



Hybridarmerade konstruktioner i kloridhaltiga miljöer – beständighet, säkerhet och livscykelkostnader

Downloaded from: <https://research.chalmers.se>, 2025-05-17 11:50 UTC

Citation for the original published paper (version of record):

Chen, T., Gil Berrocal, C., Löfgren, I. et al (2020). Hybridarmerade konstruktioner i kloridhaltiga miljöer – beständighet, säkerhet och livscykelkostnader. *Bygg och teknik*, 2020(6): 14-19

N.B. When citing this work, cite the original published paper.



Hybridarmerade konstruktioner i kloridhaltiga miljöer

– beständighet, säkerhet och livscykelkostnader

Livslängden för armerade betongkonstruktioner i kloridhaltiga miljöer kan förlängas genom att kombinera traditionell armering med fibrer i så kallade hybridarmerade lösningar. Detta visades experimentellt i ett tidigare doktorandprojekt i samarbete mellan Chalmers tekniska högskola och Thomas Concrete Group. I ett efterföljande postdoc-projekt har vi nu utvecklat modeller som kvantitativt utvärderar fibernas effekt på beständighet och säkerhet – därigenom visas de positiva resultaten i praktisk användning. Vi har också genomfört en fallstudie som visar de ekonomiska och miljömässiga fördelarna med att använda hybridarmerad betong i kantbalkar.

Armerade betongkonstruktioner som utsätts för havsvatten eller vägsalter drabbas av armeringskorrosion när kloridjoner når armeringen genom betong och sprickor.

Korrosion försämrar konstruktionens beständighet och säkerhet genom att täcksiktet spräcks, vidhäftningen mellan armering och betong försämrar, och

armeringsarean minskar, och därmed förkortas livslängden. Underhålls-, reparations- och ersättningsarbeten krävs följaktligen för att avhjälpa korrosionsskadorna, vilket leder till en stor ekonomisk kostnad för ägarna och användarna. Det är därför av stort intresse att hitta hållbara lösningar för betongkonstruktioner i kloridhaltiga miljöer. Försöksresultat från det tidigare doktorandprojektet [1], [2] visade att fibrer i kombination med traditionellt armerad betong, så kallad hybridarmerad betong, är en lovande metod. Tillsats av fibrer förlänger livslängden genom flera mekanismer: initiering av korrosionen fördröjs, korrosionshastigheten minskar och skadorna på konstruktionen av korrosionen blir mindre. För att ta dessa positiva resultat vidare till praktisk användning genomfördes detta projekt – för att ytterligare underbygga de tidigare slutsatserna och kvantifiera effekten av hybridarmering på beständighet, säkerhet och livscykelkostnader för konstruktioner i kloridhaltiga miljöer. I synnerhet har följande forskningsfrågor identifierats:



Teresa E Chen
Chalmers



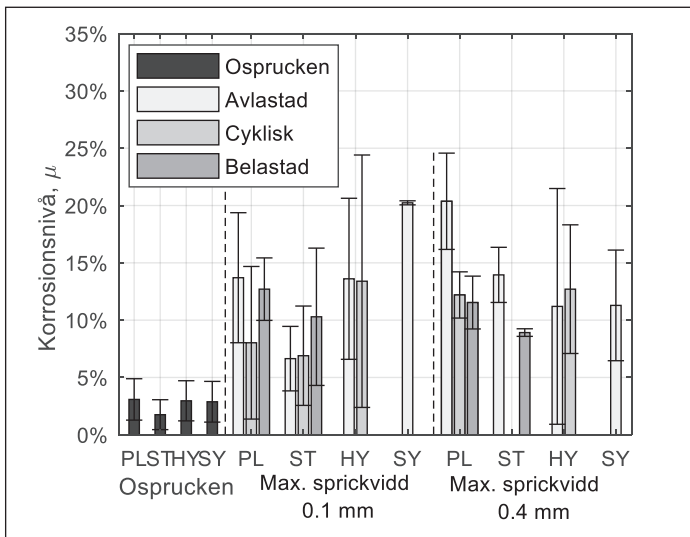
Ingemar Löfgren
C-lab/Chalmers



Carlos Berrocal
Chalmers



Karin Lundgren
Chalmers



Figur 1: Korrosionsnivå (genomsnittlig och standardavvikelse) för de tre armeringsstångerna i varje balk av de fyra betongsorterna (PL: utan fibrer, ST: stålfibrer, HY: blandade och SY: syntetiska) under olika lastförutsättningar och tidigare maximal sprickvidd. (Notera: Korrosionsnivån representerar maximal lokal förlust av tvärsnittsarean.)

korroderade armeringsstångerna karakteriserades. Först kartlades sprickbilderna som inkluderade både tvärgående böjsprickor och längsgående korrosionsprickor. Därefter extraherades armeringsstångerna från balkarna för kartering av korrosionsmönster och dragprovning.

Korrosionsmönster relaterat till sprickor i betongen

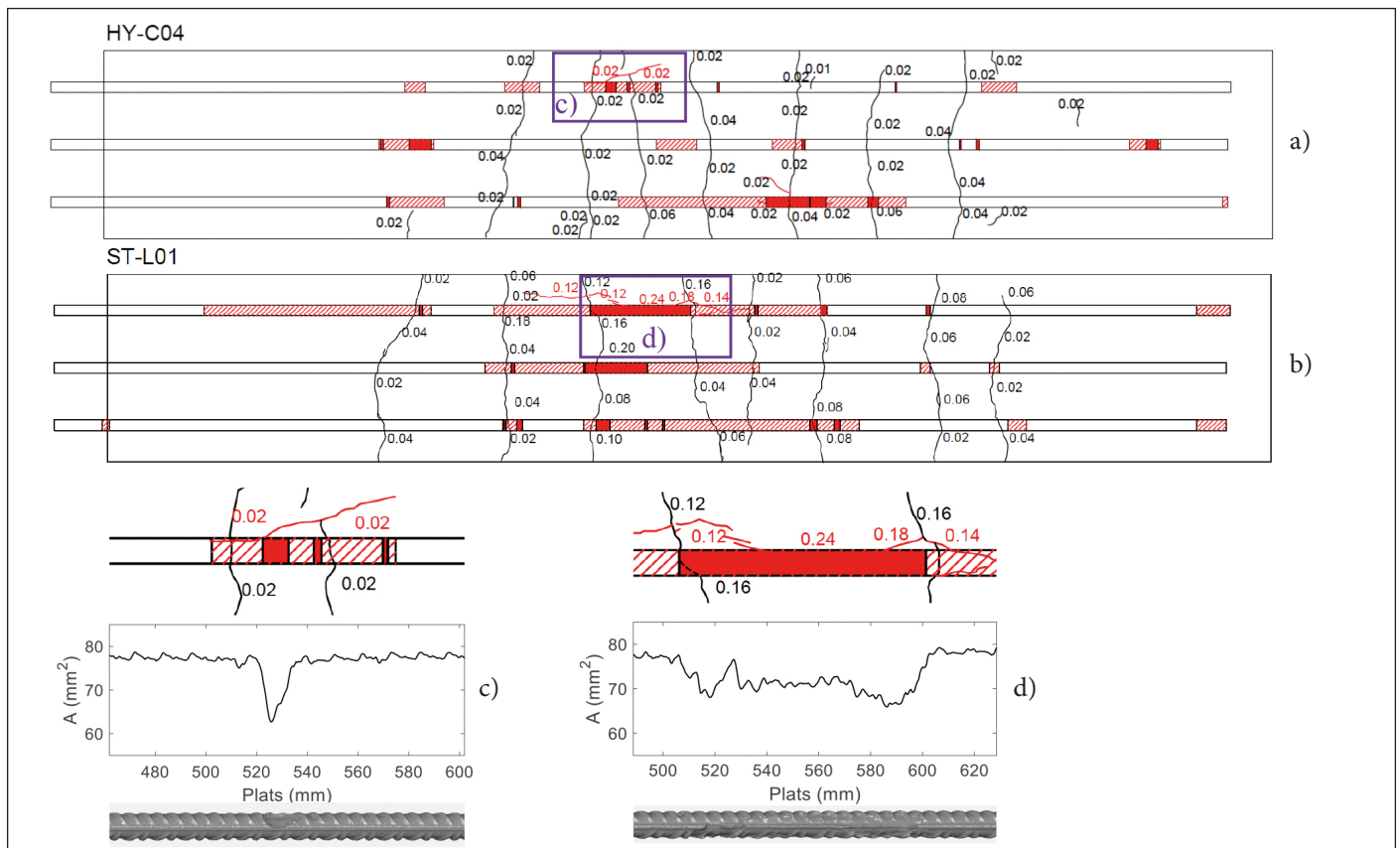
Korrosionsnivån (definierad som den maximala förlusten av en armeringsstångs tvärsnittsarea) och korrosionsmönster karterades noggrant med hjälp av 3D-scanning. Som framgår av figur 1 är det uppenbart att de tvärgående böjsprickorna accelererade korrosionen. Det gick dock inte att påvisa någon tydlig korrelation mellan den maximala sprickvidden för böjsprickorna (0,1 och 0,4 mm) och korrosionsnivån. Alla balkarna i stålfiberserien (ST) hade lägre genomsnittlig korrosionsnivå än motsvarigheterna i serien utan fibrer (PL). Balkarna med en fibermix (HY, syntet och stål) och syntetiska (SY) fibrer visade liknande eller lägre genomsnittlig korrosionsnivå än sina motsvarigheter utan fibrer för den större sprickvidden (0,4 mm). Balkarna med en fibermix visade en stor standardavvikelse (figur 1) som kan ha berott på ojämn fiberfördelning. Det fanns ett avvikande fall, för syntetfibrer och sprickvidd 0,1 mm, som hade högre korrosionsnivå än motsvarande utan

- 1) Hur påverkar sprickor och fibrer korrosionsnivå och korrosionsmönster på lång sikt?
- 2) Hur påverkar korrosionsnivå och korrosionsmönster armeringsstångernas dragkapacitet och deformationsförmåga?
- 3) Hur kan effekten av armeringskorrosion på bärförmågan kvantifieras?
- 4) Hur påverkar detta livslängden, livscykelkostnaderna och utsläppen av växthusgaser?

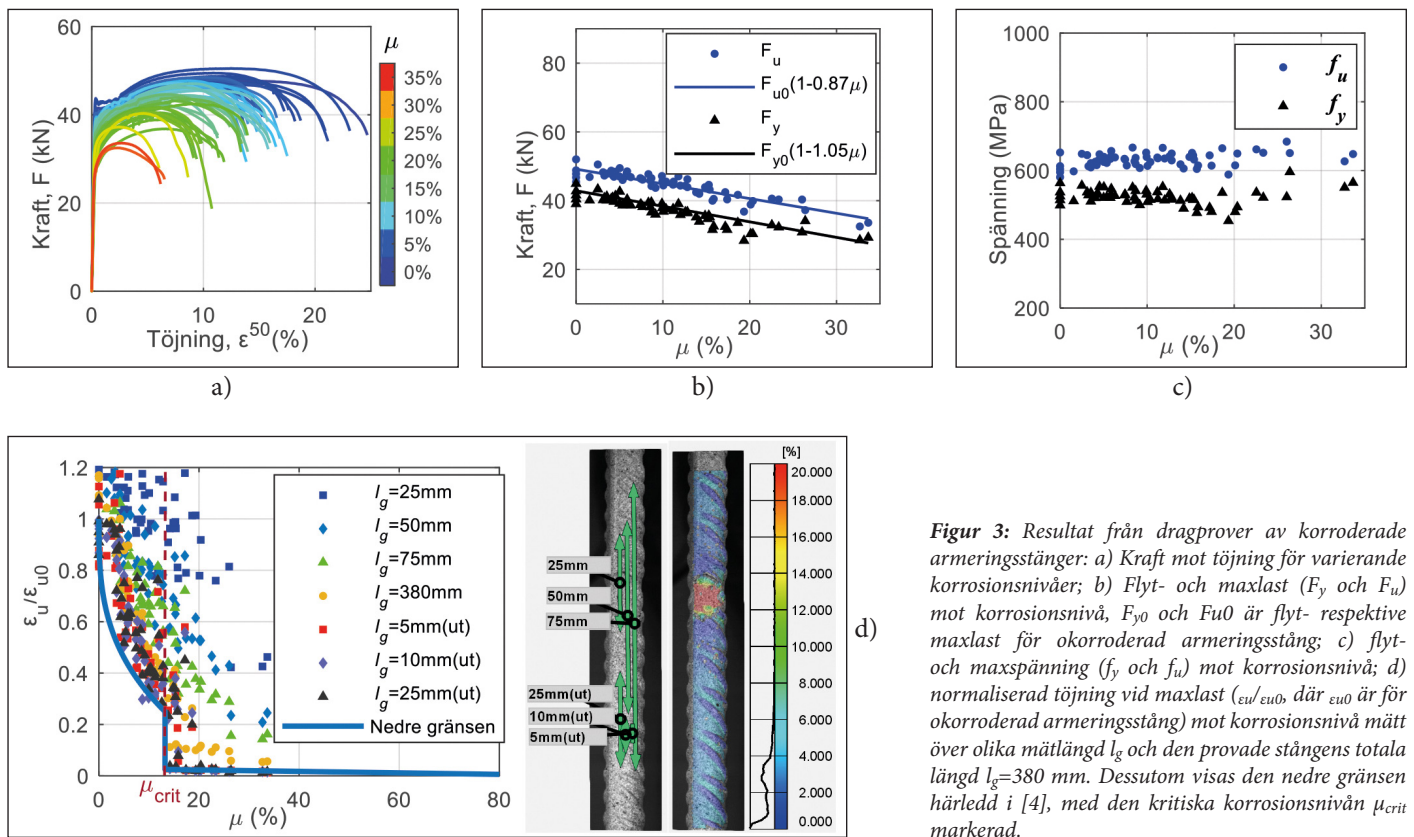
Experiment och resultat

Ett program med långtidsförsök inleddes 2013 för att studera hybridarmerade betongbalkars prestanda i kloridhaltig

miljö [3]. Totalt ingick 54 balkar med dimensionen 100×180×1100 mm, vardera armerad med tre Ø10 stänger. Fyra betongsorter ingick: utan fibrer, samt tre olika sorters fiberbetong. Vidare delades provkropparna in i spruckna och ospruckna balkar. De utsattes för omväxlande torra och våta perioder under sammanlagt tre år, där de våta perioderna inkluderade 16,5 procent NaCl-lösning för att främja korrosion. Ytterligare detaljer om betongrecept, fiberegenskaper och försöksupställning finns i [3]. I det aktuella projektet studerades 22 balkar, i vilka vi undersökte korrosionsmönstret i förhållande till sprickor och där de mekaniska egenskaperna hos de



Figur 2: Exempel som visar hur sprick- och korrosionsmönster karterades.



Figur 3: Resultat från dragprover av korroderade armeringsstänger: a) Kraft mot töjning för varierande korrosionsnivåer; b) Flyt- och maxlast (F_y och F_u) mot korrosionsnivå, F_{y0} och F_{u0} är flyt- respektive maxlast för okorroderad armeringsstång; c) flyt- och maxspänning (f_y och f_u) mot korrosionsnivå; d) normaliserad töjning vid maxlast (ϵ_u/ϵ_{u0} , där ϵ_{u0} är för okorroderad armeringsstång) mot korrosionsnivå mätt över olika mätlängd l_g och den provade stängens totala längd $l_0=380$ mm. Dessutom visas den nedre gränsen härledd i [4], med den kritiska korrosionsnivån μ_{crit} markerad.

fibrer. Det beror troligen på att den balken fått gjutdefekter vid armeringen, eftersom korrosionsnivån var lägre i balken med syntetfibrer och 0,4 mm sprickvidd.

Vi kunde också identifiera ett samband mellan korrosionsmönster och långsgående sprickor som uppkommit på grund av rostens volymexpansion [4]. En längre gropfrätning visade sig hänga samman med en längre och vidare långsgående spricka, se figur 2. Resultaten indikerar ett tidsberoende i hur sprickor påverkar korrosionsutvecklingen – följande hypotes ställdes upp: I ett tidigt skede påverkar tvärgående sprickor och ger främst lokaliserad gropfrätning. Dessa leder till långsgående korrosionsinducerade sprickor, som i sin tur med tiden ger upphov till mer generell korrosion längs armeringen.

Korroderade armeringsstångers mekaniska egenskaper

Resultat från dragprover av de korroderade armeringsstångerna sammanfattas i figur 3. Med ökande korrosionsnivå visar kraft-töjningskurvan tidigare flytning, och att den markerade flytplateån successivt minskar och försvinner, se figur 3a. Flyt- och maxlast (F_y , F_u) minskade linjärt med korrosionsnivån, medan flyt- och maxspänning (f_y , f_u), baserade på den återstående tvärsnittsarean, var konstanta oavsett korrosionsnivå, med en viss spridning – se figur 3b och figur 3c. Jämfört med lastkapacitet minskade deformationskapaciteten mer drastiskt med ökande korrosionsnivå. Töjningen vid max lastkapacitet (ϵ_u) beror även på hur den mäts, eftersom töjningen inte är jämnt fördelad över stängen

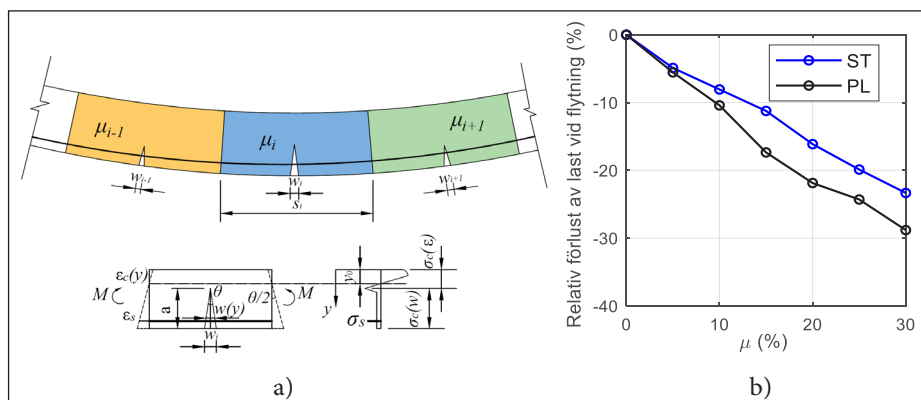
– detta visades med hjälp av Digital Image Correlation (DIC); se figur 3d. Försöken visade även att det finns en kritisk korrosionsnivå för gropfrätning: för större lokala korrosionsnivåer blir deformationsförmågan mycket begränsad. Det beror på att stålet når flytning enbart i det område som är angripet av gropfrätning – flytningen sprider sig alltså inte till resten av armeringsstången. Genom en enkel jämviktsbetraktelse visades att denna kritiska korrosionsnivå är:

$$\mu_{crit} = 1 - \frac{f_{y0}}{f_{u0}} \quad (1)$$

där f_{y0} är stålets flytgräns och f_{u0} är stålets sträckgräns, båda för armeringsstänger utan korrosion. För de provade stängerna var denna kritiska korrosionsnivå 13,3 procent. Vidare jämviktsbetraktelser ledde till en enkel modell som kan användas för att på säkra sidan uppskatta deformationsförmågan för en armeringsstång med gropfrätningar. Denna nedre gräns för deformationsförmågan fås direkt ur materialets arbetskurva, se figur 3d. För detaljer, se [5].

Modellering av bärförmåga

Lokaliserad gropfrätning minskar armerade betongkonstruktioners bärförmåga, deformationskapacitet och därmed säkerhet. Särskilt allvarligt blir det om förvarning om pågående korrosion genom spräckta täcksikt saknas. För att bedöma bärförmågan hos hybridarmerade be-



Figur 4: a) Modell för bärförmåga med icke-linjära leder; b) Resultat i form av relativ förlust av last vid flytning för balkar under tre-punkts böjning (med samma geometri och materialegenskaper som balkarna i [1], PL: utan fibrer, ST: stålfibrer).

tongbalkar utvecklades en modell som baseras på ett koncept med icke-linjära leder [6]. Modellen som togs fram i [5] användes för att ge arbetskurvan för korroderade stänger. För den fiberarmerade betongen användes en bilinjär arbetskurva efter uppsprickning. En balk delades upp i en serie icke-linjära leder, där antalet berodde på de tvärgående sprickorna, se *figur 4a*. Korrosionsnivån på armeringen i varje led tilldelades separat för att motsvara varierande gropfrätningar längs stängerna. För varje led bestämdes moment och krökning (M_i-K_i) samband, detta beräknades utifrån korrosionsnivå μ_i och jämvikts- och kompatibilitetsförhållandena för det spruckna tvärsnittet. Under ett givet lastfall (till exempel trepunkts- eller fyrapunktstöjning) kan krökningsfördelning, rotation och balkens nedböjning lösas. Modellen validerades först mot tidigare försöksresultat för hybridarmerade betongbalkar, både med och utan armeringskorrosion. Därefter utfördes en parameterstudie för att undersöka effekten av korrosionsnivå och gropfrätningars placering på bärförmågan. Givetvis är gropfrätningar farligast då de är placerade i maxmomentssnitt, i dessa fall mitt i balken. Resultaten av parameterstudien visar att jämfört med den traditionellt armerade betongbalken behöll den

Tabell 1: Alternativa utformningar i fallstudien och beräknad livslängd.

Alternativ	Armering	v_f (% vol.)	A_s (mm ²)	f_{ct} (MPa)	$f_{Fi,SLS}$ (MPa)	$f_{Fi,ULS}$ (MPa)	M_u (kNm)	w_{cr} (mm)	Livslängd (år)
PL1	10Ø16	0	2011	3.5	0	0	153	0.51	50
PL2	16Ø16	0	3217	3.5	0	0	221	0.28	44
FRC1	10Ø16	0.5	2011	3.5	2.0	1.5	201	0.21	97
FRC2	8Ø16	0.5	1608	3.5	2.0	1.5	167	0.27	79
FRC3	8Ø16	1.0	1608	3.6	3.0	2.4	197	0.13	102
FRC4	10Ø12	1.0	1131	3.6	3.0	2.4	173	0.15	127

Armeringsutformning

PL1, FRC1, FRC4 PL2 FRC2, FRC3

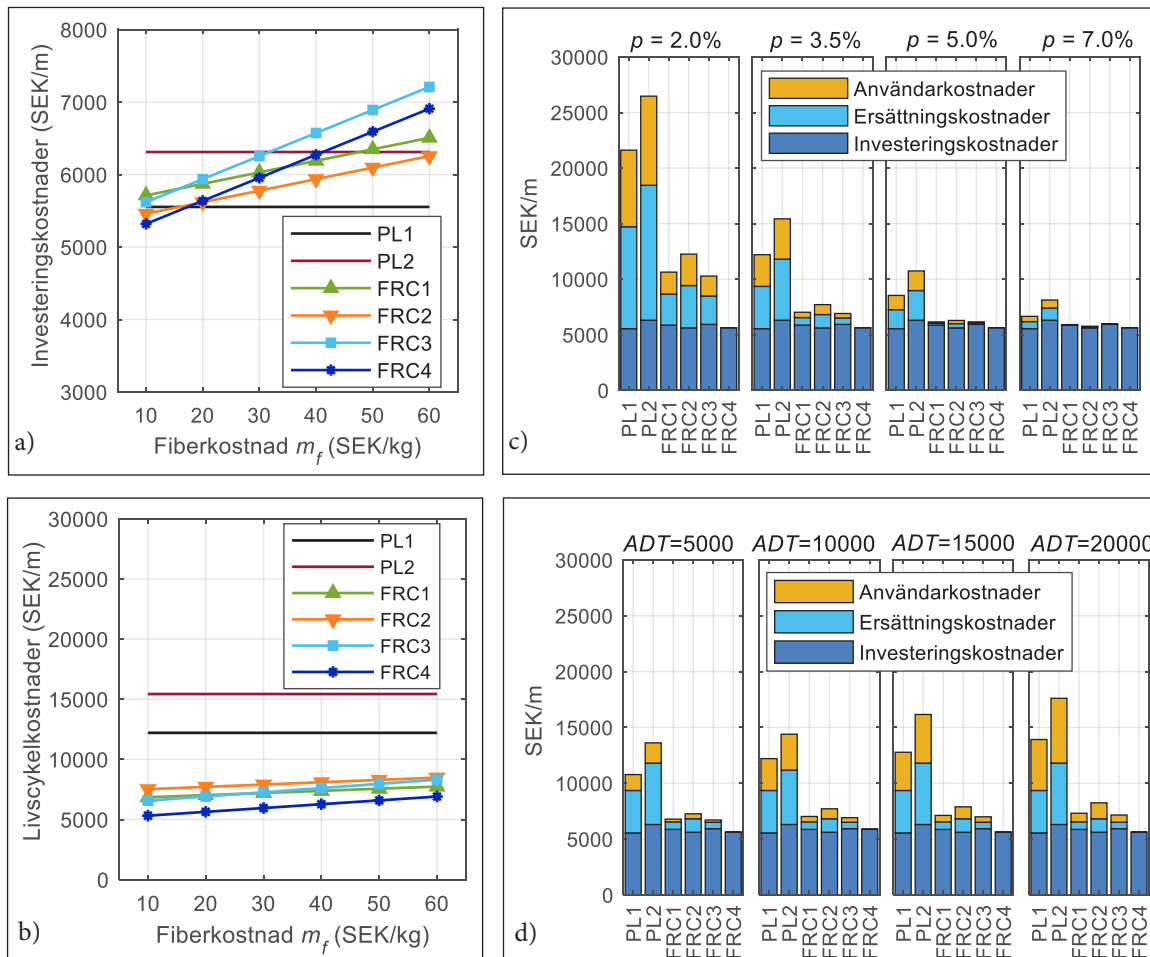
Notera: v_f är volym innehåll fibrer, A_s är armeringsarea, f_{ct} är betongens draghållfasthet, $f_{Fi,SLS}$ är fiberbetongens residualdraghållfasthet i bruksgräns, $f_{Fi,ULS}$ är fiberbetongens residualdraghållfasthet vid en sprickvidd om 2,5 mm (brottgräns), M_u är momentkapacitet och w_{cr} är den maximala sprickvidden på grund av tvång.

hybridarmerade betongbalken en större andel av sin ursprungliga bärförmåga, se *figur 4b*.

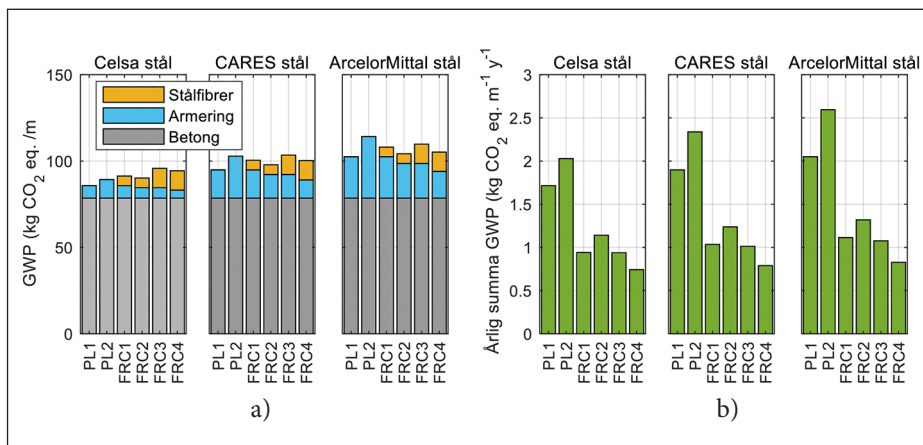
Fallstudie på kantbalkar

En fallstudie genomfördes på kantbalkar på broar. Kantbalkar har en avsevärt kortare livslängd än broars avsedda livslängd, huvudsakligen på grund av armeringskorrosion som orsakar långsgående sprickor och avspjälkning av täcksikt. Olika alternativa kantbalkar, med varierande armeringsutformning och stålfibermängd utformades, se *tabell 1*.

Momentkapacitet, sprickvidd och livslängd beräknades för alla alternativ. Livslängden beräknades utifrån initeringstid för korrosion genom klorid-diffusion och hur lång tid den korrosionsinducerade sprickbildningsprocessen tar. Samma kloriddiffusion användes för den ospruckna betongen oavsett om den innehöll fibrer eller ej, baserat på de tidigare försöksresultaten [1]. I sprucken fiberarmerad betong visade det sig denna vara 33 procent mindre än den i sprucken betong utan fibrer. Tillväxten av korrosionssprickor



Figur 5: Inverkan av fiberkostnader på a) investeringskostnader och b) totala livscykelkostnader; c) inverkan av diskonteringsräntan p när genomsnittliga dygnstrafiken ADT=10000 fordon/dag och fiberkostnaden är 20 SEK/kg; d) inverkan av den genomsnittliga dygnstrafiken ADT när diskonteringsräntan $p=3.5\%$ och fiberkostnaden är 20 SEK/kg (Bron antogs vara 15 m lång med 120 års livslängd).



Figur 6: a) Global warming potential (GWP) från betong, armering och stålfibrer, och b) årlig total GWP i vart och ett av alternativen (Enhets-GWP för betong från Svensk Betong är 388 kg CO₂/m³, enhets-GWP av stålfibrer från Mapei är 0.703 kg CO₂/kg, enhets-GWP av armering är 0,37, 0,839 och 1,23 kg CO₂/kg från Celsa, CARES respektive ArcelorMittal).

studerades i finita elementanalyser. Analyserna visade att sprickvidden för de långsgående sprickorna blev betydligt mindre i hybridarmerad betong, särskilt för alternativet med 1,0% volym stålfibrer och liten diameter på armeringsstängerna.

Baserat på dessa beräkningar kan livslängden för en kantbalk förlängas med mer än 58 procent genom användning av fibrer, se *tabell 1*. Vidare utfördes analys av livscykelkostnaden (LCC) med beaktande av Investeringskostnader, Ersättningskostnader och Användarkostnader, med varierande värden på fiberkostnaden (10-60 SEK/kg), diskonteringsränta (p) och genomsnittlig dygnstrafik (ADT). Vid högre fiberkostnader (≥ 30 kr/kg, vilket är högre än det normala marknadspriset om cirka 15-25 SEK/kg), är investeringskostnaderna för alla hybridkonstruktioner högre än de traditionella. Trots det är den totala livscykelkostnaden för alla alternativen med hybridarmering mindre än de traditionella alternativen, på grund av minskade Ersättnings- och Användarkostnader; se *figur 5a* och

figur 5b. Fördelen med att minska LCC genom att använda hybridarmering blir dessutom större vid lägre diskonteringsränta. Genomsnittlig dygnstrafik har ett mindre inflytande, se *figur 5c* och *figur 5d*. Slutligen bedömdes den miljöpåverkan som indikeras av GWP (Global Warming Potential) per meter av kantbalken från materialproduktionen av olika alternativ genom livscykelanalys, se resultat i *figur 6*. Olika tillverkare av armeringsstänger rapporterar varierande värden på GWP, därför undersöktes denna variation. I allmänhet står betongen för majoriteten av den totala GWP, vilket gör att skillnaden av den totala GWP mellan olika alternativ blir måttlig. Men den årliga totala GWP är betydligt lägre i de hybridarmerade alternativen på grund av deras längre livslängd.

Slutsatser

Det aktuella projektet förstärker och bekräftar de tidigare positiva resultaten om användning av hybridarmerade konstruktioner i kloridhaltiga miljöer. Försök visade att de allra flesta armeringsstänger-

na i fiberarmerade betongbalkar hade lägre korrosionsnivå än motsvarande utan fibrer. Modeller för konstruktioners säkerhet och livslängd utvecklades, och de visar att hybridarmerade alternativ bibehöll både bärförmåga och beständighet (mätt i form av när armeringskorrosion spräcker täcksikt) bättre än traditionella lösningar. Följaktligen ger hybridarmerade konstruktioner en mer ekonomisk och hållbar lösning i kloridhaltiga miljöer genom dess ökade livslängd jämfört med traditionellt armerade betongkonstruktioner. Med den modell som utvecklats för att beskriva arbetskurvan för korroderade stänger och den för att bedöma bärförmåga och deformations-/rotationskapacitet kan effekten av korrosion undersökas både för konventionella och hybridarmerade konstruktioner. ■

Referenser

- [1] Berrocal CG. *Corrosion of steel bars in fibre reinforced concrete: Corrosion mechanisms and structural performance* [Doctoral Thesis]: Chalmers University of Technology; 2017.
- [2] Berrocal CG, Lundgren K, Löfgren I. *Fibrer i anläggningskonstruktioner*. Bygg & teknik. 2017;7:30-3.
- [3] Berrocal CG, Löfgren I, Lundgren K, Tang L. *Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: influence of crack width, fibre type and loading conditions*. Corrosion Science. 2015;98:128-39.
- [4] Chen E, Berrocal CG, Löfgren I, Lundgren K. *Correlation between concrete cracks and corrosion characteristics of steel reinforcement in pre-cracked plain and fibre-reinforced concrete beams*. Materials and Structures. 2020;53.
- [5] Chen E, Berrocal CG, Fernandez I, Löfgren I, Lundgren K. *Assessment of the mechanical behaviour of reinforcement bars with localised pitting corrosion by Digital Image Correlation*. Engineering Structures. 2020;219:110936.
- [6] Löfgren I. *Calculation of crack width and crack spacing*. Nordic Mini Seminar "Fibre reinforced concrete" 2007.