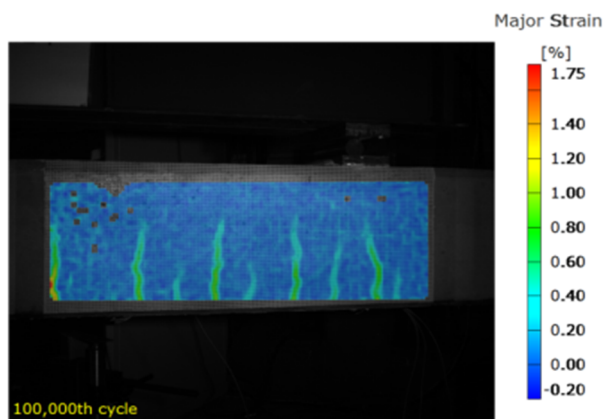


# FÖRSTÄRKNING AV BETONGKONSTRUKTIONER FÖR ÖKAD UTMATTNINGSKAPACITET

*Analytisk och experimentell undersökning*



Registrering av sprickutveckling under cyklisk belastning. Bilden visar sprickor på sidan av förstärkt betongbalk vid 100 000 cykler.

**Björn Täljsten**

**2015-09-01**

# FÖRORD

För att ett (forsknings)projekt ska lyckas måste det finnas tydliga mål, kunna mäta vad man uppnår, vara tillräckligt intressant för att arbetsinsatsen ska kunna motiveras utan att det man vill uppnå anses orealistiskt. Dessutom ska det genomföras inom en bestämd tidsrymd inom budgetramarna. Detta kräver inte enbart en klar projektplan utan framförallt engagerade projektdeltagare.

Föreliggande projekt har levererat ett resultat över förväntan, inom utsatt tid och kostnad. Detta tack vare framförallt en ambitiös och duktig doktorand, Mohammed Salih Mohammed Mahal, en engagerad projektledning i form av huvudhandledaren Professor Björn Täljsten och biträdande handledare Tekn. Dr. Thomas Blanksvärd samt effektiva och kluriga personer i labbet. Här vill vi passa på att tacka Georg Danielsson, Mats Petersson, Roger Lindfors och Lars Åström.

Projektet hade inte varit möjligt utan finansiering från SBUF, genom Skanska AB, samt finansiellt stöd från Irakiska staten. Speciellt tack går till er.

Björn Täljsten

Stockholm September 2015

# SAMMANFATTNING

Föreliggande rapport sammanfattar ett forskningsprojekt där syftet har varit att i större grad förstå hur utanpåliggande pålimmad fiberkompositarmering kan användas för ökad utmattningshållfasthet. Projektet har genomförts under 2011-2015 i form av ett doktorandprojekt. Projektet utfördes vid avdelningen för Konstruktionsteknik, Luleå tekniska universitet.

Upprepad cyklisk belastning på armerade betongkonstruktioner, exempelvis broar, kan leda till begränsad livslängd och brott på grund av utmattnings. Detta kan förekomma även om spänningsnivåerna i konstruktionen är relativt låga. Fiberkompositer (FRP – Fibre Reinforced Polymers) kan användas för att öka dessa konstruktioners bärförmåga samt förlänga dess livslängd med avseende på utmattnings. Metoden går ut på att plattor, väv eller stavar limmas mot konstruktionen – antingen utanpåliggande eller i upprästa eller uppsågade spår i det täckande betongskiktet. Tekniken med plattor och väv kallas ofta EBR (Externally Bounded Reinforcement) medan metoden med stavar betecknas som NSM (Near Surface Mounted).

Vid början av den aktuella forskningen var det utifrån litteraturstudien inte klart vilken av dessa metoder; EBR eller NSM som var att föredra med avseende på utmattnings och det finns fortfarande många aspekter att utreda. Det viktigaste målet med genomförd forskning är att erhålla utökad kunskap om beteendet hos material och konstruktioner under utmattningsbelastning. Utöver detta var det även intressant att försöka utveckla en lämplig analytisk modell för analys och dimensionering som beaktar utmaningarna med utmattningsbelastning efter förstärkning med EBR eller NSM.

Det vetenskapliga förhållningssättet i den här avhandlingen omfattar experimentella utmattningsförsök av armerade betongbalkar förstärkta med EBR-plattor och NSM-stavar. Studien inkluderar även analytiska metoder för att beskriva beteendet hos förstärkta betongbalkar samt numerisk modellering av vidhäftningen mellan materialen under utmattningsbelastning. De analytiska resultaten är verifierade jämfört mot experimentella mätningar. Utöver det teoretiska och experimentella arbetet har en litteraturstudie (state of the art) genomförts för att kunna identifiera forskningsfronten inom området samt förstå utmattnings på såväl materialnivå som strukturnivå.

I avhandling finns sex stycken artiklar bifogade. Den första artikeln presenterar en ”state of the art” översyn av olika materialkombinationer och tillämpningar av mineral- och epoxibaserade FRP-system vid tillämpning för reparation och förstärkning av betongkonstruktioner utsatta för utmattningsbelastning, artikel: Mahal et. al. (2013) och rapport: Mahal (2015). Den andra artikeln beskriver en försöksserie med förstärkta betongbalkar belastade med utmattningslast, där förstärkta balkar utsätts för samma spänningsnivå i armeringen som oförstärkta för att kunna jämföra effektiviteten mellan EBR plattor och NSM stavar, Mahal et. al. (2015). Den tredje artikeln beskriver utmattningsbeteendet av armerade betongbalkar med utanpåliggande förstärkning bestående av EBR plattor och NSM stavar genom att använda fotometrisk töjningsmätning (DIC-Digital Image Correlation). Förskjutningsfält erhålls genom digitala bilder som registreras under utmattningsförsöken vid specifika cykler, dessa analyseras med avseende på sprickvidd, nedböjning och krökning samt huvudtöjningar med avseende på att upptäcka sprickor, Mahal et. al. (2015). Den fjärde artikeln beskriver en analytisk modell för simulering av utmattningsbeteendet av testade betongbalkar förstärkta med EBR plattor och NSM-stavar, Mahal et. al. (2015). Den femte artikeln beskriver en ny tvåskalig skademodell av vidhäftningen mellan FRP och betong under hög cyklisk utmattningsbelastning. Detta tar hänsyn till det viktigaste steget för en korrekt analys av förstärkta armerade betongbalkar genom en tredimensionell FEM, Mahal et. al. (2015). Den sjätte och sista artikeln beskriver även den modellering av vidhäftning under utmattnings där en jämförelse görs med försök, Mahal et. al. (2013).

Resultatet från den genomförda forskningen är mycket positivt. Det framgår tydligt från det utförda arbetet att utmattningskapaciteten kan förlängas avsevärt genom förstärkning. Under flera av försöken hade armeringsjärnen utmattats så de var av, trots detta fortsatte konstruktionen att bära last.

I praktisk tillämpning är det möjligt att spara avsevärda kostnader samtidigt som man förlänger livslängden på en betongkonstruktion, t ex en järnvägsbro, genom förstärkning. Arbetet visar vidare på att man även vid en lastökning kan förbättra utmattningskapaciteten avsevärt på våra broar genom förstärkning.

# INNEHÅLL

<b>FÖRSTÄRKNING FÖR UTMATTNING - BAKGRUND</b> .....	4
RESULTAT FRÅN TIDIGARE STUDIER .....	4
PROBLEMSTÄLLNING .....	4
SYFTE .....	4
BEGRÄNSNINGAR.....	5
RELEVANS .....	5
METODIK .....	5
LABORATORIEFÖRSÖK .....	6
<b>SLUTSATS</b> .....	13
<b>FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE</b> .....	13
<b>REFERENSER</b> .....	13
<b>BILAGOR</b> .....	14

# FÖRSTÄRKNING FÖR UTMATTNING - BAKGRUND

## Resultat från tidigare studier

Att ta tillvara på befintliga byggnadsverk blir allt viktigare, detta innebär också att en stor del av våra byggnadsverk, bl a broar, måste underhållas, repareras, förstärkas eller bytas ut. Investeringarna för renoveringar och byggnadsverk uppgår till ca 2 miljarder SEK per år, detta motsvarar ca 2 % av totala investeringsvolymen inom anläggningssektorn. En stor del av dessa anläggningar är byggda i betong. Mer effektiva metoder för förstärkning och förlängning av livslängden kan med relativt små insatser innebära ett hållbarare samhälle, både ur en ekonomisk och miljömässig synvinkel. Ett exempel är förstärkning av en järnvägsbro i Frövifors där farbanan i en trågbro förstärktes i tvärled för ökad böjmomentkapacitet. Byta ut bron och ersätta den med en ny var inte bara komplicerat utan skulle också medföra kostnader över 20 miljoner SEK. En förstärkning med kolfiberkomposit löste de aktuella bärighetsproblemet till bråkdelen av denna kostnad, ca 1.5 miljoner kr, och utan att trafiken behövde ledas om eller stoppas. Denna metod är således både tekniskt och ekonomiskt fördelaktig. Enkelt beskriven fungerar den på så sätt att en yttre armering limmas fast mot betongens yta, dvs. den armering som saknas på insidan ersätts med ny armering på utsidan. Tekniken kan även användas för trä- och stålkonstruktioner. Metoden har med framgång använts i över 20 år och Luleå tekniska universitet är pionjär inom området och besitter såväl djup kunskap som lång erfarenhet. Att metoden fungerar för att ta upp ökade statiska laster råder det ingen tvekan om. Dock har forskningen gällande dynamisk belastning varit blygsam.

Förstärkning av betongkonstruktioner med kolfiberkomposit har visat sig vara en mycket bra metod för att förlänga livslängden vid utmattningsbelastning, Wang et. al (2007). Från tidigare genomförda försök vid Luleå tekniska universitet så har det tydliggjorts att förstärkning för utmattning i böjning, Hjort (1998), ökar livslängden. Det är även visat förstärkning för utmattningslast i tvärkraft, Mattsson (1999), så kan till och med den statiska bärförmågan ökas jämfört med ett oförstärkt tvärsnitt. Det är alltså fullt möjligt att förstärka betongtvärsnitts utmattningskapacitet. Den största tröskeln är alltså inte att påvisa de goda egenskaper och med lätthet som utmattningskapaciteten kan höjas genom förstärkning med kolfiberkomposit, utan att modeller som behövs för att prediktera livslängden. I tillägg, så är beror även förstärkningseffekten i utmattning på valt förstärkningssystem. De flesta tillgängliga forskningsresultat är baserade på det traditionella förstärkningssystemet med ytmonterade komposit. Dessa har sämre förankringskapacitet än de nyare systemen som baseras på täckskiktsmonterade komposit, bl.a. NSM (Near Surface Mounted) systemet som utvecklats vid Luleå tekniska universitet, Täljsten et. Al (2003), Badawi & Soudki (2009).

## Problemställning

Betongkonstruktioner utsatta för utmattning över sin tillåtna nivå får en avsevärt lägre livslängd än de är avsedda för. Typiska konstruktioner är broar. Att förstärka betongkonstruktioner för utmattningslast är komplicerat och medför ofta att konstruktionen måste bytas ut, vilket är betydligt mer kostsamt än om den går att förstärka.

## Syfte

Syftet med denna studie är att komplettera tidigare forskning så att delar av de kunskapsluckor som finns kan fyllas igen. Konkret avses att såväl förbättra den teoretiska som praktiska kunskapsbasen gällande förstärkning för utmattning med kompositmaterial. Konkret har syftet varit:

- Att utveckla en analytisk modell som beskriver det icke linjära beteendet av betongbalkar förstärkta med komposit där man tar hänsyn till effekten av progressiv skadebild av material under belastning.
- Att utveckla en konstitutiv modell som kan beskriva beteendet i vidhäftningszonen hos kompositförstärkta betongbalkar utsatta för utmattningslast.
- Att utreda hur en utmattningslast påverkar beteendet hos betongbalkar förstärkta med laminat respektive NSM (Near Surface Mounted) kompositarmering.
- Att föreslå en metodik för att förlänga livslängden hos betongkonstruktioner utsatta för upprepade utmattningslast vilka annars hade behövt ersättas med en ny konstruktion.

## Begränsningar

Genomförande av laboratorieförsök är kostsamt, än mer kostsamt och tidsödande är om man utför försök med avseende på utmattning. Av den orsaken har såväl antalet provkroppar som antalet utmattningscykler begränsats. Detta medför bl a att parametrar som storlek på provkropp, förankringslängder, undersökning av varierande materialkvaliteter inte genomförts.

En del av dessa begränsningar har försökts täckas upp genom det analytiska arbetet. Dock skulle det i framtiden vara önskvärt att komplettera den genomförda studien med såväl fler laborietester som försöka i fält. Det sistnämnda skulle vara av stort värde och kunna tydligt visa på möjligheterna med förstärkning för utmattning.

## Relevans

Projekt är relevant ur branschsynpunkt då efterfrågan på nya och effektiva metoder eller förbättring av befintliga metoder för att bedöma nyttan av reparations- och förstärkningsåtgärder efterfrågas. Exakt vad detta innebär i ekonomiska termer är dock svårt att kvantifiera, men om man antar att ca 1 - 2 % av allt som har byggts måste underhållas/repareras/förstärkas per år, medför detta ett underhållsbehov av ca 30 - 45 Miljarder SEK/år, baserat på ett totalt värde av anläggningar motsvarande ca 3 000 Miljarder SEK.

Den konkreta nyttan med projektet är att ta fram ett ytterligare verktyg till verktyglådan för reparation och förstärkning av betongkonstruktioner. Ett verktyg som kan användas på befintliga konstruktioner utan att verksamheten behöver stoppas och samtidigt till en betydligt lägre kostnad än dagens befintliga teknik, t ex utbyte eller utanpåliggande spännkablar.

## Metodik

Metodiken för arbetet har varit följande:

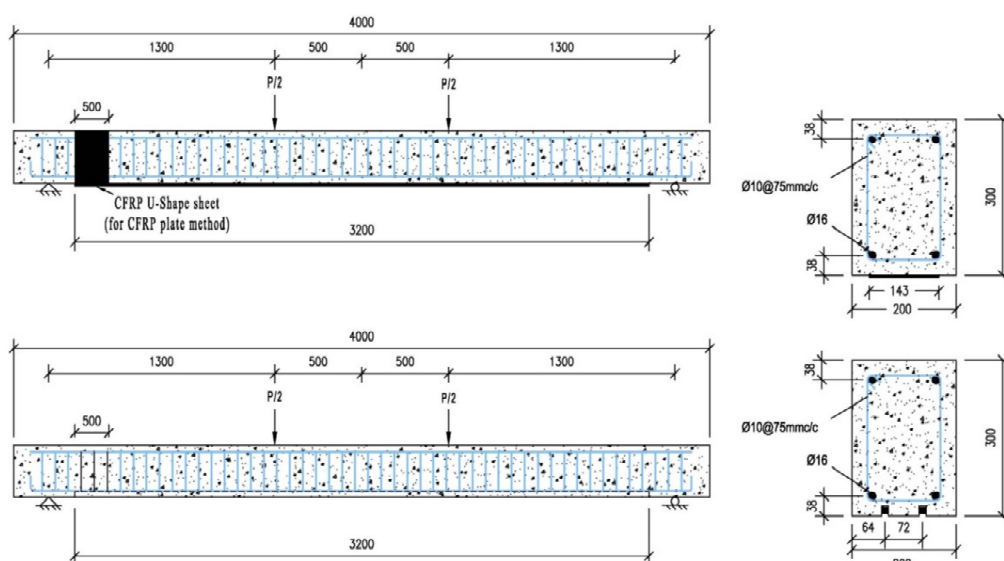
- Grovplanering - Övergripande inriktning och struktur
- "State of the Art" - Kartläggning av forskningsfront
- Teoretisering, modellering, analys -Djupare förståelse av problematiken kring förstärkning för utmattning
- Detaljplanering - Detaljerad kartläggning vad som behövde genomföras
- Experimentell studie - Genomförande av laboratorieförsök och utvärdering av dessa
- Utvärdering och sammanställning – utmynnade in en Dr. avhandling och ett flertal artiklar
- Förslag till fortsatt arbetet – vad som behöver göras för att metoden ska få utbredning

Utmaningen i projektet har varit att med begränsade resurser samtidigt utföra kostsamma laboratorieförsök som analytiska studier – i första hand FE-modellering. Genom en bra planering och ett strukturerat arbetssätt har detta till stor del klarats av. Önskvärt hade, som tidigare nämnts, varit en större experimentell del för att erhålla ett större underlag i samband med analysarbetet.

# Laboratorieförsök

## Provkroppar

Tolv fritt upplagda armerade betongbalkar,  $l \times h \times b = 4\,000 \times 300 \times 200$  mm, provades, se också figur 1. Samtliga balkar hade motsvarande mängd drag-, tryck- och skjuvarmering. Vilket i detta fallet innebar två armeringsjärn  $\phi 16$  på dragsidan och två stycken på trycksidan. Skjuvarmeringen utgjordes av  $\phi 10$  med 75 mm centrumavstånd. Utav de 12 balkarna förstärktes 5 med EBR (External Bonded Reinforcement), dvs laminat och 5 med NSM (Near Surface Mounted), dvs rektangulära stavar som limmades i försågade spår,  $b \times d = 15 \times 17$  mm, i betongens täckskikt. EBR förstärkningen utgjordes av laminat med tvärsnittet:  $1.4 \times 143$  mm, för NSM stavarna var tvärsnittet  $10 \times 10$  mm. I samtliga fall var längden på förstärkningsmaterialet 3200 mm. I samtliga fall användes ett tvåkomponents rumshärdande epoxilim för limningen. Samtliga betongytor slipades så att ballasten framträdde, därefter rengjordes ytorna med tryckluft innan limning. Samtliga materialdata framgår av tabell 1 och tabell 2.



Figur 1 Balkarnas geometri, armeringskonfiguration och förstärkningsdetaljer

Tabell 1 Materialdata för provade balkar

Specimen	Type of load	Concrete compressive strength (MPa)	Standard deviation	Concrete Tensile strength (MPa)	Standard deviation	Fracture energy (N/m)	Young's modulus of CFRP (GPa)
B13-0-F	Fatigue	71	0.71	4.2	0.28	0.0878	-
B10-NE1-F-C	Fatigue	73	1.34	4.3	0.02	0.1222	200
B9-PE1-F-C	Fatigue	72	2.28	3.9	0.24	0.1222	200
B8-NE2-F	Fatigue	75	1.47	4.5	0.19	0.1269	150
B7-NE2-S	Static						
B3-NE1-F	Fatigue	71	1.50	4.7	0.26	0.0964	200
B4-NE1-S	Static						
B1-PE1-F	Fatigue	71	2.18	4.2	0.16	0.0964	200
B2-PE1-S	Static						
B5-PE2-S	Static	72	0.26	3.9	0.34	0.1269	150
B6-PE2-F	Fatigue						
B11-0-S	Static	64	1.40	4.0	0.51	0.0878	-

Två typer av kvaliteter på kompositmaterial användes, här var syftet att undersöka effekten av kompositens styvhet. Även två olika typer av lim finns redovisade i tabell 2. StoPox LH används för att limma väv, som användes för att undvika fläkning ute vid den ände som ej var instrumenterad, och StoPox SK41 för laminat och stavar, se tabell 2.

Tabell 2. Materialegenskaper hos komposit och lim

Material	<i>compressive strength (MPa)</i>	<i>Tensile strength (MPa)</i>	<i>Young's modulus (GPa)</i>	<i>Ultimate strain (%)</i>
Composite <sup>a</sup>				
StoFRPComposite E	-	1800	150	12
StoFRPComposite IM	-	2900	200	14
Adhesive <sup>a</sup>				
StoPox LH	100	90	3.50	-
StoPox SK 41	82	19	7.87	-

<sup>a</sup> Supplier's data

### Förstärkning med laminat (EBR)

Undersidan av betongen slipades så att ballast motsvarande ca 5 mm frilades, därefter blåstes ytan ren och en primer för det aktuella förstärkningssystemet påfördes. Efter härdning av primer limmades laminaten mot ytan med ett 2 mm tjockt limlager. Proceduren framgår av figur 2. Härdning av limmet skedde därefter i rumstemperatur, 21 °C under minst 7 dagar innan provning. Efter härdning av lim applicerades två lager väv över ena änden av laminatet och upp över balkens båda höjdsidor, se figur 3.

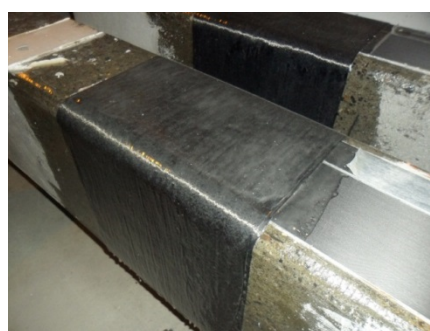


(a) Grinding

(b) Priming

(c) CFRP and epoxy

Figur 2 Limning av EBR



Figur 3 Limning av väv över ände på laminat (EBR)



## Förstärkning med NSM

Förstärkningen med NSM stavarna påbörjade genom att spar sågades upp i täcksiktet på undersidan av betongbalkarna, 15 mm breda och 17 mm djupa. Spåret rengjordes noga med tryckvatten och efter torkning påvördes även här en spoxiprimer för det aktuella förstärkningssystemet. Efter det att primern härdat fylldes spåren med lim och de rektangulära stavarna, 10 x 10, monterades. Även här härdade limmet i rumstemperatur, 21 °C, under 7 dygn innan provning. Förstärkningsproceduren framgår av figur 4.



(a) Groove

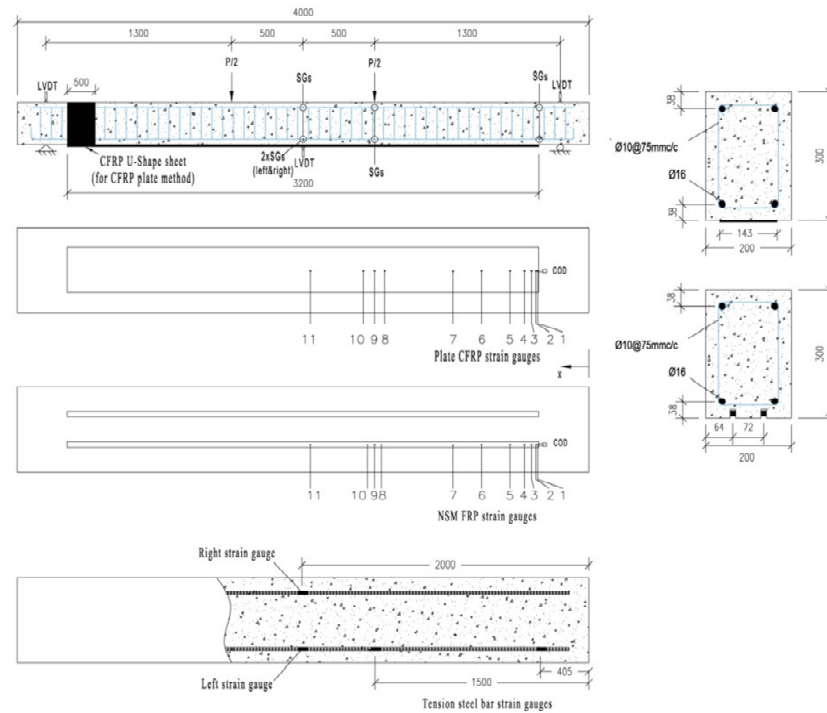
(b) Priming

(c) CFRP and filling epoxy

Figur 4 Installation av NSM stavar

## Instrumentering

Instrumentering av balkarna visas i figur 5. Såväl armeringen som komposit förseddes med töjningsgivare. Nedböjningarna och sättningar vid stöd under belastning mättes med LVDT (linear voltage differential transducers) givare. Dessutom användes spricköppningsgivare (COD-crack opening displacement) för att mäta förskjutning mellan ände på laminat och betong.



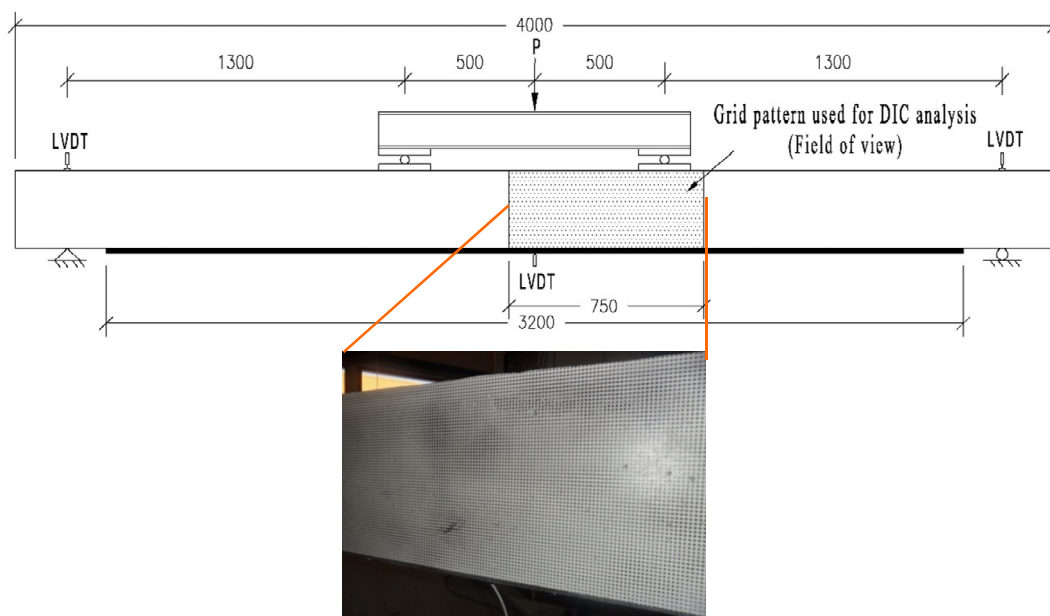
FRP Gauge	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Location, X (mm)	405	420	450	500	600	800	1000	1470	1500	1530	2000

Figur 5 Instrumentering samt placering av töjningsgivare på laminat

Det optiska systemet ARAMIS (GOM-Gesellschaft für Optische Messtechnik GmbH) för töjningsmätning användes för att kontinuerligt under provningen mäta sprickutvecklingen under såväl statisk som dynamisk belastning, se figur 6, 7 och 8. Kortfattat fungerar systemet så att man applicerar en yta med pixlar, förskjutningen av dessa pixlar i förhållande till ett referensläge registreras optiskt och mjukvara i systemet räknar om detta till förskjutningar/töjningar.



Figur 6 ARAMIS



Figur 7 Placering av pixlar/struktur på den yta som bedöms mest intressant ur provningssynpunkt.



Figur 8 Kalibrering av ARAMIS

## Provuppställning

Samtliga 12 betongbalkar provades i fyrapunktsbelastning. Upplagslängden var i samtliga fall 3 200 mm, se figur 9. Benämningen av balkarna är följande; Referensbalkar "0", CFRP förstärkta balkar "N" eller "E" beroende på om det är NSM eller EBR.  $E_1 = 200 \text{ GPa}$  och  $E_2 = 150 \text{ GPa}$  avser elasticitetsmodul på kompositen. Symbolerna F och S betecknar utmattningslast (fatigue) eller statisk (static) belastning. Slutligen "C" syftar på det fall när de provade balkarna har varit förspräckta, vilket genomfördes av en balk för varje förstärkningstyp. Under utmattningsförsöken, oavsett om det var oförstärkta eller förstärkta balkar, pålades en belastning så att spänningen i dragarmeringen uppgick till 258 MPa (spänningsvidd). Detta skulle i det aktuella fallet motsvara ca 600 000 lastcykler till utmattningsbrott. I samtliga fall avbröts försöken vid 600 000 cykler oberoende av om balkarna hade uppnått brott eller ej. Anledningen var kostnad och tid för provningen. De balkar som inte uppnått brott vid 600 000 cykler belastades statiskt till brott. Kontinuerlig mätning av töjningar och deformationer utfördes. Den optiska mätningen registrerade töjningar/förskjutningar vid förta belastning sedan vid 100 000, 200 000, 300 000, 400 000, 500 000 och slutligen vid 600 000 cykler, vid min- och maxlast.



Figur 3.9 Provuppställning

## Resultat från provning

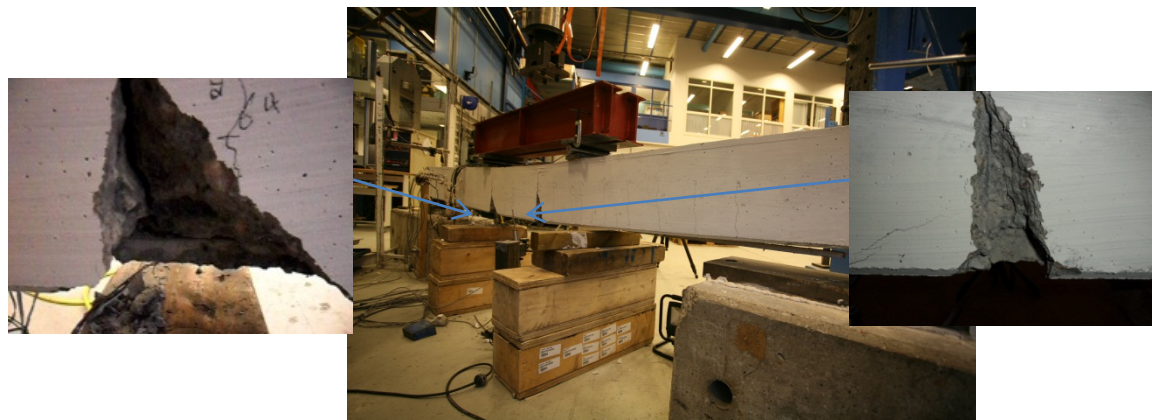
I tabell 3 sammanfattas resultaten från provningen. Här framgår bl a brottmoder, antalet cykler när armeringsjärn utmattas och totalt antal cykler fram till 600 000 st.

Tabell 3 Resultat från statisk och dynamisk (utmattning) provning

Beam	Load range (kN)	1st cycle dissipation energy (Area/load)	Total No. cycles	Total deflection during last cycle	No. of cycles at steel ruptures	Percentage of fatigue life remaining after first rupture	Fatigue Failure mode	Ultimate static load (kN)	Static Failure mode
B3-NE1-F	6-64	2.5	437,222	22.9	408,094	6.6	ID*	-	-
B8-NE2-F	6-64	2.3	599,107	54.9	348,245 373,460 463,394 491,492	41.8	ID	-	-
B1-EE1-F	6-64	2.2	520,733	15.9	456,213	12.4	ID	-	-
B6-EE2-F	6-64	2.6	438,593	14.7	416,866	4.9	ID	-	-
B9-EE1-F-C	6-64	1.7	600000	11.7	-	-	-	177	ID*
B10-NE1-F-C	6-64	1.6	600000	23	470305 503841	21.6	-	115	ID
B13-0-F	6-38.7	3.1	600000	12.45	-	-	-	82.7	SY*+CC*
B7-NE2-S	Static	-	-	-	-	-	-	194.4	SY+ID
B4-NE1-S	Static	-	-	-	-	-	-	210.9	SY+ID
B2-EE1-S	Static	-	-	-	-	-	-	177.4	ID
B5-EE2-S	Static	-	-	-	-	-	-	169.5	ID
B11-0-S	Static	-	-	-	-	-	-	86.1	SY+CC

\*ID=intermediate debonding, CC=concrete crushing, SY=steel yielding

Det framgår tydligt från tabell 3 att samtliga förstärkta balkar där utmattning skedde i armeringsjärnet fortsatte att bära last. Den typiska brottmoden i de fall då antalet cykler vid brott understeg 600 000 var vidhäftningsbrott i den sektion där ett eller flera armeringsjärn hade utmattats. Detta är förväntat då det uppstår höga skjuvspänningar i denna sektion samtidigt då uppsprickningen var avsevärd. Ett exempel på detta visas i figur 10.



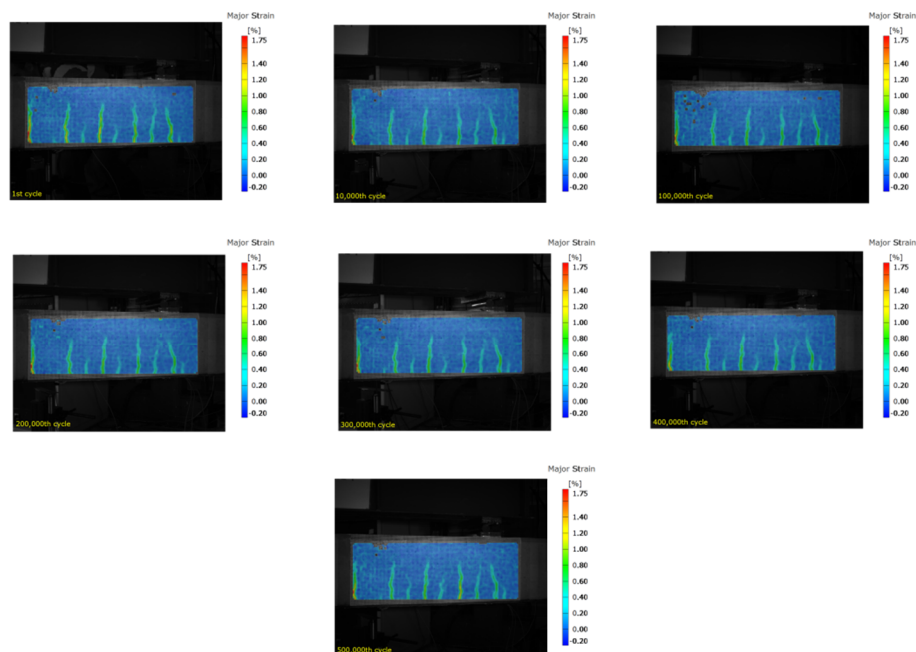
(a) NSM strengthened beam (B8-NE2-F)



(c) Plate strengthened beam (B1-EE1-F)

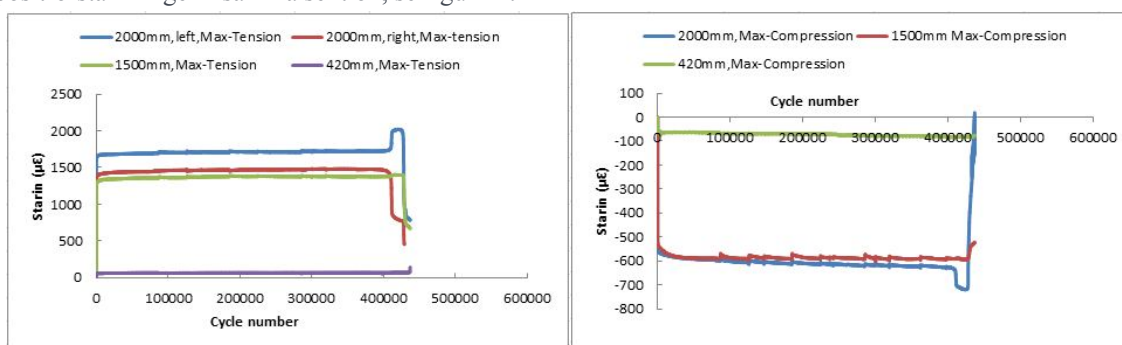
Figur 10 Utmattningsbrott i dragarmering med efterföljande vidhäftningsbrott. Det är uppseendeväckande att förstärkningen trots brott i armering kan överföra den stora last som det är frågan om.

I figur 11 visas ett typiskt exempel på registrering från ARAMIS gällande sprickutveckling efter olika antal belastningscykler. Generellt så var sprickutvecklingen snabb upp till första belastning, därefter var sprickorna relativt konstanta tills det att något eller några av armeringsjärnen utmattats, se också doktorsavhandlingen av Mahal, (2015).

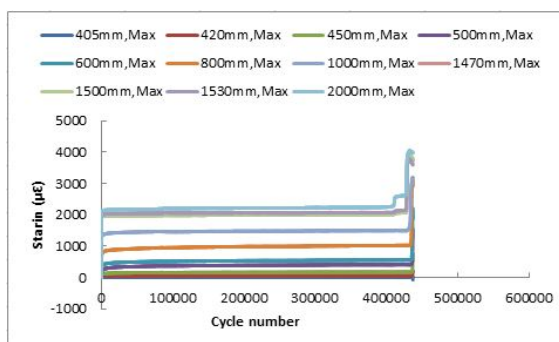


Figur 11 Typiska sprickmönster utvärderade från ARAMIS (data för balk B1-EE1-F)

Efter det att armeringen gått till brott, vilket var i de flesta fall helt uppenbart då betongen kring armeringen hade ramlat bort. Innan brott kunde det noteras en avsevärd ökning i töjning hos armeringsjärnen samt på kompositförstärkningen i samma sektion, se figur 12.



(a) Steel strains



(b) CFRP strains

Figur 12 Töjning i armering och FRP under belastning, balk B3-NE1-F.

## SLUTSATS

I en sammanfattningsrapport är det svårt att rättvist beskriva det omfattande arbete som genomförts. Dock framgår det tydligt att förstärkning av betongkonstruktioner för utmattning kan vara ett sätt att förlänga livslängden hos t ex konstruktioner med höga utmattningslaster. Studien har behandlat befintlig litteratur och forskningsfront i en litteraturstudie. Utifrån denna studie har sedan projektet planerats. Arbetet har lett fram till:

- En analytisk modell som beskriver det icke linjära beteendet av betongbalkar förstärkta med komposit där man tar hänsyn till effekten av progressiv skadebild av material under belastning.
- en konstitutiv modell som kan beskriva beteendet i vidhäftningszonen hos kompositförstärkta betongbalkar utsatta för utmattningslast.

Dessutom har det kartlagts hur en utmattningslast påverkar beteendet hos betongbalar förstärkta med laminat (EBR) respektive NSM (Near Surface Mounted) kompositarmering.

Projektet har använt sig av modern optisk icke berörande mätteknik, ARAMIS, för att kartlägga förskjutningar och töjningar. Denna teknik tillsammans med mer traditionella töjningsgivare har gett värdefull data för modellering. De modeller som tagits fram stämmer bra överens med erhållna laboratorieresultat.

Förstärkningsmetoden skulle redan idag kunna användas i samband med förstärkning för utmattning av t ex järnvägsbroar i slakarmerad betong.

Författaren vill än en gång nämna att det goda resultatet i denna forskning inte skulle ha varit möjligt utan den gedigna insatsen från doktoranden Mohammed Salih Mohammed Mahal, som inte enbart bidrog starkt till den teoretiska utvecklingen utan tog också ett stort ansvar i att genomföra och utvärdera laboratorieförsöken – det har blivit många sena nätter.

## FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

Trots det lyckade arbetet finns det självklart förslag på fortsatt forskning/utveckling. Först och främst bör man genomföra fler laboratorieförsök. Här bör man undersöka fler materialparametrar, flera spänningsnivåer i armeringsjärnen under belastning. Denna utökade parameterstudie ligger sedan till grund för kalibrering av analytiska och numeriska modeller. Dessutom bör man genomföra konkreta fältförsök där man undersöker beteenden i utmattning över en längre tidsrymd även omfattande säsongsvariationer.

## REFERENSER

- Badawi, M. & Soudki, K. (2009) *Fatigue behavior of RC beams strengthened with NSM CFRP rods*. Journal of Composites for Construction, 13(5), pp. 415-421.
- Hjort, N. (1998) *Betongbalkar förstärkta med kolfiberkomposit – Studie av böjbelastade betongbalkar utsatta för utmattning*. Examensarbete 1998:367, Luleå Tekniska Universitet, Avdelningen för konstruktionsteknik, pp. 76.
- Mahal M., Blanksvärd T. and Täljsten B., 2013, *Examination at a Material and Structural Level of the Fatigue Life of Beams Strengthened with Mineral or Epoxy Bonded FRP:s: "The State of the Art"*, Journal of Advances in Structural Engineering, (16)7, pp1311-1327,

- Mahal M., Blanksvärd T. and Täljsten B., 2013, *FE-Modelling of FRP-concrete Interface for Very High Cycle Fatigue Behaviour*, Journal of Key Engineering Materials, Vol 577-578, pp 165-168.
- Mahal M., Täljsten B. and Blanksvärd T., 2015, *Experimental performance of RC beams with FRP materials under monotonic and fatigue loads*, Submitted to Journal of Composites in January 2015.
- Mahal M., Täljsten B. and Blanksvärd T., 2015, *Fatigue analysis of reinforced concrete beams strengthened in flexure using CFRP*, Submitted to Composites Structures in January 2015.
- Mahal M., Täljsten B. and Blanksvärd T., 2015, A two-scale damage model for high-cycle fatigue at the fiber reinforced polymer interface. Submitted to Computers and Concrete in January 2015.
- Mahal M., Blanksvärd T. and Täljsten B., 2015, *Using digital image correlation to evaluate fatigue behaviour of strengthened reinforced concrete beams*, Submitted to Engineering Structures in February 2015.
- Mahal, M., (2015) *Experimental investigations of RC beams strengthened with FRP materials under monotonic and fatigue loads*. Research report 2015, Luleå University of Technology, Division of Structural and Construction Engineering, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, ISBN 978-91-7583-211-1, pp 150.
- Mahal, M., (2015) *Fatigue Behavior of RC beams Strengthened with CFRP, Analytical and Experimental Investigations*, Doctoral Thesis, Division of Structural and Construction Engineering, Department of Civil Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå University of Technology, ISSN 1402-1544, p 173
- Mattson, P. (1999) *Betongbalkar förstärkta med kolfiberkomposit – Tvärkraftskapacitet vid utmattninglast*. Examensarbete 1999:165, Luleå Tekniska Universitet, Avdelningen för konstruktionsteknik, pp. 65.
- Täljsten, B., Carolin, A. & Nordin, H. (2003) *Concrete structures strengthened with near surface mounted reinforcement of CFRP*. Journal of Advances in Structural Engineering, 6(3), pp. 201-213.
- Täljsten, B., Blanksvärd, T. & Sas, G. (2012) *Handbok för dimensionering och utförande i samband med förstärkning av betongkonstruktioner med pålimmade fiberkompositer*. Bok, Luleå Tekniska Universitet, avdelningen för byggkonstruktion och –produktion, ISBN 978-91-7439-146-6, pp. 184.
- Wang, Y.C., Lee, M.G. & Chen, B.C. (2007) Experimental study of FRP-strengthened RC bridge girders subjected to fatigue loading. *Journal of Composite Structures*, 81, pp. 491-498.

## BILAGOR

Doktorsavhandling:

- Mahal, M., (2015) *Fatigue Behavior of RC beams Strengthened with CFRP, Analytical and Experimental Investigations*, Doctoral Thesis, Division of Structural and Construction Engineering, Department of Civil Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå University of Technology, ISSN 1402-1544, p 173