

Slutrapport

Projektamn: Hybridarmerade betongkonstruktioner i kloridhaltig miljö - beständighet, säkerhet och livscykelkostnader		
Projektnr. TRV / BBT nr:	Projektledare:	Huvudsaklig utförarorganisation:
2018/36506 / 2017-015	Ingemar Löfgren	Chalmers tekniska högskola
Rapporteringsperiod:	Rapport upprättad av:	Datum:
juni 2018 – November 2020	Ingemar Löfgren	2020-11-09

Exekutiv sammanfattning

Projektet startade 1 juni 2017 och avslutades november 2020. Avslutande referensgruppsmöte hölls 2020-05-12.

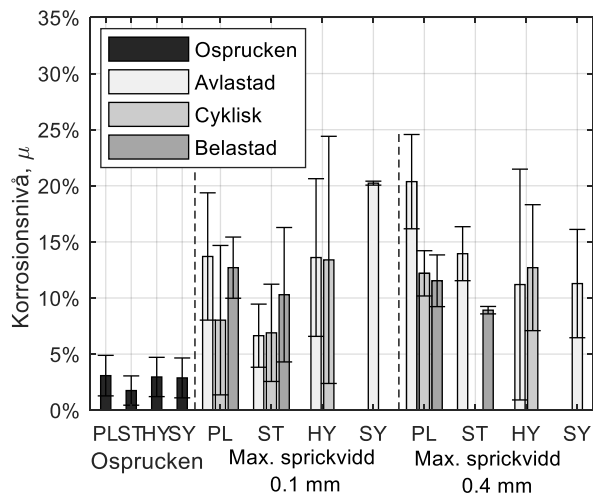
Experiment och resultat

Ett program med långtidsförsök inleddes 2013 för att studera hybridarmerade betongbalkars prestanda i kloridhaltig miljö [1]. 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% NaCl-lösning för att främja korrosion. Ytterligare detaljer om betongrecept, fiberegenskaper och försöksuppställning finns i [1]. I det aktuella projektet studerades 22 balkar, i vilka vi undersökte korrosionsmönstret i förhållande till sprickor och där de mekaniska egenskaperna hos de korroderade armeringsstängerna karakteriserades. Först kartlades sprickbilderna som inkluderade både tvärgående böjsprickor och längsgående korrosionssprickor. Därefter extraherades armeringsstängerna från balkarna för kartering av korrosionsmönster och dragprovning.

Korrosionsmönster relaterat till sprickor i betongen

Korrosionsnivån μ (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 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.

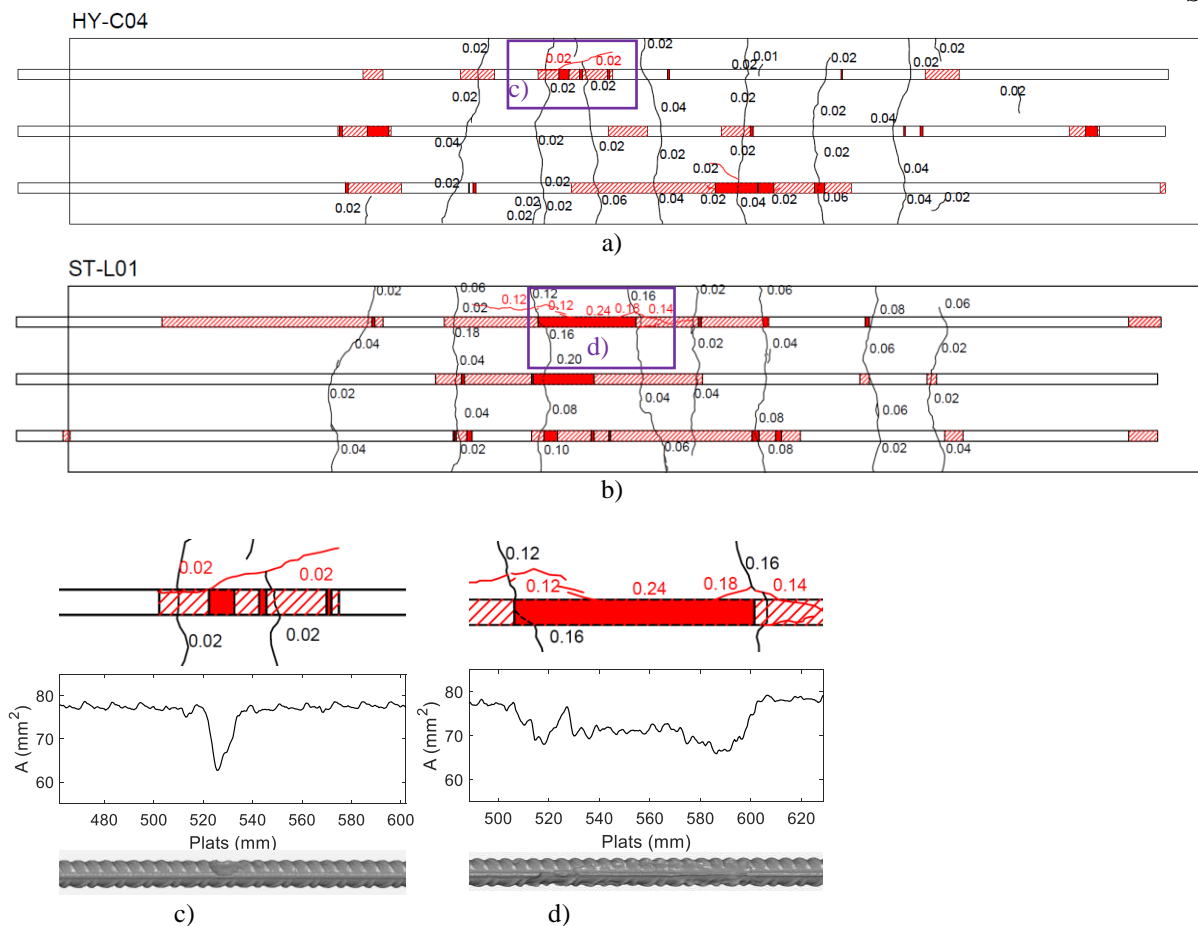
¹ Berrocal CG. Corrosion of steel bars in fibre reinforced concrete: Corrosion mechanisms and structural performance, Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology; 2017



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.)

Vi kunde också identifiera ett samband mellan korrosionsmönster och längsgående sprickor som uppkommit på grund av rostens volymexpansion [2]. En längre gropfrätning visade sig hänga samman med en längre och vidare längsgående spricka (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 längsgående korrosionsinducerade sprickor, som i sin tur med tiden ger upphov till mer generell korrosion längs armeringen.

² 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



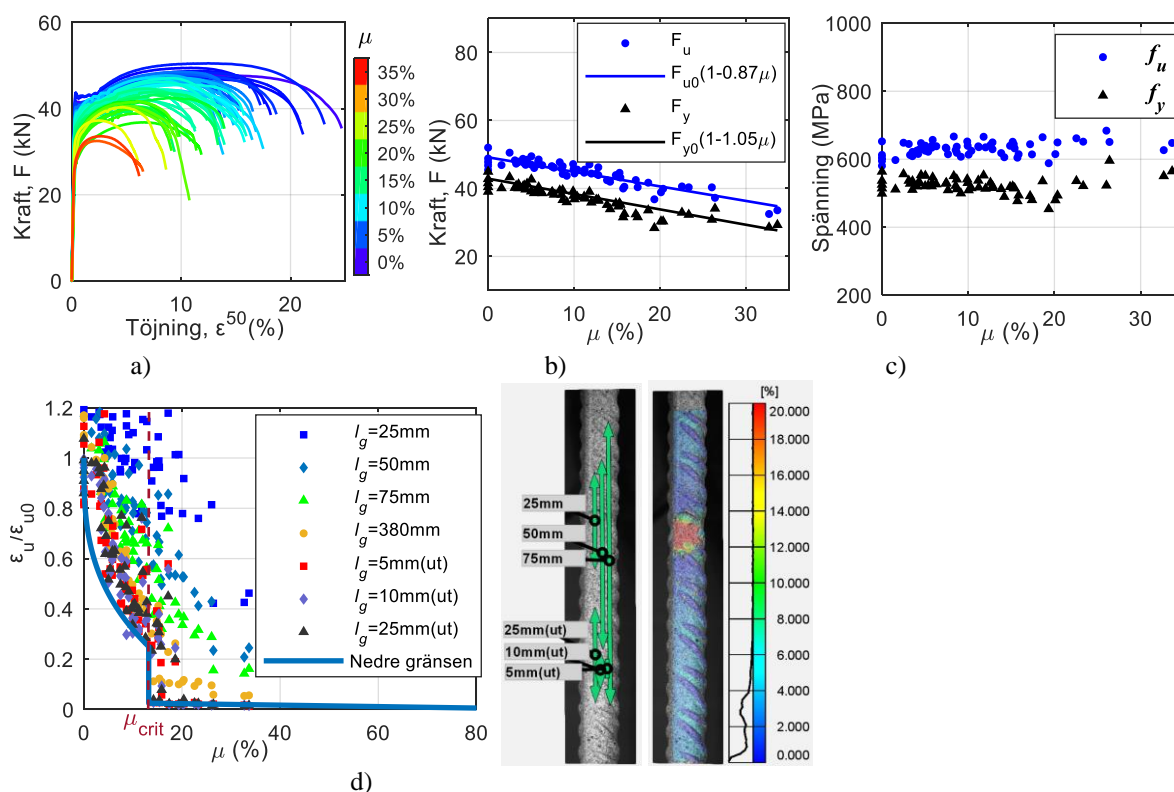
Figur 2 Exempel som visar hur sprick- och korrosionsmönster karterades.

Resultat från dragprover av de korroderade armeringsstångerna sammanfattas i figur 3. Med ökande korrosionsnivå visar kraft-töjningskurvan tidigare flytning, och att den markerade flytplatån successivt minskar och försvinner (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 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 stängens – 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:

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

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%. 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 [3].



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 ($\varepsilon_u/\varepsilon_{u0}$, där ε_{u0} är för okorroderad armeringsstång) mot korrosionsnivå mätt över olika mätlängd l_g och den provade stängens totala längd $l_g=380$ mm. Dessutom visas den nedre gränsen härledd i [3], med den kritiska korrosionsnivån μ_{crit} markerad.

Modellering av bärförmåga

Lokaliserad gropfrätning minskar armerade betongkonstruktioners bärförmåga, deformationskapacitet och därmed säkerhet. Särskilt allvarligt blir det om förvarning om pågående korrosion genom spräckta täckskikt saknas. För att bedöma bärförmågan hos hybridarmerade betongbalkar utvecklades en modell som baseras på ett koncept med icke-linjära leder och där modellen som togs fram i [3] 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 (figur 4a). Korrosionsnivån på armeringen i varje led tilldelades separat för att motsvara varierande gropfrätningar längs stängerna. För varje led bestämdes moment och krökning ($M_i-\kappa_i$) samband, detta beräknades utifrån korrosionsnivå μ_i och jämvikts- och kompatibilitetsförhållandena för det spruckna tvärsnittet. Under ett givet lastfall (till exempel trepunkts- eller fyrapunktsböjning) kan krökningsfördelning, rotation och balkens nedböjning lösas. Modellen validerades först mot tidigare försöksresultat för hybridarmerade

³ 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

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 maxmomentnitt, i dessa fall mitt i balken. Resultaten av parameterstudien visar att jämfört med den traditionellt armerade betongbalken behöll den hybridarmerade betongbalken en större andel av sin ursprungliga bärförmåga, se figur 4b.

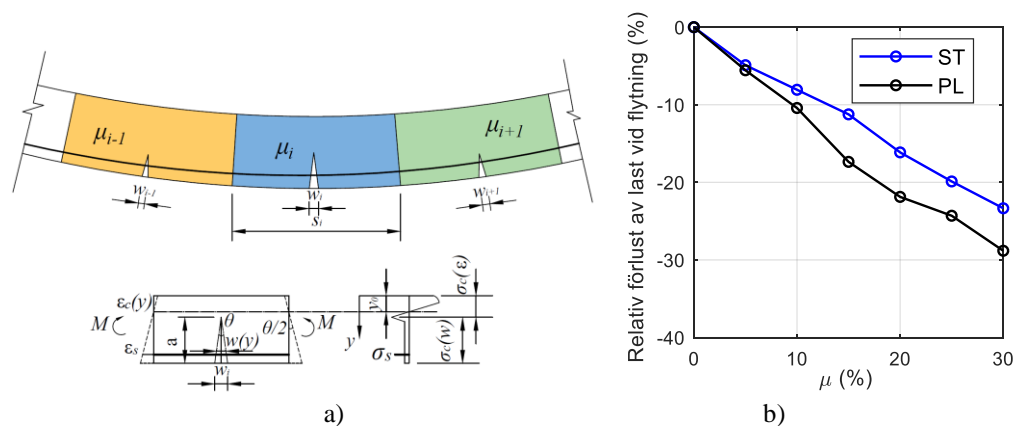


Figure 4 a) Modell för bärförmåga med icke-linjära leder; b) Resultat i form av relativ förlust av last vid flytning för balkar under tre-punkts böjning (med samma geometri och materialegenskaper som balkarna i [1], PL: utan fibrer, ST: stålfibrer).

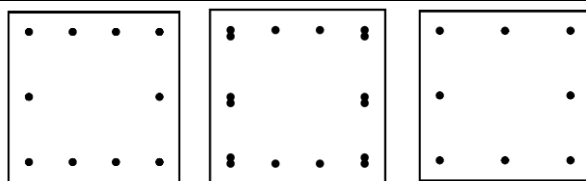
Fallstudie på kantbalkar

En fallstudie genomfördes på kantbalkar på broar. Kantbalkar har en avsevärt kortare livslängd än broars avsedda livslängd, huvudsakligen på grund av armeringskorrosion som orsakar längsgående 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 initieringstid för korrosion genom kloriddiffusion 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 % mindre än den i sprucken betong utan fibrer. Tillväxten av korrosionssprickor studerades i finita elementanalyser. Analyserna visade att sprickvidden för de längsgående 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 % genom användning av fibrer (se tabell 1).

Tabell 1 Alternativa utformningar i fallstudien och beräknad livslängd

Alternativ	Armering	v_f (% vol.)	A_s (mm^2)	f_{ct} (MPa)	$f_{Ft,SLS}$ (MPa)	$f_{Ft,ULS}$ (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



PL1, FRC1, FRC4

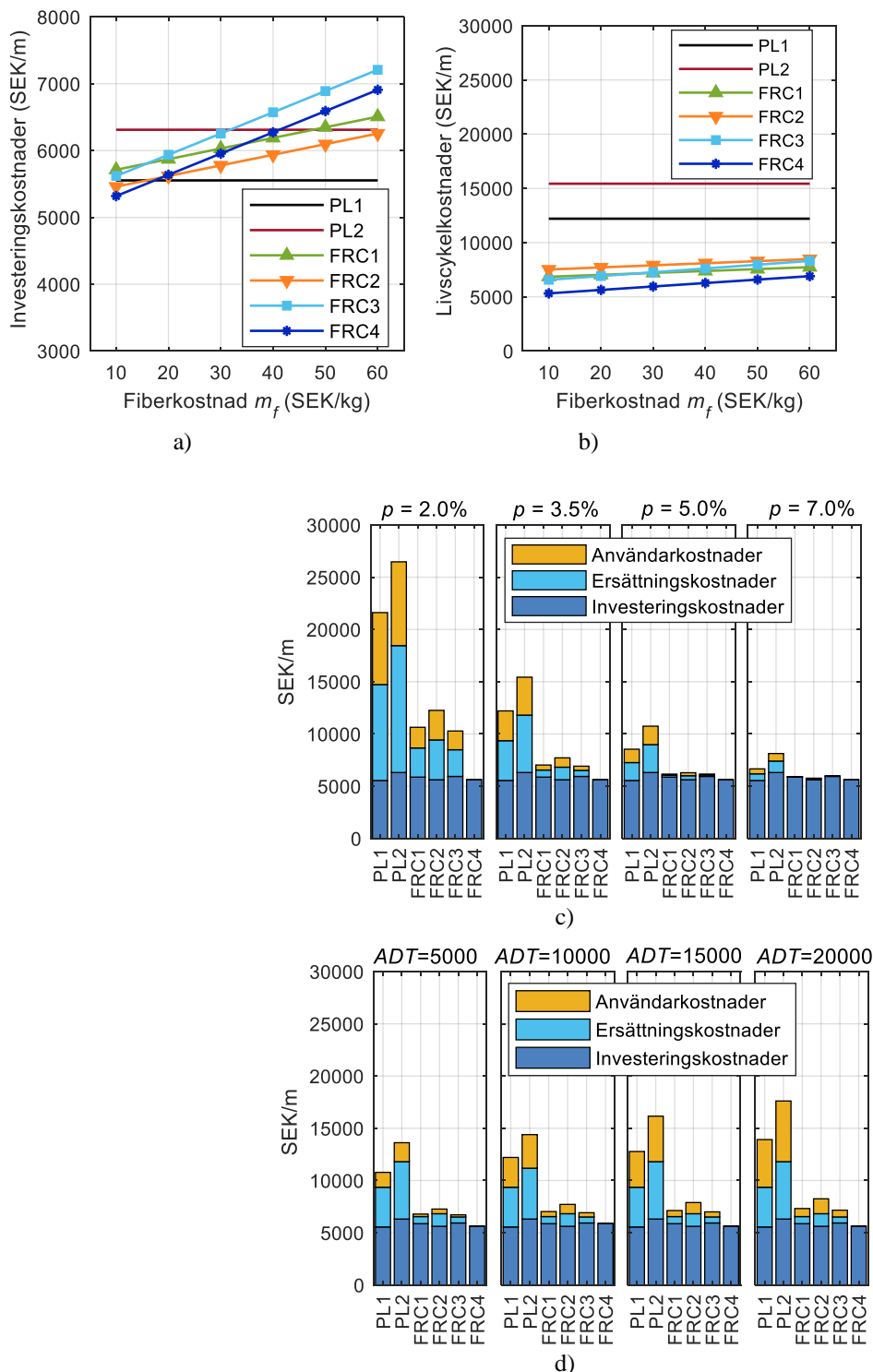
PL2

FRC2, FRC3

Armeringsutformning

Notera: v_f är volymsinnehåll fibrer, A_s är armeringsarea, f_{ct} är betongens draghållfasthet, $f_{Ft,SLS}$ är fiberbetongens residualdraghållfasthet i bruksgräns, $f_{Ft,ULS}$ 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.

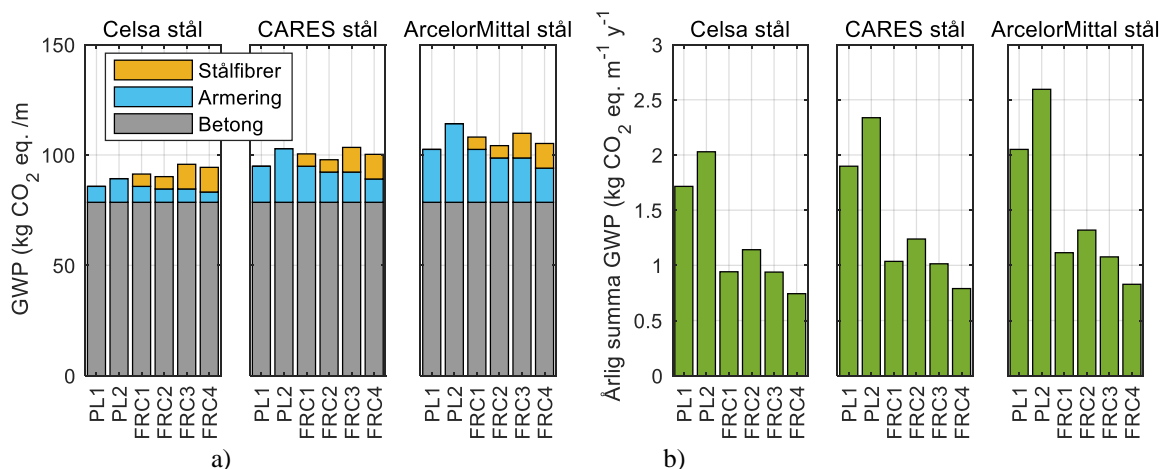
Vidare utfördes analys av livscykelkostnaden (LCC) med beaktande av Investeringskostnader, Ersättningskostnader och Användarkostnader, med varierande värden på fiberkostnaden (10-60 SEK/kg), diskonteringsränta (p) och genomsnittlig dygnstrafik (ADT). Vid högre fiberkostnader (≥ 30 SEK/kg, vilket är högre 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 5b. Fördelen med att minska LCC genom att använda hybridarmering blir dessutom större vid lägre diskonteringsränta. Genomsnittlig dygnstrafik har ett mindre inflytande (figur 5c och 5d).



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).

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.



Figur 6 a) Global warming potential (GWP) från betong, armering och stålfibrer, and b) årlig total GWP i vart och ett av alternativen (enhets-GWP för betong från Svensk Betong är $388 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$, enhets-GWP av stålfibrer från Mapei är $0.703 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$, enhets-GWP av armering är $0,37$, $0,839$ och $1,23 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$ från Celsa, CARES respektive ArcelorMittal).

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 armeringsstängerna i fiberarmerade betongbalkar hade lägre korrosionsnivå än motsvarande utan fibrer. Modeller för konstruktioners säkerhet och livslängd utvecklades, och de visar att hybridarmerade alternativ bibehåller 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.

Publikationer inom projektet:

Chen E., Berrocal, C. G., Löfgren I., & Lundgren K. (2020): Correlation between concrete cracks and corrosion characteristics of steel reinforcement in pre-cracked plain and fibre-reinforced concrete beams. *Materials and Structures* (2020) 53:33.

<https://doi.org/10.1617/s11527-020-01466-z>

Chen E., Berrocal, C. G., Fernandez I., Löfgren I., & Lundgren K. (2020): Assessment of the mechanical behaviour of reinforcement bars with localised pitting corrosion by Digital Image Correlation. *Engineering Structures* 219(2020).

https://research.chalmers.se/publication/517647/file/517647_Fulltext.pdf

Chen E., Berrocal, C. G., Löfgren I., & Lundgren K. (submitted 2020-10-08 till *Structure and Infrastructure Engineering*): Comparison of the service life, life-cycle costs and assessment of bridge edge beams made of hybrid or traditional reinforced concrete.

Chen E., Berrocal, C. G., Löfgren I., & Lundgren K. (2020): *Corrosion Pattern and Mechanical Behaviour of Corroded Rebars in Cracked Plain and Fibre Reinforced Concrete*. P. Serna et al. (Eds.): BEFIB 2020, RILEM Bookseries 30, pp. 477–488, 2021.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-58482-5_44

Chen E., Berrocal, C. G., Löfgren I., & Lundgren K. (2020): Hybridarmerade konstruktioner i kloridhaltiga miljöer – beständighet, säkerhet och livscykelkostnader. *Bygg & teknik* 6/2020.

Examensarbeten genomförda inom projektet:

Cassavia G. (2020): *Structural analysis of hybrid reinforced concrete beams with reinforcement corrosion*. Department of Civil Engineering, Architecture, Environment, Land Planning and Mathematics, University of Brescia.

Henriksson R., & Åhs M. (2019): *Effect of Cracks and Fibres on Reinforcement Corrosion – Edge beam application*. Master's thesis in Master Program Structural Engineering and Building Technology, Chalmers University of Technology. Master's thesis ACEX30-19-25.

<https://hdl.handle.net/20.500.12380/257459>

Projektet har presenterats

- Vid Betonggalans kunskapsdagar (30 oktober, 2020), se [4].
- Vid Rebetdagen 2019, ”Pågående forskning om tillståndsbedömning, reparation och underhåll” Karin Lundgren, se [5].
- Avsikten var att presentera projektet vid Nordic Concrete Research och BEFIB 2020, men båda dessa konferenser ställdes in. Bidraget till BEFIB 2020 har dock publicerats i en proceeding (se publikationer ovan).
- Trafikverket har också önskemål om att ett webinar hålls där projektet presenteras. Inget datum är ännu satt för detta.

Aktiva forskare inom projektet

- PhD Teresa E Chen, post doc.
- PhD Carlos Gil Berrocal, post doc.
- Professor Karin Lundgren
- Adjungerad professor Ingemar Löfgren

⁴ <https://betong.se/2020/10/30/chalmers-teresa-e-chen-pa-kunskapsdagen/>

⁵ <http://www.rebet.org/web/page.aspx?refid=25>

Händelser/resultat i projektet som kan ge feedback till framtida forskning.

- Resultat från 3D-scanning av korroderade stänger visar hur korrosionen är fördelad. Denna information kommer öppna upp för nya möjligheter att utveckla probabilistiska metoder. Tillsammans med dokumenterad information om sprickbildning kan det ge värdefull information om samband mellan sprickor och korrosion. Modellen som utvecklats för att beakta inverkan av korrosion och hur armeringens töjningskapacitet begränsas när den kritiska korrosionsnivå överstigs kommer att vara ett värdefullt bidrag till ökad förståelse.

Implementering av resultaten

- I övrigt har vi i stort följt den implementeringsplan vi hade i projektbeskrivningen.

Ekonomisk rapport

Här redovisas enbart de kostnader och intäkter som är förknippade med projektet.

I förhållande till projektets budget (ansökan) så har kostnaden varit högre. Personalkostnaden och tillhörande indirekta kostnader överstiger budget med 56 743 kr (46 256 + 40 487) och kostnader för utrustning, licenser, mm överstiger med 103 835 kr. I huvudsak handlar detta om licenskostnad för datorprogram (DIANA för FE-analys) samt kostnad för publicering i ”open access”.

Förbrukade medel (Chalmers):	2 563 577 kr nov./dec.
Utbetald kontantfinansiering:	1 169 000 kr + 699 000 kr nov./dec.
TRV	859 000 kr + 259 000 kr nov.
SBUF	110 000 kr + 440 000 kr nov./dec.
Cementa	200 000 kr
Upparbetad in-kind finansiering:	
Chalmers*	683 000 kr
Thomas Concrete Group	319 400 kr
NCC	50 000 kr
Skanska	50 000 kr
RISE	7 500 kr

* Avser medel från Thomas Concrete Group som överförs från annat projekt som avslutats

Specifikation över förbrukade medel

	Kostnader [kr]
Personalkostnader *	1 548 256
Utrustning, mark, byggnader	19 628
Konsultkostnader, licenser mm.	56 869
Övriga direkta kostnader inkl. resor	206 338
Indirekta kostnader	732 487
Summa	2 563 577