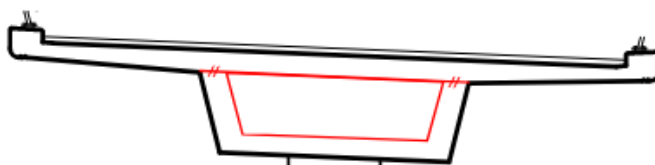


KLIMATOPTIMERADE BETONGBROAR – GEOMETRI OCH MATERIAL



Per Kettil

2023-03-21

FÖRORD

Denna studie har utförts under tiden november 2022 till mars 2023. Studien har finansierats av SBUF och egeninsatser av medverkande företag. Följande personer har medverkat:

Projektledare och utförare: Per Kettil, Skanska Sverige (Göteborg)

Referensgrupp:

Rasmus Rempling, NCC och CTH, konstruktion, material och produktionsteknik

Mats Karlsson, Trafikverket, beställarperspektiv, klimat- och hållbarhet

Mattias Liewendahl, Skanska, entreprenörsperspektiv och produktionsmetoder

Hanna von Bahr, Skanska, klimatpåverkan- och hållbarhet

Jag vill speciellt tacka finansiärerna som möjliggjort projektet, samt referensgruppen och kollegor för synpunkter och diskussioner som förbättrat rapporten.

Göteborg, 2023-03-21

Per Kettil

SAMMANFATTNING

I SBUF projektet ”Klimatoptimerat byggande av betongbroar” från 2017 framgår infrastrukturens omfattning av klimatpåverkande utsläpp, specifikt CO₂, och möjligheten att minska utsläppen genom rätt val av geometri och material.

Syftet med projektet är att etablera konstruktionslösningar med ”optimerade” geometrier som ger betydande materialbesparingar och därmed utsläppsminskningar, men som samtidigt uppfyller erforderliga funktionskrav, och med en tillhörande produktionsmetodik som fortfarande ger en rimlig tid och produktionskostnad.

Rapporten visar att man kan minska betongvolymerna och därmed tillhörande CO₂-utsläpp väsentligt (storleksordning -30%), och fortfarande uppfylla funktionskrav.

I vissa fall kan avsteg mot bronormen behövas, men detta kan göras genom att påvisa att alternativ lösning uppfyller funktionen. Hur detta kan göras finns beskrivet i rapporten.

Anledningen att detta inte görs idag är att produktionskostnaden blir större än materialbesparingen. Med framtidsutsikt om ökande materialkostnad p g a tillhörande klimatpåverkande utsläpp, kan detta förhållande komma att förändras.

En reduktion av betongvolymen enligt denna rapport, tillsammans med förbättringar av materialet, s k ”grön betong” [1], bedöms reduktionen kunna ännu större (storleksordning -50%).

Rapporten kan direkt användas som underlag för implementering i praktiken.

INNEHÅLL

| | |
|---|-----------|
| KLIMATOPTIMERADE BETONGBROAR – GEOMETRI OCH MATERIAL | 0 |
| 1 INLEDNING | 4 |
| 1.1 BAKGRUND | 4 |
| 1.2 SYFTE | 4 |
| 1.3 METODIK | 4 |
| 1.4 AVGRÄNSNINGAR | 4 |
| 2 UNDERSÖKNINGAR | 6 |
| 2.1 KONSTRUKTIONSLÖSNINGAR MED BESPARINGSPOTENTIAL | 6 |
| 2.1.1 <i>Broar med spännvidd 5-20 m</i> | 6 |
| 2.1.2 <i>Broar med spännvidd 20 – 40 m</i> | 7 |
| 2.2 KONTROLL AV UPPFYLLANDE AV FUNKTIONSKRAV | 10 |
| 2.2.1 <i>Brotyp hålursparad platta</i> | 10 |
| 2.2.2 <i>Brotyp ribbad platta</i> | 10 |
| 2.2.3 <i>Brotyp I-balkar</i> | 10 |
| 2.2.4 <i>Brotyp lådtvärsnitt</i> | 10 |
| 2.3 TILLHÖRANDE PRODUKTIONSMETODER | 11 |
| 2.3.1 <i>Brotyp hålursparad platta</i> | 11 |
| 2.3.2 <i>Brotyp ribbad platta</i> | 11 |
| 2.3.3 <i>Brotyp I-balkar</i> | 11 |
| 2.3.4 <i>Brotyp lådtvärsnitt</i> | 12 |
| 3 SLUTSATSER | 14 |
| 4 LITTERATURFÖRTECKNING | 15 |

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Med stöd från SBUF genomfördes projektet ”Klimatoptimerat byggande av betongbroar” under 2016 – 2017 [1]. I denna rapport framgår infrastrukturens omfattning av klimatpåverkande utsläpp, specifikt CO₂, och möjligheten att minska utsläppen genom rätt val av geometri och material.

Mängden klimatutsläpp korrelerar med mängden material som byggs in i konstruktionerna. Under lång tid har material varit relativt billigt jämfört med arbetskostnader. Detta har medfört att konstruktionerna ofta har utförts med enkla geometriska former, som ger lägre arbetskostnad, men högre materialåtgång, och därmed högre klimatutsläpp.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att etablera konstruktionslösningar med ”optimerade” geometrier som ger betydande materialbesparingar och därmed utsläppsminskningar, men som samtidigt uppfyller funktionskrav, och med en tillhörande produktionsmetodik som fortfarande ger en rimlig tid och produktionskostnad.

1.3 Metodik

Projektet har utförts i följande delsteg:

1. Etablera konstruktionslösningar med besparingspotential för betongbroar 5-20 m respektive 20-40 m, genom sökning bland referensprojekt och i litteraturen.
2. Kontroll av uppfyllande av funktionskrav, genom kontroll mot gällande normer.
3. Framtagning av tillhörande produktionsmetoder, genom sökning bland referensprojekt och i litteraturen.
4. Verka för genomförande i verkliga projekt via dokumentation för informationsspridning.

1.4 Avgränsningar

För att nå ett snabbt genomförande avgränsas projektet till geometrier för de vanligaste typerna av betongbroar av kort- till medellång spännvidd (5-40 m), då dessa står för en betydande andel av brobeståndet, och även bedöms ha den största potentialen för material-/klimatbesparingar. Studien begränsas till broöverbyggnaden, men det bedöms att liknande åtgärder kan vidtas i underbyggnader. Fokus är på platsgjutna broar vilket är det vanligaste, men prefabricering omnämns som möjliga alternativ.

”Optimering” utförs med tvärsnittsgeometrin som parameter, med målet att minimera betongvolymen, samt med bivillkor att uppfylla funktionskrav. Detta eftersom betongen medför merparten av CO₂-utsläppen för den bärande konstruktionen av armerad betong, typiskt 65%, se [1] figur 4, och det bedöms också att den total armeringsmängden för de aktuella fallen inte påverkas nämnvärt av förändringarna i geometri. Vidare är författarens erfarenhet som konstruktör, är att man vanligen tidigt låser en betonggeometri baserat på erfarenhet, av praktiska skäl för att komma framåt i

projekteringen, och därefter "finräknar" på armeringen. Det bedöms därför att den största besparingspotentialen i förstone finns i att reducera betongvolymerna.

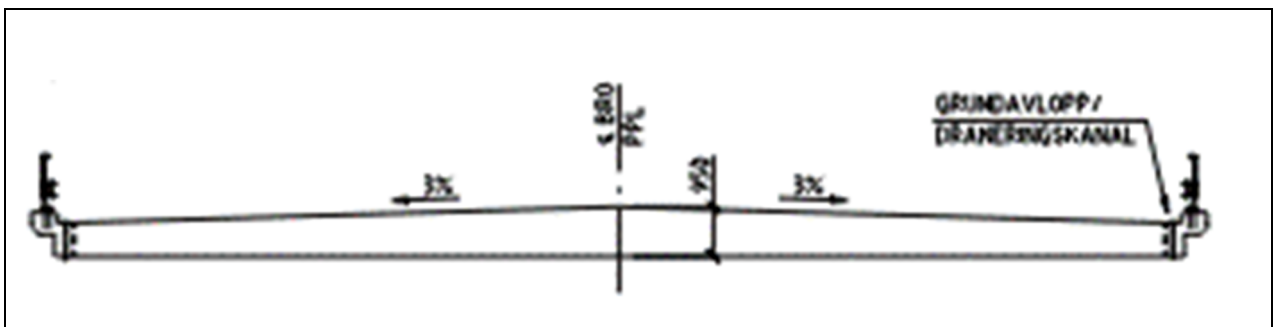
Vidare låses övriga parametrar, som t ex materialkvalitet, och tas inte med som variabler. Reduktion av betongvolym blir därmed proportionell med reduktion av CO₂-utsläpp av betong per konstruktion. Tankegången är att samtidigt införande av "grön betong" som i sig ger reducerad CO₂-utsläpp per m³, är att reduktion av materialåtgång gånger reduktion av materialet utsläpp ger en multiplikativ effekt. Till exempel en reduktion av betongvolym med 30% tillsammans med reduktion 30% av CO₂ per m³ betong, ger en reduktion $1 - 0.7 * 0.7 = 50\%$ av CO₂-utsläpp av betong per konstruktion, respektive med $0.65 * 50 = 33\%$ totalt för den armerade betongkonstruktionen.

2 UNDERSÖKNINGAR

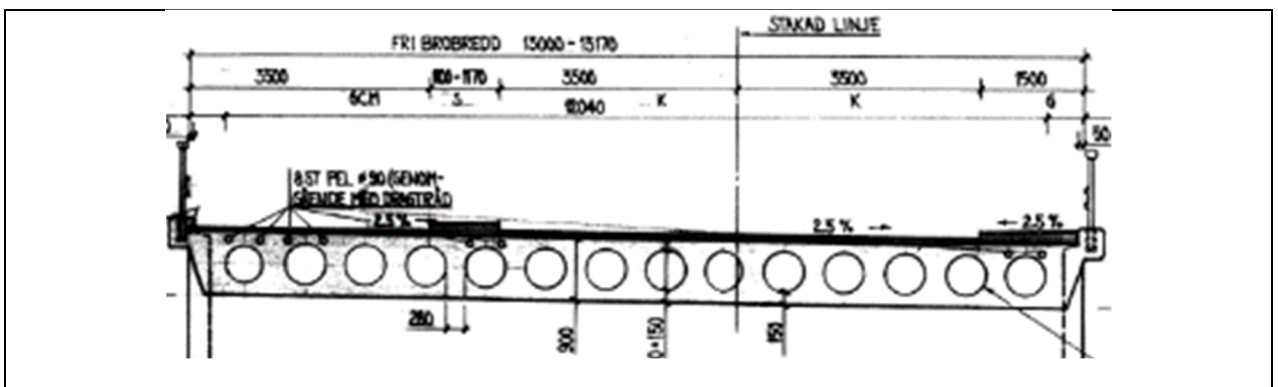
2.1 Konstruktionslösningar med besparingspotential

2.1.1 Broar med spännvidd 5-20 m

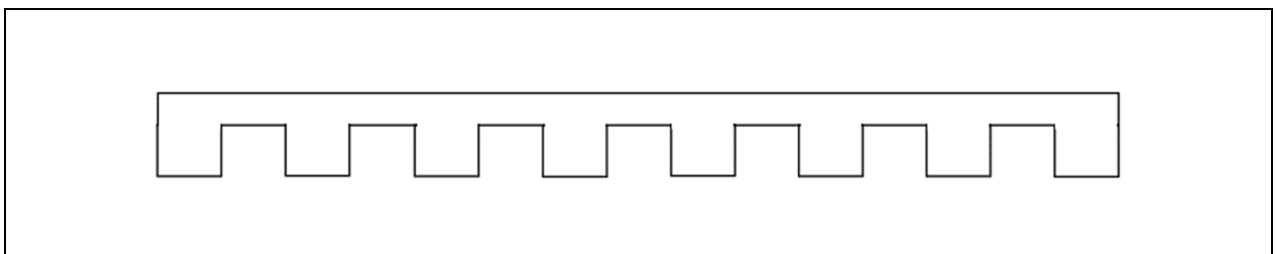
Platt- och plattrambroar av armerad betong är den vanligaste brotypen inom detta spännviddsintervall. Två konstruktionslösningar med betydande besparingspotential har etablerats, se typer 1 och 2 i Figur 2.2 respektive Figur 2.3 nedan, jämte referensvärde för dagens standardlösning typ 0 i Figur 2.1. Jämförelsesiffrorna avser betongvolym per m^2 broyta, för en typisk bro med spännvidd ca 20 m, vilka är baserade på erfarenhetsvärden från tidigare broar respektive bedömning. Armeringsmängder per m^2 bro bedöms förändras marginellt mellan de olika alternativen. Resultatsammanställning se tabell 2.1.



Figur 2.1 Typ 0) Massiv platta, votad vid ramben, dagens standardlösning ($0.8 m^3/m^2$)



Figur 2.2 Typ 1) Hålursparad platta, vanlig kring 1980, ($0.55 m^3/m^2$, -30%)



Figur 2.3 Typ 2) Ribbad platta, ($\leq 0.55 m^3/m^2$, -30%)

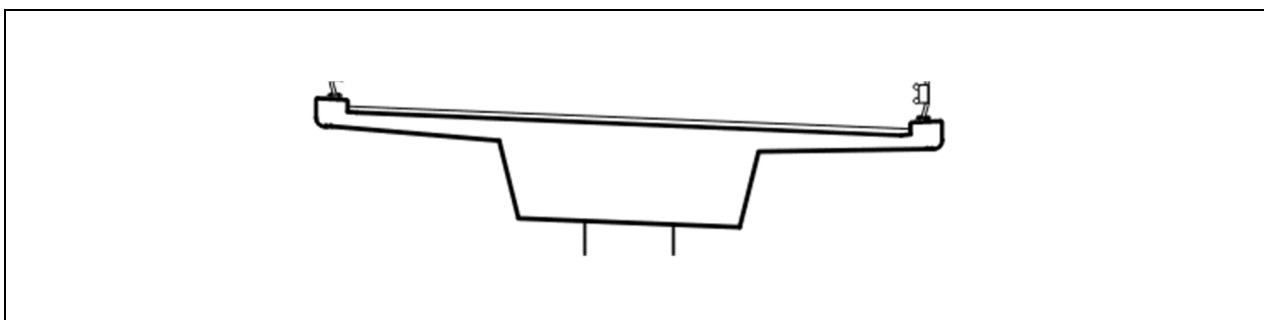
Tabell 2.1 Resultatsammanställning typisk bro spännvidd 20 m

| Typ av tvärsnitt | Betong m ³ /m ² | Reduktion av betongvolym | Reduktion av CO ₂ -utsläpp av betong |
|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---|
| Typ 0, Massiv platta, referens | 0.8 | 0 | 0 |
| Typ 1 hålursparad platta | 0.55 | -30% | -30% |
| Typ 2) Ribbad platta | 0.55 | -30% | -30% |

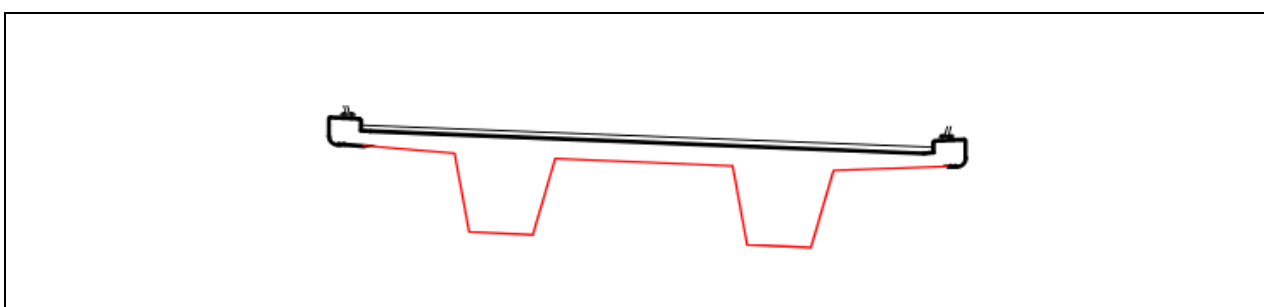
2.1.2 Broar med spännvidd 20 – 40 m

Två konstruktionslösningar med betydande besparingspotential har etablerats, se typ 3 och 4 i Figur 2.6 respektive Figur 2.7 nedan, jämte referensvärde för dagens standardlösning typ 0 i Figur 2.4 och ett mellanläge typ 1 i Figur 2.5. Jämförelsesiffrorna avser betongvolym per m² broyta, för bro med spännvidd ca 30 m, vilka är baserade på erfarenhetsvärden från tidigare broar respektive bedömningar. Armeringsmängder per m² bro bedöms förändras marginellt mellan de olika alternativen. Resultatsammanställning se tabell 2.2. Liknande exempel se Figur 2.8 till Figur 2.10.

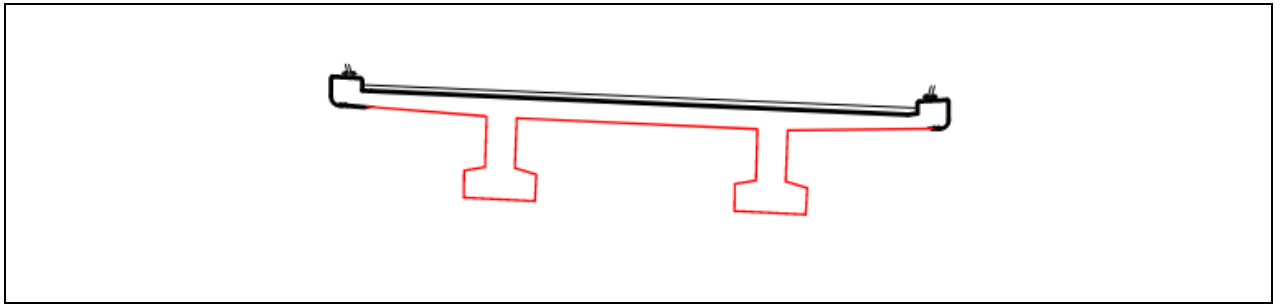
Vid spännvidder över 30 m utförs dessa broar vanligen spännarmerade. Ett minskat betongtvärsnitt är även gynnsamt med tanke på att det minskar mängden spännarmering.



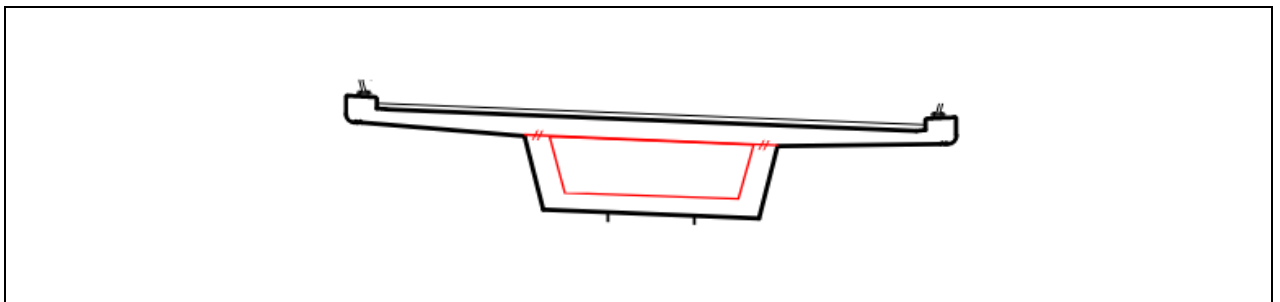
Figur 2.4 Typ 0) Bred enkelbalk, dagens standardlösning (referensvärde 0.87 m³/m²)



Figur 2.5 Typ 1) Dubbelbalk, under ökad användning senaste åren (0.71 m³/m², -18%)



Figur 2.6 Typ 2) I-balkar, "nästa steg" (bedömt $\leq 0.55 \text{ m}^3/\text{m}^2$, -36%)

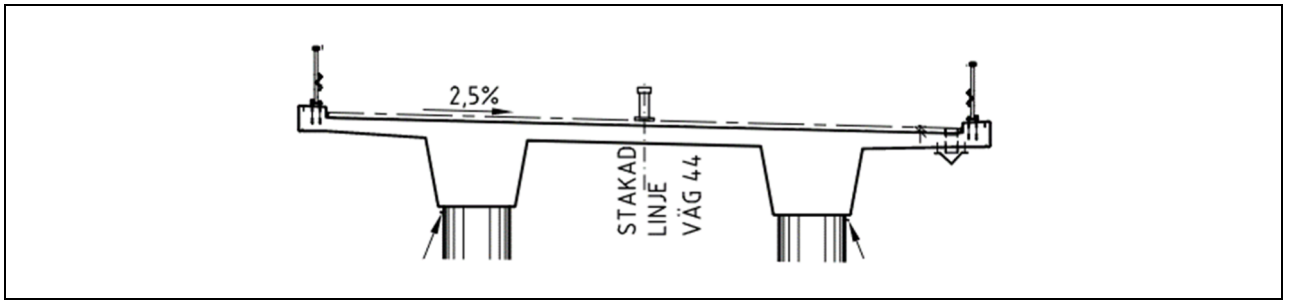


Figur 2.7 Typ 3) Lådtvärsnitt, "nästa steg" (bedömt $\leq 0.55 \text{ m}^3/\text{m}^2$, -36%)

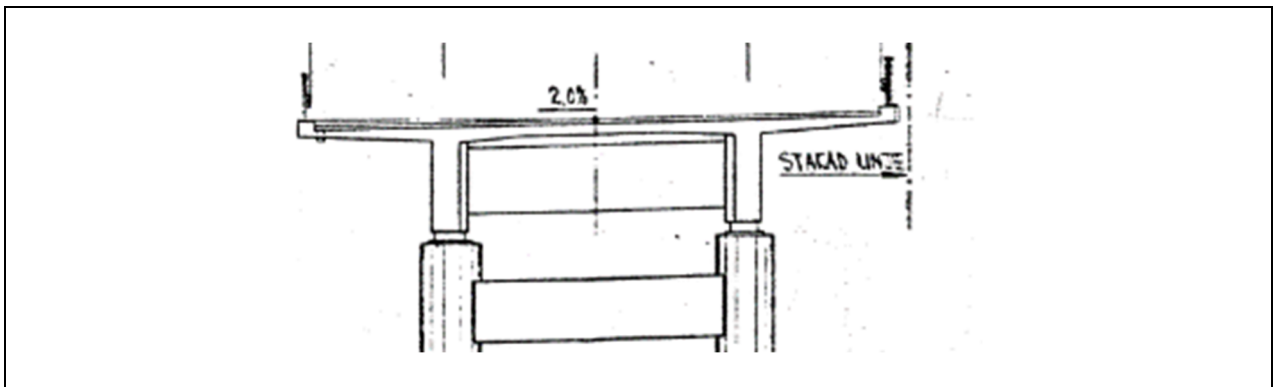
Tabell 2.2 Resultatsammanställning typisk bro spännvidd 30 m

| Typ av tvärsnitt | Betong m^3/m^2 | Reduktion av betongvolym | Reduktion av CO_2 -utsläpp av betong |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------|---|
| Typ 0) Enkelbalk | 0.87 | 0 | 0 |
| Typ 1) Dubbelbalk | 0.71 | -18% | -28% |
| Typ 2) I-balkar | 0.55 | -36% | -36% |
| Typ 3) Lådtvärsnitt | 0.55 | -36% | -36% |

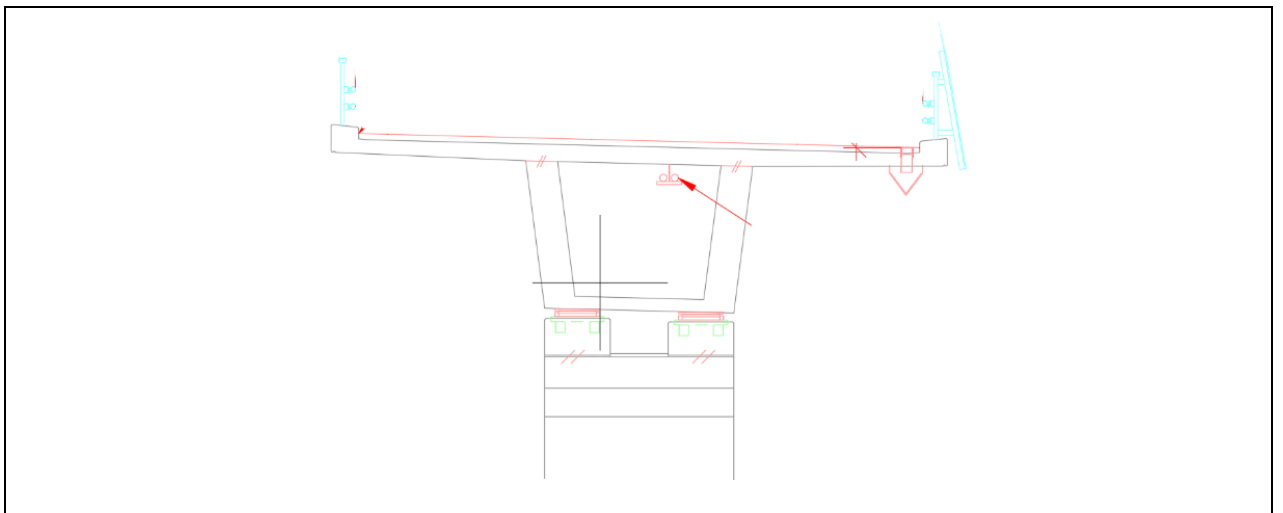




Figur 2.8 Exempel typ 1) Dubbelbalk, bro 100-121-1 på RV44, Götene kommun (bild från Trafikverkets förvatningsdatasystem Batman), 2019.



Figur 2.9 Exempel typ 1, gränsande till typ 2) Dubbelbalk, bro O1096 över Grandalsbäcken, 1978.



Figur 2.10 Exempel, men med något med större spännvidd >40 m, Typ 3) Lådtvärsnitt, bro över Lässmyran, 2007.

2.2 Kontroll av uppfyllande av funktionskrav

Med funktionskrav avses att konstruktionen skall kunna upprätthålla bärförmåga för specificerade laster under angiven livslängd, tillsammans med övriga krav enligt ”bronormen” [2] och däri hänvisade dokument.

2.2.1 Brotyp hålursparad platta

Sett som en lådbalksbro uppfyller den inte krav på inspektionsutrymme, jämför avsnitt 2.2.4. Brotypen finns inte omnämnd i nuvarande bronormer [2], men har tidigare tillåtits och utförts på 1980-talet. Om inga beständighetsproblem orsakade av det inneslutna röret inrapporterats, bör brotypen kunna tillåtas med hänvisning till tidigare erfarenhet.

Beaktat gällande bronorm [2] kan brotypen introduceras i projekt genom användande av ”särskild kravspekifikation”, där ovanstående beaktas.

2.2.2 Brotyp ribbad platta

Brotypen ribbad platta motsvarar en balkbro med många balkar. Den uppfyller därmed funktionskrav p s s som en konventionell balkbro.

2.2.3 Brotyp I-balkar

I-balkbron skiljer sig funktionsmässigt endast marginellt från konventionell betongbro med massiva balkar. Den kan även liknas med en samverkanbro med I-balkar av stål.

De synpunkter som brukar framkomma är estetiken är sämre än bro med släta sidor, och att det kan sitta fåglar på underflänsen som skräpar ned. Båda dessa synpunkter kan dock avskrivas med att I-balkbroar av stål har samma utseende.

Hållfasthet och beständighet uppfylls med beräkning respektive val av betongkvalitet och täckskikt, p s s som broar med andra tvärsnitt. Ytor är inspekterbara och kan vid problem åtgärdas.

För I-balkbron anses därmed funktionskrav uppfyllda utan speciella åtgärder.

2.2.4 Brotyp lådtvärsnitt

Lådbalksbron för dessa kortare spännvidder skiljer sig funktionsmässigt från lådbalkbroar för större spännvidder i ett avseende; den har typiskt en lägre höjd. Bronormen [2] anger minsta tillåtna invändig fri höjd till 1.5 m, vilket vanligen endast finns tillgängligt för broar över 40 m spännvidd.

Hållfasthet och beständighet uppfylls med beräkning respektive val av betongkvalitet och täckskikt, p s s som broar med andra tvärsnitt. Utvändiga ytor är inspekterbara och kan vid problem åtgärdas. Invändiga ytor kan dock inte inspekteras och åtgärdas med vanliga manuella metoder, då utrymmet är för begränsat för att få in personal.

Alternativt fylls utrymmet med annat beständigt material, se förslag för utförande i avsnitt 2.3.4.

Det begränsade utrymmet har likheter med rörledningar. För rörledningar finns speciella metoder för inspektion och underhåll. Inspektion utförs med kamera på en liten robot.

Reparation kan utföras med invändig relining där invändigt foder trycks in med tryckluft kompletterat med robot.

För lådbalkbron anses därmed funktionskrav uppfyllda, med något av följande åtgärdsalternativ:

- Rätt valda beständighetskrav som styr betongkvalitet, täcksikt och tillåtna sprickvidder för att minimera risk för skador. Notera även att:
 - Miljön inne i balken har låga exponeringsklasser. Det är enbart karbonatisering som kan tänkas inträffa och detta med ringa omfattning eftersom tillgång till fukt och syre minskar efter hand.
 - De sprickor som uppkommer i liv och underfläns är med största sannolikhet genomgående varför de kan detekteras och hanteras från utsidan.
- Utfyllnad med annat beständigt material, förslag se avsnitt 2.3.4.
- Inspektionslucka och slät insida som medger:
 - inspektion med kamera på robot, med ett tätare inspektionsintervall för att tidigt identifiera eventuella begynnande skador, t ex för stora sprickor eller nedbrytning av betongen
 - eventuell reparation genom påförande av extra tätskikt m h a robot

Beaktat gällande bronorm [2] kan brotypen introduceras i projekt genom användande av ”särskild kravspecifikation” i enlighet med bronorm [2], där ovanstående beaktas.

2.3 Tillhörande produktionsmetoder

2.3.1 Brotyp hålursparad platta

Denna typ av plattbroar försvann under 1990-talet. Skälet var dels att ursparingsrören flöt upp i samband med vibrering (bl a Undabron Uddevalla 1998) vilket tyder på att de var för dåligt förankrade, vilket bör kunna åtgärdas för kommande broar.

Det andra skälet var omfattande tvärkraftsarmering mellan sparkropparna vilken var svårt att utföra. Orsaken till detta var den beräkningsmodell som Vägverket använde vilken var mycket ogynnsam. Med dagens beräkningshjälpmedel borde denna typ av armering kunna minskas avsevärt. Vidare kan armeringen mellan rören hanteras genom att den utformas så att prefabricerade armeringskorgar kan användas.

Jämfört med massiv plattbro, så ökar tid och kostnad för arbete något, vilket då skall vägas mot besparing i material och klimatpåverkande utsläpp.

2.3.2 Brotyp ribbad platta

Brotypen ribbad platta motsvarar en balkbro med många balkar, och kan utföras på liknande sätt, antingen platsbyggd med speciell form för ursparingar, eller med prefabricerade ribbor/balkar.

2.3.3 Brotyp I-balkar

I-balkbron skiljer sig produktionsmässigt endast i ett avseende från konventionell betongbro med massiva balkar; det extra urtaget i balkliven.

Urtaget i balkliven medför en något mer komplicerad armering och formsättning. I-tvårsnitt är vanligt förekommande för prefab-balkar, eftersom man där har större anledning att spara vikt. Produktionsmetoder som fungerar finns därmed att inhämta från prefab, och överföra till platsgjuten bro. Alternativt utförs I-balkarna prefabricerade.

Produktionsmässigt anses därför I-balkbron medföra en något ökad komplexitet jämfört konventionell balkbro med släta liv:

- M h t åtkomlighet, måste balken armeras före formen byggs upp kring balken.
- Formen förses med extra ursparingar i livet
- Översidan på underflänsen skall ha tillräcklig lutning för att säkerställa att luftficka inte bildas vid gjutning

Kan geometrin utformas lika så att formknektarna kan återanvändas på ett flertal brospann eller flera broar, sänker detta formkostnad och sparar även formmaterial.

Jämfört med massiv balkbro med släta sidor, så ökar tid och kostnad för arbete något, vilket då skall vägas med besparing i material och klimatpåverkande utsläpp.

2.3.4 Brotyp lådtvårsnitt

Bron med lådtvårsnitt skiljer sig produktionsmässigt endast i ett avseende från konventionell betongbro med massiva balkar; hålrummet inne i balken.

Lådbalksbroar utförs för större spännvidder, varifrån metoder kan hämtas och överföra till de mindre broarna. Produktionsmetod för större lådbalksbroar:

1. Under- och utvändig form
2. Armering botten och väggar
3. Invändig sidoförm och "flytbräda"
4. Gjutning bottenplatta och liv
5. Rivning väggformar
6. Formsättning, armering och gjutning överfläns/farbaneplatta
7. Formrivning

Sista steget rivning av invändig form är speciellt krävande om invändiga utrymmet är trångt. Detta gäller speciellt för mindre lådbalksbroar. Ett alternativ för en i huvudsak platsbyggd bro är att använda en kvarsittande form, t ex typ plattbärlag, inne i lådan, se beskrivning nedan.

Produktionsmetod för mindre platsbyggd lådbalksbro:

1. Under- och utvändig form
2. Armering botten och väggar
3. Invändig sidoförm och "flytbräda"
4. Gjutning bottenplatta och liv
5. Rivning väggformar
6. Plattbärlag monteras för del av överfläns/farbaneplatta inne i lådan. Beroende på spännvidd resp val av plattjocklek utförs de fribärande eller stämpade.
7. Formsättning resterande del av överfläns/farbaneplatta

8. Armering och gjutning överfläns/farbaneplatta
9. Formrivning, endast utvändig form

En annan möjlig produktionsmetod är att utföra hålrummet med en sparkropp av lämpligt material, jämför den hålursparade plattbron, t ex:

- Ursparing utförd av kvarsittande korrugerad plåt, eventuellt samverkande med betongen, jämför t e x system för plattor typ Plannja Combideck.
- Utfyllnad av hålrummet med annat lätt material med god beständighet och lägre mängd CO₂-utsläpp, typ lättfyllning eller skumbetong

Jämfört med massiv balkbro med släta sidor, så ökar tid och kostnad för arbete väsentligt, vilket då skall vägas mot besparing i material och klimatpåverkande utsläpp.

Kan geometrin utformas lika så att formknektarna kan återanvändas på ett flertal brospann eller flera broar, sänker detta formkostnad och sparar även formmaterial.

Ett annat alternativ är en prefabricerad segmentutbyggd bro där brobalken prefabriceras i korta segment, som lyfts på plats och spänns ihop med spännarmering

3 SLUTSATSER

Undersökningen i kapitel 2 visar hur betongvolymerna och därmed tillhörande CO₂-utsläpp för de vanligaste brotyperna kan minskas väsentligt (storleksordning -30%), och fortfarande uppfylla funktionskrav.

I vissa fall kan avsteg mot Bronorm [2] behövas, men detta kan göras genom att påvisa att alternativ lösning uppfyller funktionen. Hur detta kan göras finns beskrivet i rapporten.

Anledningen att detta inte görs idag är att produktionskostnaden blir större än materialbesparingen. Med framtidsutsikt om ökande materialkostnad p g a tillhörande klimatpåverkande utsläpp, kan detta förhållande komma att förändras.

En reduktion av betongvolymen enligt denna rapport, tillsammans med förbättringar av materialet, s k "grön betong" [1], bedöms reduktionen kunna ännu större (storleksordning -50%).

Rapporten kan direkt användas som underlag för implementering i praktiken.

4 LITTERATURFÖRTECKNING

- [1] Klimatoptimerat byggande av betongbroar, SBUF-projekt 13207, Stefan Uppenberg, Daniel Ekström och Ulf Liljenroth, WSP tillsammans med Nadia Al-Ayish, RISE, 2017.
- [2] Krav Brobyggande, TDOK 2016:0204, Trafikverket, version 3, 2019.