

FRP-Broer

Projekteringsgrundlag for FRP-broer er næsten klar til brug

De seneste 30 år er der på verdensplan sket en betydelig vækst inden for anvendelsen af FRP-broer. I Danmark er det indtil nu begrænset med eksempler på anvendelse af FRP-broer. En forklaring kunne være, at der endnu ikke findes et normgrundlag for denne brotype. En håndbog - Projekteringsgrundlag for FRP-broer - forventes udgivet af Vejregelgruppen for Bygværker senere i år.



AF CHRISTIAN VON SCHOLTEN

Atkins

christian.von.scholten@atkinsglobal.com



AF BARBARA BOESEN

MACAULAY

Vejdirektoratet
bape@vd.dk

Baggrund

Gennem de seneste 30 år har der været en stigende interesse for at anvende Fiber Reinforced Polymer (FRP) til broer. Der er bygget en hel del FRP-broer på verdensplan og også nogle i Danmark. Der findes endnu ingen Eurocode for FRP-broer, hvorfor designerne indtil videre må nøjes med den viden, som findes på nettet, på universiteterne og via FRP-producenterne. Det er selvfølgelig uhensigtsmæssigt at designe konstruktioner, som ikke er normbaseret.

Denne mangel har affødt et behov for at formulere krav og retningslinjer, der uanset valg af entreprenør, producent og rådgiver sikrer, at det færdige bygværk har den nødvendige kvalitet med hensyn til funktion, sikkerhed og holdbarhed. Vejregelgruppen for Bygværker har derfor udarbejdet et projekteringsgrundlag for FRP-Broer, som angiver regler og vejledninger for dimensionering af FRP-broer i Danmark. Denne forventes udgivet i 2021.

Hvad er FRP lavet af?

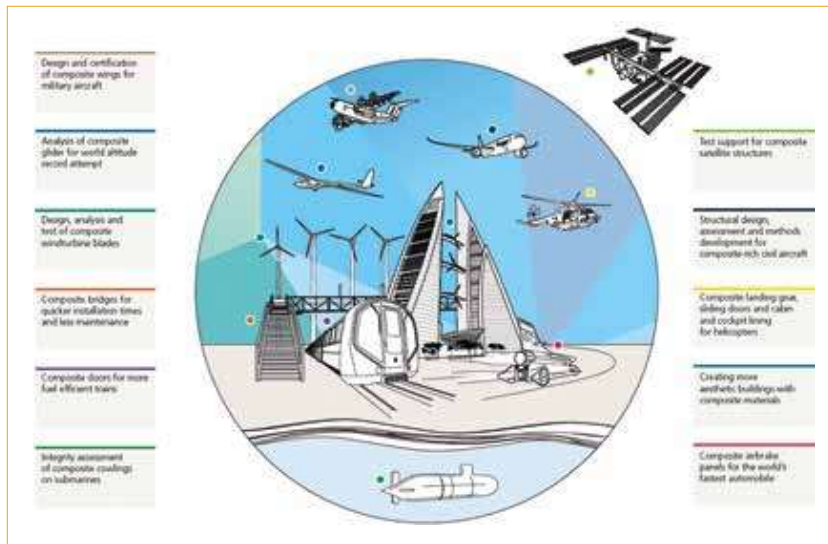
FRP er et kompositmateriale opbygget med fibre, som giver materialet styrke og stivhed i fibrenes retning, samt af et polymer-materiale som fibrene "støbes/limes" ind i. Denne lim optager forskydningen, når kompositmaterialet udsættes for bøjning. Polymer-materialer er primært fremstillet af olie.

Fibre er som oftest lavet af glas (som i glasfiberbåde), men andre stærkere og stivere fibre af fx carbon anvendes også.

Historisk overblik og anvendelser af FRP generelt

Første kendte eksempel på en FRP-konstruktion er fra USA i 1930'erne, som var en sejlbad i glasfiberarmet polyester. I 1940'erne begyndte man at anvende FRP i det amerikanske luftvåben og i flåden. I 50'erne bredte brugen sig til industrien - fx til rør, tanke, bilkarosserier og fritidsbåde, og i 60'erne byggede USA og UK mindre krigsskibe i FRP. Fra midten af 60'erne steg masseproduktionen af fritidsbåde af FRP markant. I 1970'erne kom turen til passagerfly. Cirka 10 % af concordefly var bygget af FRP-materialer. Vindmøllevinger i FRP er siden 80'erne produceret længere og længere - nu op omkring 100 meter. I slutningen af 80'erne blev de første FRP-vejbros bygget i blandt andet Kina, Tyskland og Bulgarien. I 1997 opførte Fiberline Skandinavien første bro i FRP-materialer i Kolding. Op gennem 00'erne blev flere flytyper fabrikeret med omkring 50 % FRP, fx Boring 787 Dreamliner. Se figur 1 for eksempler på anvendelser.

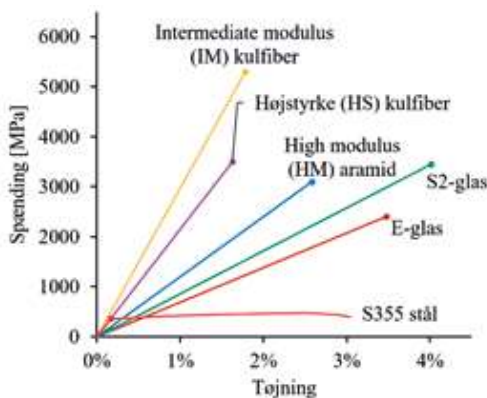
Frem til 2003 var der på verdensplan bygget cirka 170 vejbroer og 160 gangbroer i FRP. Halvdelen af disse er bygget i USA og en fjerdedel i Europa.



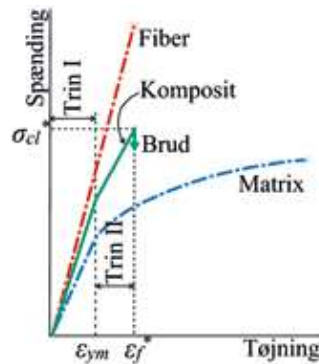
Figur 1: Eksempler på FRP-konstruktioner



Figur 4: Stibro i Kolding (foto Fiberline) fremstillet af pultruderede profiler (1997), længde 40 meter



Figur 2: Arbejdskurver for typiske FRP-fibertyper



Figur 3: Principiel arbejdsurve for et FRP-element



Figur 5: Klapbro Pont Draig i Wales fremstillet ved formstøbning (2013), spænd 2 x 35 meter

FRP-materialer

Som nævnt er FRP et kompositmateriale, hvor både fibertyper og typer af den lim samt tilsætningsstoffer, de støbes ind i, afgør, hvilke egenskaber de får, og dermed hvilke anvendelsesmuligheder de har.

FRP kan deles i tre hovedtyper ud fra de fibertyper, som indgår:

- Glas, GFRP (billigt, anvendes mest)
- Carbon, CFRP (meget dyrt, meget stærkt, meget stift)
- Aramid, AFRP (dyrt, stærkt, særlige anvendelser)

Matrixen består af resin, additiver, som kan give FRP-elementet forskellige egenskaber som fx UV-bestandighed og brandhæmmende egenskaber, samt af eventu-

elle fyldstoffer uden egenskaber.

Resintyperne er:

- Epoxy (dyrt, stærkt, hårdt, gode klæbeegenskaber, meget vandtæt)
- Polyester (billigt, anvendt til fx fritidsbåde)
- Vinylester (ikke-dyrt og meget resistent over for korrosive miljøer)

Ved valg af resin er det vigtigt at være opmærksom på anvendelsestemperaturen for broen. Ved en bestemt høj temperatur - T_g (glasovergangstemperaturen) - mister resinen sine styrkeegenskaber, og det skete er irreversibelt. T_g for FRP befinder sig typisk i intervallet 60-150 °C. Ved udlægning af varm asfalt oven på et FRP-dæk skal varmeindtrængningen derfor vurderes ud fra valg af resin.

Som det ses i figur 2, har FRP-fibrene et skørt og uvarslet brud (ringe duktilitet/plasticitet). I figur 3 ses den principielle arbejdsurve for et FRP-element.

Fremstilling

De to almindeligste fremstillingsmetoder af FRP-elementer er meget forskellige:

- Pultruderede/ekstruderet fabriksfremstillede elementer, typisk rette profiler. Disse fremstilles under ensartede kontrollerede forhold, se eksempel i figur 4.
- Formstøbte elementer (som ved fremstilling af lystbåde)
 - som FRP- laminater, skaller, se figur 5
 - som sandwichelementer med et kernemateriale omsluttet af FRP-laminater

»

Fordele	Ulemper/begrænsninger
FRP-broer fremstillet ved pultrudering	
Velegnet til masseproduktion, stort volumen	Begrænset designfleksibilitet
Høj kvalitet på grund af ensartede produktionsforhold	Æstetisk udfordret ved større spænd
Velegnet til brodæk med mindre spænd op til 10-15 meter	
FRP-broer fremstillet ved formstøbning	
Mulighed for større spænd	Relativt dyr løsning hvis form kun anvendes få gange
Færre samlinger (men mere krævende)	Krævende arbejdsgange i udførelsen som kræver særlige kompetencer
Stor designfleksibilitet	Vanskeligere at projektere
Større æstetisk potentiale	Vanskeligere at teste egenskaber på



Figur 6: Sti-klapbro i CFRP i Fredrikstad, Norge, udført ved formstøbning med et spænd på 60 meter (foto: Ole Dag Johansen)

De to fremstillingsmetoder har nogle fordele og ulemper/begrænsninger, som bør indgå i overvejelserne tidligt i designprocessen.

Anvendelser til broer

FRP anvendes allerede i stor stil inden for byggebranchen. Særligt til vindmøllevinger, i sekundære konstruktioner på offshore faciliteter og til sekundære bygningsdele samt konstruktioner i forbindelse med vandanlæg.

Inden for broer har FRP demonstreret sin værdi og anvendelighed til blandt andet:

- Gang- og stibroer, spænd på op til 60-70 meter (se figur 6).
- Mindre vejbroer, spænd på 5-25 meter og begrænset trafik (se figur 7).
- Broer over jernbaner (ingen jording).
- Hybrid-broer hvor den hovedbærende konstruktion udført i stål eller beton bærer sekundære bærende FRP-dækpaneler med mindre spænd.
- Bevægelige broer især klapbroer udført som hybrid-broer - se ovenfor, hvor man udnytter FRP's lave vægt.
- Sideudvidelser af eksisterende broer, især i forbindelse med tilføjelse af gang-/stiarealer.
- Kantbjælker og æstetiske beklædninger på broer.

I Danmark er der indtil nu bygget mindst seks FRP-broer.

Nogle fordele ved FRP

FRP-materialet har en række særlige egenskaber, som i visse situationer kan udnyttes med fordel:

- Lav vægt. Har typisk en densitet på 20-30 % af ståls.
- Høj styrke, typisk højere end ståls.
- Velegnet til masseproduktion.
- Nemt at bearbejde og reparere.
- Stor holdbarhed. Ruster ikke.
- Elektrisk isolerende.
- Udviser relativ god bæredygtighed.

Væsentlige centrale tekniske forhold ved FRP

FRP-konstruktioner er et relativt komplekst og "nyt" fagområde i forhold til traditionelle konstruktioner. På trods af en betydelig forskning og udvikling de seneste 30 år er mange problemstillinger fortsat uafklarede.

FRP er typisk et ortotrop materiale med gode egenskaber i fibrenes retning, men ringere på tværs eller mellem fiberlag. Dette kan især være en udfordring i forhold til udmattelse og i boltesamlinger samt ved påvirkninger ud af planen.

FRP har ringe plastiske egenskaber og skal beregnes elastisk uden mulighed for plastisk omfordeling af snitkræfterne.



Figur 7: Vejbro udført med sammenlignede pultruderede boxprofiler. Klettgau i Tyskland, længde 7,2 meter (2017, foto Fiberline)

FRP-materialers egenskaber er udpræget tids- og belastningsafhængige samt afhænger af det omgivende miljø. Det er derfor nødvendigt i styrkeberegningerne at anvende konverteringsfaktorer, som tager hensyn til disse forringelser.

FRP-materialer udviser betydelig krybning, når de påvirkes af permanente/langvarige belastninger. Kilde¹ indikerer, at der for GFRP er risiko for krybningsbrud, når spændingen fra en vedvarende permanent last er større end $0,33/1,6 = 0,20$ gange den karakteristiske korttids brudstyrke (faktoren 1,6 er en sikkerhedsfaktor). For CFRP og AFRP er de tilsvarende grænser 0,55 henholdsvis 0,30. Er der risiko for krybningsbrud, skal der udføres forsøg til bestemmelse af grænseværdien for krybningsbrud.

Generelt har FRP-elementer gode udmattelsesegenskaber, men boltesamlinger eller steder med væsentlige dimensionsændringer skal særligt undersøges.

Boltesamlinger fylder ofte en del og er derfor tit dimensionsgivne i valget af FRP-profilstørrelse. Lidt på samme måde som for trækonstruktioner.

FRP-materialet har generelt en relativ høj styrke, som dog ikke altid kan udnyttes fuldt ud. Deformationer/svingninger i SLS er ofte styrende for dimensionerne af de hovedbærende elementer.

Design og fabrikation/udførelse af FRP-elementer skal udføres af kvalificerede personer.

Særlige påvirkninger som brand, UV-lys og påkørsel skal indtænkes i designet. Brand kan modvirkes ved tilsætning af brandhæmmende additiver til resinen. Tilsvarende kan FRP beskyttes mod skadelige UV-lys. Skader fra påkørsel kan minimeres ved øget frihøjde til brooverbygningen.

Materialeegenskaber skal altid verificeres ved forsøg/test, da materialer, elementer og fremstillingsmetoder for FRP ikke p.t. lader sig standardisere. Dette kræver relativt meget mere kvalitetskontrol i forhold til andre byggematerialer.

Nogle udfordringer og begrænsninger for FRP

Til trods for at FRP har været kendt og anvendt i mere end 80 år og vist sig særdeles anvendeligt til rigtig mange andre formål end FRP-broer, så går det fortsat nogle steder langsomt med at anvende FRP til broer. Det skyldes formentlig blandt andet:

At FRP-broer ofte har en højere anlægspris end traditionelle broer (opvejes til dels af lavere udgifter til D&V).

- At FRP er et komplekst materiale, hvor man fortsat mangler en del viden og erfaring.
- At FRP generelt er forholdsvist ukendt i brobranchen.
- At der mangler fagfolk med kompetencer inden for FRP-konstruktioner.
- At der trods alt generelt kun er relativt få erfaringer med FRP-broer.



Figur 8: Fremtidens broer - måske udført som 3D-printede broer i FRP. Blandt andet i Holland eksperimenteres der med det (Illustration Royal HaskoningDHV).

- At hvert FRP-projekt kræver mange materialetests.
- Og vigtigst - at der mangler normgrundlag på området, som er begrænsende for anvendelse af FRP-broer på en kosteffektiv måde.

Bæredygtighed

FRP's lave vægtfylde og høje styrke betyder ofte, at man kan bygge FRP-broer inklusive fundamenter med en betydelig lavere samlet vægt, end tilfældet er med broer af andre mere tunge materialer. Studier, [1], indikerer, at FRP-broer i forhold til andre typer broer normalt kræver et signifikant lavere energiforbrug og medfører et tilsvarende lavere CO₂-aftryk (livscyklus). Disse studier viser, at FRP-broer i forhold til betonbroer mere end halverer energiforbruget og CO₂-påvirkningen og endnu mere i tilfældet med stålbroer. Stort set al glasfiber kan genanvendes (ifølge DAKOFA.DK), men der er krav til renhed af produktet, som gør visse emner mere velegnede end andre. Fx er udtjente vindmøllevinger særdeles velegnede. Det er dog uvist, hvor stor en del som faktisk genanvendes i dag.

Vejregler og udbudsdokumenter for FRP-broer er på vej

Vejregelgruppen for Bygværker igangsatte for et par år siden udarbejdelsen af håndbogen "Projekteringsgrundlag for FRP-Broer".

Håndbogen angiver regler og vejledninger for dimensionering af FRP-broer i Danmark med henblik på at sikre fælles accepterede krav og retningslinjer for projektering af FRP-broer samt sikre en tilstrækkelig kvalitet af det færdige bygværk og den tilhørende projektdokumentation.

Den nye håndbog er baseret på en hollandsk anvisning til design af FRP-Konstruktioner, [1]. I tilknytning til håndbogen er der udarbejdet en række FRP-udbudsdokumenter i form af en AAB-SAB-P, TAG-P og TBL-P samt Håndbog for tilsyn.

Afrunding

Mens vi venter på en Eurocode for FRP-broer (måske om 5-10 år), bliver det interessant at se, hvorledes og hvor meget de kommende vejregeldokumenter kommer i anvendelse, og hvilke erfaringer vi får med dem. Uanset hvad er der dog næppe tvivl om, at anvendelsen af FRP som konstruktionsmateriale til broer vil stige i de kommende år. Og det er interessant, hvad designede kompositmaterialer i fremtiden vil bringe af udvikling inden for broer. Seneste bud er mulighederne for at lave 3D-printede FRP-broer, se figur 8. ●

Referencer

1. Fibre-reinforced polymers in buildings and civil engineering structures, CROW-CUR RECOMMENDATION 96:2019
2. Fremtidens broer er glasfiberbroer, Torben Ronlev Hemmel, Trafik og Veje 2/2012