

Klimatoptimering av broar – Åtgärder vid projektering för reduktion av växthusgasutsläpp med LCA

CarlJohan Jörnland och Jenny Henriksson

Avdelningen för Konstruktionsteknik
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet, 2018

Avdelningen för Konstruktionsteknik
Lunds Tekniska Högskola
Box 118
221 00 LUND

Department of Structural Engineering
Lund Institute of Technology
Box 118
S-221 00 LUND
Sweden

Klimatoptimering av broar -

Åtgärder vid projektering för reducering av växthusgasutsläpp med LCA

Climate optimization of bridges -

Actions for reducing greenhouse gas emissions with LCA

CarlJohan Jörnland & Jenny Henriksson

2018

Rapport TVBK-5263
ISSN 0349-4969
ISRN: LUTVDG/TVBK-18/5263 (83)

Examensarbete
Handledare: Oskar Larsson Ivanov & Viktor Hermansson
Maj 2018

Förord

Detta examensarbete är utfört vid avdelningen för Konstruktionsteknik på Lunds tekniska högskola vid Lunds universitet och fullbordar därmed fem års civilingenjörstudier. Examensarbetet genomfördes under våren 2018 i Malmö i samarbete med Skanska Teknik Brogruppen i Malmö.

Vi vill uttrycka vår tacksamhet till våra handledare, universitetslektor Oskar Larsson Ivanov på avdelningen för Konstruktionsteknik på Lunds tekniska högskola och Viktor Hermansson och Karl Lundstedt på Skanska Teknik Brogruppen i Malmö, för deras vägledning och stöd under hela arbetets gång. Vi vill också tacka Gustav Sandqvist och Nicklas Magnusson på Skanska Hållbar Affärsutveckling för deras råd och stöd samt resterande kollegor på Skanska Teknik Brogruppen i Malmö för deras support och att de gjort vår tid där mycket trevlig.

Lund, maj 2018

CarlJohan Jörnland och Jenny Henriksson

Sammanfattning

År 2017 togs beslut i Sveriges riksdag att anta ett nytt klimatmål där Sverige år 2045 ska ha noll nettoutsläpp av växthusgaser för att därefter ha negativa växthusgasutsläpp. Utifrån detta mål ställer Trafikverket vidare krav på sin verksamhet och sina väg- och järnvägsprojekt. Trafikverkets mål är att infrastrukturen ska vara klimatneutral till år 2050 med delmål att minska växthusgasutsläppen med 20 % till år 2020 och 30 % till år 2025 jämfört med 2015 års värde. Som en del att dokumentera denna utsläppsreduktion har myndigheten tagit fram verktyget Klimatkalkyl.

Syftet med rapporten är att undersöka, analysera och jämföra konstruktionsmässiga åtgärder för reduktion av växthusgasutsläpp hos brokonstruktioner. I denna studie utreds två olika typer av åtgärder för reduktion av växthusgasutsläpp: *Klimatoptimerat förhållande - mängd betong/mängd armering* respektive *Val av material*. De två åtgärderna studeras på varsin bro, båda projekterade och byggda av Skanska. En metod för att beräkna utsläpp av klimatgaser, resursanvändning och andra miljörelaterade påverkningar kopplat till en produkt eller tjänst är livscykelanalyser.

I rapportens första del studeras åtgärden *Klimatoptimerat förhållande - mängd betong/mängd armering* för en plattambro, *Vägporten*, för tvåfilig motorväg med fri öppning 8,0 m. Endast brobanan studeras och dess växthusgasutsläpp kopplat till materialtillverkningsfasen. Brobanan dimensioneras för fem olika tvärsnittshöjder varpå dess utsläpp sedan beräknas. Resultatet påvisade att ett tunnare tvärsnitt, med högre mängd armering och lägre mängd betong, gav lägre global uppvärmningspotential i materialtillverkningsfasen för brobanan.

I den andra delen av rapporten studeras åtgärden *Val av material*. Denna åtgärd appliceras på referensobjektet *bron över Hovaån*, även den med tvåfilig motorväg, vilken i anbudsskedet var tänkt att utföras som en samverkansbro men i slutänden utfördes som en betongbalkbro. I studien jämförs därmed de två utförandealternativen mot varandra med avseende på utsläpp av växthusgaser. Vidare studeras även åtgärden *Val av material* i form av att olika val av leverantör görs för materialen betong, armering och konstruktionsstål för de två utförandealternativen. Studien av bron över Hovaån görs som en livscykelanalys där de fyra faserna materialtillverkning, produktion, underhåll och slutbehandling inkluderas. Tillvägagångssättet för denna studie görs enligt standarden ISO 14044:2006. Resultaten från denna del gav att ingen tydlig skillnad i form av växthusgasutsläpp erhöles mellan de två utförandealternativen då det antogs att stålbalkarna hos Samverkansbron återvinns till 100 % när bron nått sin livslängd. Det påvisades att val av leverantör i samband med *Val av material* gav stor påverkan på utsläppen för de två utförandena av bron över Hovaån. Vidare gav resultatet även att antagen återvinningsgrad för konstruktionsstålet i slutbehandlingsfasen har stor påverkan på samverkansbrons totala globala uppvärmningspotential. Om det, istället för fullständig återvinning, antogs att ingen återvinning av stålbalkarna gjordes då livslängden uppnåtts erhöles tydligare indikationer att Betongbalkbron var det alternativ vilket gav lägst global uppvärmningspotential under livscykeln.

I rapportens sista del görs beräkningar för åtgärden *Val av material* för bron över Hovaån i Trafikverkets verktyg Klimatkalkyl. Detta görs för att jämföra resultatet från rapportens andra del med resultatet som erhålls i Klimatkalkyl. Vidare önskas det även jämföra växthusgasutsläppen för de två utförandealternativen för bron över Hovaån med dess utsläpp i 2015 års värde. Det visade sig att effekterna för åtgärden *Val av material* i form av val av leverantör skattades likvärdigt i beräkningarna i den andra delen av rapporten och i Klimatkalkyl. Det visades även att besparingen för bron över Hovaån blev 18 % för Betongbalkbron respektive 14 % för Samverkansbron. Dessa besparingar kan vidare jämföras med Trafikverkets reduktionskrav 17 % gällande klimatbelastning för broar med färdigställande mellan 2020-2024 och med investeringskostnad överstigandes 50 miljoner kronor.

Nyckelord: Brokonstruktion; Broar; Livscykelanalys; LCA; Global uppvärmning; Hållbara konstruktioner; CO₂-ekvivalenter; Klimatoptimering

Abstract

In 2017 the Swedish Parliament implemented a new national goal for limiting climate change. The goal is to have zero net emissions of greenhouse gases by year 2045 which will ultimately lead to negative net emissions. Further, the Swedish Transport Administration adapted the goal of making Sweden's infrastructure climate neutral by the year 2050, with the milestones of reducing the emissions from 2015 with 20 % by 2020 and 30 % by 2025. In order to document this reduction, the Swedish Transport Administration has developed the tool *Klimatkalkyl*.

The purpose of this report is to investigate, analyse and compare different bridge designer actions for reducing emissions of greenhouse gases from bridges. In this report, two different main actions are studied: *Climate optimized proportions – amount concrete/amount reinforcement* and *Choice of material*. These two actions are applied on two different bridges, both designed and constructed by Skanska. A common method which is used to determine emissions of greenhouse gases, use of resources and other parameters contributing to climate change related to a product or service is life cycle assessment.

In the first part of the report, the action *Climate optimized proportions – amount concrete/amount reinforcement* is applied on *Vägporten*, a concrete frame bridge of a two lane highway with the open width 8.0 m. Only the bridge deck and its emissions of greenhouse gases in the material manufacturing phase are studied. Design calculations are made for five different heights of the bridge deck followed by an estimation of the emissions from each of the cross sections. The obtained results indicate that a smaller cross section of the bridge deck, and thereby less amount of concrete and higher amount of reinforcement, emits less greenhouse gases in the material manufacturing phase.

The second part of the report focuses on the action *Choice of material*. This action is applied on *Bron över Hovaån*, a two lane highway bridge. In the first design proposal, the bridge was intended to be constructed as a composite bridge with steel beams and concrete deck. However, in the end it was constructed as a concrete girder bridge. In the study, the two different design options are compared in relation to their greenhouse gas emissions. Further, the impacts of *Choice of material*, by choosing different manufacturers, are studied for concrete, reinforcement and structural steel of the two bridge designs. The entire study of *Bron över Hovaån* is done as a life cycle assessment according to the standard ISO 14044:2006 and includes the four phases material manufacturing, construction, maintenance and end of life. From the results of this study, it could not be definitively determined which of the two design proposals is to be preferred with regards to greenhouse gas emissions as the difference between the two was rather small. This was, however, based on the assumption that the steel girders of the composite bridge will be fully recycled after the end of life of the bridge. The results also showed that the choice of manufacturer during the action *Choice of material* had a high impact on greenhouse gas emissions for both bridge designs. Further, the results showed that the assumed recycling rate of the steel girders of the composite bridge had a significant impact on the results. If it, instead of 100 % recycling rate, was assumed that the girders were not recycled in the end of life phase, the results indicated that the concrete girder bridge having significantly less emissions of greenhouse gases.

Finally, calculations of greenhouse gas emissions in *Klimatkalkyl* are made for *Bron över Hovaån* and the action *Choice of material*. The purpose of this was to compare the results from the calculations previously made with the results obtained in *Klimatkalkyl*. It was also the aim to in *Klimatkalkyl* further determine the difference in greenhouse gas emissions of the two design proposals in comparison to their emissions using emission values of 2015. The results showed that the measured effect of the *Choice of material* was estimated similarly in *Klimatkalkyl* as in the calculations previously made. It was also established that the estimated reduction of greenhouse gas emissions for the two design proposals from the emissions in 2015 emission values was 18 % for the concrete girder bridge and 14 % for the composite bridge. These reductions are to be compared with the Swedish Transport Administration's criteria of 17 % reduction in greenhouse gas emissions of bridges with completion in 2020-2024 and an investment cost of at least 50 million SEK.

Innehåll

Förord	i
Sammanfattning	iii
Abstract	v
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Metod	2
1.4 Referensobjekt	3
1.4.1 Bro över enskild väg - Vägporten	3
1.4.2 Bro över Hovaån	3
2 Klimatpåverkan	7
2.1 Klimat- och miljöpåverkan	7
2.1.1 Historik	7
2.1.2 Växthuseffekten	8
2.2 Utsläpp vid betongproduktion	9
2.2.1 Tillverkning av cement	9
2.2.2 Cementklinkerersättning	10
2.3 Utsläpp vid produktion av armerings- och konstruktionsstål	12
2.3.1 Tillverkning av järn och stål	12
3 Livscykelanalys	15
3.1 Historik	15
3.2 Livscykelanalys enligt ISO 14044:2006	16
3.2.1 Definition av mål och omfattning	16
3.2.2 Inventeringsanalys (LCI)	16
3.2.3 Miljöpåverkansbedömning (LCIA)	17
3.2.4 Tolkning	17
3.3 Miljövarudeklaration, EPD	17
3.4 Livscykelanalysens för- och nackdelar	18
3.5 Livscykelanalyser av broar - tidigare studier	18
3.5.1 Samverkansbroar	18
3.5.2 Betongbroar	19
3.5.3 Jämförelse mellan samverkans- och betongbroar	19
3.5.4 Slutsats kring tidigare utförda livscykelanalyser av broar	21
4 Trafikverkets klimatarbete i väg- och järnvägsprojekt	23
4.1 Trafikverkets Klimatkalkyl	23
4.2 Trafikverkets klimatkrav enligt TDOK 2015:0480	24
4.2.1 Investeringsåtgärder \geq 50 miljoner kronor	25
4.2.2 Investeringsåtgärder $<$ 50 miljoner kronor	25
4.2.3 Reinvesteringsåtgärder och underhållsentreprenad	26
5 Analys av Vägporten - Klimatoptimerat förhållande	27
5.1 Utsläppsförhållande för armerad betong	27
5.2 Armeringsbehov	29
5.2.1 Längsgående underkantsarmering	29

5.2.2	Längsgående ovankantsarmering	31
5.2.3	Längsgående skjuvarmering	32
5.2.4	Tvärgående underkantsarmering	33
5.2.5	Tvärgående ovankantsarmering	34
5.2.6	Tvärgående skjuvarmering	35
5.3	Armeringsmängd	35
5.4	Global uppvärmningspotential	36
6	LCA av bron över Hovaån -	
	Val av material	39
6.1	Mål och omfattning	40
6.1.1	Mål	40
6.1.2	Omfattning	40
6.2	Livscykelinventeringsanalys (LCI)	43
6.2.1	Betong	44
6.2.2	Armering	45
6.2.3	Konstruktionsstål	45
6.2.4	Gjutform och formställning	46
6.2.5	Broräcke	46
6.2.6	Lager	47
6.2.7	Transport av material	47
6.2.8	Diesel- och elförbrukning	47
6.2.9	Sammanställning av livscykelinventering	47
6.2.10	Material- och transportkvantiteter	48
6.3	Miljöpåverkansbedömning (LCIA)	50
6.4	Livscykeltolkning	53
6.4.1	Känslighetsanalys - återvinning av konstruktionsstål	53
7	Analys av bron över Hovaån i Klimatkalkyl	57
7.1	Beräkningar i Klimatkalkyl	57
7.1.1	Klimatgasutsläpp med anpassad emissionsdata	58
7.1.2	Klimatgasutsläpp i 2015 års värde	62
8	Diskussion	63
8.1	Analys av Vägporten - Klimatoptimerat förhållande	63
8.2	LCA av bron över Hovaån - Val av material	64
8.2.1	Studiens mål och omfattning	64
8.2.2	Studiens livscykelinventering	64
8.2.3	Studiens miljöpåverkansbedömning	66
8.2.4	Studiens resultat och tolkning	67
8.3	Analys av bron över Hovaån i Klimatkalkyl	67
8.4	Avslutande diskussion och rekommendationer	68
9	Slutsats	71
9.1	Vidare studier	72

Kapitel 1

Introduktion

1.1 Bakgrund

I FN:s klimatpanel IPCCs femte samlade utvärderingsrapport (2013) klargörs att “Människans påverkan på klimatsystemet är tydlig”. Rapporten visar en genomsnittlig ökning av den globala medeltemperaturen med 0,85°C under åren 1880-2012 samt att den genomsnittliga havsnivån ökat med 0,19 m under åren 1901-2010. Den största orsaken beskrivs vara högre halter av växthusgaserna koldioxid, metan och lustgas i atmosfären som under det senaste århundradet ökat i en utsträckning som saknar motstycke de senaste 22 000 åren.

Enligt klimatavtalet som togs fram vid FN:s klimatkonvention i Paris 2015, som presenteras i regeringens proposition 2016/17:16, ska den globala temperaturökningen hållas väl under två grader och helst under 1,5 grader jämfört med förindustriell nivå. Kopplat till detta avtal antog den svenska regeringen (2017) ett klimatpolitiskt ramverk innehållande en klimatlag, nya klimatmål och ett klimatpolitiskt råd. Enligt dessa nya klimatmål ska Sverige senast år 2045 inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären för att därefter uppnå negativa utsläpp (Regeringen 2017).

Utifrån Sveriges klimatmål har Trafikverket formulerat vision och mål för sin verksamhet. Visionen är att infrastrukturen ska vara klimatneutral till 2050 med målen att minska utsläppen med 20 % till 2020 och 30 % till 2025 jämfört med 2015 års värde. För att nå uppställd vision och mål har Trafikverket tagit fram det digitala verktyget Klimatkalkyl och även ställt upp klimatkrav för investerings-, underhålls- och reinvesteringsprojekt samt vid upphandling av tekniskt godkänt järnvägsmaterial.

Byggbranschen står för en betydande del av växthusgasutsläppen i Sverige. Enligt Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien IVA (2014) svarar hus- och anläggningsprojekt för utsläpp om ca 10 miljoner ton CO₂-ekvivalenter per år vilket motsvarade ca 17 % av Sveriges totala utsläpp av växthusgaser år 2012. För att nå de nya klimatmålen och begränsa klimatförändringarna krävs omfattande minskning av koldioxidutsläppen, inte minst i anläggningsbranschen som svarar för ca 6 miljoner ton av dessa 10 miljoner ton CO₂-ekvivalenter per år (IVA 2014). Trots att anläggningsprojekten antyds stå för en högre andel av utsläppen än husprojekten är det traditionellt sett främst tekniska och ekonomiska aspekter som tas hänsyn till vid projektering och byggnation av anläggningsprojekt (Du och Karoumi 2013). Den miljömässiga prestandan bortses från i många fall på grund av för vaga och oprecisa mät- och analysmetoder samt osäkerheter i modellerna.

Livscykelanalys (LCA) är en standardiserad och väletablerad miljösystemanalytisk metod (Rydh, Lindahl och Tingström 2002; ISO 14044:2006). Metoden är en kartläggning av klimatgasutsläpp, resursanvändning och andra relaterade miljömässiga påverkningar över hela livscykeln, från vaggan till grav, för en tjänst, vara eller produkt. Inom brobyggnad är dock användningen av LCA begränsad och behöver utvecklas (Du och Karoumi 2014). Speciellt med tanke på de omfattande mängder energi och naturresurser som krävs för att framställa material till, bygga och underhålla en bro för att behålla den beständighet som krävs under dess livslängd. Det finns därmed en tydlig potential för att utöver de ekonomiska och tekniska aspekterna som vägs in för en bro även ta hänsyn till de miljömässiga.

I Svenska byggbranschens utvecklingsfonds (SBUF) rapport 13207 (2017) presenteras olika åtgärders potentiella reducering av klimatgasutsläpp för betongbrokonstruktioner i Sverige. Med utgångspunkt från

denna rapport kommer här potentiell miljöpåverkan kopplad till några konstruktionsmässiga åtgärder att studeras för att minska koldioxidutsläpp från brokonstruktioner och på sikt kunna bidra till att begränsa klimatförändringarna.

1.2 Syfte

Syftet med rapporten är att undersöka, analysera och jämföra konstruktionsmässiga åtgärder för reduktion av växthusgasutsläpp hos brokonstruktioner. Detta för att bidra till en kunskapsutveckling där utöver ekonomiska och tekniska aspekter även miljömässiga aspekter vägs in vid projektering och byggnation av broar. Några av de åtgärder som en brokonstruktör kan påverka studeras för att undersöka hur dessa kan påverka växthuseffekten.

Applicerat på två olika referensobjekt, bron över Hovaån och Vägporten, kommer två olika åtgärder att studeras. För Vägporten, som är en vanligt förekommande plattrambro, kommer åtgärden *Klimatoptimerat förhållande - mängd betong/mängd armering* att studeras för brobaneplattan. Detta görs genom att tvärsnittshöjd varieras varefter mängd armering för respektive tvärsnitt optimeras. För bron över Hovaån, där anbudsförslaget var en samverkansbro med stålbalkar och brobaneplatta i betong men där det verkliga utförandet istället blev en betongbalkbro, kommer åtgärden *Val av material* att studeras. Detta görs både genom en inbördes jämförelse mellan de totala växthusgasutsläppen för dessa två broutföranden och genom att studera potentialen för att göra olika val av leverantör för materialen betong, armering och stål för de två olika broutförandena.

För åtgärden *Klimatoptimerat förhållande - mängd betong/mängd armering* på bron Vägporten kommer inte en fullständig livscykelanalys att utföras utan endast de processer som inkluderas i materialtillverkningsfasen. För den andra åtgärden däremot kommer potentiell miljöpåverkan kopplad till växthusgasutsläpp för brokonstruktioner så heltäckande som möjligt beskrivas genom att som metod utföra en livscykelanalys enligt ISO 14044:2006. På så sätt kommer hela livscykeln från råmaterialanskaffning och materialtillverkning, produktion och underhåll till slutbehandling att studeras.

I syfte att jämföra studiens egna livscykelanalysberäkningar för åtgärden *Val av material* för bron över Hovaån kommer en jämförande beräkning av klimatbelastning att utföras med Trafikverkets verktyg *Klimatkalkyl*. Utöver detta kommer även potentiell besparing jämfört med Trafikverkets 2015 års referensvärde för de två broutförandenas ursprungsalternativ att beräknas.

1.3 Metod

Rapporten har genomförts i följande steg:

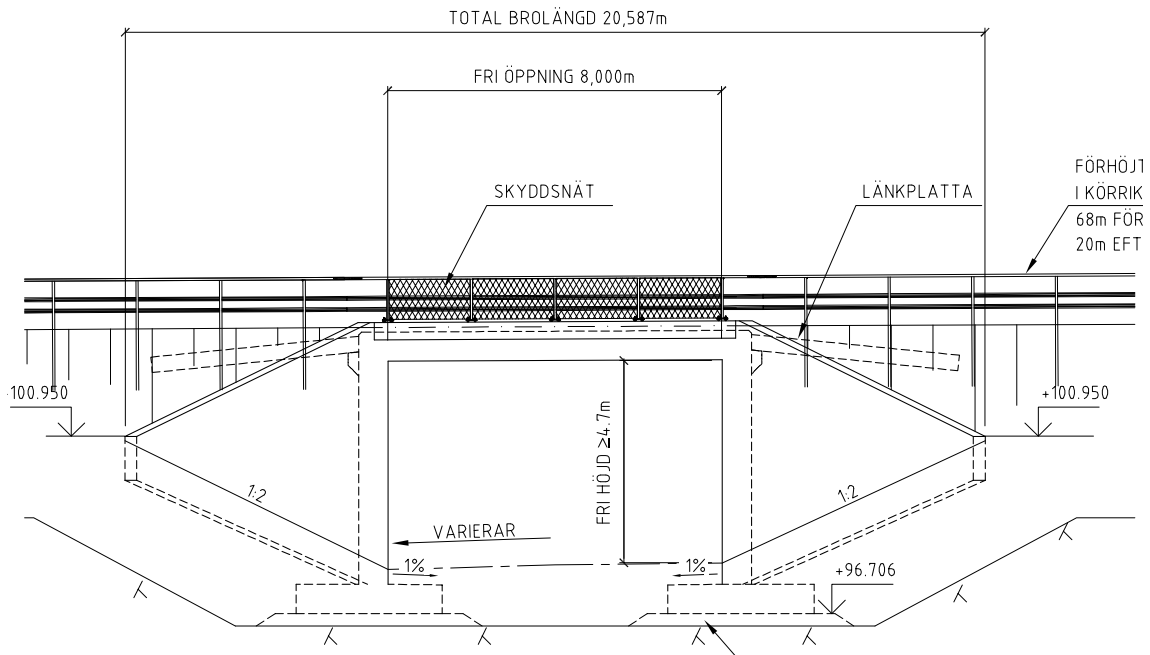
1. Utförande av litteratursökning och litteraturstudie inklusive kartläggning av befintliga livscykelanalyser av broar.
2. Identifiering och bearbetning av konstruktionsmässiga åtgärders potentiella påverkan på växthusgasutsläppen.
3. Säkerställande att konstruktionsmässiga krav uppfylls för fem olika tvärsnittshöjder för brobanan vid studie av åtgärden *Klimatoptimerat förhållande - mängd betong/mängd armering* för referensobjektet Vägporten.
4. Undersökning och analys av åtgärden *Klimatoptimerat förhållande - mängd betong/mängd armering* potentiella påverkan på växthusgasutsläppen för referensobjektet Vägporten.
5. Undersökning, analys och jämförelse av åtgärden *Val av material* globala uppvärmningspotential genom livscykelanalysberäkningar för referensobjektet bron över Hovaån.
6. Beräkning och jämförelse av klimatbelastning för bron över Hovaån i Trafikverkets Klimatkalkyl.
7. Sammanställning, diskussion och slutsatser av utförda analyser och undersökningar.

1.4 Referensobjekt

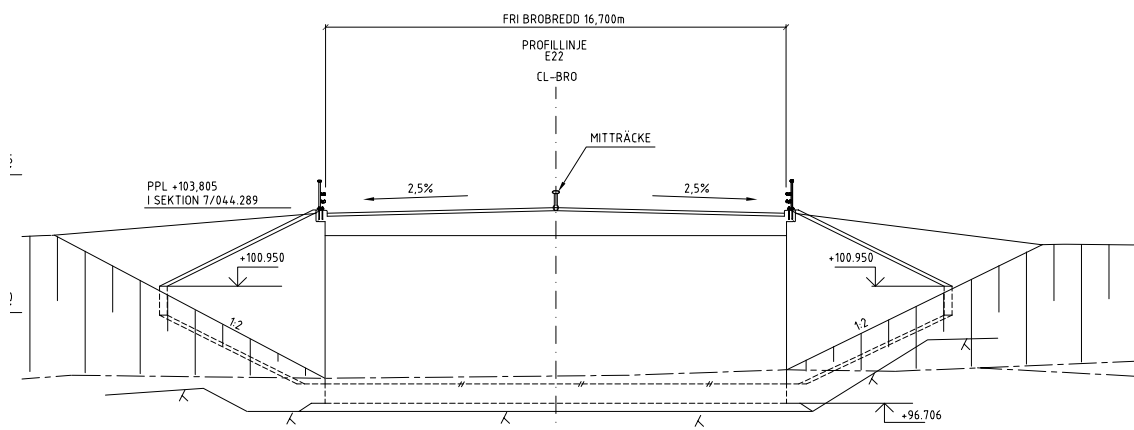
I detta arbete studeras två motorvägsbroar projekterade och byggda av Skanska åt Trafikverket vid om- och nydragning av E20 förbi Hova i Västra Götaland.

1.4.1 Bro över enskild väg - Vägporten

Den ena bron, benämnd *Vägporten*, skulle upprättas över en enskild väg med en fri höjd på minst 4,7 meter, en fri öppning på minst 8 meter och en fri brobredd om minst 16,7 meter. Det skulle finnas två körfält i vardera riktning och den skulle utföras som en platttribro av betong enligt förfrågningsunderlaget från Trafikverket. Förslagsskisser ses nedan i Figur 1.1 och Figur 1.2



Figur 1.1: Elevation för bron över enskild väg.



Figur 1.2: Sektion för bron över enskild väg.

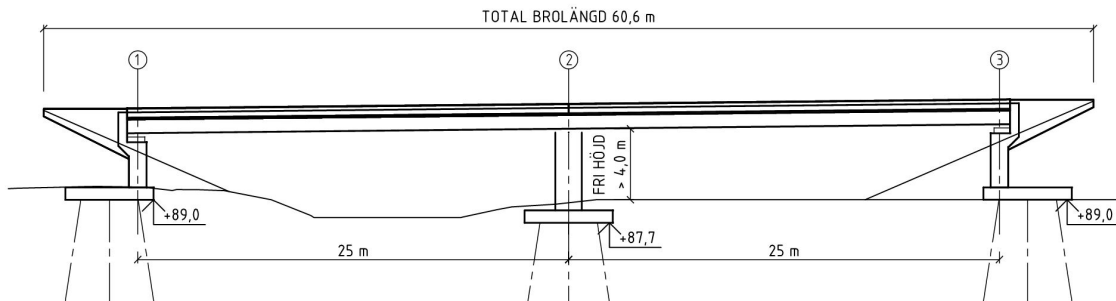
1.4.2 Bro över Hovaån

Den andra bron, benämnd *Bro över Hovaån* skulle upprättas över en mindre dalgång där Hovaån rinner och där även fauna fritt skulle kunna passera under. Genom hela byggskedet skulle vattenlevande orga-

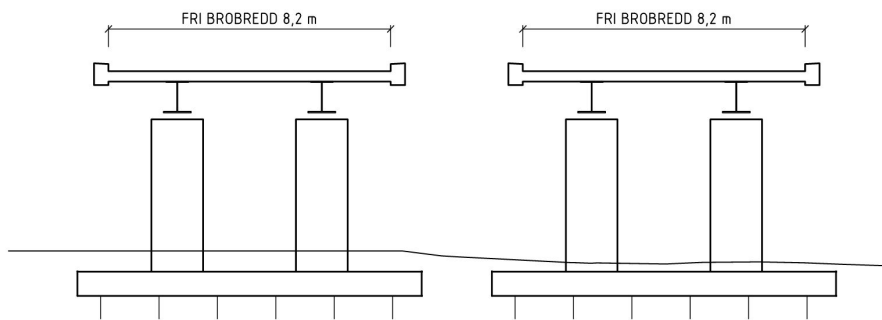
nismer obehindrat kunna vandra i vattendraget. Det fick därför inte placeras någon byggnadsställning under brospannen. Bron skulle utföras som två parallella broar med två körfält och minst 8,2 meter i fri brobredd. De skulle vidare utföras i två spann om vardera ca 25 meter. Enligt förfrågningsunderlaget från Trafikverket fick bron utföras som betong- eller samverkansbro i betong och stål.

Anbudsförslag - Samverkansbron

Först togs det av Skanska fram ett förslag där bron skulle utföras som en samverkansbro, se Figur 1.3 och Figur 1.4 nedan. Respektive bro var tänkt att utföras med en överbyggnad i betong vilandes på två stålbalkar av I-profil. Således kunde stålbalkarna lanseras ut över de tre stöden och ingen formställning behövde ställas på marken i dalen. Ändstöden skulle utföras med grusskift och frontmur där stålbalkarna sedan fästes i lager placerade på plintar, se Figur 1.3 nedan. Mittstödet var tänkt att utgöras av två runda pelare där de två balkarna fästes i varsitt lager. Bottenplattor under stöd planerades att grundläggas på 16 pålar för respektive bottenplatta. Brons underbyggnad skulle göras med betongkvalitet C35/45 och dess överbyggnad med betongkvalitet C40/50, båda med vct mindre än 0,45. Pålarna planerades göras med betongkvalitet C50/60. Armering av kvalitet K500B var tänkt för hela bron. Stålbalkarna föreslogs utföras som I-profiler av stålqualität S355J2 med undantag för underfläns av stålqualität S420J2.



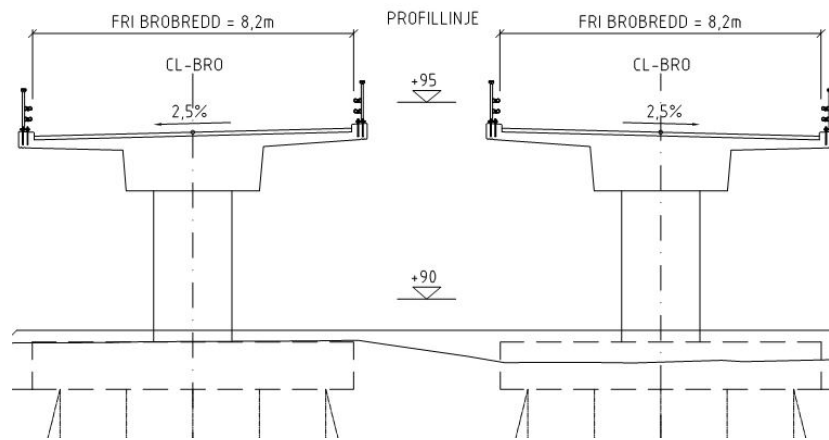
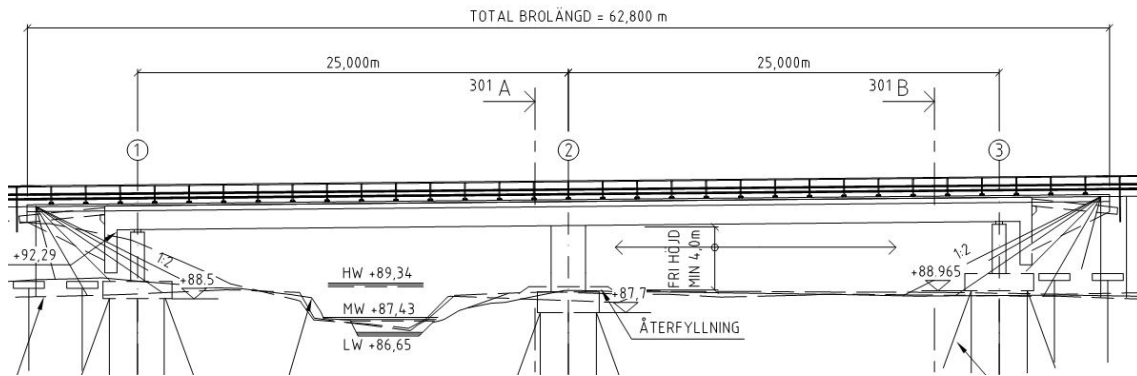
Figur 1.3: Vy för samverkansalternativ över Hovaån.



Figur 1.4: Sektion vid mittstöd för samverkansalternativ över Hovaån.

Verkligt utförande - Betongbalkbron

Skanska arbetade sedan fram ett nytt alternativ helt i betong vilket också var det alternativ som blev byggt. Respektive bro utfördes som en massiv betongbalkbro med ändskärmar vilandes på två lager placerade på skivor vid landfästena, se Figur 1.5 och Figur 1.6 nedan. Mittstödet utfördes som en rund pelare vilken gjordes fast inspänd i överbyggnaden. Även för detta alternativ användes 16 pålar under respektive bottenplatta. För pålarna användes betong av hållfasthetsklass C50/60. I övrigt användes betong av hållfasthetsklass C35/45 och armeringskvalité K500B. För att bära formen för detta alternativ användes fyra stålfackverk, två för respektive spann, placerade på bottenplattorna för de tre stöden, se Figur 1.7 nedan. De två broarna uppfördes en åt gången och tack vare deras identiska utseende, så när som på dess spegelvända tvärfall, kunde stålfackverken återanvändas till båda broarna.



Figur 1.7: Stålfackverk för att bära gjutform under byggskedet av betongbalkbron.

Kapitel 2

Klimatpåverkan

I rapporten *Our Common Future*, även kallad Brundtlandrapporten, från år 1987 myntade dåvarande norska statsministern Gro Harlem Brundtland begreppet hållbar utveckling vilket innebär “utveckling som möter nutidens behov utan att riskera möjligheten för kommande generationer att möta sina behov” (Gröndahl och Svanström 2011). Denna definition av hållbar utveckling kom vidare att antas som ett gemensamt mål vid FN:s andra världskonferens om miljö och utveckling i Rio de Janeiro 1992. Brundtlandrapporten är skriven med en underton av att utveckling och framgång ska mätas i människans välmående snarare än ekonomi (ibid.). Hållbar utveckling bygger enligt Brundtlandrapporten på fyra etiska byggstenar (ibid.): beroende mellan människa och ekosystem, solidaritet mellan människor, jämlikhet och rättvisa mellan generationer samt demokrati och medbestämmande.

En ofta förekommande definition av hållbar utveckling är den om de tre områdena bevarande av naturens resurser, social rättvisa och ekonomisk tillväxt (ibid.). Ett samtidigt uppfyllande av dessa tre områden representerar en hållbar utveckling. I denna rapport är inriktningen bevarande av naturens resurser, även kallat ekologisk hållbarhet, med huvudfokus på klimatförändring kopplat till utsläpp av växthusgaser. Vid upprättande av broar förekommer ofta betong och stål som några av de största ingående materialposterna. Dessa material är även en stor källa till utsläpp av just växthusgaser, något som vidare behandlas i Avsnitt 2.2 respektive 2.3.

2.1 Klimat- och miljöpåverkan

Björkström och Tjernström (u.å. A) definierar klimatförändring som en förändring av klimatet på lokal, regional eller global nivå. Vid lokal miljöeffekt syns de effekter som en källa ger upphov till i nära anknytning till källan själv. Då effekterna på miljön istället är märkbar inom en begränsad region från utsläppskällan är det istället tal om regionala miljöeffekter. När en miljöeffekt, oberoende av ursprungskällans geografiska läge, inverkar på hela jorden är det istället tal om en global miljöeffekt. Till denna kategori hör bland annat utsläpp av växthusgaser så som koldioxid vilka bidrar till ökad medeltemperatur på jorden. Gröndahl och Svanström (2011) menar på att vilka konsekvenser klimatförändringarna får är mycket svåra att förutspå. Det som är säkert är dock att påverkan på ekosystem kommer vara omfattande.

2.1.1 Historik

Fram tills runt 7000-4000 f.Kr. har människans varaktiga påverkan på miljön varit begränsad (Gröndahl och Svanström 2011). Först därefter uppstår en tydligare påverkan till följd av att mer permanenta jordbrukssamhällen började växa fram och människor stannade på ett och samma ställe. Således kunde inte längre naturen på platsen få tid att återhämta sig efter det att människan rört sig vidare i sökande på nya resurstillgångar. I takt med att städer började växa fram uppkom även avfallsproblem, något som finns beskrivet redan från antiken (ibid.).

I samband med att industrialismen tog fart under 1800-talet ökade även miljöproblematiken (ibid.). Kopplingen mellan utsläpp av koldioxid och en förstärkt växthuseffekt gjordes av svensken Svante Arrhenius

i slutet av 1800-talet (ibid.). Arrhenius teori var dock att mängden koldioxid i atmosfären skulle öka i avsevärt lägre takt än vad vi nu kan se att den gjort. Det var dock först under 1960-talet som ett större allmänintresse växte fram och 1967 upprättades en ny myndighet, Naturvårdsverket, vilken enbart skulle arbeta med frågor kopplade till skydd av natur och miljö. Kring samma tid insågs att miljöproblem är ett globalt problem och att samarbete över landgränser krävs för att få bukt på dessa. I Stockholm 1972 hölls FN:s första internationella miljökonferens med anledning av detta.

I den femte samlade utvärderingsrapporten (AR5) från FN:s klimatpanel IPCC (2013) presenteras att jordens medeltemperatur ökat med $0,85^{\circ}\text{C}$ [$0,65^{\circ}\text{C}$ till $1,06^{\circ}\text{C}$] under perioden 1880-2012. Enligt det klimatavtal som togs fram vid FN:s klimatkonvention i Paris 2015 (även kallat Parisavtalet), vilket presenteras i regeringens proposition 2016/17:16, ska den globala uppvärmningen begränsas till långt under $2,0^{\circ}\text{C}$ och helst under $1,5^{\circ}\text{C}$ jämfört med förindustriell nivå. Den 1 januari 2018 trädde en ny klimatlag i kraft i Sverige vilken binder regeringen till att årligen presentera en klimatredovisning i budgetpropositionen (Regeringen 2017). Vidare ska regeringen inför varje mandatperiod lägga fram en klimatpolitisk handlingsplan för att klargöra hur klimatmålen ska uppnås. Denna lag är en del av det klimatpolitiska ramverk som röstades igenom i riksdagen den 15 juni 2017. Ramverket innefattar utöver denna klimatlag även nya klimatmål och ett klimatpolitiskt råd. Klimatmålet innebär bland annat att det i Sverige inte ska ske några nettoutsläpp av växthusgaser år 2045 (ibid.). Därefter ska utsläppen vara negativa, det vill säga att de utsläpp som görs ska understiga den mängd koldioxid som naturen har förmåga att ta upp. För att den regeringspolitik som förs ska kunna granskas opartiskt som kontroll att klimatmålen efterlevs inrättas ett klimatpolitiskt råd (ibid.).

2.1.2 Växthuseffekten

Av den UV-strålning från solen som riktas mot jorden är det cirka en tredjedel som når och värmer upp jordens yta (Gröndahl och Svanström 2011). Till följd av uppvärmningen av jordytan strålar långvägig värmestrålning ut. Denna strålning tas delvis sedan upp av olika gaser i atmosfären och värme bildas. Långvägig värmestrålning strålas då åter mot jordytan vilken värms ytterligare. Detta fenomen, där gaser i atmosfären absorberar och strålar ut värme, är känt som växthuseffekten och är en naturlig process vars förekomst är en förutsättning för liv på jorden i den form vi känner till (Björkström och Tjernström u.å. B). Medeltemperaturen på jorden håller sig runt $+14^{\circ}\text{C}$ till följd av växthuseffekten istället för de -18°C som hade rått utan den (Gröndahl och Svanström 2011). Flera olika typer av gaser bidrar till växthuseffekten. 70-90 % av den naturliga växthuseffekten står vattenångan för, enligt Gröndahl och Svanström (2011). Även koldioxid och metan anses vara naturligt förekommande växthusgaser.

De olika växthusgaserna har olika effekt på uppvärmningen. För att kunna jämföra påverkan från utsläpp av olika växthusgaser med varandra mäts olika gasers globala uppvärmningspotential (GWP, global warming potential) i koldioxidekvivalenter, vanligen över tidsspannet 100 år. För koldioxid är denna ekvivalent därmed 1 medan den för till exempel metan är 25 och för lustgas 298 (Naturvårdsverket u.å.).

Variation i medeltemperaturen på jorden sker av naturliga anledningar men forskning visar på att även den mänskliga påverkan är av betydelse (ibid.). Som exempel på naturliga anledningar finns att jordens lutning mot och dess bana kring solen varierar men även att förekomst av solfläckar ger en variation i ljusstyrkan från solen. Enligt Gröndahl och Svanström (2011) kan dock inte den medeltemperaturökning som skett sedan 1980 enbart förklaras av de naturliga anledningarna. De menar att en utbred samsyn finns i forskarvärlden att den mänskliga påverkan inte går att förneka.

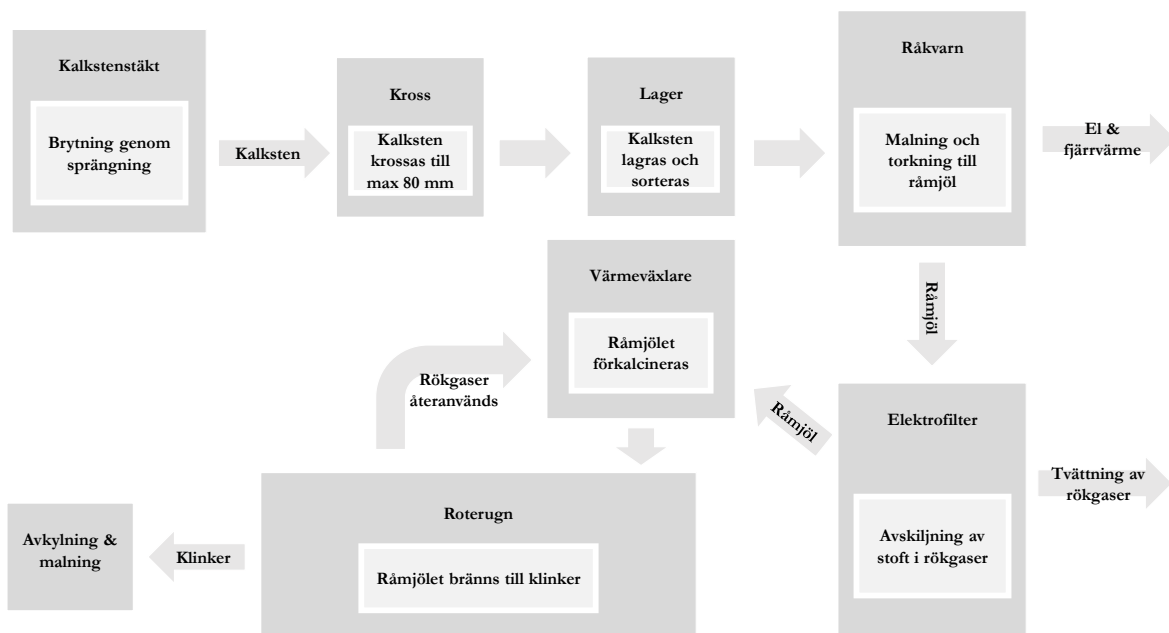
Utsläpp av bland annat koldioxid, freoner (CFC), lustgas och metan bidrar alla till en förstärkt växthuseffekt. Koldioxid står för ungefär hälften av den ökade växthuseffekten menar Gröndahl och Svanström (2011). Ökningen av koldioxid står i första hand förbränning av kol, olja och naturgas för, så kallade fossila bränslen. Andra bidragande effekter är skövling av skog vilket medför att naturen har minskande möjlighet att ta upp lika stor andel av koldioxiden i atmosfären. Gröndahl och Svanström (2011) menar även att cementproduktionen står för en anmärkningsvärd andel av den koldioxid människan släpper ut. Vid cementproduktion frigörs nämligen kol bundet i marken och avges som koldioxid under produktionskedet.

2.2 Utsläpp vid betongproduktion

Klimatpåverkan gällande växthusgasutsläpp från betongproduktion uppgick enligt Svensk Betong (2017a) till ca 3 procent av Sveriges totala koldioxidutsläpp per år eller 1,65 miljoner ton CO₂-ekvivalenter per år för år 2016. Av dessa utsläpp står tillverkningen av cementklinker för mer än 90 %. Transporter, framställning av ballast, förbrukning av vatten och övriga tillsatsmedel samt själva tillverkningen av olika betongprodukter står för resterande 10 % (ibid.). Genom utveckling, förbättringsarbete och forskning arbetar betongbranschen för att minska klimatpåverkan i alla led. Detta görs bland annat genom att delvis ersätta cementklinker som bindemedel med olika tillsatsmedel som flygaska eller masugnsslagg (ibid.). I SBUFs rapport (2017), där potentialen för effekten med olika cementsorter och med 20-35 % ersättning av cementklinker med masugnsslagg eller flygaska bland annat undersöks, fås ett resultat om att denna åtgärd har en potential att minska utsläppen för en platttrambro i betong med upp till 21 %. Med ett val av en miljömässigt sämre cementsort har den också, enligt LCA-beräkning i SBUFs rapport, potential att öka utsläppen upp till 14 %.

2.2.1 Tillverkning av cement

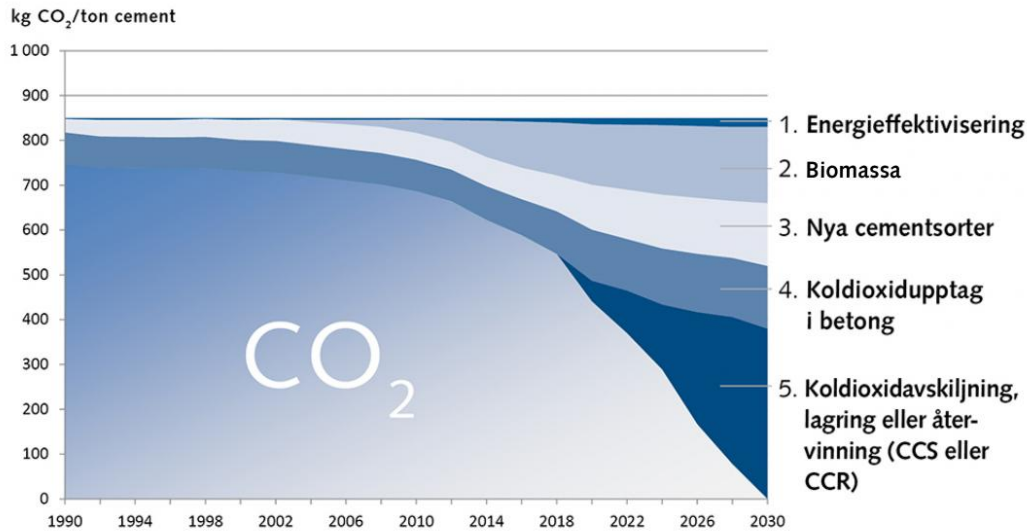
Eftersom mer än 90 % av betongens koldioxidutsläpp kommer av cementtillverkningen (Svensk Betong 2017a) krävs det förståelse om denna process för att förstå hur och var dessa utsläpp uppstår. Tillverkningsprocessen för cementklinker visas schematiskt i Figur 2.1. Kortfattat så tillverkas cement, eller cementklinker, genom att kalksten bryts, krossas och mals till ett fint råmjöl som sedan torkas och bränns till klinker vilket till sist avkyls och mals till önskad finhet (Cementa u.å. A).



Figur 2.1: Cementtillverkningsprocessens olika steg.

Först i värmeväxlaren och sen i roterugnen där råmjölet gradvis bränns i en allt högre temperatur sker calcineringen där 60 % av koldioxidutsläppen kommer från. Vid den höga temperaturen frigörs koldioxid bundet i kalkstenen (Svensk Betong 2017a). Resterande 40 % av utsläppen kommer från den energianvändning som krävs för att driva uppvärmnings- och bränningsprocessen.

För att reducera utsläppen har Cementa och HeidelbergCement Northern Europe formulerat en vision om klimatneutralitet 2030 där koldioxidutsläppen sett över cementproduktens livstid ska vara noll (Cementa u.å. B). Deras strategi för att uppnå detta illustreras av Figur 2.2 där fem huvudområden och deras bidrag till att minska koldioxidutsläppen kan ses.



Figur 2.2: Cementas fem huvudområden för klimatneutralitet år 2030 samt deras potentiella bidrag till att minska koldioxidutsläppen. Källa: Cementa u.å. B.

Utvecklingen av nya cementsorter med ersättningen av cementklinker, vars potentiella effekter studeras i denna rapport, är således en del av fem för att reducera och på sikt nå klimatneutralitet för betong- och cementprodukter.

2.2.2 Cementklinkerersättning

Ersättning av cementklinker med andra liknande reaktiva material som flygaska eller masugnsslagg, även kallat tillsatsmedel, kan antingen göras vid tillverkning av cement eller vid tillverkning av betong (SBUF-13207 2017). Då ersättning sker vid tillverkningen av cement blandas och sammals tillsatsmedel med cementklinker till ett cement och regleras av den europeiska cementstandard SS-EN 197-1. Om ersättning istället sker vid framställningen av betong regleras det av SS-EN 206:2013 och SS 137003:2015 (ibid.). Tillåten mängd tillsatsmedel beror av vilken exponeringsklass som krävs för studerad betongkonstruktion, dvs vilken påverkan av miljön betongen bedöms exponeras för bestämmer tillåten mängd tillsatsmedel (SS 137003:2015). Enligt Tabell D.1-1 i TDOK 2016:0203 (Trafikverket 2016a) krävs för olika brokonstruktionsdelar exponeringsklasser enligt Figur 2.3 nedan.

Tabell D.1-1 Val av exponeringsklass - allmänt

Konstruktionsdel	Exponeringsklasser
Underbyggnad ^{2) 3)} inkl. bottenplatta:	
- Betong under mark och betongytor mot jordfyllning	XC2, XF3 ¹⁾
- Betong i sötvatten (under LLW – 1,0 m)	XC2, XF3 ¹⁾
- Betong i havsvatten (under LLW – 1,0 m)	XS2, XF4
- Betong ovan marin miljö (HHW + 5,0 m)	XS1, XF2
- Trafikerad bottenplatta	XD1, XF2
- Vingmur till väg- samt gång- och cykelbro	XD1, XF4
- Övrig betong	XC4, XF3 ¹⁾
Överbyggnad väg- samt gång- och cykelbro ⁴⁾	XD1, XF4
Överbyggnad järnvägsbro ⁴⁾	XC4, XF3
Överbyggnad järnvägsbro ovan marin miljö ⁴⁾ (HHW + 5,0 m)	XS1, XF2
Kantbalk vid vägbroar	XD3 ⁵⁾ , XF4
Kantbalk vid gång- och cykelbroar	XD1, XF4

¹⁾ v_{ct,ekv} enligt SS 13 70 03 begränsas till maximalt 0,50

²⁾ ändskärmar ingår

³⁾ vingmurar ingår

⁴⁾ länkplattor ingår

⁵⁾ en kantbalk som gjuts tillsammans med brobaneplattan kan dock utformas av betong med v_{ct,ekv} ≤ 0,45 och med ett minsta täckande betongskikt av 35 mm.

Figur 2.3: Val av exponeringsklass för brokonstruktionsdelar. Källa: Trafikverket 2016a.

Oavsett om ersättningen sker vid tillverkningen av cement eller vid framställningen av betong så får den totala mängden tillsatsmaterial inte överstiga de värden som för respektive exponeringsklass gäller enligt Tabell 8b i SS 137003 (2015) vilket kan ses i Figur 2.4 där de exponeringsklasser som enligt Figur 2.3 krävs för brokonstruktionsdelar syns med röd markering.

Tabell 8b – Accepterade bindemedelssammansättningar i de olika exponeringsklasserna

Kravelement	Exponeringsklass																		
	X0	XC 1	XC 2	XC 3	XC 4	XS 1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF 1	XF 2	XF 3	XF 4	XA 1	XA 2	XA 3	
Cement enligt SS-EN 197-1	Alla	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ¹⁾ II/B-M ²⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ³⁾ II/B-M ⁴⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ⁵⁾ II/B-M ⁶⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ⁷⁾ II/B-M ⁸⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ⁹⁾ II/B-M ¹⁰⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ¹¹⁾ II/B-M ¹²⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ¹³⁾ II/B-M ¹⁴⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ¹⁵⁾ II/B-M ¹⁶⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ¹⁷⁾ II/B-M ¹⁸⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ¹⁹⁾ II/B-M ²⁰⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ²¹⁾ II/B-M ²²⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ²³⁾ II/B-M ²⁴⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ²⁵⁾ II/B-M ²⁶⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ²⁷⁾ II/B-M ²⁸⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ²⁹⁾ II/B-M ³⁰⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ³¹⁾ II/B-M ³²⁾ III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M ³³⁾ II/B-M ³⁴⁾ III/A	Sulfatresistenta bindemedel se 5.3.2(5)
Hållfasthetsklass hos cement	≥ 32,5	≥ 32,5	≥ 32,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5
Andel PC-klinker av bindemedlet ^{b)}	≥ 30 ^{d)}	≥ 35	≥ 35	≥ 65	≥ 65	≥ 35	≥ 35	≥ 65	≥ 35	≥ 35	≥ 65	≥ 65	≥ 65	≥ 65	≥ 80	≥ 35 ^{d)}	≥ 35 ^{f)}	≥ 35 ^{f)}	≥ 42,5
Andel av bindemedlet ^{e)}																			
Silikastoft	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤5	≤5	≤10	≤10 ^{g)}	≤10 ^{g)}	≤10 ^{g)}
Flygaska	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35 ^{h)}	≤20	≤35	≤35 ^{h)}	≤35 ^{h)}	≤35 ^{h)}
Slagg	≤70 ^{e)}	≤65	≤65	≤35	≤35	≤65	≤65	≤35	≤65	≤65	≤65	≤35	≤35	≤35 ^{h)}	≤20	≤65 ^{h)}	≤65 ^{h)}	≤65 ^{h)}	≤65 ^{h)}

a) Bestäms i varje enskilt fall
b) Andel anges som massfraktion i %. Det ska förutsättas att cementtypen i fråga innehåller lägsta möjliga andel portlandcementklinker enligt SS-EN 197-1.
c) Andel anges som massfraktion i %. I denna andel ska både det som ingår som huvudbeståndsdel i cementet och det som tillsätts vid blandningen medräknas. Om ett cement där tillsatsmaterial ingår används ska det förutsättas att det innehåller högsta möjliga andel tillsatsmaterial för cementtypen i fråga enligt SS-EN 197-1.
d) Lägre andel får tillämpas om tillsatsmaterial enbart ingår som huvudbeståndsdel i ett accepterat ordinärt cement enligt SS-EN 197-1 eller i en motsvarande bindemedelskombination med påvisad likvärdig prestanda enligt bilaga 0.
e) Högre andel får tillämpas om tillsatsmaterialet enbart ingår som en huvudbeståndsdel i ett tillåtet ordinärt cement enligt SS-EN 197-1 eller i en motsvarande bindemedelskombination med påvisad likvärdig prestanda enligt bilaga 0.
f) Gäller endast då tillsatsmaterial kombineras med CEM I-SR0 eller CEM I-SR3 enligt SS-EN 197-1 eller cement som uppfyller SS 134204.
g) Endast cement med S, V eller D.
h) Endast cement med S eller V.
i) Endast cement med S, V, D eller LL.
k) Endast cement med S, V eller LL.
ANM. För att minimera risken för bildning av det svällande mineralet thaumasit bör cement innehållande kalkstensfyller som en huvudbeståndsdel (beteckning LL och i vissa fall M) undvikas i betong i marin miljö längs västkusten och i Öresund. För "lining" i bergtunnlar utsatt för grundvattentryck bör dessa cement undvikas när sulfathalten (SO₄²⁻) i vattnet överskrider 200 mg/l.

Figur 2.4: Accepterade mängder tillsatsmedel med röd markering av de exponeringsklasser som krävs för brokonstruktionsdelar. Källa: SS 137003:2015.

Härur kan ses att för brokonstruktionsdelar med exponeringsklass upp till och med XF3 tillåts ersättning med tillsatsmedel upp till 35 % av mängd massa cementklinker medan det för brokonstruktionsdelar med exponeringsklass XF4 tillåts ersättning med upp till 20 % av mängd massa cementklinker.

2.3 Utsläpp vid produktion av armerings- och konstruktionsstål

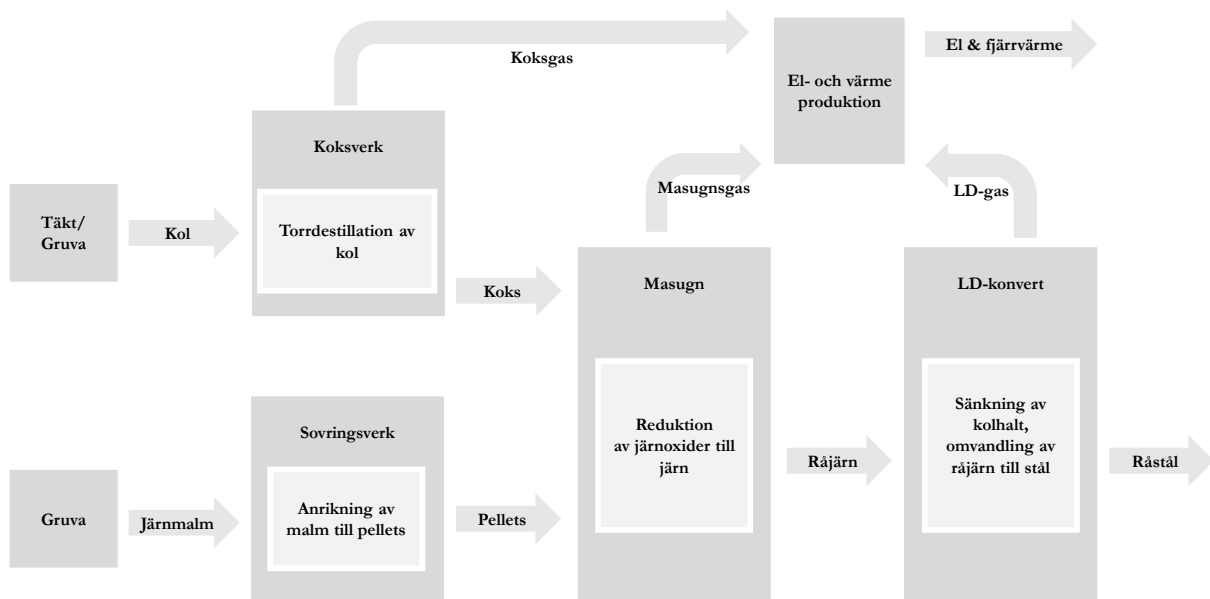
Produktion av järn och stål orsakar också stora växthusgasutsläpp. Enligt Energimyndigheten (2017) svarade den svenska stålindustrin år 2014 för 5,5 miljoner ton CO₂-ekvivalenter eller 11 procent av Sveriges totala växthusgasutsläpp. Utöver att optimera och minska mängd armering eller stål i ett broprojekt kan produktval av armering och konstruktionsstål ha stor inverkan för den totala klimatpåverkan för projektet då det finns stora skillnader i framställningen av armering och stål beroende på hur och var stålet framställs. I rapporten av SBUF (2017) där produktval av armering studeras för sex plattambroar i betong fås fram att denna åtgärd har en potential att minska växthusgasutsläppen med som mest 27 %, men även potential att öka utsläppen med som mest 46%.

2.3.1 Tillverkning av järn och stål

Enligt Energimyndigheten (2017) är framställningen av järn och stål antingen malm- eller skrotbaserad, där den malmbaserade orsakar mest utsläpp. De processrelaterade utsläppen, som för den malmbaserade ståltillverkningen står för den största andelen, motsvarar endast 4 % av stålindustrins totala processutsläpp för den skrotbaserade ståltillverkningen (ibid.). Det är främst tillgången på skrot som begränsar möjligheten att öka den skrotbaserade produktionen och övergå från malmbaserad till skrotbaserad. I Sverige är cirka två tredjedelar av stålproduktionen malmbaserad och en tredjedel skrotbaserad (Jernkontoret u.å.).

Malmbaserad ståltillverkning

Processen för malmbaserad ståltillverkning och var koldioxidutsläppen uppstår i denna process kan schematiskt ses i Figur 2.5. Stål produceras från järnmalm och koks där järnmalmen bryts i gruvor och anrikas sedan i sovringsverk till slig genom krossning, sortering, malning, separation och flotation så att gråbergsrester och orenheter avskiljs och sorterar bort (Energimyndigheten 2017). Malmpellets, som är en mellanprodukt för att bilda råjärn, bildas vidare genom att den anrikade malmen rullas och bränns. För att malmpelletsen ska bli till råjärn behöver malmpelletsen reduceras i en masugn med hög temperatur. Här används koks som både reduktionsmedel och som bränsle. Koks bildas i ett koksverk där kol omvandlas till koks genom torrdestillation, det vill säga en syrefri miljö där kolet upphettas till över 1000 grader så att vatten och flyktiga beståndsdelar kan avgå (ibid.). Med hjälp av koks som reduktionsmedel omvandlas malmpelletsen till råjärn vid mycket höga temperaturer i masugnen. I LD-konvertorn bildas sedan råstål genom att kolhalten sänks då syrgas blåses på råjärnet. Handelsfärdigt stål fås till slut genom att råstålet legeras, gjuts i lämplig form och bearbetas genom valsning.



Figur 2.5: Processen för malmbaserad ståltillverkning och var utsläppen uppstår.

Reduktionen av järnmalmpellets i masugn till råjärn är den mest utsläppsintensiva processen (Jernkontoret u.å.). Detta främst på grund av kolet, eller koksen, som används som både bränsle och reduktionsmedel och som står för cirka 90 % av stålindustrin koldioxidutsläpp (Jernkontoret u.å.). För att framställa koks och råstål bildas också utsläpp som delvis kan användas som bränsle i processen eller användas för el- och värmeproduktion men som vid förbränning orsakar växthusgasutsläpp.

Skrotbaserad ståltillverkning

Vid skrotbaserad framställning av stål smälts råvaran, som är återvunnet järn- och stålskrot, ner genom en elektrisk ljusbågsugn. Energianvändningen blir med denna typ av ståltillverkning endast en femtedel av energianvändningen vid malmbaserad ståltillverkning (ibid.) och utsläppen med denna typ av tillverkningen är väldigt beroende av vilken elmix som används.

Flera företag i branschen är dock engagerade i olika forskningsprojekt för att reducera växthusgasutsläppen (ibid.) HYBRIT är ett forskningsprojekt där det undersöks att direktreducera järnmalmen med hjälp av vätgas för att sedan smältas till råstål i en ljusbågsugn. Genom att även undersöka produktions sätt för att med klimatneutral el producera vätgas genom elektrolys kan stål tillverkas med mycket låga koldioxidutsläpp (ibid.). Tillämpning och användning av detta ligger dock långt fram i tiden.

Var och hur stålet eller armeringen framställs har således stor inverkan på vilken klimatpåverkan som fås. Huruvida det är skrotbaserad eller malmbaserad produktion, vilken elmix som finns tillgänglig vid produktionsplatsen samt andelen återvunnet järn- och stål är några av de faktorer som påverkar stålets klimatpåverkan.

Kapitel 3

Livscykelanalys

I syfte att kunna skapa beslutsunderlag har olika system, så kallade miljösystemanalytiska metoder, tagits fram för att modellera kvantitativ och kvalitativ data (Rydh, Lindahl och Tingström 2002). Beroende på analysens omfattning och fokus kan val av miljösystemanalytisk metod variera. Enligt Du och Karoumi (2012) har det visat sig i flertalet studier att resultatet av en livscykelanalys är beroende av vilken av dessa metoder som väljs. En av dessa metoder är Livscykelanalys (LCA), vilken också är en av de mest etablerade metoderna (Rydh, Lindahl och Tingström 2002).

En livscykelanalys är en metod där utsläpp av klimatgaser, resursanvändning och andra relaterade miljömässiga påverkningar kopplade till en tjänst, vara eller produkt studeras över hela livscykeln från vaggan till grav (Rydh, Lindahl och Tingström 2002; ISO 14044:2006). Med hela livscykeln menas att alla aktiviteter från råmaterialanskaffning och materialtillverkning, produktion, användning och underhåll till slutbehandling och återvinning för den studerade produkten under hela livslängden studeras.

3.1 Historik

Enligt Klöpffer och Grahl (2014) finns livscykelanalyser dokumenterat redan från 1880-talet. En metod utvecklad av den skotska biologen och ekonomen Patrick Geddes kartlade bland annat processers energibehov med huvudsakligt fokus på dess kolkonsumtion. Men det var först under slutet av 1960- och 1970-talet som livscykelanalyser fick ett riktigt uppsving (Rydh, Lindahl och Tingström 2002). Från 60-talet återfinns dokumenterade livscykelanalyserna vilka oftast hade syfte att kartlägga produktsystems och kemiska processers energibehov (ibid.).

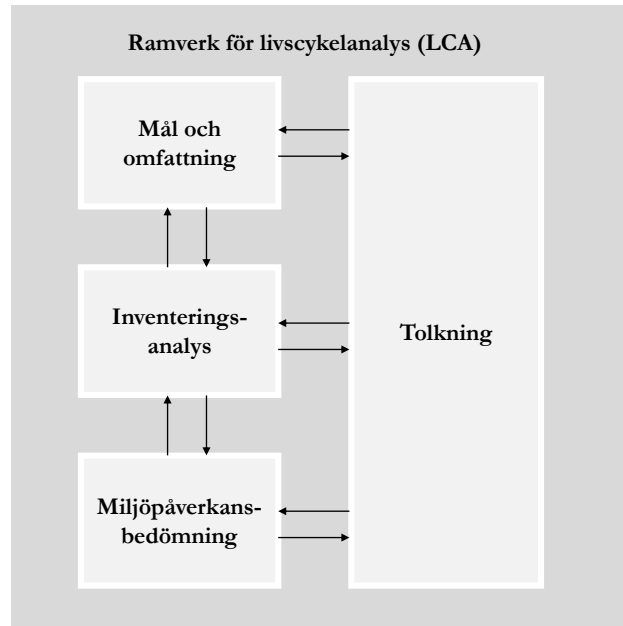
Under 70-talet började livscykelanalyser användas som en konsekvens av den rådande oljekrisen. De användes för att kartlägga processers energibehov samt för att utvärdera alternativa energikällor. Enligt Rydh, Lindahl och Tingström (2002) började även livscykelanalyserna nu innefatta de utsläpp vilka kunde hänföras till respektive energikälla. Utvecklingen av livscykelanalyser tog fart då enskilda produkter och produktionsprocesser nu även började studeras.

Uppmärksamhet kring de ökade avfallsmängderna i världen under 80-talet ledde till att ett ökande intresse växte fram kring att minska deponering av material och istället öka återvinning och återanvändning (ibid.). Även detta kom till att utforma och vidareutveckla livscykelanalysen.

Under början av 90-talet började livscykelanalyser även innefatta bedömning av hur det studerade systemets material påverkar miljön och inte enbart hur flödena av dessa sker över systemets gränser. En slags förenklad LCA-metod växte fram med anledning av detta. Regeringar började nu även använda livscykelanalyser för att skapa beslutsunderlag för lagstiftning (ibid.). 1997 utkom även den första internationella standardiseringen kring livscykelanalys, ISO 14040, från International Organization for Standardization (ISO). Åren därpå utkom ytterligare standarder; ISO 14041, ISO 14042 och ISO 14043. Dessa fyra standarder kom 2006 att ersättas av nu gällande ISO 14044:2006.

3.2 Livscykelanalys enligt ISO 14044:2006

Inom ISO 14000-familjen samlas de standarder som berör miljöledning vilka genererar ett miljöledningssystem för applicering inom olika befintliga verksamheter. Användningen av detta miljöledningssystem är frivilligt och bidrar till att en kontinuerlig utveckling av den egna verksamheten kan upprätthållas (SIS, u.å.). Som en del av ISO 14000 finns den standard vilken täcker livscykelanalyser, ISO 14044:2006. Livscykelanalys enligt ISO 14044:2006 är en iterativ process, vilken schematiskt visas i Figur 3.1, bestående av följande fyra faser; definition av mål och omfattning, inventeringsanalys, miljöpåverkanbedömning och tolkning.



Figur 3.1: Ramverk för livscykelanalys och dess iterativa process.

3.2.1 Definition av mål och omfattning

En LCA inleds med att definiera mål och omfattning för studien med syfte att tydliggöra och beskriva varför studien genomförs och vad resultaten ska användas till (Rydh, Lindahl och Tingström 2002). Målen ska definieras tydligt så att resultaten kan tolkas med tillräcklig noggrannhet. Omfattningen fastställs utifrån att definiera produktsystemet samt genom att identifiera vilka processer, systemgränser och vilken detaljnivå som krävs för att uppfylla målsättningen för studien (ibid.). Denna fas anses enligt Guinée (2002) vara den viktigaste då den påverkar beslut som tas i övriga faser.

3.2.2 Inventeringsanalys (LCI)

Den andra fasen, inventeringsanalysen, innebär insamling och kvantifiering av alla in- och utflöden relaterad till produktsystemet (Rydh, Lindahl och Tingström 2002). Med inflöden menas de råmaterial och den energi som krävs för de processer som ingår i produktsystemets livscykel och med utflöden menas de olika utsläpp till luft, vatten eller bildande av avfall som genereras av dessa processer.

Inventeringen kan enligt SAIC (2006) göras i fyra steg där det första steget innebär att ett flödesschema tas fram med in- och utflöden för varje process. I det andra steget tas en plan för all insamling av data fram för att säkerställa att kvaliteten på insamlad data uppfyller de krav som ställts upp under mål och omfattning. Insamling av all data sker under steg tre varpå sedan steg fyra innebär att inventeringen sammanställs, utvärderas och presenteras.

3.2.3 Miljöpåverkansbedömning (LCIA)

Under miljöpåverkansbedömningen, fas tre, vägs data samman och konverteras för att kunna bedöma potentiella miljömässiga effekter hos den data som samlades in under inventeringsanalysen (Rydh, Lindahl och Tingström 2002). Detta sker genom fyra delprocesser; klassificering, karakterisering, normalisering och viktning. Klassificering innebär att data sorteras i olika miljöeffektkategorier såsom växthuseffekt, försurning och övergödning och karakterisering innebär att data multipliceras med faktorer specifika för varje miljöeffektkategori (ibid.). Normalisering och viktning är, till skillnad från klassificering och karakterisering, inte obligatoriska för en LCA (ISO 14044:2006) men innebär i korthet att data förenklas ytterligare och vägs samman till ett tal.

3.2.4 Tolkning

I den sista och fjärde fasen tolkas resultatet från de tidigare faserna med syfte att dra slutsatser, utvärdera begränsningar och ge rekommendationer i förhållande till målen för studien (Rydh, Lindahl och Tingström 2002). Tolkningen av resultatet kan leda till att andra faser behöver ändras eller göras om, till exempel om kraven för kvalitet på data inte uppfylls, vilket illustrerar livscykelanalysens iterativa process.

Ovan presenterade fyra faser beskrivs i standarden i generella termer för att metoden ska kunna appliceras på såväl produkter som tjänster oberoende av verksamhetsområde. Beroende på vilka mål som ställts upp för livscykelanalysen i första fasen kan ibland dessa uppnås genom att enbart genomföra en inventeringsanalys och tolkning, en så kallad LCI-studie. Eftersom det i ISO-standardens endast beskrivs i generella termer hur miljöpåverkan ska beräknas har European Committee for Standardization (CEN) utvecklat en standard för byggbranschen, *EN 15804 Hållbarhet hos byggnadsverk - Miljövarudeklarationer - Produktspecifika regler*, där så kallade produktkategoriregler styr beräkningen av miljöpåverkan för byggnader, anläggningar och byggvaror genom framtagning av miljövarudeklarationer (Al-Ayish 2017).

3.3 Miljövarudeklaration, EPD

En miljövarudeklaration (EPD, environmental product declaration) är ett verktyg vilket syftar till att redovisa produkter och tjänsters miljöpåverkan över dess livscykel vilket sedan granskas och verifieras av en oberoende part (EPD International AB u.å. A). Vidare registreras miljövarudeklarationen vanligen i databaser för att underlätta jämförelse av information mellan likvärdiga produkter. Ett av de huvudsakliga syftena med miljövarudeklarationer är att öka transparensen kring produkters miljöprestanda. De har dessutom potential att göra livscykelanalysprocessen snabbare och effektivare genom att tillhandahålla specifik leverantördata som indata till inventeringsanalysen (Al-Ayish 2017).

Att en produkt (vara eller tjänst) har en miljövarudeklaration ska dock inte tolkas som att den nödvändigtvis är mer fördelaktig ur ett klimatperspektiv jämfört med andra alternativ. En miljövarudeklaration innebär enbart att miljöpåverkan kopplad till den aktuella produkten är deklarerad på ett transparent sätt och är oberoende granskad (ibid). Inom byggsektorn används miljövarudeklarationer ofta i samband med miljöcertifiering av byggnader och intresset hos leverantörer att utföra miljövarudeklarationer har därför ökat de senaste åren (EPD International AB u.å. B).

Miljövarudeklarationer styrs i huvudsak av den internationella standarden *ISO 14025 Miljömärkning och miljödeklarationer - Typ III miljödeklarationer - Principer och procedurer*. Som nämnt ovan finns för varor och tjänster inom byggsektorn vidare en standard inom EU framtagen av European Committee for Standardization; *EN 15804 Hållbarhet hos byggnadsverk - Miljövarudeklarationer - Produktspecifika regler*. Denna standard är utformad som en förlängning av ISO 14025 för att reglera miljövarudeklarationer kopplade till varor och tjänster inom byggbranschen. De så kallade produktkategorireglerna i EN 15804 karakteriseras i fyra moduler under livscykeln och styr beräkningen av klimatpåverkan från byggkonstruktioner, byggvaror och tjänster (Al-Ayish 2017), se Figur 3.2. Vid upprättande av miljövarudeklarationer är fasen för produktframställning (A1-A3) obligatorisk (Al-Ayish 2017).

Produktframställning			Produktionsfas		Bruksfas							Slutanvändning			
Uttag av råmaterial	Transport	Tillverkning	Transport till arbetsplats	Montering	Användning	Underhåll	Reparation	Utbyte	Renovering	Energiåtgång bruksfas	Vattenåtgång bruksfas	Rivning	Transport	Sortering av avfall	Hantering av avfall
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4

Figur 3.2: Moduler för de olika stegen i livscykeln för byggvaror och byggtjänster enligt EN 15804.

3.4 Livscykelanalysens för- och nackdelar

Vikten av att känna till för- och nackdelar med LCA är avgörande för att kunna återge trovärdiga resultat av en livscykelanalys menar Rydh, Lindahl och Tingström (2002). En väl genomförd LCA kan medföra att dolda materialflöden in och ut ur det studerade systemet upptäcks. Den kan även bidra till ökad kunskap om och förståelse för den egna produkten eller produktionsprocessen. En väl genomförd LCA kan också generera underlag för beslut för vidareutveckling eller framtagning av nya produkter. En livscykelanalys kan även bringa klarhet i miljömässiga tvister. Däremot är det inte ovanligt att tillgången till data är begränsad och att denna är baserad på korta mätserier. Insamlad data är inte alltid tillfredsställande och kan medföra stora variationer i resultatet vid mindre variation av indata. Datainsamlingen är dessutom ofta både resurs- och tidskrävande vilket kan begränsa användandet av resultaten från livscykelanalysen som hjälpmedel vid produktutveckling. Komplexiteten ökar speciellt vid framtagande av en ny produkt eller process vilket medför en hög kostnad jämfört med värdet på det resultat som fås (ibid.).

Även Du och Karoumi (2012) anser att tillgången på tillförlitlig data är en av de största bristerna i de flesta livscykelanalyser. De menar att detta kan förklaras av att det ofta är många olika parter som ingår i tillverkningen av en produkt, så som olika materialleverantör. Även geografiska variationer i både sammansättning, utvinning och förädling av material är en del av förklaringen. Detta medför bristande objektivitet i den data som hämtas från LCI databaser enligt Du och Karoumi (2012). Det är därför av stor vikt att genomföra en känslighetsanalys i samband med livscykelanalyser för att kunna utvärdera resultatet. Det är dock alltid fördelaktigt att använda sig utav data vilken kommer direkt från den aktuella tillverkaren (Du och Karoumi 2012). Dessvärre är sådan data vanligtvis svår att få tag på.

3.5 Livscykelanalyser av broar - tidigare studier

I takt med att LCA som metod för miljöbedömning har blivit allt mer etablerad har dess implementering inom brobyggnad också ökat. Nedan sammanställs några av de livscykelanalyser för broar som gjorts och som anses vara relevanta för denna rapport.

3.5.1 Samverkansbroar

Widman (1998) jämförde två samverkansvägbroar över hela livscykeln och inkluderade såväl trafiken på broarna som underbyggnad och överbyggnad. En lådbalkbro med åtta fack jämfördes med en balkbro av I-balkar i ett fack genom att den studerade enheten var kvadratmeter brobana. Båda broarna hade brobanepatta i betong. Små detaljer för lager och knutpunkter avgränsades bort. Resultat visade på att

användningsfasen, på grund av den inkluderande trafiken, hade störst totala utsläpp och att underhållsfasen påverkade marginellt. Det indikerades också att tillverkningen av cement och stål står för störst påverkan gällande enbart CO₂-utsläpp och att balkbron med I-balkar, som har större andel betong, gav större utsläpp än lådbalkbron.

Itoh och Kitagawa (2003) utvecklade en LCA-metodik för infrastruktur och applicerade denna på en ny typ av bro; en minimerad stålbalcksbro med förspänd brobaneplatta, som jämfördes med en konventionell stålbalcksbro med slakarmerad brobaneplatta. CO₂-utsläpp och kostnader studerades för hela livscykeln. Resultatet gav att den konventionella stålbalcksbron hade såväl högre utsläpp som kostnader jämfört med den nya minimerade stålbalcksbron.

3.5.2 Betongbroar

Lounis och Daigle (2007) undersökte ett livscykelbaserat tillvägagångssätt för design av motorvägsbroar där miljöpåverkan studerades med fokus på reducering av CO₂-utsläpp, byggavfall och kostnader. Hela livscykeln analyserades för två brobaneplattor, en med högpresterande betong och en med vanlig betong. Resultaten indikerade på att brobaneplattan med högpresterande betong är fördelaktig ur miljösynpunkt på grund av såväl längre livslängd, lägre CO₂-utsläpp samt lägre livscykelkostnader.

Thiebault (2010) utförde en omfattande litteraturstudie kring livscykelanalyser av broar och tog utifrån denna fram ett förenklat excelbaserat LCA-verktyg där järnvägsbron Banafjälbron med två olika utföranden jämfördes; ballasterat och fixerat spår. Verktyget var tänkt att användas i tidiga skeden för att ge grova miljömässiga uppskattningar. Hela livscykeln studerades utifrån sex miljöpåverkanskategorier; förbrukning av icke-förnyelsebara resurser, global uppvärmning, marknära ozonbildning, försurning, övergödning och humantoxicitet. Den studerade funktionella enheten var hela överbyggnaden för hela livslängden 60 år. Resultaten indikerade att materialtillverkningsfasen var dominerande och att lösningen med fixerat spår gav lägre utsläpp för alla sex miljöeffekter.

Du och Karoumi (2012) tog fram ett ramverk för LCA för järnvägsbroar och implementerade detta på samma järnvägsbro som Thiebault (2010), Banafjälbron, där jämförelse gjordes mellan ballasterat och fixerat spår. Ramverket togs fram utifrån en undersökning av befintliga järnvägsbroar i Sverige och skapades för att studera hela livscykeln, oavsett detaljeringsnivå. Detta för att möjliggöra att såväl en hel bro som en del av en brokonstruktionsdel ska kunna studeras, med hjälp av samma ramverk. Vidare grupperades hela livscykeln i följande fyra faser; materialtillverkning, produktion, underhåll och slutbehandling. Implementeringen av ramverket på Banafjälbron gjordes för att jämföra de två utförandena utifrån samma sex miljöpåverkanskategorier som Thiebault (2010) och utifrån CML 2001 som metod för miljöpåverkanbedömning. Funktionell enhet valdes till en meter bro i längsriktningen, med konstant mängd årlig trafik, under livslängden 120 år. Kärlighetsanalys utfördes gällande såväl effekten av underhållsåtgärder, som togs fram utifrån dialog med Trafikverket, olika slutbehandlingsåtgärder samt trafikstörningar. Resultatet gav, likt Thiebault (2010), att alternativet med fixerat spår presterar bättre för alla miljöeffekter på grund av minskade materialmängder och minskat underhåll.

I studien av SBUF (2017) studerades olika möjligheter gällande utformning och dimensionering för reducering av växthusgasutsläpp för den vanligt förekommande betongbrokonstruktionen plattrambro. Sex plattrambroar med en spännvidd mellan 5,9 meter till 17,5 meter studerades enligt LCA-standard ISO14040 och EN15804 för EPD:er för byggprodukter. De möjligheter för reducering av växthusgasutsläpp som främst studerades var följande: produktval cement, tillsättning av tillsatsmaterial, betongkvalitet och typ, korrosionsskydd, produktval armering, transporter, optimering av konstruktion, estetiska val samt en kombinationsåtgärd gällande betongsammansättning. Resultaten indikerade på att det med ett aktivt och medvetet klimatarbete och en kombination av åtgärder gällande material och utformning så kan klimatbelastningen gällande växthusgasutsläpp reduceras med ca 50 %. De åtgärder som har störst påverkan är produktval armering samt kombinationsåtgärden för betong med cement med så lågt koldioxidutsläpp som möjligt, minsta möjliga betongkvalitet och maximal tillåten mängd tillsatsmaterial.

3.5.3 Jämförelse mellan samverkans- och betongbroar

Horvath och Hendrickson (1998) använde sig av en livscykelanalysmetod (EIO-LCA) som kopplar alla direkta och indirekta kostnader för en produkt, vara eller tjänst till resursanvändning och miljömässiga

utsläpp. De jämförde en stålbalksbro i plåt med en förspänd betongbalkbro där båda broarna hade brobaneplatta i betong. Hela livscykeln under livslängden 80 år studerades utifrån tre grupper av miljöeffekter: giftiga kemiska emissioner, riskabel avfallsbildning och emissioner av luftföroreningar. Resultat indikerade på att betongbalkbron totalt sett hade lägst miljöpåverkan.

Steel et al. (2003) undersökte olika broars underhållsaktiviteter och underhållsbehov ur ett livscykelperspektiv genom en fallstudie på 30 broar. Broarna delades in i tre kategorier; balkbroar, bågbroar och kabelbroar. Slutsatsen var att eftersom materialtillverkningen av stål och betong är den enskilt största utsläppsfaktorn så bör inte reducering av klimatpåverkan göras på bekostnad av beständighet och livslängd.

Martin (2004) studerade miljöpåverkan kopplat till CO₂-utsläpp och energiförbrukning och jämförde en brobaneplatta i betong med en samverkansbrobaneplatta över hela livscykeln. Resultaten visar på skillnader beroende på om endast nya material eller återanvända material används. Med endast nya material fås mindre energiförbrukning och mindre CO₂-utsläpp med brobaneplatta helt i betong men med återanvänt material fås mindre energiförbrukning och CO₂-utsläpp med samverkansbrobaneplattan.

Collings (2006) utförde två studier där miljömässig påverkan för tre olika brotyper; konsol-, snedkabel- och bågbroar, och tre olika material; betong, stål och samverkan av stål och betong, studerades kopplat till CO₂-utsläpp och energiförbrukning. Materialmängder erhöles med hjälp av geometriska jämviktsmetoden, andra liknande brotyper och uppskattade laster. För materialtillverkningsfasen undersöktes både energiförbrukning och CO₂-utsläpp medan det under driftfasen enbart studerades CO₂-utsläpp. Flera olika underhållsscenarion antogs och beräknades utifrån mängder som erhöles från produktionen. Resultaten antyder att betongbroar har lägst CO₂-utsläpp och energiförbrukning för alla brotyper och att ökad spännvidd ger ökad energiförbrukning. För korta spännvidder är dock skillnaden mellan betong- och samverkansbroar marginell.

Gervásio och Simões da Silva (2008) utförde en integrerad LCA och LCCA där två alternativ för en trefacksbro jämfördes; en samverkansbro med I-balkar och en lådbalkbro i betong. Livscykelanalysen utfördes utifrån ISO 14040-serien men omfattningen begränsades av data till att endast innehålla materialtillverkningsfasen. Sex miljöpåverkanskategorier analyserades: global uppvärmning, försurning, övergödning, luftföroreningar, smogbildning och vattenförbrukning. Resultaten indikerade att trots att betongbron var betydligt billigare så var samverkansbron så pass mycket bättre gällande miljöpåverkan vilket gjorde att samverkansbron även totalt sett, för både kostnader och miljöpåverkan, var bäst.

Eriksen (2009) studerade och jämförde kostnader och miljöpåverkan ur ett livscykelperspektiv genom att utföra en fallstudie på en bro över Leduån i Västerbotten som var tänkt som en konventionell betongbro men som byggdes år 2006 som en samverkansbro. Samverkansbron utfördes med stålbalkar och samverkande brobaneplatta av betong i ett spann på 40 meter med integrerade landfästen. Betongbron utfördes i två fack på 18 meter med ändskärmar vid båda stöden och ett mellanstöd. Livscykelanalysen utfördes enligt ISO 14044 med hjälp av programmet SimaPro och Eco-indicator 99 som metod för att studera skadeverkan utifrån följande tre kategorier: mänsklig hälsa, ekosystemkvalité och resursförbrukning. Underhållsåtgärder för respektive brotyp togs fram från erfarenheter av broinspektörer på Vägverket. Störningar av trafik vid byggnation, underhåll och rivning inkluderades utifrån dess uppskattade trafikantkostnad. Resultaten antydde tydliga fördelar med samverkansbron med integrerade landfästen på grund av mindre antal underhållsåtgärder, lägre totalkostnad samt mindre inverkan på miljön för alla tre skadekategorier.

Hammervold et al. (2013) genomförde en LCA-studie för tre byggda broar i Norge: en 42,8 m lång lådbalkbro i stål (Klenevågen), en 37,9 m lång bågbro i trä (Fretheim) och en 39,3 m lång lådbalkbro i betong (Hillersvika). Studien inkluderade en stor bredd av emissionsfaktorer och funktionell enhet definierades som en kvadratmeter effektiv ytbrobana med en livslängd 100 år. Miljödata karaktäriserades med CML-metoden i följande sex miljöpåverkanskategorier: försurning, övergödning, global uppvärmning, ozonlagerförtunning, marknära ozonbildning och förbrukning av icke-förnyelsebara resurser. Materialmängder samlades in från ritningar, anbudsdokument och projektrapporter. Resultaten antydde att betongbron presterar bäst sett för alla miljöeffekter medan om enbart global uppvärmning studeras så presterar träbron bäst.

Du et al. (2014) utvecklade sitt ramverk för LCA för järnvägsbroar till att inkludera vägbroar genom att addera underhållsåtgärder och brokonstruktionsdelar för vägbroar. Detta ramverk implementerades på fem förslag för Karlsnäsbron som Trafikverket år 2013 planerade att bygga som en 320 meter lång och 22,5 meter bred vägbro med två körfält i varje riktning. De fem olika alternativ som för studien

togs fram och jämfördes var enligt följande: en samverkansbro med sex fack utförd som en bro med två lådbalkar i stål, en samverkansbro med två broar och två I-balkar i stål per bro i sex fack, en betongbro med sex fack utförd med två förspända lådbalkbroar, en betongbro i sex fack utförd som en bro med två förspända lådbalkar och en betongbro i fyra fack utförd som en förspänd lådbalksbro. För att studera miljöpåverkan ur ett livscykelperspektiv så heltäckande som möjligt karakteriserades miljödata med ReCiPe (H) som metod för miljöpåverkansbedömning i tolv miljöpåverkanskategorier; global uppvärmningspotential, ozonlagerförtunning, humantoxicitet, marknära ozonbildning, partikelutsläpp, joniserande strålning, försurning, sötvattens- och havsvattensövergödning och mark-, sötvatten- och havsvattentoxicitet. Utöver detta gjordes också två känslighetsanalyser; en gällande stålets återvinningsgrad och en gällande vald betongkvalité. Resultaten var långt ifrån entydiga. Samverkansbroarna gav lägre potentiell påverkan för global uppvärmning, ozonlagerförtunning och marknära ozonbildning medan betongbroarna gav lägre potentiell påverkan gällande flera av de andra såsom humantoxicitet, partikelutsläpp, försurning och övergödning. Känslighetsanalyserna gav att såväl valet av stålets återvinningsgrad, som varierades från 0-100 %, som valet av betongkvalitén, som ändrades från C50/60 till C25/35, har stor inverkan för resultatet.

Du et al. (2015) jämförde miljöpåverkan ur ett livscykelperspektiv för två vanligt använda broar för korta spännvidder i Sverige; en plattrambro i betong och en rörbro i stål. En fallstudie gjordes med fyra plattrambroar och fyra rörbroar med varierande spännvidd från 4,5 meter till 32,7 meter. Funktionell enhet valdes till en kvadratmeter yteffektiv area per år under livslängden 80 år. Markförberedelser och återfyllnadsarbeten exkluderades från studien då de ansågs vara likvärdiga för de två brotyperna. Enligt ISO standard och med hjälp av ReCiPe (H) som metod för miljöpåverkansbedömning studerades elva miljöpåverkanskategorier. En känslighetsanalys gjordes där stålets återvinningsgrad studerades. Resultatet var likt studien av Du et al. (2014) inte entydigt men med tydligare tendenser. Rörbroarna i stål gav markant lägre potentiell påverkan för global uppvärmning, ozonlagerförtunning och marknära ozonbildning medan plattrambroarna gav en något lägre potentiell påverkan gällande exempelvis humantoxicitet och partikelutsläpp. Vad som studeras och inkluderas gällande miljöpåverkan har således stor påverkan för resultatet. Känslighetsanalysen, som utfördes med 100 % återvinningsgrad för stålet i jämförelse med studiens 37 %, indikerade på att oavsett återvinningsgrad så har rörbroarna lägre påverkan gällande global uppvärmning.

3.5.4 Slutsats kring tidigare utförda livscykelanalyser av broar

Av dessa tidigare gjorda studier blir det tydligt att det inte går att dra några generella slutsatser kring vilket material eller vilken brotyp som har bäst miljö- och klimatprestanda. Resultaten skiljer sig beroende hur studien genomförs, vilka datakvalitetskrav som ställts upp, vilka miljöeffekter som studeras, vilka systemgränser som används, etc. Därav blir det av stor vikt för denna rapport att tydligt redogöra alla dessa val så resultatet inte misstolkas eller generaliseras.

Kapitel 4

Trafikverkets klimatarbete i väg- och järnvägsprojekt

Med ursprung i Sveriges klimatmål att vara klimatneutralt till 2050 tog Trafikverket fram en vision att infrastrukturen ska vara klimatneutral till år 2050 med målen att utsläppen ska minska med 20 % till 2020 och 30 % till 2025 jämfört med 2015 års värde (Trafikverket 2017). Efter att denna vision och mål var formulerade tidigare hade regeringen Sveriges klimatmål till 2045. Trafikverket kommer att redovisa hur hänsyn tas till denna förändring i början av 2019 i samband med att de planerar att presentera nya klimatkrav för 2030 (ibid.).

Trafikverket började i februari 2016 ställa klimatkrav på investeringsprojekt om minst 50 miljoner kronor där öppning för trafik planerades till tidigast 2020. I mars 2018 kom även klimatkrav att ställas på investeringsprojekt under 50 miljoner kronor, återigen då planerad öppning för trafik är tidigast 2020. Utöver investeringsprojekt ställs även klimatkrav på underhåll, reinvestering och upphandling av tekniskt godkänt järnvägsmateriel (Trafikverket 2018).

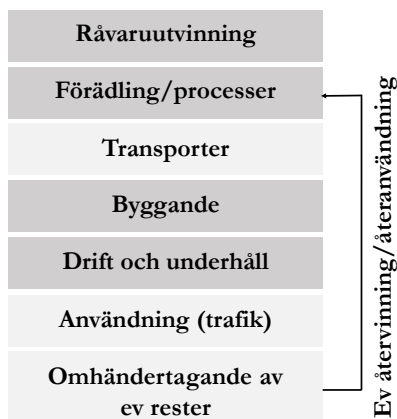
4.1 Trafikverkets Klimatkalkyl

Trafikverket har utvecklat verktyget *Klimatkalkyl* för beräkning av energianvändning och klimatbelastning från infrastrukturhållning ur ett livscykelperspektiv. Verktyget beskrivs i rapporten *Klimatkalkyl version 5.0 - Beräkning av infrastrukturens klimatpåverkan och energianvändning i ett livscykelperspektiv* av Toller och Norberg (2017) utgiven av Trafikverket. Verktyget kan tillämpas på hela investeringsåtgärder såväl som delar av den och är utformat efter livscykelanalysmetodik (ibid.).

I skrivande stund är nyaste version av Klimatkalkyl version 6.0. I denna rapport har däremot version 5.0 använts vid beräkning av klimatbelastning. Detta då version 6.0 utkom i ett sent skede av arbetet då beräkningar i version 5.0 redan genomförts. Utifrån de uppdateringar och tillägg som gjorts för version 6.0 bedömdes det att dessa inte skulle ha någon påverkan på det resultat som redan erhållits genom beräkningar i version 5.0. Valet gjordes därför att inte göra om beräkningarna i version 6.0. Med detta som bakgrund beskrivs nedan utformningen av Klimatkalkyl utifrån version 5.0.

Klimatkalkyl beräknar klimatbelastning utifrån miljöpåverkanskategorierna energianvändning och klimatbelastning uttryckt i koldioxidekvivalenter. De faser som inkluderas (se Figur 4.1) är byggande och underhåll där även de råvaror, material och produkter som används för byggnationen inkluderas. Även de transporter som sker vid råvaruproduktion och förädling är inkluderade. Däremot är inte transporter mellan produktion av material och komponenter till entreprenaden inkluderade då dess påverkan anses vara marginell i sammanhanget. Transporter inom entreprenaden tas dock hänsyn till, så som transport av schaktmassor. Under underhållsfasen inkluderas i version 5.0 enbart vinterväghållning (salt, sand och energiåtgång vid snöröjning), underhåll av beläggning samt tunneldrift. Det finns möjlighet att lägga till belysningspunkter separat. Modellen inkluderar heller inte slutbehandlingsfasen där avveckling och omhändertagande av eventuella rester ingår. Enligt Toller och Norberg (2017) är detta då fullständig rivning av infrastruktur sällan förekommer. Inte heller transport av rester vid utbyte av delkomponen-

ter i samband med underhållsåtgärder inkluderas då det anses vara en försumbar post i förhållande till klimatbelastning och energianvändning vid materialtillverkningen. Belastning från trafik under användningsfasen inkluderas inte.



Figur 4.1: Livscykelns faser där mörkgrå faser inkluderas i Trafikverkets verktyg Klimatkalkyl (Toller och Norberg 2017).

I Klimatkalkyl 5.0 finns fyra olika ingångar till kalkylen (A-, B-, C- och D-ingång) där val av ingång är beroende av vilken data som finns att tillgå i det aktuella skedet. Vid användning av A-ingången baseras kalkylen på de så kallade typåtgärder som projektet innehåller. Med typåtgärd avses de anläggningsdelar som åtgärden är uppbyggd av, till exempel kvadratmeter bro, kilometer tunnel, kilometer dubbelspår eller liknande. Ingång B utgör detaljerad information om projektets byggdelar eller material- och energiresurser. Med byggdel menas typåtgärdens delkomponenter vilka vidare omfattar material och/eller arbetsmoment (energiresurs). Då varierad detaljeringsgrad finns för projektet används istället ingång C. Denna ingång accepterar olika detaljeringsgrader av indata och möjlighet finns att använda typåtgärder så väl som byggdelar. Ingång D används vid upprättande av klimatkalkyl för baskontrakt för underhåll av väg och baseras på ingående underhållsåtgärder.

Klimatkalkyls beräkningsmetodik går ut på att emissionsfaktorer för olika typåtgärder, byggdelar och material- och energiresurser multipliceras med resursanvändandet. De emissionsfaktorer som används är av Trafikverket beslutade effektsamband och presenteras i Bilaga 1, Kapitel 7 i *Effektkatalogen "Bygg om eller bygg nytt"* av Trafikverket (2016b). Dessa bedöms enligt Toller och Norberg (2017) överlag vara representativa för svenska förhållande och normala resurser. Däremot anses känsligheten hos dessa värden vara stor. Ett konservativt förhållningssätt till utsläpp har varit målsättningen vid val av emissionsfaktorer. Resursschabloner används för att enkelt kunna uppskatta resursmängderna som ingår i ett objekt eller en åtgärd i de skeden då dessa är okända. Resursschablonerna är baserade på tidigare anläggningskalkyler och miljövarudeklarationer, eller specifika produktblad. För typåtgärder baseras resursschablonerna på ett antal projekt som förmodas vara representativa för Trafikverkets projektportfölj som helhet. Det anses av Toller och Norberg (2017) finnas osäkerheter kring dessa resursschabloner och huruvida de är baserade på ett representativt urval. Den största osäkerheten och felkällan anses däremot vara indata till modellen.

4.2 Trafikverkets klimatkrav enligt TDOK 2015:0480

Som tidigare nämnts ställer Trafikverket klimatkrav på investerings-, underhålls- och reinvesteringsprojekt samt vid upphandling av tekniskt godkänt järnvägsmaterial. Dessa klimatkrav beskrivs i Trafikverkets riktlinje TDOK 2015:0480. Klimatkraven ställs vid planläggning och byggskede och är beroende av investeringskostnaden.

4.2.1 Investeringsåtgärder \geq 50 miljoner kronor

I samband med planläggning av investeringsåtgärder om minst 50 miljoner kronor tas ett utgångsunderlag i bland annat Klimatkalkyl fram. Denna initiala beräkning för investeringsåtgärdens klimatbelastning och energianvändning är sedan referenspunkt framöver i åtgärdens senare skeden. Vid beräkning i Klimatkalkyl fås en klimatbelastning och energiåtgång uttryckt i 2015 års värde. Detta är av intresse då just 2015 års utsläppsvärde är, som tidigare nämnt, referenspunkten för Trafikverkets övergripande mål. Utifrån denna initiala beräkning i Klimatkalkyl kan en jämförelse göras av de effekter för de klimatomfattiga åtgärder konsulter och entreprenörer arbetar fram i senare skeden av projektet. På så vis kan det bedömas om Trafikverkets ställda reduktionskrav för klimatbelastning och energianvändning för investeringsåtgärden har uppfyllts eller ej. Vidare ska det vid planläggningen lyftas fram de mest betydande klimateffekterna för investeringsåtgärden tillsammans med åtgärdsförslag för minskad klimatbelastning och energianvändning. Som underlag för indikativa reduktionskrav för investeringsåtgärden används reduktionspotentialer för olika typåtgärder. För typåtgärden bro är denna reduktionspotential 17 % vid slutförande 2020-2024 och 30 % vid slutförande 2024-2029 jämfört med 2015 års värde.

Beroende på vilken entreprenadform som därefter väljs, utförande- eller totalentreprenad, finns olika direktiv i TDOK 2015:0480. Då utförandeentreprenad väljs används tidigare framtagna reduktionskrav som direkta krav vid upphandling av konsult för framtagning av förfrågningsunderlag inför utförandeentreprenad. Anlitad konsult för att ta fram detta förfrågningsunderlag ska sedan med utgångspunkt i klimatkalkylen redogöra för åtgärdsförslag som minst motsvarar reduktionskraven framtagna i planläggningsskedet. Dessa ställs sedan som krav då utförandeentreprenaden ska upphandlas. Före kontraktet för utförandeentreprenad sedan fastställs ska den faktiska klimatpåverkan för investeringsåtgärden samt effekt av genomförda klimatomfattiga åtgärder vara redovisade. Denna redovisning ska genomföras i Trafikverkets Klimatkalkyl enligt riktlinjen TDOK 2015:0007. Inför upphandlingen ska Trafikverket även fastställa nivåer för bonus och vite.

Då totalentreprenad istället väljs för investeringsåtgärden blir reduktionskraven framtagna i planläggningsskedet genomförandekrav vid upphandling av totalentreprenad. Entreprenören ska även för denna entreprenadform redogöra för faktisk klimatpåverkan och effekter för klimatomfattiga åtgärder för investeringsåtgärden. Denna redogörelse ska även då göras i Klimatkalkyl enligt riktlinjen TDOK 2015:0007. Trafikverket ska också fastställa nivåer för bonus och vite innan avtal inleds.

Då projektspecifika resursrelaterade emissionsfaktorer används i Klimatkalkyl ska dessa presenteras och kunna verifieras med miljövarudeklaration enligt EN 15804 eller motsvarande som godkänt av Trafikverket. Detta gäller oavsett vilken entreprenadform som används. Vid projektspecifika emissionsfaktorer ska miljövarudeklaration alltid kunna presenteras för armeringsstål, konstruktionsstål (väg- och broräcken inklusive vajerräcken, pålar och spont samt rostfria konstruktionsprodukter) samt för cement eller betong. Entreprenören ska även genom fakturaunderlag kunna redogöra för att material endast tagits från de redovisade leverantörerna. Krav ställs även för drivmedel vid upphandling inför utförandeentreprenad.

4.2.2 Investeringsåtgärder $<$ 50 miljoner kronor

En viss skillnad i klimatkraven för projekt under 50 miljoner kronor finns gentemot projekt om minst 50 miljoner kronor, men ingen skillnad görs beroende på vald entreprenadform.

Det ställs krav på att det vid planläggningsskedet redovisas de mest betydande klimataspekterna samt att minst två genomförbara åtgärdsförslag med stor besparingspotential tas fram. Även nyttan för dessa åtgärdsförslag ska beskrivas.

Vid upphandling av entreprenad ställs specifika krav på emissionsfaktorer för armeringsstål, konstruktionsstål (väg- och broräcken inklusive vajerräcken, pålar och spont samt rostfria konstruktionsprodukter), cement eller betong samt drivmedel till fordon och arbetsmaskiner i storstadsregionerna, se Tabell 4.1. I slutdokumentet ska entreprenören redovisa att dessa krav uppfyllts genom att sammanställa miljövarudeklarationer för valda materialleverantörer. Det ska vid anmodan kunna redovisas genom fakturaunderlag att dessa angivna leverantörer med tillhörande miljövarudeklaration faktiskt använts i utförandet. I slutdokumentationen ska det även göras en förteckning över använda mängder och kvaliteter av el och drivmedel enligt ett fastställt formulär från Trafikverket. Även här ska kvitton och fakturaunderlag kunna tillhandahållas vid anmodan.

Tabell 4.1: Trafikverkets klimatkrav enligt TDOK 2015:0480 på material och drivmedel som används i investerings- och reinvesteringsåtgärder < 50 miljoner kronor samt underhållsrenoveringar.

	Planerat år för slutförande av entreprenad 2020-2024	Planerat år för slutförande av entreprenad 2025-2029
Armeringsstål vid tillverkning (A1-A3)	≤0,72 kg CO ₂ /kg stål	≤0,52 kg CO ₂ /kg stål
Konstruktionsstål vid tillverkning (A1-A3)	Krav på miljövarudeklaration typ III (EPD) för väg- och broräcken (inklusive vajerräcken), pålar och spont samt rostfria konstruktionsstålprodukter	Krav på miljövarudeklaration typ III (EPD) för allt konstruktionsstål
Cement/Betong (A1-A3)	≤0,70 kg CO ₂ /kg cement <i>alternativt</i> Entreprenören ska överlämna certifierade miljövarudeklarationer typ III (EPD) för den anläggningsbetong som använts inom entreprenaden. Minskning av klimatpåverkan från betongen med 25 % jämfört med utgångsvärde respektive för 2015 - hela bevisbördan hos betongtillverkare/entreprenör. Utgångsnivån för föreskriven betong ska utgå från exponeringsklass och hållfasthet, och den cementtyp som tillåts.	≤0,62 kg CO ₂ /kg cement <i>alternativt</i> Entreprenören ska överlämna certifierade miljövarudeklarationer typ III (EPD) för den anläggningsbetong som använts inom entreprenaden. Minskning av klimatpåverkan från betongen med 35 % jämfört med utgångsvärde respektive för 2015 - hela bevisbördan hos betongtillverkare/entreprenör. Utgångsnivån för föreskriven betong ska utgå från exponeringsklass och hållfasthet, och den cementtyp som tillåts.
Drivmedel till fordon och arbetsmaskiner i storstadsregionerna	Minst 20 % av den samlade energianvändningen, avseende fordon och arbetsmaskiner, ska bestå av el från förnybara energikällor och/eller hållbara höginblandade och hållbara rena biodrivmedel som inte omfattas av reduktionsplikt.	

4.2.3 Reinvesteringsåtgärder och underhållsrenovering

Vid reinvesteringsåtgärder under 50 miljoner kronor och underhållsrenovering (oavsett belopp och som ska genomföras från och med 2020 samt har upphandlats efter ikraftträdande av TDOK 2015:0480) tillämpas de klimatkrav som ställs vid upphandling av entreprenad för investeringsåtgärder under 50 miljoner kronor. För tillfället finns det inte några klimatkrav då reinvesteringsåtgärden är 50 miljoner kronor eller högre.

Kapitel 5

Analys av Vägporten - Klimatoptimerat förhållande

Potentialen för att reducera växthusgasutsläpp genom att optimera mängden material som används i ett broprojekt är enligt SBUF (2017) mellan 20-60 % i jämförelse med den utformning som ursprungligen valdes i studien. Dock får de i deras egen LCA-beräkning, där överbyggnaden i en av sex plattambroar studeras utifrån att öka mängden armering och minska mängden betong, att denna åtgärd har en potential att minska växthusgasutsläppen med 15%. I rapporten framhålls också flera faktorer som påverkar möjligheterna till optimering. Såväl avtals- och entreprenadsform för projektet, mängd resurser och tillgänglig tid som hur samverkan med olika aktörer vilka är delaktiga i utformningen sker påverkar och ger olika förutsättningar för konstruktiv optimering av mängder. Då det i rollen som brokonstruktör även redan ingår att optimera materialmängder, bland annat för att försöka minska kostnader, är det intressant att studera hur stor klimatmässig effekt denna åtgärd får för ett verkligt projekt byggt och projekterat av Skanska.

För att studera potentialen av denna åtgärd gällande global uppvärmningspotential kommer förhållandet mellan mängd betong och mängd armering i brobaneplattan för bron Vägporten att studeras. Detta kommer inte göras som en fullständig livscykelanalys utan endast för materialtillverkningsfasen (modul A1-A3), se Figur 3.2 sida 18, för de ingående materialen betong och armering.

Istället för att optimera mängden armering utifrån en låst konstruktionshöjd, som ofta är maximalt tillgängliga höjd (SBUF 2017), kommer brobaneplattans tvärsnittshöjd varieras varefter tillhörande mängd armering kommer att optimeras. Detta görs för fyra tvärsnitt utöver ordinarie tvärsnitt, se Tabell 5.1.

Tabell 5.1: Tvärsnittshöjd och volym för brobaneplattan i de fem tvärsnitt som väljs att studeras.

Beteckning	Ner 0.2	Ner 0.1	Ordinarie	Upp 0.1	Upp 0.2
Tvärsnittshöjd [m]	0.5 - 0.711	0.6 - 0.811	0.7 - 0.911	0.8 - 1.011	0.9 - 1.111
Volym [m ³]	89	104	118	133	148

5.1 Utsläppsförhållande för armerad betong

För att uttrycka hur den globala uppvärmningspotentialen varierar för en kubikmeter betong med varierande mängd armering kommer detta förhållande tas fram. Potentiella växthusgasutsläppen för en kubikmeter armerad betong, y_{ab} , med varierande mängd armering, uttrycks genom att addera utsläppen från massa armering till utsläppen från massa betong, se Ekvation 5.1

$$e_a m_a + e_b m_b = y_{ab} \quad (5.1)$$

där e_a är emissionsfaktor för armering [kg CO₂-ekv./enhet], m_a är massa armering [kg], e_b är emissionsfaktor för betong [kg CO₂-ekv./enhet] och m_b är massa betong [kg]. För att uttrycka detta per kubikmeter

armerad betong, V_{ab} , där följande förhållande gäller

$$V_a + V_b = V_{ab} \quad (5.2)$$

och

$$m_a + m_b = m_{ab} \quad (5.3)$$

där V_a är volym armering [m^3], V_b är volym betong [m^3] och m_{ab} är massa armerad betong [kg], divideras utsläppen i Ekvation 5.1 med volymen V_{ab} enligt följande

$$\frac{e_a m_a}{V_{ab}} + \frac{e_b m_b}{V_{ab}} = \frac{y_{ab}}{V_{ab}} \quad (5.4)$$

Genom att omvandla massa betong, m_b , med hjälp av följande uttryck

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5.5)$$

kan Ekvation 5.4 uttryckas enligt följande

$$\frac{e_a m_a}{V_{ab}} + \frac{e_b \rho_b V_b}{V_{ab}} = \frac{y_{ab}}{V_{ab}} \quad (5.6)$$

där ρ_b är densiteten för betong [2400 kg/m^3]. Vidare uttrycks volym betong, V_b , i volym armering, V_a , enligt Ekvation 5.2 till följande uttryck

$$\frac{e_a m_a}{V_{ab}} + \frac{e_b \rho_b (V_{ab} - V_a)}{V_{ab}} = \frac{y_{ab}}{V_{ab}} \quad (5.7)$$

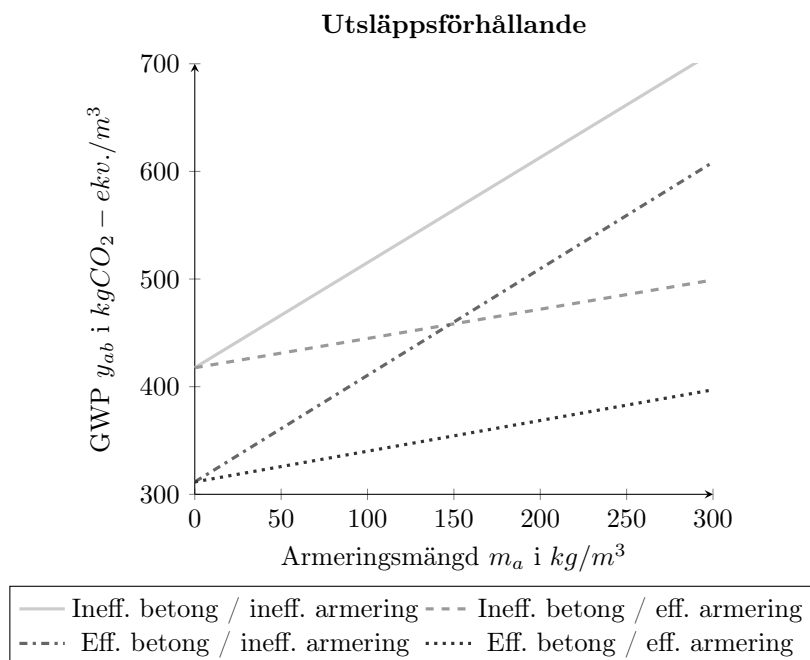
Slutligen kan volym armering, V_a , omvandlas med hjälp av Ekvation 5.5 och V_{ab} uttryckas för 1 m^3 så att uttrycket i Ekvation 5.7 blir enligt följande, där ρ_a är densiteten för stål [7850 kg/m^3].

$$e_a m_a + e_b \rho_b \left(1 - \frac{m_a}{\rho_a}\right) = y_{ab} \quad (5.8)$$

Beräkning av global uppvärmningspotential för en kubikmeter armerad betong, y_{ab} , görs för fyra olika produkter av betong och armering: en med klimateffektiv betong och armering, en med klimateffektiv betong och klimatineffektiv armering, en med klimatineffektiv betong och klimateffektiv armering och en med klimatineffektiv betong och armering. I Tabell 5.2 nedan ses källor till använd emissionsdata för de olika betong- och armeringsprodukterna. Utsläppsförhållandena för en kubikmeter armerad betong för de fyra olika sammansatta produkterna ses i Figur 5.1 nedan. För använda emissionsvärden gäller att den klimatineffektiva betongen är cirka 34 % större än den klimateffektiva betongen. För armeringen är den klimatineffektiva cirka 217 % större än det klimateffektiva värdet.

Tabell 5.2: Källor till använd emissionsdata för Vägporten.

		Källa för emissionsdata
Betong	<i>Klimateffektiv</i>	EPD: Skanska Asphalt och Betong (2017)
	<i>Klimatineffektiv</i>	IVL: Anläggningsbetong C35/45
Armering	<i>Klimateffektiv</i>	EPD: Norsk Stål AS (2015)
	<i>Klimatineffektiv</i>	Trafikverket Effektsamband: Armeringsstänger, stål (2016b)



Figur 5.1: Utsläppsförhållande för de fyra olika sammansättningarna av armerad betong med varierad armeringsmängd

Utan att ta hänsyn till hur kapaciteten ur bärighetssynpunkt för en kubikmeter armerad betong med ökad armeringsmängd förändras ökar alltså den globala uppvärmningspotentialen med ökad mängd armering vilket ses i Figur 5.1. Med valda emissionsdata indikeras också potentialen upp till en armeringsmängd om 150 kg/m³ vara lägre för en sammansättning med klimateffektiv betong och klimatineffektiv armering än med en klimatineffektiv betong och en klimateffektiv armering. Efter 150 kg/m³ indikeras det motsatta gälla.

5.2 Armeringsbehov

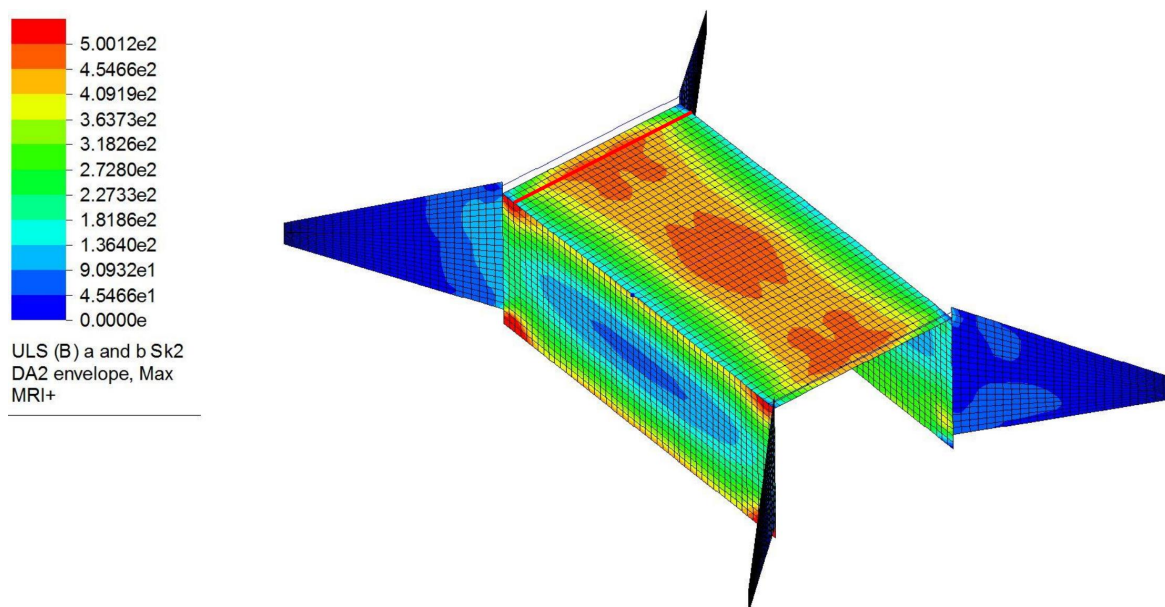
För att bestämma och optimera armeringsmängden i brobanepattan beräknas först snittkrafter för respektive tvärsnitt, beskrivna ovan i Tabell 5.1. Beräkningar görs enligt följande standarder: SS-EN 1990, SS-EN 1991 och SS-EN 1992 samt följande publikationer och litteratur: TRVFS 2011, TRVR Bro 11, TRVK Bro 11 och AMA Anläggning 13. Eftersom bron har en teoretisk spännvidd som är mindre än 15 meter tillämpas säkerhetsklass 2. De laster som beaktas är följande: egentygnd (betong, fyllning, beläggning och jord), trafiklast, utmattninglast, bromskraft, sidokraft, överlast, temperaturlast, vindlast och olyckslast. Framtagningen av dessa lastvärden utfördes i ett tidigare skede av Skanska vid projekteringen av Vägporten.

Beräkningar görs i Brigade Standard vilket är ett program som använder sig av Finita Elementmetoden (FEM) och är speciellt anpassat för vanligt förekommande broar (Scanscot u.å.). En befintlig beräkningsmodell, som i ett tidigare skede tagits fram av Skanska vid projekteringen av bron, används vid beräkning av snittkrafter för de olika tvärsnitten. Beräkningarna i detta avsnitt bygger således på tidigare antaganden och beräkningar utförda av Skanska. Utifrån framtagna snittkrafter beräknas armeringsbehovet i brons längsgående och tvärgående riktning fram.

5.2.1 Längsgående underkantsarmering

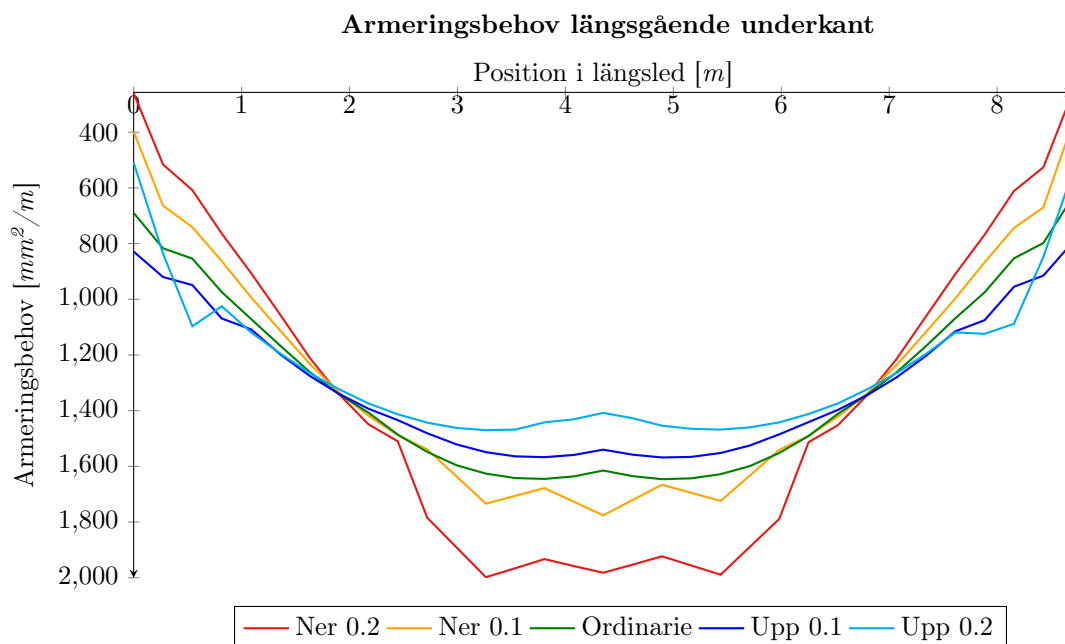
Armeringen i underkant i brons längsriktning bestäms med avseende på de moment och tillhörande normalkrafter som erhålls från Brigade gällande såväl brott- och bruksgränstillstånd som utmattning. I Figur 5.2 ses momentfördelningen för beräkningsmodellen enligt brottgränstillståndet för ordinarie tvärsnittshöjd. Dimensionerande snitt för såväl brottgräns-, bruksgräns- och utmattningstillståndet fås

vid kanterna av brons kortsidor och är markerat med rött streck i Figur 5.2. Att dimensionerande snitt fås längs med brons kortsidor beror av att momentfördelningen i fältmitt är i samma storleksordning över hela brons bredd och att brobanans tvärsnitt i kanterna är tunnast. För brobanans tvärsnittsvariation i tvärlöd se Avsnitt 1.4.



Figur 5.2: Momentfördelning [kNm/m] i brottgränstillståndet med markering av dimensionerande snitt för **längsgående underkantsarmering**.

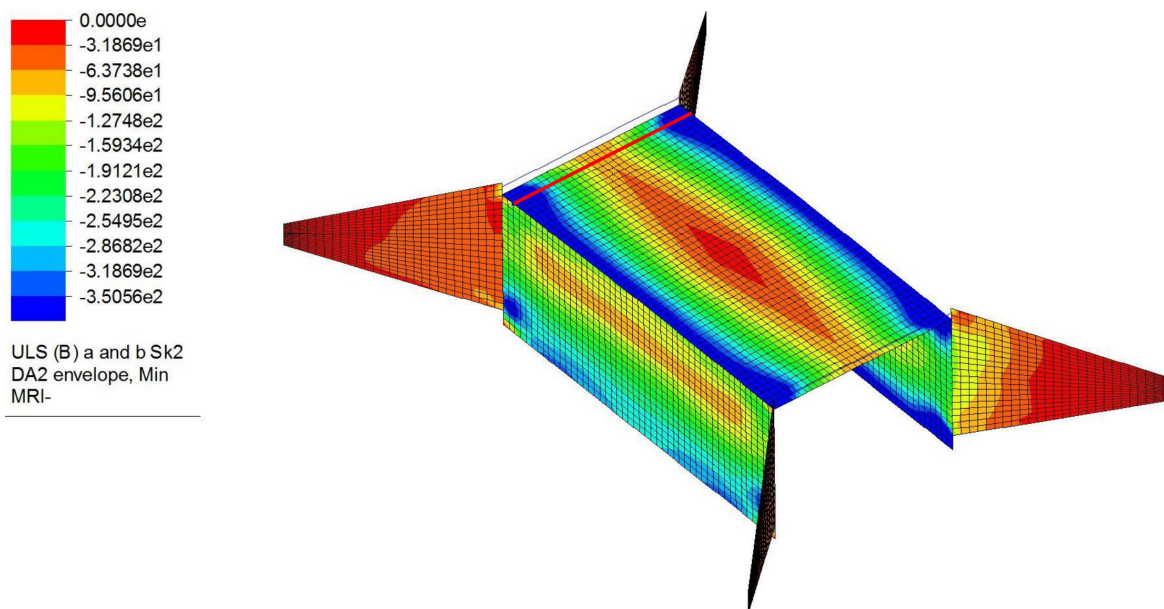
Efter utförda beräkningar fås armeringsbehov med hänsyn till brott- och bruksgränstillstånd och utmattning för respektive tvärsnitt. Detta kan ses i Figur 5.3. För de två tunnare tvärsnitten, *Ner 0,2* respektive *Ner 0,1*, är utmattning dimensionerande vid bromitt varpå ett ökat armeringsbehov fås här för dessa tvärsnitt.



Figur 5.3: Armeringsbehov i **underkant längsgående** för dimensionerande snitt och respektive tvärsnitt.

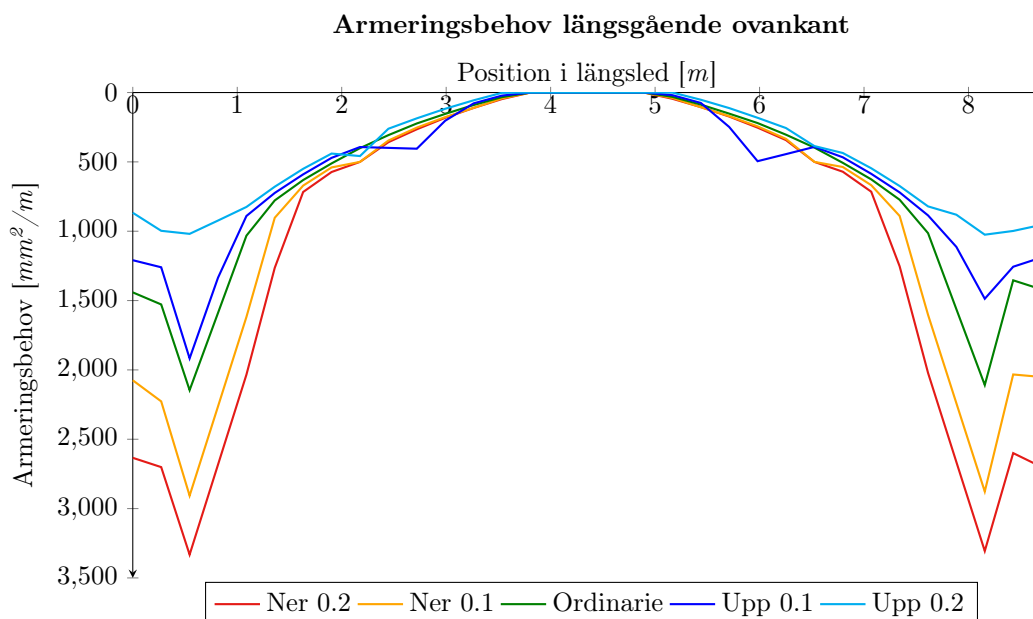
5.2.2 Längsgående ovankantsarmering

Armeringen i ovankant i brons längsriktning bestäms likt för armeringen i underkant med avseende på de moment och tillhörande normalkrafter gällande såväl brott- och bruksgränstillstånd som utmattning. Det dimensionerande snittet fås längs med kanten av brons kortsida då tvärsnittet här är som tunnast och momentet som störst för såväl brottgräns-, bruksgräns- och utmattningstillståndet. I Figur 5.4 ses momentfördelningen för beräkningsmodellen enligt brottgränstillståndet för ordinarie tvärsnittshöjd med dimensionerande snitt markerat med rött streck.



Figur 5.4: Momentfördelning [kNm/m] i brottgränstillståndet med markering av dimensionerande snitt för längsgående ovankantsarmering.

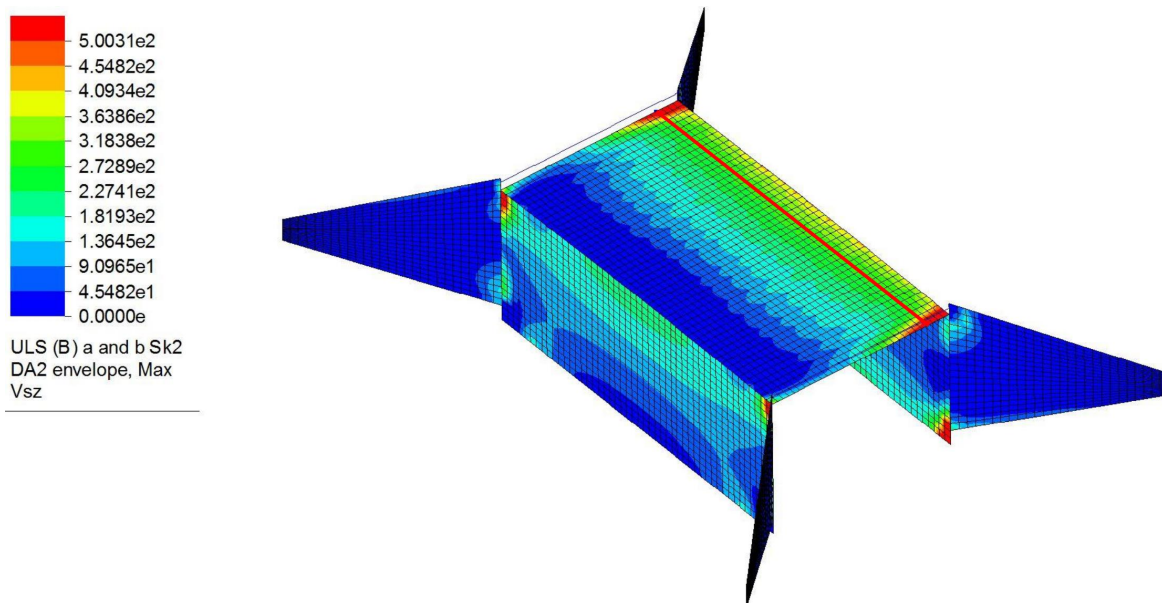
Efter utförda beräkningar fås armeringsbehov med hänsyn till brott- och bruksgränstillstånd och utmattning för respektive tvärsnitt. Detta kan ses i Figur 5.7.



Figur 5.5: Armeringsbehov i ovankant längsgående för dimensionerande snitt och respektive tvärsnitt.

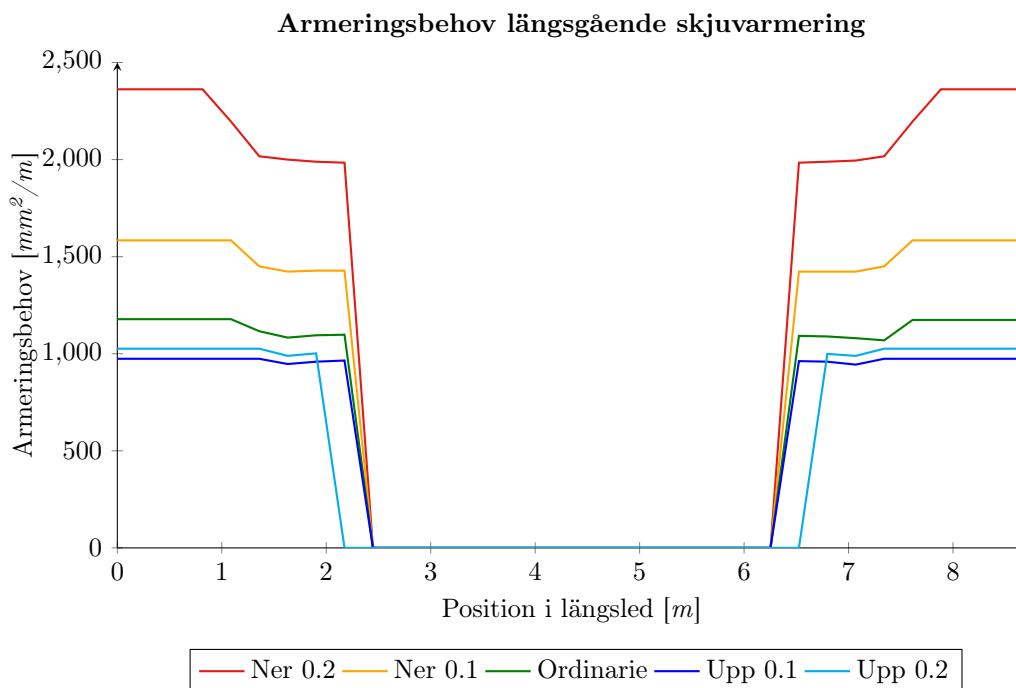
5.2.3 Längsgående skjuvarmering

Skjuvarmeringen i brons längsriktning bestäms med avseende på de tvärkrafter som uppstår gällande såväl brott- och bruksgränstillstånd som utmattning. I Figur 5.6 ses tvärkraftsfördelningen i brottgränstillståndet för ordinarie tvärsnittshöjd med markering av dimensionerande snitt med rött streck. Dimensionerande snitt fås längs med kanten av brons långsida där störst tvärkraft inträffar.



Figur 5.6: Tvärkraftsfördelning [kN/m] i brottgränstillståndet med markering av dimensionerande snitt för **längsgående skjuvarmering**.

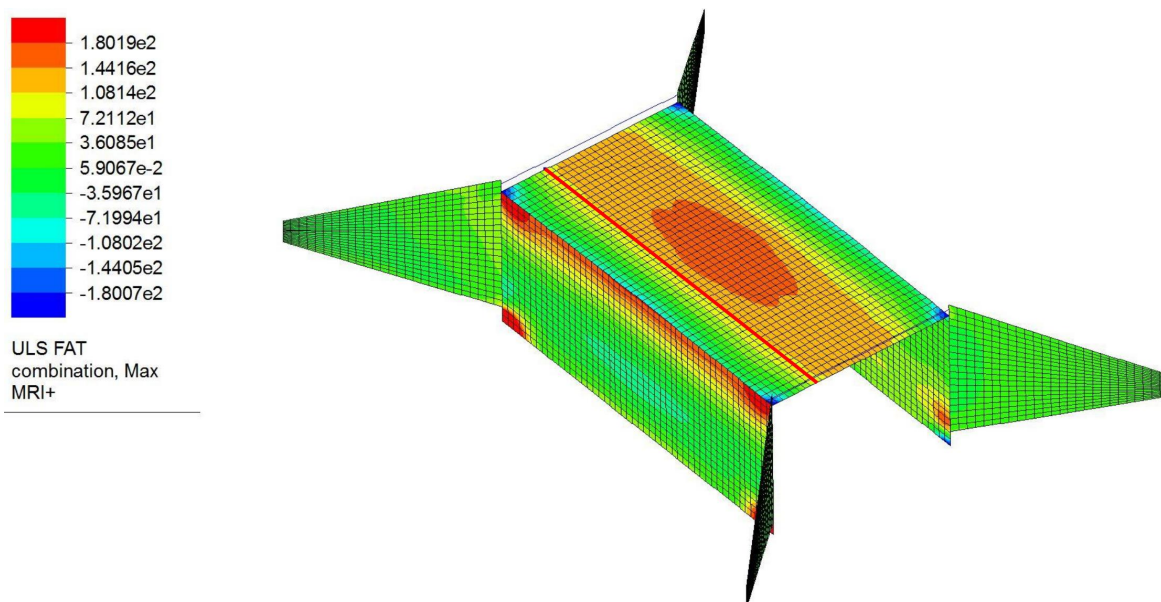
Efter utförda beräkningar fås armeringsbehov med hänsyn till brott- och bruksgränstillstånd och utmattning för respektive tvärsnitt. Detta kan ses i Figur 5.7.



Figur 5.7: Armeringsbehov **skjuvarmering längsgående** för dimensionerande snitt och respektive tvärsnitt.

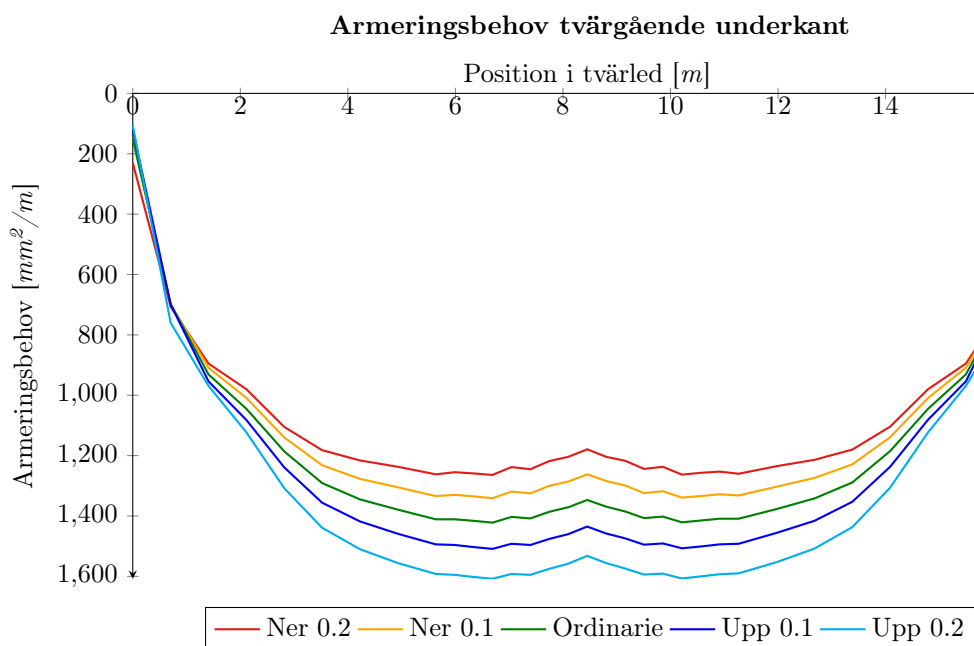
5.2.4 Tvärgående underkantsarmering

Armeringen i underkant i brons tvärriktning bestäms, liksom armeringen i brons längsriktning, med avseende på de snittkrafter av moment och tillhörande normalkrafter. I Figur 5.8 ses momentfördelningen för beräkningsmodellen enligt utmattningstillståndet för ordinarie tvärsnittshöjd. Dimensionerande snitt fås för brott-, bruksgräns- och utmattningstillståndet vid en sträcka av cirka en fjärdedel av spännvidden och är markerat med rött streck i Figur 5.8. Att dimensionerande snitt fås vid denna linje beror på att de till momentet tillhörande normalkrafterna här är som störst samtidigt som momentet är stort.



Figur 5.8: Momentfördelning [kNm/m] i brottgränstillståndet med markering av dimensionerande snitt för tvärgående underkantsarmering.

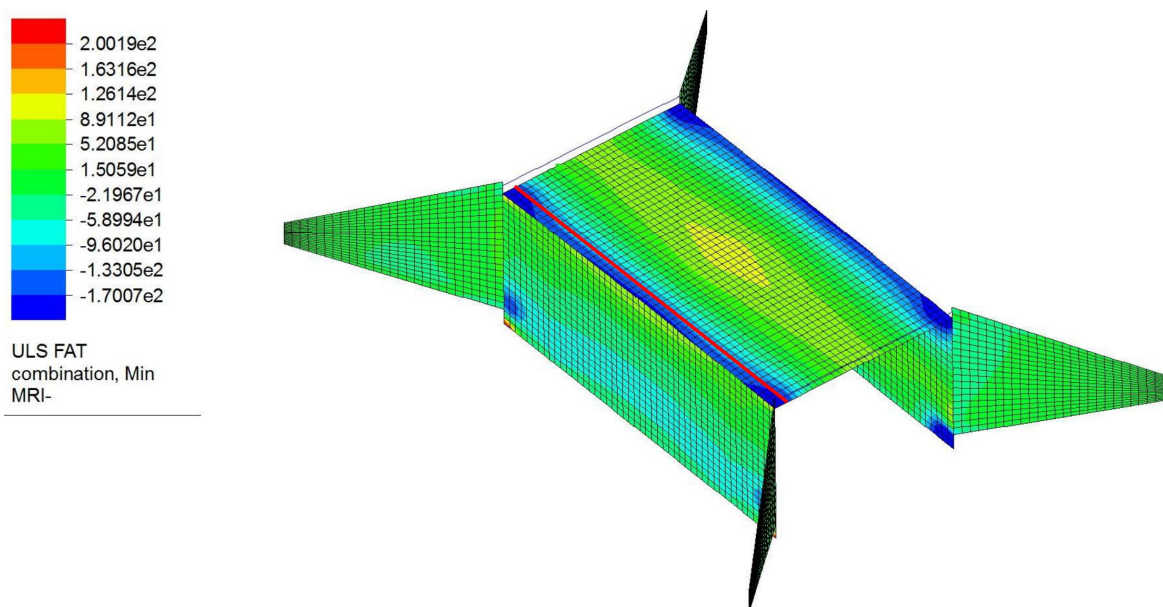
Efter utförda beräkningar fås armeringsbehov med hänsyn till brott- och bruksgränstillstånd och utmattning för respektive tvärsnitt. Detta kan ses i Figur 5.9.



Figur 5.9: Armeringsbehov i **underkant tvärgående** för dimensionerande snitt och respektive tvärsnitt.

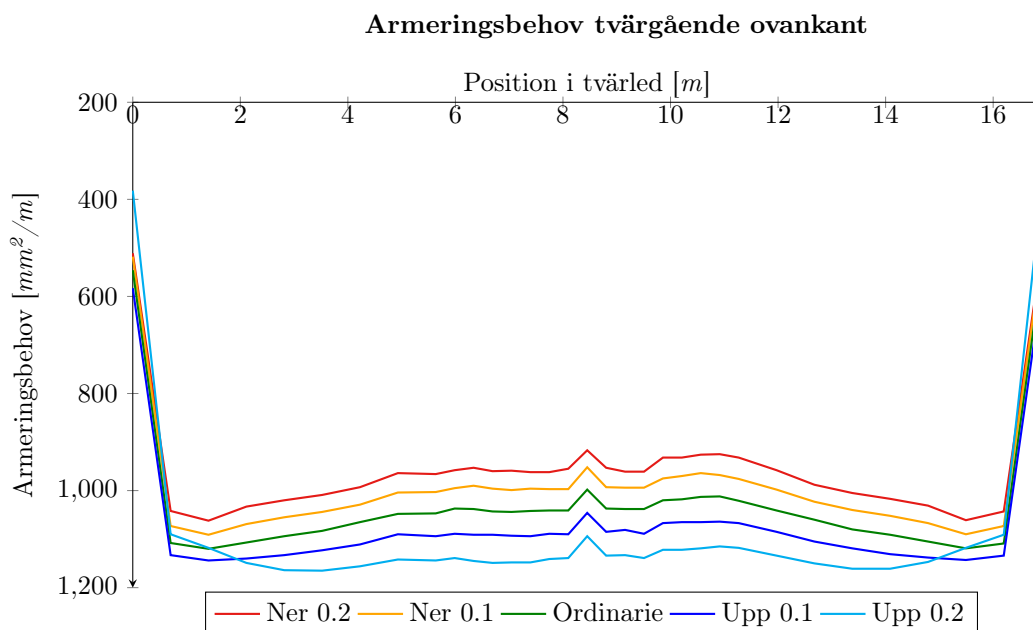
5.2.5 Tvärgående ovankantsarmering

Armeringen i ovankant i brons tvärriktning bestäms likt armeringen i brons längsriktning med avseende på de moment och tillhörande normalkrafter. I Figur 5.10 ses momentfördelningen för beräkningsmodellen enligt utmattningstillståndet för ordinarie tvärsnittshöjd. Dimensionerande snitt fås för brott-, bruksgräns- och utmattningstillståndet längs kanten av långsidan och är markerat med rött streck i Figur 5.10.



Figur 5.10: Momentfördelning [kNm/m] i brottgränstillståndet med markering av dimensionerande snitt för tvärgående ovankantsarmering.

Efter utförda beräkningar fås armeringsbehov med hänsyn till brott- och bruksgränstillstånd och utmattning för respektive tvärsnitt. Detta kan ses i Figur 5.11.



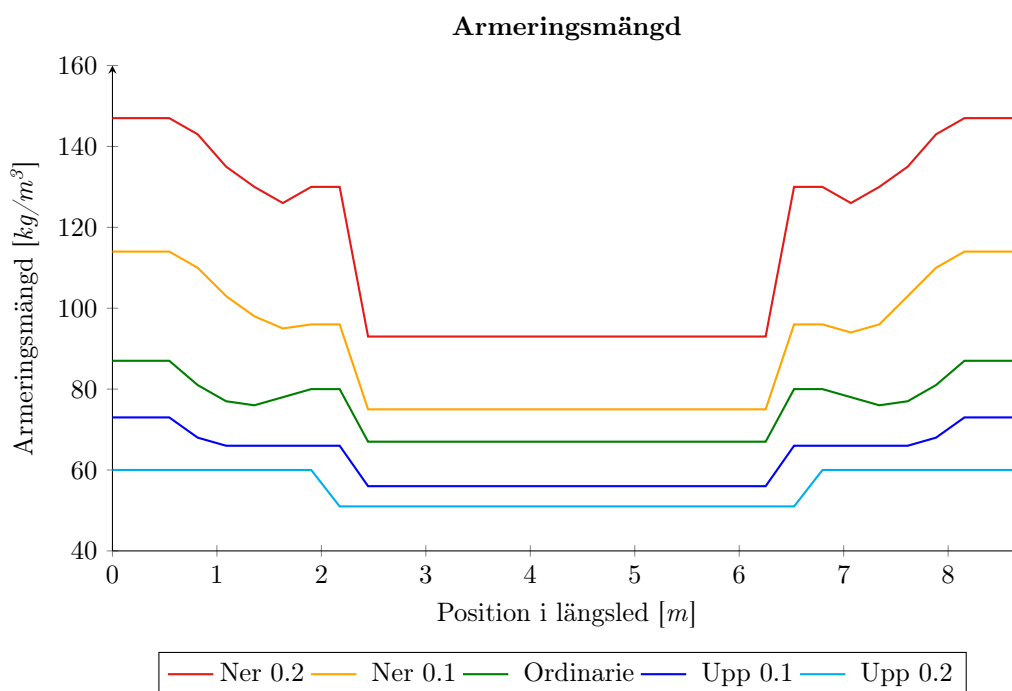
Figur 5.11: Armeringsbehov i ovankant tvärgående för dimensionerande snitt och respektive tvärsnitt.

5.2.6 Tvärgående skjuvarmering

Det erfordras ingen skjuvarmering i brons tvärgående riktning för något av tvärsnitten.

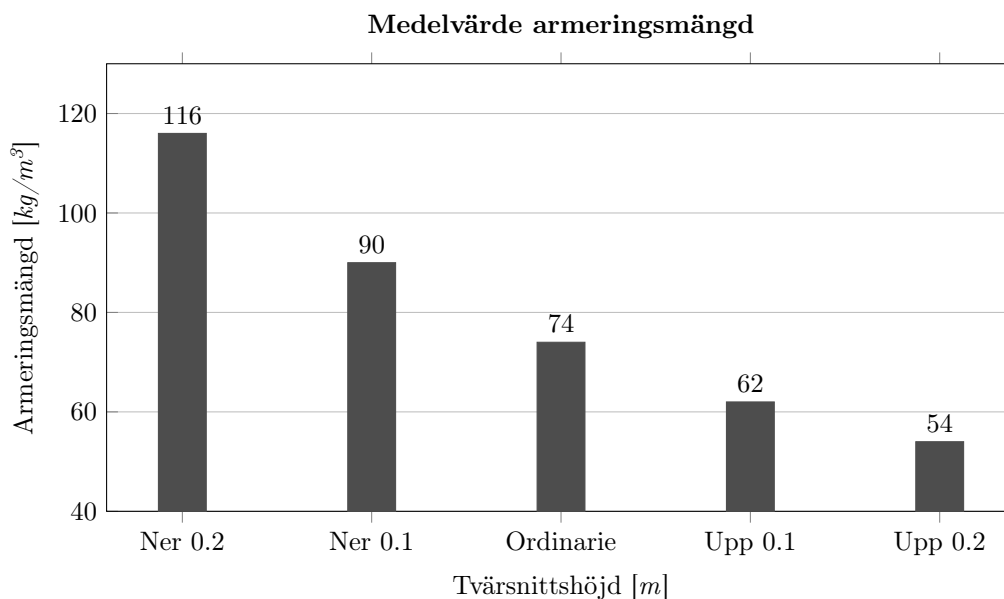
5.3 Armeringsmängd

Utifrån armeringsbehovet i både längsled och tvärlid tas erforderlig armeringsmängd i mm^2/m fram gällande såväl underkant, ovkant som skjuvning. Resulterande armeringsmängd för respektive tvärsnitt summeras sedan ihop och räknas om till enheten kg/m^3 . Vid beräkning av armeringsmängder för respektive tvärsnitt har skarvlängder och bockningslängder inte tagits hänsyn till. För en meter bred strimla i mitten av bron i tvärlid fås armeringsmängd per kubikmeter för respektive tvärsnitt enligt Figur 5.13.



Figur 5.12: Armeringsmängd för en meter bred strimla i bromitt i tvärlid.

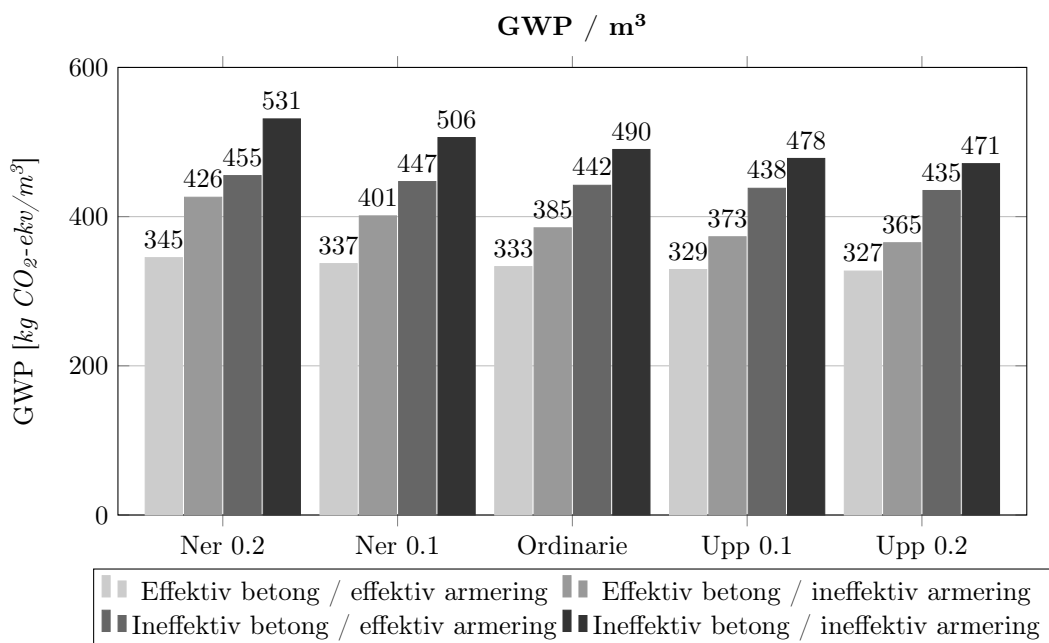
Det totala medelvärdet av armeringsmängden i hela brobaneplattan för respektive tvärsnitt tas sedan fram och kan ses i Figur 5.13.



Figur 5.13: Medelvärdet av armeringsmängden i brobaneplattan för respektive tvärsnitt.

5.4 Global uppvärmningspotential

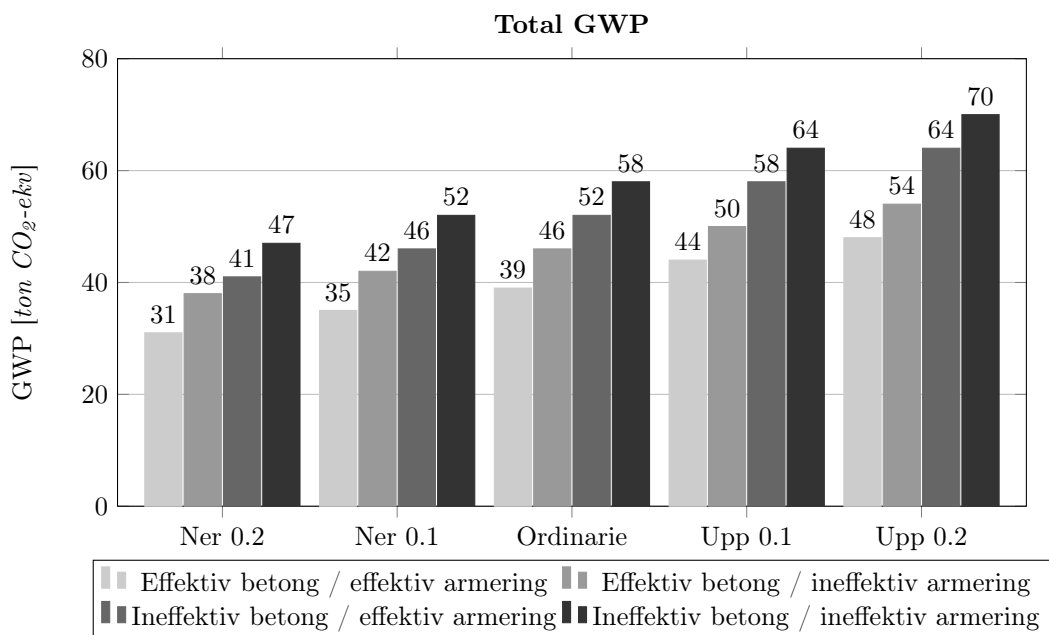
Vidare beräknas den globala uppvärmningspotentialen i $kg\ CO_2$ -ekv. per kubikmeter armerad betong för respektive tvärsnitt med hjälp av utsläppsförhållandet, framtaget i Avsnitt 5.1 sida 27, för de fyra olika sammansättningarna av armerad betong, se Tabell 5.2 för vald emissionsdata. Utsläppen ses i Figur 5.14 nedan.



Figur 5.14: GWP per kubikmeter armerad betong för respektive tvärsnitt.

Ur Figur 5.14 utläses att de potentiella utsläppen per kubikmeter antyds vara störst för det tunnaste tvärsnittet med mest armering och minst för det tjockaste tvärsnittet med minst armering, oavsett sammansättning av betong och armering. Vidare ses även att utsläppen antyds vara lägre för en armerad betong med klimateffektiv betong och klimatineffektiv armering jämfört med en armerad betong med

klimateffektiv betong och klimateffektiv armering. Total global uppvärmningspotential för hela brobaneplattans volym för respektive tvärsnitt kan slutligen beräknas och sammanställas nedan i Figur 5.15. Se Tabell 5.1 för volym för respektive tvärsnitt.



Figur 5.15: Total GWP för brobaneplattan i Vägporten för respektive tvärsnitt.

I Tabell 5.3 sammanställs utsläppen från Figur 5.14 och Figur 5.15. Total global uppvärmningspotential för hela brobaneplattan antyds alltså vara lägst för det tunnaste tvärsnittet med mest armering och högst för det tjockaste tvärsnittet med minst armering. Detta gäller oavsett val av sammansättning av betong och armering även om det endast skiljer 1 ton CO₂-ekv. mellan tvärsnittet *Ner 0.2* med klimatineffektiv betong och armering och *Upp 0.2* med klimateffektiv betong och armering. Differensen i Tabell 5.3 visar på skillnaden i totala utsläpp mellan *Ordinarie* och resterande tvärsnitt. När hänsyn tas till bärförmåga antyds ett tvärsnitt med mer armering och mindre betong att ge lägre total global uppvärmningspotential än ett tvärsnitt med mindre armering och mer betong.

Tabell 5.3: Sammanställning av GWP i ton CO₂-ekv. för studien av variation av tvärsnittshöjd för Vägporten.

	Ner 0.2	Ner 0.1	Ordinarie	Upp 0.1	Upp 0.2
Eff. betong / eff. armering					
Utsläpp/m ³	0.345	0.337	0.333	0.329	0.327
Totalt utsläpp	31	35	39	44	48
Differens	-22 %	-11 %	0 %	11 %	23 %
Eff. betong / ineff. armering					
Utsläpp/m ³	0.426	0.401	0.385	0.373	0.365
Totalt utsläpp	38	42	46	50	54
Differens	-17 %	-9 %	0 %	9 %	18 %
Ineff. betong / eff. armering					
Utsläpp/m ³	0.455	0.447	0.442	0.438	0.435
Totalt utsläpp	41	46	52	58	64
Differens	-23 %	-11 %	0 %	11 %	23 %
Ineff. betong / ineff. armering					
Utsläpp/m ³	0.531	0.506	0.490	0.478	0.471
Totalt utsläpp	47	52	58	64	70
Differens	-19 %	-10 %	0 %	10 %	20 %

Kapitel 6

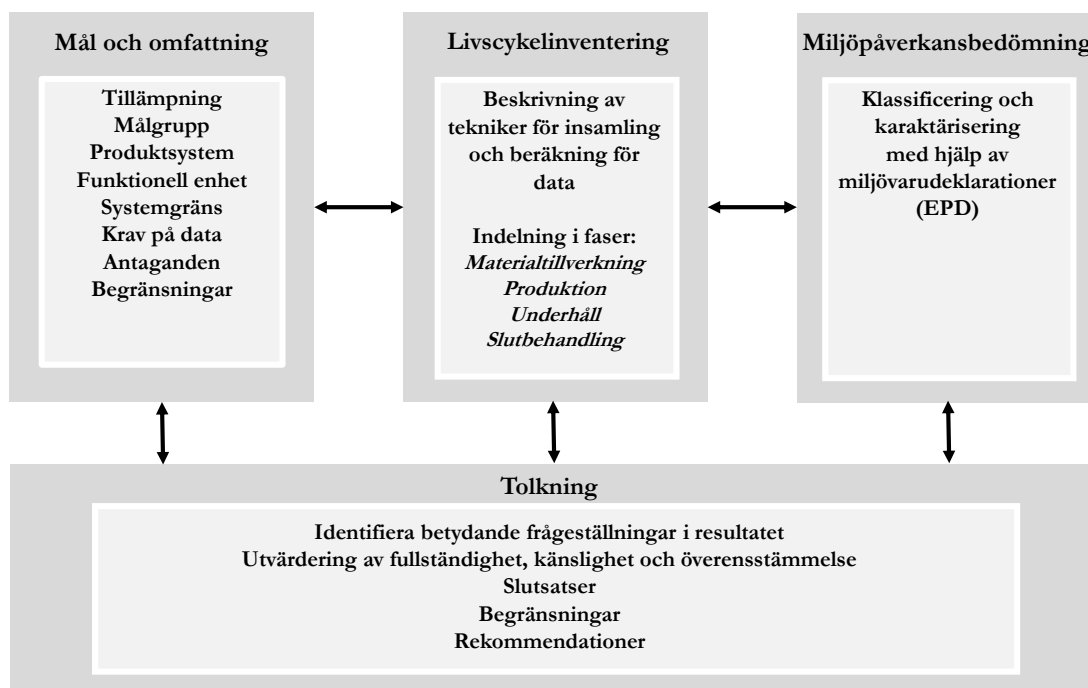
LCA av bron över Hovaån - Val av material

Bron över Hovaån utfördes som en betongbalkbro i två fack där det även arbetades fram ett förslag på ett samverkansalternativ i stål och betong. Båda dessa typer av utförande beskrevs i Avsnitt 1.4 sida 3. Utöver en jämförelse mellan dessa två olika utförande av bron över Hovaån önskas det även studeras vilka effekter i form av växthusgasutsläpp som fås för åtgärden *Val av material* för respektive broutförande. Dessa effekter presenteras som ett intervall för att påvisa eventuell förbättringsmöjlighet men även för att påvisa vilka effekter som fås vid val av sämre alternativ med avseende på global uppvärmningspotential. Effekter från följande åtgärder studeras och jämförs med grundalternativet (nollalternativet) för respektive brotyp:

- Val av betong
- Val av armering
- Val av konstruktionsstål
- Kombination av Val av betong, Val av armering och Val av konstruktionsstål

För respektive åtgärd ovan hålls övriga parametrar konstant vid beräkning av den effekt som erhålls för den aktuella åtgärden. Det vill säga att vid applicering av till exempel åtgärden Val av betong är det enbart de parametrar vilka är kopplade till just detta material som ändras, exempelvis emissionsvärde eller transport från tillverkare.

Studien görs genom en livscykelanalys enligt standarden ISO 14044:2006 vilken beskrevs i Avsnitt 3.2 sida 16. I Figur 6.1 nedan redovisas den iterativa arbetsgång som används under studiens gång. I denna studie används bland annat miljövarudeklarationer (EPD) för att effektivisera processen. I de EPD:er som använts har steg så som klassificering och karaktärisering utförts varpå resultatet av dessa redovisas för olika miljöpåverkanskategorier i deklARATIONEN. Det görs alltså inte någon direkt klassificering eller karaktärisering i denna studie, utan den görs indirekt genom de EPD:er och databaser som använts.



Figur 6.1: Iterativ arbetsgång för livscykeln.

6.1 Mål och omfattning

Definitionen för mål och omfattning ska vara tydlig. Dess utformning beskrivs i ISO 14044:2006 vilken beskrevs i Avsnitt 3.2.1 sida 16.

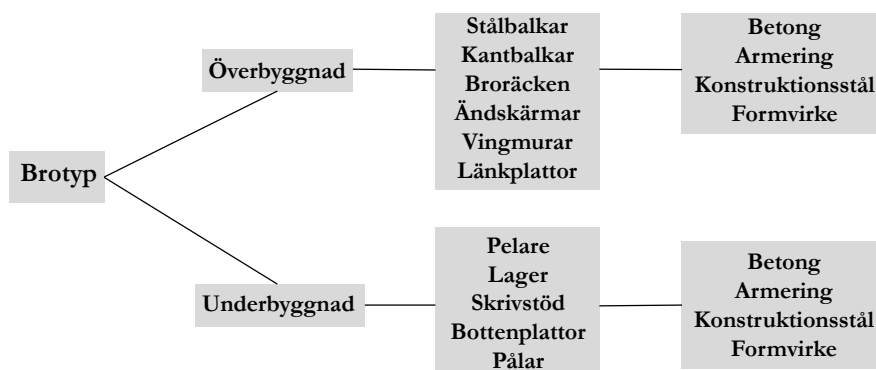
6.1.1 Mål

Målet med studien är att jämföra de två olika utförandealternativen av bron över Hovaån samt vilka miljömässiga effekter som fås vid olika materialåtgärder för de två alternativen. Detta i syfte att få indikationer kring hur olika beslut påverkar bronns klimateffekt i form av utsläpp av växthusgaser. Denna livscykelanalys och tillhörande resultat avses endast användas internt på Skanska med förhoppning att kunna användas som vägledning för deras konstruktörer. Resultatet kommer även presenteras vid redovisning av examensarbetet vid Lunds Tekniska Högskola i maj 2018 samt publiceras vid Lunds Universitet. Syftet med denna analys är alltså inte att resultatet ska kunna jämföras med projekt utanför Skanska.

6.1.2 Omfattning

Denna jämförande analys behandlar hela livscykeln för de två utförandealternativen och eventuell applicerad åtgärd. Bron är en del av en ny sträckning av E20 förbi Hova i Västra Götaland med referenshastighet 100 km/h och ÅDT 7490 med andelen 25 % tunga fordon (år 2020). Den funktionella enheten väljs till bronns totala beräknade utsläpp med teknisk livslängd 80 år och trafikbelastning enligt ovan.

Ambitionen för studien är att inkludera livscykeln för hela bron, från vagg till grav. Med uttrycket hela bron avses för Betongbalkbron pålar, bottenplattor, skivstöd, pelarstöd, plintar, lager, vingmur, ändskärm, länkplattor, brobaneplatta inklusive balkar och kantbalkar samt broräcken. För Samverkansalternativet avses med hela bron pålar, bottenplattor, frontmur, plintar, lager, grusskift, väggar, vingmurar, länkplattor, pelare, brobaneplatta, stålbalkar, kantbalkar och broräcken. Även markförberedande moment i form av schaktning tas med samt gjutform för båda alternativen och formställningen för Betongbalkbron. I studien inkluderas inte vägbeläggning, avvattningssystem eller eventuell belysning. En sammanställning över ingående komponenter redovisas även i Figur 6.2 nedan.



Figur 6.2: Studerade brokomponenter och ingående material.

För datainsamling ställs ett tillvägagångssätt upp samt krav gällande hur eventuell avsaknad av data ska hanteras. Vid insamling önskas i förstahand data direkt från leverantör, till exempel i form av miljövrudeklaration (EPD) för den aktuella produkten. Då sådan inte finns att tillgå används sekundärt data från Svenska Miljöinstitutets (IVL) miljödatabas eller effektsamband från Trafikverket. Finns heller inte data att finna på detta sätt görs, om möjligt, en egen bedömning kring vad som kan antas som rimlig indata för det aktuella fallet. Om sådan bedömning inte kan göras på goda grunder eftersöks data vidare i tidigare studier på ämnet där en koppling till bron över Hovaån anses rimlig. Om inget av tidigare handlingsätt resulterar i data som kan anses rimlig för bron över Hovaån väljs det att utelämna den aktuella komponenten.

För att definiera produktsystemet utgås det från ett systematiskt ramverk för livscykelanalys för järnvägsbroar framtaget av Du och Karoumi (2014). Enligt Du et al. (2014) kan detta ramverk även tillämpas för vägbroar. I detta ramverk rekommenderas att livscykelanalysen delas in i följande fyra faser (även presenterade under rubriken *Livscykelinventering* i Figur 6.1):

Materialtillverkningsfas

Materialtillverkningsfasen innefattar de delprocesser som krävs för att tillverka de ingående materialen i bron. Detta inkluderar utvinningsprocessen fram tills dess att materialet är redo att överlämnas till kund från materialtillverkaren för användning i produktion av bron. I denna studie används data från respektive tillverkare då sådan finns att tillgå. I de fall då sådan leverantördata inte har kunnat fås fram används istället livscykelinventeringsdata från IVL (Svenska Miljöinstitutet) eller från Trafikverkets effektsamband. Data hämtad från IVLs databas är EPD-baserad medelvärdesdata. Således fås därför inte nödvändigtvis en helt sanningsenlig data utan snarare en uppskattning av det aktuella materialet eller komponentens miljöpåverkan under denna fas.

Produktionsfas

Produktionsfasen inkluderar energiåtgång och emissioner vilka kan kopplas till själva produktionen av bron. I denna studie görs samma förenkling som i studien av Du et al. (2014) där energiåtgången för maskiner som används under produktionsfasen sätts till att konsumera 0,1 liter diesel per m³ förflyttat material på produktionsplatsen. Denna konsumtionsmängd är vidare baserat på en artikel av Hammer-vold et al. (2013). Detta görs då det inte finns dokumenterad data kring energiåtgång från den aktuella arbetsplatsen. Antaganden har gjorts för transportsträckor och tillhörande klimatbelastning för transport av material från leverantör till arbetsplatsen. I vissa fall har även antagande gjorts för geografisk produktions- och/eller lagerplats för materialet i fråga. Det har i studien inte inkluderats de utsläpp i produktionsfasen som kan kopplas till transport av arbetare eller drift av arbetsplatsen i form av vattenkonsumtion och dylikt.

Underhållsfas

Underhållsfasen inkluderar det underhåll som krävs för att bron ska vara bruklig under hela dess avsedda livslängd. I denna studie inkluderas endast reparation och utbyte av kantbalkar, reparation av brobanor samt utbyte av lager och broräcke. Ommålning och förbättring av korrosionsskyddet på stålbalkarna har övervägts att ta in. Det visade sig dock vid närmare efterforskning att denna underhållsposts belastning i form av utsläpp av växthusgaser understiger cut-off-kriteriet för miljörelevans som presenteras i slutet av detta avsnitt. Denna underhållspost tycks förr ha klimatbelastning på andra områden än just påverkan på växthuseffekten. I denna studie har frekvens- och omfattningsdata för underhållet hämtats från Safi (2013) där data är framtagen genom inventering av underhållsåtgärder registrerade i Trafikverkets databas BaTMan. Detta presenteras i Tabell 6.1 nedan. Du och Karoumi (2014) poängterar att underhållets omfattning och frekvens är beroende av budget, inspektionsfrekvens och nedbrytningstakt av materialet. Därmed varierar underhållsfasens utformning mellan enskilda fall och bedömningen av underhållsbehovet i denna studie är endast antaganden.

Transport av det ersättande materialet till arbetsplatsen inkluderas såväl som transport av uttjänt material till återvinningscentral. Det antas att avfallet lämnas till en närliggande återvinningscentral i Vara för vidare hantering och återvinning.

Tabell 6.1: Utvald underhållsdata för balkbroar (Safi 2013).

Åtgärd	Tid för åtgärd		Åtgärdsandel		
	Intervall	Specifikt år	%	av	Enhet
Reparation av kantbalkar		20	30	Kantbalkslängd	m
Reparation av kantbalkar		40	40	Kantbalkslängd	m
Utbyte av kantbalkar		60	100	Kantbalkslängd	m
Reparation av brobanor	35		20	Överbyggnadsarea	m ²
Utbyte av lager		60	100	Totalt antal lager	st
Utbyte av broräcke		60	100	Broräckeslängd	m

Slutbehandlingsfas

Slutbehandlingsfasen innefattar hur den förväntade hanteringen av den uttjänta bron kommer att ske. Detta inkluderar till exempel rivning, sortering och transport av materialet till återanvändning, återvinning, förbränning eller deponi. Även för denna fas är relevant data otillgänglig för det aktuella fallet. Det väljs därför att göra en uppskattning utifrån en rapport skriven av Håkan Stripple (2001). Det förutsätts att all betong från bron över Hovaån kommer att krossas för att senare kunna användas till exempel som aggregat i vägkonstruktioner. Rapporten av Stripple beskriver den diesel- och elförbrukning som krävs för att krossa ett ton aggregat som 16,99 MJ diesel och 21,19 MJ elektricitet. För armering och stålbalkar påförs detta projekt inte klimatbelastningen från återvinningen i slutbehandlingsfasen. Detta då dessa komponenter helt respektive delvis utgörs av redan återvunnet material varpå hänsyn till klimatbelastning vid återvinning redan gjorts i materialtillverkningsfasen. Det görs en liknande uppskattning som i underhållsfasen att förflyttning av material konsumerar 0,1 liter diesel per kubikmeter förflyttat material. Denna uppskattning appliceras på brons totala volym vid rivningsskedet. Vidare antas det att allt rivningsmaterial körs till en återvinningscentral i Vara för vidare hantering.

För att avgöra vilken data som ska tas med i de fyra ovan beskrivna faserna ställs tre cut-off-kriterier upp:

- **Konstruktörsrelevans** - alla de inflöden som en brokonstruktör inte har möjlighet att påverka och/eller ta beslut om ska inte tas med i analysen. Detta gäller även sådana flöden där brokonstruktörens beslut inte ger konsekvensmässiga utfall med avseende på miljöeffekter

- **Miljörelevans** - alla inflöden som enskilt eller tillsammans bidrar med mindre än två procent av den totala mängden CO₂-ekvivalenter ska exkluderas i studien
- **Massa** - alla inflöden som enskilt eller tillsammans utgör mindre än en procent av den totala mängden massa i produktsystemet ska exkluderas

I denna studie studeras endast miljöpåverkanskategorin växthuseffekten med miljöpåverkansindikatorn CO₂-ekvivalenter och karakteriseringen global uppvärmningspotential (GWP, global warming potential). Det väljs att inte inkludera fler miljöpåverkanskategorier då syftet med detta examensarbete är att utreda åtgärder kopplade till Sveriges klimatmål om klimatneutralitet 2045 där inget nettoutsläpp av växthusgaser ska förekomma.

För att begränsa studiens omfattning görs allokering av klimatbelastningen för material till formverk och eventuella formställningar. För betonggjutning vid produktion av Betongbalkbron användes en gjutform av trä där formen för brobaneplattan bars av fyra stålfackverk, som tidigare beskrivits i Avsnitt 1.4. För trägjutformen antas det att virket kunde återanvändas tre gånger, likt antagande av Hammervold, Reenaas och Brattebø (2013). Stålfackverken hyrdes in och uppskattas av leverantören kunna användas under minst 20 år med genomsnittlig uthyrning en gång per år (Ledin 2018). Således väljs det att allokera klimatutsläppet kopplat till gjutformen och stålfackverket med fördelningen en tredjedels belastning för träformen och en tjugondels belastning för stålfackverket av respektive komponents totala klimatbelastning under materialtillverkningsfasen. För Samverkansbron var det tänkt att först lansera stålbalkarna vilka sedan skulle bära träformen vid gjutning av brobaneplattan. Valet görs även här att endast klimatbelasta en tredjedel av trämaterialiet till gjutformar för denna bro vid materialtillverkningsfasen.

6.2 Livscykelinventeringsanalys (LCI)

Inflöden i det studerade systemet i form av material och transporter redovisas i Tabell 6.2 nedan. För posterna *Reparation/utbyte av kantbalkar* och *Reparation av brobanor* i underhållsfasen studeras endast inflöde i form av betong. De utflöden som studeras i denna livscykelanalys är enbart sådana vilka kan hänföras till att ha en inverkan på global uppvärmningspotential. Dessa utflöden fås fram genom användning av olika miljövarudeklarationer och databaser.

Tabell 6.2: Sammanställning av ingående beräkningsdata fördelat över livscykelns fyra faser.

MATERIALTILLVERKNINGSFAS
Betong
Betongpålar
Armering
Stålbalkar (Samverkansbro)
Broräcken
Lager
Fackverksbalkar (Betongbalkbro)
Formvirke
PRODUKTIONSFAS
Transport av material till arbetsplats
Diesel, materialförflyttning
Diesel, arbetsmaskiner
UNDERHÅLLSFAS
Reparation/Utbyte av kantbalkar
Byte av broräcke
Byte av lager
Reparation av brobanor
Transport till arbetsplats
Transport till återvinningscentral
SLUTBEHANDLINGSFAS
Transport till återvinningsstation
Diesel, materialförflyttning vid rivning
Diesel, krossning av betong
El, krossning av betong

I kommande Avsnitt 6.2.1-6.2.8 presenteras beskrivningar av indata för beräkningar av broutförändas och tillhörande åtgärders globala uppvärmningspotential. Efter dessa beskrivningar presenteras en sammanställande tabell över källor för de emissionsdata som används i beräkningarna samt en sammanställning av material- och transportkvantiteter, se Tabell 6.3 Avsnitt 6.2.9 respektive Tabell 6.4, Figur 6.3 och Figur 6.4 i Avsnitt 6.2.10.

6.2.1 Betong

Vid upprättandet av bron över Hovaån användes betong av hållfasthetsklass C35/45 med vct 0,4 hämtad från en leverantör i Mariestad. Denna betong användes för samtliga delar av bron förutom för pålarna där betong av hållfasthetsklass C50/60 istället användes. Det antas att samma betongleverantör hade använts oavsett val av broutförande och betongtyp. För samtliga betongåtgärder nedan används emissionsdata för pålar av betong från IVLs databas. Emissionsvärde för pålarna hålls alltså konstant för alla åtgärder och förändras inte vid applicering av åtgärden Val av betong.

I underhållsfasen antas ett visst underhållsbehov för kantbalkarna och brobaneplattorna presenterat i Tabell 6.1 ovan. För dessa reparationer och utbyte antas det att betong med motsvarande sammansättning och utsläpp kommer användas som användes vid upprättande av bron. Enligt tidigare beskrivning antas att all betong kommer krossas efter brons livslängd för att till exempel utgöra fyllnadsmaterial i vägkonstruktioner.

Nollalternativ

Då ingen mer specifik information kring betongens innehåll har kunnat fås än betongens hållfasthetsklass har det valts att använda emissionsdata från EPD för betong för vägbroar av Svensk Betong (2017b). Vidare antas det att betongreceptet till Nollalternativet av Samverkansbron skulle vara densamma som för Nollalternativet för Betongbalkbron.

Val av klimateffektiv betong

För det klimateffektiva valet av betong väljs det att använda en betong med anläggningscement FA. I denna cement ersätts 20 % av klinkerandelen med 15 % flygaska och 5 % kalksten (Cementa 2016). En tredjepartsgranskad EPD har utförts av Skanska för betong med denna cementsort, redovisad i *Environmental Product Declaration - Frostbeständig betong med Anläggning FA* (Skanska Asfalt och Betong 2017).

Val av klimatineffektiv betong

För det klimatineffektiva betongalternativet används emissionsdata för anläggningsbetong C35/45 från IVLs databas.

6.2.2 Armering

Då armering utgörs helt eller delvis av återvunnet material väljs det att inte belasta detta projekt av energiåtgången vid återvinning av materialet i livscykelanalysens slutbehandlingsfas, likt antagandet i artikeln presenterad av Du et al. (2014). Detta då hänsyn till den energiåtgång vilken krävs för att återvinna materialet redan tagits hänsyn till i materialtillverkningsfasen för detta projekt. Således påförs belastningen från återvinningen istället till den produkt vilket stålet från bron återanvänds i.

Nollalternativ

Armeringen i Betongbalkbron togs från producenten Celsa Sverige AB där EPD-data för denna leverantör har kunnat fås fram. Armeringen produceras i Norge och är 100 % skrotbaserad (Celsa Steel Service AB 2012). Miljövarudeklarationen inkluderar även transporten från Norge till deras lager i Sverige. Det har i denna studie antagits att den armering som användes i bron lagrades på Celsas lager i Halmstad varpå sedan ytterligare belastning för transporten mellan Halmstad och Hova påförts i produktionsfasen. Likt antagandet för betongen i Samverkansbron antas det att denna slags armering var tänkt att användas för samverkansalternativet.

Val av klimateffektiv armering

Emissionsvärde från EPD från Norsk Stål AS (2015) används för val av klimateffektiv armering. Transporten antas ske med lastbil från Norsk Ståls lager i Larvik i Norge till Hova.

Val av klimatineffektiv armering

Vid val av klimatineffektiv armering har det valts att använda sig av emissionsvärde för armering enligt Trafikverkets effektsamband (2016b). Denna emissionsfaktor är baserat på ett medelvärde av de teknologier som används globalt (Trafikverket 2016b). Då detta värde är ett globalt medelvärde väljs även transportsträckan till ett uppskattat globalt medelvärde. Detta görs genom att anta transportsträckan till en fjärdedel av jordens omkrets. Det antas vidare att merparten av denna sträcka utförs med färja vilken leverans till hamnområde i Göteborg där transporten sedan fortsätter med lastbil till Hova.

6.2.3 Konstruktionsstål

Likt armeringen utgörs konstruktionsstålet delvis av återvunnet stål. Valet görs därför att inte heller för konstruktionsstålet påföra klimatbelastning för återvinning av stålet i slutbehandlingsfasen. Det antas vidare att konstruktionsstålet återvinns till 100 % i slutbehandlingsfasen.

Nollalternativ

Stålbalkarna för samverkansalternativet var tänkta att tas från leverantören RUUKKI med produktion i Oborniki, Polen. En miljövarudeklaration från denna leverantör har funnits att tillgå. I denna EPD presenteras olika typer av stålalternativ varpå valet görs att anta att stål av typen svetsade och målade fackverk, sektioner och balkar av varmvalsad plåt (Tabell 3 i EPD från RUUKKI 2014). Denna EPD gäller för modulerna A1-A3 samt D (Figur 3.2 sida 18). En uppskattning av transportsträckan mellan Oborniki och Hova görs och det antas att sträckan gjorts med lastbil.

Val av klimateffektivt konstruktionsstål

För klimateffektivt konstruktionsstål väljs emissionsvärde från EPD av leverantören UPB AS (2016). Stålet produceras av denna leverantör i Lettland. Det väljs att anta att transporten mellan Grobina i Lettland och Hova görs med färja mellan Ventspils och Nynäshamn samt med lastbil på resterande sträcka.

Val av klimatineffektivt konstruktionsstål

Emissionsvärde används från EPD av EMV Construction (2014) för att representera det klimatineffektiva valet av konstruktionsstål. Plåtarna för dessa profiler tillverkas enligt tillverkaren av europeiska tillverkare för att sedan monteras samman till önskad profil i Magnor i Norge. Vidare antas det att transporten från Magnor till Hova för de färdiga profilerna görs med lastbil.

6.2.4 Gjutform och formställning

Som tidigare nämnt upprättades en gjutform av trä för Betongbalkbron, något som även var tänkt för samverkansbron. Allt formvirke hämtades från ett lokalt sågverk utanför Tibro. Det presenterades även i slutet av Avsnitt 6.1.2 att endast en tredjedel av klimatbelastningen under materialtillverkningsfasen för trät påförs detta projekt. Då ingen miljövarudeklaration har funnits att tillgå från den specifika leverantören används värde för sågat virke från IVLs databas. En transportsträcka mellan sågverket och Hova uppskattas och det antas att denna transport skett med lastbil. Den tredjedel som påförs projektet antas vidare köras till återvinningsstation i Vara efter det använts, det vill säga den andel som inte återanvänds. Även denna transport antas ske med lastbil.

För Betongbalkbron användes stålfackverk för att bära gjutform och ohärdad betong för brobanan. Dessa hyrdes in, som tidigare nämnt, och kan enligt leverantören själv användas under minst 20 år med en genomsnittlig uthyrningsfrekvens en gång per år (Ledin 2018). Ledin (2018) meddelade att dessa tillverkades i södra Sverige men vill inte specificera vilken leverantör som användes. Således görs valet att använda emissionsdata från IVL för galvat konstruktionsstål. Vidare antas det att stålfackverken producerades i Halmstad för att transporteras med lastbil till företagens lager i Göteborg. Transporten mellan Göteborg och Hova antas även den vara gjord med lastbil.

6.2.5 Broräcke

Angående broräckena har information kring leverantör och produkt varit mycket begränsad. Känt är enbart att dessa tillverkades i Kina. Då ingen direkt leverantörsdata har kunnat fås har valet gjorts att använda emissionsdata för galvat konstruktionsstål från IVLs databas för materialtillverkningsfasen. Transportvägen och transportmetoden har behövts uppskattas på grund av bristande tillgång till data. Det antas att transporten skett med färja från Shanghai i Kina till Göteborg i Sverige. Vidare antas det att transporten mellan Göteborg och Hova har gjorts med lastbil. Det antas att samma broräckesleverantör skulle använts för tillverkning av samverkansbroalternativet. I underhållsfasen antas det att samtliga räcken byts ut efter 60 år och att räcken från samma leverantör då används för de nya räcken.

6.2.6 Lager

För Betongbalkbron användes två lager vid respektive landfäste vilket resulterar i totalt åtta lager för detta alternativ. Det var tänkt att sex lager per bro skulle användas för Samverkansbron, två vid respektive landfäste samt två vid mittstöd. Totalt var tolv lager tänkt att användas för Samverkansbron. Utifrån de lager som har använts vid byggnationen har en vikt fått fram från leverantören. Med syfte att förenkla beräkningarna har valet gjorts att vidare uppskatta klimatbelastningen från lagerna vid materialtillverkningsfasen genom att anta att lagerna helt och hållet består av galvat konstruktionsstål. Detta antagande görs även för de lager som sätts in när de ordinarie lagerna har uttjänt sin livslängd efter 60 år (se Tabell 6.1 sida 42). Emissionsvärde för det galvade konstruktionsstålet tas från IVLs databas. Det har antagits att lagerna hämtades från Kongsvinger i Norge för vidare transport med lastbil till Hova.

6.2.7 Transport av material

För de transporter som sker för respektive material beskrivna ovan från produktionsplats till Hova används emissionsdata från IVLs databas. För transporter med lastbil används emissionsdata baserat på sträcka, transportsträcka mellan 20-70 km eller transportsträcka över 70 km. För transporter som görs med färja antas det att godset transporteras i containrar.

6.2.8 Diesel- och elförbrukning

En konsumtion av diesel vid förflyttning av material har enligt tidigare beskrivningar valts att approximeras som 0,1 liter/m³ förflyttat material. Denna siffra appliceras delvis på de uppskattade schakt- och återfyllnadsmassor som finns att tillgå för Betongbalkbron. Vidare appliceras detta även på brons totala vikt som en uppskattning på dieselkonsumtionen för att förflytta materialet inne på arbetsplatsen under produktion samt i samband med rivning av bron.

Som tidigare presenterats görs en uppskattning av diesel- och elkonsumtion för krossning av betongen under slutbehandlingsfasen (16,99 MJ diesel respektive 21,19 MJ elektricitet per ton aggregat).

6.2.9 Sammanställning av livscykelinventering

Nedan i Tabell 6.3 sammanställs ovan presenterade källor för de emissionsdata som använts i livscykelanalysen för bron över Hovaån.

Tabell 6.3: Källor till använd emissionsdata.

		Källa för emissionsdata
Betong	<i>Klimat effektiv</i>	EPD: Skanska Asphalt och Betong (2017)
	<i>Nollalternativ</i>	EPD: Svensk Betong (2017b)
	<i>Klimat ineffektiv</i>	IVL: Anläggningsbetong C35/45
Betongpålar	<i>Alla</i>	IVL: Pålar av betong
Armering	<i>Klimat effektiv</i>	EPD: Norsk Stål AS (2015)
	<i>Nollalternativ</i>	EPD: Celsa Steel Service AS (2012)
	<i>Klimat ineffektiv</i>	Trafikverket: Armeringsstänger, stål (2016b)
Stålbalkar	<i>Klimat effektiv</i>	EPD: UPB AS (2016)
	<i>Nollalternativ</i>	EPD: RUUKKI (2014)
	<i>Klimat ineffektiv</i>	EPD: EMV Construction AS (2014)
Fackverksbalkar	<i>Betongbalkbro</i>	IVL: Konstruktionsstål, galvad
Broräcke	<i>Alla</i>	IVL: Konstruktionsstål, galvad
Lager	<i>Alla</i>	IVL: Konstruktionsstål, galvad
Formvirke	<i>Nollalternativ</i>	IVL: sågat virke
Transport	<i>Lastbil 20-70 km</i>	IVL: Lastbil 20-70 km
	<i>Lastbil >70 km</i>	IVL: Lastbil >70 km
	<i>Färja</i>	IVL: Färja Container
Arbetsmaskiner	<i>Diesel</i>	IVL: ACP Diesel MK1 (utan RME)
Krossning av betong	<i>Diesel</i>	IVL: ACP Diesel MK1 (utan RME)
	<i>Elektricitet</i>	Energimyndigheten (2015)

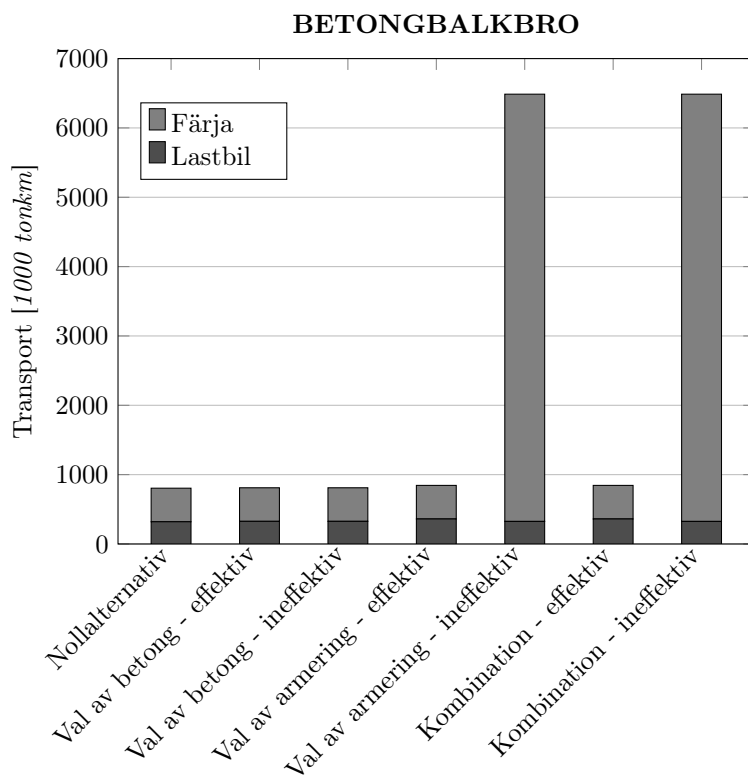
6.2.10 Material- och transportkvantiteter

I Tabell 6.4 presenteras de studerade materialmängder som respektive utförandetyp för bron över Hovaån kräver under livslängden. Dessa mängder är samma för samtliga studerade åtgärder för respektive utförandetyp.

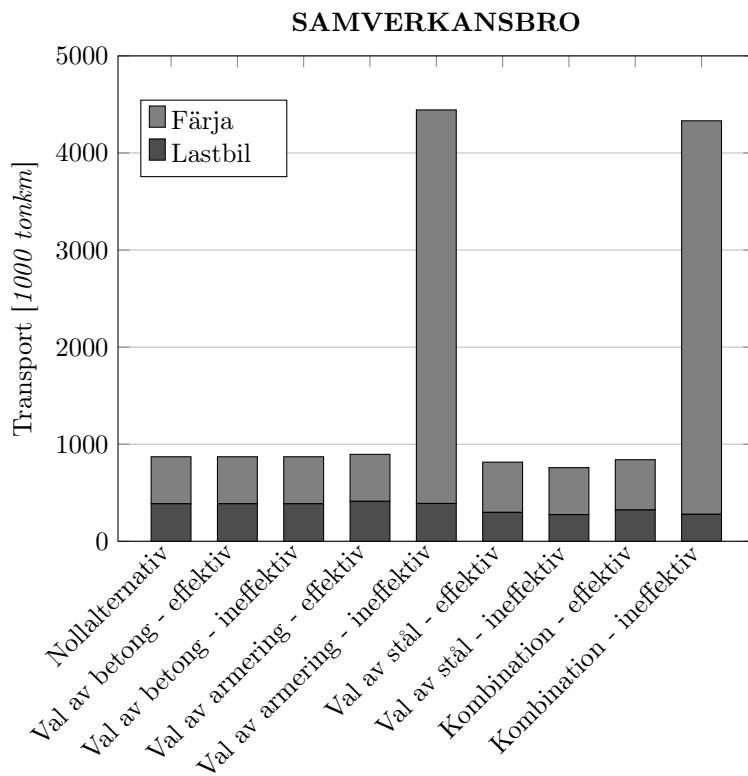
Tabell 6.4: Materialmängder för bron över livscykelns fyra faser.
(*Inkluderar broräcke, lager samt fackverksbalkar respektive stålbalkar)

Materialtillverkningsfas	Enhet	BETONGBALKBRO	SAMVERKANSBRO
Betong	m^3	1 202	873
Armering	<i>ton</i>	186	116
Konstruktionsstål*	<i>ton</i>	46	136
Formvirke	m^2	2 950	1 807
Produktionsfas			
Diesel, markarbeten	<i>liter</i>	602	129
Diesel, materialförflyttning	<i>liter</i>	129	94
Underhållsfas			
Reparation kantbalkar (år 20, 30 %)	m^3	12	14
Reparation kantbalkar (år 40, 40 %)	m^3	16	19
Reparation kantbalkar (år 60, 100 %)	m^3	40	47
Byte av broräcken (år 60, 100 %)	<i>ton</i>	12	12
Byte av lager (år 60, 100 %)	<i>ton</i>	1	2
Reparation av brobana (år 35, 20 %)	m^3	12	8
Reparation av brobana (år 70, 20 %)	m^3	12	8
Slutbehandlingsfas			
Diesel, materialförflyttning	<i>liter</i>	115	84
Diesel, krossning av betong	<i>liter</i>	1 389	1 009
El, krossning av betong	<i>MJ</i>	6 185	4 493

Figur 6.3 och Figur 6.4 redogör för transporter för respektive brotyp och inkluderat transportmedel. Redogörelsen görs i tusentals tonkm.



Figur 6.3: Transport för **Betongbalkbron** och respektive åtgärd under produktions-, underhålls- och slutbehandlingsfasen.

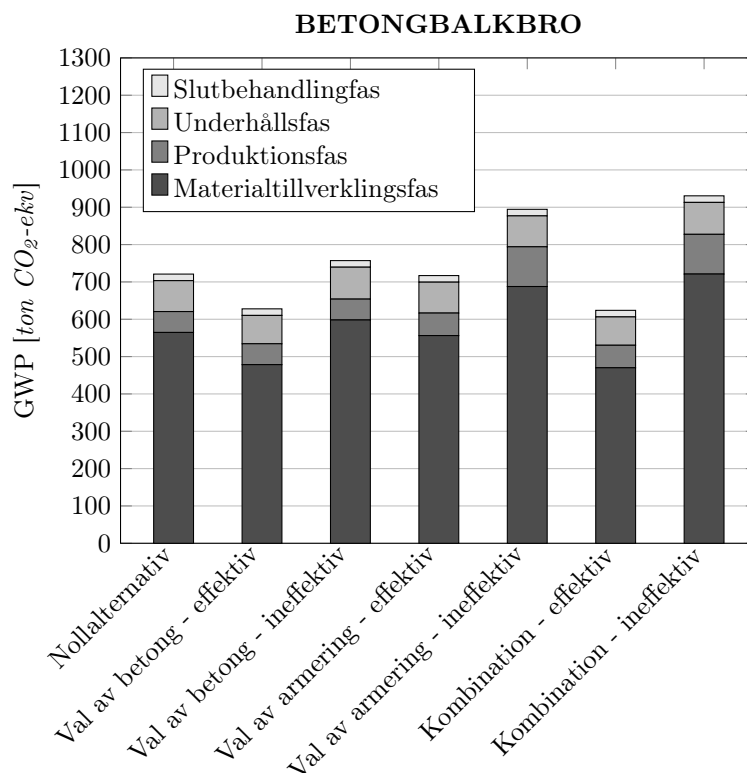


Figur 6.4: Transport för **Samverkansbron** och respektive åtgärd under produktions-, underhålls- och slutbehandlingsfasen.

I såväl Tabell 6.3 som i Tabell 6.4 ses att transporten är avsevärt högre för åtgärden Val av armering för det ineffektiva alternativet. Något som vidare även återkommer i den ineffektiva Kombinationsåtgärden. Bakgrunden till denna ökning i transport är att, som beskrivet i Avsnitt 6.2.2, ineffektiv armering är baserad på ett globalt medelvärde enligt Trafikverkets effektsamband. Vidare antogs det därmed en transportsträcka motsvarande en fjärdedel av jordens omkrets för den ineffektiva armeringen. Denna i sammanhanget långa transportsträcka i kombination med en stor godsvikt medför en markant ökning i transportbelastning uttryckt i tonkm. Vidare antogs det även i Avsnitt 6.2.2 att majoriteten av sträckan körs med färja. Då detta transportsätt har ett förhållandevis lågt emissionsvärde jämfört med lastbil fås däremot inte ett allt för stort tillskott i global uppvärmningspotential för den extra transportsträckan för armeringen.

6.3 Miljöpåverkansbedömning (LCIA)

För bedömning av global uppvärmningspotential aggregeras livscykelinventeringsdatan genom klassificering och karaktärisering till potentiella utsläpp i form av $kg\ CO_2\text{-ekv./funktionell enhet}$. Funktionell enhet behandlades i Avsnitt 6.1.2 sida 40 och är för studien hela bron. Genom användning av miljövarudeklarationer (EPD) förkortas och effektiviseras miljöpåverkansbedömningen då klassificeringen och karakteriseringen för respektive vara eller produkt i dessa redan är utförda. Potentiell påverkan på växthuseffekten beräknas således genom att summera och multiplicera respektive växthuseffektspotential [$kg\ CO_2\text{-ekv./enhet}$] med tillhörande livscykelinventeringsdata. I Figur 6.5 och Tabell 6.5 nedan redovisas resulterande global uppvärmningspotential, GWP, för Betongbalkbron fördelat över livscykelns fyra faser.



Figur 6.5: Global uppvärmningspotential, GWP, för **Betongbalkbron** för respektive åtgärd fördelat på livscykelns fyra faser.

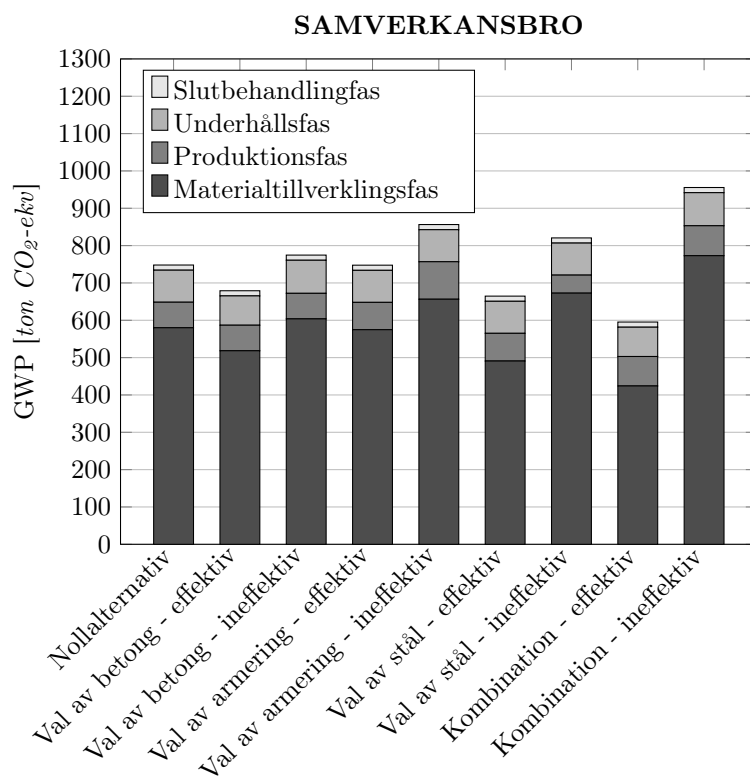
Tabell 6.5: Global uppvärmningspotential, GWP, i ton CO₂-ekv. för **Betongbalkbron** med tillhörande åtgärder fördelat över livscykelns fyra faser.

BETONGBALKBRO	Nollalt.	Val betong		Val armering		Kombination	
		Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.
Materialtillverkning	565	478	598	556	688	470	721
Produktion	56	56	56	60	106	60	106
Underhåll	83	76	86	83	83	76	86
Slutbehandling	18	18	18	18	18	18	18
Totalt	721	628	757	717	895	624	931

I Figur 6.5 och Tabell 6.5 utläses att effekten i form av variation i utsläpp vid applicering av de olika åtgärderna för Betongbalkbron till stor del sker i materialtillverkningsfasen. Detta gäller med undantag för åtgärden val av klimatineffektiv armering där en nästintill fördubbling sker i produktionsfasen jämfört med Nollalternativet och åtgärden Val av betong. Denna fördubbling återkommer således även för åtgärden klimatineffektiv kombination.

Materialtillverkningsfasen står för mellan 75-79 % av den totala globala uppvärmningspotentialen under bronns livslängd beroende på applicerad åtgärd. Av utsläppen i materialtillverkningsfasen står utsläpp från betongen för mellan 69-84 % och armeringen för mellan 11-28 % beroende på vald åtgärd. Totalt motsvarar detta mellan 95-96 % av materialtillverkningsfasens totala klimatgasutsläpp. Utsläppsandelarna relaterade till de övriga faserna är för produktionsfasen mellan 8-12 %, för underhållsfasen mellan 9-12 % och för slutbehandlingsfasen mellan 2-3 % beroende eventuell påförd åtgärd.

Sammanställning över global uppvärmningspotential för respektive åtgärd över de fyra faserna presenteras för Samverkansbron i Figur 6.6 och Tabell 6.6 nedan.



Figur 6.6: Global uppvärmningspotential, GWP, för **Samverkansbron** för respektive åtgärd fördelat på livscykelns fyra faser.

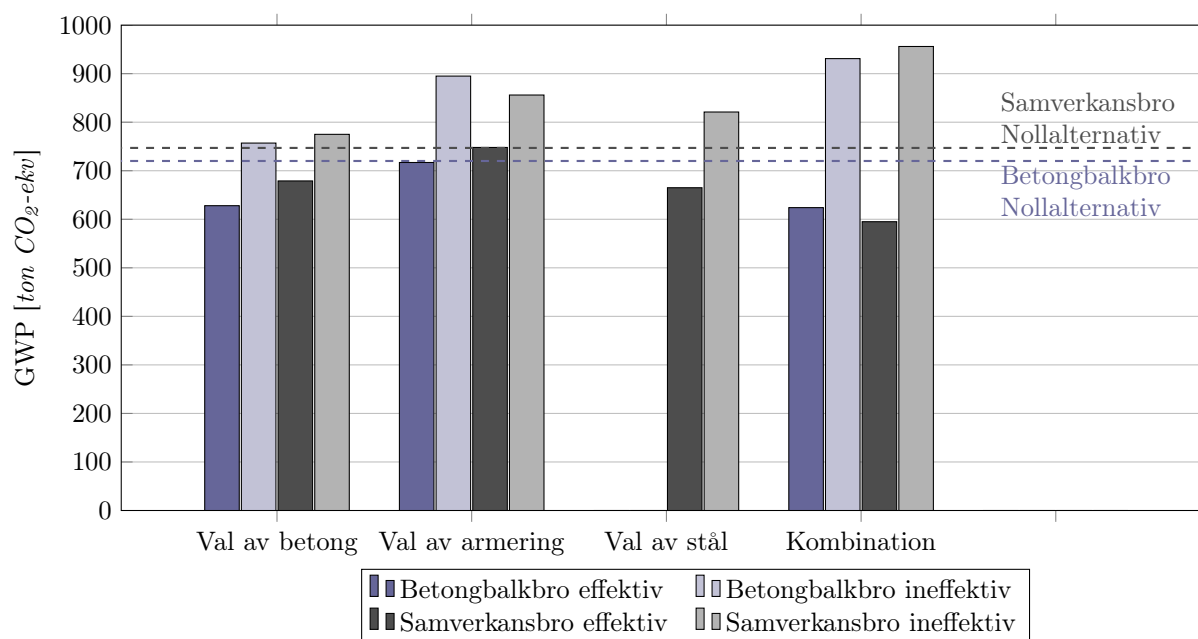
Tabell 6.6: Global uppvärmningspotential, GWP, i ton CO₂-ekv. för **Samverkansbron** med tillhörande åtgärder samt utsläppsfördelning mellan livscykelns fyra faser.

SAMVERKANSBRO	Nollalt.	Val betong		Val armering		Val stål		Kombination	
		Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.
Materialtillverkning	580	518	604	575	656	491	673	424	773
Produktion	68	68	68	73	100	74	48	79	80
Underhåll	86	79	89	86	86	86	86	79	89
Slutbehandling	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Totalt	748	679	775	748	856	665	821	595	956

Även för Samverkansbron är materialtillverkningsfasen den dominerande fasen för global uppvärmningspotential. Denna fas står i detta fall för mellan 71-81 % under bronns livslängd medan produktionsfasen står för 6-13 %, underhållsfasen står för 9-13 % och slutbehandlingsfasen för 1-2 %.

I materialtillverkningsfasen står betongen här för mellan 47-69 %, armering för mellan 7-18 % och stålet för mellan 17-39 % av den globala uppvärmningspotentialen i materialtillverkningsfasen. Tillsammans motsvarar detta mellan 94-97 % av materialtillverkningsfasens totala globala uppvärmningspotential.

I Figur 6.7 nedan presenteras global uppvärmningspotential för båda brotyperna och respektive åtgärder.



Figur 6.7: Global uppvärmningspotential, GWP, för de två brotyperna för respektive åtgärd.

Som utläses i Figur 6.7 är skillnaden mellan de två nollalternativen för de två brotyperna marginell, motsvarande 3,6 %. Vidare tycks minst global uppvärmningspotential under livslängden fås för åtgärden Val av betong för Betongbalkbron och för Val av stål för Samverkansbron då materialåtgärderna studeras var för sig. Vid jämförelse mellan dessa två tycks lägst global uppvärmningspotential fås för broutförandet Betongbalkbron vid applicering av åtgärden Val av betong. Vid kombination av de olika enskilda åtgärderna fås däremot lägst global uppvärmningspotential för Samverkansbron. Det är dock även denna brotyp som å andra sidan tycks få högst global uppvärmningspotential vid klimatineffektiv kombination.

I Tabell 6.7 nedan redovisas de intervall som fås vid applicering av respektive åtgärd för respektive broutförande.

Tabell 6.7: Sammanställning av global uppvärmningspotential hos respektive broutförande och tillhörande åtgärder.

	BETONGBALKBRO		SAMVERKANSBRO	
	Effektiv	Ineffektiv	Effektiv	Ineffektiv
Val av betong	-13 %	5 %	-9 %	4 %
Val av armering	-1 %	24 %	0 %	14 %
Val av stål	-	-	-11 %	10 %
Kombination	-13 %	29 %	-20 %	28 %

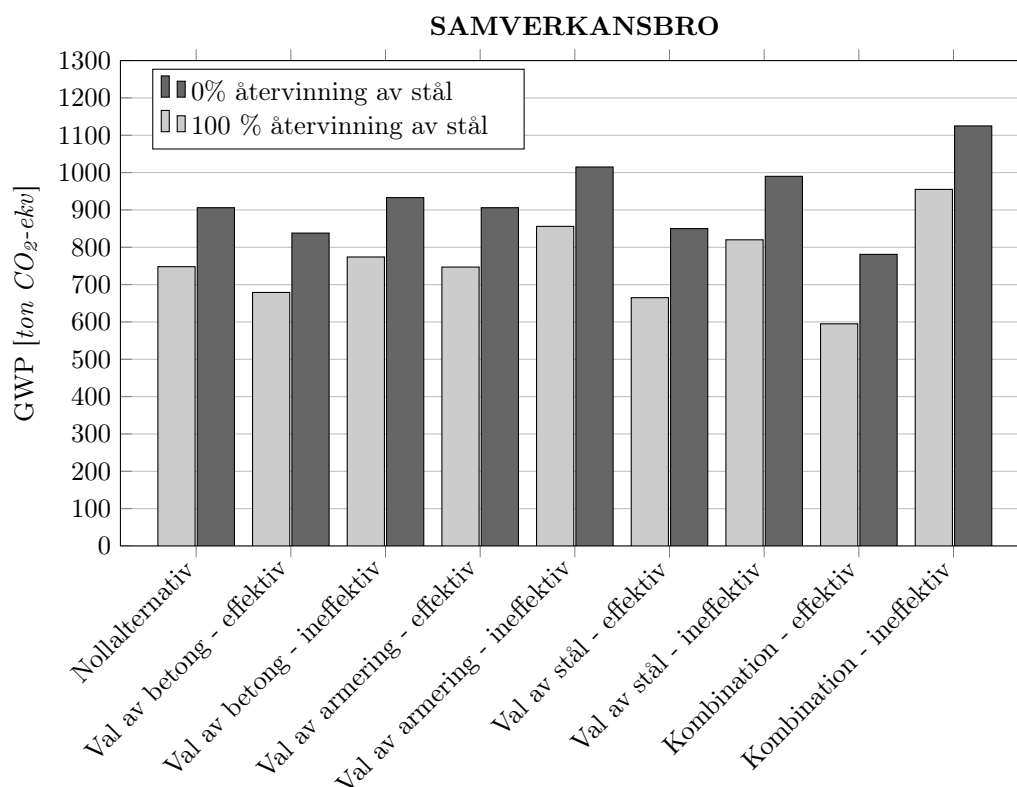
I denna tabell utläses att störst intervall för den procentuella effekt som fås vid applicering av respektive åtgärd fås för åtgärden Val av armering för Betongbalkbron (25 %) och Val av stål för Samverkansbron (22 %). Den största potentiella förbättringsandelen fås vidare vid kombinationsåtgärden för Samverkansbron, -20 % mot Betongbalkbrons -13 %. Samverkansbron är även det alternativ som har störst intervall för den procentuella effekt som får vid kombinationsåtgärden, 48 % mot Betongbalkbrons 42 %.

6.4 Livscykeltolkning

För att utvärdera livscykelanalysens resultat, måluppfyllelse och begränsningar för att vidare kunna dra slutsatser och ge rekommendationer tolkas resultatet både löpande under analysens gång och avslutningsvis. Bedömning av resultatets begränsning och spridning kan bland annat utvärderas med hjälp av en känslighetsanalys vilken har som syfte att analysera inverkan på resultatet vid variation av en parameter då resterande behålls oförändrade.

6.4.1 Känslighetsanalys - återvinning av konstruktionsstål

Allt konstruktionsstål har i studien antagits kunna återvinnas i slutbehandlingsfasen. Det är dock osäkert hur material och konstruktionsdelar kommer behandlas under slutbehandlingsfasen. För Samverkansbron där konstruktionsstålet utgör en stor del av den globala uppvärmningspotentialen undersöks det därför hur stor inverkan återvinningsgraden har. Resultatet kan ses i Figur 6.8 och Tabell 6.8.

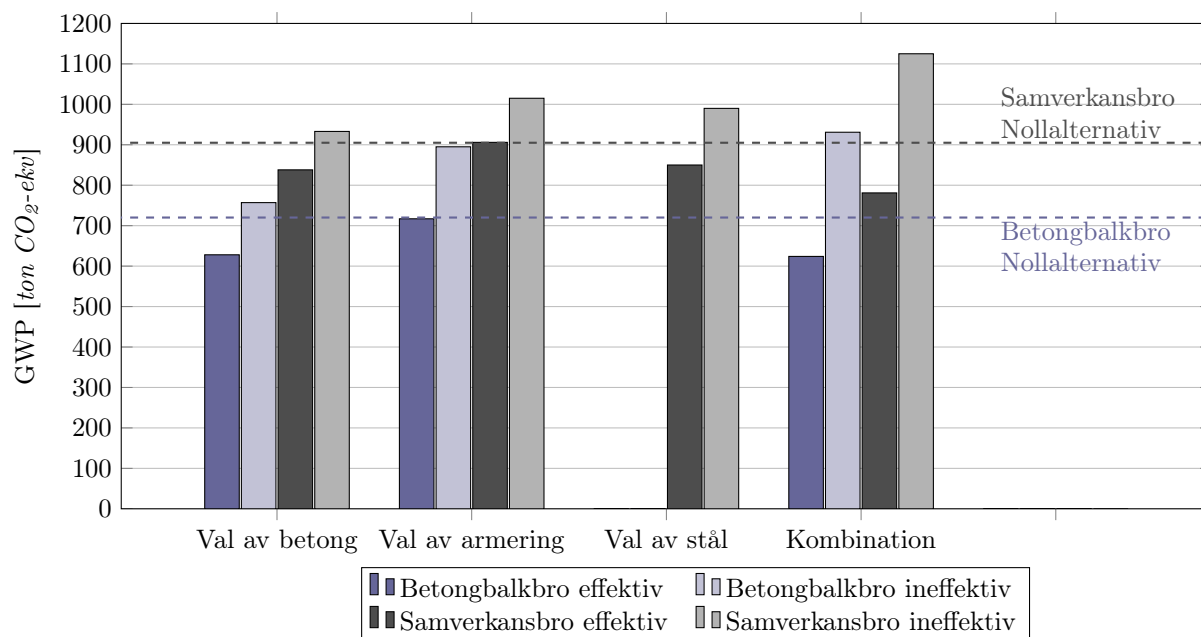


Figur 6.8: Jämförelse av global uppvärmningspotential för **Samverkansbron** med 100 % återvinning av konstruktionsstålet och 0 % återvinning av konstruktionsstålet.

Tabell 6.8: Jämförelse av global uppvärmningspotential, GWP, i ton CO₂-ekv. för **Samverkansbron** med 100 % återvinning av konstruktionsstål och 0 % återvinning.

SAMVERKANSBRO	Nollalt.	Val betong		Val armering		Val stål		Kombination	
		Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.
100 % återvinningsgrad	748	679	774	747	856	665	820	595	955
0 % återvinningsgrad	906	838	933	906	1015	850	990	781	1125
Differens [%]	21	23	20	21	19	28	21	31	18

Som utläses av Figur 6.8 och Tabell 6.8 är differensen med 0 % återvinningsgrad jämfört med 100 % återvinningsgrad mellan 18 % - 31 %. I Figur 6.9 nedan jämförs Samverkansbron med 0 % återvinningsgrad för konstruktionsstålet med Betongbalkbron.



Figur 6.9: Global uppvärmningspotential, GWP, för de två brotyperna för respektive åtgärd med 0 % återvinningsgrad för konstruktionsstål.

Med 0 % återvinningsgrad för konstruktionsstålet utläses av Figur 6.9 att Samverkansbron antyds ha en högre global uppvärmningspotential än Betongbalkbron för nollalternativen, motsvarande 25,6 %. En större global uppvärmningspotential tycks även fås för Samverkansbron för åtgärderna Val av betong, Val av armering och Kombinationsåtgärden. Inte ens Samverkansbrons klimateffektiva kombinationsåtgärd antyds ge lägre global uppvärmningspotential än Betongbalkbrons Nollalternativ. Betongbalkbrons klimatineffektiva kombinationsåtgärd antyds dessutom ge liknande global uppvärmningspotential som Samverkansbrons nollalternativ. Huruvida konstruktionsstålet återvinns i slutbehandlingsfasen eller inte antyds således ge stor påverkan på resultatet. Vidare diskussion, utvärdering, begränsningar, slutsatser och rekommendationer görs i Kapitel 8.

Kapitel 7

Analys av bron över Hovaån i Klimatkalkyl

I Avsnitt 4.1 sida 23 beskrevs Trafikverkets beräkningsverktyg Klimatkalkyl för beräkning av klimatbelastning och energianvändning för deras väg- och järnvägsprojekt. I detta kapitel kommer två analyser för bron över Hovaån att genomföras med Klimatkalkyl. Den första analysen syftar till att undersöka eventuella skillnader mellan resultat från den analys av bron över Hovaån som gjordes i Kapitel 6 och de resultat som fås med Klimatkalkyl med samma emissionsdata. Den andra analysen görs med ordinarie emissionsdata, motsvarande 2015 års värde, för att mäta den besparing som fås för respektive Nollalternativ i Klimatkalkyl.

7.1 Beräkningar i Klimatkalkyl

Beräkningar i Klimatkalkyl är begränsade i sitt utförande i förhållande till de beräkningar som gjordes i Kapitel 6. Klimatkalkyl inkluderar till exempel inte transport från tillverkare till arbetsplatsen, underhålls- eller slutbehandlingsfas, som beskrivs i Avsnitt 4.1 sida 23. En sammställning för jämförelse mellan ingående beräkningsdata för de egna beräkningarna och Klimatkalkyl redovisas i Tabell 7.1 nedan.

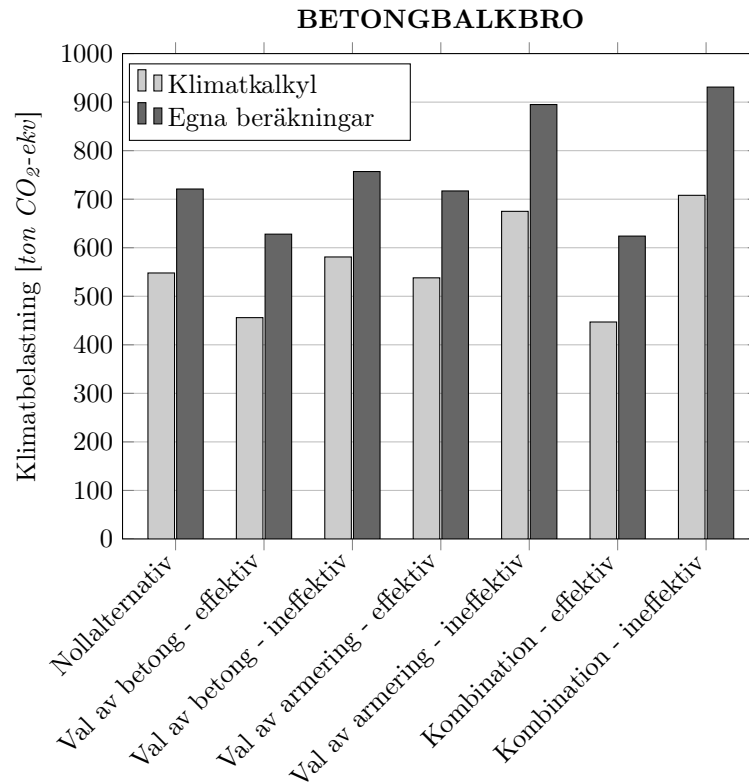
Det finns skillnader mellan beräkningsgången i Klimatkalkyl jämfört med beräkningar i Kapitel 6. Beräkning av klimatbelastning för betongpålarna görs genom en i verktyget icke redovisad viktning mellan emissionsvärdet för betong och emissionsvärdet för armering. Det har därför inte gått att använda sig av den emissionsdata för pålarna som användes för beräkningarna i Kapitel 6 vilket medför en skillnad i beräkningarna för denna byggdel. En annan skillnad mellan de två beräkningssätten är att det i Klimatkalkyl endast går att använda ett emissionsvärde åt gången för konstruktionsstålet. Detta resulterar i att lagerna, stålfackverken och stålbalkarna använder samma emissionsdata vid beräkning av klimatbelastning. Lagerna blir således påverkade vid val av olika emissionsdata för åtgärden *Val av stål* för Samverkansbron och hålls därmed inte konstant.

Tabell 7.1: Sammanställning av ingående beräkningsdata för de egna beräkningarna i Kapitel 6 och Trafikverkets Klimatkalkyl.

	Egna beräkningar	Klimatkalkyl
MATERIALTILLVERKNINGSFAS		
Betong	x	x
Betongpålar	x	x
Armering	x	x
Stålbalkar (Samverkansbro)	x	x
Broräcken	x	x
Lager	x	x
Fackverksbalkar (Betongbalkbro)	x	x
Formvirke	x	x
PRODUKTIONSFAS		
Transport av material till arbetsplats	x	
Diesel, materialförflyttning	x	x
Diesel, arbetsmaskiner	x	x
UNDERHÅLLSFAS		
Reparation/Utbyte av kantbalkar	x	
Byte av broräcke	x	
Byte av lager	x	
Reparation av brobanor	x	
Transport till arbetsplats	x	
Transport till återvinningscentral	x	
SLUTBEHANDLINGSFAS		
Transport till återvinningsstation	x	
Diesel, materialförflyttning vid rivning	x	
Diesel, krossning av betong	x	
El, krossning av betong	x	

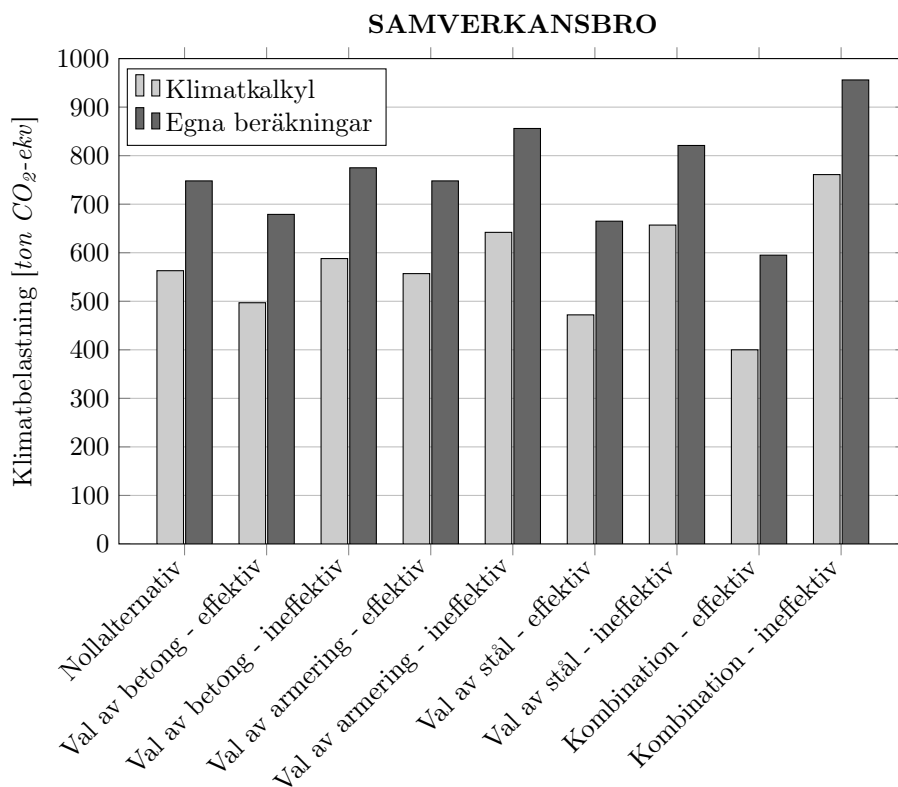
7.1.1 Klimatgasutsläpp med anpassad emissionsdata

I denna beräkning väljs ingång B i Klimatkalkyl för att på egen hand kunna föra in brons olika byggdelar och tillhörande mängder. För att vidare kunna göra en så rättvis jämförelse mellan de egna beräkningarna i Kapitel 6 och Klimatkalkyl som möjligt används emissionsdata från Tabell 6.3 sida 48 för de poster som ingår i Trafikverkets verktyg. I Figur 7.1 och Tabell 7.2 respektive Figur 7.2 och Tabell 7.3 nedan redovisas de ingående poster från Klimatkalkyl som använts för Betongbalkbron respektive för Samverkansbron.


 Figur 7.1: Klimatbelastning för **Betongbalkbron** med tillhörande åtgärder.

 Tabell 7.2: Resultat från analys av **Betongbalkbron** med åtgärder i Trafikverkets Klimatkalkyl samt jämförelse av dessa resultat med beräknade värden från Kapitel 6.

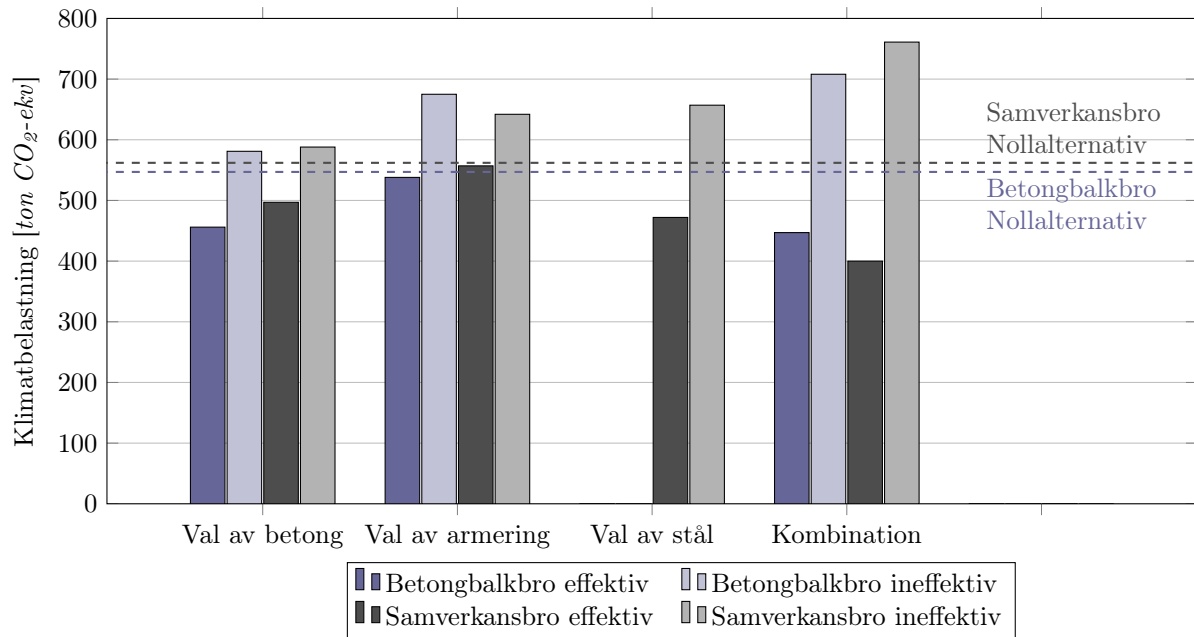
BETONGBALKBRO	<i>Klimatbelastning i ton CO₂-ekv.</i>						
	Nollalt.	Val betong		Val armering		Kombination	
Byggdela		Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.
Betong	439	352	471	439	439	352	471
Betongpålar inkl. pålplattor	25	20	26	24	29	20	30
Broräcke	7	7	7	7	7	7	7
Diesel	2	2	2	2	2	2	2
Stål, armering	69	69	69	60	192	60	192
Stål, konstruktion	5	5	5	5	5	5	5
Trä	1	1	1	1	1	1	1
TOTALT Klimatkalkyl	548	456	581	538	675	447	708
TOTALT Egna beräkningar	721	628	757	717	895	624	931
Differens [%]	-24	-27	-23	-25	-25	-28	-24


 Figur 7.2: Klimatbelastning för **Samverkansbron** med tillhörande åtgärder.

 Tabell 7.3: Resultat från analys av **Samverkansbron** med åtgärder i Trafikverkets Klimatkalkyl samt jämförelse av dessa resultat med beräknade värden från Kapitel 6.

SAMVERKANSBRO	Klimatbelastning i ton CO ₂ -ekv.								
	Nollalt.	Val betong		Val armering		Val stål		Kombination	
Byggdel		Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.
Betong	313	251	337	313	313	313	313	251	337
Betongpålar inkl. pålplattor	23	19	24	22	26	23	23	18	28
Broräcke	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Diesel	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Stål, armering	43	43	43	38	119	43	43	38	119
Stål, konstruktion	175	175	175	175	175	84	269	84	268
Trä	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTALT Klimatkalkyl	563	497	588	557	642	472	657	400	761
TOTALT Egna beräkningar	748	679	775	748	856	665	821	595	956
Differens [%]	-25	-27	-24	-25	-25	-29	-20	-33	-20

I Figur 7.3 nedan sammanställs klimatbelastningen för respektive åtgärd för de två brotyperna enligt beräkningar utförda i Klimatkalkyl.



Figur 7.3: Klimatbelastning för de två brotyperna för respektive åtgärd enligt Trafikverkets Klimatkalkyl.

Likt beräkningarna i Kapitel 6 ses i Figur 7.3 att minst klimatbelastning under livslängden antyds fås för Val av betong för Betongbalkbron och för Val av stål för Samverkansbron då materialåtgärderna studeras var för sig. Vid jämförelse mellan dessa två tycks Betongbalkbron få lägst klimatbelastning vid åtgärden Val av betong. Vid kombination av de olika åtgärderna fås likt Kapitel 6 lägst och högst klimatbelastning för Samverkansbron. Vid jämförelse mellan nollalternativen för de två brotyperna fås inte någon större skillnad för dess klimatbelastning, Samverkansbrons utsläpp är enligt beräkningarna 2,7 % större än Betongbalkbrons.

Nedan i Tabell 7.4 redovisas en jämförelse mellan beräknad klimatpåverkvan i form av växthusgasutsläpp utförda i Kapitel 6 respektive klimatbelastning i Trafikverkets Klimatkalkyl för de två brotyperna och tillhörande åtgärder.

Tabell 7.4: Redogörelse av potential för klimatbelastning för de två brotyperna och tillhörande åtgärder. Jämförelse mellan egna beräkningar och beräkningar i Trafikverkets Klimatkalkyl.

	BETONGBALKBRO				SAMVERKANSBRO			
	Egna beräkningar		Klimatkalkyl		Egna beräkningar		Klimatkalkyl	
	Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.	Eff.	Ineff.
Val betong	-13 %	5 %	-17 %	6 %	-9 %	4 %	-12 %	4 %
Val armering	-1 %	24 %	-2 %	23 %	0 %	14 %	-1 %	14 %
Val stål	-	-	-	-	-11 %	10 %	-16 %	17 %
Kombination	-13 %	29 %	-18 %	29 %	-20 %	28 %	-29 %	35 %

Ur Tabell 7.4 utläses att beräkningarna i Klimatkalkyl ger större intervall, och därmed större uppskattad potential, för respektive åtgärd för båda brotyperna i jämförelse med de egna beräkningarna. Utöver detta antyds samma tendenser som i Kapitel 6 att störst intervall fås för åtgärden Val av armering för Betongbalkbron (25 %) och Val av stål för Samverkansbron (33 %). Den största potentiella förbättringsandelens fås vidare vid kombinationsåtgärden för Samverkansbron, -29 % mot Betongbalkbrons -18 %. Samverkansbron är även det alternativ som har störst intervall för den procentuella effekt som får vid kombinationsåtgärden, 64 % mot Betongbalkbrons 47 %.

7.1.2 Klimatgasutsläpp i 2015 års värde

I Avsnitt 4.1 sida 23 beskrevs det att den första kalkylen i Klimatkalkyl under ett projekts gång sker i 2015 års värde för klimatbelastning och energiåtgång. I syfte att jämföra de egna beräkningarna för global uppvärmningspotential i Kapitel 6 med beräknad klimatbelastning enligt Klimatkalkyl görs därför en beräkning där respektive broutförandes nollalternativ beräknas helt i 2015 års värde. Detta resultat jämförs sedan med det tidigare beräknade värdet för nollalternativen i Klimatkalkyl med egna emissionsdata (tidigare presenterade i Tabell 7.2 respektive Tabell 7.3). Resultatet av denna jämförelse redovisas i Tabell 7.5 nedan.

Tabell 7.5: Beräkning av klimatbelastning i ton CO₂-ekv. för Nollalternativen för respektive broutförande i Klimatkalkyl.

	2015 års värden	Egna emissionsvärden	Differens
Betongbalkbro Nollalternativ	669	548	-18 %
Samverkansbro Nollalternativ	651	563	-14 %

I denna tabell syns att Klimatkalkyl med 2015 års värden uppskattar att Samverkansbron har något lägre klimatbelastning än Betongbalkbron. Det omvända gäller dock då de egna emissionsvärdena används i Klimatkalkyl. Det finns även en indikation att Nollalternativet för Betongbalkbron resulterat i en besparing motsvarande 18 % gentemot dess klimatbelastning i 2015 års värde. För Samverkansbron antyds att motsvarande siffra vara 14 % besparing. Då investeringen i ut- och ombyggnation av E20 förbi Hova översteg 50 miljoner kronor kan dessa besparingar jämföras med Trafikverkets initierande besparingspotential 17 % för broar med färdigställande mellan 2020-2024. För Betongbalkbron hade det alltså kunnat ses som att detta krav möttes för dess Nollalternativ, även om kravet i sig inte gäller för just detta projekt vilket planerar öppna för trafik i oktober 2018. För Samverkansbron hade någon eller några ytterligare åtgärder behövts göras gentemot Nollalternativet för att matcha detta besparingskrav.

Kapitel 8

Diskussion

Utifrån de tillvägagångssätt som använts och de resultat som fåtts fram i Kapitel 5, 6 och 7 förs inledningsvis en diskussion utifrån respektive kapitel. Avslutningsvis förs sedan en mer generell diskussion kring de insikter som fåtts under arbetet med rapporten.

8.1 Analys av Vägporten - Klimatoptimerat förhållande

Resultaten indikerar att en brobaneplatta med mindre betong och mer armering per kubikmeter trots lägre växthusgasutsläpp i materialtillverkningsfasen än en brobaneplatta med mer betong och mindre armering per kubikmeter. Detta antyds oavsett val av sammansättning av betong och armering. För tvärsnittet *Ner 0.2* fås cirka 20 % mindre utsläpp än för *Ordinarie*, se Tabell 5.3 sida 37. Resultatet visar på samma tendens som i SBUFs rapport (2017) där utsläppen för en hel plattrambro indikeras kunna minskas med 15 % med ett tvärsnitt med mindre betong och mer armering. Med utgångspunkt i den helt klimatineffektiva sammansättningen av betong och armering, se Tabell 5.3 sida 37, antyds det även vara mer effektivt att välja klimateffektiv betong framför en klimateffektiv armering, om enbart ett material väljs klimateffektivt. Detta verkar dock enbart gälla upp till en medelarmeringsmängd om 150 kg/m^3 för valda emissionsvärden, se Figur 5.1 sida 29.

Undersökningen av åtgärden för ett *Klimatoptimerat förhållande - mängd betong/mängd armering* i en brokonstruktion av betong genomfördes för materialtillverkningsfasen med fem olika tvärsnittshöjder för brobaneplattan i en plattrambro benämnd Vägporten. Den utfördes med hjälp av en befintlig beräkningsmodell där laster och finitaelementmodell redan var framtagna och antaganden redan var gjorda. Ett utsläppsförhållande togs fram för fyra olika sammansättningar av armerad betong. Utifrån snittkrafter för respektive tvärsnitt beräknades sedan armeringsbehov och armeringsmängd varpå utsläppen per kubikmeter och totalt för hela brobaneplattan togs fram och jämfördes. Utifrån genomförandet av undersökningen finns det därmed en rad osäkerheter som kan påverka resultatet.

En osäkerhet är att det inte funnits möjlighet att utforma eller granska varken beräkningsmodellen, lasterna som verkar på bron eller de antaganden som beräkningarna bygger på. Dock är dessa modeller, beräkningar och antaganden granskade både internt på Skanska och externt av Trafikverket vilket medför att grova fel borde ha upptäckts. Eftersom utsläppsberäkningarna utgår från vald armeringsmängd och inte armeringsbehovet finns även en osäkerhet kring hur detta kan påverka resultatet. Med en vald armeringsmängd ingår en anpassning av armeringsstorlek och centrumavstånd vilket ger en avvikelse från armeringsbehovet som inte är konstant. Detta anses dock ha en marginell på resultatet då en liten ökning eller minskning av vald armering i varje riktning får en marginell effekt på medelarmeringsmängden. Vidare har skarv- och bockningslängder inte beaktats vid beräkning av total armeringsmängd. Detta gör att de beräknade armeringsmängderna för alla fem tvärsnitt är något lägre än vad som i praktiken behövs. Dock anses detta också ha marginell påverkan på resultatet då armeringsmängden vid beaktande av skarv- och bockningslängder troligtvis hade ökat likvärdigt för alla fem tvärsnitt.

Med val av andra sammansättningar av betong och armering än de i studien valda kan också ett annat resultat fås. Detta anses dock inte heller påverka nämnvärt då det i studien söktes efter extremvärden vid val av emissionsdata. Detta utesluter inte att det finns andra mer extrema värden, det vill säga ännu

lägre eller ännu högre än de i studien inkluderade, men effekten vid ett sådant val bedöms få marginell påverkan.

En annan osäkerhet är att studien enbart omfattar materialtillverkningsfasen vilket gör att potentiella utsläpp från resterande faser såsom produktions-, underhålls- och slutbehandlingsfas inte är inkluderade vilka skulle kunna påverka resultatet. Dock visar de egna beräkningarna i Kapitel 6 att materialtillverkningsfasen är dominerande och att ca 70 - 80 % av de totala utsläppen hänförs till materialtillverkningsfasen under livscykeln. De andra faserna står också i proportion till omfattningen av materialtillverkningsfasen. Detta innebär att med en minskad brobanepplatta och således minskade utsläpp i materialtillverkningsfasen skulle exempelvis underhållsfasen, enligt det sätt att beräkna underhåll som använts i Kapitel 6, troligtvis också minska då mängd underhåll påverkas av mängd material.

Ytterligare en osäkerhet är att endast brobanepplattan studeras och att övriga delar av bron inte är inkluderade i analysen vilket också skulle kunna ge ett annat resultat. Det anses dock vara osäkert hur mycket detta skulle kunna påverka resultatet då övriga delar står i proportion till brobanepplattans storlek och tyngd. Det vill säga att om brobanepplattans storlek och tyngd minskas så kan övriga brodelars storlek och tyngd också minskas, om än kanske inte i samma utsträckning.

Vidare anses det utgöra en osäkerhet att enbart en bro studeras. Med samma studie på fler antal liknande plattrambroar hade ett mindre ensidigt resultat kunnat fås. För ett ännu bättre resultat hade det även varit intressant att inkludera fler brotyper för att se hur detta förhåller sig för olika typer av betongkonstruktioner med olika verkningssätt och förutsättningar. Med en ännu större variation av tvärsnittshöjden hade också tendensen i resultatet kunnat stärkas.

8.2 LCA av bron över Hovaån - Val av material

8.2.1 Studiens mål och omfattning

Redan i början av en livscykelanalys, när mål och omfattning definieras, ställs stora begränsningar upp för de resultat som kommer fås. Val av till exempel systemgränser är direkt avgörande för resultatets omfattning i senare steg av livscykelanalysens gång. I denna studie medför några val i de tidiga skedena en begränsning kring de resultat som fås. Valet av vilka delar av bron som ska inkluderas i studien är direkt avgörande för hur omfattande resultatet blir, valet av analysens cut-offkriterier ska alltså göras med eftertänksamhet. Under analysens gång har därför de uppställda cut-offkriterierna reviderats i den iterativa processgången som råder vid en livscykelanalys.

Systemgränsen för en livscykelanalys innefattar även andra delar vilket har en tidig inverkan på det resultat som kommer fås för studien. Ett sådant exempel är att endast studera utsläpp relaterade till global uppvärmningspotential. Effekter från tillverkning av en produkt resulterar ofta, om inte alltid, i betydligt fler klimatbelastande parametrar till exempel i form av försurning av mark och vatten eller utsläpp av olika tungmetaller. På så vis är valet att endast studera global uppvärmningspotential ett mycket begränsat sätt att beskriva produktens klimatbelastning då detta inte ger en helhetsbild. Valet att endast studera global uppvärmningspotential görs då studien har sin grund i Sveriges miljömål att landet inte ska ha något nettoutsläpp av växthusgaser år 2045.

En annan parameter som i tidigt skede även begränsat studien är valet av vilka faser i livscykeln som ska inkluderas respektive exkluderas. I denna studie gjordes valet att inte inkludera bruksfasen för bron över Hovaån. Den globala uppvärmningspotential som fås vid användandet av bron i form av trafik ansågs inte vara relaterat till konstruktörens beslutsområde varpå denna fas föll bort till följd av studiens cut-off kriterium för konstruktörsrelevans.

8.2.2 Studiens livscykelinventering

Materialtillverkningsfas

Under livscykelinventeringen påträffades en del ingående materialparametrar där till exempel leverantör och/eller emissionsdata för använd leverantör inte har kunnat fastställas. För den betong som använts i

bron över Hovaån har endast leverantör fått fram. Då denna leverantör saknar emissionsdata har istället ett EPD-värde för anläggningsbetong från Svensk Betong använts vilket nödvändigtvis inte behöver överensstämma med den betong som användes i bron över Hovaån. Det går inte heller att avgöra hur den använda betongen för bron över Hovaån förhåller sig till de betongtyper som använts för att beskriva det klimateffektiva respektive klimatineffektiva alternativet. Resultatet från denna materialpost bedöms därför vara förhållandevis osäkert, i synnerhet vid bedömning av potentialen hos åtgärden Val av betong.

För den armering som användes har både leverantör och EPD funnits att tillgå vilket ökar resultatets trovärdighet för denna post för nollalternativen. Potentialen hos åtgärden Val av armering bedöms således förhållandevis säker för de valda emissionsvärden för klimateffektiv respektive klimatineffektiv armering. Detta då det finns en tydlig indikation kring hur utsläpp från armering för nollalternativen förhåller sig till valda emissionsvärden för åtgärden. För det klimatineffektiva värdet finns däremot en stor osäkerhet vad gäller transport från tillverkare till arbetsplatsen. Det antogs att transportsträckan motsvarar en fjärdedel av jordens omkrets. Detta antagande i sig själv är grovt och har försökt begränsas genom att vidare anta att majoriteten av sträckan görs med färja, vilket ger lägre global uppvärmningspotential än om även denna sträcka körts med lastbil. På så vis blir utsläppet från transporten totalt sätt förhållandevis begränsat för att inte ha en allt för markant påverkan på resultatet som helhet. Således bedöms detta grova antagande få marginell påverkan på slutresultatet.

Vad gäller konstruktionsstål för Samverkansbron har information fått kring vilken leverantör som var tänkt att användas. Denna leverantör har miljövarudeklarationer för flera av sina produkter och produktionsplatser. Det har därför förts en dialog med leverantören angående vilken miljövarudeklaration som var mest lämplig för studien. Således bedöms trovärdigheten vara tillfredsställande för Nollalternativet för Samverkansbron för denna materialpost. För val av klimateffektivt respektive klimatineffektivt konstruktionsstål finns dock en osäkerhet i huruvida de valda alternativen verkligen är tillämpbara på det aktuella fallet. Denna osäkerhet bedöms ha en stor påverkan på resultatet för åtgärden Val av stål.

För de lager som användes vid byggnation av bron över Hovaån har leverantör kunnat fastställas. Denna leverantör innehåller däremot ingen miljövarudeklaration för den aktuella produkten. Uppskattning gjordes därför att värdera lagernas utsläpp som om dessa enbart bestod av konstruktionsstål. Detta gjordes då dess vikt kunnat fastställas och majoriteten av det ingående materialet i lagerna antas bestå av en stålkonstruktion. Påverkan från övriga delar av lagerna, så som till exempel gummidelar och vätskor, samt hur dessa förhåller sig till utsläpp från konstruktionsstål är i denna studie okänt. Det bedöms däremot troligt att denna uppskattning haft en marginell påverkan till följd av lagernas begränsade vikt och volym i förhållande till bron som helhet.

Endast Kina som produktionsland har kunnat fastställas för de broräcken som användes. En rad antaganden och uppskattningar har därmed behövs göras för såväl transportsträcka, transportsätt samt emissionsdata. Det bedöms rimligt att anta att broräckena i huvudsak består av konstruktionsstål varpå emissionsdata från detta material ansågs kunna användas. Det är däremot osäkert hur det använda värdet förhåller sig till broräckenas verkliga utsläpp. Räckenas begränsade vikt och volym i förhållande till bron som helhet medför dock att det bedöms att denna post får en marginell påverkan på slutresultatet.

Vad gäller gjutformar för broalternativen och formställning för Betongbalkbron har även här ett antal antaganden och uppskattningar behövs göras. För både gjutform och formställning har leverantör kunnat fastställas. Däremot har ingen emissionsdata funnits att tillgå vilken således har behövs uppskattas. Det har även behövt göras antaganden kring hur många gånger träet till gjutformen och stålfackverken kunnat återanvändas. Här bedöms en stor osäkerhet föreligga för denna post. Påverkan på slutresultatet från dessa poster bedöms däremot vara mycket begränsad.

Produktionsfas

I denna fas inkluderas i denna studie endast transport av material från tillverkare till arbetsplatsen och dieselkonsumtion vid förflyttning av material på arbetsplatsen och schaktning. Angående transport från tillverkare till arbetsplatsen har en uppskattning av utsläppen kopplat till detta gjorts baserat på värden från IVLs databas. Det finns en viss osäkerhet kring huruvida dessa stämmer överens med aktuella transportmedel, men dessa värden bedöms vara tillfredsställande nog för studiens syfte.

För förflyttning av material och schaktmassor har en antagen dieselkonsumtion för sådan förflyttning använts. För förflyttning av material på arbetsplatsen har det vidare antagits att denna motsvarar för-

flyttning av hela brons vikt en gång. Detta är en mycket grov uppskattning men som bedöms tillräckligt rimlig för att inkludera i studien även om dess värde mycket väl kan vara större såväl som mindre än den antagna materialvolymen. Vad gäller schaktvolymerna har dessa fått från produktion och bedöms på så vis vara tillräckligt tillförlitliga för att kunna inkluderas i studien. Det har här, likt antagandet för materialförflyttningen, antagits att förflyttning av schaktmassor motsvarar förflyttning av totala schaktvolymen en gång. Även här finns möjligheten att denna post kan vara högre eller lägre jämfört med det som antagits.

Driften av arbetsplatsen i övrigt har inte kunnat uppskattas på ett lämpligt sätt på grund av bristande information för det aktuella fallet. Vidare har det heller inte i denna studie tagits hänsyn till materialspill i samband med produktion. Det är osäkert vilken effekt inkludering av spill hade gett för de två brotyperna.

Samlat för denna fasen bedöms det att osäkerheter kring antaganden och uppskattningar ovan haft marginell påverkan på resultatet som helhet.

Underhållsfas

I Avsnitt 6.1.2 sida 40 togs det upp att typ av underhåll och frekvens av sådan är beroende av sådant som budget, antal inspektionstillfällen och nedbrytningstakten hos materialet (Du och Karoumi 2014). Det finns därmed generellt en stor osäkerhet för denna post. Som underlag till antaget underhållsbehov och frekvens har en studie av Safi (2013) använts i vilken data tagits fram genom inventering i Trafikverkets databas BaTMan. På så vis anses uppskattningen vara tillräckligt god för att kunna ta hänsyn till några utvalda underhållsparametrar under brons livslängd. Det finns däremot en stor osäkerhet huruvida antaget underhåll motsvarar det underhåll som kommer behövas för bron över Hovaån. Underhållsfasens storlek i förhållande till totalt utsläpp över livslängden är dock förhållandevis begränsad. Differensen för denna fas mellan de två broutförandena och tillhörande åtgärder är vidare ytterst marginell och bedöms därmed inte ha en stor inverkan på resultatet vid inbördes jämförelse mellan de olika utförandealternativen.

Slutbehandlingsfas

Denna fas inkluderar bland annat den diesel- och elförbrukning som krävs för att krossa betongen för återanvändning som fyllnadsmaterial i till exempel vägkonstruktioner. Förbrukningen är baserat på ett värde från en rapport av Stripple från 2001 och är därmed att anse som förhållandevis gammal. Utöver att konsumtionen av diesel och elförbrukning i sig är förhållandevis osäker för det studerade fallet medförs även en ytterligare osäkerhet till följd av denna använda datas höga ålder. Det bedöms dock att osäkerheternas inverkan på slutresultatet är marginell.

Det antas i denna studie att allt stål i såväl Betongbalkbron som Samverkansbron återvinns till 100 %. Återvinningsgraden av konstruktionsstålet i Samverkansbron visade sig efter utförd känslighetsanalys ha en betydande inverkan på slutresultatet. Detta diskuteras vidare i Avsnitt 8.2.4 nedan.

I denna fas antas det även att allt ingående material i bron transporteras till en närliggande återvinningscentral. Huruvida denna återvinningscentral har möjlighet att ta emot en så pass stor mängd byggavfall är oklart, säkert är enbart att de tar emot byggavfall. Det har i studien inte tagits hänsyn till vidare transport från återvinningscentral till plats för eventuell vidare hantering av avfallet. Istället har det valts att dra systemgränsen för livscykeln vid överlämning av material till återvinningscentralen.

8.2.3 Studiens miljöpåverkansbedömning

Då det i denna studie använts miljövarudeklarationer och databas från IVL har därmed inte någon egen klassificering och karakterisering gjorts för denna studie. Dessa antas ha gjorts på ett tillfredsställande sätt i de certifierade och tredjepartsgranskade miljövarudeklarationerna och bedöms således även kunna ses som tillförlitliga.

8.2.4 Studiens resultat och tolkning

Studiens resultat indikerar på att den globala uppvärmningspotentialen kopplat till materialtillverkningsfasen är för båda brotyperna den enskilt största bidragande livscykel-fasen. För Betongbalkbron utgör den mellan 75 - 79 % och för Samverkansbron utgör den mellan 71 - 81 % av total global uppvärmningspotential för respektive bro. För att reducera den globala uppvärmningspotentialen kopplad till varje bro finns det således störst potential genom att reducera utsläppen kopplat till denna fas.

Studien visar också på att utifrån valda emissionsvärden har åtgärden Val av armering störst effekt, det vill säga intervallet mellan klimateffektiv och klimatineffektiv, för Betongbalkbron (25 %) och åtgärden Val av stål störst effekt för Samverkansbron (22 %) enligt Tabell 6.7 sida 53. Störst enskild besparing för en ensam åtgärd fås dock för Betongbalkbron genom åtgärden Val av betong (-13 %) och för Samverkansbron genom åtgärden Val av stål (-11 %). Dessa resultat påverkas dock av de för nollalternativen ingående emissionsvärden, till exempel armeringsvärdet, som för bron över Hovaån var ett relativt klimateffektivt val.

Resultatet vid jämförelse av de två broutförandenas nollalternativ indikerar att lägst total global uppvärmningspotential fås för Betongbalkbron. Dock är skillnaden i resultatet endast cirka 4 % (721 ton CO₂-ekv. jämfört med 748 ton CO₂-ekv.) vilket anses vara inom felmarginalen på grund av de osäkerheter som finns kopplat till resultatet. Vid kombination av de enskilda åtgärderna indikeras det att Samverkansbron har både lägst och högst total global uppvärmningspotential. Således antyds det att Samverkansbron kan med klimateffektiva val bli den klimatt bästa bron och med klimatineffektiva val även bli den klimatt sämsta bron i jämförelse med Betongbalkbron i hänseende till total global uppvärmningspotential.

Från känslighetsanalysen, där påverkan av konstruktionsstålets återvinningsgrad undersöks, fås det att resultatet kopplat till Samverkansbron är känsligt för stålets återvinningsgrad. Stora skillnader i resultat fås då återvinningsgraden för konstruktionsstålet är 0 % jämfört med 100 %. Den globala uppvärmningspotentialen ökar för Samverkansbron med mellan 18 - 31 %. Vid jämförelse av nollalternativen för Samverkansbron och Betongbalkbron fås en skillnad i global uppvärmningspotential på 26 % (906 ton CO₂-ekv. jämfört med 721 ton CO₂-ekv) vilket inte anses vara inom felmarginalen. Om inte stålet kan återvinnas antyds det därmed att Betongbalkbron är det broutförande som ger lägst total global uppvärmningspotential.

Vid vidare studie av de enskilda åtgärderna Val av betong samt Val av armering får Samverkansbron enligt känslighetsanalysen med val av klimateffektiv betong respektive armering högre global uppvärmningspotential än Betongbalkbron med val av klimatineffektiv betong respektive armering. Även vid klimateffektiv kombination av de enskilda åtgärderna får Samverkansbron högre global uppvärmningspotential än Betongbalkbrons nollalternativ och vid klimatineffektiv kombination får Betongbalkbron ungefär samma utsläpp som Samverkansbrons nollalternativ, se Figur 6.9 sida 55. Detta visar kanske ännu tydligare på att konstruktionsstålets återvinningsgrad har stor påverkan för den globala uppvärmningspotentialen för Samverkansbron och därmed även resulterande jämförelse med Betongbalkbron.

8.3 Analys av bron över Hovaån i Klimatkalkyl

För analys av bron över Hovaån användes i denna studie Klimatkalkyl version 5.0 för bedömning av klimatbelastning i Trafikverkets mått mätta. Skillnaden mellan det totalt beräknade utsläppet varierar mellan de egna beräkningarna och beräkningar i Klimatkalkyl med mellan 20-33 % enligt Tabell 7.2 sida 59 och Tabell 7.3 sida 60. I Avsnitt 7.1 sida 57 lyftes de väsentliga skillnaderna mellan de egna beräkningarna genomförda i Kapitel 6 och beräkningar i Klimatkalkyl fram. En av de största skillnaderna mellan beräkninggångarna är vilka faser som inkluderas, något som vidare ger effekt i det resultat som erhölls. Klimatkalkyl inkluderar inte faserna underhåll eller slutbehandling och omfattar inte heller produktionsfasen i samma omfattning som i de egna beräkningarna. I de egna beräkningarna utgörs underhållsfasen till stor andel extra material som tillförs bron för ersättning av uttjänta delar av bron. Dessa material hade förvisso kunnat ta hänsyn till i studien genom att öka mängden betong, broräcke och lager som fördes in i Klimatkalkyl. Valet gjordes däremot att inte göra på detta sätt för att inkludera underhållsfasen i beräkningarna i Klimatkalkyl. Anledningen till detta är att verktyget inte ansågs vara avsett att användas på detta sätt då det i nuläget finns möjlighet att beräkna klimatbelastning för underhåll av Trafikverkets väg- och järnvägsprojekt. I nuläget är däremot underhåll av broar ännu inte inkluderat i verktyget. Även slutbehandlingsfasen hade delvis kunnat inkluderas i beräkningar genom

att lägga till den dieselkonsumtion och elförbrukning vilken är kopplad till krossningen av betong. På även denna punkt valdes att inte göra sådan kompensation då Trafikverket uttrycker i sin beskrivning av verktyget att de inte anser rivning av anläggningsprojekt vara av vikt att inkludera i beräkningarna (Toller och Norberg 2017). De skillnader som fås i resultatet mellan de egna beräkningarna och beräkningar i Klimatkalkyl uppstår i huvudsak av dessa val samt att det i Klimatkalkyl inte inkluderas transporter av något slag under brons livscykel.

Vid beräkning av den potential som uppskattas för respektive åtgärd med vald emissionsdata fås snarlika resultat vid jämförelse mellan de egna beräkningarna och beräkningar i Klimatkalkyl, redovisat i Tabell 7.4 sida 61. Klimatkalkyl antyder dock att det finns en något större potential hos åtgärderna än vad som uppskattats i de egna beräkningarna. Denna skillnad är kopplad till och kan förklaras av skillnad mellan de två tillvägagångssätten för beräkningarna som tidigare beskrevs. Klimatkalkyl pekar, liksom de egna beräkningarna, på att som enskild åtgärd är potentialen störst hos Samverkansbron för Val av stål och Val av armering för Betongbalkbron. Beräkningarna i Klimatkalkyl pekar även på att potentialen för kombinationsåtgärden för Samverkansbron är större än hos Betongbalkbron samt att både lägst och högst totalt utsläpp för kombinationsåtgärden fås för Samverkansbron. Även detta överensstämmer med de indikationer som erhöles vid de egna beräkningarna.

Det undersöktes även hur nollalternativen för de två broalternativen förhöll sig till dess klimatbelastning i 2015 års värde. Denna beräkning visade en besparing på 18 % för Betongbalkbron och 14 % för Samverkansbron. För detta broprojekt var inte huvudfokus att bygga bron med klimatfrågan som enskilt huvudsakligt fokus. Valet att använda till exempel armering från en leverantör med förhållandevis klimateffektivt utsläpp kopplat till sin produkt baserades sannolikt snarare på ekonomiska aspekter än på huvudsakliga miljöskäl enligt personer involverade i projektet. Det kan således diskuteras om kraven från Trafikverkets sida är för lågt ställda gällande reduktionspotentialen 17 % för broar vid slutförande mellan 2020-2024 när dessa, i ett förvisso enskilt fall, nåddes utan att miljöfrågan stod i huvudsakligt centrum.

8.4 Avslutande diskussion och rekommendationer

Under arbetets gång och efter utvärdering av de resultat som erhöles i Kapitel 5-7 har det blivit tydligt att det är så när som på omöjligt att få fram total miljöpåverkan kopplat till växthusgasutsläpp för en brokonstruktionsdel eller hel bro. Omfattningen, kvalitén på indata, antaganden och osäkerheter etc. har stor påverkan på slutresultatet vilket gör att det totala miljöpåverkansvärdet i sig självt inte kan anses vara helt sanningsenligt. Ambitionen att kartlägga total miljöpåverkan så heltäckande som möjligt för en hel bro eller brodel kan dock ge en uppfattning om det totala utsläppet, var utsläppen uppstår och hur dessa står i proportion till varandra.

Genom att kartlägga potentiell miljöpåverkan kan en ökad medvetenhet fås vilket kan leda till att utöver de tekniska och ekonomiska aspekter som redan vägs in vid projekteringen av broar att även miljömässiga aspekter kan vägas in. Med en ökad medvetenhet om hur exempelvis utsläpp för betongkonstruktioner uppstår kan man med ett förhållningssätt, där man har som utgångspunkt att minska mängden betong och öka mängden armering, med förhållandevis enkla medel potentiellt reducera växthusgasutsläppen även som brokonstruktör. Vid inköp och val av material kan man också genom medvetna val reducera växthusgasutsläppen, för stålkonstruktioner exempelvis genom att välja ett stål med hög återvinningsgrad. I rapporten *Klimatoptimerat byggande av betongbroar - Råd och vägledning* av SBUF (2017) belyses ytterligare konstruktionsrelaterade åtgärder utöver de som valts att studera i denna rapport. Diskussion har förts under arbetets gång att inkludera fler åtgärder, bland annat variation av betongkvalité för de brokonstruktionsdelar som tillåter detta. Med tanke på den arbetstid som är avsatt för detta arbete ansågs det dock att en eventuell kompromiss på arbetets kvalitet kunde uppstå vid inkludering av fler åtgärder.

För att ett broprojekt ska kunna minska sitt klimatavtryck och lyckas reducera växthusgasutsläppen är det också av stor vikt att alla olika aktörer inblandade i projektet kan kommunicera och samarbeta under hela projektets gång. Utan kommunikation mellan alla led spelar det mindre roll hur bra val av material som gjorts, hur mängderna har optimerats eller hur effektiv byggnationen har varit om resterande arbete görs utan någon tanke på att minska växthusgasutsläppen.

I syfte att nå det långsiktiga målet där Sverige ska ha noll nettoutsläpp av växthusgaser år 2045 kommer en

teknikutveckling och innovation kring klimatsmarta lösningar behövas, även inom anläggningsbranschen. Det anses därför vara av stor betydelse att kraven på utsläppsreduktion för anläggningsprojekt, på kort såväl som på lång sikt, är satta på sådan nivå att innovation och kreativitet kring klimatsmarta lösningar blir ett nödvändigt strategiskt steg för att som aktör i branschen kunna hålla en konkurrenskraftig ställning.

Kapitel 9

Slutsats

Syftet med rapporten var att undersöka, analysera och jämföra konstruktionsmässiga åtgärder för reduktion av växthusgasutsläpp hos brokonstruktioner. Applicerat på två olika referensobjekt, Vägporten och bron över Hovaån, har detta undersökts genom åtgärderna *Klimatoptimerat förhållande - mängd betong/mängd armering* och *Val av material*. För den första åtgärden, *Klimatoptimerat förhållande - mängd betong/mängd armering*, har tvärsnittshöjden för brobaneplattan för plattrambron Vägporten varierats varpå armeringsmängd har optimerats och resulterande växthusgasutsläpp beräknats. Den andra åtgärden, *Val av material*, har undersökts genom livscykelanalys för materialjämförelse mellan Samverkansbron och Betongbalkbron för bron över Hovaån. I livscykelanalysen uppskattades även potentialen för åtgärderna val av materialen betong, stål och armering för bron över Hovaån. I syfte att jämföra studiens egna livscykelanalysberäkningar för bron över Hovaån har jämförande beräkningar för åtgärden *Val av material* också utförts i Trafikverkets egna verktyg Klimatkalkyl. Vidare utvärderades i Klimatkalkyl även den besparing som erhållits jämfört med 2015 års emissionsvärde för respektive nollalternativ för de två broutförandena.

Utifrån syftet, tillvägagångssättet och resultatet av rapporten dras följande slutsatser, där rapporten visar att:

- genom optimering av förhållandet mängd betong/mängd armering så kan växthusgasutsläppen reduceras genom att för brobaneplattor i plattrambroar minska mängden betong och öka mängden armering.
- materialtillverkningsfasen är den dominerande livscykelfasen för bron över Hovaån.
- det vid jämförelse mellan nollalternativen för bron över Hovaån är svårt att avgöra vilket utförande som ger lägre global uppvärmningspotential under förutsättning att konstruktionsstålet återvinns till 100 %. Då det istället antas att återvinningsgraden är 0 % fås tydliga indikationer på att Nollalternativet för Betongbalkbron ger nämnvärt lägre global uppvärmningspotential än Nollalternativet för Samverkansbron.
- val av material, det vill säga val av leverantör för de ingående materialen betong, stål och armering, har stor påverkan på växthusgasutsläppen för bron över Hovaån.
- återvinningsgraden för konstruktionsstål har stor påverkan på global uppvärmningspotential för stålkonstruktioner.
- det fås liknande effekter av åtgärden Val av material vid jämförelse mellan beräkningar i Klimatkalkyl och egna beräkningar.
- besparingen för nollalternativen jämfört med 2015 års värde i Klimatkalkyl är 18 % för Betongbalkbron respektive 14 % för Samverkansbron.

För att undvika suboptimeringar och för att lyckas minska växthusgasutsläppen krävs det dock även kommunikation i alla led genom hela projektet och att såväl ekonomiska, tekniska som miljömässiga aspekter vägs in.

9.1 Vidare studier

Vid studie av optimering av förhållandet mängd betong/mängd armering bör alla delar av bron inkluderas och optimeras för att få ett ännu mer rättvist resultat gällande reduktion av global uppvärmningspotential. Genom att även studera fler antal broar och även olika brotyper kan resultatet stärkas ytterligare.

För att kunna studera och jämföra potentialen för åtgärden *Val av material* med *Klimatoptimerat förhållande - mängd betong/mängd armering* kan dessa göras för samma bro och för fler antal broar och brotyper.

Genom att inkludera fler miljöpåverkanskategorier än global uppvärmning kan en mer representativ bild gällande total miljöpåverkan beskrivas och jämföras för bron över Hovaån och Vägporten.

Ytterligare en konstruktörmässig åtgärd som hade varit intressant att se potentiell klimatpåverkan av är variation av betongkvaliteten i olika brodelar.

Litteraturförteckning

Al-Ayish Nadia. 2017. *Environmental Impact of Concrete Structures - with Focus on Durability and Resource Efficiency*. Lic. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

Björkström Anders och Tjernström Michael. [u.å. A]. Hållbar utveckling. *Nationalencyklopedin*. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/klimatf%C3%B6r%C3%A4ndring> (Hämtad 2018-02-06).

Björkström Anders och Tjernström Michael. [u.å. B]. Växthuseffekten. *Nationalencyklopedin*. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/v%C3%A4xthuseffekten> (Hämtad 2018-02-06)

Celsa Steel Service AS. 2012. *Steel reinforcement products for concrete - Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025 and EN 15804*. <https://gryphon4.environdec.com/system/data/files/6/8564/epd305%20Celsa%20Steel%20Service%202018.pdf>

Cementa. 2016. *Anläggningscement FA CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR* (Produktblad). <https://www.cementa.se/sv/anlaggningscement-fa>. (Hämtad 2018-03-16).

Cementa. u.å. A *Cementproduktion steg-för-steg*. <https://www.cementa.se/sv/cementproduktion-steg-för-steg> (Hämtad 2018-03-09).

Cementa. u.å. B *Nollvision för koldioxid*. <https://www.cementa.se/sv/nollvision2030> (Hämtad 2018-03-13).

Collings D. 2006. An environmental comparison of bridge forms. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering*. 159 (BE4): 163-168

Du Guangli och Karoumi Raid. 2013. Life cycle assessment of a railway bridge: comparison of two superstructure designs. *Journal of Structure and Infrastructure Engineering*. 9 (11): 1149-1160

Du Guangli och Karoumi Raid. 2014. Life cycle assessment framework for railway bridges: litterature survey and critical issues. *Journal of Structure and Infrastructure Engineering*. 10 (3): 277-294

Du Guangli, Safi Mohammed, Pettersson Lars och Karoumi Raid. 2014. Life cycle assessment as a decision-making support tool for bridges: comparing five design proposals. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 19 (12): 1948-1964

Du Guangli, Pettersson Lars och Karoumi Raid. 2015. Life cycle environmental impact of two commonly used short span bridges in Sweden.

EMV Construction AS. 2014. *Environmental Product Declaration - Welded plated beams: HSQ, ISQ and HSK*. <http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/St%C3%A5lkonstruksjoner/NEPD-00231-Welded-plated-beams.pdf>. (Hämtad 2018-0425)

EN 15804:2012. *Sustainability of Construction Work - Environmental Product Declarations - Core Rules for the product category of construction products*. European Committee for Standardization, Swedish Standards Institute. Stockholm, Sverige.

Energimyndigheten 2015. *Växthusgasberäkning*. <http://www.energimyndigheten.se/fornybart/hallbarhetskriterier/hallbarhetslagen/fragor-och-svar/vaxthusgasberakning/> (Hämtad 2018-03-16).

Energimyndigheten. 2017. *Nulägesanalys - Underlag till regeringsuppdrag: Uppdrag att genomföra innovationsfrämjande insatser för att minska processindustrins utsläpp av växthusgaser*. <https://energimyndigheten.a-w2m.se/Home.mvc?ResourceId=5691>

- EPD International AB. [u.å. A]. Vad är en EPD? *EPD - The International EPD System*. <http://www.environdec.com/sv/what-is-an-EPD/> (Hämtad 2018-03-09).
- EPD International AB. [u.å. B]. Building Assessment Schemes. *EPD - The International EPD System*. <http://www.environdec.com/sv/what-is-an-EPD/Anvandningsomraden/Building-assessment-schemes/>. (Hämtad 2018-03-09).
- Eriksen J. 2009. Bro utan lager vinnare när miljöanalys görs. *Husbyggaren* Nr. 2: 18-21.
- Gervásio H. och Simões da Silva L. 2008. Comparative lifecycle analysis of steel-concrete composite bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*. 4 (4), 251-269
- Gröndahl Fredrik, Svanström Magdalena. 2011. *Hållbar utveckling - en introduktion för ingenjörer och andra problemlösare*. Uppaga 1. Stockholm: Liber AB.
- Guinée J.B. 2002. *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*. Eco-efficiency in industry and science: v. 7. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers, c2002.
- Hammervold Johanne, Reenaas Marte och Brattebø Helge. 2013. Environmental Life Cycle Assessment of Bridges. *Journal of Bridge Engineering*. 18 (2): 153-161
- Horvath A. och Hendrickson C. 1998. Steel vs steel-reinforced concrete bridges: Environmental assessment. *Journal of Infrastructure systems ASCE*. 4 (3): 111-117
- International Panel on Climate Change [IPCC] (FN:s klimatpanel). 2013. *Climate Change 2013 The Physical Science Basis (Fifth assessment report, AR5)*. http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf
- ISO 14044:2006 *Miljöledning - Livscykelanalys - Krav och vägledning*. European Committee for Standardization, Swedish Standards Institute. Stockholm, Sverige.
- Itoh Y. och Kitagawa T. 2003. Using CO₂ emission quantities in bridge lifecycle analysis. *Engineering Structures*. 25 (5): 565-577
- Jernkontoret. u.å. *Processer*. <http://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/processer/> (Hämtad 2018-03-08).
- Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien [IVA] och Sveriges Byggindustrier 2014. *Klimatpåverkan från byggprocessen - En rapport från IVA och Sveriges Byggindustrier*. <https://www.iva.se/globalassets/rapporter/ett-energieffektivt-samhalle/201406-iva-energieffektivisering-rapport9-i1.pdf> (Hämtad 2018-02-16)
- Klöpffer Walter och Grahl Birgit. 2014. *Life Cycle Assessment (LCA) A Guide to Best Practise*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KgaA.
- Ledin Thomas (BRITEK). 2018. E-mail 22 februari.
- Lounis Z. och Daigle L. 2007. Environmental benefits of life cycle design of concrete bridges. *Proceedings of the 3rd International Conference on Life Cycle Management, Zurich, Switzerland, August 27-29 2007*. 293, 1-6
- Martin A.J. 2004. Concrete bridges in sustainable development. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*. 157 (4): 219-230
- Naturvårdsverket. u.å. *Koldioxidekvivalenter*. <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-0/Vaxthugaser-konsumtionsbaserade-utslapp-fran-exporterande-foretag/Koldioxidekvivalenter/> (Hämtad 2018-02-09).
- Norsk Stål AS. 2015. *Environmental Product Declaration - Ribbed Reinforcement Bars*. http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/St%C3%A5lkonstruksjoner/NEPD-347-238-EN_Ribbed-reinforcement-bars.pdf (Hämtad 2018-04-06)
- Proposition 2016/17:16. *Godkännande av klimatavtalet från Paris*. <http://www.regeringen.se/4a75ca/contentassets/618f83b8918f4f34bb1ae06b62aae8f2/godkannande-av-klimatavtalet-fran-paris-prop.-20161716>
- Regeringen. 12 juni 2017. *Det klimatpolitiska ramverket*. <http://www.regeringen.se/artiklar/2017/06/det-klimatpolitiska-ramverket/> (Hämtad 2018-02-06).

- RUUKKI. 2014. *Environmental Product Declaration Structural Steel Construction Products*. https://cdn.ruukki.com/docs/default-source/b2b-documents/epd/environmental-product-declaration-for-structural-steel-construction-products.pdf?sfvrsn=51e5c884_14 (Hämtad 2018-03-19).
- Rydh Carl Johan, Lindahl Mattias och Tingström Johan. 2002. *Livscykelanalys - en metod för miljöbedömning av produkter och tjänster*. Upplaga 1:7. Lund: Studentlitteratur.
- Safi Mohammed. 2013. *Life-Cycle Costing - Applications and Implementations in Bridge Investment and Management*. Diss. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Scanscot Technology, u.å. *BRIGADE/Standard*. <https://scanscot.com/products/bridge-design/brigade-standard/>. (Hämtad 2018-04-16)
- Scientific Applications International Corporation [SAIC] 2006. *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. Work Assignment 3-15, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. <http://www.cs.ucsb.edu/~chong/290N-W10/EPAonLCA2006.pdf>
- Skanska Asphalt och Betong. 2017. *Environmental Product Declaration - Frostbeständig betong med Anläggning FA*. http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/Betongvarer/NEPD-1328-427_Frostbest--mdig-betong-med-Anl--ggning-FA.pdf. (Hämtad 2018-03-16).
- SS 137003:2015 *Betong - Användning av SS-EN 206 i Sverige*. Swedish Standards Institute. Stockholm, Sverige.
- SS-EN 206:2013 *Betong - Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse*. Swedish Standards Institute. Stockholm, Sverige.
- Steele K., Cole G., Parke G. och Harding J. 2003. Highway bridges and environment: Sustainable perspectives. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 156 (4): 176-182
- Stripple Håkan. 2001. *Life Cycle Assessment of Road - A Pilot Study for Inventory Analysis*. Rapport/IVL Svenska Miljöinstitutet.
- Svensk Betong. 2017a. *Betong och klimat - En rapport om arbetet för klimatneutral betong*.
- Svensk Betong. 2017b. *Environmental Product Declaration Betong för Vägbro*. http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/Betongvarer/NEPD-1294-420_Betong-f--r-v--gbro.pdf. (Hämtad 2018-04-18).
- Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond [SBUF]. 2017. *Klimatoptimerat byggande av betongbroar - Råd och vägledning*. SBUF-projekt 13207
- Swedish Standards Institute (SIS), u.å. *ISO 14001 Ledningssystem för miljö*. <https://www.sis.se/iso14001/>. (Hämtad 2018-01-30.)
- Thiebault V. 2010. *Design of railway bridges considering LCA*. Masteruppsats Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Toller Susanna och Norberg John. 2017. *Klimatkalkyl version 5.0 - Beräkning av infrastrukturens klimatpåverkan och energianvändning i ett livscykelperspektiv*. Trafikverket
- Trafikverket. 2016a. *TDOK 2016:0203 - Råd Brobyggande*.
- Trafikverket. 2017. Frågor och svar om klimatkrav. *Trafikverket*. <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/miljo---for-dig-i-branschen/energi-och-klimat/klimatkrav/fragor-och-svar-klimatkrav/>. (Hämtad 2018-03-09)
- Trafikverket. 2016b. *Effektkatalogen "Bygg om eller bygg nytt"*. Trafikverket
- Trafikverket. 2018. *TDOK 2015:0480 - Klimatkrav i planläggning, byggskede, underhåll och på teknisk godkänt järnvägsmateriel*.
- UPB AS. 2016. *Environmental Product Declaration - Steel Structures*. http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/Stalkonstruksjoner/NEPD-402-281-EN_Steel-structures.pdf (Hämtad 2018-04-06)
- Widman, J. 1998. Environmental impact assessment of steel bridges. *Journal of Constructional Steel Research*. 46 (1): 291-293