

Innovativ kulfiberforstærkning af eksisterende BETONBROER



**AF HENRIK O.
NIELSEN**
Vejdirektoratet
hn@vd.dk



**AF JAKOB STRUVE
PETERSEN**
COWI A/S
JSTP@cowi.com



**AF BRIAN MIKAEL
KRISTENSEN**
CG Jensen A/S
bmk@cgjensen.dk



**AF ULRIK SLOTH
ANDERSEN**
COWI A/S
USA@cowi.com



**AF MORTEN FROST
KAMPHØVNER**
S&P Reinforcement
Nordic
Morten.Frost@
sp-reinforcement.eu



**AF JACOB WITTRUP
SCHMIDT**
Aalborg Universitet
jws@build.aau.dk

Et nyudviklet kulfibersystem blev i 2020 afprøvet i et pilotprojekt igangsat af Vejdirektoratet. I projektet medvirkede entreprenør CG Jensen, S&P Reinforcement Nordic (amerikanske Simpson Strong-Tie), COWI A/S og Aalborg Universitet. Bro 14-0-073 OF sløjfen ved Kongens Lyngby blev forstærket ved anvendelse af en konventionel kulfiberforstærkningsmetode, hvor Bro 133-0-007 OF af Lindelsevej på Lolland blev forstærket med et innovativt nyt kulfibersystem. Begge broer havde signifikante påkørselsskader, hvor kulfibersystemerne skulle erstatte syv beskadigede forspændte stål-armeringstænger. En vigtig faktor i forhold til anvendelsen af systemet var montageproceduren, da kort montagetid, præcis montage, tolerancer og så videre er afgørende for implementeringen på virkelige konstruktioner. Ved anvendelse af det konventionelle system på Bro 14-0-073 OF sløjfen viste det sig, at fire kulfiberstænger kunne erstatte de brudte stålarmeringstænger dog uden reetablering af forspændingskraften. Ved anvendelse af det nye system for broen ved Lindelsevej kunne både forspændingskraften og bæreevnen reetableres. Indbygning af systemet kunne efter indledende forbedelse monteres på en arbejdsdag under etablering af de nødvendige trafikale

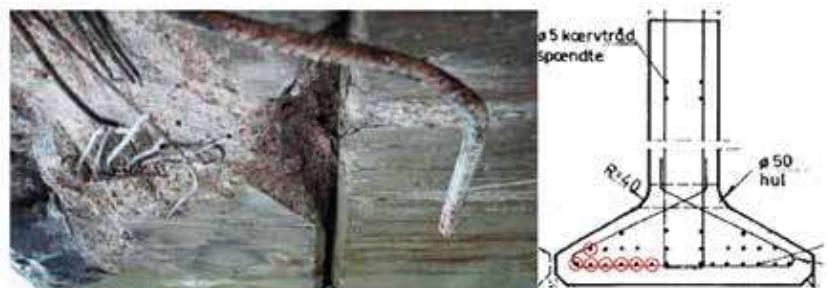
foranstaltninger. Pilotprojektet viste, at systemet kan anvendes effektivt til forstærkning af eksisterende betonbroer uden store trafikgener.

Levetidsforlængelse af eksisterende betonkonstruktioner i trafikinfrastrukturen er en af nutidens store økonomiske samfundsudfordringer. Metoder til at forlænge sådanne konstruktioners levetid kan resultere i signifikante samfundsmæssige besparelser. Derudover reduceres CO₂-belastningen, da effektive forstærkningssystemer kan anvendes til at opgradere bæreevnen for broer eller delvist erstatte korroderet eller skadet armering og dermed forlænge levetiden for eksisterende konstruktioner. En længere levetid bevirker, at CO₂-belastningen reduceres.

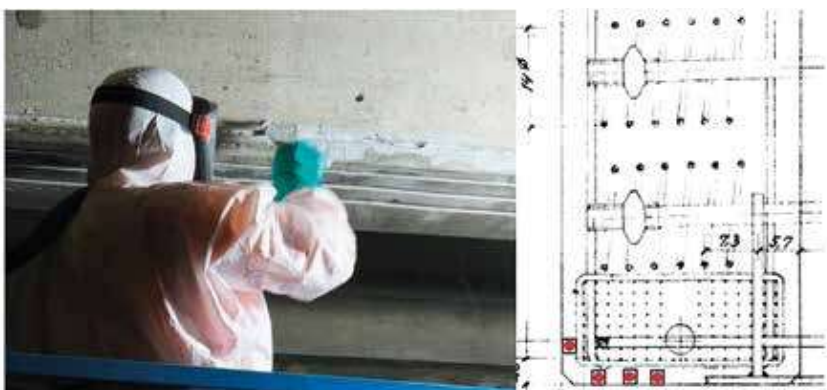
Samarbejdspartnerne har igangsat nærværende projekt, da de ser et stort potentiale i de anvendte kulfiberforstærkningssystemer, der kan forlænge levetiden af eksisterende betonkonstruktioner. Firmaet S&P Reinforcement er en af pionererne inden for fiberforstærkning. De samarbejder med forskeren Jacob Wittrup Schmidt, der udvikler det nye kulfiberforstærkningssystem. Han startede med at udvikle systemet på DTU og forsker sammen med S&P videre i udviklingen af dette på Aalborg Universitet. Det nye system muliggør en højere udnyttelse af kulfiberen, der typisk har en trækstyrke, som er cirka fem gan-



Figur 1: Påkørselsskade bro 14-0-073 OF sløjfen ved Kongens Lyngby



Figur 2: Påkørselsskade bro 133-0-007 OF af Lindelsevej på Lolland



Figur 3: Montage af det konventionelle kulfiberforstærkningssystem

”

Det blev derfor besluttet at benytte to kulfiberforstærkningsmetoder til udbedring af påkørselsskaderne for de to broer

bedring af sådanne skader, da de kan monteres i betonens dæklag, se Figur 3. En optimal reetablering skal således indeholde en forstærkningsprocedure, der fører konstruktionen tilbage til det tidligere forspændings- og bæreevneniveau.

Ved anvendelse af kulfiberstænger til forstærkning af betonkonstruktioner (uden forankring) opnås en forstærkningseffekt, men kulfiberet bliver typisk ikke fuldt udnyttet, da brududviklingen relateret til sådanne systemer sker via de-laminering, inden den fulde styrke i kulfiberen er udnyttet. Etablerede forstærkningssystemer, der kan sikre både forspænding- og bæreevneopgradering ved at udnytte kulfiberens styrke mere optimalt og samtidig kan monteres i dæklaget, er dog ikke tilgængelige på markedet. Det innovative nyudviklede kulfiberforstærkningssystem blev for broen ved Lindelsevej vurderet til at kunne opfylde disse kriterier.

Systemet var afprøvet i laboratorieforhold, men manglede at blive afprøvet på virkelige konstruktioner. Det blev derfor besluttet at benytte to kulfiberforstærkningsmetoder til udbedring af påkørselsskaderne for de to broer:

1. Konventionel kulfiberforstærkning uden anvendelse af det nye system på bro 14-0-073, se Figur 3.
2. Forstærkning ved hjælp af det nyudviklede system der muliggør både forspænding af kulfiberen og forstærkning til oprindeligt bæreevneniveau på bro 133-0-007, se Figur 6.

gehøjere end almindelig stålarmring samt en vægt, der er 20 % af ståls. Dette muliggør hurtigere montage af systemet, som samtidig har en god korrosionsbestandighed og derved kan monteres i overfladen af betonkonstruktionen.

Påkørslerne

Bro 14-0-073 OF sløjfen ved Kongens Lyngby (Figur 1) og Bro 133-0-007 OF af Lindelsevej på Lolland (Figur 2) blev begge påkørt, så syv forspændingslinjer blev beskadiget. Det ses fra Bro 14-0-073, at det kun er en lille del af den interne forspændte armring, der er beskadiget. Der-

imod er det en langt større andel af den interne armring, der er beskadiget i bro 133-0-007 tværsnittet.

Sådanne skader resulterer i et skadesomfang, der er relativt lille, men kompleks at reetablere, da den beskadigede armring var forspændt og armringstæthed i konstruktionen høj. Derudover må der typisk ikke anvendes forstærknings- og reparationsmetoder, der fylder mere end det eksisterende konstruktionstværsnit, da det øger sandsynligheden for påkørsler yderligere.

De anvendte kulfiberforstærkningssystemer egner sig derfor også godt til ud-



Figur 4: Opspænding af det nye kulfiberforstærkningsystem i Aalborg Universitets laboratorium

Konventionel kulfiberforstærkning, bro 14-0-073 i Kongens Lyngby

Indlimningen af den slappe kulfiberarmering foregår ved, at man fræser slidser i bjælkedæklaget, som svarer til størrelsen af kulfiberarmeringen, dog således at der er plads til epoxylim. Slidserne renses, epoxyen lægges i slidserne, hvorefter kulfiberarmeringen trykkes ind i epoxyen, herefter afsluttes fuld indstøbning med epoxy i betonens dæklag, se Figur 3.

Nyudviklet kulfibersystem til forstærkning af bro 133-0-007 på Lolland

Forspænding af kulfiberarmering er normalt en omfattende procedure, da kulfiberstænger er svære at forankre og derved også i praksis svære at udnytte til det tiltænkte spændingsniveau. Udførelsesmetoderne relateret til sådanne systemer kan derfor både være komplicerede og give sikkerhedsmæssige udfordringer (svigt ved højt opspændingsniveau). Dette har dog vist sig muligt under laboratorieforhold, hvor det nye system med for-

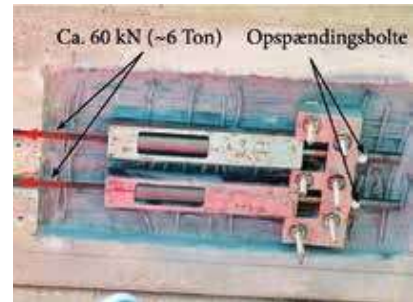
spændte kulfiberstænger er blevet træktestet og testet på betonbjælker.

På Figur 4 ses det nye system opspændt i Aalborg Universitets laboratorie inden anvendelse på den virkelige konstruktion. Der kan dog være stor forskel på anvendelsen i laboratoriet og på en virkelig konstruktion, da montageforholdene forandrer sig signifikant (montagemiljøet, tilgangen til området hvor systemet skal monteres, systemsamlingsproceduren, nye montører, opspændingsforhold og så videre). Det blev dog vurderet, at systemet var klart til at blive afprøvet i et pilotprojekt på en virkelig konstruktion.

Sammenlignet med den konventionelle kulfiberforstærkning er det nyudviklede system konstrueret til at kunne opfylde forskellige forspændingsniveauer - se Figur 6. Derved vil man, som følge af forspændingen, kunne udnytte kulfiberens styrke bedre, hvilket muliggør anvendelsen af færre kulfiberstænger og dermed også udfræsning af færre indlimningslidser.

Placeringen af kulfibersystemet

Inden placeringen af det nye kulfiberforstærkningsystem skulle følgende adres-



Figur 5: Ankerblokken monteret mellem tæt intern armering



Figur 6: Fikseringspladen der sikrer fikseringspunktet midt på broen

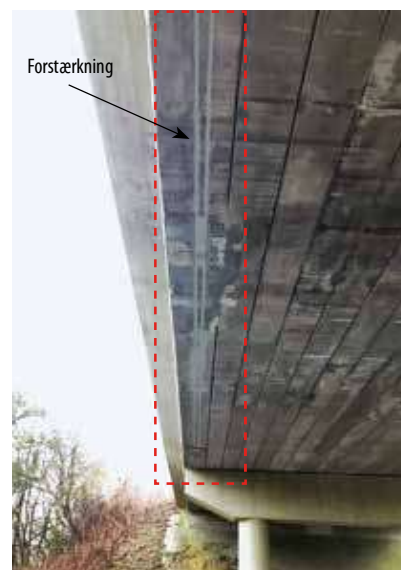
ses: i) Identificering af den aktuelle armerings placering, ii) opmåling af konstruktionens pilhøjde, iii) bestemmelse af konstruktionens pilhøjde, iv) ankerblokkernes placering og relateret udhugning, v) tolerancer, vi) overfladebehandling, vii) fiksering af kulfiberarmeringen, viii) opspændingsprocedure og ix) kulfiberens indlimningsprocedure.

Armeringsforholdene var dog komplicerede, da den eksisterende armering ligger meget tæt og havde begrænset dæklagstykkelse. Ankerblokmontagen skulle derfor foretages med høj præcision uden at beskadige armeringen, samtidig med at blokkene skulle placeres meget præcist for at have den tiltænkte effekt. Derudover skulle der tages højde for konstruktionens pilhøjde, så det blev sikret, at den interne armering ikke kom til at ligge uden for slidserne i broens centerområde. Ankerblokken blev derfor konstrueret med justeringsmuligheder, så indboringerne ikke beskadigede den interne armering, se Figur 5.

Derudover blev der på bromidtten med den største pilhøjde anvendt en specialfikseringsplade, der sikrede, at kulfiberar-



Figur 7: Montage af det nye innovative kulfiberarmersystem



Figur 8: Afluttet arbejde på bro 133-0-007

meringen kunne glide i fikseringspunkterne under opspændingsproceduren. Fikseringsmekanismen var konstrueret til at sikre en stabil opspænding i slidsen, uden kulfiberarmeringen blev beskadiget. Da kulfiberen er et sprødt materiale med svagere styrke vinkelret på armeringsretningen end i den langsgående retning, skulle fikseringspladen også sikre beskyttelse mod kritiske lokale påvirkninger, se Figur 6.

Opspændingen af kulfiberen foregik via opspændingsboltene i ankerblokken, se Figur 5. Det endelige opspændingsniveau på ankerblokkene var cirka 120kN (~12ton) svarende til ca. 60kN (~6 ton) i hver kulfiberarmersstang, se Figur 5. Opspændingskraften blev målt via strain-



Fikseringsmekanismen var konstrueret til at sikre en stabil opspænding i slidsen, uden kulfiberarmeringen blev beskadiget.

gauges under opspændingsproceduren. Målepunkterne var placeret ved fikseringspunktet på midten og lige før ankerblokken for at vurdere, om der opstod fastholdelse ved fikseringspunktet under opspændingen, se Figur 7.

Montagen

De trafikale foranstaltninger kunne løses med daglige eller natlige afspærringer under de indledende arbejder, som CG Jensen A/S udførte sammen med opmåling, skæring af slidser og udhugning til ankerblokke. Indbygning af systemet i konstruktionen kunne udføres på en arbejdsdag, og kulfiberstængerne blev indbygget i fuld længde under kortvarig spærring af vejen, som var nødvendig under opsætningen, indtil kulfiberen kunne låses fast i enten slidserne ved bro 14-0-073 eller ankersystemet på bro 133-0-007. Udstøbningsen med epoxy blev for broen på Lolland udført lige efter fastlåsningsen af kulfiberstængerne for at begrænse de trafikale gener.

Konklusion og fremtidsperspektiver

Der kan på baggrund af pilotprojektet drages følgende hovedkonklusioner - se Figur 8:

- Både det konventionelle- og forspændte kulfiberforstærkningsssystem fungerede som tiltænkt.
- Opspændingsproceduren virkede efter hensigten.
- Det var muligt at fikserer kulfiberarmeringen i slidsen og derved tage højde for pilhøjden.
- Montagen foregik som planlagt.
- Trafikforstyrrelsen var meget begrænset med en fuld spærring af vejen på cirka fem minutter.
- Løsningen med forspænding giver nye muligheder, da det med en sådan forstærkning er muligt at genskabe eller forøge en eksisterende forspænding.

Parterne i projektet ser store perspektiver i forstærkningsmetoden, som nu evalueres nærmere. Systemet vurderes til at kunne blive anvendt til forstærkning og levetidsforlængelse for en række betonkonstruktionstyper. Ud over den anvendte løsning vil der i fremtiden også blive forsket i den næste generation af systemet, hvor forstærkningsmetodens opførelse kan skræddersys til en efterspurgt forstærkningseffekt og duktilitet. ●