

20.4 Kulfiberforstærkninger af betonkonstruktioner

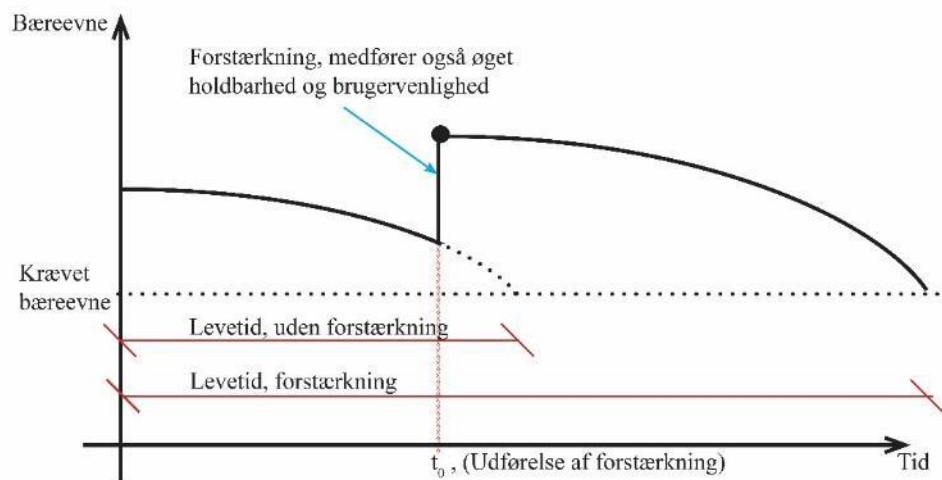
Af Jacob W. Schmidt og Morten F. Kamphøven

20.4.1 Anvendelse af kulfiberforstærkning

Ønsket om forstærkning af en eksisterende betonkonstruktion er typisk et krav om en højere bæreevne. Det kan være, at den oprindelige bæreevne ønskes øget, eller konstruktionen kan være beskadiget pga. nedbrydningsmekanismer eller den kan være fejldimensioneret.

Der findes allerede andre løsningsmetoder til forstærkning, hvor der anvendes konventionelle materialer som fx indlmede og indstøbte stålarmringer til moment- og forskydningsforstærkning, påsatte stålkonsoller til søjleforstærkninger, eksterne forspændte stålstænger/wirer, pålmede stålplader osv.

Kulfiberkompositter (CFRP: **C**arbon **F**iber **R**einforced **P**olymeres) anvendes dog i stigende grad som et alternativ til de traditionelle løsninger pga. CFRP's gode korrosionsbestandighed, trækstyrker der er ca. 5 gange højere end armeringsstål og en vægt, der er ca. 5 gange mindre end ståls. Dette giver mulighed for, at systemerne kan monteres på - eller i - overfladen af konstruktionen.



Figur 1. Levetidsforøgelse af konstruktioner ift. anvendelsesfunktion.

Udføres en tilstrækkelig forstærkning vil man, desuden, ofte kunne opnå en signifikant levetidsforlængelse af betonkonstruktionen, da den derved opfylder gældende krav og kan forblive i brug uden at skulle nedrives, se Figur 1.

Der skal, før en forstærkning foretages, udføres en fyldestgørende inspektion af konstruktionen, der sikrer, at den er egnet til forstærkning. Efter forstærkningen foretages verificerende inspektion af konstruktionens og forstærkningens tilstand, så det sikres, at forstærkningen virker efter hensigten i konstruktionens levetid.

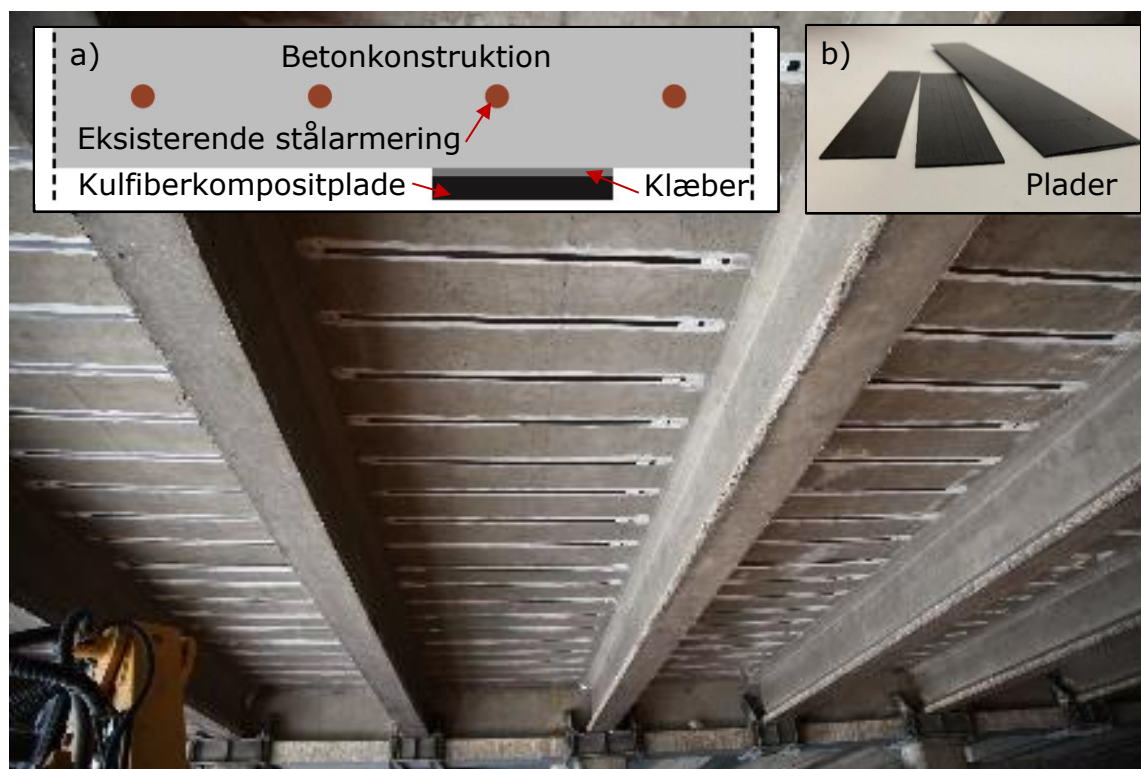
Typiske kulfiberkompositter og anvendelse

Der er tre typiske fremgangsmåder til udførelse af kulfiberforstærkning:

- Pålimning af plader af kulfiberkomposit på betonens overflade
- Indlimning af stænger af kulfiberkomposit i betonens overflade
- Pålimning af en kulfiberdug på betonens overflade.

Kulfiberkompositterne limes direkte på den forberedte betonoverflade eller ind i fræsedede riller i dæklaget. Eksemplerne på Figur 2, Figur 3 og Figur 4 viser de gængse kulfiberkompositmaterialer og geometrier, der anvendes til forstærkning af eksisterende betonkonstruktioner.

Pladeforstærkning, sker ved at lime kulfiberkompositplader direkte på betonens overflade. Der kan herved opnås en forøget bøjningskapacitet, se Figur 2 og 2a. Kulfiberpladerne, se Figur 2b, egner sig til forstærkning af fx betonplader, bjælker og søjler.



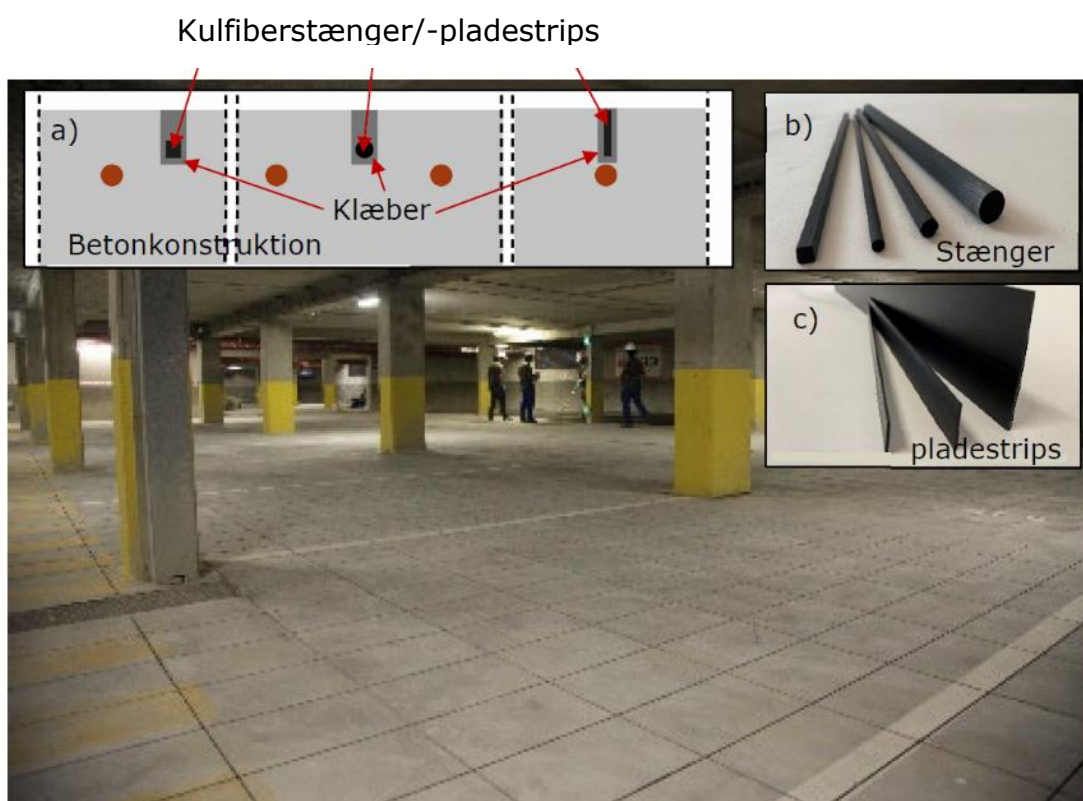
Figur 2. Forstærkning af dæk, a) forstærkningsprincip, b) materialeform.

Det ses af Figur 3+ 3a, at betondæklaget kan udnyttes til indlimning af cirkulære eller firkantede armeringsstænger og pladestrips af kulfiberkomposit. Disse systemer ligger skjult og mere beskyttet i konstruktionen, hvor de omslutes af betonen på 3 sider. Metoden giver typisk muligheden for en bedre udnyttelse af kulfiberkompositmaterialet, og desuden mulighed for supplerende montage af pladeforstærkning i tværgående retning af de indlimede stænger og strips.

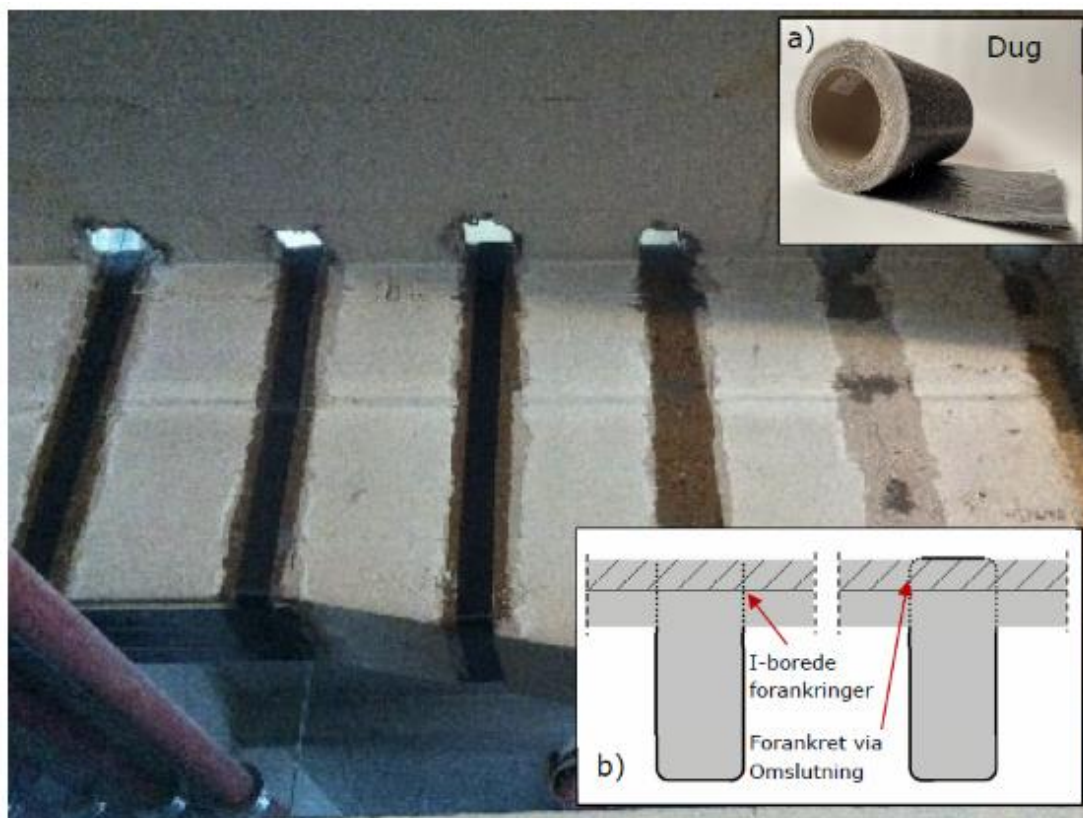
Pålimning af kulfiberdug er den mest anvendte metode til forskydningsforstærkning, se Figur 4+ 4a. Kulfiberdugen bliver svøbt omkring den forbehandlede konstruktion og vædet med epoxylim, så man derved former forstærkningssystemet til konstruktionen.

Når limen er hærdnet, har man derved dannet kompositmaterialet in-situ.

Som det ses af Figur 4b skal forskydningsforstærkningen forankres i betonens trykzone enten som fuld omslutning, borede huller til forankring af kulfiberdugen eller via mekaniske fastgørelser (forankret i trykzonen), der griber tilstrækkeligt fat i forskydningsforstærkningen (se også efterfølgende afsnit om forankringer).



Figur 3. Forstærkning i riller i dæk, a) forstærkningsprincip, b) og c) materialeform.



Figur 4. Forskydningsforstærkning, a) materialeform, b) forstærkningsprincipper.

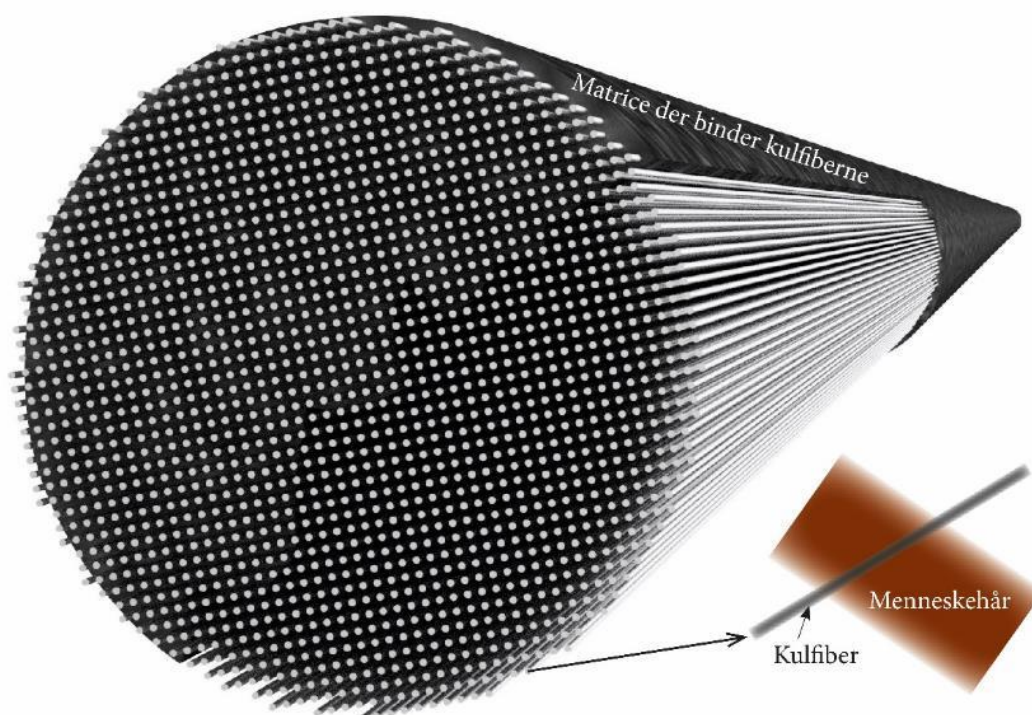
Kulfiberkompositplader og -stænger kan ikke anvendes direkte til forskydningsforstærkning, da de ikke kan bøjes/formes in-situ, som det ses fra stålarmering. Bøjning af materialet foregår derfor ifm. produktionen (typisk som fx L- og U-profiler).

Yderligere eksempler der viser, hvordan de gængse kulfiberkompositmaterialer og geometrier kan anvendes til forstærkning, kan i øvrigt ses på leverandørernes hjemmesider. Se links i litteratur- og leverandøraftsnittet.

For alle kulfiberforstærkningssystemerne gælder, at de tre elementer der gør, at forstærkningen virker efter hensigten, er 1) kulfiberkompositmaterialet, 2) klæberen (limen), der anvendes til at montere kulfiberen til 3) betonen. ISO 10406, ISO 527, ISO 14130 og EN 1504-4 er eksempler på standarder, der kan anvendes til prøvning af disse materialer.

20.4.2 Materialesammensætning og egenskaber

Materialesammensætningen for kulfiberkompositter er kulfibertråde og en matrice, der tilsammen giver kompositten unikke egenskaber, se Figur 5.



Figur 5. Kulfiberkomposit og kulfibers størrelsesforhold.

Til matricen, der binder og omslutter kulfiberen, anvendes enten termohærdende matricer som polyester (vinylester) og epoxy eller termoplastiske matricer. Termoplastiske matricer har den ulempe, at de blødgøres ved opvarmning og kan deformeres. Derfor anvendes ofte termohærdende matricer til kulfiberkompositter, da disse er mere formstabile og desuden elektrisk og kemisk modstandsdygtige.

Som det ses af Figur 5, er kulfiberstrengene ultratynde (ca. 0,005-0,010 mm i diameter) og sammensat af kulfiberatomkæder og mikroskopiske krystaller. Kvaliteten af råfiber karakteriseres ved 1K/3K/6K/9K/12K/15K/18K/24K/48K. Tallet indikerer antal streng i tusinder pr. tråd. Til bygningsforstærkning anvendes typisk kvaliteterne 6K / 9K / 12K.

Kulfiberstrengene samles til en tråd, som rulles op på ruller til forarbejdning med matricen, der via [pultrudering \(se link\)](#) danner kulfiberkompositprofiler. Kulfiber kan via vævning dannes til en kulfiberduk i en given bredde, hvor kulfibertråde bindes sammen med en tynd fibertråd. Nogle producenter har også kulfiberkompositter med fibre i flere retninger.

Materialeegenskaber

Figur 6 viser typiske materialeegenskaber for kulfiberkompositter. Det ses, at arbejdskurven for kulfiberkompositter er lineær og ikke har et flyderegime, som det ses fra stålarmring. Derudover varierer materialeegenskaber alt efter type, hvilket er angivet som et areal i et polygon, da kulfiberkomposittens egenskaber kan designes inden for et interval. Egenskaberne kan skræddersys via kombinationen af de forskellige kulfibertyper, matricetyper samt mængdeforholdet mellem disse materialer.

Den typiske fibervolumen-brøkdel (v_{fiber}) i gængse kulfiberkompositter, der anvendes til forstærkning, findes fra ca. 0,6 – 0,7. Brøkdelen har indflydelse på både E-modulet og styrken i materiale.

Det skal her noteres, at kompositterne har forskellige egenskaber i hhv. fiberretningen og på tværs af fibre, da kulfiber er et anisotropisk materiale (se Figur 7) med forskellige egenskaber i fiberretningen og på tværs af fiberretningen.

Et højere E-modul resulterer dog ikke nødvendigvis i en højere kapacitet, da brudtøjningen på sådanne fibre kan være lavere end for fibermaterialer med lavere E-modul.

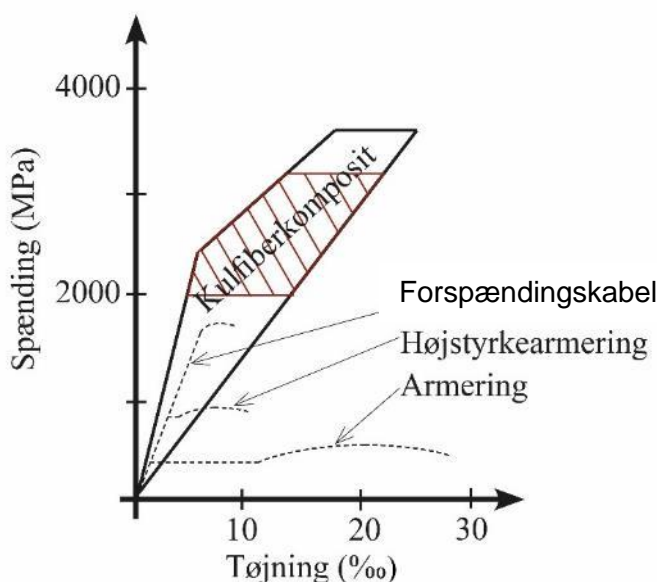
Komposittens stivhed i fiberretningen:

$$E_{samlet} = E_{fiber} \cdot v_{fiber} + E_{matrice} \cdot v_{matrice} ; \text{ hvor } v_{fiber} = \frac{A_{fiberareal}}{A_{samletAreal}}, v_{matrice} = \frac{A_{matriceareal}}{A_{samletAreal}}$$

Kraft i kompositten:

$$P_{komposit} = \epsilon_{tøjning} \cdot (E_{fiber} \cdot A_{fiber} + E_{matrice} \cdot A_{matrice}), \text{ hvor } \epsilon_{tøjning} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\text{Længdeændring}}{\text{OprindeligLængde}}$$

Figur 6 viser et eksempel på kulfiberkompositters spændings/tøjningskurve, hvor arealet i et polygon indikerer, at kulfiberkomposittmaterialets egenskaber kan designes jf. ovenstående indrammede formler. Det rødt-skraverede område indikerer niveauet for kulfiberkompositters typiske maksimalkapaciteter (anvendt til forstærkning af betonkonstruktioner).



Figur 6. Kulfiberkompositter spændings/tøjningskurve sammenlignet med de mest anvendte stålarmeringstyper.

Kulfiberkompositterne differentierer sig fra armeringsstål ved, at trækkurven er lineær elastisk indtil brud. De har derfor ikke en flydespænding og en forlængelse under flydning, som det ses fra stål, men høje brudspændingsniveauer. Typisk angivne ca.

værdier for kulfiberkompositters materialeegenskaber ved lavt og højt E-modul ses i Tabel 1. Det bemærkes her, at materialet trækker sig sammen i længderetningen ved forøgede temperaturer (negativ udvidelseskoefficient). Dette skal der tages hensyn til i designet.

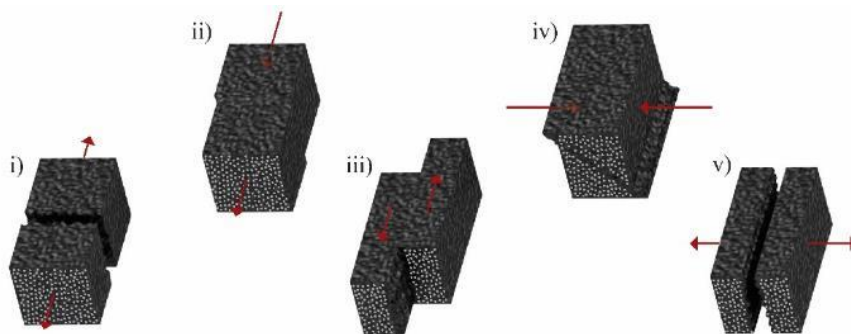
Tabel 1. Generelle materiale egenskaber for gængse kulfiberkompositter.

E-modul [GPa]	Brudspænding [MPa]	Brudtøjning [%]	Temperaturudvidelseskoefficient [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]
200-260	2000-3300	9-16	-1 to 0
160-170		14-18	

Udfordringen ved anvendelse af kulfiberkompositter er det sprøde materiales anisotropiske egenskaber, der giver en svagere styrke i tværgående retning af fibrene. Dette resulterer i, at kulfiberkomposittmaterialet kan generere flere avancerede brudtyper, hvilket ses af Figur 7.

Disse egenskaber gør forankring af fibrene kompleks, da konventionelle gribe- og forankringsmekanismer kan skade kulfiberkompositterne (fx ved anvendelse af mekanisk forankring).

Det ses ofte, at anvendelse af limankre til kulfiberen medfører brud i limfladen mellem kulfiberkompositterne og den anvendte klæber. Det er derfor sjældent, at den fulde styrke kan udnyttes for større tværsnitsarealer, da de omkringliggende materialer bryder før kulfiberkompositterne.



Figur 7. Kulfiberkompositters brudtyper ved forskellige kraftpåvirkninger i forskellige retninger.

20.4.3 Montage af kulfiberkompositter til konstruktionen

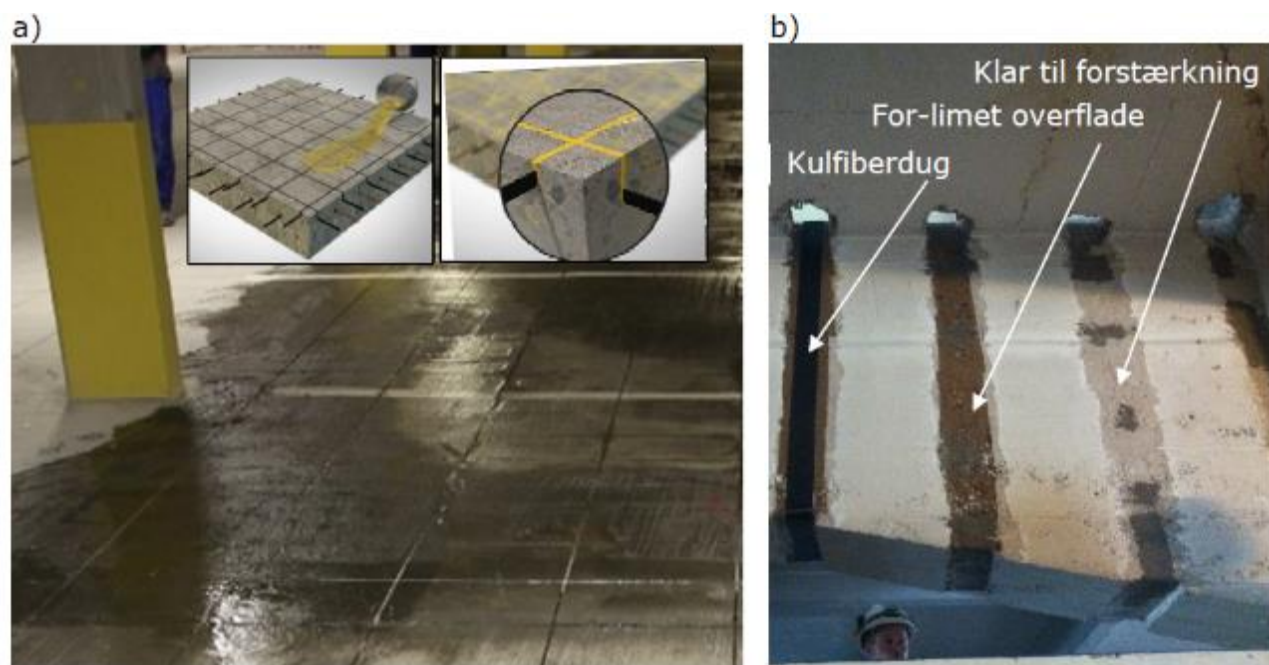
Kulfiberkompositter monteres med en klæber (montagelim) som normalt er en to-komponents epoxy (se Figur 8a). Ved nogle produkter skal betonen forbehandles med en primer. Alt efter den valgte kulfiberforstærkningstype eller metode, anvendes der klæber med forskellig viskositet. Det vil sige, at når man eksempelvis forstærker med kulfiberkompositplader eller stænger, anvender man typisk en relativ halvfast klæbetype. Dette gør, at klæberen kan monteres på kulfiberpladen, uden at det løber af overfladen (se Figur 8b), hvorefter pladerne med klæberen kan monteres på den

forberedte beton. Da kulfiberkompositterne har en lav vægt, kan klæberen fastholde kulfiberkompositterne i den tiltænkte position indtil klæberen er hærdet, hvilket ikke er muligt ved anvendelse af stålplader.



Figur 8 a) Opblanding af 2-komponent montagelim, og b) påføring på kulfiberlaminat.

Til forskydningsforstærkning, søjleforstærkninger med kulfiberduk og for ind-rillede kulfiberstænger/-pladestrips på oversiden af bjælke- og dækkonstruktioner eller i søjler, anvendes typisk en mere flydende klæber.



Figur 9 a) forstærkning af dækkonstruktion i oversiden med kulfiberstrips b) forskydningsforstærkning af bjælke med kulfiberduk.

Brugstiden (også benævnt potlife) er den åbne tid, man har til rådighed, efter at man har blandet komponenterne sammen. Den kemiske reaktion starter, og klæberens hærder op fra en "flydende" konsistens til gelelignende konsistens og til sidst til en fast hård substans. Afhængig af produktsammensætning, luftfugtighed og temperatur, ligger brugstid typisk mellem 25-90 min. ved ca. 20-23°C

Tørretiden varierer med temperaturer på overfladen og i omgivelserne, men er den tid, det tager til det er helt tørt (overgangsfasen fra gel til fast substans). Afhængig af produktsammensætning, luftfugtighed og temperatur, vil tørretiden typisk ligge mellem 2-4 timer. ved ca. 20-23°C

Hærdetiden er den tid, det tager for klæberens at hærde op til fuld styrke. Afhængig af produktsammensætning, luftfugtighed og temperatur, er hærdetiden typisk 7 døgn ved ca. 20-23°C

Ved montage af kulfiber skal man sikre sig, at de anviste fugtighedsforhold i betonen og den krævede relative luftfugtighed overholdes. Temperaturforholdene i luften på overfladerne undersøges for at sikre, at dugpunktet ligger over de 3°C. Arbejds-temperaturer ligger normalvis ved 8-35°C. Der kan anvendes en dugpunktmåler on-site til at verificere dette. Fugt i betonoverfladen skal undgås, når epoxylim anvendes. Dette sikrer en optimal vedhæftning af kulfiberkompositten.

Forundersøgelse og prøvning af materialeegenskaber

Ved anvendelse af kulfiberforstærkning skal man sikre sig, at systemet er testet. Det vil sige, at man vælger produkter fra samme leverandør, hvor komponenterne, der anvendes til forstærkningssystemet, er testet som et samlet system. Det giver en øget sikkerhed ift. systemets tiltænkte funktion, forstærkningseffekt samt over for de anvendte kulfiberforstærkningsmaterialer.

Inden forstærkningen igangsættes, er det vigtigt at kende følgende:

- Konstruktionens statiske funktion og afgrænsning
- Eksisterende og nye belastningskrav
- Geometri (tværsnitsmål, længde, mv.)
- Armeringsareal og placering.

Den ydre geometri kan opmåles inden forstærkningsproceduren. For at sikre sig, at armeringsareal og placering er korrekt, anbefales det, at der udføres lokale udhugninger ved armeringen, og konstruktionen scannes så dæklagstykkelse, armeringsplacering, og -areal kan fastlægges.

Materialeegenskaber

- Betonens tryk- og trækstyrke
- Eksisterende armeringsstyrke
- Betonens aftræksstyrke.

Betonens karakteristiske trykstyrke ved forstærkning skal ligge fra ca. 15-50 MPa, og kan bestemmes efter flere metoder beskrevet nærmere i betonhåndbogen - afsnit

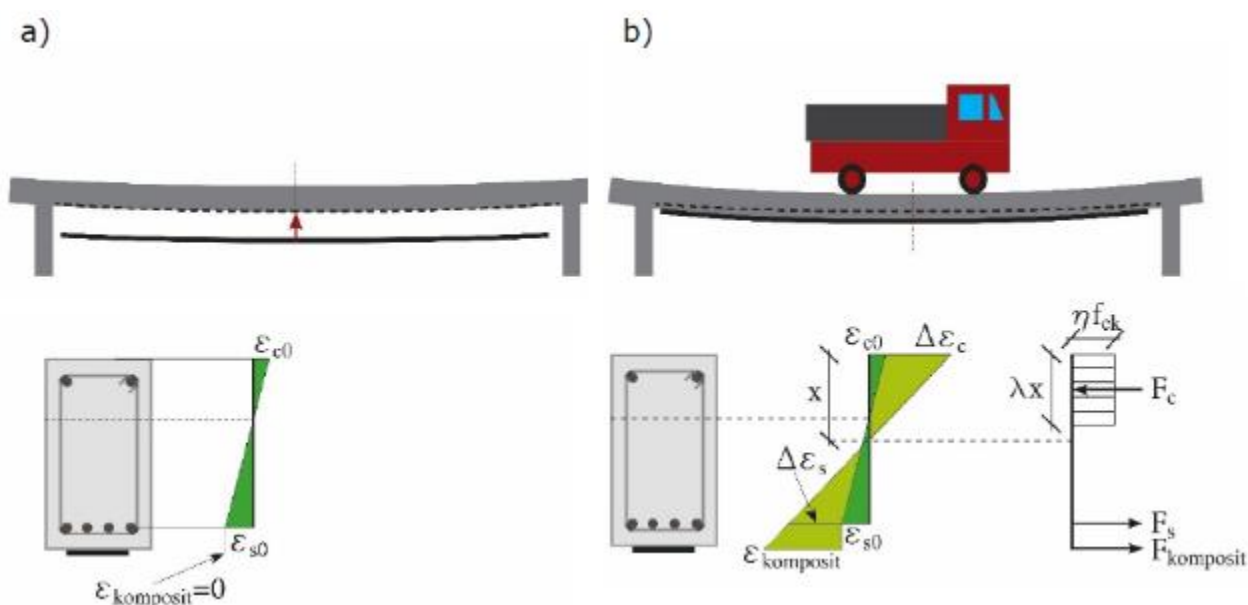
10.1.6. Betons trækstyrke er ligeledes beskrevet i betonhåndbogen - afsnit 10.2.2. Derudover udføres typisk aftræksforsøg på betonoverfladen for at lave et tjek af betonens overfladestyrke, især i forankringszoner.

Aftræksstyrken kan bestemmes ved udførelse af aftrækstest (pull off tests) jf. DS/EN 1542. Da betonens styrke og tilstand kan variere, er det op til det projekterende firma at afgøre, om de udførte tests er repræsentative og brugbare. Aftrækstyrkens karakteristiske værdi kan beregnes ud fra 5 % fraktilen jf. DS/EN 1990 DK NA – EC 0 annex D. Målte aftræksstyrker skal ligge med værdier større end 1,5 MPa for at kunne overføre kræfterne fra betonen til kompositten.

20.4.4 Kulfiberforstærkning af betonkonstruktioner

Når en konstruktion forstærkes via konventionelle metoder, forstærkes normalt alene for de belastninger, der påføres konstruktionen efter, at forstærkningen er foretaget. Dvs. at man ikke forstærker for egenvægtsbelastninger og andre belastninger, der allerede forekommer på konstruktionen inden forstærkningen, se figur 10a.

Forstærkningen aktiveres derfor først, når der tilkommer yderligere belastninger efter at forstærkningen er udført, se Figur 10b. Det ses af Figur 10a, at der allerede er en starttøjning pga. de allerede eksisterende belastninger. Derfor er det interne armeringsstål og betonen allerede påvirket med en tøjning på hhv. ε_{s0} og ε_{c0} . Der er ingen tøjning i kulfiberforstærkningen ($\varepsilon_{\text{komposit}}$), da konstruktionen skal aktiveres yderligere før denne opstår. I Figur 10b ses det, at konstruktionen belastes yderligere, og der derved opstår forøgede tøjning i armeringsstålet ($\Delta\varepsilon_s$), betonen ($\Delta\varepsilon_c$) og kulfiberforstærkningen ($\varepsilon_{\text{komposit}}$).



Figur 10 a) Konstruktion påvirket af permanent (egenvægt) belastning(er) under forstærkningsproceduren. b) Kulfiberforstærkningen aktiveres ved tilkommende belastninger efter udført forstærkning.

I Figur 10b med den statiske ligevægt i vektorerne for betonens bidrag (F_c) og hhv. armeringsstålets (F_s) og förstærkningssystemets bidrag (F_{komposit}), er det vist, at betonens fulde kapacitet er udnyttet. Dette er dog kun ét (men gængs) ligevægts-scenarie, da det ikke er altid, at betonen og armeringsstålet er fuldt udnyttet når brudkapaciteten af kulfiberforstærkningssystemet er opnået.

Da kulfiberforstærkningssystemernes typiske brudtype er delaminering i betonen, udnyttes den fulde kapacitet af selve kulfiberkompositterne sjældent. Forspænding af fiberkompositten kan dog øge udnyttelsesgraden, se Figur 12b. Ved sammenligning med stålarmers duktile (seje) brud, giver brudformerne for delaminering ofte en reduceret varsling fra betonkonstruktionen, før bruddet opstår. Figur 11 beskriver nogle af de primære brudformer for delaminering.

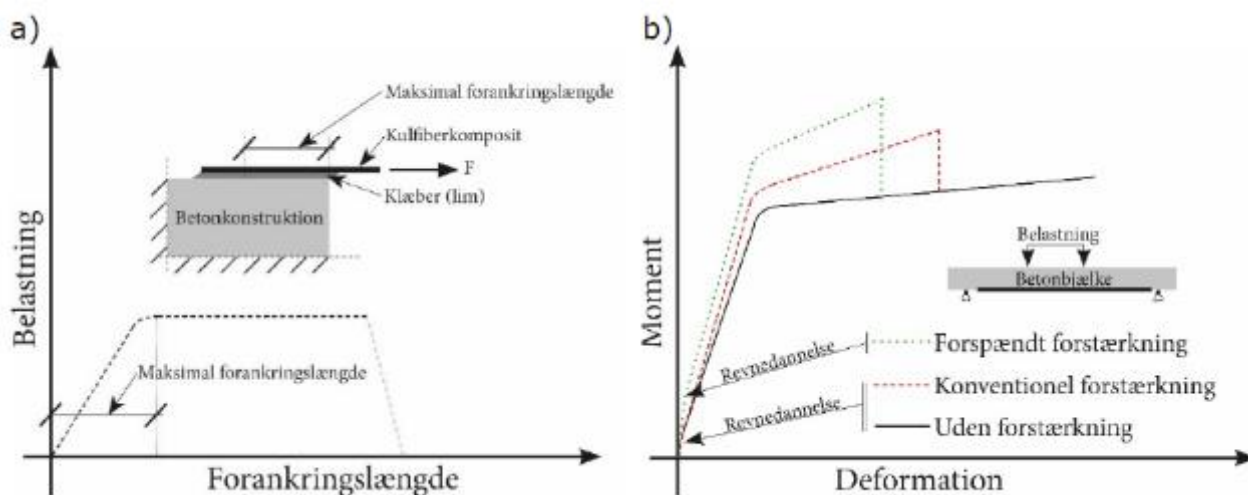
Ved delaminering er kulfiberkompositterne typisk kun forankret via klæberen til et tøjningsniveau, der i forhold til brudkapaciteten er ca. 60-80 % for kulfiberstænger og ca. 30-60 % for plader. Dvs. at en forøgelse af forankringslængden ikke vil bidrage yderligere til forankringskraften.

I Figur 12a ses fx, at en forankret kulfiberkompositplade kun kan forankres til en kraftpåvirkning, der svarer til den maksimale forankringslængde. Dette afspejles også på figur 12b, der viser et eksempel på moment/deformationskurverne for bjælker med og uden kulfiberforstærkning.



Figur 11. Forskellige brudformer for delaminering.

Det ses på Figur 12b, at der kan opnås en signifikant forstærkningseffekt, indtil forankringsbrud ved delamineringen i betonen opstår. Efter at brud ved delaminering er opstået, vil restbæreevnen i den forstærkede konstruktion være på niveau med konstruktionen uden forstærkning.



Figur 12 a) forankringslængde ved horisontaltrækforsøg og b) moment/deformationskurver for 4-punkts bjælketests ved 3 forskellige opsætninger.

Figur 12b viser også et eksempel på anvendelse af en forspændt kulfiberforstærkning. Sådanne systemer er stadig relativt nye (i 1997 blev de første systemer introduceret), da tilstrækkelig forankring af kulfiberkompositter kan være en udfordring. Derudover introducerer man startspændinger i sådanne systemer, der skal kunne kontrolleres gennem de mekaniske og/eller indlimede forankringsmetoder i kombination med klæberen. Fordele ved anvendelse af sådanne systemer er:

- Høj forstærkningseffekt (forstærker for permanente laster via aktivering)
- Kulfiberkompositmaterialet kan udnyttes bedre
- Revnedannelser reduceres (se Figur 12b)
- Nedbøjningsreduktion (som ved konventionelle forspændingssystemer)
- Tryk fra forspændingen indvirker forøgende på forskydningsbæreevnen.

Som det nævnes ifm. forskydningsforstærkning, skal kulfiberdugen forankres i tværsnittets trykzone. Derved kan forskydningsarmeringen give et tilskud til den eksisterende forskydningskapacitet. Tilskuddet fra sådanne forstærkninger afhænger af det anvendte system, hvor tværsnittets kropshøjde også kan have en signifikant indflydelse på forstærkningseffekten. Bidraget ($V_{Rd, \text{komposit}}$) fra forskydningsforstærkningen lægges typisk til den eksisterende forskydningskapacitet (V_{Rd}), så den samlede kapacitet med forstærkning kan skrives som:

$$V_{Rd, \text{forstærkning}} = V_{Rd} + V_{Rd, \text{komposit}}$$

Metoden, hvorpå bidraget af forskydningsforstærkningen findes, er nationalt forskelligt.

Da der ikke findes nogen dansk norm for arbejdet, er det omfattet af BR18, kapitel 15, §352.

Forankringssystemer

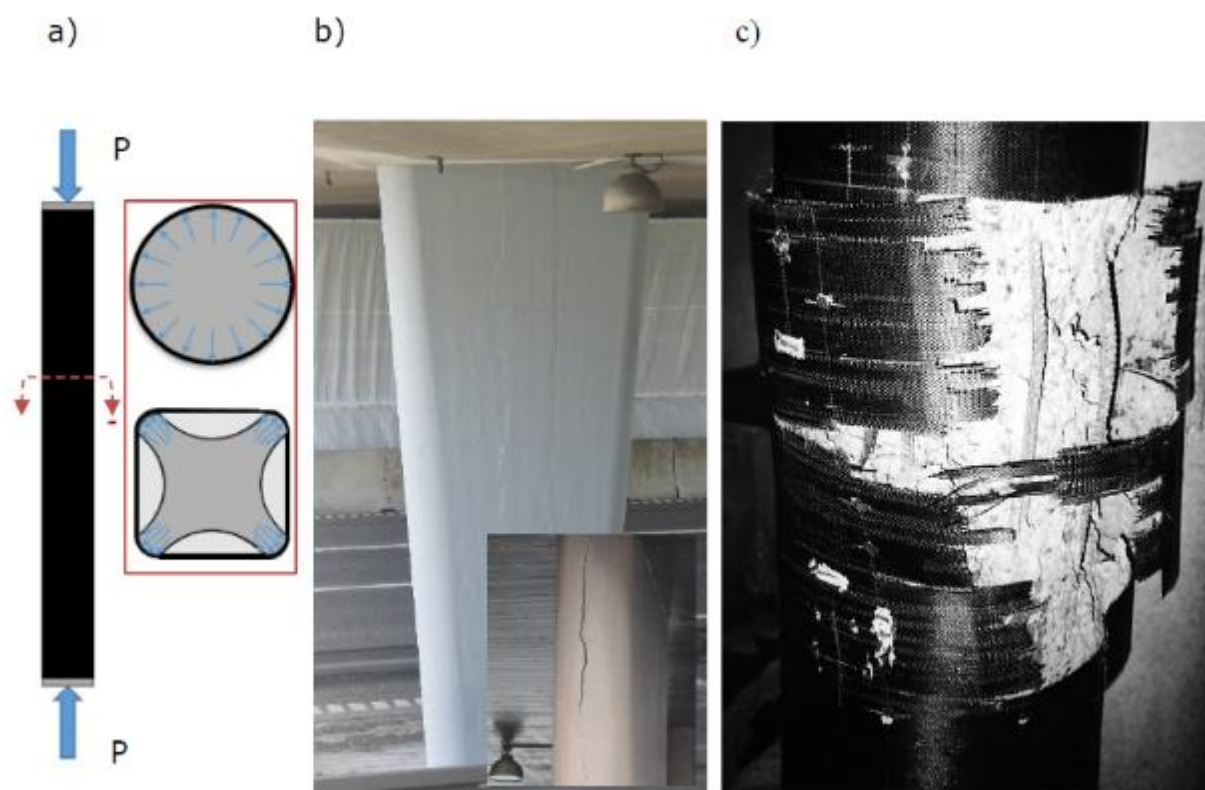
Da kulfiberforstærkningssystemerne kan generere mange forskellige brudtyper, anvendes forankringssystemer typisk til at reducere de mulige brudmekanismer, reducere forankringslængder, udnytte kulfiberkompositterne bedre osv. Sådanne systemer er normalt produktbestemt, men udviklet til disse specielle applikationer. Eksempler findes på de forskellige leverandørers hjemmesider. Nogle eksempler på anvendte forankringstyper er:

- Endeankerplader:
 - Mekanisk forankring af enderne på kulfiberplader, hvor man ikke opfylder forankringslængde og til sikring mod betonens delaminering.
- Stålvinkel / kulfiberdug:
 - Mekanisk forankring af kulfiberdug i trykzonen ved forskydningsforstærkning af T-tværsnit.
- Stålbøjler / kulfiberplader:
 - Forankring af kulfiberplader til sikring mod delamineringsbrud ved kulfiberender.
- Kulfiberankre til kulfiberdug:
 - Kulfiberforankring med montagedybel af kulfiber og vifte af fibertråde, der monteres i trykzonen og limes sammen med kulfiberdugen.
- Kulfiber U-/L-bøjler:
 - U-/L-bøjler til forankring af plader mod delamineringsbrud.
- Boltede løsninger i kulfiberlaminater:
 - Mekanisk forankring af kulfiberplader med multiorienterede fibre.
- Duktile forankringer:
 - Mekanisk forankringssystem der sikrer duktil forstærkningsopførsel for både almindelige og forspændt løsninger med kulfiberstænger.

Søjleforstærkning

Ved kulfiberforstærkning af betonsøjler med kulfiberdug giver søjleforstærkning en omslutningseffekt, der øger trykstyrken. 100 % omslutningseffekt opnås (confinement) kun i cirkulære tværsnit. Ved et "rektangulært" tværsnit kan man ved en given hjørneradius, til en vis grad, opnå en omslutningseffekt, se Figur 13a. Dette er dog meget afhængig af søjletværsnittets udformning. Omslutningseffekten kan beregnes iht. EN1992-1-1 kap. 3.1.9.

Ved forstærkning af runde søjler med kulfiberdug kan man typisk opnå trykstyrker, der øges med en faktor 1,8-2,0, hvis de rette konditioner er opfyldt.



Figur 13. Forstærkning af trykpåvirket betonsøjler. a) omslutningseffekten for forskellige tværsnit. b) forstærkning af revnet søjle. c) brud i forstærket søjle.

Ud over anvendelse til en trykkapacitetsforøgende effekt kan kulfiberdug på søjler også anvendes til forstærkning af eskalerende spalterevner, se Figur 13b. Som ved forskydningsarmeringsforstærkning omdannes kulfiberdug og klæber først til et kompositmateriale, når klæberen er hærdet in-situ, som vist i Figur 9b. Figur 13c viser et eksempel på en kulfiberforstærket søjle testet til brud.

Brand

En af de primære udfordringer ved kulfiberforstærkningerne er brandpåvirkning. Ved forhøjet temperaturpåvirkning, som ved en brand, ændres egenskaberne i klæberen. Derfor er det vigtigt at brandbeskytte forstærkningssystemet på den forstærkede konstruktion eller bygningsdel, så den kan modstå brandpåvirkninger i tilstrækkelig grad. Kan konstruktionen eller bygningsdelen ikke bære sig selv uden forstærkningen, skal der brandbeskyttes efter anvisninger fra en brandrådgiver. Typiske løsninger i sådanne tilfælde er brandbestandige plader.

Forstærkningsoversigt

Tabel 2 viser forstærkningsmulighederne relateret til de typisk anvendte kulfiberforstærkningssystemer med primær fokus på ikke-forspændte systemer. Det ses i nogle lande, at kulfiberdug anvendes mere bredt, fx til momentforstærkning, hvilket der ikke taget hensyn til i tabellen.

Tabel 2. Oversigt forstærkningsmuligheder med forskellige kulfiberprodukttyper.

	Kulfiberlaminater	Kulfiberdug	Kulfiberstænger
Moment og nedbøjning	X		X
Forskydning		X	
Normalkraft		X	
Udknækning			X
Stabilitet	X		X
Hultagning	X	X	X

20.4.5 Litteratur

Yderligere litteratur, tekniske data, vejledninger og beregningssoftware kan findes på leverandørernes hjemmesider i følgende links:

Links til leverandører

S&P Reinforcement – www.sp-reinforcement.dk

Sika – www.dnk.sika.com/

Sto – www.sto.dk/s/

Vejledninger og artikler

Der forventes, at der med den næstkommende opdatering af EC2 indeholder et tillæg omkring kulfiberforstærkninger.

Der findes følgende vejledninger og litteratur på området:

- [1] FIB Bulletin 90 "Externally applied FRP reinforcement for concrete structures", 2019 (International Federation for Structural Concrete)
- [2] SIA 166: 2004 (Schweizisk norm)
- [3] ACI 440.2R-02 (Amerikansk guideline)
- [4] CUR Aanbeveling 91 (Hollandsk guideline)
- [5] CSTB AT N° 3.3/19-989+990_V1 (Fransk guideline)
- [6] Concrete Society TR N° 55 (Britisk guideline)
- [7] CNR-DT 200/2004 (Italiensk guideline)
- [8] Täljsten, B. FRP Strengthening of Existing Concrete Structures; Division of Structural Engineering; Luleå University of Technology: Luleå, Sweden, 2006
- [9] Schmidt, J. W., Christensen, C. O., Goltermann, P. & Sena-Cruz, J., Activated Ductile CFRP NSMR Strengthening 25 May 2021, In: Materials. 14, 11, 2821

- [10] Schmidt, J.W.; Christensen, C.O.; Goltermann, P.; Hertz, K.D. Shared CFRP activation anchoring method applied to NSMR strengthening of RC beams. Compos. Struct. 2019, 230, 111487.
- [11] DS/EN 1504 serien; Produkter og systemer til beskyttelse og reparation af betonkonstruktioner – definitioner, krav, kvalitetskontrol og overensstemmelse