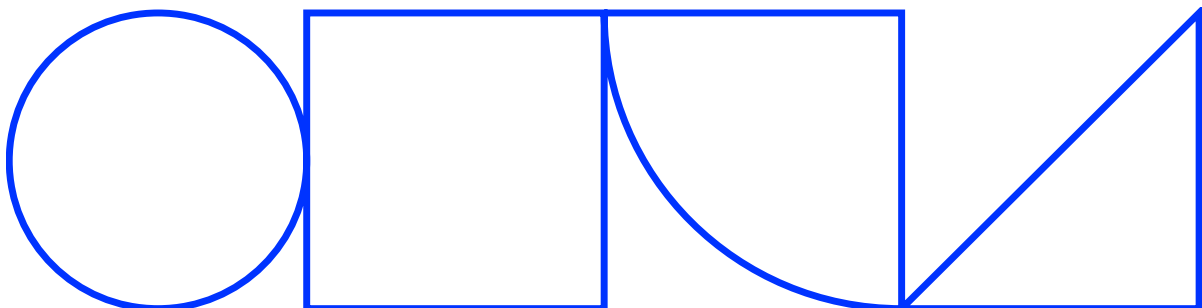
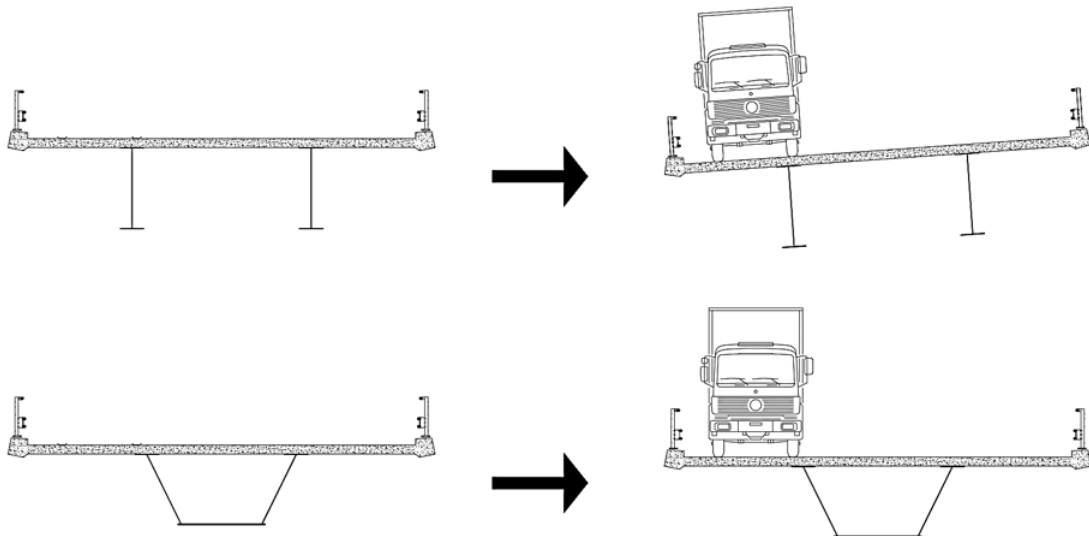


# Effektivare I-balksbroar genom lådverkan

Composite I-girder bridges with lateral bracing – improved load distribution

Victor Vestman & Peter Collin  
Luleå Tekniska Universitet

2023-08-31



## Förord

Rapporten beskriver en studie av en innovativ metod för att minska spänningar av främst excentrisk utmattningslast i äldre samverkansbroar av I-balkstyp. Projektet har genomförts av Victor Vestman, Peter Collin och Robert Hällmark (Luleå tekniska universitet, LTU). Projektet är en vidarestudie/fördjupning på det tidigare SBUF-projektet, ID 13287.

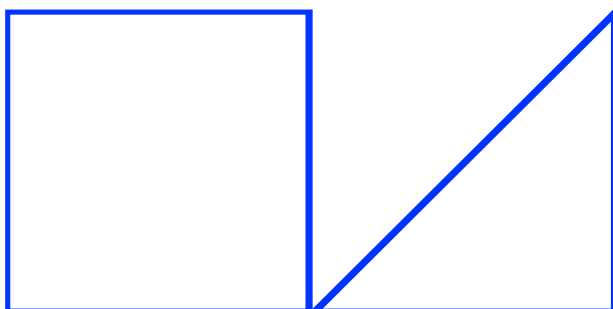
Projektet har följts av en referensgrupp bestående av

- Martin Laninge, bro- och tunnelsexpert på PEAB
- Thomas Blanksvärd, tidigare på Skanska, nuvarande teknisk direktör på Consolis
- Hans Petursson, stålbroexpert på Trafikverket
- Javier Jordan Garcia, konstruktör på PEDELTA, Barcelona
- Timo Tirkkonen, utvecklingschef R&D på Liikennevirasto, Finska Trafikverket
- Knut Grefstad, chefsingenjör på Statens Vegvesen, Norska Trafikverket

Projektet är en del av licentiatarbetet *Composite I-girder bridges with lateral bracing – improved load distribution* (Vestman, 2023) som har stöttats av

- Trafikverkets Branschprogram BBT
- Liikennevirasto, Trafikverket i Finland
- Rambollfonden, Danmark
- Ramboll Sverige AB

Luleå, augusti, 2023



## Sammanfattning

Med tiotusentals gamla stål- och samverkansbroar runt om i Europa finns det behov av rationella metoder för förstärkning av dessa. Detta inte bara för att kompensera för deras åldrande, utan även för att kunna tillåta högre belastningar i framtiden. Att kunna förstärka och spara äldre broar på ett för entreprenören effektivt sätt bidrar även till en minskad miljöpåverkan, samtidigt som trafikstörningar kan minimeras genom innovativa förstärkningsmetoder. Underhåll av befintliga broar kommer att vara en växande utgift för broförvaltare, vilket innebär att kostnadsbesparande koncept är viktiga både för kostnadseffektiv broförvaltning samt för att minska miljöbelastningen vid byggande av nya broar. För att förlänga den tekniska livslängden på dessa broar kan olika metoder användas, beroende på vilka specifika förutsättningar som råder.

I detta arbete presenterar en möjlig metod för att förlänga befintliga broars livslängd. Metoden innebär att ett horisontellt fackverk installeras på en samverkans bro bestående av två I-balkar av stål med en ovanliggande samverkande betongfarbana. Fackverket installeras mellan de nedre flänsarna på stålbalkarna, detta medför att tvärsnittet blir slutet, vilket ger en ökad vridstyvhet. Den ökade vridstyvheten möjliggör en förbättrad lastfördelning av excentriska laster, till exempel trafiklast placerad på farbanans konsoler, mellan stålbalkarna.

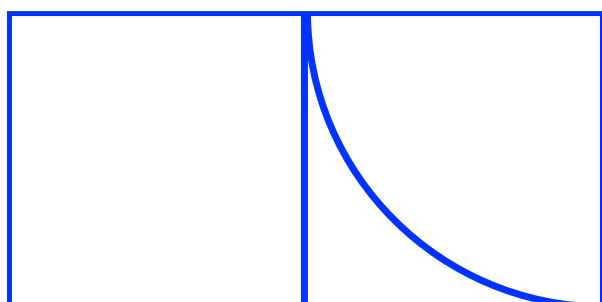
En underökning har utförts i projektet för att samla in kunskap om hur metoden med horisontellt fackverk mellan underflänsarna i samverkansbroar används i andra länder, för nybyggnationer och förstärkning av broar. I undersökningen har det också undersökts varför horisontella fackverk används och om detta skiljer sig åt i de länder där metoden förekommer. Arbetet har inte funnit att fackverk används som en förstärkningsmetod på samverkansbroar. Det har dock visats i ett flertal fallstudier som utförts i projektet att metoden är gynnsam för lastfördelningen av excentriska laster. För ett traditionellt samverkanstvårsnitt på en bro i de nordiska länderna, bestående av två stålbalkar med en samverkande betongfarbana, kan fördelningen av en excentrisk last, lasten placerad rakt ovanför ena stålbalken, förbättras från en fördelning 100/0 % (mest belastad/minst belastad balk) till en fördelning på 70/30 %. Den förbättrade lastfördelningen innebär lägre vertikal nedböjning av den mest belastade stålbalken, vilket då även innebär en lägre böjspänning. Den lägre spänningen kan ha stor inverkan på bärförmågan i brott, men kan ha ännu större inverkan på bärförmågan i utmattningstillståndet.

I de utförda fallstudierna har även påverkan på befintliga konstruktionsdelar, utöver de primära bärverksdelarna (I-balkarna), studerats. Det har visats att påverkan på övriga konstruktionsdelar är till stor del positiv då ett öppet tvärsnitt ändras, med hjälp av fackverket, till ett slutet tvärsnitt. De längsgående förskjutningskrafterna mellan stål och betong som påverkar skjuvförbindarna minskar generellt över brolängden, dock fås en lokal ökning vid tvärförbanden mellan balkarna av den horisontella komponenten som uppstår där välvning av tvärsnittet är förhindrad. En ökning av de normalkrafter som uppkommer i tvärförbandens element har konstaterats, dock har de ökade normalkrafterna för de fallstudier som utförts varit av dignitet så att de begränsar den positiva effekten av det slutna tvärsnittet. Förhoppningen är att sammanfatta de totala

påverkningarna gällande samtliga befintliga konstruktionsdelar i en artikel. Artikeln är planerad att publiceras i slutet av 2023.

# Innehåll

1. Inledning	1
2. Bakgrund	4
2.1 Syfte och mål	4
3. Användandet i andra länder	5
3.1 Frankrike	5
3.2 USA och Sydamerika	6
3.3 Finland	8
4. Fallstudier	10
5. Påverkan på existerande konstruktion	13
6. Detaljutformning	15
7. Diskussion och slutsatser	17
Referenser	19
Bilagor	20

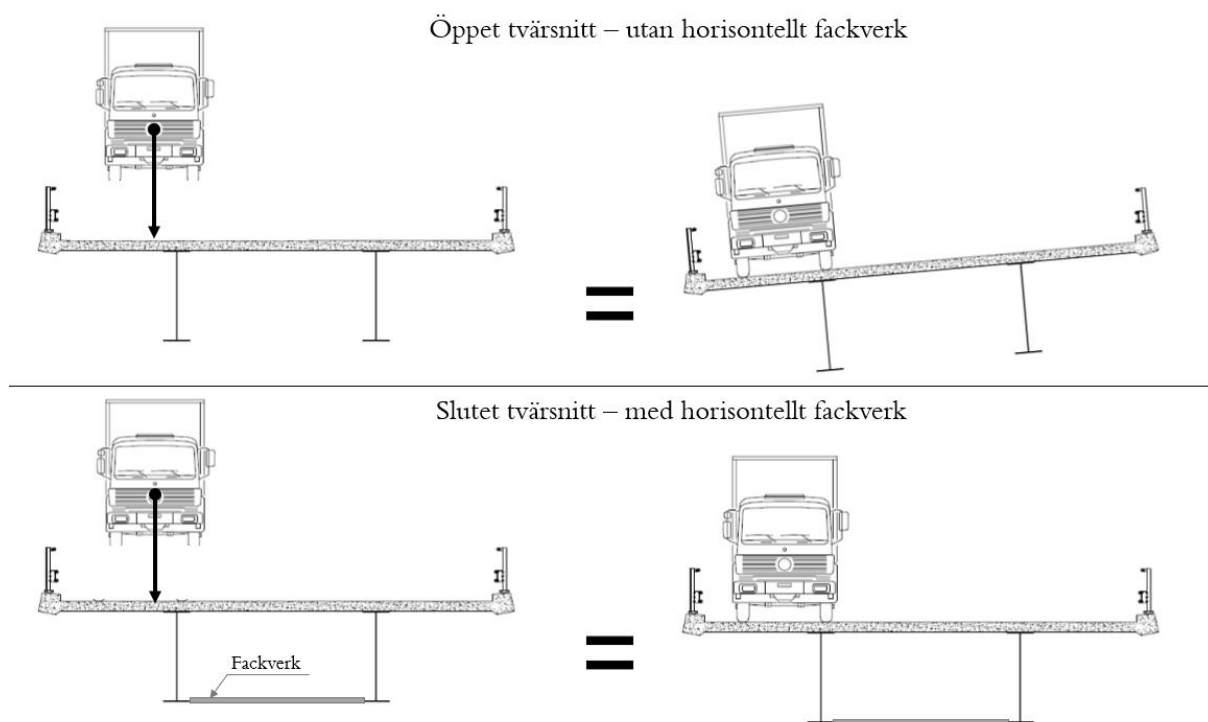


# 1. Inledning

Under de senaste årtiondena har europeiska vägar och järnvägar haft en ökning av trafik, både när det gäller volym och belastningsintensitet. Detta har lett till en ökad takt av nya väg- och järnvägsprojekt för att möta efterfrågan, och brostrukturer är ofta involverade i nya infrastrukturprojekt. När en ny bro byggs behövs en till bro underhållas. Dessutom är många befintliga broar utformade för lägre trafikbelastning och volym än dagens standard. Genom relativt små åtgärder kan en broslängd förlängas (Habel & Harvey, 2022). Den mest kostnadseffektiva åtgärden ur ett samhällsekonomiskt perspektiv är ofta att förstärka bron för att uppfylla de nya kraven. Idag har många olika typer av förstärkningsmetoder studerats och i vissa fall testats på befintliga broar. I de nordiska länderna byggs samverkansbroar i stål och betong huvudsakligen med en konstruktion av en ställåda eller två svetsade I-balkar (Collin, Johansson & Sundquist, 2011). Båda typerna av balksektioner används med en ovanpåliggande betongfarbana som förbinds samman med skjuvförbindare. Konceptet med en ställåda började att användas mycket senare än konceptet med I-balkar, vilket innebär att ett större antal broar med I-balkstvärsnitt kan behöva förstärkas för ökad belastningskapacitet.

Efter införandet av de europeiska normerna, Eurokoder, har kraven på utformning avseende utmattning blivit strängare. Många länder har justerat dessa krav för att bättre överensstämja med tidigare använda krav genom att ändra säkerhetsfaktorn för utmattning,  $\gamma_{Mf}$ , eller genom att justera medelvikten för lastbilarna,  $Q_{m1}$  (Sousa et.al., 2019). Olika tillvägagångssätt kan användas för att förlänga livslängden för befintliga stål- och kompositbroar avseende utmattning. Några av dem är att: skapa samverkan mellan stålet och betongen med hjälp av efterinstallerade skjuvförbindare för de broar som är dimensionerade utan samverkan; öka detaljkategorin i avseende på utmattning genom till exempel efterbehandling av svetsarna; reducera spänningarna genom att lägga till mer material och därigenom öka böjstyvheten; ändra det statiska systemet och på så sätt minska tvärsnittskrafterna i de primärt bärande konstruktionsdelarna.

Detta projekt fokuserar på en förstärkningsmetod där tvärsnittet för broar med I-balkstvärsnitt kompletteras med ett horisontellt fackverk. Fackverket fästs mellan underflänsarna på I-balkarna. Fackverket har syftet att öka vridstyvheten hos det samverkande brotvärsnittet, vilket omvandlar det öppna tvärsnittet av I-balksystemet till att bete sig mer som ett slutet tvärsnitt, ett lådtvärsnitt. Figur 1 illustrerar skillnaden mellan vridning av ett öppet- och slutet tvärsnitt för en excentrisk last.



Figur 1. Vridning av ett samverkanstvårsnitt med I-balkar med och utan fackverk mellan underflänsarna.

Detta innebär en metod där kombinationen av att ändra det statiska systemet och lägga till mer material används för att öka bärförmågan med avseende på utmattning och/eller den statiska bärförmågan (lastbärförmågan), och därmed förlänga bros livslängd. Projektet har också fokuserat på att undersöka om och hur andra länder använder ett horisontellt fackverk mellan underflänsarna på nya broar, och i sådana fall i vilken utsträckning. Dessutom om horisontellt fackverk har använts för förstärkning av existerande samverkansbroar. Tidigare studier har utförts gällande de teoretiska förutsättningarna för det horisontella fackverket samt hur olika fackverkstyper och konfigurationer påverkar vridstyvheten. Dessa tidiga studier är delvis presenterade i SBUF-rapporten ID-13287, *Förlängning av gamla stålbroars livslängd genom lådverkan*. Arbetet som presenteras i denna rapport är således en vidare studie på metoden med att förstärka samverkansbroar med I-balkstvårsnitt med hjälp av ett horisontellt fackverk. Utöver den tidigare nämnda omvärldsstudie gällande användandet av horisontella fackverk i nya- och befintliga broar så har ett flertal fallstudier utförts i projektet för att undersöka påverkan på befintliga konstruktionsdelar och då inte enbart de primära bärverksdelarna som i tidigare studier.

Projektet är en del av ett licentiatarbete (Vestman, 2023) som inom tidsramen för projektet har publicerats och presenterats under ett licentiatseminarium, se Figur 2. Diskussionsledare under seminariet var stålbrospécialist Hans Pétursson från Trafikverket.



*Figur 2. Gruppbild från licentiatseminariet den 12 maj 2023 på Luleå Tekniska Universitet. Foto: Per Pettersson*



## 2. Bakgrund

### 2.1 Syfte och mål

Syftet med projektet är att med tyngre, mer frekvent trafik och samtidigt strängare kunna behålla många av de svenska samverkansbroarna som inte kommer att hålla måttet för omräkning enligt gällande normer, Eurokod. Vidare ska potentialen i att använda konceptet för nya broar studeras. Hypotesen är att återstående livslängd för existerande samverkansbroar av I-balkstyp skulle kunna förlängas kraftigt genom att addera ett fackverk som gör tvärsnittet vridstyvt och därigenom får balkarna att dela på lasteffekter av excentrisk last.

Detta är utgångspunkten för arbetet med följande forskningsfrågor:

- 1) I vilken utsträckning har konceptet använts på nya (och ev. gamla) broar runt om i världen?
- 2) Vilken potentiell nytta kan konceptet ge på en ny I-balksbro, jämfört med en I-balksbro utan fackverk respektive en bro med lådtvärsnitt?
- 3) Hur mycket längre livslängd med avseende på utmattning kan förväntas om en gammal samverkansbro förstärks med ett fackverk mellan underflänsarna?
- 4) Hur påverkas den befintliga bronns tvärförband och betongfarbana av förstärkningen?
- 5) Hur bör ett fackverk avsett för förstärkning, med avseende på både utmattningsdetaljer och produktionsaspekter, utformas samt fästas till befintlig bro?

### 3. Användandet i andra länder

En studie gällande användandet av horisontellt fackverk mellan underflänsarna på samverkansbroar med I-balkar har utförts i projektet. Studien har innefattat både insamling av litteratur, vilket har givit begränsat material, samt enkätundersökningar och kontakt med broägare och konstruktörer i ett flertal länder. Inom litteraturen förekommer horisontellt fackverk främst att innefatta horisontellt fackverk mellan överflänsarna för att stabilisera tvärsnittet, I-balkar och lådbalkar med två överflänsar, under konstruktionsskeden. Under dessa förutsättningar hjälper det horisontella fackverken att stabilisera tvärsnitt som antingen har excentriska laster eller har någon form av horisontell radie d.v.s. att bron ligger i kurva och på så sätt påverkas av ett vridande moment (Fan & Helwig, 1999). För att undersöka huruvida horisontella fackverk används mellan underflänsarna har konstruktörer och broägare kontaktats. Figur 3 illustrerar skillnaden mellan två möjliga användningsområden för horisontella fackverk.



Figur 3. Horisontellt fackverk mellan överflänsar (vänster) och mellan underflänsarna (höger)

Följande kapitel redovisar hur några länder förhåller sig till användandet av horisontella fackverk i samverkansbroar mellan underflänsarna. Samt några exempel på broar där metoden har använts.

#### 3.1 Frankrike

I Frankrike är det vanligt att använda ett horisontellt fackverk mellan underflänsarna på I-balkarna på samverkansbroar för tågtrafik där man har två spår (Berthelley, Labourie & Leconte, 2002). Vid enspåriga tågbroar har man generellt spåret mitt mellan balkarna, vilket av enbart vertikal tågtrafiklast inte ger upphov till märkbara vridmoment, och således minimeras nyttan av ett slutet tvärsnitt. För broar med två spår används således fackverket för att reducera den nedböjningen som uppkommer av vridningen och på så sätt reduceras även accelerationen som kan ge upphov till sämre åkkomfort. En annan möjlig, men i de flesta fall dyrare, metod är att öka styvheten på de två I-balkarna (Berthelley, Labourie & Leconte, 2002).

Ett praktiskt exempel på en bro där skillnaden mellan I-balkar med horisontellt fackverk och ett lådtvärsnitt har utförts är bron Lille Porte Sude, Figur 4. Den ursprungliga planen var att bygga bron med ett lådtvärsnitt, men efter att ett förslag med I-balkar och horisontellt fackverk mellan underflänsarna presenterats valdes detta i stället för lådtvärsnittet. Detta då man med lägre kostnader och mindre material kunde uppnå samma kravnivå som för lådtvärsnittet. Konstruktionen med I-balkar och fackverk sparade runt 15 % av den totala stålmängden (Berthelley, Labourie & Leconte, 2002).



Figur 4. Vy från undersidan av bron, (Google, n.d).

### 3.2 USA och Sydamerika

En enkätundersökning skickades ut till alla 50 transportavdelningar i USA med hjälp av Harry White på New Yorks transportavdelning, NYSDOT. Av dessa 50 så svara 30 avdelningar på enkäten som innefattade frågeställningar huruvida horisontella fackverk används i nybyggnationer och ifall de har använts som förstärkningsåtgärd på befintliga broar. Dessutom ställdes frågan ifall de i sina normregler har definierat om fackverk får användas och i sådana fall hur. Endast tre avdelningar hade underlag som reglerade användandet av fackverk. För raka broar, utan horisontalradie, uppmuntrade två avdelningar användandet av horisontellt fackverk då spännvidderna var större än 43 meter, men enbart om det kunde påvisas att fackverket var nödvändigt för stabilitet eller bärförmåga. Den tredje avdelningen hade begränsningar som påpekade att fackverk skall användas för broar med horisontalradie, oberoende av storlek på radien.

Transportmyndigheten, Federal Highway Administration, ha gett ut ett antal detaljförslag på hur fackverk kan fästas mellan underflänsarna samt hur dessa ska samordnas med till exempel livavstyvningar. I en vanligt förekommande brotyp i USA, samverkansbro med ett flertal längsgående stålbalkar, används fackverk mellan de yttre balkarna. Att broarna oftast har fler än två balkar beror till stor del på hur myndigheterna har tolkat kritiska delar, där ett system med två balkar anses vara kritiska delar som vid brott orsakar kollaps av hela systemet. För sådana delar krävs en högre grad av kontroll vid tillverkning och konstruktion än för delar som kan antas vara icke kritiska.

I Figur 5 ses en bro med rosttrött stål samt det typiska tvärsnittet med ett flertal balkar, fler än två. Fackverket mellan de yttre balkarna är också synligt i figuren.



*Figur 5. Bro med vy från undersidan, visar brotvärsnittet med tvärförband och horisontellt fackverk. Källa: Harry White*

I Guatemala återfinns en bro som visar på användandet av horisontellt fackverk mellan flänsarna för både konstruktionsskeden och bruksskeden. Oxecbron är en flerspanns bro med tre längsgående balkar och en samverkande betongfarbana. Bron har fackverk både mellan överflänsarna och underflänsarna, se Figur 6. Mellan överflänsarna används fackverket för att stabiliseras bron innan betongfarbanan är på plats. Så både under konstruktionsskedet och senare i bruksskedet så har man ett tvärsnitt där de tre balkarna med fackverken fungerar som två intilliggande lådor. Fackverket mellan överflänsarna tappar i princip sin funktion när betongen har härdnat. Fackverket mellan underflänsarna däremot kommer att upprätthålla det slutna tvärsnittet med sina fördelar.



*Figur 6. Oxecbron i verkstad. Källa: PEDELTA*

### 3.3 Finland

Ett horisontellt fackverk mellan underflänsarna på en samverkansbro har använts sedan tidigt 1970-tal (Lilja, H, personlig kommentar, oktober 7, 2021). Användandet av fackverk med avseende att stabiliseras tvärsnittet mot horisontella laster har använts mycket längre (Lilja, H, personlig kommentar, oktober 7, 2021).

I de nationella riktlinjerna återfinns rekommendationer att använda ett horisontellt fackverk mellan I-balkarnas nedre del för broar med spännvidder mellan 50–70 m (Liikenneviraston, 2016). Där det i praktiken generellt ses som ett krav för broar med spännvidder över 70 m.

Normalt används fackverk konfigurerade som K-fackverk mellan I-balkar i Finland. K-fackverk är fördelaktigt eftersom de inte medför någon ytterligare styvhet till underflänsarna i global böjning. Dessutom inducerar K-fackverket inte någon ytterligare påkänning på huvudbalkarna, om systemnoderna sammanfaller mellan konstruktionsdelarna.

Nedan återfinns två exempel på broar där horisontellt fackverk har använts mellan underflänsarna, Jännevirtabron och Kaitanenbron.



*Figur 7. Jännevirtabron under konstruktion. Källa: Ramboll Finland*



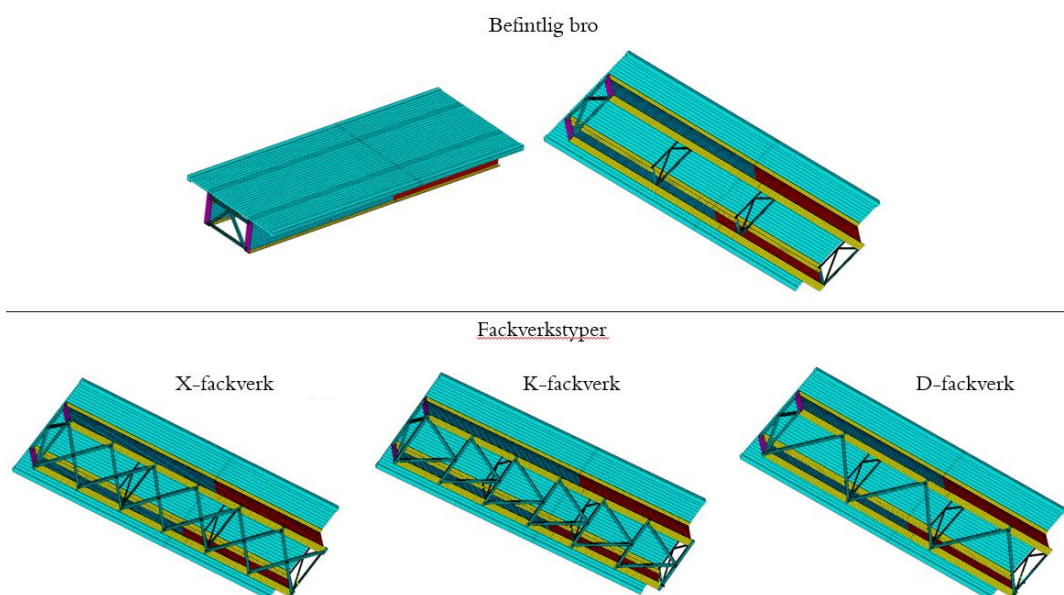
*Figur 8. Kaitanenbron. Källa: Heikki Liija*

## 4. Fallstudier

I följande fallstudier har befintliga broar använts för att utvärdera beteendet och påverkan av att lägga applicera ett horisontellt fackverk mellan underflänsarna på stål balkarna. I föregående kapitel beskrevs användandet av horisontella fackverk runt om i världen. I detta avsnitt beskrivs kort med en förklaring om hur ett antal broar användes som fallstudier i detta forskningsprojekt. Några av broarna har använts i andra forskningsprojekt, vilket också nämns i beskrivningarna nedan. Tillsammans innefattar dessa fyra fallstudier broar som är fritt upplagda och kontinuerliga, utan befintligt fackverk mellan de underflänsarna samt broar med befintligt fackverk. Dessutom innefattar fallstudierna broar med två- eller fler längsgående I-balkar.

### *Fallstudie 1 – Pitsundsbron (Sverige)*

Pitsundsbron har använts i ett tidigare forskningsprojekt där resultaten av mätningarna är publicerade i bland annat doktorsavhandlingen, (Hällmark, 2018). Bron har tre olika tvärsnittsammansättningar. Den första delen blev förstärkt 2006 med efterinstallerade skjuvförbindare för att skapa samverkan mellan stål och betong, vilket ligger som bakgrund till arbetet av Hällmark, 2023. Den andra delen var ursprungligen konstruerad som en samverkansbro med ställåda och betongfarbana. Den tredje delen består av två spann där stål balkarna och betongfarbanan inte är dimensionerade med samverkan. Den sista delen var utvald för fallstudien. Fallstudien bygger på att bron blir förstärkt med samverkan, likt den första delen av bron, men att ytterligare förstärkningsåtgärder var nödvändiga. Den ytterligare förstärkningsåtgärden som analyserades var metoden med horisontellt fackverk mellan underflänsarna. I analysen så jämfördes ett flertal olika konfigurationer på fackverket och deras inverkan på böjspänningarna i de två balkarna av en excentriskt placerad last. De olika konfigurationerna av fackverket är illustrerade i Figur 9. En del av resultaten från denna studie finns även publicerade i rapporten SBUF-ID 13287 och dess bilagor.



Figur 9. Fackverkstyper analyserade i fallstudien med Pitsundsbron.

### *Fallstudie 2 – Östre Trösken bru (Norge)*

Bron Östre Trösken blev 2021 utvärderad och man fann att vippning av underflänsarna begränsade bärförmågan för böjmoment. Bron är byggd 1967 och består av två I-balkar med varierande tvärsnittshöjd längs med brolängden. Bron har tre spann och balkarna har en ovanpåliggande farbana. Tvärsnittet är dimensionerat utan samverkan. Bron har ett befintligt horisontellt fackverk, som benämns vindfackverk på ritningarna. Tanken med fackverket är nog att stabileras balkarna och sprida ut horisontella laster, t.ex. vindlast. En av förstärkningsförslagen innefattade efterinstallation av skjuförbindare för att skapa samverkan. Tvärsnittet skulle rent dimensioneringsmässigt fungera som ett slutet tvärsnitt i och med det befintliga fackverket mellan underflänsarna. Konstruktionselementen för fackverket var dock relativt slanka och frågan uppstod ifall dessa skulle vara tillräckliga.

Bron har använts som en fallstudie där bronns beteende med och utan fackverk samt med och utan samverkan har studerats. Även påkänningarna på det befintliga fackverket har studerats då man antar olika sorters tvång mellan stål och betong som kan uppstå, även utan skjuförbindare.

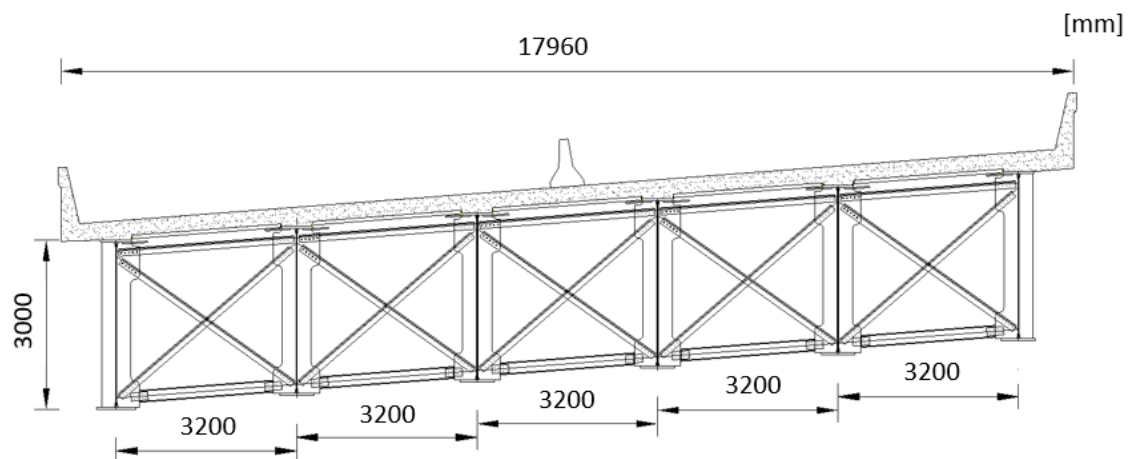
### *Fallstudie 3 – Bro över Yxlökanal (Sverige)*

För att studera hur ett horisontellt fackverk påverkar ingående delar på en traditionellt vanlig samverkansbro i Sverige har bron över Yxlö kanal söder om Stockholm används som fallstudie. Bron är byggd 1961 och består av två I-balkar med en ovanpåliggande farbana, en vanligt förekommande brotyp i Sverige. Bron är dimensionerad utan samverkan, men i en studie av Tjernberg (2021) studerades bronns bärförmåga med olika grader av samverkan. Som en fortsättning på studien har således bron används i detta forskningsprojekt, dock för att studera påverkan på befintliga konstruktionselement (tvärförband, skjuförbindare med mera) då ett horisontellt fackverk appliceras mellan underflänsarna på tvärsnittet.

### *Fallstudie 4 – Bro över Pinula River (Guatemala)*

För att utvidga studien har bron över Pinula River används som en fallstudie för att analysera hur horisontella fackverk påverkar lastfördelningen då tvärsnittet består av fler än två balkar, likt i de tidigare nämnda fallstudierna. Bron är en samverkansbro med sex längsgående I-balkar med en ovanpåliggande samverkande betongfarbana. Bron har tre spann, 51–50–60 m. Bron har en horisontalradie på 148 m och en konstant tvärlutning, se Figur 10.





Figur 10. Tvärsnitt på bron över Pinula River (Vestman et. al. 2023).

Bron är dimensionerad med horisontalfackverk mellan överflänsarna längs hela bronns längd. Detta för att stabilisera balkarna under konstruktionsskedet, där lansering användes för att få bron till slutligt läge. Mellan underflänsarna var dock enbart stödområdena försedda med horisontalfackverk. Detta för att säkerställa bronnsbärförmåga vid en eventuell jordbävning. I fallstudien har lastfördelningen mellan balkarna analyserats beroende på hur fackverket mellan underflänsarna är som dimensionerat eller om man har ett fackverk längs med hela bronns längd. För att utvärdera bron har konstruktörerna Javier Jordan och Guillermo Santa-Maria, som konstruerade bron, hjälp till med analysen.

## 5. Påverkan på existerande konstruktion

I de utförda fallstudierna har det påvisats att lastfördelningen mellan I-balkarna i en samverkanskonstruktion är runt 95/5 % då lasten står rakt ovanför den ena balken. Denna lastfördelning gäller då broar med liknande geometrisk utformning som i fallstudierna. Broarna har typiska tvärsnitt vad gäller tvärsnittshöjd, bredd och avstånd mellan balkarna som merparten av de stål- och betongbroar med och utan dimensionerad som återfinns i den nordiska infrastrukturen. Lastfördelningen syftar i detta sammanhang till fördelningen av böjmoment och nedböjning mellan de två balkarna där lastfördelningen beräknas som delen som en av balkarna bär delat i totalen för båda balkarna.

Genom att lägga in ett horisontellt fackverk mellan underflänsarna på de längsgående balkarna så kan lastfördelning förbättras mellan balkarna. I studierna har en förbättring av lastfördelningen påvisats till en 70/30 % fördelning jämfört med den ursprungliga 95/5 % fördelningen. Denna förbättrade lastfördelning som i studierna gav en reducerad böjspänning på mellan 20-40 % i den mest belastade balken. Detta innebär en ökning av den kvarvarande livslängden på 2,5 respektive 12 ggr med avseende på dimensionerande utmattning i en vanligt förekommande konstruktionsdel, livavstyvning.

I fallstudien med Yxlöbron så påvisades en ökning av normalkrafterna i tvärförbanden då ett horisontellt fackverk används för att sluta tvärsnittet. Ökningen var procentuellt stor, men i faktiska tal så var ökningen 25 MPa, från i princip 0 MPa i det analyserade tvärförbandet. I samma fallstudie utvärderades påverkan på skjuvkraftsfördelningen, vilken kan ses i det resulterande skjuvflödesdiagrammet i Figur 11, som visar skjuvflödet vid stål-betonggränssnittet. Skjuvflödet mellan stål och betong minskas från 130 kN/m till 118 kN/m, en skillnad på 9%, vilket kan jämföras med 22% skillnad när avvikelser eller spänningar jämförs, se Tabell 5. Detta är förväntat, eftersom även för en sluten lådsektion med excentrisk belastning (där avvikelserna för både vänster och höger liv är nästan desamma) kommer livet att ha betydligt olika skjuvkrafter. Detta beror på att livet får ett ytterligare bidrag av det totala vridmomentet från den excentriska lasten.



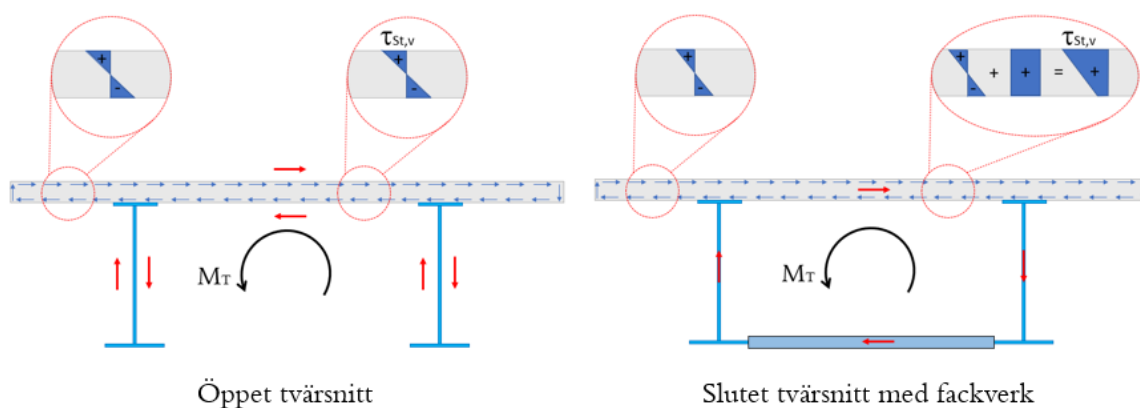
Figur 11. Skjuvflödet längs med bron i den mest belastade balken då lasten står centriskt på bron.

Tabell 1. Lastfördelning med avseende på böjspänning,  $\sigma_m$  och vertikal nedböjning,  $\delta_v$ .

Typ	$\delta_{1,v} / (\delta_{1,v} + \delta_{2,v})$ [-]	$\sigma_{1,m} / (\sigma_{1,m} + \sigma_{2,m})$ [-]
Inget fackverk	0,91	0,92
Horisontaler	0,91	0,92
K-fackv.	0,74	0,74
X-fackv.	0,71	0,71
D-fackv. + horisontaler	0,77	0,75
D-fackv.	0,77	0,77
Z-fackv.	0,79	0,79

Påverkan på betongfarbanan har i begränsad omfattning analyserats. I de analyser som utförts har följande påvisats då ett horisontellt fackverk mellan underflänsarna applicerades på Pitsundsbron, fallstudie 1.

- Reducerad normalkraft i betongfarbanan såväl som reducerat skjuvflöde längs med farbanan i och med en mer jämn lastfördelning mellan balkarna.
- Reducerat vridmoment,  $M_T$ , som tas i enbart farbanan, dvs. inte det totala vridmomentet som tas av tvärsnittet.
- En ökning av längsgående skjuvflöde,  $\tau_{St,v}$  från vridning i farbanedelen mellan balkarna eftersom tvärsnittet blir slutet, se Figur 12.

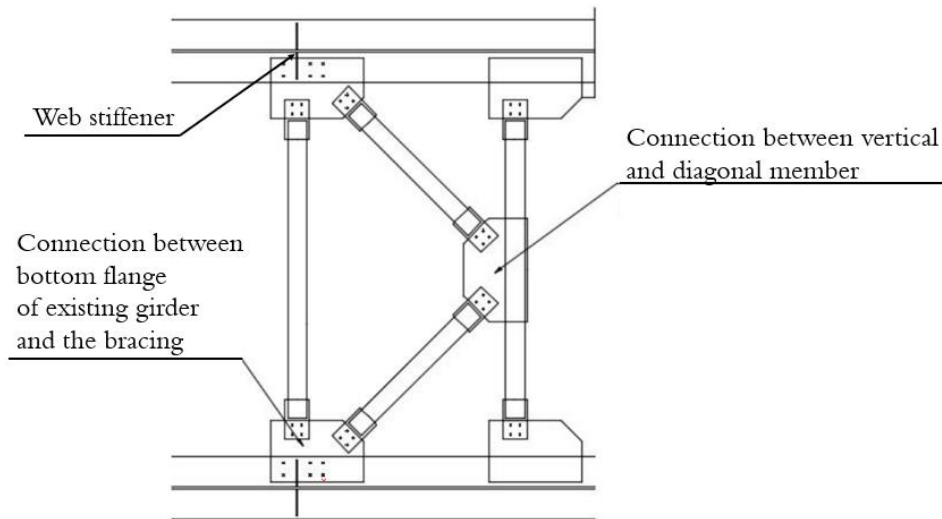


Figur 12. Skjuvspänning i farbanan av vridning (Efter: Ivanon et.al 2020).

## 6. Detaljutformning

Baserat på de fallstudier och information som insamlats under projektet har ett antal förslag på hur horisontella fackverk kan appliceras ur ett dimensioneringsperspektiv och hur de kan utformas och fästas till existerande konstruktion presenterats i Vestman (2023). En mer detaljerad beskrivning återfinns i licentiatavhandlingen som finns bifogad i slutet av rapporten. Nedan följer ett antal förslag på hur fackverket kan utformas och fästas in i befintlig konstruktionen.

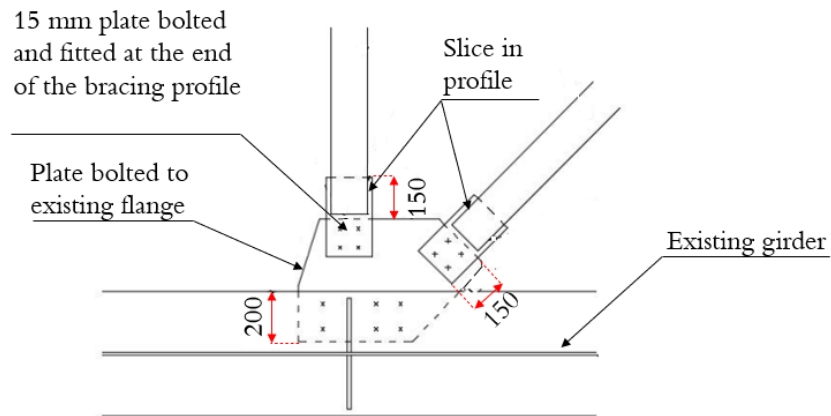
Två typer av detaljer är nödvändiga för att installera det horisontella fackverket mellan balkarnas underflänsar. Ett förband mellan underflänsen och stagen i fackverket samt ett förband mellan konstruktionsdelarna i fackverket. I figur visas en möjlig konfiguration för ett K-fackverk där skruvförband används för dessa knutpunkter.



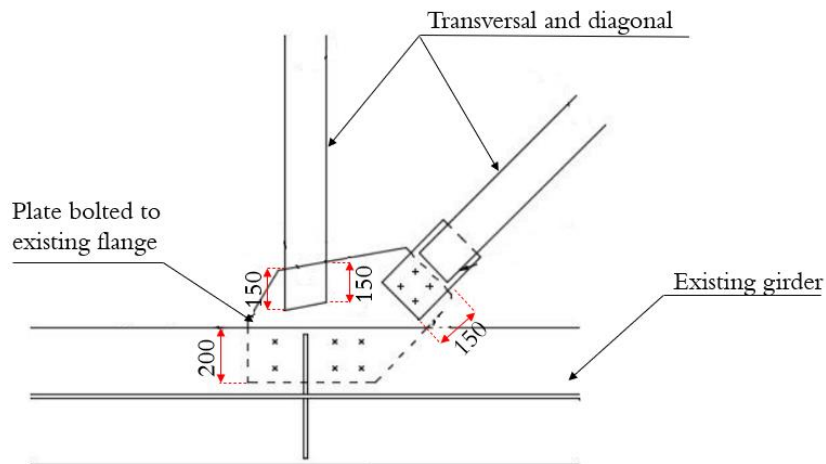
Figur 13. Förslag på utformning av förband i ett K-fackverk som installeras mellan befintliga underflänsar. (Vestman, 2023).

Ett likande system gäller givetvis för ett X-fackverk där fackverksdelarna bildar ett kryss. Förslagen som följer är enbart med skruvförband eftersom ett svetsat förband anses vara mer arbetskrävande och svårare att utföra på plats. Detta kan i sin tur leda till försämrade detaljklasser och således en försämrad dimensionerad livslängd vid utförande fel. Genom att använda skruvade förband försämras inte detaljkategorin och fackverket ger således en längre livslängd med avseende på detaljerna i underflänsen. Skruvförbanden i underflänsen ger en nystart på livslängden i detaljen med avseende på utmattning då skruvhålen anses vara i jungfruligt material, hålen har inte varit där vid tidigare belastningscykler.

Förslag på utformning av förbanden i knutpunkten mellan fackverk och underfläns visas i detalj i Figur 14 och Figur 15.



Figur 14. Knutpunkt mellan fackverk och underfläns (Vestman, 2023).



Figur 15. Alternativ lösning på knutpunkten mellan fackverk och underfläns (Vestman, 2023).

Vinkeln mellan den horisontella strävan och diagonalen i fackverket bör sättas till 45 grader. Detta är såklart inte möjligt i alla fall då utformningen av den befintliga konstruktionen kan begränsa alternativen med avseende på avstånd mellan balkar och tvärförband.

## 7. Diskussion och slutsatser

De viktigaste resultaten kan sammanfattas enligt följande:

- Användning av konceptet med horisontellt fackverk mellan underflänsarna är begränsad för nya broar. För existerande broar har inget konkret exempel hittats där konceptet används för förstärkning av bärförmågan. I litteraturen är det ännu mer begränsat skrivet gällande fackverk mellan underflänsarna för att förbättra lastfördelningen mellan balkarna.
- Befintliga normer tar inte specifikt hänsyn till användandet av horisontellt fackverk. I enstaka fall i Finland och några stater i USA har konceptet dock beskrivits vara fördelaktigt att användas och för specifika brotyper varit som krav. I dessa fall har kravet varit för att säkerställa ett mer vridstyvt tvärsnitt där till exempel tvärlutningen av excentriska laster begränsas.
- På existerande broar där ett befintligt horisontellt fackverk används för sidostabilisering och lastfördelning för horisontella laster, exempelvis vindlast finns det en risk att effekten av ett lådtvärsnitt förbisetts vid dimensioneringen. Detta gäller främst broar som är dimensionerade med analytiska metoder och där helheten av påverkan från det horisontella fackverket inte beaktats utan enbart de enskilda effekterna för sidostabilisering. Där mer moderna dimensioneringsmetoder, exempelvis FEM, används korrekt fångas sannolikt de totala effekterna av det slutna tvärsnittet. Med det sagt är det inte självklart att befintliga fackverk är underdimensionerade, utan detta måste kontrolleras för varje enskilt fall om fördelarna med lådtvärsnittet skall beaktas vid dimensionering.
- Att använda ett horisontellt fackverk som förstärkningsmetod ger i de studerade fallen en förbättrad lastfördelning mellan balkarna. Den förbättrade lastfördelningen leder till minskade böjspänningar i mest belastas balk för excentriska laster och kan innebära en förlängning av livslängden med avseende på utmattning. För en vanlig detalj i samverkansbroar, livavstyvare, skulle den kvarvarande livslängden öka mellan 2,5–12 ggr.
- För nya broar finns det en potential att minska båda produktionskostnader och material då ett koncept med I-balkar och horisontellt fackverk används i stället för en, ur produktionssynpunkt dyrare, lådbalk.
- De potentiellt negativa effekterna från att implementera ett horisontellt fackverk mellan underflänsarna på en existerande samverkansbro har funnits vara begränsade. Effekterna måste dock kontrolleras i varje enskilt fall där utformning av befintlig konstruktion kan begränsa möjligheterna till att uppnå fackverket fulla potential. Specifika konstruktionsdelar som bör kontrolleras är bland annat befintliga tvärförband där projektet funnit en viss ökning av normalkrafterna i tvärförbandet.

- En vidare användning av konceptet i samverkansbroar skulle kunna gynnas av en spridning på de exempel som har hittas i andra länder. Därför har informationen spridits vid internationella konferenser samt i en kommande artikel som publiceras i en amerikansk tidskrift (ASCE) för konstruktörer, forskare och broägare.
- Ett pågående arbete gällande inverkan på skjuvförbindare, och då specifikt intill tvärförbanden, i samverkansbroar då koncepter implementeras är under arbete. I en kommande artikel undersöks hur den transversella kraftkomponenten, förskjutningskraften i tvärled, lokalt ökas för skjuvförbindarna intill tvärförband. Detta härrör troligtvis från att det slutna tvärsnittet ger upphov till skjuvflöde som tas runt i tvärsnittet och att den tvärsnittsdeformationen, välvning, som uppstår av vridmomentet delvis förhindras av tvärförbanden.

## Referenser

Berthelley. J, Labourie. L and Leconte. R, (2002), Viaduc de la Porte Sud de Lille – Retour d’expérienc, Mikti conference in Paris, February, 2002.

Collin, P., Johansson, B. & Sundquist, H., (2011). Steel Concrete Composite Bridges. 4th Edition ed. Stockholm, Sweden: KTH Architecture and the Built Environment, LTU Division of Structural Engineering.

Fan Z., and Helwig T. (1999), Behavior of steel box girders with horizontal top bracing systems, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 125(8), 829-837. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:8\(829\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:8(829))

Google. (n.d.). [Street view for Ronchin, Hauts-de-France]. Retrieved March 20, 2023, from([https://www.google.com/maps/@50.6165009,3.0822323,3a,75y,283.71h,75.42t/data=!3m6!1e1!3m4!1s7ywJiSjzFMbn\\_Z9aR1cusw!2e0!7i16384!8i8192?hl=sv](https://www.google.com/maps/@50.6165009,3.0822323,3a,75y,283.71h,75.42t/data=!3m6!1e1!3m4!1s7ywJiSjzFMbn_Z9aR1cusw!2e0!7i16384!8i8192?hl=sv))

Habel, K.; Harvey, D. (2022) NEW LIFE FOR AGING INFRASTRUCTURE. 11th International Conference on Short and Medium Span Bridge. SMSB, Toronto. pp. 188-1-1-188-4-9

Hällmark, R. (2018), Composite Bridges: Innovative ways of achieving composite action, PhD dissertation, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.

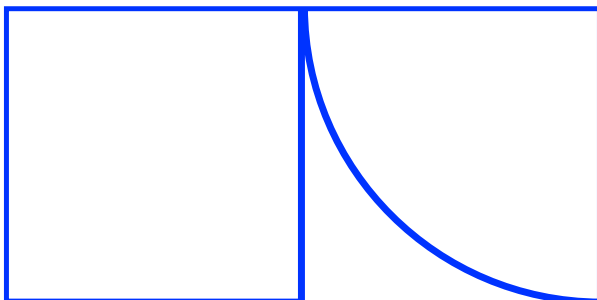
Ivanov S., Collin P., and Vestman V. (2020), Additional Effects from Transforming Open Bridge Cross Section To Semi-Closed, IABSE Symposium Wraclow 2020 – Synergy of Culture and Civil Engineering, October.

Liikenneviraston. (2016). Eurokoodin soveltmissohje. Teräs - ja liittorakenteiden suunnittelu – NCCI 4, 25.8.2016 ISBN 978-952-317-306-4, [in Finnish]

Sousa, M.L, Dimova, S., Athanasopoulou, A., Iannaccone, S. & Markova, J., State of harmonized use of the Eurocodes (2019), JRC Technical Reports, [Report EUR 29732], European Union, Luxembourg

Tjernberg J. (2020), Strengthening of non-composite bridges by Partial Composite Action, Master Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.

Vestman, V. (2023). Composite I-girder bridges with lateral bracing – improved load distribution (Licentiate dissertation, Luleå University of Technology).





## Bilagor

*Licentiatavhandling (sammanläggning av fem artiklar):* "Composite I-girder bridges with lateral bracing – improved load distribution".

Länk:

<https://tu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1745142&dswid=-2362>