ses också att lägre höjd på ramsidorna, 1,7 m (fall 4) i förhållande till 2 m (fall 2) ger tydligt mindre utböjning vid applicering av enhetslast vilket är fullt rimligt eftersom hävarmen till tvärbalksfästningen blir kortare. Därav ses även att beräkningsfall 12 och 13, där fackverksramen är 1,7 m och både avstyvningsplåtar och förflyttad fläns har modellerats, har den klart lägsta utböjningen av broarna.

4.2.10 Mängdning till livscykelanalys och kostnadsanalys

Till livscykelanalys och kostnadsanalys kommer stålmängderna att baseras på beräkningsfall 12 och 13 då dessa gav upphov till mest gynnsam utformning med hänsyn till styvheten i tvärled samtidigt som dimensionerna för den funktionella enheten uppfylls. Som tidigare nämnt ökades plåttjockleken i gångbanepålaten till 12 mm och i livplåtarna till 8 mm för fall 13 i kolstål med hänsyn till spänningsnivåerna i fall 12 i rostfritt stål och kolstålets lägre hållfasthetsgrad. Det är på grund av risken för plåtbuckling i överrampsstången dock inte med bestämdhet konstaterat att tillräcklig bärrighet är uppfylld. Kritiska spänningsnivåer uppstår lokalt i samtliga beräkningsfall och utökad tvärsnittskontroll är nödvändig, något som dock ligger utanför denna studies avgränsningar. Spänningarnas toppvärden i beräkningsfall 12 är dock liknande mot vad som beräknades för Södertäljebro. För vidare diskussion kring detta i relation till den funktionella enheten i livscykelanalys och kostnadsanalys hänvisas till kapitel 8. För materialmängder för de två beräkningsfallen 12 och 13 hänvisas till tabell 4.1.

5. Livscykelanalys

5.1 Mål och omfattning

Livscykelanalysen avses att omfatta miljöpåverkansbedömning av gång- och cykelbro i rostfritt stål från Stål och Rörmontage AB av den utförandetyp som beskrivits tidigare, samt två jämförelsealternativ med avseende på materialval. Således kommer tre olika fall att presenteras i studien, bron i rostfritt stål, motsvarande utformning fast i konventionellt kolstål samt en jämförbar fackverksbro i trä.

5.1.1 Syfte

Syfte med studien är att undersöka potentialen hos det rostfria stålet som konstruktionsmaterial inom brobyggnad i förhållande till likvärdiga material med avseende på samtliga faser under brons livslängd. Omfattningen av livscykelanalysen är "från vagga till grav" dvs processer som kommer att inkluderas är följande: materialtillverkning, konstruktion, underhåll, rivning/demontering, återvinning samt transporter relaterat till samtliga av dessa faser. I enlighet med studiens syfte är det av speciellt intresse att jämföra bidragen från var och en av de olika livscykelfaserna både inbördes för varje bro och mellan de olika alternativen. Utöver detta utreds även vilken inverkan trafikavstängning av underliggande väg vid montage och underhåll har på resultatet.

Avsikten är att resultatet från livscykelanalysen ska vara användbart för företagen som har anknytning till den rostfria bron i deras interna strategiarbete. Studien ska här kunna bistå med information kring den rostfria brons miljöbelastning samt förhållande till de jämförda materialalternativen och med detta visa på effekterna av olika materialval inom brobyggnad. Således är primärt den avsedda målgruppen för livscykelanalysen de berörda företagen. Då studien genomförs som en del av examen vid civilingenjörsprogrammet ekosystemteknik vid Lunds Tekniska Högskola är målgruppen även studenter inom detta program.

5.1.2 Studerat system och funktionell enhet

Dimensionerna för de två broarna i stål baseras på resultatet från konstruktionsberäkningarna där spännvidder som överensstämmer med den alternativa träbron har undersökts. För den rostfria bron motsvarar detta beräkningsfall 12 i konstruktionsberäkningarna och kolstålbron beräkningsfall 13, se tabell 4.1. Träbrons utformning är baserad på produktritningar samt konstruktionsexempel från Träguiden/Martinsons trä (Träguiden 2007, Martinsons AB 2019a, Martinsons 2015). Samtliga tre alternativ har samma spännvidd och fri bredd samt ska vara dimensionerade för samma laster. För illustration av principiell utformning av de tre alternativen hänvisas till kapitel 2. Fundament och grundläggning kommer ej att inkluderas i denna studie då de är oberoende av överbyggnadens utformning och således inte kommer att variera beroende på vilket av de tre broalternativen som studeras. Det studerade systemet omfattar därmed den bärande brokonstruktionen inklusive beläggningen dvs det som går under benämningen broöverbyggnad. För beräkning av transportsträckor antas Södertälje som plats för uppförande för att motsvara förutsättningarna för den rostfria bro som redan konstruerats.

Den funktionella enheten definieras som ***gång- och cykelbroöverbyggnad med spännvidd och gångbanebredd enligt tabell 5.1 samt livslängd på 80 år.***

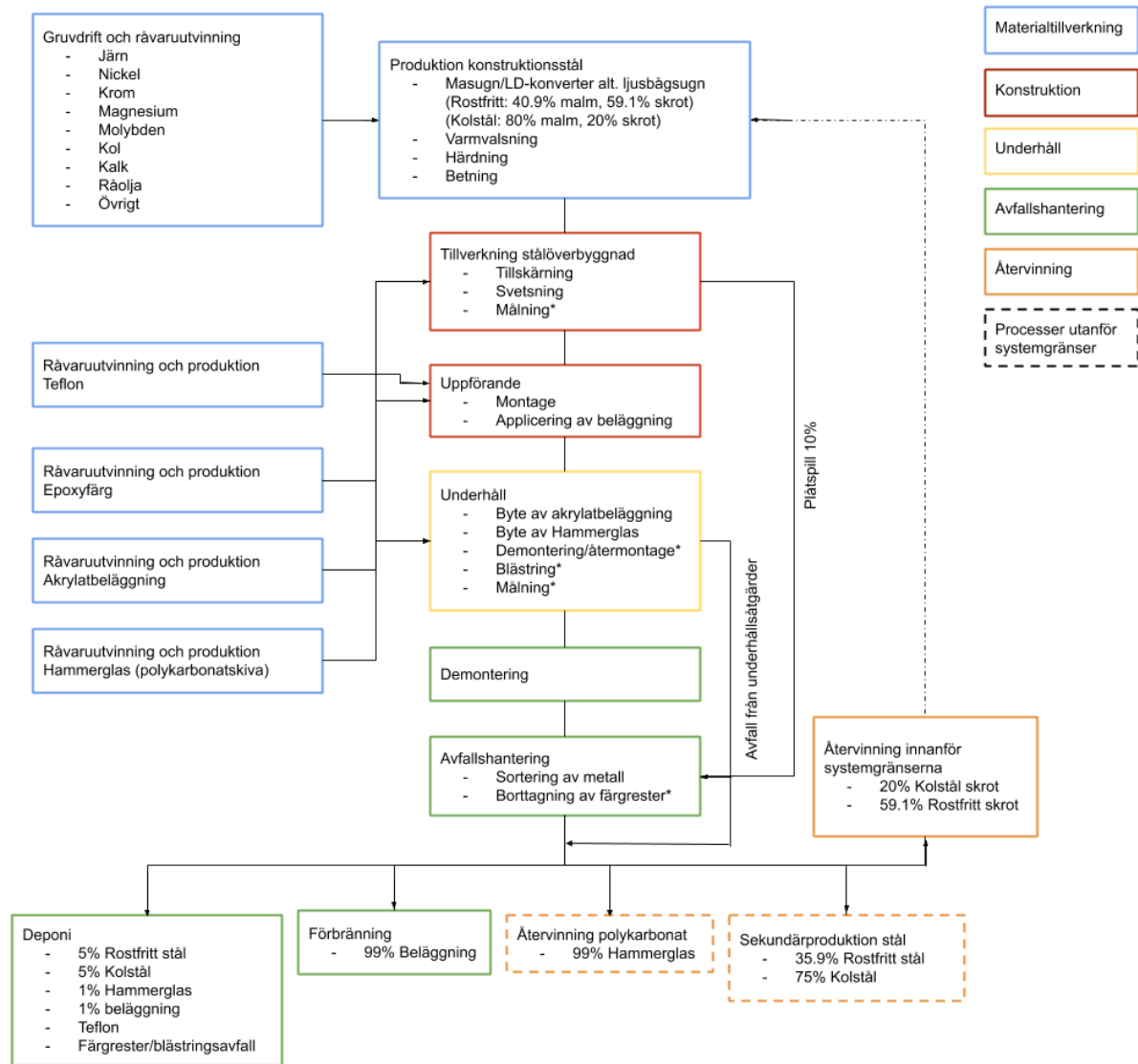
Tabell 5.1 Designspecifikation överbyggnad gång- och cykelbro

| | | |
|--------------------|------|----------------|
| Spännvidd | 26,1 | m |
| Fri bredd gångbana | 3 | m |
| Belagd yta | 78,3 | m ² |

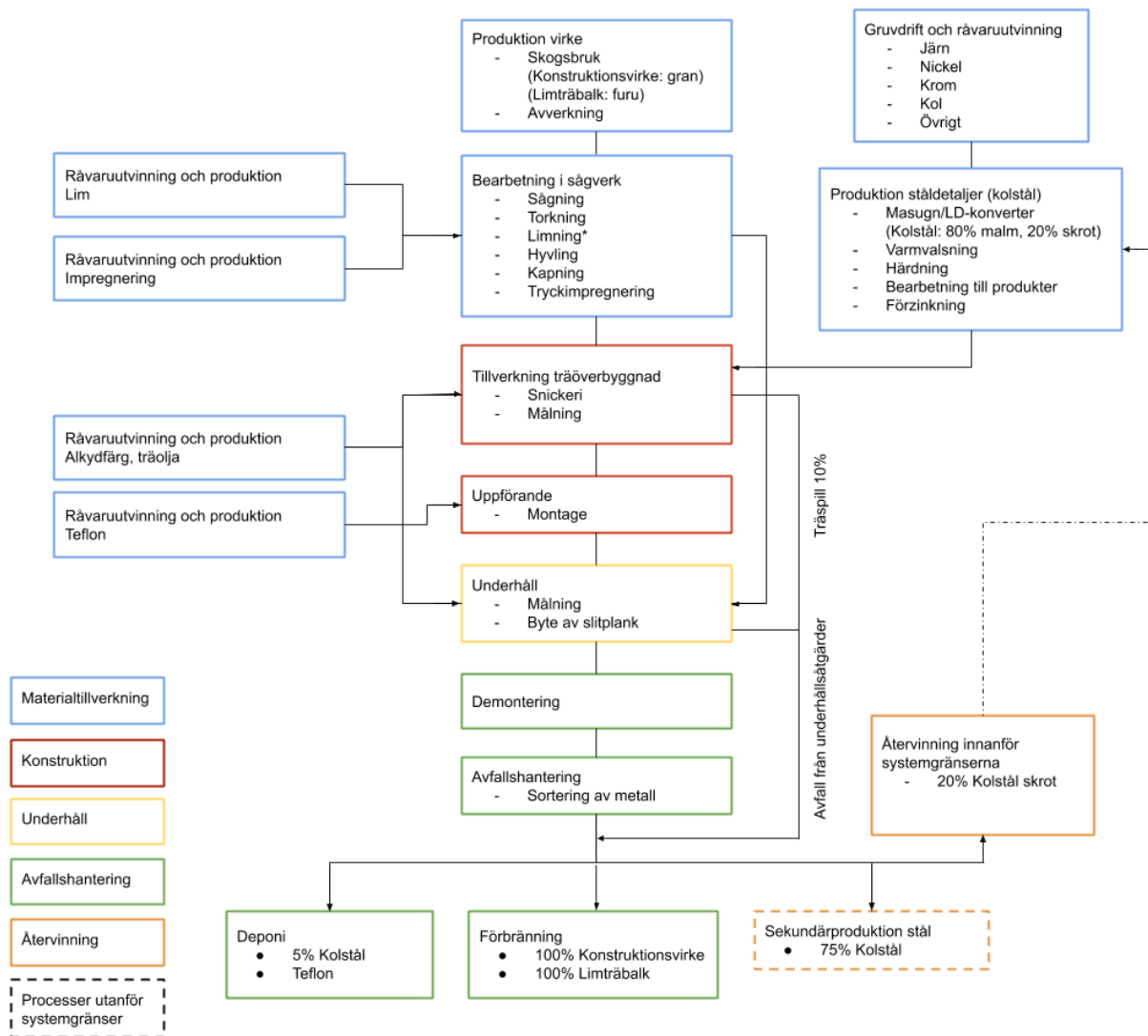
Det bör noteras att de två broalternativen i stål har en teknisk livslängd på 80 år medan alternativet i trä enbart är dimensionerad för 40 års livslängd. Denna variation beaktas genom att antagande att träbron behöver ersättas fullständigt en gång under den 80-årsperiod som definieras i den funktionella enheten.

5.1.3 Processdiagram

Systemgränser och enhetsprocesser för de olika broalternativen visas nedan i figur 5.1 och 5.2. Transporter samt tillverkning av bränsle visas ej specifikt. I processdiagrammen har även viss gruppering av enhetsprocesserna gjorts för att visa på vilka processer som hör till vilken fas i livscykeln.



Figur 5.1 Processdiagram för livscykel hos rostfri bro samt kolstålsbro



Figur 5.2 Processdiagram för livscykel hos träbro

5.1.5 Cut-offkriterier

För varje enhetsprocess gäller att flöden av material eller energi mindre än 1% av det totala in- och utflödet har borträknas om det inte har inneburit ett betydande miljöpåverkansbidrag. För material räknas detta baserat på massa dvs kriterierna utgår från fysiska egenskaper. Totalt sett för varje enhetsprocess gäller att högst 5% av samtliga in- och utflöden får exkluderas. I de fall där inventeringsdata är inhämtad från miljövarudeklarationer för materialtillverkningsfasen har cutoffkriterierna för dessa noterats så att överensstämmelse följer genom hela studien och att cutoffprinciper tillämpas konsekvent. Övrigt som faller utanför systemgränserna är tillverkning och underhåll av lokaler, maskiner och fordon för transporter samt infrastruktur. Ingen allokering görs för biprodukter som uppstår i materialtillverkningsfasen, tex slagg vid ståltillverkningen.

5.1.6 Datakällor

Vad gäller datakällor baseras inventeringsdatan med avseende på nyttjade material i första hand på existerande miljövarudeklarationer där resultatet räknas om för att motsvara de aktuella mängderna för varje broalternativ. I de fall där miljövarudeklarationer inte finns tillgängliga samt för enhetsprocesser

inom konstruktion, montage, underhåll och rivning som inte primärt relaterar till ett materialflöde hämtas data från Ecoinvent v3.5 med systemmodell "Allocation, at the point of substitution". För transporter har sträckor för frakt uppskattats och miljöbelastning per transporterad sträcka även där hämtats från Ecoinvent v3.5. Detta gäller inte för transporter som sker internt inom enhetsprocesserna i materialtillverkningsfasen och då är inkluderade i respektive miljövarudeklaration. Förpackningar för material är inte heller inkluderat i LCA-studien bortsett gångbaneläggningen för stålbroarna samt den epoxibaserade färgen för kolstålbron då LCI-data för detta är inkluderat i miljövarudeklarationerna som använts som källa.

5.1.6.1 Geografisk täckning

Det geografiska täckningsområdet för livscykelanalysen är de nordiska länderna. Avsikten är att skapa så produktspecifika livscykelanalyser som möjligt och samtliga tre studerade broalternativ antas vara tillverkade i Sverige med de huvudsakliga konstruktionsmaterialen producerade inom de skandinaviska länderna. För inventeringsfasen prioriteras data från specifika produktionsanläggningar, med lokal bränslesammansättning och faktiska transportsträckor framför generisk data när så är möjligt. När data för svenska eller nordiska förhållanden eller inte har varit möjlig att finna har dock det geografiska täckningsområdet vidgats till i första hand europeisk, i andra hand global skala för att prioritera den tekniska täckningen. För de huvudsakliga materialen i broarna rostfritt stål, kolstål och limträ/trä är datakällorna miljövarudeklarationer baserade på tillverkning inom de nordiska länderna.

5.1.6.2 Teknisk täckning

Som nämnt ovan har data från specifika anläggningar och processer prioriterats framför genomsnittlig data vid inventeringen. Med avseende på materialtillverkning har i första hand data erhållits för de exakta produkter som ingår i broarnas livscykel. I annat fall har data för motsvarande ersättningsprodukt med samma egenskaper och så lik komposition som möjligt som den nyttjade produkten antagits. När anläggningsspecifik data saknas har generell data tillämpats med den geografiska täckningen som värderingsgrund mellan olika alternativa datakällor. Enhetsprocesserna som ingår i konstruktionsfas och användningsfas är jämfört med materialtillverkningsfasen i större utsträckning baserad på antaganden relaterat till material-, energi- och tidsåtgång för olika processer samt hur ofta olika underhållsåtgärder inträffar. Antagandena görs baserat på tidigare LCA-studier samt övriga informationskällor relaterat till de specifika broarna. För EoL-fas är det med hänsyn till den långa livslängden svårt att förutsäga hur relevanta processer kommer att se ut när rivning och återvinning blir aktuellt. Av denna anledning är datan giltig för nuvarande tillgängliga processtekniker och de återvinningsgrader som gäller i dagsläget.

5.1.6.3 Tidsmässig täckning

För samtliga enhetsprocesser gäller att aktuell data som möjligt eftersträvas efter att geografiska och tekniska täckningskrav beaktats. För samtliga konstruktionsmaterial har miljövarudeklarationer som vid livscykelanalysens genomförande är inom giltighetsdatum används som datakällor bortsett hamnglasat där giltighetsperioden sträckte sig fram till 2017 (3form LLC 2014). Det bör noteras att datainsamling för produktionsanläggningarna har skett upp till ett par år före miljövarudeklarationens publicering. Den LCA-databas som används för generisk data, Ecoinvent 3.5, är den i dagsläget senaste versionen och där den tidsmässiga täckningsperioden sträcker sig fram till 2018 alternativt 2019 för den processdata som inhämtas. För återvinningsfasen gäller här samma antagande som för den tekniska täckningen då det är omöjligt att med bestämdhet förutse teknik och återvinningsgrader efter avslutad användningsfas. Data för dessa processer har antagits till för dagsläget gällande värden. Den tidsmässiga täckningen är därmed densamma som för materialutvinningsfasen då informationen framgår av miljövarudeklarationerna för respektive material.

5.1.7 Miljöpåverkanskategorier

För inventeringen har fem miljöpåverkanskategorier valts vilka visas i tabell 5.2 med respektive förkortning och enhet. Valet av dessa har gjorts baserat på de kategorier som förekommer i miljövarudeklarationer som tagits fram utifrån produktspecifika regler för byggnadsmaterial, samt de kategorier som förekommer i andra livscykelanalyser på broar som ämnat att ge en så heltäckande bild som möjligt av miljöpåverkan. För miljöpåverkansbedömningen där inventeringsresultatet kopplas till kategorierna används de modeller och faktorer som anges i CML2001. CML2001 är en metod för klassificering och karaktärisering som beskriver kopplingen till ett antal miljöpåverkanskategorier för en stor mängd olika ämnen (CML 2016). I denna studie kommer effekterna som kan ses på miljön för respektive kategori att kvantifieras och redovisas. Det är dock dessa effekters negativa inverkan på de så kallade kategorislutpunkterna som utgör det faktiska miljöproblemet, se tabell 5.2.

Tabell 5.2 Beskrivning av miljöpåverkanskategorier (SimaPro 2019)

| Miljöpåverkans-kategori | Enhet | Modell | Indikator | Effekt och geografisk skala | Kategori-slutpunkt |
|--|---------------------------------------|------------------------|---|--|--|
| Klimatförändring (GWP) | kg CO ₂ -ekv | IPCC: GWP100 | Ökad nettoinstrålning | Global uppvärmning till följd av växthusgasutsläpp. Global omfattning. | Hälsa hos människor och miljö, materiell välfärd |
| Nedbrytning av stratosfäriskt ozon (ODP) | kg CFC11-ekv | WMO | Förtunning av stratosfäriskt ozonlager | Ökad andel UVB-strålning som tränger genom atmosfären. Global omfattning. | Hälsa hos människor och miljö, påverkan på biokemiska processer och byggnadsmaterial |
| Fotokemisk oxidation (POCP) | kg eten-ekv | UNECE trajectory model | Bildning av fotokemiska radikaler i marknära atmosfär | Ökning av reaktiva substanser i troposfären. Lokal och kontinental omfattning. | Hälsa hos människor och miljö, påverkan på växtlighet, smog |
| Försurning (AP) | kg SO ₂ -ekv | RAINS-10 | Ökning av mängden fria vätejoner i vatten | Sänkt pH-värde i nederbörd, mark och vattendrag. Lokal och kontinental omfattning. | Påverkan på mark, yt- och grundvatten, ekosystem och byggnadsmaterial |
| Övergödning (EP) | kg PO ₄ ³⁻ -ekv | Heijungs, 1992 | Ökad förekomst av makro-nutrientier | Ökad närings-tillförsel till ekosystem. Lokal och kontinental omfattning. | Påverkan på mark, vattennära ekosystem och färskvattenkvalitet |

5.1.8 Systembeskrivning

Nedan följer en kortfattad beskrivning av de olika enhetsprocesserna i varje stadie under de tre broarnas livscyklar.

5.1.8.1 Materialtillverkning

De tre huvudsakliga materialen som används för tillverkning av broarna är rostfritt stål, kolstål respektive limträ/trävirke, där stålbroarna också har en betydande andel akrylatbeläggning som gångbanebeläggning och polykarbonat i form av hammergeglasskivorna. Produktion av dessa material beskrivs nedan.

Stål som tillverkas från malm, dvs primärproduktion, sker med två huvudprocesser: masugn och LD-konverter (Bauforum Stahl 2018). I den förstnämnda sintras malm, kalksten, kol och koksgas vilket innebär att fast partiklar sammanfogas vid mycket hög temperatur. Från masugnen tappas slagg och råjärn som leds vidare till LD-konverter där syre tillförs smältan. Detta får järnet att reduceras, kolhalten sänks och järnet blir till stål som gjuts. Det är tekniskt möjligt att inkludera upp till ca 35% skrot som råmaterial i processen utöver malm (Bauforum Stahl 2018). Ståltillverkning med skrot i stället för malm som primär råvara, sekundärproduktion, sker istället med en så kallad ljusbågsugn. Detta innebär elektrisk upphettning av metallen till flytande stål som redan raffinerats dvs att svavel-, kol- och fosforhalten justeras till den önskade. Stålet bearbetas sedan vidare genom varmvalsning till plåtar av önskad dimension som slutligen härddas (Bauforum Stahl 2018). För att rostfritt stål ska få sin karakteristiska oxiderade yta picklas och betas det vilket huvudsakligen innebär att det behandlas med en syralösning (Euro-Inox 2004). Stålet som används för detaljer till träbron förzinkas som ytbehandling mot korrosion (Träguiden 2007). Spill som sker i stålproduktionen återvinns internt (Outokumpu 2014, SSAB 2014).

Akrylatbelägningen består av två hartskomponenter och ett sammanlänkande bindemedel som reagerar kemiskt vid installation och härddar till ett mycket hårt material (FEICA 2015). Den exakta kemiska sammansättningen av produkten (ULFCAR Acrydur Bridge) är inte tillgänglig men de huvudsakliga komponenterna är epoxy, polyuretan och metylmetakrylatharts som samtliga tillverkas med råolja som bas (ULFCAR 2019a, PlasticsEurope 2019a). Avfallshantering i produktionen sker med förbränning (FEICA 2015).

Hammergeglasskivorna till stålbroarna är tillverkade av plasten polykarbonat (Hammerglas AB 2019a). Polykarbonat tillverkas med råolja som huvudråvara genom en petrokemisk framställningsprocess där bisfenol A som reagerar med gasen fosgen. Plastgranulatet som bildas vid tillverkningsprocessen smälts sedan ned och gjuts till plastskivor i önskas dimension. De färdiga skivorna har en tunn ytfilm av plasten polyeten (PlasticsEurope 2019b). Interna transporter i produktionen sker med lastbil (3form LLC 2014). De färdiga skivorna har mycket hög hållfasthet och beständighet för krosskador (Hammerglas AB 2019).

Konstruktionsvirket och limträbalkarna för träbron består av tryckimpregnerad furu respektive gran. Samtlig trävara kommer från hållbartscertifierat skogsbruk. Efter avverkning skickas timret med lastbil till sågverk (Moelven 2016, Moelven 2018). Virke avsett för limträbalkar sågas specifikt till ca 45 mm tjocka lamellskivor. Efter sågning torkas virket och lamellskivorna för limträproduktion limmas därefter samman till balkar (Moelven 2018). Konstruktionsvirke och limträbalkar hyvlas och

kapas slutligen till rätt dimension varefter tryckimpregnering sker. Ekonomisk allokering görs med avseende på skogsbruk mellan trä avsett för massaproduktion och trä för virke. Även för processerna i sågverket är allokering gjord för det producerade virket baserat på ekonomiskt värde mellan olika typer av sågade produkter (Moelven 2016, Moelven 2018). Då livscykelanalysen är av omfattningen "vagga till grav" kommer upptag av biogent kol genom inbindning av koldioxid vid odling av trä att kompenseras av ett lika stort koldioxidutsläpp vid förbränning i avfallshanteringen. Nettoutsläppet över hela livslängden är således noll. Med hänsyn till detta har såväl upptag samt utsläpp av biogent kol exkluderats. Koldioxidutsläpp som hänförs materialtillverkning av trävaror kommer enbart från skogsbruk samt förädlingsprocessen för att framställa användbart virke.

För samtliga datakällor som utgörs av miljövarudeklarationer är transporter inkluderade i materialtillverkningsprocessen.

5.1.7.2 Konstruktion

Konstruktionen av broarna i rostfritt stål och kolstål antas ske i Sölvesborg. Plåtarna skärs med vatten- eller plasmaskärare och svetsas sedan samman till den färdiga konstruktionen (Södergren 2019). För tillskärning av plåtarna antas samma elförbrukning som för svetsning. Efter konstruktion målas bron i kolstål med epoxibaserad färg för att skydda stålet mot korrosion. 1 liter färg antas räcka till 1 m², inklusive spill (Tralla 2019). Transport av bron till plats för uppförande, Södertälje, sker med lastbil och väl på plats lyfts bron med kranbil på fundamenten (Södergren 2019). Lyftprocessen antas pågå under 1 h effektiv tid med kranbil med effekt på > 100 hp (Binsell AB 2019). Applicering av beläggning samt montering av Hammerglasskivorna sker också under konstruktionsfasen. Bultar för montering av skivorna har exkluderats på grund av massa.

Tillverkning av träbron antas ske i orten Bygdsiljum, Skellefteå där Martinssons Trä har produktionsanläggning (Martinssons 2019b). Detta sker på samma anläggning som konstruktionsvirket och limträt sågas och behandlas i övrigt varvid inga transporter mellan sågverk och konstruktionsplats för bron inkluderas. Vid konstruktionsprocessen antas en elåtgång på 350 kWh viktat med hänsyn till broarea vid konstruktion av en liknande träbro (Pousette et. al. 2014). Bron målas med träolja med åtgång 1 liter per m² samt två lager pigmenterad alkydfärg med åtgång om 7 liter per m² per strykning (Martinssons 2019c). Transport till uppförandeplats och montage sker på samma sätt som för stålbroarna med lastbil.

10% av rostfritt stål, kolstål och konstruktionsvirke antas bli spill i konstruktionsfasen och gå direkt till återvinningsfasen, se processdiagramen i figur 5.1 och 5.2. Detta beräknas genom att massan producerat material multipliceras med 1.1 och detsamma för massan material i slutåtervinning..

5.1.8.3 Underhåll

Under broarnas livslängd krävs en rad underhållsåtgärder för att såväl bärighet som funktionalitet ska bibehållas. Samtliga underhållsåtgärder som ingår i denna LCA presenteras i tabell 5.3 nedan med angivet tidsintervall för när åtgärden behöver utföras. Till samtliga underhållsåtgärder i tabell 5.3 tillkommer frakt samt eventuell avfallshantering av material. Inga underhållsåtgärder sker det året broarna rivs, dvs år 80.

Tabell 5.3 Underhållsåtgärder som inkluderas i livscykelanalys

| Underhåll | Rostfritt (intervall år) | Kolstål (intervall år) | Trä (intervall år) |
|--|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Ersättning av träbro (Martinssons 2019a) | | | 40 |
| Ommålning av kolstålbro (Okasha et. al 2012) | | 20 | |
| Byte av akrylatbeläggning (ULFCAR 2019b) | 40 | 40 | |
| Byte av hammergeglas (Hammergeglas AB 2019b) | 40 | 40 | |
| Ommålning av träbro (Martinssons 2019c) | | | 10 |
| Byte av slitplank på träbro (Martinssons 2019c) | | | 20 |

Ommålning av träbron innebär samma behandling som vid första målningstillfället dvs inoljning och strykning med alkydfärg. Träbron målas om på plats. Intervallet mellan byte av slitplank beror till stor del på hur hårt slitaget bron är utsatt för (Martinssons 2019c). I denna livscykelanalys antas att slitplanket byts en gång under träbronns 40-åriga tekniska livslängd. Underhållsåtgärderna är i beräkningarna justerade så att de inte sammanfaller i en osannolik kombination dvs ommålning samt byte av slitplank sker inte samma år som träbron behöver ersättas.

Fullständig ommålning av kolstålsbron antas utföras i verkstad. Vid arbete i fält krävs exempelvis skyddsintäckning för blästring vilket undviks om arbetet kan göras inomhus (Södergren 2019). Därmed att inkluderas ned- och återmontering med lyftkran samt transport till och från verkstad vid underhåll. Innan ommålning kan ske blästras den gamla färgen bort. Blästring och målning bedöms kräva nyttjande av två kompressorer under ca 60 h vardera vilket är viktat baserat på målade area utifrån analys av en liknande bro (Tralla 2019) med effekt på 22 kW (BIAB 2019). Blästersand är exkluderad från livscykelanalysen.

Den rostfria bron är inte i behov av några underhållsåtgärder förknippade specifikt till stålkonstruktionen men för både denna bro och kolstålsbron antas akrylatbeläggningen och hammergeglasskivorna behöva bytas en gång under livslängden med hänsyn till livslängden som anges av respektive tillverkare.

5.1.8.4 Rivning, avfallshantering och återvinning

Demontering efter avslutad livslängd utgörs för samtliga tre broalternativ av nedlyftning av den använda broöverbyggnaden från fundamenten samt transport av samtligt rivningsmaterial till gemensam avfallanläggning. Transporter bortom detta skede är inte beräknade. Förutom rivning innefattar en-of-life-stadiet i livscykeln även hantering av avfallet på avfallsanläggning och återvinning av materialen, både innanför och utanför systemgränserna. Gällande avfallshantering är processen för sortering och annan bearbetning av stålsrot densamma för båda ståltyperna. För kolstålsbron tillkommer dock även process för avlägsnande av färgen från stålkonstruktionen. Epoxifärgrester läggs på deponi (Wargsjö 1998). Sortering av plast, dvs polykarbonatskivorna, är inte inkluderat baserat på försumbart miljöpåverkansbidrag (Garrain et. al. 2007). I processerna kopplade

till materialåtervinning tillkommer också massan av de 10% spill som uppstår vid konstruktion av broarna.

Av både kolstål och rostfritt stål återvinns 95% materialet och 5% går till deponi som inert rivningsavfall för att inkludera oavsiktligt bortfall i återvinningsprocessen. Den andel av stålet som inte återvinns inom systemet som inflöde av skrot till materialtillverkningen antas ersätta nyproducerat stål från malm genom systemutvidgning till sekundärtillverkning av stål. Principen för detta är beskriven tidigare i avsnitt 3.2.3. Hammerglasskivorna återvinns till 95% där denna mängd ersätter primärproduktion av polykarbonat genom systemutvidgning. Övriga 5% går till deponi. Beläggningen från de två stålbroarna samt färgen från kolstälbron går till förbränning vilket enligt uppgift kan göras i konventionell avfallsförbränningsanläggning (FEICA 2015). 99% av materialet förbränns och resterande 1% går till deponi. Konstruktionsvirket och limträbalkarna från träbron går till förbränning efter passerad livslängd. Inget utsläpp av biogent kol i form av koldioxid räknas från förbränningen då samma mängd som släpps ut i denna process har tagits upp vid tillväxt av skog under materialtillverkningsfasen. Ingen systemutvidgning för energiproduktion görs för eventuell el och fjärrvärme som genereras vid förbränning.

5.1.8.5 Trafikomledning

Vid initialt montage, vid rivning samt i samband med ommålning av kolstålsbron kan trafik på och under bron påverkas. Antas att broarna i denna studie är belägna på samma plats som den rostfria bron som redan uppförts, dvs i anknötning till trafikplats Södertälje Syd kommer trafiken på väg E4 att beröras i en köriktning. På aktuell sträcka av E4:an är årsdygnstrafiken i norrgående köriktning enligt tabell 5.4 nedan (Trafikverket 2016).

Tabell 5.4 Årsdygnstrafik väg E4 vid trafikplats Södertälje Syd

| | Personbilar | Lastbilar | Fordon totalt |
|----------------|-------------|-----------|---------------|
| Årsdygnstrafik | 16980 | 2060 | 19040 |

De tre broalternativen som undersöks i denna LCA behöver inte nödvändigtvis vara placerade över en väg med så hög trafikbelastning som väg E4, utan exempelvis över en mindre väg eller vattendrag. Därför är LCA-resultatet från trafikpåverkan presenterat separat. Detta ligger således utanför systemgränserna för LCA:n men undersöks ändå för att visa på effekterna.

När bron lyfts på eller av fundamenten antas detta leda till en avstängning av en köriktning för väg E4 under 3 timmar och ett behov av att leda om trafiken. Den extra körsträcka som erfordras leder i sin tur till ökade utsläpp från de fordon som berörs. Leds trafiken om mellan trafikplats Södertälje Syd och nästa trafikplats i riktning mot Södertälje blir den extra körsträckan 1,3 km. Målas kolstälbron om i verkstad blir detta således relevant två gånger under i samband med varje ommålningstillfälle. I övrigt endast en gång per tillfälle vid uppförande eller rivning för samtliga tre broformningar. Vid ommålning av träbron antas vägtrafiken inte behöva ledas om utan avstängning av ett körfält bedöms vara tillräckligt under de dagar som arbetet pågår.

5.2 Inventering

5.2.1 Mängder

Materialmängder samt övriga relevanta uppgifter för beräkningarna i inventeringsfasen och senare i miljöpåverkansbedömningen presenteras i tabell 5.5 nedan för de tre broarna. Stålmängder för den rostfria bron och kolstålsbron kan hänföras till tabell 4.1 i kapitel 4 där konstruktionsberäkningarna redovisas. Mängderna är ökade med 10% jämfört med värdena i 4.1 för att ta hänsyn till spill i produktionsfasen enligt vad som anges i 5.1.8.1. För konsekvens har även mängder för konstruktionsvirket och limträbalkarna ökat med motsvarande andel.

Tabell 5.5 Materialmängder för rostfri bro, kolstålsbro och träbro

| Material | Rostfritt stål | Kolstål | Trä | Enhet |
|--------------------|----------------|---------|------|----------------|
| Hammerglas | 0,61 | 0,61 | | ton |
| Akrylatbeläggning | 1,73 | 1,73 | | ton |
| Stål, överbyggnad | 16,5 | 21,1 | | ton |
| Limträ | | | 6,02 | ton |
| Konstruktionsvirke | | | 12,5 | ton |
| Förzinkat stål | | | 1,24 | ton |
| Målad yta | | 295 | 513 | m ² |
| Längd svets | 1010 | 1010 | | m |
| Längd skuren plåt | 377 | 377 | | m |
| Teflon | 3,26 | 3,26 | 3,26 | kg |

5.2.2 LCI materialtillverkning

I bilaga 1 tabell 1 presenteras samtliga material för vilka data har insamlats för i inventeringen. Datan används för beräkningar kopplade till materialtillverkningsfasen samt i vissa fall även underhållsfasen då nytt material behöver tillföras någon av broarna. För varje material anges användningsområde i den funktionella enheten, andel återvunnet material respektive jungfruliga råvaror som inflöde i produktionen, eventuellt övriga antagande som görs, ursprungskälla för inventeringsdata samt tidsmässig och geografisk giltighet för denna. I tabell 5.6 återfinns en sammanställning av data från bilaga 1 gällande materialursprung i produktionsfasen samt vilka eventuella återvinningsgrader som antas för beräkningarna. Notera att andelen closed-loopåtervinning för de båda stålsorterna, dvs den procentuella andelen återvunnet material i produktionen, är baserad på de återvinningsgrader som anges i respektive miljövarudeklaration vilket i sin tur beror på bland annat produktionsmetod och tillgång på skrot respektive malm.

Tabell 5.6 Beskrivning av återvinningsgrader för konstruktionsmaterial i de studerade broarna

| Material | Ursprung i tillverkningsfasen | Eventuell återvinningsgrad efter rivning | Slutbehandling |
|--|--|--|--|
| Rostfritt stål | 40,9 % kolstålskrot och jungfruliga legeringsämnen, 59,1 % återvunnen rostfri skrot. | 95% | 5% deponi 59,1% återvinning inom systemet 35,9% återvinning med systemutvidgning |
| Kolstål | 80 % järnmalm, 20 % återvunnen stålskrot. | 95% | 5% deponi 20% återvinning inom systemet 75% återvinning med systemutvidgning |
| Limträ, inkl impregnering och färg | 100% nyproduktion | | 100% förbränning |
| Konstruktionsvirke, inkl impregnering och färg | 100% nyproduktion | | 100% förbränning |
| Hammerglas | 100% nyproduktion | 95% | 95% återvinning med systemutvidgning 5% deponi |
| Akrylatbeläggning | 100% nyproduktion | | 99% förbränning 1% deponi |
| Teflon | 100% nyproduktion | | 100% deponi |
| Epoxyfärg | 100% nyproduktion | | 100% deponi |

5.2.3 LCI konstruktion och underhåll

Processer som kan knytas till konstruktionsfasen och/eller underhållsfasen för en eller flera av broarna presenteras i bilaga 1 tabell 2 tillsammans med beskrivning av funktion i det studerade systemet, eventuella antaganden som görs, ursprungskälla för inventeringsdata samt tidsmässig och geografisk giltighet för denna.

5.2.4 LCI Rivning, avfallshantering och återvinning

Processer som kopplas till hantering av rivningsavfallet, återvinning och annan slutbehandling av materialet visas i bilaga 1 tabell 3. För varje process anges funktion i det studerade systemet, eventuellt övriga relevanta uppgifter eller antagande som görs, ursprungskälla för inventeringsdata samt tidsmässig och geografisk giltighet för denna.

5.2.5 LCI transporter och trafikstörning

De två fordonstyper, lastbil och personbil, som inventeringsdata insamlas för visas i bilaga 1 tabell 4 tillsammans med, ursprungskälla för inventeringsdata samt tidsmässig och geografisk giltighet för denna. Beräkning av utsläpp för transport med lastbil görs baserat på fraktad vikt och sträcka, för personbil beror utsläpp enbart på sträckan. Ingen frakt sker med personbil utan denna data är enbart för beräkning av extra miljöpåverkan vid trafikomledning. Transportsträckor under broarnas samtliga faser i livscyklerna för frakt av material visas i bilaga 1 tabell 5-7.

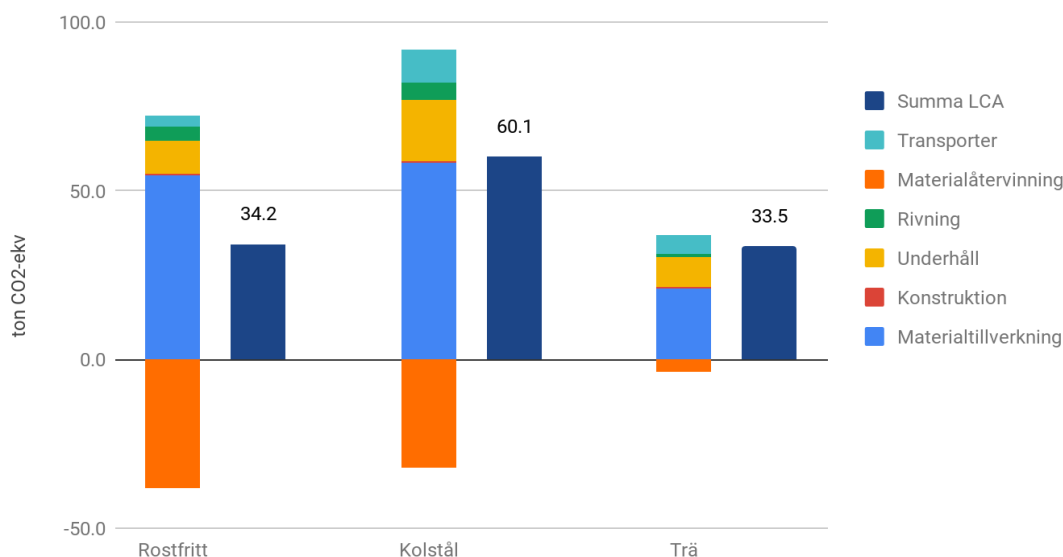
5.3 Miljöpåverkansbedömning

Baserat på datan från inventeringen har resultat för de fem miljöpåverkanskategorierna kunnat beräknas och resultat presenteras i avsnitt 5.3.1-5.3.5. För träbron gäller samtliga värden för två träbroöverbyggnader då detta är vad som krävs för att uppfylla den funktionella enheten. Inventeringen har gjorts för en bro och därefter har samtliga resultat multiplicerats med en faktor två, med kompensation för att brolagerna kan bibehållas under hela livslängden på 80 år.

5.3.1 Klimatförändring

LCA-resultat för utsläpp av växthusgaser visas i figur 5.3. För varje bro visar den vänstra stapeln resultatet uppdelat på varje livscykelphas och den högra stapeln den totala summan för hela livscykeln dvs nettoresultatet efter kreditering på grund av återvinning. Resultatet visas också som siffervärden i tabell 5.7. I tabell 5.8 visas den procentuella skillnaden för kolstålbron och träbron i förhållande till den rostfria bron. För alla broar dominerar materialtillverkningsfasen, därefter underhållsfasen. Sammanlagt över livscykeln kommer träbron att generera lägst mängd CO₂-ekvivalenter. Den rostfria bron har ett resultat bara något högre medan kolstålbron är förknippad med klart högst miljöbelastning. De två stålbroarna får en stor fördel av systemutvidgningen där stålet återvinns.

Klimatförändring GWP



Figur 5.3 LCA-resultat för utsläpp av CO₂-ekvivalenter [ton]

Tabell 5.7 LCA-resultat för utsläpp av CO₂-ekvivalenter [ton]

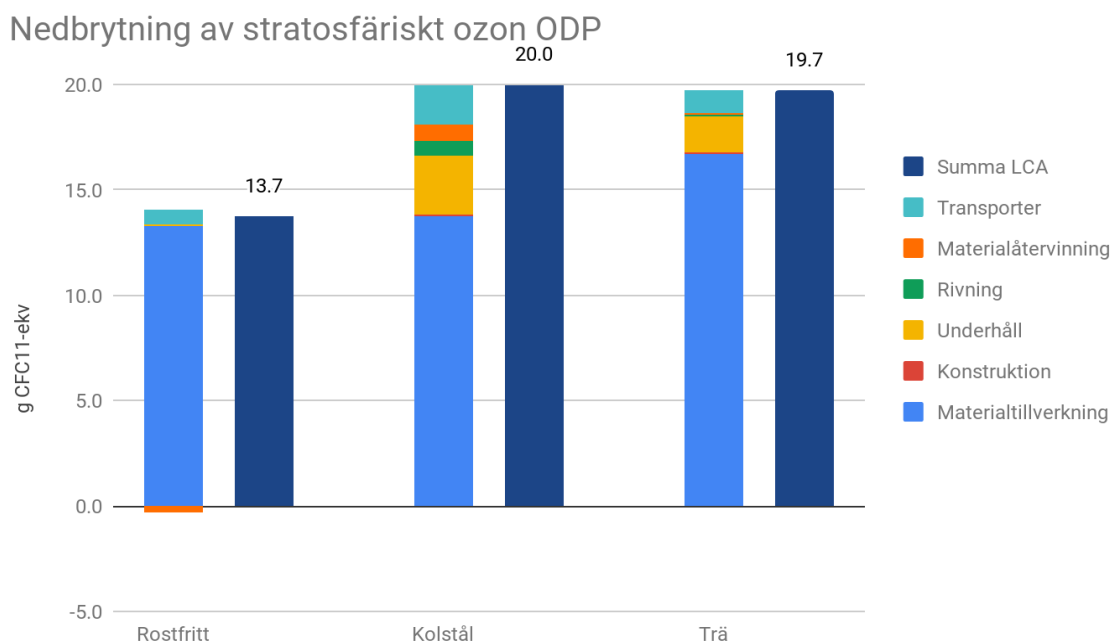
| | Material-tillverkning | Konstruktion | Underhåll | Rivning/avfalls-hantering | Återvinning utanför system | Transporter | Summa |
|-----------|-----------------------|--------------|-----------|---------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| Rostfritt | 54,4 | 0,4 | 10,1 | 4,2 | -38,2 | 3,5 | 34,2 |
| Kolstål | 58,4 | 0,4 | 18,2 | 5,1 | -32,0 | 9,9 | 60,1 |
| Trä | 21,2 | 0,5 | 8,8 | 1,0 | -3,6 | 5,6 | 33,5 |

Tabell 5.8 Procentuellt förhållande till rostfri bro (normaliserat till 100%) med avseende på utsläpp av CO₂-ekvivalenter

| | Material-tillverkning | Konstruktion | Underhåll | Rivning/avfalls-hantering | Återvinning utanför system | Transporter | Summa |
|---------|-----------------------|--------------|-----------|---------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| Kolstål | 107% | 100% | 181% | 122% | 84% | 287% | 175% |
| Trä | 39% | 111% | 88% | 23% | 9% | 163% | 98% |

5.3.2 Nedbrytning av stratosfäriskt ozon

LCA-resultat med för utsläpp av CFC11-ekvivalenter visas i figur 5.4. Resultatet visas också som siffervärden i tabell 5.9. I tabell 5.10 visas den procentuella skillnaden för kolstålbron och träbron i förhållande till den rostfria bron. Materialtillverkning ger störst påverkan av livscykelns faser och över hela livscykeln har den rostfria bron lägst resultat. Träbron och kolstålbron har närmast identisk totalsumma.



Figur 5.4 LCA-resultat utsläpp av CFC11-ekvivalenter [g]

Tabell 5.9 LCA-resultat för utsläpp av CFC11-ekvivalenter [g]

| | Material-tillverkning | Konstruktion | Underhåll | Rivning/avfalls-hantering | Återvinning utanför system | Transporter | Summa |
|-----------|-----------------------|--------------|-----------|---------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| Rostfritt | 13,3 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | -0,3 | 0,6 | 13,7 |
| Kolstål | 13,8 | 0,0 | 2,8 | 0,7 | 0,8 | 1,8 | 20,0 |
| Trä | 16,7 | 0,1 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 1,1 | 19,7 |

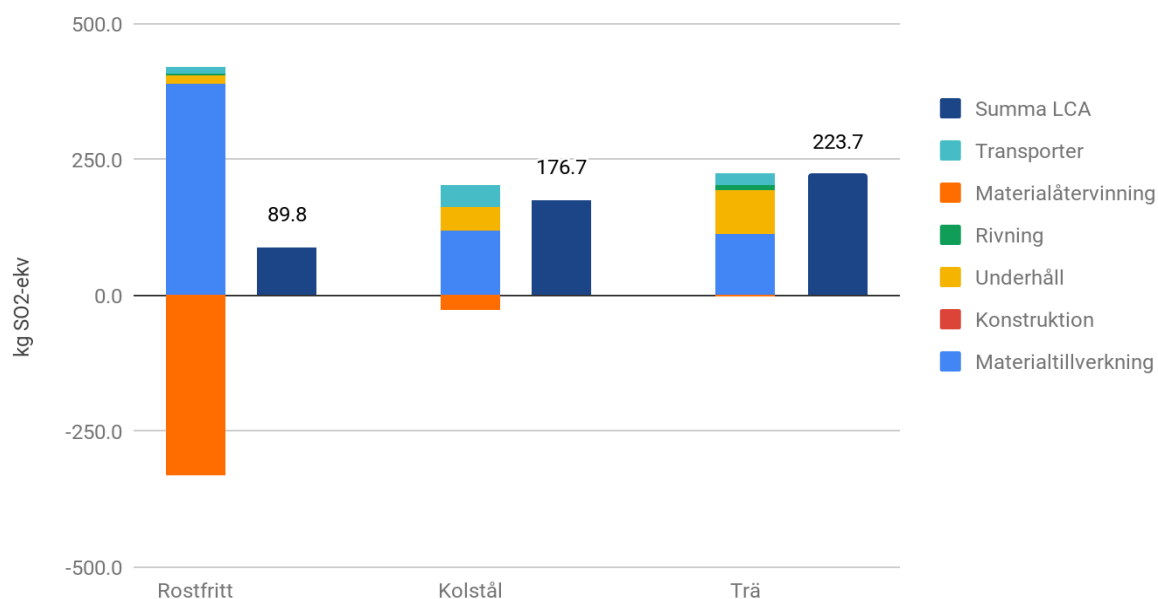
Tabell 5.10 Procentuellt förhållande till rostfri bro (normaliserat till 100%) med avseende på utsläpp av CFC11-ekvivalenter

| | Material-tillverkning | Konstruktion | Underhåll | Rivning/avfalls-hantering | Återvinning utanför system | Transporter | Summa |
|---------|-----------------------|--------------|-----------|---------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| Kolstål | 104% | 100% | 5393% | 2671% | -263% | 287% | 145% |
| Trä | 126% | 405% | 3196% | 265% | -37% | 164% | 144% |

5.3.3 Förurning

LCA-resultat för utsläpp av SO₂-ekvivalenter visas i figur 5.5. Resultatet visas också som siffervärden i tabell 5.11. I tabell 5.12 visas den procentuella skillnaden för kolstålbron och träbron i förhållande till den rostfria bron. Materialtillverkningsfasen ger störst bidrag till förurning för de två stålbroarna medan underhållsfasen för träbron är störst. I sammanlagt resultat av SO₂-ekvivalenter över hela livscykeln har den rostfria bron lägst resultat, därefter kolstålbron och sist träbron. Den rostfria bron får en stor fördel av systemutvidgningen där stålet återvinns.

Förurning AP



Figur 5.5 LCA-resultat för utsläpp av SO₂-ekvivalenter [kg]

Tabell 5.11 LCA-resultat för utsläpp av SO₂-ekvivalenter [kg]

| | Material-tillverkning | Konstruktion | Underhåll | Rivning/avfalls-hantering | Återvinning utanför system | Transporter | Summa |
|-----------|-----------------------|--------------|-----------|---------------------------|----------------------------|-------------|--------------|
| Rostfritt | 388,7 | 1,1 | 16,8 | 1,1 | -331,2 | 13,4 | 89,8 |
| Kolstål | 119,5 | 1,1 | 43,2 | 0,5 | -25,9 | 38,3 | 176,7 |
| Trä | 112,2 | 2,6 | 79,5 | 10,2 | -2,5 | 21,8 | 223,7 |

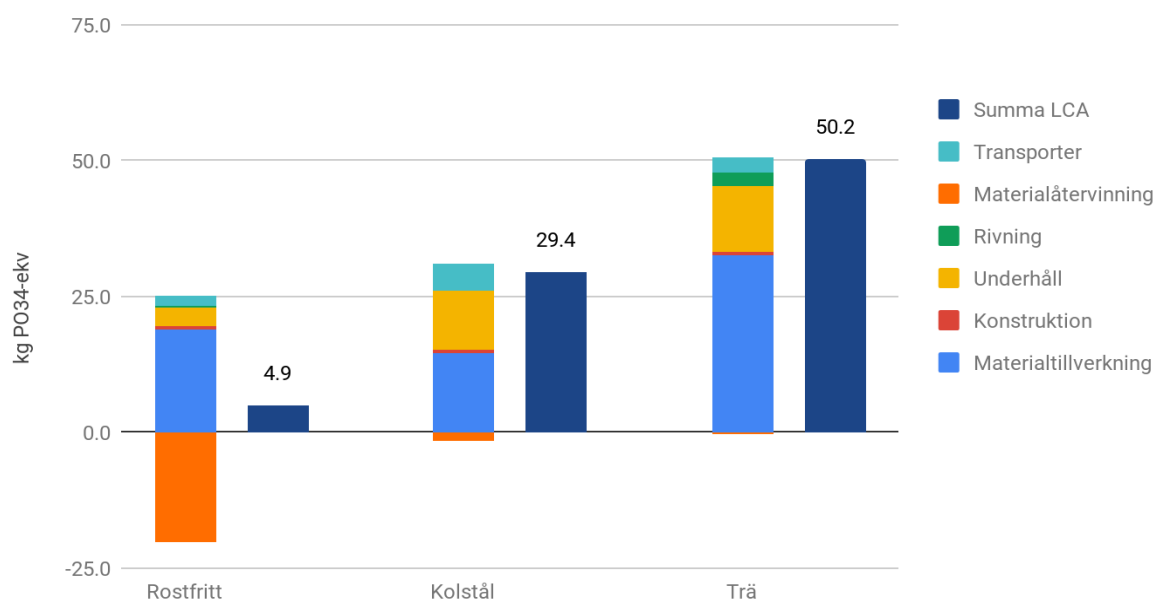
Tabell 5.12 Procentuellt förhållande till rostfri bro (normaliserat till 100%) med avseende på utsläpp av SO₂-ekvivalenter

| | Material-tillverkning | Konstruktion | Underhåll | Rivning/avfalls-hantering | Återvinning utanför system | Transporter | Summa |
|---------|-----------------------|--------------|-----------|---------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| Kolstål | 31% | 100% | 258% | 47% | 8% | 287% | 197% |
| Trä | 29% | 243% | 474% | 932% | 1% | 164% | 249% |

5.3.4 Övergödning

LCA-resultat med hänsyn till utsläpp av PO₄³⁻-ekvivalenter visas i figur 5.6. Resultatet visas också som siffervärden i tabell 5.13 I tabell 5.14 visas den procentuella skillnaden för kolstålbron och träbron i förhållande till den rostfria bron. Den rostfria bron har lägst resultat över hela livscykeln, därefter kolstålbron och sist träbron. För kolstålbron och träbron genererar underhållsfasen en stor del av det totala resultatet även om materialtillverkningsfasen är störst för alla tre alternativ. Den rostfria bron har även för denna miljöpåverkanskategori stor fördel av systemutvidgning med återvinning av stålet.

Övergödning EP



Figur 5.6 LCA-resultat för utsläpp av PO₄³⁻-ekvivalenter [kg]

Tabell 5.13 LCA-resultat för PO_4^{3-} -ekvivalenter [kg]

| | Material-tillverkning | Konstruktion | Underhåll | Rivning/avfalls-hantering | Återvinning utanför system | Transporter | Summa |
|-----------|-----------------------|--------------|-----------|---------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| Rostfritt | 19,1 | 0,6 | 3,4 | 0,4 | -20,2 | 1,7 | 4,9 |
| Kolstål | 14,6 | 0,6 | 10,8 | 0,2 | -1,5 | 4,8 | 29,4 |
| Trä | 32,5 | 0,6 | 12,2 | 2,4 | -0,2 | 2,8 | 50,2 |

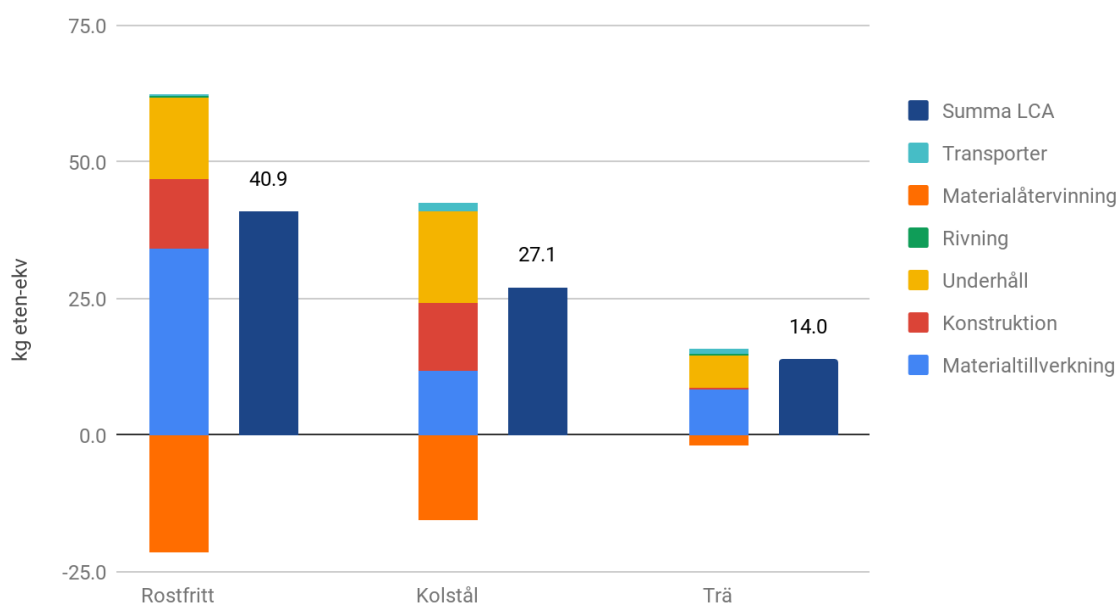
Tabell 5.14 Procentuellt förhållande till rostfri bro (normaliserat till 100%) med avseende på utsläpp av PO_4^{3-} -ekvivalenter

| | Material-tillverkning | Konstruktion | Underhåll | Rivning/avfalls-hantering | Återvinning utanför system | Transporter | Summa |
|---------|-----------------------|--------------|-----------|---------------------------|----------------------------|-------------|--------------|
| Kolstål | 76% | 100% | 317% | 38% | 7% | 287% | 601% |
| Trä | 171% | 100% | 359% | 610% | 1% | 163% | 1026% |

5.3.5 Fotokemisk oxidation

LCA-resultat för utsläpp av eten-ekvivalenter visas i figur 5.7. Resultatet visas också som siffrvärden i tabell 5.15 I tabell 5.16 visas den procentuella skillnaden för kolstålbron och träbron i förhållande till den rostfria bron. Sett till hela livscykeln har den rostfria bron högst resultat därefter kolstålbron och sist träbron med lägst mängd eten-ekvivalenter. De två stålbroarna får en stor fördel av systemutvidgningen där stålet återvinns.

Fotokemisk oxidation POCP



Figur 5.7 LCA-resultat för utsläpp av eten-ekvivalenter [kg]

Tabell 5.15 LCA-resultat för utsläpp av eten-ekvivalenter [kg]

| | Material-tillverkning | Konstruktion | Underhåll | Rivning/avfalls-hantering | Återvinning utanför system | Transporter | Summa |
|-----------|-----------------------|--------------|-----------|---------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| Rostfritt | 34,3 | 12,6 | 15,1 | 0,0 | -21,6 | 0,6 | 40,9 |
| Kolstål | 11,6 | 12,6 | 16,8 | 0,0 | -15,6 | 1,6 | 27,1 |
| Trä | 8,4 | 0,2 | 5,9 | 0,4 | -1,8 | 0,9 | 14,0 |

Tabell 5.16 Procentuellt förhållande till rostfri bro (normaliserat till 100%) med avseende på utsläpp av eten-ekvivalenter

| | Material-tillverkning | Konstruktion | Underhåll | Rivning/avfalls-hantering | Återvinning utanför system | Transporter | Summa |
|---------|-----------------------|--------------|-----------|---------------------------|----------------------------|-------------|------------|
| Kolstål | 34% | 100% | 112% | 58% | 72% | 287% | 66% |
| Trä | 24% | 1% | 39% | 1200% | 8% | 163% | 34% |

5.3.6 Trafikomledning

Resultat för miljöpåverkan på grund av förlängd körsträcka vid omledning av trafiken på väg E4 i samband med montage, rivning och underhåll visas i tabell 5.17.

Tabell 5.17 LCA-resultat för situation med trafikomledning

| Miljöpåverkans-kategori | Enhet | 3h avstängning PB+LB |
|-------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| GWP | ton CO ₂ -ekv | 2,2 |
| ODP | g CFC11-ekv | 0,4 |
| AP | kg SO ₂ -ekv | 8,2 |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ -ekv | 1,6 |
| POCP | kg eten-ekv | 0,4 |

Tabell 5.18-20 visar LCA-resultat för de tre broarna när trafikomledning inkluderas i livscyklerna. Kolumnen summa motsvarar en direkt addition av påverkan från trafikavstängningen till resultatet från miljöpåverkansbedömningen i avsnitt 3.1.1-3.1.5. Den procentuella ökningen av det ursprungliga LCA-resultatet som detta orsakar visas också.

Tabell 5.18 Miljöpåverkan för rostfri bro inklusive bidrag från trafikomledning

| Miljöpåverkans-kategori | Enhet | Resultat för trafikomledning | Addition till LCA-resultat | Ökning |
|-------------------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------|--------|
| GWP | ton CO ₂ -ekv | 4,3 | 38,6 | 13% |
| ODP | g CFC11-ekv | 0,8 | 14,5 | 6% |
| AP | kg SO ₂ -ekv | 16,4 | 106,3 | 18% |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ -ekv | 3,3 | 8,2 | 67% |
| POCP | kg eten-ekv | 0,8 | 41,7 | 2% |

Tabell 5.19 Miljöpåverkan för kolstålsbro inklusive bidrag från trafikomledning

| Miljöpåverkans-kategori | Enhet | Resultat för trafikomledning | Addition till LCA-resultat | Ökning |
|-------------------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------|--------|
| GWP | ton CO ₂ -ekv | 17,4 | 77,5 | 29% |
| ODP | g CFC11-ekv | 3,0 | 23,0 | 15% |
| AP | kg SO ₂ -ekv | 65,7 | 242,3 | 37% |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ -ekv | 13,1 | 42,5 | 44% |
| POCP | kg eten-ekv | 3,0 | 30,1 | 11% |

Tabell 5.20 Miljöpåverkan för träbro inklusive bidrag från trafikomledning

| Miljöpåverkans-kategori | Enhet | Resultat för trafikomledning | Addition till LCA-resultat | Ökning |
|-------------------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------|--------|
| GWP | ton CO ₂ -ekv | 8,7 | 42,2 | 26% |
| ODP | g CFC11-ekv | 1,5 | 21,2 | 8% |
| AP | kg SO ₂ -ekv | 32,8 | 256,6 | 15% |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ -ekv | 6,5 | 56,8 | 13% |
| POCP | kg eten-ekv | 1,5 | 15,5 | 10% |

5.4 Tolkning

I livscykelanalysens tolkningsfas kommer resultatet från miljöpåverkansbedömningen samt datakällornas giltighet att analyseras och diskuteras. De allmänna slutsatserna och rekommendation till vidare studier återfinns dock i kapitel 8 Diskussion och slutsatser.

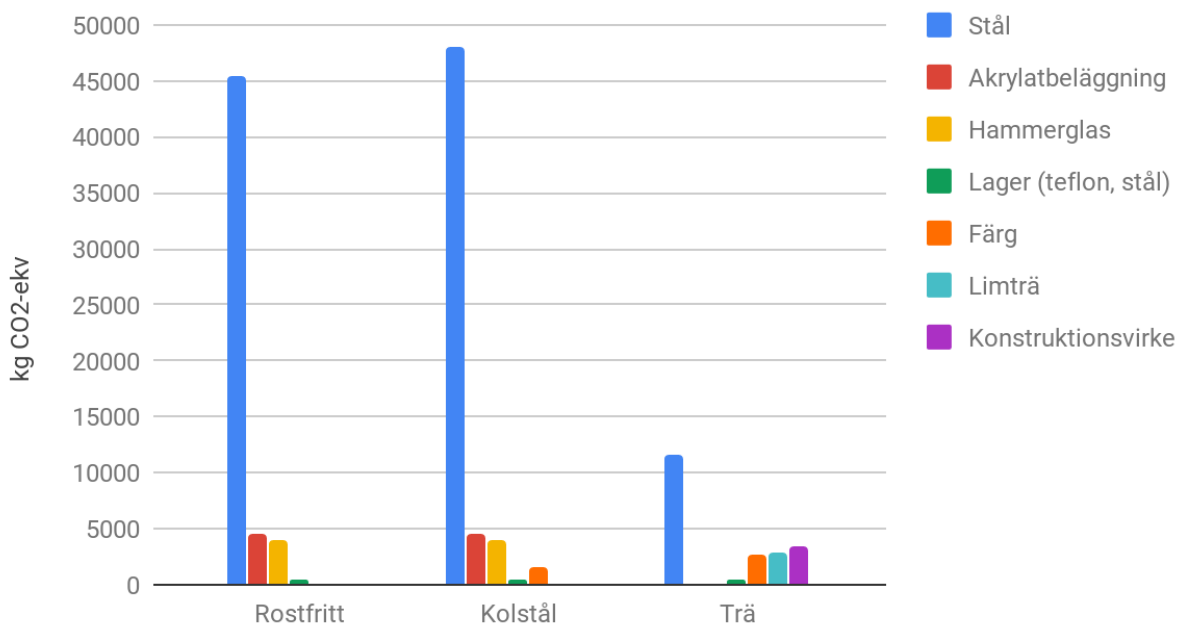
5.4.1 Analys av miljöpåverkansbedömning

5.4.1.1 Klimatförändring

För de två stålbroarna dominerar materialtillverkningsfasen tydligt i avseende på klimatförändring. För träbron är också denna fas störst men även underhållsfasen genererar ett stort bidrag, drygt hälften av materialtillverkningsfasen. Träbron, vars värde motsvarar tillverkning av två broöverbyggnader, ligger på knappt 40% av den rostfria brons resultat under denna fas. Detta visar på träbrons förhållandevis

låga klimatpåverkan vid tillverkningen. I materialtillverkningsfasen för träbron ingår viss ståltillverkning som sammanlagt ger större växthusgasutsläpp än produktionen av trävaror. Per ton producerad produkt är genererar trä endast ca 0,13 ton CO₂-ekvivalenter (Moelven 2016), medan motsvarande siffra för kolstål är 2,28 ton CO₂-ekvivalenter (SSAB 2014). Dessutom inkluderas för stålet i träbron även bearbetning till produkter såsom spännstag samt förzinkning som båda utgör icke-försumbara bidrag. För produktion av träbron är stålets CO₂-ekvivalentbidrag ca 80% högre än trävarans samtidigt som det räknat till massan enbart motsvarar ca 7%. Detta illustreras i figur 5.8 som visar fördelningen av koldioxidekvivalenter mellan de olika konstruktionsmaterialen i tillverkningsfasen för varje bro.

CO₂-ekv i materialtillverkningsfasen, per material



Figur 5.8 Fördelning av CO₂-ekvivalenter i materialtillverkningsfasen

Båda stålbroarna har ett resultat på drygt 50 ton CO₂-ekvivalenter vardera när samtliga material inkluderas. 55,4 ton CO₂-ekvivalenter gäller för den rostfria bron och 58,4 ton CO₂-ekvivalenter för kolstålbron. Kolstålbron har dock en större massa stål än den rostfria bron på grund av den lägre hållfastheten hos materialet och därmed behov av större godstjocklek. Trots detta ses ingen stor skillnad i växthusgasutsläpp i materialtillverkningsfasen, kolstålbron ligger endast 7% högre än den rostfria bron. Sett till enbart stålet har den rostfria bron en miljöbelastning i materialtillverkningsfasen på 45,5 ton CO₂-ekvivalenter och kolstålsbron 48,0 ton CO₂-ekvivalenter. För kolstålbron tillkommer även produktion av epoxifärg, något som genererar låga utsläpp i förhållande till de övriga materialen, endast 0,45 ton CO₂-ekvivalenter per bro. Beläggningen ger upphov till 4,54 ton CO₂-ekvivalenter och hammerglaset 3,92 ton CO₂-ekvivalenter, dessa två poster är dock identiska för de två stålbroarna.

I figur 5.8 ses tydligt stålets dominans i förhållande till de övriga materialen. Enbart en differens på 2,5 ton CO₂-ekvivalenter mellan de två stålbroarna kan tyckas vara liten eftersom kolstålbron har en flera ton större massa stål än den rostfria bron. Det rostfria stålet har också en betydligt större andel ingående skrot i materialtillverkningen, 59,1% i förhållande till kolstålets 20%. Dessa siffror är vad som gäller för de specifika stålsorterna, från Outokumpu respektive SSAB, som studeras i detta arbete

men kan variera mellan olika producenter. Tillverkningen av stål från enbart skrot sker med ljusbågsugn som drivs av primärt elektricitet vilket orsakar runt 90% lägre koldioxidutsläpp än produktion från jungfruligt material (SSAB 2019). Orsaken till det rostfria stålets förhållandevis höga växthusgasutsläpp är huvudsakligen skillnader i materialsammansättning för de två stålqualiteterna. För att producera ett ton rostfritt duplexstål genereras 2,75 ton CO₂-ekvivalenter medan kolstålet enbart genererar 2,28 ton (Outokumpu 2014, SSAB 2014). Notera att dessa siffror inkluderar de angivna andelarna av closed-loopåtervinning av respektive stålqualität. Skillnaden här kompenserar för den större materialmängden och behov av målning hos kolstålbron.

Konstruktionsfasen är i mycket liten i jämförelse med materialtillverkningsfasen och nära identisk för alla tre broarna. Underhållsfasen är störst för kolstålbron på grund av ommålningen, som gör mängden CO₂-ekvivalenter för denna fas nära 80% högre än den för den rostfria bron som inte behöver målas om. Byte av akrylatbeläggning och hammergeglas för stålbroarna genererar ca 10 ton CO₂-ekvivalenter inkluderat avfallshantering. Träbron ligger drygt 10% högre än den rostfria bron i underhåll på grund av ommålning och byte av slitplank. Att byta ut träplanket genererar i bara ett koldioxidutsläpp på 0,3 ton per tillfälle, vilket kan jämföras med byte av akrylatbeläggning som ger nära 9 ton. Träbron målas om med tätare intervall än den rostfria bron, var 10:e år jämfört med var 20:e år men de målas också med olika typ av färg och tjocklekslager vilket ger olika klimatpåverkan. Färgåtgången är högre för träbron men epoxifärgen genererar dubbelt så stor mängd CO₂-ekvivalenter per liter liksom att träbron inte kräver ytterligare ytpreparering såsom blästring.

I samband med demontering och avfallshantering ger förbränning av akrylatbeläggning klart högst klimatpåverkan ca 4 ton CO₂-ekv. Övriga åtgärder såsom nedmontering av bron och sortering av stål är i princip försumbart. För träbron står hantering i samband med förbränning för majoriteten av dess växthusgasutsläpp under livcykelfasen. Utsläpp av den inbundna koldioxiden i träet inkluderas inte eftersom nettoutsläppet sett till hela livslängden är noll. Klimatpåverkan under demontering och avfallshantering är överlag mycket liten i förhållande till övriga stadier i livscykeln för samtliga broar.

Med avseende på kategorin transporter genererar den rostfria bron lägst mängd CO₂-ekvivalenter följt av träbron och därefter kolstålsbron. Det rostfria stålet produceras i Sverige och kolstålet i Finland vilket innebär en längre fraktsträcka i det senare fallet. För kolstålbron och träbron utgör transporter ca en sjättedel av det totala LCA-resultatet och för den rostfria bron ca en tiondel.

Återvinning utanför systemgränserna blir relevant för materialen stål och hammergeglas. Denna livscykelns beaktas genom systemutvidgning där restmaterialet ersätter nyproducerat material från jungfrulig råvara. Även i återvinningsfasen i livscykeln ses en skillnad mellan det rostfria stålet och kolstålet där krediteringen per kilo stål är större för det rostfria stålet. För det rostfria gäller -2,15 ton CO₂-ekvivalenter per ton stål nyttjad i den funktionella enheten och -1,39 ton CO₂-ekvivalenter per ton för kolstålet. Nettoutsläppet för tillverkning samt återvinning blir således 0,6 ton CO₂-ekvivalenter per ton för det rostfria stålet och 0,9 ton CO₂-ekvivalenter per ton för kolstålet. Skillnaden mellan kolstål och rostfritt stål med avseende på klimatpåverkan ur ett vaggatill-gravperspektiv genererar således en tydlig skillnad mellan broarna i nettoutsläpp sett över hela livscykeln. Effekten förstärks av materialbesparingen på grund av det höghållfasta duplexstålet.

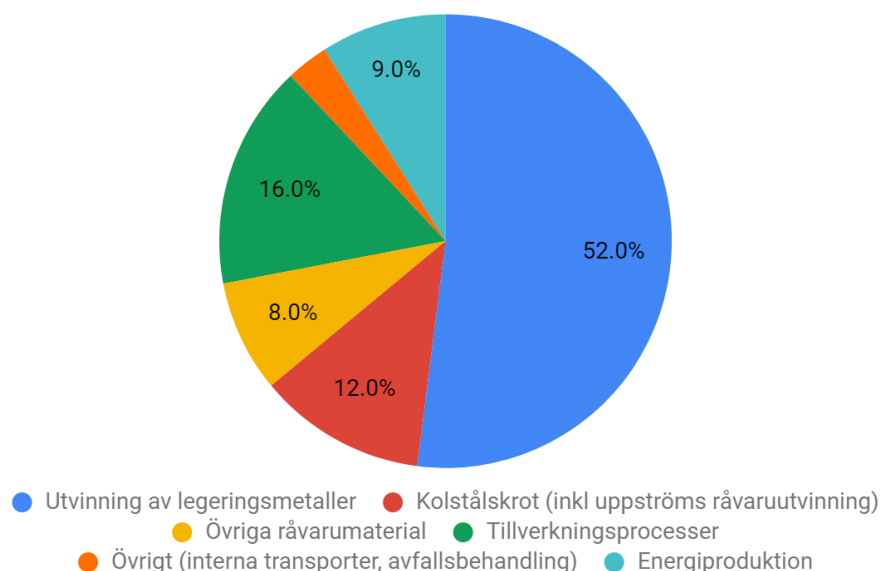
Det sammanlagda LCA-resultatet är i siffror 34,2 ton CO₂-ekvivalenter för den rostfria bron, 60,1 ton CO₂-ekvivalenter för kolstålbron och 33,5 ton CO₂-ekvivalenter för träbron. Träbron faller således ut bäst ur ett livcykelperspektiv med avseende på klimatförändring men är i princip likvärdig med den rostfria bron som enbart genererar ca 2% större mängd växthusgasutsläpp. Kolstålbron ligger på en

markant högre nivå, 75% över den rostfria bron, se tabell 5.8. Inkluderas inte återvinning genom systemutvidgning blir dock det totala klimatpåverkansbidraget 72,4 ton CO₂-ekvivalenter för den rostfria bron, 92,1 ton för kolstålbron och 37,1 ton för träbron, vilket är en markant förändring i både nivåer för de två stålbroarna och de tre broarnas inbördes förhållande till varandra.

Återvinningen av det rostfria stålet får således stora effekter på slutsumman av CO₂-ekvivalenter. Skillnaden i återvinningens kompensation av utsläppet i tillverkningen väger, i kombination med materialbesparingen, sammantaget upp för det rostfria stålets högre utsläpp per kilo producerad råvara jämför med det kolstålet. Den totala krediteringen på grund av återvinningsmöjligheter för träbron är endast 9% av krediteringen som ses för den rostfria bron. Detta grundas i att trävaran går till energiåtervinning efter rivning och att ingen systemutvidgning heller görs här. Systemutvidgning skulle kunna innebära att elektricitet och fjärrvärme som genereras vid förbränningen ersätter detsamma fast producerat från ett annat likvärdigt bränsle, exempelvis träflis eller hushållsavfall. Detta skulle dock inte ge någon större krediteringsmöjlighet för träbrons produktsystem (Moelven 2016) varför det exkluderas från studiens omfattning.

På grund av att ståltillverkningen klart dominerar med avseende på klimatförändring samt att återvinningen får mycket stora effekter för hur broarna faller ut i förhållande till varandra bör denna process studeras mer ingående. Görs inte systemutvidgningen belastas den rostfria bron med nära dubbelt så stort utsläpp av växthusgaser. Trots den betydligt högre andelen ingående återvunnet material i produktionen genererar det rostfria stålet större mängd CO₂-ekvivalenter per ton material än kolstålet. En granskning av andra miljövarudeklarationer för stål samt generisk data från databasen Ecoinvent v3.5 (High alloyed resp. Low alloyed) visar på att växthusgasutsläpp generellt är lägre vid tillverkning av rostfritt stål än vid konventionellt kolstål (Bauforum Stahl 2018, Ecoinvent 2018, Norsk Stålförbund 2019). Fördelningen av växthusgasutsläpp på de olika delprocesserna i tillverkningen av varmvalsat rostfritt stål ses i figur 5.9.

Fördelning av växthusgasutsläpp i produktion av rostfritt stål



Figur 5.9 Fördelning av miljöpåverkansresultat i materialtillverkningsfasen för rostfritt stål, per ton stål (Outokumpu 2014)

Produktion av legeringsmetaller den klart dominerande processen med över hälften av bidraget, 52%. Legeringsämnen domineras av ferrokrom och den aktuella stålqualiteten duplex 1.4462 har en sammansättning av 22% krom, 5.7% nickel och 3% molybden (Outokumpu 2014). Ferrokromet, som också tillverkas av Outokumpu, har en kromhalt på 50-54% och liknande halter av metall ses generellt även för de övriga legeringsämnena (Outokumpu 2019b, Hurman 2014, Lee 2001, Crundwell et. al. 2011). Detta innebär att om en total halt av legeringsmetaller för det rostfria stålet är 30% kommer runt 60% av massan från legeringsämnena och resterande mängd 40% ursprungligen från järnmalm (järnoxid). För Outokumpus rostfria stål utgörs det senare av kolstålskrot (Outokumpu 2014).

Med förhållande 60:40 av legeringsämnena och järnskröt ses i figur 5.9 skillnaden i miljöpåverkan mellan dessa två komponenter för det rostfria stålet. Utsläpp av växthusgaser från enbart metallråvaran, som representeras av röd samt blå del av stapeln i figuren, kommer 18,8% från kolstålskrotet och 81,2% från legeringsämnena. De 60% legeringsämnena kommer således att stå för över 80% av klimatpåverkan. Det är möjligt att skillnaden är ännu större eftersom datan i miljövarudeklarationen är baserad på Outokumpus genomsnittliga produktion och andelen ferrokrom kan vara så låg som 10,5% i rostfritt stål. Produktionen av legeringsämnena är således tydligt den avgörande faktorn till att det rostfria stålet har en högre miljöbelastning än kolstål sett till produktionen. Anledningen till att det rostfria stålet får förhållandevis stor vinst i form av återvinning jämfört med belastningen vid primärproduktion är således att framställning av legeringsämnena undviks i sekundärproduktionen.

Divideras LCI-resultatet för tillverkningsfasen med andel icke-återvunnet stål i produktionen och LCI-resultatet för återvinningsfasen med andelen nettoutflöde av skrot fås klimatpåverkan i ett fall där ingen closed-loopåtervinning förekommer. Detta resulterar i 6,72 ton CO₂-ekvivalenter per ton producerat rostfritt stål med kreditering på -5,99 ton CO₂-ekvivalenter genom återvinning och 2,85 ton CO₂-ekvivalenter per ton producerat kolstål med -1,86 ton kreditering. Här ses tydligt i enighet med ovanstående resonemang att klimatbelastningen för att producera ett ton rostfritt stål är betydligt högre än att producera ett ton kolstål, utan något återvunnet material. Resultatet för rostfritt stål är mer än dubbelt så högt som för kolstål. Vinsten i att återvinna rostfritt stål, dvs primärproduktion minus sekundärproduktion av ett ton stål utan closed-loopåtervinning är samtidigt också högre än för kolstål med nettoutsäpp på 0,7 och 1,0 ton för rostfritt respektive kolstål.

Ur klimatförändringssynpunkt är det således av yttersta vikt att inkludera återvunnet material i tillverkningsprocessen, i synnerhet för det rostfria stålet. Den aktuella återvinningsgraden på 59,1% är därmed starkt motiverad och ger stor inverkan på resultatet. Introduceras en större andel återvunnet material i kolstålproduktionen än nuvarande genomsnittliga 20% kan en stor miljömässig vinst ur ett livscykelperspektiv förväntas. Detta bekräftas också av en miljövarudeklaration för kolstål med betydligt högre återvinningsandel i produktionen, 88% skrot, där CO₂-ekvivalenter belastningen per kilo stål endast är 1,13 ton CO₂-ekvivalenter per ton stål (Bauforum Stahl 2018). Dock måste den tekniska begränsningen för masugnprocessen tas i beaktning liksom tillgången på kolstålskrot. Enligt miljövarudeklarationen för kolstålet sker produktionen uteslutande med masugn/LD-konverter (SSAB 2014). Ska andelen skrot för kolstålproduktionen öka måste ljusbågsugn eller motsvarande introduceras i tillverkningen då maximalt 30% skrot ingår vid masugnsbaserad produktion (Broadbent 2016).

5.4.1.2 Nedbrytning av stratosfäriskt ozon

Det sammanlagda LCA-resultatet avseende på nedbrytning av stratosfäriskt ozon ligger totalt på 20,0 g och 19,7 g CFC11-ekvivalenter för kolstålsbron respektive träbron, den rostfria bron ca 45% lägre än

övriga två på 13,7 g. Materialtillverkningsfasen är klart dominerande för samtliga tre broar där tillverkning av teflon står för störst bidrag, ca 13 g per bro. Teflon utgör enbart för en mycket liten andel av broarnas totala massa, drygt 3 kg per bro fördelat på två lager men står trots detta för merparten av kategoriresultatet. Resultatet är rimligt då teflon i sin kemiska sammansättning är ett flourerat kolväte och nedbrytning av stratosfäriskt ozon påverkas av just klor- och flourföreningar (SMHI 2013). Träbron får högre påverkan än övriga broar vilket beror på en något större belastning i produktionen per kilo trä jämfört med kilo stål. Sammantaget över hela livscykeln väger dock kolstålbron upp till samma nivå som träbron på grund av tillverkning och förbränning av epoxifärg vilket inte den rostfria bron belastas av. Materialåtervinning leder enbart till kreditering för den rostfria bron, dock endast marginellt.

5.4.1.3 Förurning

Bidraget till miljöpåverkanskategorin förurning är under materialtillverkningen klart störst från den rostfria bron med 388 kg SO₂-ekvivalenter jämfört med 119 och 112 kg SO₂-ekvivalenter från kolstålbron respektive träbron. De två senare ligger således på en nivå motsvarande ca en tredjedel av den rostfria bron. Precis som för klimatpåverkan genererar produktion av rostfritt stål betydligt större mängd SO₂-ekvivalenter men samtidigt är krediteringen till systemet vid återvinningen större för det rostfria, se figur 5.7. Nettoutsläppet per ton stål blir 3,3 kg SO₂-ekvivalenter för kolstål och 2,5 kg SO₂-ekvivalenter för det rostfria stålet med de aktuella återvinningsgraderna. Vinsten i att återvinna det rostfria stålet är således större än att återvinna kolstål eftersom produktionen av legeringsämnen orsakar större miljöpåverkan än produktion av kolstål från järnmalm. Sett till enbart produktionen genereras 22,2 kg SO₂-ekvivalenter per ton rostfritt stål och 4,3 kg SO₂-ekvivalenter per ton kolstål, trots att andelen ingående rostfri skrot är hela 59,1%. Resultatet per bro utan återvinning efter rivning ger 367 respektive 90,3 kg totalt för stålet. Stålet i den rostfria bron ger således upphov till närmare 4 gånger så hög förurningseffekt som kolstålet. Inkluderas dock effekterna av återvinning genom systemutvidgning blir resultatet det omvända och den rostfria bron faller ut bättre med hänsyn till förurning med 41,4 kg SO₂-ekvivalenter jämfört med 69,6 kg för kolstålbron.

För träbron bidrar de ingående materialerna grova drag lika mycket vardera till resultatet i materialtillverkningsfasen: 38,8 kg SO₂-ekvivalenter från produktion av ståldetaljerna, därefter limträt med 26,2 kg SO₂-ekvivalenter, konstruktionsvirket med 30,5 kg SO₂-ekvivalenter och alkydfärgen med 25,2 kg SO₂-ekvivalenter. För träbron är dock underhållsfasen jämbördig med den initiala materialtillverkningen, trots att denna inkluderar produktion av två broöverbyggnader. På grund av de sex ommålningstillfällena under hela livscykeln blir även underhållsfasens bidrag till förurning stor för träbron. Produktionen av epoxifärg till kolstålbron har något större bidrag per liter sett till SO₂-ekvivalenter än alkydfärgen för träbron, 0,025 respektive 0,019 kg per liter färg men den målade ytan är å andra sidan större för träbron (Ecoinvent 2018). Detta i kombination med fler ommålningstillfällen gör att träbron ger större bidrag till förurning.

Det slutgiltiga LCA-resultatet när samtliga faser under broarnas livscykler inkluderas ger kolstålbron nästan den dubbla nivån SO₂-ekvivalenter jämfört med den rostfria bron, 97% högre.

Träbron har ytterligare högre resultat, nära 2,5 gånger så stort totalvärde som den rostfria bron.

5.4.1.4 Övergödning

Vid beräkningar på de tre broarnas bidrag till miljöpåverkanskategorin övergödning ses återigen det karakteristiska utseendet på fördelningen av utsläpp över den rostfria bron livslängd. Utsläppet är högt vid materialproduktionen men kompenseras av en stor kreditering vid materialåtervinningen. Möjligheterna till minskat miljöpåverkanbidrag på grund av återvinning genom systemutvidgning är

mycket liten för både kolstålbron och träbron. Vid materialtillverkningen står kolstålbron för lägst nivå PO_4^{3-} -ekvivalenter med 76% av värdet för den rostfria bron. Träbron är alternativet med högst miljöpåverkan i denna fas, 71% högre än den rostfria bron. Det totala resultatet över livscykelns samtliga faser visar lägst påverkan från den rostfria bron, följt av kolstålbron med 6 gånger så högt resultat och träbron med 11 gånger den rostfria brons resultat. Träbron tydliga dominans kan förklaras av trävarans bidrag om totalt 14,6 kg PO_4^{3-} -ekvivalenter, bearbetning och förzinkning av stålet med 16,4 kg PO_4^{3-} -ekvivalenter och färgen motsvarande 3,8 kg PO_4^{3-} -ekvivalenter per målning. Motsvarande värde för färgen till kolstålbron är 2,1 kg PO_4^{3-} -ekvivalenter per målning. Färgen ger ett litet bidrag i den initiala produktionen men ommålningen av broarna gör att underhållsfasen utgör en förhållandevis stor andel av det totala livscykelresultatet. Resultatet är något högre för träbron på grund av det tätare ommålningsintervallet och större färgåtgång.

5.4.1.5 Fotokemisk oxidation

Inverkan på fotokemisk oxidation är klart störst för den rostfria bron även efter systemutvidgningen med återvinning av stålet. Den rostfria bron genererar 40,9 kg eten-ekvivalenter under livscykeln, därefter kolstålbron med 66% av värdet på 27,1 kg eten-ekvivalenter och slutligen träbron med enbart 34% av den rostfria brons utsläpp på 14,0 kg eten-ekvivalenter. Utan återvinning blir effekten än mer tydlig då både det rostfria stålet och kolstålet får stora fördelar genom detta. För fotokemisk oxidation är påverkan från legeringsämnen mindre i stålproduktionen och utsläppen i större grad beroende av typ av tillverkningsmetod dvs ljusbågsugn eller masugn/LD-konverter. Produktion med ljusbågsugn genererar högre utsläppsnivåer av eten-ekvivalenter än den masugnsbaserade processen (Outokumpu 2014) vilket förklarar det höga värdet för den rostfria bron där produktionen till större del baseras på ljusbågsugn. På grund av detta är vinsterna vid återvinning av det rostfria stålet inte lika stora i relation till påverkan från produktionen som kunnat visas på för andra miljöpåverkanskategorier. Samtidig återvinning av stål antas ske med ljusbågsugn vilket är anledningen till att krediteringen vid återvinningen för kolstål är större än det utsläpp som sker i samband med tillverkningen. Detta gör att kolstålet faller ut bäst av de två stålqualiteterna ur ett livscykelperspektiv.

Bortsett stålet är stålproduktionen av beläggning för stor effekt i materialtillverkningsfasen med 2,5 kg eten-ekvivalenter per bro. Anmärkningsvärt för beläggningen är att det är appliceringen, dvs konstruktionsfasen, som genererar merparten av miljöpåverkan, 12,5 kg eten-ekvivalenter. Orsaken till detta är genereringen av den flyktiga alkoholen bensyl när produkten härdas (FEICA 2015). Detta gör att konstruktionsfasen för denna miljöpåverkanskategori är stor i förhållande till övriga faser för stålbroarna, något som inte har kunnat visas för övriga kategorier. För träbron är dock konstruktionsfasen försumbar och i underhållsfasen kommer bidraget till största del från färgtillverkningen. Transporternas och rivningsfasens bidrag till fotokemisk oxidation är mycket liten i förhållande till övriga faser för samtliga broar.

5.4.1.6 Trafikomledning

Resultatet när miljöpåverkan från trafikstörningar vid upp- eller nedmontering av bron inkluderas i LCA-resultatet visar att effekten av detta blir betydande. Sett till klimatförändring kommer ökade utsläpp på grund av förlängd körsträcka att orsaka ett tillskott om 2,2 ton CO_2 -ekvivalenter per gång avstängning genomförs. Detta tillskott av växthusgasutsläpp gör att det samlade livscykelresultatet ökar med 13% för den rostfria bron, 29% för kolstålbron och 26% för träbron. En ökning kan inte ses enbart för klimatpåverkan utan även för övergödning och försurning där ökningen för kolstålbron är ca 40% för vardera kategorin. Beaktas miljöpåverkan från trafik i val mellan olika material vid brobyggnad bör därför det rostfria stålet vara förknippat med klara fördelar i förhållande på grund av lågt underhållsbehov. I denna studie gynnas dock kolstålbron av att den är möjlig att montera ned och

målas om i verkstad jämfört med ett scenario där avstängning hade krävts under lika lång tid som underhållet pågår.

Utifrån resultatet i denna studie bör slutsatsen vara att det är högst motiverat att inkludera trafikeffekter vid livscykelanalys. Ger underhållsåtgärder upphov till trafikpåverkan för större trafikleder eller störningen pågår under lång tid kan detta leda till stor klimatpåverkan. Hur trafiken påverkas av bör dock modelleras mer noggrant än vad gjorts i denna studie. Tex skulle köbildning rimligen kunna ge upphov till stor påverkan vilket inte beaktats här. För broarna i denna studie heller sker ingen miljöpåverkan för omledning av trafiken på själva bron då det rör sig om gång- och cykelbroar. Hade det varit vägbroar för biltrafik hade naturligtvis påverkan från omledning av trafiken uppe på bron också blivit relevant att studera.

Ytterligare en slutsats bör vara att underhållsåtgärder som påverkar trafik om möjligt bör ske under tider på dygnet då trafikbelastningen är lägre. Under den tidpunkt då mätningarna för årsdygnstrafik för väg E4 genomfördes var antalet fordon per timme nattetid vardag endast ca 2500, dvs 60% lägre än det värde som används i beräkningarna baserat på årsdygnstrafiken. Dagtid var dock trafikintensiteten 30% högre (Trafikverket 2016). Arbete under natten skulle således kunna få stora effekter på trafikomledningens miljöpåverkan.

5.4.2 Datakvalitet och osäkerhetsfaktorer

Resultatet från livscykelanalysen visar att materialtillverkningsfasen är dominerande för samtliga miljöpåverkanskategorier och för alla tre broarna varvid datakvaliteten får störst inverkan på resultatets validitet här. LCI-datan för de olika materialen kommer från miljövarudeklarationer i majoriteten av fallen och komplettering med generisk data från databaser gjorts enbart i liten utsträckning, för teflonet i brolagren samt träimpregneringen. Samtliga miljövarudeklarationer är verifierade av tredje part och godkända enligt ISO-standard och anger alla en hög grad av uppmätta flöden, minst 95%. Detta gör att indatan till livscykelanalysen med avseende på materialtillverkningen får anses god. Transparensen för den exakta beräkningsgången minskar dock något vid användning av miljövarudeklarationer eftersom klassificering och karakterisering redan är gjord i dessa. Alternativet att använda utsläppsdata från databaser hade dock klart sänkt datakvaliteten i fråga om teknisk överensstämmelse med produkterna som studeras. Med miljövarudeklarationer som utgångspunkt har inventeringsdata från de specifika tillverkarna av materialen kunnat användas i livscykelanalysen med tillhörande aktuell återvinningsgrad. Med tanke på att återvinning får mycket stor effekt för stålets miljöbelastning är det en stor fördel att känna till denna och inte utgå från exempelvis europeiskt eller globalt genomsnitt.

Kolstålsbron är ett fiktivt jämförelsealternativ i avseende på att ingen sådan bro har producerats i verkligheten och därför måste en ståltyp antas för beräkningarna. För att detta material ska vara jämbördigt med det rostfria stålet har data för ett stål från det svenska företaget SSAB antagits. Detta stål produceras i Finland (SSAB 2014), vilket även legeringsämnen till det rostfria stålet görs (Outokumpu 2019b). Det valda kolstålet bör därmed vara ett rimligt jämförelsealternativ till det rostfria stålet med i avseende på produktionsplats och teknik. Geografisk överensstämmelse har prioriterats framför likvärdighet i fråga om återvinningsgrader då detta varierar kraftigt mellan olika länder.

Miljövarudeklarationerna för limträbalkarna och konstruktionsvirket för träbron stämmer också väl med studiens geografiska datatäckningskrav. Detta innebär att de primära konstruktionsmaterialen för

alla tre broarna har god datakvalitet och jämförbarhet. De till massan räknat sekundära materialen såsom akrylatbeläggningen, färgen till kolstålbron och träbron samt hammergeglasskivorna har något sämre geografisk och teknisk överensstämmelse med täckningkraven. För både hammergeglaset och alkydfärgen har miljövarudeklarationer från andra tillverkare än vad som tillämpas för broarna i verkligheten använts. För hammergeglaset ger detta en sämre geografisk men god teknisk datakvalitet då miljödeklarationen baseras på en nära identisk produkt. Akrylatbeläggningen har dock en sämre teknisk överensstämmelse då data för en representativ generisk produkt fått användas. För båda typerna av färg är miljövarudeklarationen giltiga för en stor mängd liknande produkter och av denna anledning tillämpas också samma inventeringsdata för alkydfärgen och träoljan. På grund av färgens både låga massa och miljöpåverkan i förhållande till övriga material och antas fortfarande datakvaliteten vara tillräcklig.

I avseende på tidsmässig täckning är datakvaliteten genomgående god, inte bara för materialtillverkningsfasen utan även för datakällor i övriga faser. Merparten av miljövarudeklarationerna är inom giltighetstid och i annat fall mycket nära den bortre tidsgränsen. För den generiska data som använts från Ecoinvent v3.5 är giltighetstiden fram till 2018 även om det framgår att viss processdata är interpolerad från äldre datainsamling för tidigare versioner av databasen. Versionen som använts är dock senaste utgåvan vilket gör att det får anses vara bästa tillgängliga datakälla i de fall där mer specifik data inte går att finna. Med avseende på produktsystemen för de tre broarna som helhet är slutsatsen att en god grad av teknisk teckning har uppnåtts i fråga om de enhetsprocesser som inkluderats. Bortsett färgen och impregneringsmedlet för träbron "försvinner" inga materialflöden utan slutlig avfallsbehandlingsmetod är angiven och inventerad för samtliga material. Miljöpåverkan för avfallshantering av färgen och impregneringen bör rimligen kunna räknas in i förbränningen av träprodukterna.

Baserat på uppgifter från tillverkarna om vilka processer som ingår i både konstruktions- och underhållsfasen för broarna bör livscykelanalysen ha god teknisk överensstämmelse i dessa båda faser. För livscykelanalyser inom brokonstruktion har tillverkning-, underhålls- och avfallshanteringsfas tenderat att vara dåligt utredda och inkluderade i ofullständig omfattning (Du et. al. 2013). Det kan exempelvis vara problematiskt att genomföra inventering för underhålls- och avfallshanteringsprocesser då det rör sig om framtida processer. För att få en god teknisk täckning av systemet och inte förringa någon av faserna i livscykeln har ambitionen i denna studie dock varit att inkludera samtliga processer som förekommer, även i konstruktions- och underhålls- och avfallshanteringsfasen. Inventeringsdatan för dessa faser om tex energiåtgång vid olika processer är dock i större grad byggd på uppskattningar och antaganden än materialtillverkningsfasen vilket gör att osäkerheten i resultatet ökar. Den ökade osäkerheten har dock accepterats till fördel för teknisk fullständighet men bör likväl noteras.

Ytterligare en källa till osäkerhet i resultatet är åtgången av material för tillverkning av broarna. Materialmängderna för stålbroarna är baserade på datormodelleringen som genomfördes i samband med konstruktionsberäkningarna. Detta innebär att varje enskild plåt i broarna har modellerats separat med hjälp av koordinatangivelser och därefter tilldelats en godstjocklek och en densitet varvid den totala massan har kunnat beräknas. Samma noggrannhet i materialåtgång har inte uppnåtts för träbron där mängdningen i stället baseras på enklare produkttrinitningar. Framför allt massan av ståldetaljerna kan ha underskattats. Dock överensstämmer den totala massan för materialet väl med den angivna lyftvikten på 18,4 ton för bron vilket är ett tecken på god uppskattning av mängder. Tillverkaren för den rostfria bron anger att mellan 5% och 10% av den inköpta stålplåten blir spill i tillverkningen (Södergren 2019) och för att vara på säkra sidan har därför den producerade mängden stål satts till 1,1

går den beräknade åtgången. För överensstämmelse har samma faktor använts för kolstålet och trävaran för de två jämförelsealternativen.

Vidare diskussion kring osäkerhetsfaktorer relaterat till den funktionella enhetens och systemgränsernas definition samt beräkningsmetoder kommer att föras i kapitel 8 med tillhörande slutsatser för livscykelanalysen och rekommendationer utifrån resultatet.

6. Kostnadsanalys

6.1 Indata till kostnadsanalys

I detta avsnitt 6.1 redovisas vilka ekonomiska händelser som inkluderas i kostnadsanalysen för den rostfria bron, kolstålbron och träbron. Kostnaderna som uppstår under den 80-åriga kalkylperioden kan delas upp i dels en investeringskostnad dels en rad underhållskostnader samt kostnad i samband med rivning. Till samtliga faser tillkommer också fraktkostnader. Investeringskostnaden utgörs av materialkostnader samt kostnader för tillverkning och montage och utgörs av en engångskostnad för broförvaltaren vid inköp av bron. Underhållskostnaderna är därefter successivt utspridda över broarnas livslängd enligt antagande om hur ofta dessa behöver genomföras. För att träbron ska uppfylla den funktionella enheten i livscykelanalysen i kapitel 5 antogs att broöverbyggnaden ersattes fullständigt det 40:e året. Samma metodik kommer att tillämpas även i kostnadsanalysen för att samtliga tre studerade alternativ ska vara funktionsmässigt likvärdiga under hela kalkylperioden och därmed jämförbara. Investeringskostnaden för träbron kommer dock enbart att bestå av den initiala kostnaden år 0 i kostnadsanalysen och kostnaden för ersättningsbron behandlas som en underhållskostnad.

6.1.1 Kostnad för material och konstruktion

Kostnader för material, konstruktion och montage av broarna visas i tabell 6.1. Eftersom träbron som jämförelsealternativ i studien utgår från en existerande produkt som finns tillgänglig på marknaden anges det aktuella priset för att beställa denna från leverantör. För stålbroarna beräknas det totala priset utifrån kostnad för de ingående materialen, arbetskostnad och frakt var för sig. Stålsorter används för de stålsorter som LCA-studien baseras på, genom distributören Tibnor. Arbetskostnaden är baserad på kostnaden för Södertäljebroarna och reducerad med hänsyn till skillnaden i spännvidd. Produktionstiden och därmed arbetskostnaden är satt till samma värde för båda stålbroarna då tidsåtgången enligt uppgift är jämförbar för de två materialen trots något olika hantering (Södergren 2019). Pris för beläggning och lager grundas på Trafikverkets schablonkostnader från databasen BaTMan, *Bridge and Tunnel Management*. Övriga kostnader är aktuella försäljningspriser från angiven leverantör. Frakt av material för stålbroarna är beräknade utifrån godsfraktkostnad enligt ASEK 6.1 se avsnitt 6.1.4 i denna studie för mer information.

Tabell 6.1 Material- och tillverkningskostnader (SEK)

| | Kostnad | Enhet | Kostnadsår |
|-------------------------------------|---------|-------------------|------------|
| Rostfritt stål (Tibnor 2019) | 83,57 | kr/kg | 2019 |
| Kolstål (Tibnor 2019) | 21,18 | kr/kg | 2019 |
| Hammerglas (Stocksundet 2019) | 87 200 | kr/bro | 2019 |
| Beläggning (V. Mara et.al. 2012) | 1 100 | kr/m ² | 2012 |
| Lager (Safi M. 2013) | 26 000 | kr/st | 2012 |

| | | | |
|--|---------|--------|------|
| Träbro (Martinssons 2019d) | 543 600 | kr/bro | 2019 |
| Målning träbro (Martinssons 2019d) | 75 500 | kr/bro | 2019 |
| Blästring och målning kolstål (Södergren 2019) | 10 | kr/kg | 2019 |
| Frakt material kolstål (Trafikverket 2018) | 70 800 | kr/bro | 2014 |
| Frakt material rostfritt stål (Trafikverket 2018) | 32 000 | kr/bro | 2014 |
| Frakt träbro (Martinssons 2015) | 58 100 | kr/bro | 2019 |
| Montage (Martinssons 2015) | 50 500 | kr/bro | 2019 |
| Arbetskostnad, stålbroar (Anbud Södertäljebro 2017) | 135 000 | kr/bro | 2018 |

Det antagna kilopriset för varmvalsad rostfri duplexstålplåt ger en investeringskostnad för materialet mycket nära det som angavs vid upphandling av Södertäljebro när mängder för denna sätts in i beräkningarna, skillnaden ligger på knappt 1,2 %. Vid granskning av priser från olika leverantörer har dock stora skillnader i aktuellt pris för det rostfria duplexstålet kunnat konstateras (Tibnor 2019, Stena 2019, BE-group 2019). Överlag är priset för rostfritt stål runt 4 gånger högre än det för kolstål vilket också ses i tabell 6.1. Stålpriset, för kolstål såväl som rostfritt stål, fluktuerar också på daglig basis på grund av variationer i den globala efterfrågan och utvinning av både järnmalm och legeringsmetaller (General Steel 2019). Som exempel kan noteras att det europeiska genomsnittspriset per ton kolstål direkt från stålverk halverades mellan januari 2012 och januari 2016 (Focus Economics 2019).

6.1.2 Kostnader för underhåll

Underhållskostnader som kan bli relevanta för en eller flera av broarna i studien presenteras i Tabell 6.2 med kostnad per händelse, enhet som kostnaden per bro baseras på samt uppskattat tidsintervall för när underhållsåtgärden bör sättas in. Alla underhållsåtgärder som inkluderas i kostnadsanalysen leder inte till miljöpåverkan som inkluderas i livscykelanalysen, tex inspektion av bron, varför inte underhållsåtgärderna i tabell 6.2 är helt identiska med tabell 5.4. För ommålning av kolstålsbron anges två alternativa kostnader där blästring och målning i verkstad utgör basfallet. Kostnad för ommålning av kolstålsbron utomhus är noterad för den samhällsekonomiska analysen i kapitel 7.

Tabell 6.2 Underhållskostnader samt åtgärdsintervall i hela år (SEK)

| | Kostnad | Enhet | Intervall rostfri bro | Intervall kolstålbro | Intervall träbro | Kostnadsår för data |
|--|---------|-------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|
| Ersättande träbro (Martinssons 2019d) | 619 100 | kr/bro | | | 40 | 2019 |
| Rengöring av vägsalt, grus (Safi M 2014) | 6 | kr/m ² | 1 | 1 | 1 | 2012 |
| Rengöring av växtlighet (Safi M 2014) | 7 | kr/m ² | 1 | 1 | 1 | 2012 |
| Blästring och målning av kolstålbro, verkstad (Hechler och Collin 2008) | 1 000 | kr/m ² | | 20 | | 2006 |
| Blästring och målning av kolstålbro ² , fält (Trafikverket 2019) | 2 300 | kr/m ² | | 20 | | 2019 |
| Byte av akrylatbeläggning (V. Mara et.al. 2012) | 1 100 | kr/m ² | 40 | 40 | | 2012 |
| Byte av Hammerglas (Stocksundet 2019) | 87 200 | kr/bro | 40 | 40 | | 2019 |
| Inspektion, lätt (Safi M 2014) | 12 | kr/m ² | 1 | 1 | 1 | 2012 |
| Inspektion, generell (Safi M 2014) | 40 | kr/m ² | 3 | 3 | 3 | 2012 |
| Inspektion, omfattande (Safi M 2014) | 70 | kr/m ² | 6 | 6 | 6 | 2012 |
| Målning av träbro (Martinssons 2019e) | 1 150 | kr/m ² | | | 10 | 2019 |
| Frakt vid ersättning av träbro (Martinssons 2015) | 58 100 | kr/gång | | | 40 | 2019 |
| Montage vid ersättning av träbro och underhåll av kolstålbro (Martinssons 2015) | 50 500 | kr/gång | | 20 | 40 | 2019 |
| Frakt vid underhåll av kolstålbro (Trafikverket 2018) | 4 600 | kr/gång | | 20 | | 2014 |
| Byte av slitplank (Karoumi 2015) | 700 | kr/m ² | | | 20 | 2015 |

² För samhällsekonomisk kostnadsanalys

6.1.3 Kostnader för avfallshantering

Kostnader för avfallshantering redovisas i tabell 6.3. Dessa kostnader blir relevanta vid slutlig rivning är 80 i kostnadskalkylen med också vid rivning av den uttjänta träbron efter 40 år samt vid underhållsåtgärder såsom byte av beläggning och byte av hammergeglasskivor där avfallsflöden genereras. Negativa värden för avfall av kolstål och rostfritt stål uppkommer på grund av materialens skrotvärde.

Tabell 6.3 Kostnader för avfallshantering (SEK)

| | Kostnad | Enhet | Kostnadsår |
|---|---------|-------|------------|
| Avfall kolstål (MEPS International 2019) | -2,9 | kr/kg | 2018 |
| Avfall beläggning, hammerglas, teflon (NSR AB 2019) | 1,44 | kr/kg | 2019 |
| Avfall rostfritt stål (Södergren 2019) | -20 | kr/kg | 2019 |
| Avfall trä (NSR AB 2019) | 2,1 | kr/kg | 2019 |

6.1.4 Kostnader för frakt

Utöver kostnaderna för underhåll och avfallshantering i tabell 6.2-6.33 tillkommer fraktkostnad för samtliga material. Detta beräknas utifrån tabell 6.4 som redovisar schablonkostnad för frakt med lastbil av klass MVG24 enligt ASEK 6.1. Fraktkostnaderna som angavs för transport av material till de två stålbroarna i anknytning till tillverkningsfasen i tabell 6.1 är också beräknade baserat på angivna värden i tabell 6.4. Kostnad för frakt beräknas baserat på vikten av det transporterade materialet i förhållande till lastbilens lastkapacitet på 24 ton. Ingen fördelning görs för frakt av de färdiga broarna samt transporter av restavfall efter rivning då den transporterade vikten ligger nära fordonets kapacitet. Återtransport inkluderas för samtliga sträckor genom att kostnaderna multipliceras med en faktor 2. Transportsträckor och tidsåtgång framgår av bilaga 1 tabell 5-7.

Tabell 6.4 Värden för beräkning av fraktkostnad MVG24 (SEK) (Trafikverket 2018)

| | Kostnad (SEK) | Enhet |
|-------------------------------------|---------------|-------|
| Drivmedel | 4,95 | kr/km |
| Service | 1,58 | kr/km |
| Däck | 0,90 | kr/km |
| Värdeminskning | 1,84 | kr/km |
| Summa avståndsberoende kostnader | 9,27 | kr/km |
| Förarlön | 235 | kr/h |

| | | |
|---------------------------------|--------|--------|
| Summa tidsberoende kostnader | 235 | kr/ h |
| Försäkringar, skador | 34,95 | kr/h |
| Skatter | 6,18 | kr/h |
| Värdeminskning | 55,23 | kr/h |
| Ränta | 25,73 | kr/h |
| Summa fordonsberoende kostnader | 122,09 | kr/h |
| Lastning av gods | 40 | kr/ton |

6.1.5 Kostnader för trafikomledning

I basfallet i kostnadsanalysen beaktas inte trafikantkostnader som uppstår vid påverkan av trafiken längs underliggande väg i samband med montage, underhållsåtgärder och rivning av broarna. Detta anses ligga för långt ifrån de studerade produktsystemen. Beroende på var bron uppförs kan påverkan på trafiken både bli stor om det är en större trafikled berörs men också inte förekomma alls. För att dock göra en uppskattning av trafikantkostnadens storlek i förhållande till övriga kostnader för broarna görs likväl beräkningar för detta som en komplettering till basfallet. Plats för uppförande antas för dessa beräkningar precis som tidigare vara utanför trafikplats Södertälje Syd ovanför väg E4 där det existerande exemplet av den rostfria bron finns. Årsdygnstrafiken för E4 återfinns i tabell 5.5.

Omledning av trafiken vid uppförande och rivning antas på samma sätt som i livscykelanalysen pågå i totalt 3 timmar per gång och leda till en förlängd körsträcka på 1.3 km för samtliga broar, se avsnitt 5.1.8.5 för ytterligare beskrivning. Samma förutsättningar gäller vid upp- och nedmontage i samband med underhåll av kolstålsbron. Ommålning av träbron sker mer betydligt mer frekvent än ommålning av kolstålsbron samtidigt som arbetskostnaden uppskattas till densamma för arbete i fält och i verkstad. Därför finns för broförvaltaren inget ekonomiskt motiv för att montera ner träbron och genomföra ommålningen i verkstad på samma sätt som förutsätts göras för kolstålsbron i basfallet. Ommålning av träbron kommer därför rimligen att göras på uppförandeplatsen. Detta antas kunna göras med enbart reducerad hastighet och eventuellt avstängning av ett körfält för underliggande väg vid målning av bronns undersida (ca 110 m²). Som känslighetsanalys kontrolleras även ett fall där kolstålsbron målas om på plats vilket också antas kunna göras med avstängning av ett körfält i taget.

Kostnader som uppstår i samband med omledning består av primärt av förseningskostnader enligt ASEK 6.1. Förseningskostnader kan beräknas dels för personbilstrafik som består av både privata resor och tjänsteresor dels för lastbilstrafik i form av frakt av gods. Uppstår förseningar på grund av avvikelser från infrastrukturens normala funktion gäller för båda trafikkategorierna att förseningskostnaden motsvarar 3,5 gånger tidsvärdet för normal trafiksituation. För personbilstrafik inkluderas utöver detta också en trängselkostnad som orsakas av minskad komfort under resan. Denna kostnad appliceras som 1,5 gånger det normala åktidsvärdet för den andel av trafiken som utgörs av privata resor, där genomsnittet är 90%. Åktidsvärdet är viktat utifrån dels andelen privata resor respektive tjänsteresor, båda med genomsnittlig belägningsgrad, dels långväga respektive regionala resor. Tidsvärden som används i beräkningarna är sammanfattade i tabell 6.5 nedan. 2014 års värde gäller genomgående i studien som räknas upp till 2019 års penningvärde. Gång- och cykeltrafik uppe på bron beaktas inte.

Tabell 6.5 Tidsvärden för beräkning av trafikantkostnader (SEK) (Trafikverket 2018)

| | Normalt tidsvärde (kr per fordonstimme) | Förseningskostnad (kr per fordonstimme) | Trängselkostnad (kr per fordonstimme, privata resor) | Total kostnad (kr per fordonstimme) |
|-----------|---|---|--|-------------------------------------|
| Personbil | 190 | 665 | 256,5 | 921,5 |
| Lastbil | 28 | 98 | - | 98 |

För att beräkna den totala trafikantkostnaden under en tidsperiod med trafikförseningar eller trängseln görs följande räkneoperation:

*Tidsvärde*förseningstid per resa*ÅDT/24*tid för trafikstörning = trafikantkostnad per tillfälle med trafikstörning*

Vid omledning av trafiken vid upp- och nedmontage beräknas förseningstiden per gång som skillnaden i tid, uttryckt i timmar, mellan att köra den ordinarie sträckan om 3,9 km i tillåten maxhastighet, 110 km/h för personbil respektive 80 km/h för lastbil med släp, och den alternativa sträckan på 5,2 km i hastighet 50 km/h.

Vid sänkning av hastigheten vid ommålning av träbron uppskattas den påverkade sträckan till 500 m med ordinarie hastigheter som angivet ovan, nedsatt hastighet 50 km/h. Arbetstiden uppskattas till 4 dygn (4 kvm/h, 3 strykningar, 2 man, ger 40 h, 10 h per dygn (Kostnadsguiden 2019)). Målas kolstålbron om på plats påverkas trafiken under 12 dygn (120 h arbetstid, 10 h per dygn (Tralla 2019)).

6.1.6 Omräkning till reallpris

Innan de ekonomiska beräkningarna kan utföras måste alla kostnader som angivits inflationsrensas genom omräkning till det gemensamma prisbasåret 2019. Hur penningvärdet förändrats mellan året då prisuppgiften publicerats och prisbasåret beräknas med hjälp av Statistiska centralbyråns tjänst *Prisomräknaren* som baseras på KPI. I tabell 6.6 nedan presenteras indexen som kostnaderna i tabell 6.1-6.5 räknas upp med vid behov.

Tabell 6.6 KPI-index för inflationsjustering (SCB 2019)

| År för prisuppgift | Inflationsindex, till prisbasår 2019 |
|--------------------|--------------------------------------|
| 2006 | 16,70% |
| 2012 | 5,60% |
| 2014 | 5,83% |
| 2015 | 5,88% |
| 2018 | 1,02% |

6.2 Resultat

6.2.1 Grundinvestering

Efter omräkning till reall pris blir investeringskostnaden för de tre broarna enligt tabell 6.7, uttryckt i 2019 års penningvärde. Den procentuella skillnaden i förhållande till den rostfria bron redovisas också. Värdena inkluderar kostnader för material, tillverkning, frakt och montage dvs de kostnadsposter som redovisas i tabell 6.1. I investeringskostnad är den rostfria bron är drygt 1 miljon kr dyrare än träbron samt 700 000 kr dyrare än den målade kolstålsbron. Görs val av konstruktionsmaterial enbart med hänsyn till investeringskostnad är således träbron det mest fördelaktiga alternativet ur kostnadssynpunkt. Inkluderas dock att träbron endast har 40 års teknisk livslängd blir dock värdet det dubbla för detta alternativ, 1 680 000 kr totalt. Detta gör att investeringskostnaden hamnar högre än för kolstålsbron, motsvarande 90% av den rostfria bronns kostnad.

Tabell 6.7 Investeringskostnad rostfri bro, kolstålsbro och träbro (2 st träbroar inom parantes).
Avrundat till 10 000-tal kr

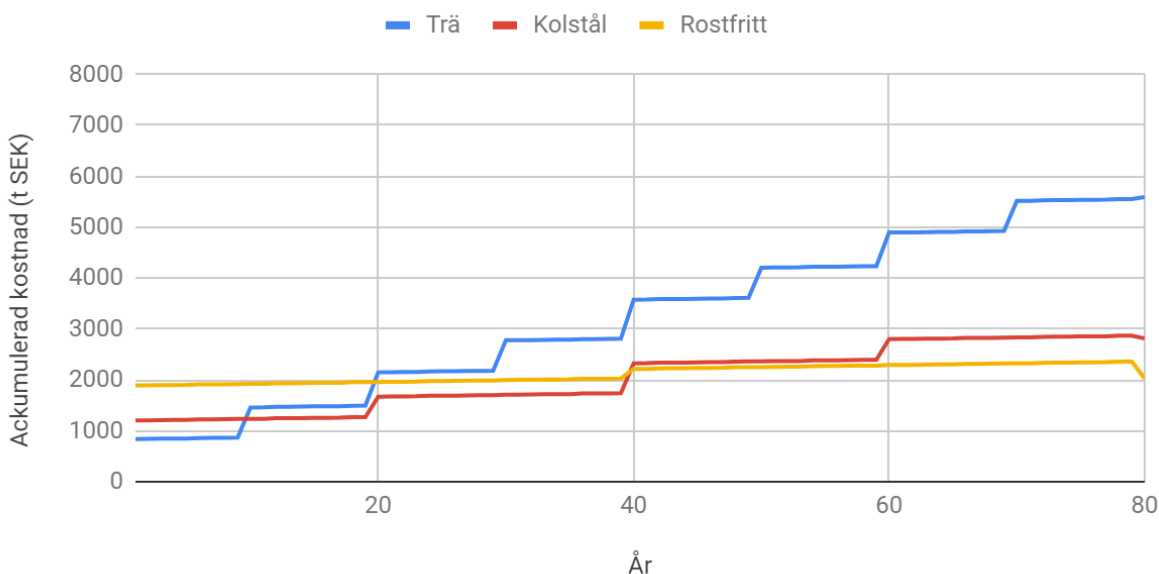
| | Investeringskostnad (SEK) | Procentuell andel av den rostfria bronns investeringskostnad |
|---------|---------------------------|--|
| Rostfri | 1 890 000 | 100% |
| Kolstål | 1 200 000 | 64% |
| Trä | 840 000 (1 680 000) | 44% (90%) |

6.2.3 Livscykelkostnad

I figur 6.2 visas hur kostnadsutvecklingen för de tre broarna ser ut över den 80-åriga kalkylperioden. Kurvorna i figur 6.2 uttrycker den ackumulerade kostnaden för varje år dvs en addition av samtliga kostnader som inträffat fram till och med det aktuella året. Värdet år 0 motsvarar således grundinvesteringen och värdet år 80 den totala ackumulerade kostnaden i reall värde som kan förväntas efter hela livslängden. Beräkningsmässigt är detta detsamma som beräkning av nuvärdet år 80 med 0% kalkylränta.

Kostnadsutveckling

Basfall



Figur 6.2 Utveckling av ackumulerad real kostnad för rostfri bro, kolstålsbro och träbro över 80 år (0% kalkylränta)

Som visas i figur 6.2 medför träbron lägst kostnad i samband med grundinvesteringen, därefter kommer kolstålsbron och sist den rostfria bron på grund av dess höga materialkostnad. Redan vid den första ommålningen av träbron år 10 sker dock en första brytpunkt då den passerar kolstålsbrons kostnad. Därifrån och fram till år 40 kommer kolstålsbron att vara alternativet som är förknippat med lägst ackumulerad kostnad och därmed det mest kostnadseffektiva valet. Vid det andra ommålningstillfället passerar träbron även den rostfria bron och blir under resterande tid av kalkylperioden det dyraste alternativet. Det kan således konstateras att om prisinformationen i avsnitt 6.1 tillämpas kommer träbron trots sin betydligt lägre investeringskostnad bara att vara billigare än kolstålsbron fram till första ommålningen och billigare än den rostfria bron fram till den andra ommålningen. Målningsintervallet beror delvis på miljöfaktorer på uppförandeplatsen och slitage men för alkydfärg rekommenderas inte målning mer sällan än var 12:e år som högst (Martinssons 2019c). Även om detta värde tillämpas kommer fortfarande träbron att få högst kostnad av de tre broarna efter andra ommålningen. Ommålningen av träbron medför en högre totalkostnad per tillfälle än kolstålsbron vilket kan hänföras till dels den ca 40% större målade ytan (ca 500 m² respektive 300 m²) dels att målningen av kolstålsbron utförs i verkstad. Hade ommålningen av den senare utförts på plats hade detta lett till en större kostnad, se tabell 6.2, på grund av ökade omkostnader runt arbetet. Den höga kostnaden för ommålning på grund av träbrons stora målade area leder också till att kostnad för ersättning av träbroöverbyggnaden år 40 är i samma storleksordning som kostnaden för en ommålning.

Vid år 40 sker en brytpunkt för de två stålbroarna. Kolstålsbron passerar här precis den rostfria bron i ackumulerad kostnad och mellan år 40 och 60 är kostnaderna för dessa mycket lika. Differentiering sker dock vid ommålningen av kolstålsbron vid 60 år. Den rostfria bron har i princip konstant ackumulerad kostnad då den kräver mycket lite underhåll. Ökning uppkommer endast vid byte av hammergeglas och beläggning samt vid inspektionstillfällena som dock ger mycket litet bidrag. Det sista året under kalkylperioden ses en minskning för den rostfria bron på grund av stålets restvärde efter

rivning. Vid kalkylperiodens sista år är således den rostfria bron det alternativ som har lägst ackumulerad kostnad. På grund av de osäkerheter som finns i kostnadsanalysen med avseende på värdena för materialkostnader och underhållsåtgärder, i synnerhet stålpriset, kan dock de två stålbroarna anses vara jämbördiga ur ett ekonomiskt perspektiv. Deras ackumulerad kostnad ligger nära varandra under hela kalkylperioden i förhållande till träbron som får klart högre kostnad redan innan den byts ut år 40.

Sett till siffrvärdena för den ackumulerade kostnaden år 80 vilket motsvarar nettonuvärdet med 0% ränta i tabell 6.8 kan konstateras att kolstålsbron efter 80 år är ca 40% dyrare än den rostfria bron. Träbron motsvarar nära 3 gånger den rostfria brons kostnad. Notera att beräkningarna är gjorda med kostnader noterade med positivt tecken, varvid nettonuvärdena i tabell 6.8 inte blir ekonomiska värden i sin strikta definition utan kostnader beräknade med nettonuvärdemetoden.

Tabell 6.8 Nettonuvärde (SEK) vid diskontering från år 80 med 0% och 3,5% ränta samt procentuellt förhållande till rostfri bro. Avrundat till 10 000-tal kr

| | NNV 0% ränta | Förhållande till rostfri bro | NNV 3,5% ränta | Förhållande till rostfri bro |
|-----------|--------------|------------------------------|----------------|------------------------------|
| Rostfritt | 2 030 000 | 100% | 2 010 000 | 100% |
| Kolstål | 2 820 000 | 138% | 1 710 000 | 84% |
| Trä | 5 590 000 | 275% | 2 380 000 | 118% |

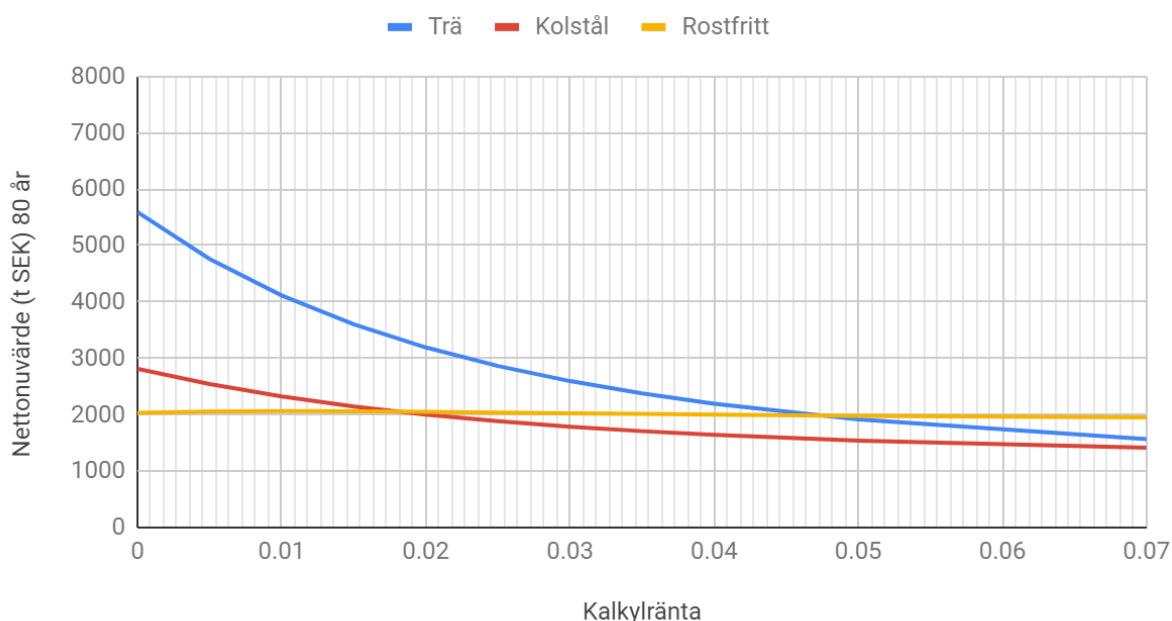
I absoluta siffror kommer den rostfria bron att leda till en total kostnad över livslängden på 2 030 tkr, kolstålsbron 2 820 tkr och träbron 5 590 tkr. 0% kalkylränta innebär att värdena överensstämmer med den ackumulerade kostnaden. Därmed motsvarar värdena i den vänstra kolumnen i tabell 6.8 också värdena för kurvorna i figur 6.2 det 80:e året. När däremot kalkylräntan på 3,5% introduceras, vilket ses i de två högra kolumnerna i samma tabell förändras resultatet markant. Kolstålsbron är nu 16% lägre än den rostfria bron. För träbron sker en markant förändring mot fallet med 0% ränta. Med 3,5% ränta är den enbart 18% dyrare än den rostfria bron över livscykeln och får ett slutvärde på 2 380 tkr, en minskning med ca 3 mkr från tidigare. Detta visar på den stora inverkan som kalkylräntan har på resultatet.

Räntesatsen gör att händelser värderas lägre ju längre fram i tiden de inträffar. Med en kalkylränta på 3,5 % kommer exempelvis en kostnad som inträffar det 20:e året att värderas endast till 50,3% av vad motsvarande värde är om den inträffar första året i kalkylperioden. Vid 80 år är motsvarande siffra enbart 6,6%. Träbrons kostnadsprofil karaktäriseras av en låg investeringskostnad och stora kostnadsposter löpande under livslängden, även sent i kalkylperioden. Detta gör att träbron som är avsevärt mycket dyrare än den rostfria bron över hela livslängden om räntan sätts till noll, får ett betydligt lägre nettonuvärde när kalkylräntan är 3,5%. På samma sätt förändras nettonuvärdet för den rostfria bron mycket lite mellan 0% och 3,5% ränta, se tabell 6.8. Detta beror på att investeringskostnaden, vilken inträffar år 0 och inte räknas påverkas av diskonteringsfaktorn, utgör en stor andel av nettonuvärdet i förhållande till kostnader för underhåll. Med introduktion av räntan blir de tre broarna mycket lika i kostnad än utan räntesats. Med tanke på möjligheterna till stor variation i stålpris blir slutsatsen att broarna, med ASEK:s rekommenderade ränta på 3,5%, är i stort sett lika i total livscykelkostnad.

6.2.3 Variation av kalkylränta

Med hänsyn till att kalkylräntans värde har stor inverkan på utfallet av resultatet i denna studie är det relevantt att undersöka hur nettonuvärdet efter 80 år för de tre broarna varierar i takt med att räntan förändras. I figur 6.3 plottas nettonuvärdet efter 80 år för basfallet för de tre broarna med en kalkylränta som ökar från 0% och 7%. Värdena på graferna där räntan är 0% respektive 3,5% överensstämmer således med värdena i tabell 6.8.

Variation av kalkylränta



Figur 6.3. Nettonuvärde efter 80 år vid olika värden på kalkylränta

Diagrammet i figur 6.3 visar att fram till en kalkylränta på 1,8% kommer den rostfria bron att ge upphov till lägst nettonuvärde i kalkylperiodens slut och träbron högst. Ökas kalkylräntan över 1,8% kommer kolstålbron att vara det mest ekonomiskt fördelaktiga alternativet ur ett ekonomiskt perspektiv. Vid 4,75% kalkylränta passerar dock den rostfria bron träbrons nettonuvärde. Nettonuvärdet för träbron minskar i snabbare takt än kolstålbron vilket gör att den troligen skulle passera även kolstålbron vid ytterligare högre ränta. Allt eftersom kalkylräntan ökar och därmed framtida händelser värderas allt lägre kommer nettonuvärdet att närma sig investeringskostnaden. Det är dock inte rimligt att anta en hur hög kalkylränta som helst även om det matematiskt inte finns någon begränsning. Dessutom ses att med en kalkylränta på ca 3,5% och uppåt kommer de tre alternativen att få i princip lika nettonuvärde. Val av räntesats får störst effekter främst med kalkylränta lägre än den som ASEK rekommenderar.

Den rostfria bron har närmast konstant nettonuvärde i takt med att räntan förändras vilket är fullt rimligt då dess totala ackumulerade kostnad över livslängden till allra största del utgörs av investeringskostnaden. Investeringskostnaden är oberoende av kalkylräntan eftersom denna i träffar i starten av det första kalkylåret och diskonteringsfaktorn då är 1. För kolstålbron ses en viss minskning av nettonuvärdet med ökad ränta då den är i behov av underhåll i större utsträckning än den rostfria bron men långt ifrån den effekt som ökad ränta får på träbrons nettonuvärde. Kurvan för träbron avtar betydligt snabbare än den för kolstålbron. Val av ränta får således stor effekt för träbrons resultat i den

ekonomiska kalkylen. Redan innan räntan når 3% har nettonuvärdet för träbron halverats mot resultatet med 0% ränta.

Framöver i detta arbete kommer fortsatt båda fallen av kalkylränta som tillämpades i kostnadskalkylen, både 0% och 3,5%, att redovisas då båda är relevanta att studera. Det första visar på den sanna ackumulerade kostnaden när ingen nedräkning görs över tid och alla händelser med säkerhet inträffar och det senare inkluderar den grad av osäkerhet och prognostiserade inflation som rekommenderas för samhällsekonomiska analyser av Trafikverket genom ASEK.

6.2.4 Trafikantkostnader

Resultat från beräkningarna av trafikomledningskostnad presenteras i tabell 6.9 nedan.

Tabell 6.9 Trafikantkostnader vid trafikstörningssituationer (SEK). Avrundat till 1000-tal kr

| | 3h omlodning vid montage/demontering | 4 dygn nedsatt hastighet ommålning träbro | 12 dygn nedsatt hastighet ommålning kolstålbro på plats |
|--|--------------------------------------|---|---|
| Trafikantkostnader per tillfälle (SEK) | 135 000 | 344 000 | 1 033 000 |

På resultatet ses att trafikantkostnader snabbt kan nå höga nivåer om det är en stor trafikled som påverkas av störningen. Enbart omlodning av trafiken vid montage eller nedmontering av broarna under 3h leder till en kostnad på runt 135 tkr. För både kolstålsbron och träbron kommer trafikantkostnaderna vid montage därmed att överstiga investeringskostnaden. Varje ommålning av kolstålbron kommer därefter att leda till två gånger 135 tkr i trafikantkostnader vilket är nära identiskt med vad själva arbetet bedöms kosta per tillfälle (343 tkr för arbetstid, material och frakt). För ommålning av träbron är trafikantkostnaderna hela 344 tkr, väl över hälften av kostnaden för målning av hela bron (590 tkr för arbetstid, material och frakt). I ett fall där kolstålbron målas om på plats och orsakar en hastighetsreduktion på den berörda vägen under 12 dygn ger detta en merkostnad på 1 033 tkr, en mycket stor summa i förhållande till arbetet i övrigt som baserat på uppgifter i tabell 6.2 kan beräknas till 680 tkr. Skillnaden mellan ommålning av kolstålbron i verkstad som bara ger trafikpåverkan under upp- och nedmontage och ommålning på plats är därmed markant.

Med hänsyn till trafikantkostnadernas storlek bör de i allra högsta grad inkluderas i en samhällsekonomisk kalkyl även för mindre investeringar såsom broarna i denna studie om trafikpåverkan förekommer på grund av processer kopplade till broarna. Notera att liksom de ordinarie kostnaderna som studerats tidigare i kapitlet kommer trafikantkostnaderna att påverkas av kalkylräntan och inverkan på den totala kostnadsutvecklingen är därmed beroende av när i tid trafikpåverkan förekommer. Effekten av inkludering av trafikantkostnader för broarna kommer att visas i kapitel 7.2, Samhällsekonomisk kostnadskalkyl där även miljökostnader inkluderas.

7. Samhällsekonomisk analys

7.1 Kostnadsvärdering av miljöpåverkan

7.1.1 Värderingsmetoder

I både ASEK 6.1 och i Naturvårdsverkets *Minskat matavfall - miljönytta och kostnadsbesparingar* presenteras kostnadsfaktorer för samhällsekonomisk värdering av miljöpåverkan. Detta innebär att trots den grundläggande problematiken i att sätta ett ekonomiskt värde på naturresurser och uppskatta miljöskadekostnader tillämpas metodiken av svenska myndigheter vid samhällsekonomiska analyser. I detta avsnitt kommer de rekommenderade kostnadsvärderingarna från ovanstående publikationer att tillämpas på LCA-resultatet tidigare i studien. Därmed kan dels värdet av utsläppsekvivalenter jämföras mellan de olika miljöpåverkanskategorierna dels kan broarnas miljöpåverkan bedömas i form av monetärt värde. I tabell 7.1 presenteras kostnaden per utsläppsekvivalent för varje miljöpåverkanskategori som kommer att tillämpas.

Tabell 7.1 Värderingsfaktorer för miljöpåverkanskategoriresultat.

| Miljöpåverkanskategori | Värderingsfaktor för ekvivalent (SEK/kg) | Källa |
|------------------------|--|---|
| Klimatförändring | 1,14 | ASEK 6.1, standardvärdering (Trafikverket 2018) |
| | 3,5 | ASEK 6.1, värdering för känslighetsanalys (Trafikverket 2018) |
| | 0,10 | Naturvårdsverket, lägsta värdering (Naturvårdsverket 2015) |
| | 5,81 | Naturvårdsverket, högsta värdering (Naturvårdsverket 2015) |
| | 1,12 | Koldioxidskatt (Naturvårdsverket 2015) |
| Försurning | 31,2 | Naturvårdsverket (Naturvårdsverket 2015) |
| Övergödning | 218 | Naturvårdsverket (Naturvårdsverket 2015) |
| Fotokemisk oxidation | 8,34 | Naturvårdsverket, lägsta värdering (Naturvårdsverket 2015) |
| | 25,0 | Naturvårdsverket, högsta värdering (Naturvårdsverket 2015) |

Varken i ASEK 6.1 eller Naturvårdsverkets publikation anges någon värdering för nedbrytning av stratosfäriskt ozon ODP. Därför kommer heller inte denna kategori att få något genomslag i kostnadsvärderingen. För CO₂-ekvivalenter ses en stor skillnad i ekonomiskt värde beroende på vilken

modell som väljs. Lägsta kostnad per utsläppsekivalent som Naturvårdsverket presenterar är 0,10 kr medan den högsta är 5,81 kr där skillnaden mellan de två värdena är över en faktor 50. Dessa siffror ska dock ses som ett intervall inom vilket det sanna värdet kan ligga och inte som två specifika punktvärden. I rapporten Ecovalue12 som Naturvårdsverket baserat sin rekommendation på presenteras ett schablonvärde på 0,32 Euro men med hänsyn till det stora intervallet förespråkar inte Naturvårdsverket att detta används för att visa på just osäkerheten i värderingen (Naturvårdsverket 2015).

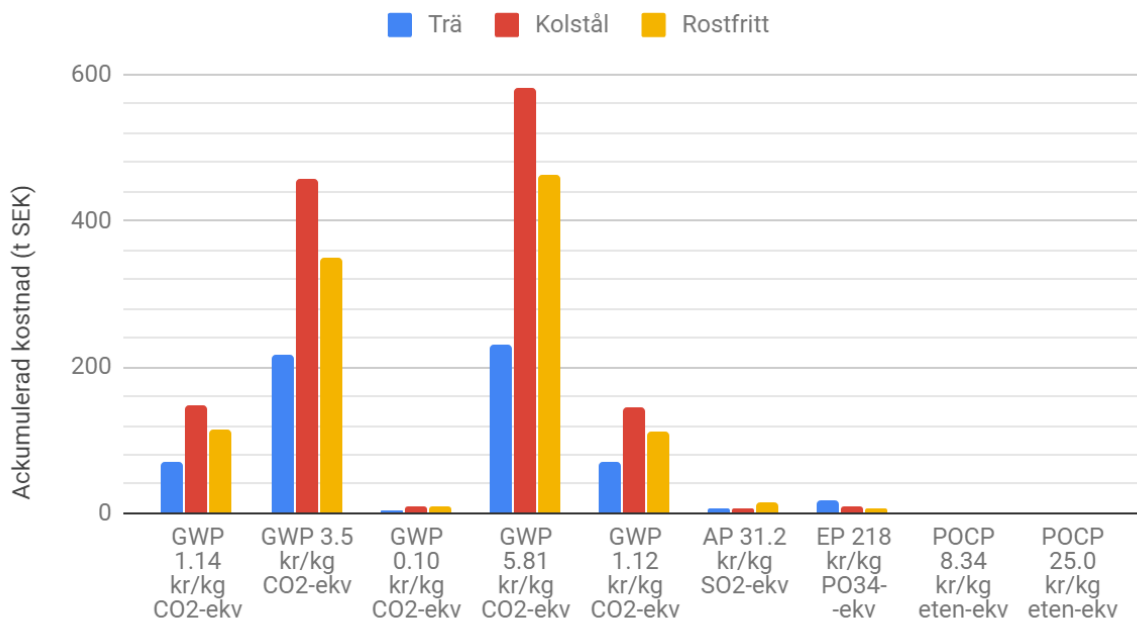
Samma resonemang gäller för fotokemisk oxidation där också ett högsta och lägsta värde anges. Värdena i Ecovalue12 är för klimatförändring framtagna baserat på en sammanställning av olika studiers skattning av marginalkostnaden för miljökada som utsläpp av ett kg CO₂-ekvivalenter ger upphov till. Orsaken till det stora intervallet bygger dels på svårigheter att uppskatta kostnaden för effekter som klimatförändring kan ge upphov till dels på ett till viss grad osäkert samband mellan utsläppsnivå av växthusgaser och storleksordningen på klimatförändring (Naturvårdsverket 2015). Trafikverkets rekommenderade värde på 1,14 kr ligger nära den aktuella koldioxidskatten på 1,12 kr och dessa båda värden placerar sig således inom det intervall som Naturvårdsverket presenterar. Detsamma gäller för det värde som rekommenderas i ASEK 6.1 som känslighetsanalys, 3,5 kr per kg utsläppsekivalent. Detta gör att ett värsta scenario enligt Trafikverket ligger väsentligt under det resultat som fås baserat på Naturvårdsverkets högsta värdering. Att värdena som rekommenderas för att kostnadsvärdera klimatförändring skiljer sig till denna grad mellan olika publikationer visar på en tvetydighet mellan vad svenska myndigheter rekommenderar. ASEK 6.1 åsyftar å ena sidan främst samhällsekonomisk värdering inom infrastrukturprojekt och miljökostnader från trafiken utsläpp men å andra sidan ska de siffror som Naturvårdsverket presenterar vara allmängiltiga inom samhällsekonomisk analys, oavsett studieområde (Naturvårdsverket 2015). Naturvårdsverket belyser i rapporten också de osäkerheter som finns i kostnadsvärderingen av miljöpåverkan enligt Ecovalue12 men menar samtidigt på att det för samhällsekonomiska analyser är bättre att göra en osäker kostnadsvärdering av miljöpåverkan än att exkludera miljöeffekter helt eftersom detta otvivelaktigt leder till en underskattning av värdet (Naturvårdsverket 2015).

Miljökostnader ska enligt ASEK 6.1 också vara föremål för årlig uppräknings med 1,5% (Trafikverket 2018). Orsaken till detta är att värdena baseras på betalningsvilja och med detta utgör ett mått på hur mycket individen är beredd att betala för en utsläppsekivalent. Detta kan i sin tur knytas till den allmänna inflationen över tid. Prognosen för inflationen sätts till 1,5% per år i ASEK 6.1 (Trafikverket 2018). Därmed behöver samtliga kostnader som antas följa den allmänna prisutvecklingen räknas upp med motsvarande faktor för att fortfarande vara uttryckt i reellt pris. Årlig uppräknings kommer i denna studien att göras när Trafikverkets två värderingsfaktorer för CO₂-ekvivalenter appliceras på LCA-resultatet. Konsekvensen av årlig uppräknings enligt ASEK 6.1 medför att utsläpp som inträffar framåt i tiden värderas högre, i dagens penningvärde, än om de sker i dagsläget och således blir det samlade värdet av utsläppen sett över hela livslängden beroende på när i tiden de enskilda händelserna i träffar. Naturvårdsverket föreskriver inte årlig uppräknings av miljökostnader i *Minskat matavfall - miljönytta och kostnadsbesparingar* och därför kommer inte heller så att göras i denna studie. För de miljöpåverkanskategorier där värdet av utsläppskostnader hämtas från Naturvårdsverket beräknas den ekonomiska värderingen genom att LCA-resultatet direkt multipliceras med kostnaden per ekvivalent. Det ekonomiska värdet blir således direkt proportionerligt mot LCA-resultatet. Dock bygger skattning av marginalkostnaden för klimatförändring i Ecovalue12 också delvis på betalningsvilja (Naturvårdsverket 2015) varvid det skulle kunna argumenteras för att även dessa värden borde räknas upp årligen.

7.1.2 Resultat omräkning av LCA-resultat

Kostnadsvärdering av samtliga miljöpåverkanskategorier från LCA-resultatet, utan inverkan från trafikomledning, visas i figur 7.1 med tillhörande värden i tabell 7.2. Vid omräkning till ekonomisk kostnad beaktas enbart de faktiska utsläppen som sker under broarnas livscyklar. Inga negativa bidrag till LCA-resultatet som uppkommer genom systemutvidgning inkluderas därför. Utsläpp som undviks då restmaterialet återvinns och antas ersätta nyproducerat material kan inte ses som en kostnadsmässig fördel då det inte genererar något ekonomiskt värde. Därmed bör det inte inkluderas i den ekonomiska analysen. I stället sätts de negativa bidragen i miljöpåverkanskategorierna i LCA-studien till noll. Liksom i LCA-studien antas trä vara ett koldioxidneutralt material med nettoutsläpp lika med noll under livscykeln. Med denna beräkningsmetod får belastas träbron inte med utsläppskostnader från förbränningen i samband med avfallshanteringen av träbron.

Kostnadsvärdering miljöpåverkanskategorier



Figur 7.1 Kostnadsvärdering av LCA-resultat med Trafikverkets och Naturvårdsverkets kostnadsfaktorer

Tabell 7.2 Kostnadsvärdering av LCA-resultat i SEK, avrundat till 1000-tal kr

| | GWP 1,14 kr | GWP 3,5 kr | GWP 0,10 kr | GWP 5,81 kr | GWP 1,12 kr | AP 31,2 kr | EP 218 kr | POCP 8,34 kr | POCP 25,0 kr |
|-----------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-----------|--------------|--------------|
| Rostfritt | 114 000 | 340 000 | 8 000 | 462 000 | 112 000 | 15 000 | 7 000 | 0 | 1 000 |
| Kolstål | 149 000 | 456 000 | 10 000 | 580 000 | 146 000 | 8 000 | 9 000 | 0 | 1 000 |
| Trä | 70 000 | 215 000 | 40 000 | 231 000 | 69 000 | 7 000 | 19 000 | 0 | 0 |

Som visas i figur 7.1 har kolstålsbron högst kostnad för klimatpåverkan följt av den rostfria bron och därefter träbron med betydligt lägre utsläppsnivå. Detta följer resultatet i livscykelanalysen som visade på att de två stålbroarna genererar stora växthusgasutsläpp jämfört med träbron. Om krediteringen för genom systemutvidgning inte görs kommer de att ligga på ungefär samma nivå. I absoluta siffror blir det ekonomiska värdet med avseende på klimatförändring 114 tkr för den rostfria bron, 149 tkr för kolstålsbron och 70 tkr för träbron med Trafikverkets rekommenderade värdering. Används 3,5 kr per kg CO₂-ekvivalenter får den rostfria bron en kostnad på runt 340 tkr och kolstålsbron 456 tkr, träbron ca 115 tkr för klimatpåverkan ur ett samhällsekonomiskt perspektiv. Med Naturvårdsverkets högsta värdering blir kostnaden 580 tkr för kolstålsbron, den rostfria bron 460 tkr och träbron 230 tkr. Jämfört med klimatförändring värderas LCA-resultatet för de övriga miljöpåverkanskategorierna mycket lågt. Endast bidraget till försurning för från den rostfria bron och övergödning för träbron genererar miljökostnader över 10 tkr. I förhållande till kostnaden för CO₂-ekvivalenter är det ekonomiska värdet av övriga miljöpåverkanskategorier i princip försumbara. Även om kostnad per ekvivalenter för både övergödning och försurning, i synnerhet det senare med 218 kr, är betydligt högre än även den högsta värderingen av koldioxid blir totalkostnaden för dessa kategorier mycket liten. Detta tyder på att det är klimatförändring och som är den relevanta miljöpåverkanskategorin när miljöbelastningen för broarna som studeras.

Slutsatsen är att klimatförändring är den miljöpåverkanskategori som klart har störst betydelse för de samlade miljökostnaderna för alla tre broarna. Endast med Naturvårdsverkets lägsta värdering ligger det i samma storleksordning som de övriga kategorierna. För alla andra klimatförändringsvärderingar blir övriga miljöpåverkanskategorier i princip försumbara. För att minska miljöbelastningen från broarna och tillhörande miljökostnader är det således minskning av växthusgaser som bör ligga i fokus.

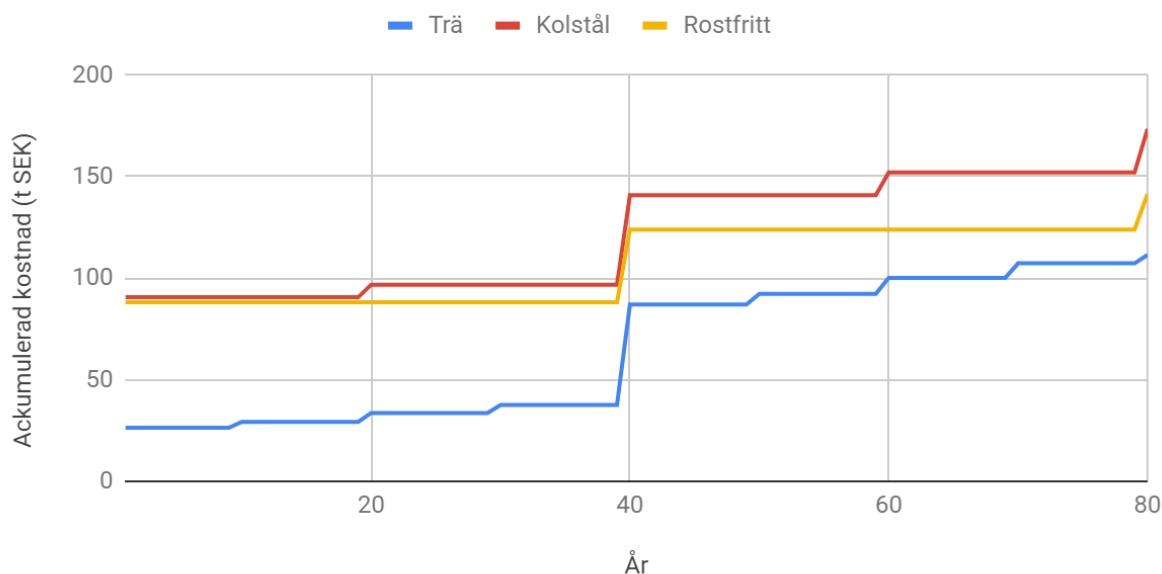
7.1.3 Samlad värdering av miljöpåverkan

För att illustrera hur de samlade miljökostnaderna fördelar sig över broarnas livslängd plottas hur den ackumulerade miljökostnaden utvecklas över kalkylperioden på samma sätt som gjordes för de direkta kostnaderna i figur 6.2. Här har således miljökostnaderna för samtliga miljöpåverkanskategorier aggregerats till ett värde. Värderingsfaktorerna som tillämpats är 1,14 kr per kg CO₂-ekvivalenter inklusive årlig uppräknings, 31,2 kr per kg SO₂-ekvivalenter, 218 kr per kg PO₄³⁻-ekvivalenter och 8,34 kr per kg eten-ekvivalenter.

Enligt ISO 14 044 för genomförande av LCA-studier rekommenderas inte sammanslagning av resultat tvärs över miljöpåverkanskategorier (ISO 14040:2006). Likväl presenterar både ASEK och Naturvårdsverket medel för att göra detta i en samhällsekonomisk analys genom kostnadsvärdering av utsläppsekvivalenter och därför frångås ISO-standardens rekommendation.

Kostnadsutveckling miljökostnader

Basfall



Figur 7.2 Utveckling av ackumulerad kostnad för miljöpåverkan över 80 år, 1,14 kr per kg CO₂-ekvivalent, i övrigt enligt Naturvårdsverkets rekommendation

Resultatet visar att de stora ökningarna i miljökostnader för alla tre broarna förekommer i samband med tillverkningen vid kalkylperiodens start samt vid de underhållsåtgärder som inträffar efter 40 år, dvs ersättning av träbron samt byte av akrylatbeläggning och hammergeglas på de två stålbroarna. Detta överensstämmer med LCA-resultatet där störst andel CO₂-ekv genererades under materialtillverkningen för samtliga broar. Även rivning av stålbroarna det sista året genererar visst bidrag till miljökostnaderna framför allt på grund av utsläpp av växthusgaser vid förbränning av beläggningen. Stålbroarnas kurvor följer varandra mycket nära under hela livslängden då de stora utsläppsposterna ståltillverkning, akrylatbeläggning och hammergeglas förekommer för båda utredningsalternativen. På grund av ommålningen blir dock kolstålbrons miljökostnader högst efter 80 år.

Träbrons miljökostnader är lägre än stålbroarnas under hela kalkylperioden. Vad som kan noteras är dock att miljökostnaden vid ersättning av träbron år 40 är högre än kostnaden vid tillverkningen dvs kurvans startvärde. Till viss del kan detta förklaras av att även kostnader förknippade med rivning uppstår men framför allt beror detta på den årliga uppräkningsfaktorn av värderingen av koldioxid. Vid år 40 är uppräkningsfaktorn 1,787 vilket ger nära det dubbla värdet mot kostnaden vid startåret. Den årliga uppräkningsfaktorn är även anledningen till att miljöpåverkan vid ommålning av träbron och kolstålbron värderas högre vid slutet av kalkylperioden än vid det första tillfället.

Nettonuvärdet för de tre broarnas miljökostnader vid kalkylperiodens sista år visas i tabell 7.3 för 0% och 3,5% ränta. Det första fallet med 0% ränta överensstämmer med den ackumulerade kostnaden år 80 som är slutvärdet för kurvorna i figur 7.2. Den samlade miljökostnaden är här 140 tkr för den rostfria bron, 23% högre för kolstålbron på 173 tkr och ungefär 20% lägre för träbron på 111 tkr. När miljökostnaderna diskonteras med 3,5% kalkylränta minskar kostnaden till ca 100 tkr för stålbroarna

och knappt 50 tkr för träbron. Med en kalkylränta på 3,5% blir således träbron mer tydligt det alternativ som är förknippat med lägst miljökostnader, ca hälften av stålbroarnas nivå.

Tabell 7.3 Nettonuvärde efter 80 år för miljökostnader vid 0% och 3,5% ränta samt procentuellt förhållande till rostfri bro. 1,14 kr per CO₂-ekvivalent, i övrigt enligt Naturvårdsverkets rekommendation. Avrundat till 1000-tal kr

| | NNV 0% ränta (SEK) | Förhållande till rostfri bro | NNV 3,5% ränta (SEK) | Förhållande till rostfri bro |
|-----------|--------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Rostfritt | 141 000 | 100% | 99 000 | 100% |
| Kolstål | 173 000 | 123% | 108 000 | 110% |
| Trä | 111 000 | 79% | 48 000 | 49% |

7.1.4 Samlad värdering av miljöpåverkan, högsta värdering

I föregående avsnitt redovisas kostnadsutvecklingen när Trafikverkets rekommenderade värdering för klimatförändring på 1,14 kr per kg CO₂-ekvivalenter tillämpas på LCA-resultatet. För att se skillnaden i när i stället den högsta värderingen av klimatpåverkan enligt Naturvårdsverket görs redovisas nettonuvärdet vid kalkylperiodens slut med 0% och 3,5% kalkylränta även för detta, se tabell 7.4. Kostnaden för ett kg CO₂-ekvivalent är i detta fallet 5,81 kr. Eftersom samtliga värderingsfaktorer i detta fall är baserade på Naturvårdsverkets rekommendation ingår ingen årlig uppräkningsfaktor.

Tabell 7.4 Nettonuvärde efter 80 år för miljökostnader vid 0% och 3,5% ränta samt procentuellt förhållande till rostfri bro. Naturvårdsverkets högsta rekommenderade miljökostnadsfaktorer (5,81 kr per CO₂-ekvivalent). Avrundat till 1000-tal kr

| | NNV 0% ränta (SEK) | Förhållande till rostfri bro | NNV 3,5% ränta (SEK) | Förhållande till rostfri bro |
|-----------|--------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Rostfritt | 486 000 | 100% | 398 000 | 100% |
| Kolstål | 600 000 | 123% | 465 000 | 117% |
| Trä | 257 000 | 53% | 140 000 | 35% |

Med de högre värderingsfaktorerna blir miljökostnaden för den rostfria bron 486 tkr och för kolstålsbron 600 tkr. Miljökostnaderna för träbron ligger klart lägre på 257 tkr. Då antalet utsläppsekvivalenter i miljöpåverkanskategorin klimatförändring är stort jämfört med övriga kategorier får en ökning av kostnadsvärderingen av CO₂-ekvivalenter stor effekt på den samlade miljökostnaden. Värdena i tabell 7.4 är betydligt högre än i tabell 7.3.

Om miljökostnaderna diskonteras med 3,5% ränta minskar nettonuvärdet för den rostfria bron till knappt 400 tkr och till 465 tkr för kolstålsbron. Träbrons miljökostnad efter diskontering är bara en dryg tredjedel av den rostfria brons kostnad, 140 tkr. Återigen speglas kalkylräntans inverkan på resultatet och effekten av den stora spridningen i kostnadsvärderingen av CO₂-ekvivalenter när värdena i tabell 7.3 och 7.4 jämförs.

7.2 Samlad samhällsekonomisk analys

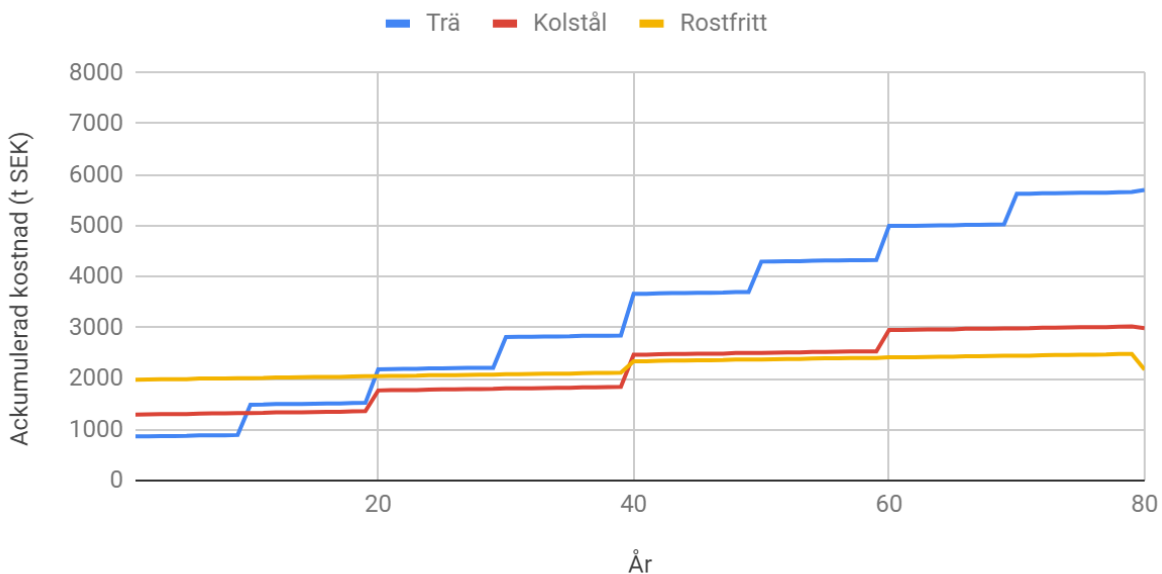
För att göra en ekonomisk analys av de studerade broarna där samtliga samhällsekonomiska kostnader inkluderas kommer resultatet från kostnadsanalysen i kapitel 6 att kombineras med resultatet från beräkningen av miljökostnader i kapitel 7.1. Samhällsekonomisk analys blir således en metod för att kombinera resultat från livscykelanalys och kostnadsanalys. I detta avsnitt kommer resultatet från kostnadsberäkningen att dels kombineras med den lägre dels den högre värderingen av samlad miljöpåverkan som gjorts. Därefter kommer en studie av olika livscykelscenarier att göras där bland annat effekter av trafikstörning och varierande underhåll av broarna beaktas. För alla analyserade fall undersöks också hur stor andel av nettonuvärdet som utgörs av miljökostnader dvs hur stor effekt miljöpåverkan får i en samhällsekonomisk analys när värdering av denna görs enligt rekommendation från svenska myndigheter. Basfallet uttrycker det som överensstämmer med tidigare resultat i livscykelanalys och kostnadsanalys utan extra effekter såsom trafikstörning.

7.2.1 Basfall

När livscykelkostnaden kombineras med miljökostnaderna med Trafikverkets ordinarie värdering av CO₂-ekvivalenter kommer kostnadsutvecklingen över kalkylperioden att se ut enligt diagrammet i figur 7.3. Detta motsvarar en direkt addition av de årliga värdena som visas i figur 6.2 och 7.2.

Samhällsekonomisk kostnadsutveckling

Basfall, standardvärdering enligt ASEK och Naturvårdsverket



Figur 7.3 Ackumulerad kostnad över 80 år, ordinarie kostnader samt miljökostnader. 1.14 kr per kg CO₂-ekvivalenter, i övrigt enligt Naturvårdsverkets rekommendation för miljökostnadsvärdering.

Jämförs resultatet i figur 7.3 med figur 6.2 som redovisar broarnas kostnadsutveckling utan miljökostnader, ses att miljökostnaderna inte får någon stor effekt med avseende på hur broarna ekonomiskt förhåller sig till varandra under kalkylperiodens förlopp. Träbron har lägst investeringskostnad men passerar redan vid första ommålningen träbrons kostnad och vid andra ommålningen även den rostfria bron. Dock ligger alla tre broarna nära varandra i kostnad fram till den tredje ommålningen av träbron. Med hänsyn till osäkerheter i värderingen av underhållsåtgärder får de anses vara ekonomiskt likvärdiga fram till den tredje ommålningen av träbron. Träbron är

däremot klart dyrare alternativet på grund av dess frekventa ommålningsbehov, även när miljökostnader inkluderas.

Nettonuvärde vid 80 år med samhällsekonomisk analys av broarna visas i tabell 7.5 för 0% och 3,5% kalkylränta samt med det procentuella förhållandet för kolstålbron och träbron jämfört med den rostfria bron för båda fallen av ränta. Notera åter att kostnader räknas med positivt tecken och att värdena som presenteras i tabell 7.5 i sin strikta definition är nettokostnad som beräknats med nuvärdemetoden. Detsamma gäller för motsvarande tabeller i avsnitt 7.2.2-7.2.4.

Inkludering av miljökostnader i den samhällsekonomiska analysen leder till att nettonuvärdena vid kalkylperiodens slut ökar något jämfört med motsvarande resultat i kostnadsanalysen, jämför tabell 7.5 med tabell 6.8. Träbron har klart lägst miljökostnad av de tre broarna, vilket leder till viss utjämning av skillnaden mellan nettonuvärdena för broarna. På grund av att miljökostnaderna är låga i förhållande till övriga kostnader är denna effekt mycket marginell. För 0% ränta motsvarar träbron fortfarande över 2,5 gånger den rostfria brons nettonuvärde och kolstålbron ligger ca 40% högre än den rostfria. Men 3,5% ränta har kolstålbron lägst kostnad och träbron högst men alla tre broar ligger nära varandra kostnadsmässigt. Det övergripande resultatet är därmed detsamma som utan miljökostnader.

Tabell 7.5 Nettonuvärde efter 80 år för ordinarie kostnader och miljökostnader vid 0% och 3,5% ränta samt procentuellt förhållande till rostfri bro. Avrundat till 10 000-tal kr

| | NNV 0% ränta (SEK) | Förhållande till rostfri bro | NNV 3,5% ränta (SEK) | Förhållande till rostfri bro |
|-----------|--------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Rostfritt | 2 170 000 | 100% | 2 110 000 | 100% |
| Kolstål | 2 990 000 | 138% | 1 820 000 | 86% |
| Trä | 5 700 000 | 262% | 2 420 000 | 115% |

Andel miljökostnad av det totala nettonuvärdet, efter 80 år, redovisas i tabell 7.6. Utan diskontering dvs 0% ränta motsvarar miljökostnader 7% av den rostfria brons kostnad, 6% av kolstålbrons kostnad och 2.0% av träbrons kostnad. Andelen miljökostnader är således låg i förhållande till övriga kostnader när ASEK:s standardvärdering av klimatförändring används. Med kalkylränta på 3,5% sker enbart en marginell förändring, andelen minskar något för den rostfria bron. Förändring i positiv eller negativ riktning beror på hur miljökostnader och övriga kostnader är fördelade över kalkylperioden. Slutsatsen är att miljökostnaderna inte har en betydande inverkan på resultatet i basfallet när klimatförändring värderas till 1,14 kr per kg CO₂-ekvivalenter.

Tabell 7.6 Andel miljökostnader av total kostnad vid 0% och 3,5% ränta.

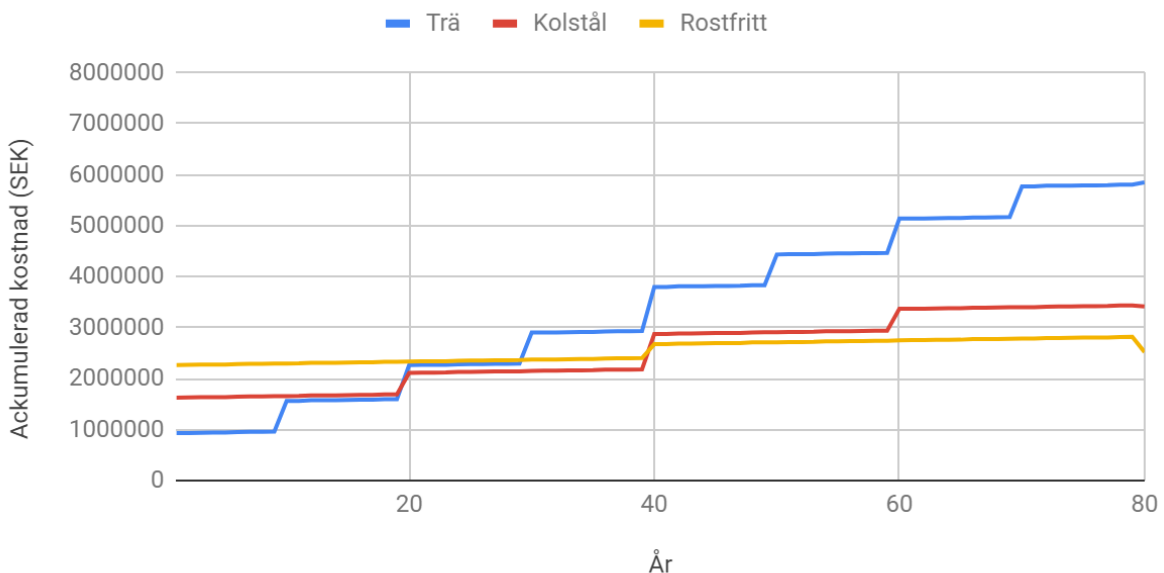
| | NNV 0% ränta | NNV 3,5% ränta |
|-----------|--------------|----------------|
| Rostfritt | 7% | 5% |
| Kolstål | 6% | 6% |
| Trä | 2% | 2% |

7.2.2 Basfall högsta värdering av miljöpåverkan

Tidigare resultat visar på att klimatförändring är den miljöpåverkanskategori som får störst effekt på miljökostnaden men att miljökostnadens storlek varierar stort beroende på vilken värderingsmodell som väljs. Med den högsta värderingen av CO₂-ekvivalenter blir den totala miljökostnaden i storleksordningen 486 tkr och 600 tkr för den rostfria bron respektive kolstålbron och ca halva värdet, 257 tkr för träbron vilket är en markant ökning från när beräkningar görs med 1,14 kr per kg CO₂-ekvivalenter, se tabell 7.3 och 7.4. Även om den övre gränsen för det intervall inom vilket Naturvårdsverket estimerar att miljöskadestorleken för klimatförändring ligger är mer osannolik är det dock av intresse att se om denna värdering gör att miljökostnader får större inverkan i den samhällsekonomiska analysen. Utvecklingen av den ackumulerade kostnaden för detta räkneexempel ses i figur 7.4 nedan och innebär således en addition av resultat från kostnadsanalysen och den högsta miljöpåverkningsvärderingen i avsnitt 7.1.4.

Samhällsekonomisk kostnadsutveckling

Basfall, högsta värdering enligt ASEK och Naturvårdsverket



Figur 7.4 Ackumulerad kostnad över 80 år, ordinarie kostnader samt miljökostnader. Naturvårdsverkets högsta rekommenderade miljökostnadsfaktorer (5,81 kr per kg CO₂-ekvivalenter)

I detta fall ses en viss förändring mot föregående fall, figur 7.3, på hur broarna förhåller sig till varandra kostnadsmässigt redan under kalkylperiodens första hälft. De två stålbroarna ligger överlag på en högre nivå än tidigare men förhållandet mellan dem är i princip oförändrat. Detta är ett rimligt utfall med tanke på att deras miljökostnader inte skiljer nämnvärt åt vare sig i storlek eller när under kalkylperioden som de inträffar. Träbron får en ekonomisk fördel i förhållande till de två stålbroarna när det ekonomiska värdet av ett kg CO₂-ekvivalenter sätts högre. I figur 7.4 ses att brytpunkten med kolstålbron inte kommer att inträffa förrän vid den andra ommålningen och med den rostfria bron vid den tredje ommålningen. Därefter blir träbron, som tidigare, det dyraste alternativet på grund av den stora arbetskostnaden vid ommålningen.

Nettonuvärdena vid kalkylperiodens slut liksom den procentuella skillnaden för kolstålbron och träbron jämfört med den rostfria bron visas i tabell 7.7. Med 0% kalkylränta blir den rostfria bron

nettonuvärde 2 520 tkr, kolstålbrons 3 410 tkr och träbrons 5 850 tkr. Med 3,5% kalkylränta blir motsvarande siffror 2 410 tkr, 2 170 tkr respektive 2 520 tkr.

Tabell 7.7 Nettonuvärde efter 80 år för ordinarie kostnader och miljökostnader vid 0% och 3,5% ränta samt procentuellt förhållande till rostfri bro. Avrundat till 10 000-tal kr

| | NNV 0% ränta (SEK) | Förhållande till rostfri bro | NNV 3,5% ränta (SEK) | Förhållande till rostfri bro |
|-----------|--------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Rostfritt | 2 520 000 | 100% | 2 410 000 | 100% |
| Kolstål | 3 410 000 | 136% | 2 170 000 | 90% |
| Trä | 5 850 000 | 232% | 2 520 000 | 104% |

I tabell 7.7 ses att skillnaden mellan nettonuvärdena ytterligare har minskat något jämfört med resultatet i föregående avsnitt. Med 0% ränta ligger kolstålbron 36% över den rostfria bron och träbron 132% över den rostfria bron jämfört med 38% respektive 175% utan miljökostnader. Trots utjämningen resulterar dock inte heller den högsta värderingen av miljöpåverkan i att rangordningen av broarna förändras. Träbron är fortfarande klart dyrast. Med introduktion av kalkylränta hamnar dock träbron endast 4% över och kolstålbron endast 10% under den rostfria brons nettonuvärde. Slutsatsen är därmed att om den högsta värderingen av miljöpåverkan görs samtidigt som den rekommenderade kalkylräntan på 3,5% tillämpas kommer de tre broarna att vara mycket lika varandra kostnadsmissigt när hela kalkylperiodens samtliga kostnader beaktas. I synnerhet gäller detta också under beaktande av variation i stålpriser som rimligen borde kunna väga upp skillnaden mellan stålbroarna enbart med en mindre prisförändring.

I tabell 7.8 redovisas miljökostnadernas procentuella andel av den totala kostnaden för den högsta miljökostnadsvärderingen tillämpas. Här ses en påtaglig skillnad mot det föregående fallet med Trafikverkets standardvärdering av CO₂-ekvivalenter, jämför tabell 7.6. Miljökostnaden utgör om 0% kalkylränta används 20% av totalkostnaden för den rostfria bron, 18% för kolstålbron och 4% för träbron. Med 3,5% ränta sker en viss förändring men andelarna är fortfarande i samma storleksordning som utan diskontering. Resultatet visar således att när den högsta värderingen av koldioxid tillämpas får miljökostnaderna en icke-försumbar andel av den totala samhällsekonomiska kostnaden, nära en femtedel för stålbroarna som är förknippade med stora koldioxidutsläpp i samband med materialtillverkning. Träbrons avsevärt mindre klimatpåverkan speglas också tydligt.

Tabell 7.8 Andel miljökostnader av total kostnad vid 0% och 3,5% ränta.

| | NNV 0% ränta | NNV 3.5% ränta |
|-----------|--------------|----------------|
| Rostfritt | 19% | 17% |
| Kolstål | 18% | 21% |
| Trä | 4% | 6% |

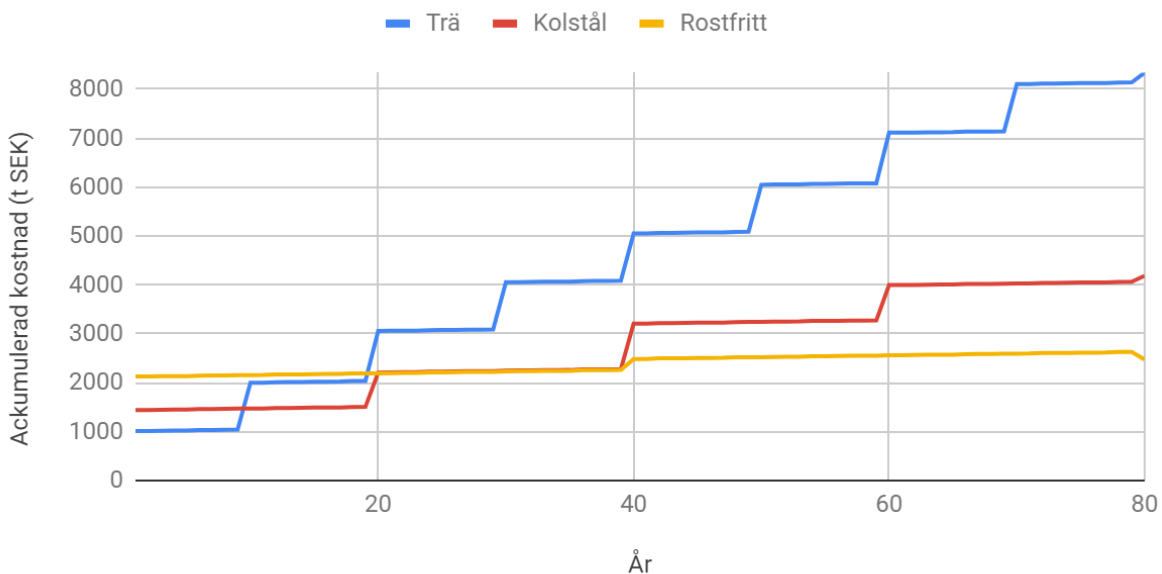
7.2.3 Basfall inklusive trafikpåverkan

Trafikpåverkan behöver inte nödvändigtvis vara inkluderat i broarnas livscyklar då det varierar från fall till fall beroende på placering. I denna studie där trafikplats Södertälje Syd används för att exemplifiera trafikeffekter är det dock högst relevant att beakta både i ett miljömässigt och ekonomiskt perspektiv. LCA-resultatet i avsnitt 5.3.6 visade på att utsläpp på grund av trafikavstängning inte är en försumbar faktor i broarnas livscykelperspektiv om de innebär störningar i en större trafikled. Trafikantkostnader på grund av försening och minskad reskomfort kan samtidigt bli mycket höga, se avsnitt 6.2.4. I en samhällsekonomisk analys är inkludering av dessa två faktorer därmed högst relevant att studera effekterna av.

I detta fall adderas trafikantkostnaderna i 6.2.4 och miljökostnader från trafikomledning till resultatet för den samhällsekonomiska bedömningen av basfallet i 7.2.1. Miljökostnaderna för trafikomledning beräknas utifrån LCA-resultatet med värdering av CO₂-ekvivalenter till 1.14 kr/kg. Detta ger sammantaget, när kostnaderna för varje miljöpåverkanskategori aggregeras, en miljökostnad om 3906 kr för varje tillfälle av 3h trafikomledning i samband med upp- eller nedmontage av någon bro. Detta är en mycket liten summa i förhållande till trafikantkostnaderna för samma händelse, som enligt tabell 6.9 uppgår till 135 tkr. Reducerad hastighet i samband med ommålning av träbron leder till trafikantkostnader på 344 tkr. Detta visar på en mycket låg skattning av miljökostnader i förhållande till förseningskostnader som i sin tur till största del beror på förlängd restid för personbilstrafik. Den ackumulerade kostnadens utveckling över kalkylperioden visas i figur 7.5.

Samhällsekonomisk kostnadsutveckling

Basfall med trafikavstängningskostnader



Figur 7.5 Ackumulerad kostnad över 80 år, ordinarie kostnader, miljökostnader samt trafikantkostnader. 1,14 kr per kg CO₂-ekvivalenter, i övrigt enligt Naturvårdsverkets rekommendation för miljökostnadsvärdering.

I figur 7.5 ses att trafikeffekter får en märkbar påverkan på kostnadsutvecklingen i den samhällsekonomiska analysen, jämförelse kan göras med basfallet i figur 7.4. Med tanke på det ringa tillskottet av miljökostnader i samband med trafikpåverkan kan förändringen i princip enbart hänföras

trafikantkostnaderna. Alla tre broar påverkas i samma grad vid det initiala montaget. Därför är deras inbördes relation opåverkad fram till att underhållsåtgärderna börjar inträffa för kolstålsbron och träbron. Den tydligaste förändringen är att träbron kommer att avvika i kostnad jämfört med de två andra broarna redan vid det andra ommålningstillfället efter 20 år. I basfallet sågs detta först vid det tredje ommålningstillfället. Resterande tid under kalkylperioden kommer träbron att vara klart dyrare. På grund av de höga trafikantkostnaderna vid ommålningstillfällena blir nettonuvärdet för träbron också att bli betydligt högre än i basfallet, 8 340 tkr jämfört med tidigare 5 700, se tabell 7.9 i jämförelse med tabell 7.5.

Tabell 7.9 Nettonuvärde efter 80 år för ordinarie kostnader, trafikantkostnader och miljökostnader vid 0% och 3,5% ränta samt procentuellt förhållande till rostfri bro. Avrundat till 10 000-tal kr

| | NNV 0% ränta (SEK) | Förhållande till rostfri bro | NNV 3,5% ränta (SEK) | Förhållande till rostfri bro |
|-----------|--------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Rostfritt | 2 470 000 | 100% | 2 270 000 | 100% |
| Kolstål | 4 190 000 | 169% | 2 240 000 | 99% |
| Trä | 8 340 000 | 337% | 3 360 000 | 148% |

En förändring mot basfallet ses dock också för kolstålsbron på grund av trafikantkostnader. Från att brytpunkten med den rostfria bronns kostnad i basfallet skedde vid den andra ommålningen inträffar den nu redan vid det första tillfället. I samband med ommålningen år 20 hamnar de två kolstålsbroarna på närmast identisk kostnad. På grund av att sedan inga ytterligare underhållsåtgärder skiljer dem åt fram till nästa ommålning kommer differentieringen mellan dem inte att ske förrän år 40. I nettonuvärde efter hela kalkylperioden hamnar kolstålsbron på 4 190 tkr, 70% högre jämfört med den rostfria bron på 2 470 tkr. Träbrons nettonuvärde motsvarar väl över 3 gånger den rostfria bronns kostnad. Även med en kalkylränta på 3,5% kommer träbron att vara klart dyrast, nära 50% högre än både kolstålsbron och den rostfria bron som hamnar på mycket lika kostnadsnivå.

Slutsatsen blir således för detta fall att när trafikantkostnader inkluderas i den samhällsekonomiska kalkylen kommer detta att leda till en mer tydlig differentiering mellan de tre alternativen med 0% ränta. Träbron avviker från de övriga broarna redan vid andra ommålningen efter 20 år och blir det dyraste alternativet därefter. Kolstålsbron och den rostfria bron har liknande kostnad fram till andra ommålningstillfället efter 40 år. Därefter är den rostfria bron mest fördelaktig och har en närmast konstant kostnad över hela kalkylperioden. Med en högre räntesats på 3,5% är fortfarande träbron dyrast medan de två stålbroarna har mycket lika nettonuvärde.

Andelen miljökostnader sett till den totala samhällsekonomiska kostnaden vilket redovisas i tabell 7.10 förändras bara marginellt mot basfallet. För stålbroarna ligger värdet efter hela kalkylperioden på 6% och träbron på knappt 2% vid 0% ränta. Förändringen vid höjning till 3,5% ränta är också liten.

Tabell 7.10 Andel miljökostnader av total kostnad vid 0% och 3,5% ränta

| | NNV 0% ränta | NNV 3,5% ränta |
|-----------|--------------|----------------|
| Rostfritt | 6% | 5% |
| Kolstål | 5% | 5% |
| Trä | 2% | 2% |

7.2.4 Ommålning av kolstålbro utomhus, inklusive trafikantkostnader

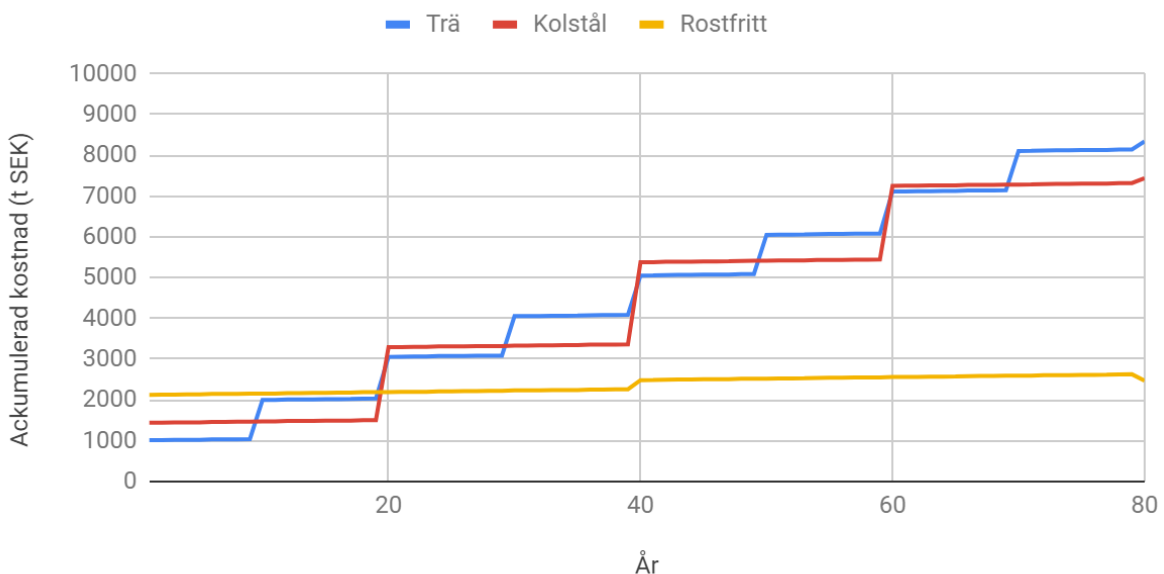
Att trafikpåverkan i samband med montage, underhåll och rivning kan ha stora effekter på broarnas samhällsekonomiska kostnad konstaterades i avsnitt 7.2.3. I detta analysfall undersöks nu en situation där kolstålbron inte monteras ned vid ommålning utan detta arbete sker utomhus på uppförandeplatsen. Arbetskostnaden är då högre och kan enligt Trafikverkets schablonkostnad uppskattas till 2300 kr per kvadratmeter målad yta, se tabell 6.2. Den högre kostnaden uppkommer på grund av intäckning av bron för att förhindra miljöutsläpp i samband med arbetet, arbetsställningar etc.

Kostnader för förseningar och minskad reskomfort för personbilstrafik beräknades i avsnitt 6.2.4 till 1 033 tkr per ommålningstillfälle för kolstålbron. Jämförelsevis blir kostnaden för material och arbete runt 690 tkr med en målad yta på 300 m². Eftersom trafikpåverkan inte innebär extra körsträcka utan enbart förlängd restid uppskattas inte någon ytterligare miljöpåverkan uppstå på grund av trafikstörningen, och därmed inte heller någon tillhörande samhällsekonomisk kostnad. Miljökostnaderna som inkluderas är enbart förändrade för kolstålbron i den mån att miljöpåverkan från nedmontering och transport till och från verkstad inte längre är medräknat. Träbron och den rostfria bron har inte förändrats från basfallet.

Utvecklingen av den ackumulerade kostnaden för respektive bro i ovan beskrivna situation faller ut enligt diagrammet i figur 7.6. För träbron och den rostfria bron är indatan till beräkningarna och således också resultatet identiskt med 7.2.3. Trafikantkostnader tas alltså i beaktning när så är relevant även för dessa broalternativ.

Samhällsekonomisk kostnadsutveckling

Ommålning av stålbro utomhus, inklusive trafikavstängningskostnader



Figur 7.6 Ackumulerad kostnad över 80 år, ordinarie kostnader, miljökostnader samt trafikantkostnader. Ommålning av kolstålbro i fält. 1,14 kr per kg CO₂-ekvivalenter, i övrigt enligt Naturvårdsverkets rekommendation för miljökostnadsvärdering.

Resultatet visar på att kolstålbron redan vid första ommålningstillfället avviker från den rostfria bronns ackumulerade kostnad. I tidigare analyserade fall skedde inte detta förrän i samband med den andra

ommålningen år 40, jämför figur 7.6 med resultatet i 7.5. Med ommålning av kolstålbron på plats och under beaktande av trafikantkostnader blir således den rostfria bron det samhällsekonomiskt mest gynnsamma alternativet redan år 20. En tydlig trend i resultatet kan också ses i att den rostfria bron och träbron kostnadskurvor tätt följs åt under hela kalkylperioden. Träbron målas med ett dubbelt så tätt intervall som kolstålbron, vart 10:e år, men genererar samtidigt en lägre kostnad vid varje tillfälle på grund av att trafikpåverkan inte sker under lika lång tid. Som nämnt i avsnitt 5.1.8.3 kan detta hänföras till att ommålning av kolstålbron kräver mer omfattande ytbehandling jämfört träbron i form av blästring innan de nya färglagren kan appliceras. Två ommålningar av träbron resulterar således i en kostnad jämförbar med en ommålning av kolstålbron i fält när trafikantkostnader inkluderas i den samhällsekonomiska kalkylen. Sett till hela kalkylperioden resulterar detta i att träbron och kolstålbron hamnar på i princip samma ackumulerade kostnad, 3 gånger motsvarande värde för den rostfria bron vilket framgår av tabell 7.11. Träbron och kolstålbron kan förväntas generera en kostnad på runt 8 mkr över hela livslängden medan den rostfria bron får en ackumulerad kostnad, dvs nettonuvärde med 0% kalkylränta, på ca 2,5 mkr. Vid 3,5% kalkylränta har fortfarande träbron och kolstålbron nära 50% högre nettonuvärde och sammanfattningsvis är således den rostfria bron det klart mest gynnsamma alternativet ur ett samhällsekonomiskt perspektiv, även med högre kalkylränta.

Tabell 7.11 Nettonuvärde efter 80 år för ordinarie kostnader, trafikantkostnader och miljökostnader vid 0% och 3,5% ränta samt procentuellt förhållande till rostfri bro. Avrundat till 10 000-tal kr

| | NNV 0% ränta (SEK) | Förhållande till rostfri bro | NNV 3,5% ränta (SEK) | Förhållande till rostfri bro |
|-----------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Rostfritt | 2 470 000 | 100% | 2 270 000 | 100% |
| Kolstål | 7 440 000 | 301% | 3 230 000 | 143% |
| Trä | 8 340 000 | 337% | 3 360 000 | 148% |

Resultatet visar återigen på att om bron är förlagd över en större väg där trafiken påverkas vid underhåll är det, ur samhällsekonomisk kostnadssynpunkt av stor vikt att välja ett alternativ som innebär så lite påverkan på trafiken som möjligt under livslängden. Storleken av underhållskostnaderna när även trafikantkostnader blir relevanta att beakta i kostnadsanalysen kan uppgå till investeringskostnadens storlek flera gånger om, jämför resultatet i tabell 7.11 med de redovisade investeringskostnaderna i tabell 6.7. Att välja en rostfri bro över väg E4 utanför Södertälje var således ett gott alternativ även om valet, enligt anbudsredovisningen, i detta fall enbart baserades på investeringskostnaden och inte framtida underhållsprognos.

För en bro med ommålningsbehov, såsom kolstålbron i denna studie, är det mycket fördelaktigt om den är nedmonterbar så att trafikpåverkan i samband med underhållet kan minimeras. Anledningen till att så inte har antagits för träbron i något fall i studien är att det för broförvaltaren, som blir betalningsansvarig för kostnader för arbete och material, inte finns något klart ekonomiskt motiv för ommålning i verkstad. Målningskostnaden torde vara densamma som om arbetet utförs utomhus vilket skiljer sig från kolstålbron där kostnader för intäckning kan undvikas vid arbete i verkstad. Det senare kompenserar för merkostnader som uppstår för upp- och nedmontering samt transport.

Som ytterligare kommentar till trafikantkostnaderna bör dock nämnas att den uppskattade förseningstiden både utgår från uppskattning om hur lång tid som den genomsnittliga restiden ökar och hur lång tid trafikpåverkan sker. Ingen detaljerad analys av trafikflöde på den aktuella sträckan har

gjorts vilket gör att det finns stora osäkerheter i resultatet. Den huvudsakliga poängen med beräkningarna är dock att belysa den stora inverkan som trafikeffekter kan ha på resultatet i en samhällsekonomisk kostnadskalkyl vilket tydligt framgår av detta analysfall.

I tabell 7.12 redovisas den procentuella andelen miljökostnader av broarnas nettonuvärde efter 80 år. För kolstålbron ligger värdet lägre än i basfallet på grund av att trafikantkostnadernas storlek i förhållande till tillskottet av miljökostnader. Slutsatsen från tidigare analysfall kvarstår att miljöpåverkan värderas avsevärt lägre än förlängd restid och minskad reskomfort och i den samhällsekonomiska analysen av broarna får miljökostnader endast litet genomslag.

Tabell 7.12 Andel miljökostnader av total kostnad vid 0% och 3,5% ränta

| | NNV 0% ränta | NNV 3,5% ränta |
|-----------|--------------|----------------|
| Rostfritt | 6% | 5% |
| Kolstål | 3% | 4% |
| Trä | 2% | 2% |

8. Slutsatser och diskussion

I detta avsnitt följer diskussion och slutsatser utifrån resultatet för varje delstudie: konstruktionsberäkningar, livscykelanalys och kostnadsanalys, samt den samhällsekonomiska analysen. I avseende på livscykelanalysen kan detta ses som en del av tolkningsfasen.

8.1 Konstruktionsberäkningar

Slutsatsen från beräkningarna är att långa spännvidder över 20 meter bör möjligt att uppnå för bron med duplexstålplåtar på 6 mm. Dock krävs viss utvidgad kontroll av fenomen som inte täcks in av finit-elementmodelleringen i denna studie eftersom fackverksramens tvärsnitt tillhör klass 4. Spännvidder under 20 m är inte kritiska på samma sätt även om tunna plåtar nyttjas. Detta visas i studien genom beräkningsfallet med 20,9 m spännvidd där toppvärdena på de mest kritiska punkterna ligger klart under materialets flytgräns, även i brottgränstillstånd.

De lokala områden där spänningarna blir kritiska uppstår vid den tryckta överramsstängen. Spänningsnivåer i finita-elementmodelleringen som medför plasticering kan accepteras för livplåten i brottgränstillståndet om det enbart rör sig om små, klart avgränsade områden, vilket är aktuellt i detta fallet. Anledningen till detta är att spänningarna lokalt anses kunna omfördelas och att materialets plastiska bärförmåga då utnyttjas. Detta resonemang är dock inte giltigt för tvärsnitt av klass 4 eftersom tvärsnittets bärförmåga kommer att begränsas av buckling av plåtarna redan innan materialet uppnår flytgränsen. Ska därmed tillräcklig bärförmåga kunna säkerställas för överramsstängen måste noggrannare analyser på tvärsnittsnivå utföras för att säkerställa tillräcklig kapacitet i varje enskilt fall, där reduktionen av tvärsnittsarea beaktas. Sådan kontroll ligger dock utanför denna studies omfattning som primärt baseras på spänningsanalys med FE-modellering. Tvärsnittsklass 4 kan med de aktuella dimensionerna för brons ramstänger inte undvikas om inte plåtarnas tjocklek ökas till 10 mm.

Dimensioneringsberäkningarna för Södertäljebron visade att det är möjligt att uppfylla tillräcklig bärförmåga även efter att nödvändig areareduktion av tvärsnittet har gjorts. Maxspänningarna i de kritiska områdena kring överramens knutpunkter för Södertäljebron motsvarar de som här beräknats för bland annat fall 12, ca 550 MPa. Med en utvidgad analys är det därför möjligt att tillräcklig bärighet ska kunna uppnås för en spännvidd på ca 26 meter, om samtidigt den fria bredden minskas till 3 m. I beräkningsfall 12 har även fackverkets höjd kunnat minskas till 1,7 m. Toppvärdena i de kritiska områdena för spännvidden på 28,7 m är högre men om spännvidder nära denna efterfrågas kan det likväl vara motiverat att som utgångspunkt modellera bron med 6 mm plåtar och försöka bekräfta de kritiska tvärsnittens bärförmåga med kompletterande beräkningar för utnyttjandegrad.

Bortsett från de lokala överskridandena vid knutpunkterna och tvärbalksinfästningen ses att spänningarna generellt är klart lägre i såväl övriga delar av livplåtarna som i över- och underfläns och tvärbalkar. Materialet utnyttjas därmed enbart inom begränsade områden i fackverksramarna till nivåer nära dess maximala kapacitet. Gångbanepåten plasticerar i brottgränstillstånd för samtliga kontrollerade spännvidder vilket dock är godtagbart. I bruksgränstillstånd är spänningarna på icke-kritisk nivå i gångbanepåten. Allmänt kan konstateras att det är klart fördelaktigt om den fria bredden minskas till 2,5 m eller 3 m eftersom detta får tydlig effekt på vilka spänningsnivåer som uppträder i överramsstängens kritiska områden. För att uppnå tillräcklig bärighet för spännvidder på 26 m och eventuellt längre med 6 mm plåtar visar resultatet på att det är nödvändigt att minska den fria bredden till åtminstone 3 m. De spänningsnivåer som beräknas för fallen med 26,1 m spännvidd och 3,5 m fri

bredd överskrider redan i bruksgränstillståndet stålets flytgräns och det är därför inte troligt att dessa dimensioner är acceptabla utan ökad plåttjocklek.

Även om spänningarna generellt är icke-kritiska för duplexstålet är de dock på en sådan nivå att det är motiverat att nyttja höghållfast stål för att kunna använda sig av tunna plåtar. För att få en uppskattning av materialökningen som krävs om bron i stället ska tillverkas av traditionellt konstruktionsstål med flytgräns 355 MPa modellerades geometrin i beräkningsfall 12 med förändrade materialegenskaper. För att plasticering inte skulle uppkomma för redan i bruksgränstillstånd ökades plåttjockleken till 12 mm i gångbanaplåten och livplåten till 8 mm. Överramsstången för bron i kolstål, fall 13, tillhör en lägre tvärsnittsklass med 8 mm plåtar vilket gör att det inte är kritiskt att beakta buckling på samma sätt som för de rostfria stålplåtarna i övriga beräkningsfall.

Tvärsnittsklassificeringen för kolstål är inte lika konservativ som de för rostfritt stål. Därav ses den aktuella plåttjockleksökning som rimlig även om det även här bör understrykas beräkningar med finita-elementanalys inte motsvarar en komplett dimensioneringsberäkning såsom görs vid uppförande av en ny bro. Materiallåtgången för bron i kolstål blev 21,8% högre än för den rostfria bron.

Undersökningen av olika knutpunktsutformning visar på att om materialets hållfasthet lokalt kan förväntas bli utnyttjat till hög grad bör knutpunkterna utformas utan excentriciteter. När excentriciteter introduceras uppkommer ett kritiskt område i zonen där de båda diagonalerna ansluter till varandra. I det normala utförandet var spänningsnivåerna här låga. I detta område blev maxspänningarna dessutom högre än vad som uppnåddes tidigare i de kritiska områdena. Beräkningarna visade på en spänningsökning på 13% med excentriciteter. En förklaring till att detta resultat uppkommer är att moment uppstår i knutpunkter med excentricitet som inte förekommer i den ursprungliga utformningen. Fackverksbrons verkningssätt bygger på att de diagonala ramstångerna överför krafter som uppstår vid belastning av brobanan till överramsstången. De horisontella kraftkomponenterna leder till att tryckande normalkrafter uppkommer i överramsstången. Excentriciteten i knutpunkterna gör dock att verkningslinjerna för krafterna i de diagonala ramstångerna inte kommer mötas i en punkt som ligger på den horisontella ramstångens systemlinje (se figur 4.6 för förtydligande).

Verkningslinjen för den tryckande normalkraften i överramsstången kommer därför att bli förskjuten i vertikalled från överramsstångens systemlinje varvid moment uppstår i knutpunkten. Dessutom innebär excentricitet att överramsstångens livplåt inte ökar i höjd vid knutpunkten på samma sätt som med den icke-excentriska utformningen varvid mängden material reduceras i det område på bron som visats vara ett av de mer kritiska. För kortare spännvidder än de som kontrollerats i denna studie borde dock knutpunktsutformningen i detta avseende vara av mindre betydelse eftersom de lägre spänningsnivåerna ger mer utrymme för mer "ineffektiv" utformning såsom excentriciteter.

Med normal knutpunktsutformning visade resultatet på en minskning av spänningsnivåerna i knutpunkterna närmare brons upplag. Detta sågs dock inte i samma utsträckning när excentriciteter introducerats utan här var spänningsnivåerna fortsatt höga. Utan excentriciteter i knutpunkterna kan maxspänning i överramsstången förväntas inträffa vid knutpunkterna närmast fältmitt och detta område vara mest kritiskt att studera i dimensioneringsprocessen. Det samma kan inte sägas om knutpunkterna har excentrisk utformning. Ska exempelvis excentriciteter förekomma för en bro med kort spännvidd bör spänningsnivåerna vid de yttersta knutpunkterna kontrolleras speciellt.

Ett möjligt sätt att göra ytterligare materialbesparing och optimering av strukturen skulle kunna vara att ha en varierande livplåttjocklek i brons längsled med tunnare plåtar vid upplagen och tjockare närmare fältmitt. Vid sådan varierande plåttjocklek skulle dock kontroll av fler trafiklastplaceringar behöva göras för att säkerställa var övergången till tunnare plåt är möjlig. Detta är något att

rekommendera för vidare analys av bron men bör dock förutsätta icke-excentrisk knutpunktsutformning.

Vid undersökning av andra ordningens effekter och knäckning sågs enbart en mycket liten förändring i maxspänningarna i de kritiska områdena, ca 4% för merparten av beräkningsfallen. Den längsta kontrollerade spännvidden på 28,7 m samt då knutpunkterna utformats med excentricitet fick dock större spänningsförändring. Spänningsökningen var för dessa fall 14% respektive 17%. Resultatet tyder på att excentricitet i knutpunkterna leder till större effekter då andra ordningens teori beaktas än vid oförändrad utformning. Den lastökningsfaktor som krävs för att inducera knäckning beräknades till mellan 2 och 3 gånger den dimensionerande lastkombinationen i brottgränstillstånd. För den kortare bron med 20,9 m spännvidd var dock värdet något högre liksom för bron i kolstål där plåttjockleken är 8 mm.

I avseende på styvhet i tvärled visar resultatet att båda de föreslagna utformningarna, förflyttad nedre fläns och avstyvningsplåtar, ger ökad styvhet i tvärled. Med förflyttad fläns minskas utböjningen med 13% och med avstyvningsplåtarna med hela 40%. När båda dessa lösningar kombineras kan utböjningen reduceras till ca hälften av den initiala. När den nedre flänsen flyttas undviks också det kritiska området mitt på underramsstången som uppstår med originalutformningen. Spänningarna i den yttre livplåten ökar något som följd, liksom för underflänsen med spänningsnivåerna är inte kritiska. Avstyvningsplåtarna medförde lokala spänningstoppar vid infästningen, dock enbart för ett fåtal element. Ingen minskning av spänningarna vid tvärbalksinfästningen kunde ses för denna utformningsvariant. Med excentrisk knutpunktsutformning sågs en ökning på 16% av utböjningen i tvärled varvid detta är en vekare utformning även sett till deformationer i tvärled.

De två komfortkraven i bruksgränstillstånd visade sig vara klart icke-kritiska för bron. För såväl egensvängningsfrekvens och nedböjning sågs en mycket god marginal till de uppsatta gränsvärdena, för samtliga beräkningsfall.

Sammanfattningsvis är det således inte på förhand givet att något av beräkningsfallen för den rostfria bron är tillräckligt dimensionerade med den aktuella plåttjockleken. Det är dock möjligt att mer noggrann tvärsnittsanalys kan innebära att tillräcklig bärighet kan påvisas för upp till 26,1 m spännvidd, eventuellt även 28,6 m. En förutsättning bör dock vara en fri bredd på 3 m eller mindre. Kortare spännvidder än 20 m bör inte vara några svårigheter att klara med 6 mm plåt eller eventuellt tunnare. Vid kritiska spännvidder rekommenderas klart att knutpunkterna utformas utan excentriciteter. För att minska spänningarna vid tvärbalksinfästningen kan med fördel underramens nedre fläns flyttas upp till nivå med tvärbalkarnas underkant. Avstyvningsplåtar leder inte till minskning av spänningsnivåerna men ger däremot en klar ökning av styvheten i tvärled, även om de enbart svetsas i den inre livplåten.

8.2 Livscykelanalys

Slutsatsen från beräkningarna och tolkningen av resultatet är att störst miljöpåverkan för alla tre broar och alla miljöpåverkanskategorier som inkluderats i studien uppkommer vid tillverkning av konstruktionsmaterialen. Detta visas tydligt med den initiala materialtillverkningsfasens dominans men också att de underhållsåtgärder som är förknippade med ett materialflöde kan göra att denna fas genererar ett icke-försumbart miljöpåverkansbidrag.

Med avseende på utsläpp av växthusgaser genererar under hela livscykeln den rostfria bron 34,2 ton CO₂-ekvivalenter, träbron 3% lägre på 33,5 ton och kolstålbron 75% högre på 60,1 ton. De två förstnämnda är således mest fördelaktiga med hänsyn till klimatpåverkan medan kolstålbrons resultat hamnar betydligt högre när ett vagga-till-gravperspektiv inklusive systemutvidgning tillämpas. Inkluderas inte systemutvidgningen med ersättning av nyproducerat material i andra produktsystem kommer dock resultatet att bli 74,2 ton CO₂-ekvivalenter för den rostfria bron, 92,1 ton för kolstålbron och 37,1 ton för träbron som därmed klart gynnas av att huvudsakligen vara producerad av trä med noll nettoutsläpp av koldioxid förknippat med virket.

Resultat är därmed i hög grad avgörande av hur systemgränserna definieras. Sett till de olika konstruktionsmaterialen är stålet tydligt det material som genererar störst bidrag till klimatförändring för de tre broarna, även för träbron trots att mängden stål i förhållande till trä är mycket liten. Hur stålet faller ut i en miljöpåverkansbedömning påverkas kraftigt av graden av återvinning, både genom tillförsel av återvunnet material i tillverkningen och genom systemutvidgning och antagande om att skrotet ersätter nyproduktion av material. Produktion av rostfritt stål från enbart nyutvunna råvaror orsakar betydligt större klimatpåverkan på grund av dess höga inblandning av legeringsmetaller än produktion av konventionellt kolstål. Samma effekt ses också för övriga miljöpåverkanskategorier bortsett fotokemisk oxidation. Samtidigt tillverkas det rostfria stålet för bron med inblandning av nära 60% rostfritt stålskrot till skillnad från kolstålets genomsnittliga 20%. Den högre andelen återvunnet material räcker dock inte för att väga upp legeringsmetallernas inverkan på det rostfria stålets klimatpåverkan i produktionen där 2,75 kg CO₂-ekvivalenter per kg rostfritt stål och 2,28 kg CO₂-ekvivalenter per kg kolstål genereras.

På grund av legeringsmetallernas stora miljöpåverkan får det rostfria stålet en stor resultatmässig fördel av att inkludera återvinning utanför systemgränserna i livscykelanalysen. Att undvika nyproduktion av legeringsmetaller får en stor effekt på stålets klimatpåverkansresultat. Nettoutsläppet för rostfritt stål blir enbart 0,6 kg CO₂-ekvivalenter per kilo stål jämfört med 0,9 kg CO₂-ekvivalenter för kolstålet. Med denna beräkningsmetodik gynnas klart det rostfria stålet och reducerar kraftigt klimatpåverkan för den rostfria bron, så mycket att den blir jämbördig med träbron. Det ska dock tilläggas att resultatet för träbron inkluderar fullständig tillverkning av två broöverbyggnader för att den ska uppfylla den funktionella enhetens tidsaspekt. Utan systemutvidgningen hade träbron klart varit mest fördelaktig ut miljöpåverkanssynpunkt. Vilken tidsmässig omfattning som definierar produktsystemen har därmed klar inverkan på hur broarnas LCA-resultat förhåller sig till varandra. Effekten av återvinning av det rostfria stålet ses inte bara för klimatförändring utan genomgående för alla miljöpåverkanskategorier utom fotokemisk oxidation.

Huruvida återvinning utanför systemgränserna ska inkluderas eller inte är en bedömningsfråga, å ena sidan är en hög återvinningsgrad för både kolstål och rostfritt stål mycket trolig då det tekniskt inte finns några begränsningar eller nackdelar, materialen har ett högt ekonomiskt restvärde och tillgången på skrot understiger efterfrågan. Å andra sidan kommer stålet att vara otillgängligt för återvinning under en mycket lång tidsperiod på grund av konstruktionens långa tekniska livslängd vilket gör att fördelarna inte kan tillgodoräknas förrän långt efter produktionen av materialet. Denna aspekt kan ge det rostfria stålet orimliga miljömässiga fördelar om inte resultatet tolkas med ett kritiskt förhållningssätt. Även för träbron finns viss grund för diskussion om systemgränser där trä antas vara ett koldioxidneutralt konstruktionsmaterial och således inga CO₂-utsläpp i samband med förbränningen vid avfallshanteringen inkluderas.

Att tillämpa den aktuella systemdefinitionen i livscykelanalysen med systemutvidgning för att beakta framtida återvinning är den rekommenderade metoden för genomförande av livscykelanalyser av stål enligt den globala branschorganisationen World Steel Association. Detta motiverar metodvalet och med efterföljande konsekvens att det rostfria stålet för en stor fördel gentemot kolstålet, trots att det i produktionen genererar högre nivåer av växthusgasutsläpp. Det kan dock vara missvisande att påstå att det rostfria stålet är mer "miljövänligt" än kolstålet eftersom produktionen de-facto är mer koldioxidintensiv med hänsyn till legeringsmetallerna. Om den aktuella metoden ska tillämpas vid genomförande av livscykelanalyser är således rekommendationen att resultatet måste värderas också utifrån ett perspektiv där återvinning inte inträffar då betydelsen av systemdefinitionerna för resultatets utfall är avgörande för resultatet. Att direkt påstå att det rostfria stålet är ett mer miljöanpassat konstruktionsmaterial är därför en sanning med modifikation. Trots att den faller ut klart bättre än kolstålbron med de i studien tillämpade systemgränserna och tillhörande systemutvidgning finns också motiv till att hävda det omvända, att det rostfria stålet är sämre än kolstål ur ett miljöperspektiv. Med detta resonemang blir i sådana fall träbron det klart bästa broalternativet med hänsyn till miljöpåverkan.

Baserat på ovanstående resonemang är också en rekommendation till framtida studier att utföra livscykelanalys för bron där även kolstålet har en extra hög hållfasthetsgrad. I denna studie är en kolstålqualität med konventionell hållfasthetsgrad S355 antaget medan det rostfria stålet är av duplexkvalitet och vilket gör att en mindre materialmängd krävs. Detta kompenserar för det rostfria stålets högre klimatpåverkan per kilo och gör att de två broarna hamnar på liknande utsläppsnivå, innan systemutvidgningen görs. Det är dock möjligt att tillverka även höghållfast kolstål vilket troligtvis skulle göra att kolstålbron faller ut betydligt bättre än den rostfria bron. En förutsättning är dock att det är tekniskt genomförbart att använda ett sådant konstruktionsmaterial för bron vilket inte har beaktats närmare.

Slutsatser för beräkningen av trafikomledningens inverkan på resultatet i livscykelanalysen är att påverkan av trafik i samband med exempelvis underhållsåtgärder kan få stora effekter. Enbart omledning av trafiken under ett fåtal timmar vid uppförande och rivning av broarna leder till en ökning av den totala klimatpåverkan med 13% för den rostfria bron om det antas att den är placerad över väg E4 vid trafikplats Södertälje Syd. Är det en stor trafikled som berörs bör materialalternativ väljas som kräver så lite underhåll som möjligt alternativt att arbetet kan utföras enbart nattetid. Vid genomförande av livscykelanalyser av infrastrukturkonstruktioner där uppförandeplats är känd är därför rekommendationen att inkludera undersökning av potentiell trafikpåverkan relaterade till processer under livscykeln.

Den övergripande slutsatsen för livscykelanalysen är att om systemet definieras som i denna studie där återvinning genom systemutvidgning inkluderas kommer den rostfria bron och träbron att vara jämbördiga ut ett miljöpåverkansperspektiv där utsläpp av växthusgaser anses väga tyngst av de studerade kategorierna. Produktion av legeringsmetaller gör tillverkningen av rostfritt stål dock klart sämre än produktion av kolstål. Det som ger det rostfria stålet dess karakteristiska egenskaper i förhållande till kolstål är också det som får störst inverkan på dess miljöprofil. Att hävda det rostfria stålets miljömässiga fördel är således inte helt korrekt. Tydligt är dock att om återvunnet material inkluderas i tillverkningen och samt att återvinning sker efter avslutad livstid kan stora positiva miljöeffekter ses, som är större än motsvarande för återvinning av kolstål. Det är också återvinningen som gör att den rostfria bron kommer ner till träbrons resultat i fråga om växthusgasutsläpp.

För att minska miljöbelastningen för stålbroarna är det optimering av materialåtgången som är väsentligt samt att säkerställa att spill i produktionen och restavfall återvinns. Att introducera större andel skrot i materialtillverkningen skulle också få stora effekter. Möjligheter till detta ses framför allt för kolstålet där den nuvarande andelen är låg. Dock krävs i sådana fall en annan tillverkningsprocess för att detta tekniskt ska vara genomförbart. För träbron ses inte samma möjligheter till minskning av miljöbelastning då den huvudsakliga komponenten trä redan är ett mer miljövänligt konstruktionsmaterial i förhållande till stål. Dock bör andelen stål i konstruktionen minimeras. Påståendet från tillverkaren att den rostfria brons miljömässiga fördel uppkommer på grund av lågt underhållsbehov styrks inte av resultatet. Underhålls bidrag till klimatförändring för kolstålbron är litet i förhållande till materialtillverkningsfasen. Om underhållsåtgärder leder till påverkan av trafik är dock denna fas av livscykelns fasen mycket viktigt att beakta ur ett miljöperspektiv och då får den rostfria bron klara fördelar.

8.3 Kostnadsanalys

Kostnadsanalysen kan sammanfattas med att investeringskostnaden är lägst för träbron på 840 tkr, därefter följer kolstålbron på 1 200 tkr och den rostfria bron på 1 890 tkr. Detta innebär att träbron motsvarar 44% och kolstålbron 64% av den rostfria brons investeringskostnad. Beaktas att träbron bara har halva tekniska livslängden jämfört med de två stålbroarna är dock värdet för införskaffning av broöverbyggnad under hela kalkylperioden det dubbla, 1 680 tkr, och kolstålbron får därmed lägst investeringskostnad totalt.

Underhållsåtgärderna får dock mycket stora effekter på hur stor kostnaden blir sett till hela kalkylperioden, i synnerhet för träbron. Kolstålbron och träbron målas om regelbundet och för båda broarna leder detta till höga arbetskostnader vid varje tillfälle. Redan vid första ommålningen blir träbron dyrare än kolstålbron och vid andra ommålningen passeras även den rostfria brons kostnad. På grund av det täta ommålningsintervallet för träbron får denna också en stor ackumulerad kostnad jämfört med de andra två alternativen sett till hela kalkylperioden, nära 3 gånger den rostfria brons totala kostnad, totalt 5 590 tkr jämfört med 2 030 tkr. Kolstålbron blir enbart ca 20% dyrare än den rostfria bron, totalt 2 820 tkr. På grund av osäkerheter i värderingen av kostnader för material och underhåll bör dessa två alternativ ses som ekonomiskt likvärdiga. Exempelvis är stora variationer i det ständigt fluktuerande stålpriset inte otänkbara vilket gör att den differens i kostnad som nu ses för broarna kan komma att både öka kraftigt och jämnas ut.

En central slutsats från kostnadsanalysen är också kalkylräntans inverkan på resultatet. Kalkylräntan påverkar framför allt träbrons nettonuvärde eftersom en stor del av dess totala ackumulerade kostnad utgörs av stora kostnadsposter som ligger långt fram i tiden. En kostnadspost som inträffar efter 40 år värderas med 3,5% ränta endast till hälften av värdet för inträffande under basåret. Träbrons nettonuvärde blir därför endast 2 380 tkr med denna räntesats. Vid analys av varierad ränta ses att högre kalkylränta medför lägre nettonuvärde vilket är vad som kan förväntas i en kostnadsanalys med nuvärdemetoden. Effekten är störst för träbron där förändringen av nettonuvärde sker snabbare med ökande ränta än vad som är fallet för de andra broarna. Den rostfria bron påverkas ytterst marginellt av varierande ränta vilket beror på dess stora investeringskostnad och låga underhållskostnad i förhållande till den totala kostnaden över kalkylperioden. Inom det intervall av ränta som studeras och får anses rimligt ligger kolstålbron och den rostfria bron på en liknande kostnadsnivå. Mellan 0% och 1,8% ränta kommer den rostfria bron att ha lägre nettonuvärde men för högre räntesats är kolstålbron förknippad med något lägre kostnad. Med 3,5% kalkylränta kommer träbrons också ner på en nivå motsvarande stålbroarnas kostnad. Brytpunkten då den rostfria bron passeras träbron dom

dyraste alternativ sker vid 4,75% kalkylränta. Skillnaden mellan broarnas nettonuvärde när räntan är ca 3% och högre bör dock kunna kompenseras av både variationer i stålpris och osäkerheter i exempelvis underhållsintervall. Därmed får de anses ekonomiskt jämbördiga om Trafikverkets rekommenderade räntesats tillämpas.

Slutligen bör inverkan av trafikantkostnader vid underhållsåtgärder och andra processer som leder till trafikstörningar understrykas. Påverkas en stor trafikled kan även mycket kortvarig påverkan få stora kostnadsräskiga effekter. Osäkerheten i tidsåtgången för ommålning av både träbron och kolstålbron bör dock noteras, värdena bygger i stor grad på uppskattningar. Bortsett från detta visar resultatet på att trafikantkostnaderna utan problem kan väga upp både material- och arbetskostnader för den orsakande underhållsåtgärden. Den ekonomiska betydelsen av underhållsåtgärder som leder till liten inverkan på trafiken är därmed stor, även om det endast rör sig om kortare tidperioder såsom för kolstålbron vid upp- och nedmontage i samband med ommålning. Ett alternativ med litet underhållsbehov såsom den rostfria bron kan med hänsyn till detta vara starkt motiverat i anslutning till större vägar. Arbete bör också förläggas under tider på dygnet då trafikintensiteten på den berörda vägsträckan är låg. Som nämndes i avsnitt 5.4.1.6 då miljöpåverkan från trafikomledningen diskuterades var antalet fordon per timme 60% lägre nattetid än motsvarande värde baserat på årsdygnstrafiken som används i beräkningarna. Underhållsåtgärder nattetid kan, om så är möjligt, reducera trafikantkostnaderna avsevärt.

Trafikantkostnader uppstår dock som rent samhällsekonomisk kostnader då de inte direkt belastar inte förvaltaren av bron som i övrigt är betalningsansvarig för underhåll etc. Kostnaderna uppkommer i stället indirekt på andra kostnadsställen hos privatpersoner, företagare etc i form av förlängd restid och försämrad reskomfort. I en samhällsekonomisk analys som gjorts i denna studien ska värdet av trafikantkostnader dock beaktas och tydligt utifrån studiens resultat är att detta kan ha stor inverkan på resultatet.

Uppskattningen av trafikantkostnader i studien illustrerar konsekvenserna av ett scenario där den existerande Södertäljebroen var tillverkad i kolstål och inte rostfritt stål. Den rostfria bron är klart mest fördelaktig med hänsyn till trafikantkostnader vilket gör att rostfritt stål således var ett gott materialval vid uppförandet av Södertäljebroen. Det rostfria stålets fördelar ur denna synvinkel bör vara ännu tydligare för större vägbroar där fordonstrafik både på bron och underliggande väg berörs under långa tidsperioder vid ommålning. Trots det rostfria stålets höga investeringskostnad det bör ur ett samhällsekonomiskt perspektiv vara ett materialval klart värt att överväga även för större konstruktioner.

8.4 Samhällsekonomisk analys

Genom den samhällsekonomiska analysen har både kostnader relaterat till både arbete och material kunnat kombineras med kostnadsbedömning av miljöpåverkan och som känslighetsanalys även trafikantkostnader. I avseende på miljökostnader visar resultatet på att det är utsläpp av växthusgaser som är den klart mest betydelsefulla miljöpåverkans-effekten. Den ekonomiska värderingen av en CO₂-ekvivalent skiljer sig dock mellan olika källor, Trafikverket förespråkat genom ASEK 6.1 ett ordinarie punktvärde om 1,14 kr per CO₂-ekvivalent samt kontroll med 3,5 kr per ekvivalent som känslighetsanalys, båda med en årlig uppräkningsfaktor på 1,5%. Naturvårdsverket å andra sidan rekommenderar att ett intervall med övre gräns på 5,81 kr per ekvivalent tillämpas i samhällsekonomiska analyser för att visa på osäkerheterna i värderingen. Som basfall i denna studie tillämpas ASEK:s ordinarie värde.

När kostnader för samtliga miljöpåverkanskategorier aggregeras ses att de största miljökostnaderna uppkommer i samband med tillverkning av broöverbyggnaderna vilket är ett naturligt utfall av att materialtillverkningsfasen också är den som genererar störst mängd CO₂-ekvivalenter under broarnas livscyklar. Allmänt gäller att träbron får en tydligare miljömässig fördel jämfört med stålbroarna när LCA-resultatet räknas om till en ekonomisk kostnad än när miljöpåverkan analyseras direkt i livscykelanalysens tolkningsfas. Detta beror på att stålbroarna inte får någon miljökostnadsmissig fördel i att vara konstruerade av en stor mängd återvinningsbart material som kan ge upphov till en minskning av beräknad miljöpåverkan genom systemutvidgningen. Denna kreditering leder i livscykelanalysen till att deras klimatpåverkansprofil förbättras avsevärt men leder däremot inte till något motsvarande negativt bidrag till miljökostnaderna. Undvikna utsläpp skapar inte en intäkt på samma sätt som de faktiska utsläppen genererar en kostnad. Träbron å andra sidan som orsakar en klart lägre nivå av CO₂-ekvivalenter men samtidig inte kan återvinnas till lika stor andel som stålbroarna får med detta beräkningssätt en lägre miljökostnad.

Med 0% kalkylränta hamnar de samlade miljökostnaderna totalt över livslängden på 141 tkr, 173 tkr och 111 tkr för den rostfria bron, kolstålbron respektive träbron med värdering av klimatförändring enligt Trafikverket. Detta motsvarar ca 6% av de totala ackumulerade kostnaderna för stålbroarna och 2% för träbron. Tillämpas Naturvårdsverkets övre intervallgräns blir siffrorna i stället 486 tkr, 600 tkr och 257 tkr vilket motsvarar ca 20% av stålbroarnas totala samhällsekonomiska kostnad och 5% av träbrons. Först med denna högre värdering får miljökostnader en inverkan på resultatet i den samhällsekonomiska analysen av broarna klart värd att beakta. Andelen miljökostnader i förhållande till övriga kostnader förändras endast marginellt när kalkylräntan ökas till 3,5%.

I en samhällsekonomisk analys kan istället trafikantkostnader få betydligt större effekt än miljökostnader då framför allt försening av personbilstrafik värderas högt. Med trafikomledningskostnader motsvarande en placering av bron vid trafikplats Södertälje Syd och trafikflöde enligt årsdygnstrafiken för E4 blev konsekvensen att den rostfria bron är klart mest kostnadseffektiv i ett livscykelperspektiv, med ca 70% högre kostnad för kolstålbron och över 3 gånger så hög kostnad för träbron. Utan trafikantkostnader har de två stålbroarna liknande nettonuvärde till den grad att skillnaden bör kunna kompenseras av osäkerheter i kostnadsvärdering samt förändringar av stålpriser. Träbron ligger klart högre i kostnad även i basfallet. Med 3,5% kalkylränta har kolstålbron lägst nettonuvärde i basfallet men skillnaden mellan alla tre broarna är procentuellt liten, med den rostfria bron som mellersta alternativ.

Sker underhåll av kolstålbron i fält utan nedmontering kommer både arbetskostnader och ytterligare trafikantkostnader på grund av förlängd restid att leda till att kolstålbron och träbrons kostnadsutveckling följs åt under kalkylperioden. Båda hamnar på ett nettonuvärde drygt 3 gånger den rostfria brons värde. Även med 3,5% kalkylränta kommer den rostfria bron i detta fall att ha lägst nettonuvärde, ca 50% under de övriga två broarna. Detta innebär att om underhållsåtgärder är förknippade med trafikstörningar på en vägsträcka med hög trafiktäthet kommer klart ett alternativ med lågt underhållsbehov att vara fördelaktigt eftersom förseningskostnader med råge kan väga upp både material- och arbetskostnader i en samhällsekonomisk analys. Kolstålsbron får med detta resonemang också stora fördelar genom att vara nedmonteringsbar i samband med underhåll vilket är utgångspunkten i basfallet. Osäkerheten i uppskattningen av förlängd restid i beräkningarna bör understrykas men resonemanget kring vikten av att beakta trafikantkostnader förändras ej. I förhållande till trafikantkostnader är förändringar av underhållsåtgärder såsom ändrat ommålningsintervall av mindre betydelse.

Sammanfattningsvis kan konstateras att samhällsekonomisk analys klart är en möjlig metod för att kombinera resultat från livscykelanalys och kostnadsanalys. Hur stort genomslag miljökostnader får är dock kraftigt beroende av vilka värderingsfaktorer som tillämpas som i sin tur beror av vilken modell för uppskattning av miljöpåverkan som används. Här råder inte samstämmighet mellan de svenska myndigheterna Trafikverket och Naturvårdsverket. Trafikverkets rekommenderade värdering av koldioxid relaterar till den allmänna betalningsviljan för utsläppsenheter medan Naturvårdsverket utgår från en uppskattad skadekostnad för respektive miljöpåverkanskategori, indirekt baserad på modellen Ecovalue12. Inte förrän Naturvårdsverkets övre intervallgräns för värdering av CO₂-ekvivalenter tillämpas får miljökostnaderna genomslag. I sammanhanget bör nämnas den generella svårigheten i att sätta ett pris på miljö och klimat samt framtida skadeeffekter för dessa. Som Naturvårdsverket dock påpekar, att inte göra en kostnadsvärdering överhuvudtaget leder med bestämdhet till en underskattning av konsekvenserna jämfört med om en ansats till detta faktiskt görs. Den allmänna slutsatsen är dock att förseningstid och minskad reskomfort utifrån Trafikverkets rekommendation värderas betydligt högre än miljökostnader i en samhällsekonomisk analys.

8.5 Diskussion kring funktionell enhet

Det kan anses vara en svaghet i studien att de konstruktionsberäkningar som presenteras inte tydligt visar på att den rostfria bron uppfyller nödvändiga tekniska krav med de dimensioner som avses i den funktionella enheten för livscykelanalys och kostnadsanalys. I denna studie har inte funnits utrymme att kontrollera de berörda tvärsnittens bärförmåga i den omfattning som skulle krävas. Beräkningar med finit-elementanalys och elastisk materialmodellering är i detta fallet inte tillräcklig. För spännvidden på 26,1 m som är aktuell för den funktionella enheten är dock spänningsnivåerna mycket likartade med vad som framkom i dimensioneringsprocessen för Södertäljebroen där tillräcklig bärlighet kunde påvisas. I sammanhanget bör åter påpekas att det redan i konstruktionsberäkningarnas avgränsningar definierats att fullständiga dimensioneringsberäkningar inte kommer att göras. Konstruktionsberäkningarna i denna studien varken kan eller bör därmed ses som avgörande för om de tekniska kraven uppfylls utan som en jämförelsestudie i förhållande till beräkningsresultatet för Södertäljebroen utifrån variationer i geometrin.

När bron som uppfyller den funktionella enhetens dimensionsangivelser modellerades i kolstål S355 visade spänningsnivåerna på att en nödvändig ökning av plåttjockleken på 2 mm är att förvänta med hänsyn till den lägre hållfasthetsgraden jämfört med det rostfria stålet. Återigen är finita-elementanalysen inte enbart tillräcklig för att klart avgöra om tillräcklig bärlighet är uppnådd men spänningsnivåerna är på en sådan nivå att de inte bör vara kritiska. Trots att det finns brister i att de studerade broalternativen inte tvunget uppfyller de tekniska kraven om lastdimensionering visar dock andra källor på att användning av höghållfast rostfritt duplexstål kan medföra en materialreducering med 27-28% för bärande konstruktioner (Ruithe 2016, Jernkontoret 2013). I denna studie uppnås 21,8% skillnad mellan kolstålbrons och den rostfria brons beräknade stålmängder. Mängdförhållandet mellan de två ståltyperna är därför fortfarande är fullt rimligt och relevant att tillämpa som indata i en jämförande analys såväl ut miljömässigt som kostnadmässigt perspektiv. Samtidigt finns också osäkerheter relaterade till träbrons materialmängder då dessa enbart uppskattats utifrån ritningar och inte definitiva angivelser från tillverkaren. Dock uppnår de beräknade materialmängderna mycket nära den totala vikt som anges för träbrons tillverkare 18,4 ton (Martinssons 2019a) vilket tyder på en god skattning. Sammanfattningsvis kan det således konstateras att det finns svagheter i mängdningen för samtliga tre studerade broar men inte på en sådan nivå att det vare sig förringar värdet i att sätta de i förhållande till varandra eller bör påverka de övergripande slutsatserna kring deras miljömässiga och ekonomiska profil.

8.6 Övergripande bedömning av den rostfria bron

Den allmänna slutsatsen för att återknyta till studiens syfte är att den rostfria bron kan hävdas vara både miljömässigt och ekonomiskt fördelaktig jämfört med alternativa konstruktionsmaterial. I båda fallen är det dock i högsta grad beroende av hur bedömningsmetoderna utformas. Ändras systemgränserna eller tidsaspekten i den funktionella enheten i livscykelanalysen alternativt kalkylräntan i den samhällsekonomiska analysen kan resultatet med enkelhet fås till att broarna är likvärdiga med varandra eller att den rostfria bron både är ett kostnadsmässigt och miljömässigt sämre alternativ än broarna i trä och kolstål.

Med de systemgränser som tillämpas i livscykelanalysen är dock den slutgiltiga bedömningen med avseende på miljöpåverkan att träbron och den rostfria bron är likvärdiga ur miljöpåverkanssynpunkt, klart bättre än kolstålsbron. Kostnadsanalys med Trafikverkets rekommenderade kalkylränta på 3,5% ger liknande livscykelkostnad för alla tre broar. Med lägre räntesats ger träbron klart högre kostnadsnivå än de två stålbroarna. Inkluderas även trafikstörningar relaterat till underhåll och övriga processer under broarnas livscykler blir dock den rostfria bron mest fördelaktig i en sammantagen samhällsekonomisk bedömning. Konsekvenserna av trafikstörningar ses även i miljöpåverkansresultatet.

Sammanfattningsvis, om såväl miljömässiga som ekonomiska aspekter beaktas finns det således grund att påstå att den rostfria bron är ett gott val i förhållande till övriga studerade broar eftersom den i samtliga separata analyser faller ut som ett av de bättre alternativen. Allt är dock under förutsättning att tillräcklig bärförmåga kan säkerställas med den aktuella plåttjockleken vilket konstruktionsberäkningarna visade på är möjligt, men inte säkerställt. Trots att det kan vara kritiskt att använda tunna plåtar för långa spännvidder bör detta dock vara utgångspunkten vid produktion av brotypen eftersom optimering av materialåtgång är väsentligt ur både kostnads och miljösynpunkt. Resultaten från studien med avseende på effekter av förändrad detaljutformning och varierande dimensioner kan här vara vägledande.

9. Sammanfattande rekommendationer och slutsatser

I detta avsnitt sammanfattas i punktform de viktigaste slutsatserna med hänsyn till studiens syfte och målsättningar. Följande har kunnat konstateras för den studerade bron utifrån resultatet:

- Upp mot 26 meter spännvidd bör vara möjligt att uppnå för bron om den fria bredden minskas till 3 m, möjligtvis även 28 m. Det kan i det förstnämnda fallet samtidigt gå att minska fackverkshöjden ner mot 1,7 m. Det är dock kritiskt att använda 6 mm plåtar för längre spännvidder på grund av lokala spänningstoppar vid överramsstångens knutpunkter. Kontroll av kritiska tvärsnitt i överramsstången kommer att krävas, så även för de kortare spännvidderna som ingått i studien runt 20 m. Detta beror på att överramsstången tillhör tvärsnittsklass 4 och plåtbuckling kan inträffa.
- Knutpunktsutformning med excentriciteter är ofördelaktigt om dimensionerna på bron är sådana att materialets kapacitet är utnyttjad i hög grad med hänsyn till spänningar. Både högre spänningar och större utbredning av områdena med kritiska spänningar är att förvänta. Knutpunkter vid brons upplag uppvisar också kritiska spänningsnivåer vilket inte ses med normal utformning. Vid andra ordningens analys ses en större spänningsökning med excentriciteter, 13% jämfört med 3-4% för normal utformning.
- Spänningsnivåerna vid tvärbalksinfästningen minskas avsevärt om underramsstångens nedre fläns flyttas upp till samma nivå som tvärbalkarnas underkant. De kritiska områdena här försvinner helt. Styvheten i tvärled förbättras också något. Avstyvningsplåtar som svetsas i den inre livplåten vid knutpunkterna är än mer fördelaktigt i avseende på styvheten i tvärled där en minskning på ca 40% observerades.
- I avseende på miljöpåverkan är utsläpp av växthusgaser den dominerande miljöpåverkanskategorin. Här genererar den rostfria bron, i ett utförande på 26,1 m spännvidd, 3 m fri bredd och 1,7 m höga fackverksramar ett totalt utsläpp av växthusgaser på 34,2 ton CO₂-ekvivalenter. Detta kan jämföras med 33,5 ton CO₂-ekvivalenter för en jämförbar fackverksbro i trä och 60,1 ton CO₂-ekvivalenter för den studerade bron fast tillverkad av konventionellt konstruktionsstål S355. Stålmängden har i det senare fallet också ökat med 21,8% för att kompensera för lägre hållfasthet.
- Inkluderas inte återvinning av stålet kommer miljöpåverkansresultatet med hänsyn till utsläpp av växthusgaser i stället att vara 72,4 ton CO₂-ekvivalenter för den rostfria bron, 92,1 för kolstålbron och 37,1 ton för träbron. Återvinning är avgörande för den rostfria brons förhållandevis låga klimatbelastning. Detta anknyter till den stora inverkan som systemgränsernas definition i livscykelanalysen har på resultatet.
- Produktion av rostfritt stål ger i sig upphov till större miljöpåverkan än konventionellt kolstål på grund av den höga andelen legeringsmetaller. Att påstå att det rostfria stålet är ett mer miljöanpassat konstruktionsmaterial utan vidare diskussion är därmed inte helt korrekt.
- Materialtillverkningsfasen genererar klart störst miljöpåverkan för samtliga tre studerade broar. Ommålning av träbron och kolstålbron ger enbart litet bidrag till den samlade miljöpåverkan, det är återvinning av stålet som gynnar den rostfria bron ur miljöpåverkanssynpunkt.

- Inkluderas ökade utsläpp från trafik i samband med underhållsåtgärder, såsom ommålning, får den rostfria bron en klar fördel av sitt låga underhållsbehov. Även vid kortvariga störningar kan en tydlig ökning av miljöpåverkan från broarna ses för både klimatförändring, försurning och övergödning om en större trafikled berörs.
- Den rostfria bron har högst investeringskostnad av de tre broarna på grund av den höga kostnaden för duplexstål, runt 4 gånger dyrare per kilo är konstruktionsstål S355. Kolstålbron motsvarar ca 64% av den rostfria brons kostnad och träbron 44%.
- I ackumulerad kostnad över hela livslängden, dvs 0% kalkylränta i nuvärdesmetoden, ligger den rostfria bron och kolstålbron på liknande resultat 2,0 respektive 2,8 mkr, Träbron placerar sig avsevärt högre på 5,6 mkr, 2,75 gånger den rostfria brons kostnad.
- Tillämpas Trafikverkets rekommenderade samhällsekonomiska kalkylränta på 3,5% kommer framför allt träbrons kostnad att sjunka drastiskt då dess totalkostnad består av stora kostnadsposter långt fram i tiden till skillnad från framför allt den rostfria bron vars största kostnad utgörs av grundinvesteringen. Efter diskontering med denna räntesats är träbron enbart 18% högre i kostnad än den rostfria bron. Kolstålbron ligger i sin tur 16% lägre. Skillnaden mellan broarna i detta fallet är så liten att den bör kunna förklaras av osäkerheter i indata och variationer i stålpriser.
- Vid närmare undersökning av effekten av varierad kalkylränta sågs att den rostfria bron kommer att ha lägst kostnad fram till 1,8% kalkylränta. För högre räntesatser, inom rimlig nivå, är därefter kolstålbron förknippad med lägst kostnad av de tre broarna. En brytpunkt mellan den rostfria bron och träbron som mellersta alternativ sker vid 4,7% ränta.
- Den rostfria bron har mycket lågt underhållsbehov och således också underhållskostnader. Träbron är förknippad med höga underhållskostnader i samband med ommålningen under hela sin livslängd. Dess kortare tekniska livslängd leder också till behov av byte efter 40 år vilket också är en stor kostnadspost. Kolstålbron målas mindre frekvent än träbron och till en lägre kostnad på grund av möjligheterna till nedmontering samt mindre målad yta. Dess ekonomiska fördel i förhållande till träbron bygger dock på möjligheten att undvika blästring och ommålning i fält.
- Inkluderas trafikpåverkan i en samhällsekonomisk analys får underhållsåtgärder stor effekt. Trafikantkostnaderna kan överstiga både material- och arbetskostnad vid störningar av en större trafikled. Trafikantkostnader har betydligt större inverkan på resultatet än miljökostnader i den samhällsekonomiska analysen.
- Miljökostnaderna domineras av kostnader för utsläpp av växthusgaser. Övriga miljöpåverkanskategorier blir i förhållande till utsläpp av växthusgaser försumbara. Trafikverket och Naturvårdsverket förespråkar olika värderingsfaktorer för CO₂-ekvivalenter, baserade på olika värderingsmodeller. Trafikverket presenterar två olika punktvärden i kombination med årlig uppräkningsmedan Naturvårdsverket argumenterar för ett brett intervall inom vilket båda Trafikverkets värden hamnar inom.

- Enbart om Naturvårdsverkets övre intervallgräns för värdering av växthusgasutsläpp tillämpas får miljökostnaderna en märkbar effekt på den totala ackumulerade kostnaden. De uppgår då till ca 20% av totalkostnaden för stålbroarna och 5% för träbron. Med Trafikverkets ordinarie värderingsfaktor på 1,14 kr per CO₂-ekvivalent inklusive uppräknig är motsvarande värde 6% respektive 2%.
- Sammantaget finns det belägg för att påstå att den rostfria bron både är ett miljömässigt och kostnadmässigt bra alternativ till broar i trä och kolstål. I båda fallen är resultatet dock i hög grad beroende av beräkningsmodellernas verkningssätt och tillämpning. Varieras väsentliga parametrar som kalkylränta i den ekonomiska kalkylen eller systemgränsernas omfattning i livscykelanalysen kan resultatet bli annorlunda.

10. Referenser

3form LLC (2014). *Environmental Product Declaration Koda - polycarbonate panel*. 3form LLC

Andersson, M. (2009). *Rostfritt stål - vad är det?* Stålbyggnadsinstitutet

Altea AB (2010). *Svensk tillämpning av Eurokoder*.

<https://altea.se/nyheter/2010/11/svensk-tillampning-av-eurokoder/> [Hämtad 2019-05-26]

Bauforum Stahl (2018). *Environmental Product Declaration Structural Steel: Sections and Plates*.
Bauforum Stahl

BE-group (2019). *BE digital prislista*

<https://www.begroup.se/om-be-group/ladda-ner-bestall/sortiment-prislistor/> [Hämtad 2019-04-22]

BIAB (2019). *Tryckluftguiden*. BIAB

Binsell AB (2019). *Mobilkranar*

<https://www.binsell.se/maskin/mobilkranar/> [Hämtad 2019-05-26]

Broadbent, C. (2016). *Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy*. The International Journal of Life Cycle Assessment, November 2016, Volume 21, Issue 11, pp 1658–1665. DOI: 10.1007/s11367-016-1081-1

Bångman, G. (2012). *Introduktion till samhällsekonomisk analys*. Trafikverket

C&H. (2017). *Beräkningar stålöverbyggnad Miljöbro Södertälje*. Centerlöf och Holmberg

CML (2016). *CML-IA Characterization Factors*. CML – Department of Industrial Ecology.

Crundwell, F., Moats, M., Ramachandran, V., Robinson, T., Davenport, W (2011).

Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals, Refining Molten Ferronickel
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/ferronickel> [Hämtad 2019-05-25]

Du, G., Karoumi, R. (2012). *Life cycle assessment of a railway bridge: comparison of two superstructure designs*. Structure and Infrastructure Engineering 9(11):1-12 - January 2012.
DOI: 10.1080/15732479.2012.670250

Du, G., Safi, M., Pettersson, L., Karoumi, R. (2013). *Life cycle assessment as a decision support tool for bridge procurement*. The International Journal of Life Cycle Assessment 19(12) – September 2014. DOI: 10.1007/s11367-014-0797-z

Ecoinvent database version 3.5, Ecoinvent 2018

<https://www.ecoinvent.org/>

EN1991-1-1. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-1: Densities, self-weight, imposed loads for buildings

EN1991-1-4. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-4: Wind actions

EN1991-2. Eurocode 1. Actions on structures. Part 2: Traffic loads on bridges

EN1993-1-1. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings

EN1993-1-4. Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-4: General rules. Supplementary Rules for Stainless Steel

EN1993-1-5. Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-5: Plated structural elements

EN1993-2. Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 2: Steel Bridges

EuroInox (2004). *Betning och passivering av rostfritt stål*. EuroInox

FEICA - Association of the European Adhesive and Sealant Industry (2015). *Environmental Product Declaration Reactive resins based on epoxy resin, filled and/or aqueous with high content of filler*. FEICA

Focus Economics (2019). *Steel (Europe) Price Outlook*
<https://www.focus-economics.com/commodities/base-metals/steel-europe> [Hämtad 2019-05-13]

Folkbro (2019). *Livscykelkostnadsanalys*
<https://www.folkbro.com/vad-ar-livscykelkostnadsanalys-lcc-analys/> [Hämtad 2019-05-26]

Garraín, D. Martínez, P., Vidal, R., Bellés, M. (2007). *LCA of thermoplastics recycling*. Conference paper, LCM 2007, At Zurich

General Steel (2019). *2019 Steel Price Forecast*
<https://gensteel.com/building-faqs/steel-building-prices/forecast> [Hämtad 2019-05-13]

Hechler, O., Collin P. (2008). *On the use of stainless steels in bridge construction*. Conference paper from: Bridge Maintenance, Safety Management, Health Monitoring and Informatics: Proceedings of the Fourth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, July 13-17 2008, Seoul, Korea

Hammerglas AB (2019a). *Vad är Hammerglas?*
<https://www.hammerglass.se/faq/glas-skolan/> [Hämtad 2019-05-26]

Hammerglas AB (2019b). *Broar*. Hammerglas AB

Hurman, E (2014). *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes, Production of Ferroalloys*
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/ferromanganese> [Hämtad 2019-05-25]

ISO 14040:2006, *Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework*. International Organization for Standardization

Isaksson, T., Mårtensson, A. (2008). *Byggkonstruktion - Regel och formelsamling*. 3. uppl., Lund: Studentlitteratur.

Jernkontoret, MISTRA. (2013). *The Steel Eco-Cycle - Environmental Research Programme for the Swedish Steel Industry*. Jernkontoret research

Jotun AS (2018). *Environmental Product Declaration Penguard WF coating*. Jotun AS

Karoumi, R., (2015). *Whole life costing of bridges*. Stockholm, Kungliga tekniska högskolan, Kurslitteratur

- Kostnadsguiden (2019). *Fasadmålning*
<https://kostnadsguiden.se/malare-timpris-och-kostnad/fasadmalning/> [Hämtad 2019-04-22]
- Kurowski, P., Kurowski, T. (2011). *Buckling analysis with FEA*
<https://www.machinedesign.com/fea-and-simulation/buckling-analysis-fea> [Hämtad 2019-05-26]
- Lee, Y E (2001). *Ferrous alloys: Production and use in Steel-making, Encyclopedia of Materials: Science and Technology*
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/ferromanganese> [Hämtad 2019-05-25]
- Mara, V., Haghani, R., Sagemo, A., Storck, L., Nilsson, D. (2013). *Comparative study of different bridge concepts based on life-cycle cost analyses and life-cycle assessment*. Conference paper from: Asia-Pacific Conference on FRP in Structures 2013
- Martinssons (2015a). *Produktion MGC FV*. Martinssons
- Martinssons (2015b). *Prislista Martinssons gång- och cykelbro FV*. Martinssons
- Martinssons (2019a). *MGC FV Teknisk specifikation*. Martinssons
- Martinssons (2019b). *Om Martinssons*
<https://www.martinssons.se/om-martinssons/> [Hämtad 2019-05-26]
- Martinssons (2019c). *MGC FV Underhållsplan*. Martinssons
- Martinssons (2019d). *Gång- och cykelbroar i trä*
<https://www.martinssons.se/byggnader-i-tra/broar/fardiga-broar/gang-och-cykelbroar-i-tra-gc-broar-i-limtra-martinssons/> [Hämtad 2019-05-26]
- Martinssons (2019e). Personlig mailkorrespondans
- MEPS International Ltd (2019). *Scrap Prices 2018*
www.meps.co.uk/ScrapPrice.htm [Hämtad 2019-05-03]
- Moelven Limtre AS (2018). *Environmental Product Declaration Standard limtrebjelke*. Moelven AS
- Moelven Woods AS (2016). *Environmental Product Declaration Kobberimpregneret trelast*. Moelven AS
- Moström, A. (2013). *Fackverk*. Uppsala universitet, Kurslitteratur
- Naturvårdsverket (2015). *Minskat matavfall - miljönytta och kostnadsbesparingar, rapport 6697*. Naturvårdsverket
- Norsk Stålförbund (2019). *Miljö*
<http://www.stalforbund.no/om-stal/miljo> [Hämtad 2019-05-26]
- NSR AB (2019). *Återvinningsanläggningar - Priser*
<https://nsr.se/foretag/lamna-verksamhetsavfall/atervinningsanlaggningar/#1502789147616-a7d4cd91-35d6> [Hämtad 2019-04-22]

- Okasha, N., Frangopol, D., Fletcher, F., Wilson, A. (2012). *Life-Cycle Cost Analyses of a New Steel for Bridges*. Journal of Bridge Engineering 17(1):168-172 - January 2012.
DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000219
- Ottosen, N., Petersson, H. (1992). *Introduction to the Finite Element Method*. 1. uppl., Pearson Education
- Outokumpu (2007). *Duplex Stainless Steel, Outokumpu datasheet table*. Outokumpu
- Outokumpu (2014). *Environmental Product Declaration Hot Rolled Stainless Steel*. Outokumpu
- Outokumpu Oy (2019a). *Avesta Stainless Steel Plant*
<https://www.outokumpu.com/locations/avesta> [Hämtad 2019-05-26]
- Outokumpu (2019b). *Ferrochrome - the key ingredient*
<https://www.outokumpu.com/products/forms/ferrochrome> [Hämtad 2019-05-26]
- Petersson, O. (1971). *Knäckning*. Division of Structural Mechanics and Concrete Construction - Bulletin 24. Lund
- PlasticsEurope (2019a). *Eco Profiles*
<https://www.plasticseurope.org/en/resources/eco-profiles> [Hämtad 2019-05-26]
- PlasticEurope (2019b). *Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers: Polycarbonate (PC)*. Plastics Europe
- Pousette, A., Norén, J., Penaloza, D., Wiklund, U., Pantze, A. (2014). *LCA för vägbro - Analys av en byggd betongöverbyggnad och en alternativ träöverbyggnad - Slutrapport*. SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås
- Ronnebrant, R. (1999). *LCC-Modeller (bro) Förstudie till Fou-ramprojekt*. Vägverket
- Ruithe, D. (2016). *Lighter duplex grades for structural applications*. Outokumpu Oy
- Ruukki Construction Oy (2015). *Environmental Product Declaration Welded and coated sections, trusses and beams made of hot-rolled plate, sheet and coil*. Ruukki Construction Oy
- Safi, M. (2014). *Life cycle costing of bridges*. Diss. Stockholm : Kungliga Tekniska högskolan
- Salemyr, O. (2018). *Så tar du bättre beslut vid investeringar - Nuvärdesmetoden*
<https://blogg.pwc.se/foretagarbloggen/investeringskalkylering> [Hämtad 2019-05-26]
- SCB (2019). *Prisomräknaren*
<https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/prisomraknaren/> [Hämtad 2019-05-13]
- SETRA. (2006). *Technical guide: Footbridges - Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridges under Pedestrian Loading*. Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Association Francaise De Genie Civil, Paris, France.
- Setra (2018). *Environmental Product Declaration Glulam beams and pillars*. Setra
- SimScale (2019). *What is von Mises Stress?*
<https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/fea/what-is-von-mises-stress.html> [Hämtad 2019-05-25]

- SimaPro (2019). *SimaPro Database Manual - Methods Library*. SimaPro
- SMHI (2013). *Vanliga frågor om ozon*
<https://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/ozon/vanliga-fragor-om-ozon-faq-1.8954> [Hämtad 2019-05-25]
- SRM AB (2018). *Miljövänliga, rostfria stålbroar*. SRM AB
- SSAB (2014). *Hot-rolled plates, sheets and coils - Environmental product declaration*. SSAB
- SSAB (2019). *Steel Production*
<https://www.ssab.com/company/sustainability/sustainable-operations/steel-production> [Hämtad 2019-05-25]
- Stena (2019). *Stena ståls prislista*
<https://www.stenastal.se/prislistor/> [Hämtad 2019-04-22]
- Stocksundet (2019). *Polykarbonatskivor prisinformation*
<https://www.stocksundet.se/category/polykarbonatskivor> [Hämtad 2019-05-25]
- Södergren, R. (2019). Personlig mailkorrespondans
- Teknos Oy (2018). *EPD Vattenburna utomhusfärger*. Teknos
- Thorstensson, P. (2019). *Plasticitet*
<http://meckigt.se/forelasning-12-materialsamband/plasticitet-kap-6-1-6-3-forelasning-12-mtm021/> [Hämtad 2019-05-25]
- Tibnor (2019a). *Tunnplåtkatalogen*. Tibnor AB
- Tibnor (2019b). *Tibnor webshop produktkatalog* (gällande priser för april 2019). Tibnor AB
- TK Bro 11. *Trafikverkets tekniska krav Bro*. TRV publ nr 2011:085. Trafikverket
- Trafikverket (2018). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.1*. Trafikverket
- Trafikverket (2016). *Vägtrafikflödeskartan - Trafikplats Södertälje Syd*
<http://vtf.trafikverket.se/SeTrafikinformation#> [Hämtad 2019-05-15]
- Trafikverket (2019). *BaTMan á-prislista 2019*. Trafikverket
- Tralla, J P. (2017). *LCC och LCA Söderströmsbroarna*. Betong- och Stålteknik
- Träguiden (2003). *Dimensionering i brotgränstillståndet*
<https://www.traguiden.se/konstruktion/dimensionering/dimensioneringsgang/dimensioneringsgang/dimensionering-i-brottgranstillstandet/?previousState=1> [Hämtad 2019-05-02]
- Träguiden (2007). *Träbroar - Bro med fackverk, Storforsen*.
<https://www.traguiden.se/konstruktion/konstruktionsexempel/trabroar/> [Hämtad 2019-05-02]
- Träguiden (2017). *Bruksgränstillstånd*
<https://www.traguiden.se/konstruktion/limtrakonstruktioner/projektering-av-limtrakonstruktioner/bruksgranstillstand/> [Hämtad 2019-05-02]

TRVFS 2011:12. *Trafikverkets författningssamling*. Trafikverket

ULFCAR AB (2019b). *The great Belt Bridge*

<http://www.ulfcar.dk/en/about/case-studies/the-great-belt-bridge.htm> [Hämtad 2019-05-26]

ULFCAR (2019). *Bridge systems*

<http://www.ulfcar.dk/en/areas/bridges/bridges.htm> [Hämtad 2019-05-26]

Wargsjö, A. (1998). *Miljöanpassade broar, Förstudie till Fou-ramprojekt*. Vägverket

Whiteway, P. (1998). *Building better bridges*. Nickel Magazine Sept. 98

World Steel Association. (2017). *Life cycle inventory methodology report for steel products*. World Steel Association, Brussels.

Xiw, H., Wu, W., Wang, Y. (2017). *Life-time reliability based optimization of bridge maintenance strategy considering LCA and LCC*. Journal of Cleaner Production, Volume 176 – Mar 1, 2018.
DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.123

11. Bilaga 1

Inventeringsdatakällor för livscykelanalys: material, processer och transporter

Tabell 1. Inventeringsdata för materialtillverkning

| Material/process | Användningsområde | Beskrivning/övriga antaganden | Datakälla | Tidsmässig giltighet | Geografiskt område |
|---------------------|-------------------------------------|---|---|----------------------|--------------------|
| Rostfritt stål | Rostfri bro, lager | 40,9 % kolstålskrot och jungfruliga legeringsämnen, 59,1 % återvunnen rostfri skrot. (Outokumpu 2014) | EPD Hot rolled stainless steel, Outokumpu | 2019 | Europa |
| Kolstål | Kolstålsbro, lager | 80 % järnmalm, 20 % återvunnen stålskrot. (SSAB 2014) | EPD Hot rolled steel plates, sheets and coils, SSAB. EPD welded and coated sections trusses and beams made of hot-rolled plate, sheet and coils, Ruukki construction. | 2019 / 2020 | Norden |
| Förzinking | Ståldetaljer träbro | 65 µm skikt (Ecoinvent 2018) | Zinc coating, pieces, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Europa |
| Metallbearbetning | Ståldetaljer träbro, lager | | Metal working, average for steel product manufacturing, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Europa |
| Hammerglas | Hammerglas, kolstålsbro/rostfri bro | | EPD Polycarbonate panel, 3form | 2017 | Nordamerika |
| Akrylat | Beläggning kolstålsbro/rostfri bro | | EPD Reactive resin products, FEICA | 2020 | Europa |
| Teflon | Brolager | | Tetrafluoroethylene production, Ecoinvent v3.5 | 2020 | Europa |
| Limträ, impregnerat | Träbro | Upptag av biogent kol exkluderat | EPD standard limträbalk, Moelven | 2023 | Norge och Sverige |
| Konstruktionsvirke | Träbro | Upptag av biogent kol exkluderat | EPD kopparimpregnerat trä, Moelven | 2021 | Norge och Sverige |

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|--|--|------|--------|
| Impregnering | Träbro | 6 kg/m ³ . Impregnering av limträbalk (Ecoinvent 2018) | Wood preservation, vacuum pressure method, organic salt, Cr-free, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Europa |
| Epoxyfärg | Målning kolstålbro | 1 m ² /l (Tralla 2019) | EPD Penguard WF coating, Jotun | 2023 | Global |
| Alkydfärg/ träolja | Målning träbro | 1 m ² /l träolja 2*7 m ² /l alkydfärg (Martinssons 1029c) | EPD Vattenburna utomhusfärger, Teknos | 2023 | Europa |

Tabell 2. Inventeringsdata för konstruktions- och underhållsprocesser

| Process | Användnings- område/ funktion | Beskrivning/ övriga antaganden | Datakälla | Tidsmässig giltighet | Geografiskt område |
|--|---|---|---|-------------------------|-----------------------|
| Svetsning | Kolstålbro, rostfri bro | | Welding, steel, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Global |
| Tillskärning plåt | Kolstålbro, rostfri bro | 0,0275 kW/m | Market for electricity medium voltage, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Sverige |
| Konstruktion träbro | Träbro | 350 kWh (Pousette et. al. 2014) | Market for electricity medium voltage, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Sverige |
| Applicering av akrylat- beläggning | Beläggning kolstålbro/ rostfri bro | | EPD Reactive resin products, FEICA | 2020 | Europa |
| Kompressor | Målning och blästring av kolstålbro | 2*60 h användning vid underhåll av kolstålbro. 22 kW (Tralla 2019, BIAB 2019) | Market for electricity medium voltage, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Sverige |
| Lyftkran | Montage/ demontering av bro | 1h användning per lyft vid montage samt underhåll av kolstålbro | Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state (construction cranes) Ecoinvent v3.5 | 2018 | Global |

Tabell 3. Inventeringsdata för avfallshantering och återvinning

| Process | Användningsområde/funktion | Beskrivning/övriga antaganden | Datakälla | Tidsmässig giltighet | Geografiskt område |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---|---|----------------------|--------------------|
| Lyftkran | Demontering av bro | 1h användning | Machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, steady-state (construction cranes) Ecoinvent v3.5 | 2018 | Global |
| Återvinning rostfritt stål | Avfallshantering rostfri bro, lager | 95% återvinning, 5% deponi. Substitution med ståltillverkning från skrot (Outokumpu 2014) | EPD Hot rolled stainless steel, Outokumpu | 2019 | Europa |
| Återvinning kolstål | Avfallshantering kolstålbros, lager | 95 % återvinning, 5% deponi. Substitution med ståltillverkning från skrot (SSAB 2014) | EPD Hot rolled steel plates, sheets and coils, SSAB. EPD welded and coated sections trusses and beams made of hot-rolled plate, sheet and coils, Ruukki construction. | 2019 / 2020 | Norden |
| Avfallsförbränning | Avfallshantering akrylatbeläggning | 99% förbränning, 1% deponi (Ecoinvent 2018) | Market for waste, plastic mixture, incineration, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Sverige |
| Avfallshantering limträ | Avfallshantering träbro | | EPD standard limträbalk, Moelven | 2023 | Norge och Sverige |
| Avfallshantering konstruktionsvirke | Avfallshantering träbro | | EPD kopparimpregnerat trä, Moelven | 2021 | Norge och Sverige |
| Förbränning limträ | Avfallshantering träbro | | EPD standard limträbalk, Moelven | 2023 | Norge och Sverige |
| Förbränning konstruktionsvirke | Avfallshantering träbro | | EPD kopparimpregnerat trä, Moelven | 2021 | Norge och Sverige |
| Återvinning polykarbonat | Avfallshantering hammergeglas | 95% återvinning, 5% deponi. Substitution med nytillverkad polykarbonat | EPD Polycarbonate, PlasticsEurope | 2020 | Europa |

| | | | | | |
|----------------------------|---|--|--|------|--------|
| Deponi | Avfalls- hantering ej återvunnet material | | Inert material landfill, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Global |
| Avfalls- hantering stål | Avfalls- hantering kolstålbro, rostfri bro | | Treatment of waste bulk iron, excluding reinforcement, sorting plant, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Europe |
| Avfalls- hantering färg | Avfalls- hantering epoxifärg | | Treatment of waste paint on metal, sorting plant, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Europe |

Tabell 4. Inventeringsdata för fordonstrafik

| Fordonstyp | Användnings- område/funktio n | Beskrivning/ övriga antaganden | Datakälla | Tidsmässig giltighet | Geografiskt område |
|---------------------------|---|---|--|-------------------------|-----------------------|
| Lastbil, Euroklass 4 | Frakt, beräkning av trafikpåverkan seffekter | Utnyttjadegrad: 24 ton inkl återtransport | Market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Europa |
| Personbil, Euroklass 4 | Beräkning av trafikpåverkan seffekter | | Market for transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4, Ecoinvent v3.5 | 2018 | Global |

Tabell 5 Transportsträckor för rostfri bro

| Livscykel | Transporterad produkt | Ursprung | Destination | Tid/sträcka (h) | Distans/sträc ka (km) | Godsvikt per sträcka |
|---------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| Material- tillverkning | Rostfritt stål | Avesta, Sverige | Sölvesborg, Sverige | 7,12 | 570 | 16,544 |
| | Polykarbonat | Tyskland | Sölvesborg, Sverige | 13,51 | 946 | 0,612 |
| Konstruktion | Bro (stål, polykarbonat) | Sölvesborg, Sverige | Södertälje, Sverige | 7,36 | 515 | 15,652 |
| | Beläggning | Åbo, Danmark | Södertälje, Sverige | 13,01 | 911 | 1,727 |

| | | | | | | |
|-------------------|--------------|---------------------|-------------------------|-------|------|----------|
| Underhåll | Beläggning | Åbo, Danmark | Södertälje, Sverige | 13,01 | 911 | 1,727 |
| | Polykarbonat | Tyskland | Södertälje, Sverige | 18,87 | 1321 | 0,612 |
| | Avfall | Södertälje, Sverige | Avfallscentral, Sverige | 0,71 | 50 | Varierar |
| Avfalls-hantering | Avfall | Södertälje, Sverige | Avfallscentral, Sverige | 0,71 | 50 | 21,368 |

Tabell 6, Transportsträckor för kolstålsbro

| Livscykel-fas | Transporterad produkt | Ursprung | Destination | Tid/sträcka (h) | Distans/sträcka (km) | |
|-----------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|----------|
| Material-tillverkning | Kolstål | Raahe, Finland | Sölvesborg, Sverige | 25,29 | 1770 | 21,054 |
| | Polykarbonat | Tyskland | Sölvesborg, Sverige | 13,51 | 946 | 0,612 |
| | Träolja, alkydfärg | Nykvarn, Sverige | Sölvesborg, Sverige | 7,50 | 525 | 0,390 |
| Konstruktion | Bro (stål, polykarbonat) | Sölvesborg, Sverige | Södertälje, Sverige | 7,36 | 515 | 20,142 |
| | Beläggning | Åbo, Danmark | Södertälje, Sverige | 13,01 | 911 | 1,727 |
| Underhåll | Träolja, alkydfärg | Nykvarn, Sverige | Södertälje, Sverige | 0,21 | 15 | 0,390 |
| | Bro (stål, polykarbonat, beläggning) | Södertälje, Sverige | Verkstad, Sverige | 0,71 | 50 | 21,869 |
| | Beläggning | Åbo, Danmark | Södertälje, Sverige | 13,01 | 911 | 1,727 |
| | Polykarbonat | Tyskland | Södertälje, Sverige | 18,87 | 1321 | 0,612 |
| | Avfall | Södertälje, Sverige | Avfallscentral, Sverige | 0,71 | 50 | Varierar |
| Avfalls-hantering | Avfall | Södertälje, Sverige | Avfallscentral, Sverige | 0,71 | 50 | 28,159 |

Tabell 7, Transportsträckor för träbro

| Livscykel-fas | Transporterad produkt | Ursprung | Destination | Tid/sträcka (h) | Distans/sträcka (km) | |
|-------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------|----------------------|----------|
| Konstruktion | Ståldetaljer | Raahe, Finland | Bygdsiljum, Sverige | 7,33 | 513 | 1,291 |
| | Träolja och alkydfärg | Nykvarn, Sverige | Bygdsiljum, Sverige | 10,76 | 753 | 0,508 |
| | Bro (trä, limträ, stål) | Bygdsiljum, Sverige | Södertälje, Sverige | 10,57 | 740 | 18,643 |
| Underhåll | Träolja och alkydfärg | Nykvarn, Sverige | Södertälje, Sverige | 0,21 | 15 | 2,031 |
| | Slitplank | Bygdsiljum, Sverige | Södertälje, Sverige | 10,57 | 740 | 1,589 |
| | Avfall | Södertälje, Sverige | Avfalls-central, Sverige | 0,71 | 50 | Varierar |
| Avfalls-hantering | Avfall | Södertälje, Sverige | Avfalls-central, Sverige | 0,71 | 50 | 22,063 |