



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

Gregersensvej
DK-2630 Taastrup
Telefon 72 20 20 00
Telefax 72 20 20 19

info@teknologisk.dk
www.teknologisk.dk



Slanke konstruktioners potentiale i infrastrukturen

State-of-the-art eksempler over brugen af slanke konstruktioner i infrastrukturen – økonomiske, arkitektoniske og miljømæssige potentialer

Udarbejdet af:

Christian Bøgh Jøns Nielsen, Bygningsingeniør, Teknologisk Institut

Johannes Portielje Rauff Greisen, Arkitekt, phd, Teknologisk Institut

Version 2.0

Januar 2014

Indhold

1	Formål og baggrund	3
1.1	Hvorfor nu slank?	4
1.2	Kraftforløb og konstruktionens udtryk.....	4
2	Eksempler på slanke konstruktioner i infrastrukturen	6
2.1	Stål.....	7
2.1.1	Eksempler fra Danmark	7
2.1.2	Eksempler fra udlandet	8
2.1.3	Stål - sammenfatning.....	11
2.2	Højstyrkebeton.....	13
2.2.1	Eksempler fra Danmark	14
2.2.2	Eksempler fra udlandet	15
2.2.3	Højstyrkebeton - sammenfatning.....	17
2.3	Glasfiberarmeret plastkomposit	19
2.3.1	Eksempler fra Danmark	20
2.3.2	Eksempler fra udlandet	22
2.3.3	Glasfiberarmeret plast - sammenfatning	27
2.4	Kulfibre	28
2.4.1	Støbeform. "Bridge in a backpack"-konceptet	29
2.4.2	Kulfiberforstærkning af eksisterende konstruktioner	31
2.4.3	Kulfiber - armering.....	31
2.4.4	Kulfiber – sammenfatning	33
3	Resumé og udviklingspotentialer.....	35
3.1	Stål.....	37
3.2	Højstyrkebeton.....	38
3.3	Glasfiber	39
3.4	Kulfiber	40
4	Konklusion.....	41
5	Referencer.....	43
5.1	Primære referencer	43
5.2	Sekundære referencer	44
5.3	Figurreferencer	45

1 Formål og baggrund

Følgende rapport har til formål at belyse nye og innovative byggematerialers potentiale i infrastrukturen ud fra et økonomisk, arkitektonisk og miljømæssigt perspektiv. Rapporten er udarbejdet som en del af resultatkontrakten "Ny Teknologi til Anlægskonstruktioner" bevilliget af Styrelsen for Forskning og Innovation¹

Beton og stål har indtil i dag været, og er stadig, de dominerende byggematerialer i anlægssektoren, hvor de blandt andet er det foretrukne byggemateriale til konstruktion af broer og tunneller. Beton og ståls anvendelighed til denne type konstruktioner, hænger i høj grad sammen med de høje styrker disse materialer kan opnå, som gør, at de kan modstå de store kraftpåvirkninger, som konstruktioner i infrastrukturen ofte er udsat for.

Beton- og stålkonstruktioner i infrastrukturen besidder dog et udviklingspotentiale i forhold til at øge holdbarheden af konstruktionerne. Derudover er der ved beton- og stålkonstruktioner ofte tale om store og tunge konstruktioner, som påfører miljøet en vis belastning både ved materialefremstillingen, i udførelsesfasen og gennem vedligehold i konstruktionernes levetid. Dertil kommer de gener som er forbundet med trafikomlægninger og vej- eller banelukninger - både i forbindelse med opførelsen af nye konstruktioner samt ved eventuelt reparations- eller vedligeholdelsesarbejde.

Både i Danmark og i udlandet kæmper de nationale vejdirektorater således med udslidte stål- og betonbroer, som står over for enten omfattende reparationsarbejde eller sågar nedrivning pga. den dårlige stand de befinder sig i. Incitamentet er altså til stede i forhold til dels at forbedre de eksisterende materialer og dels at indføre nye byggematerialer i infrastrukturen, hvor omkostningsreduktioner kan opnås via materialebesparelser, effektive og hurtigere byggeprocesser samt længere levetid og mindre vedligehold.

Dette faktum anskueliggøres blandt andet af, at nye innovative konstruktioner begynder at vinde indpas i infrastrukturen som alternativ til konventionelle beton- og stålkonstruktioner. Materialer af glasfiberarmet plast, højstyrkebeton samt kulfibre anvendes i stigende grad i infrastrukturen og kan være fremtidens byggematerialer i anlægssektoren. Disse materialer har i større eller mindre grad de fælles egenskaber, at de forener styrke med lav vægt og stor holdbarhed.

Det vil i det følgende afdækkes, hvor langt udviklingen er i Danmark og udlandet med indførelsen af nye og innovative byggematerialer i infrastrukturen, samt hvilke muligheder materialerne har i infrastrukturen fremover. Herudfra vil det, økonomiske, arkitektoniske og miljømæssige potentiale for materialernes udbredelse i infrastrukturen klarlægges.

¹ Læs mere om resultatkontrakten "Ny Teknologi til Anlægskonstruktioner" på www.bedreinnovation.dk

1.1 Hvorfor nu slank?

Mennesket har gennem tiderne udviklet sine konstruktioner. Det er naturligt at forsøge at gøre det bedre end de forrige generationer og altid leve op til sin tids idealer. Idealene har ændret sig i takt med den sociale og teknologiske udvikling. Ses forenklet på nyere tid var idealet i 1800-tallets industrialisme pompøst, senere i 1900-tallets modernisme ses flere strømninger. Dels opstod en minimalisme med helstøbte, spinkle og glatte konstruktioner, hvis koncepter var subtilt innovative med klare referencer til naturens konstruktioner. Dels opstod der et formsprog med afsæt i fascinationen af det maskinelle, her var idealet at detaljen, beslag og bolte skulle accentueres og være en del af det æstetiske udtryk. Således opstod der i 1900-tallet et væld af nye typer samlinger, og nye materialer fandt vej til større konstruktioner.

Idealet for 2000-tallet står ikke klart endnu, men der viser sig en entydig nødvendighed for at udvikle og optimere vore konstruktioner i infrastrukturen. Nødvendigheden kommer af øget mobilitet og øget fokus på ressourceknaphed, samt af mere voldsomt vejrlig.

Det vil sige vi i dag skal videreudvikle en tusindårig byggekultur, som de seneste hundrede år støt har strakt sig længere med større spænd, og vokset sig stadig slankere i kraft af optimerede konstruktioner og materialer. Denne positive udvikling bør forfølges, for der findes i dag oplagte grunde til at stræbe imod at gøre infrastrukturens konstruktioner endnu slankere.

- Reducere materialeforbrug
- Minimere påvirkninger fra nedbør og vind

Hertil kan lægges et fokus på det visuelle udtryk. Æstetik har alle tider været et vigtigt parameter, men her i 2000-tallet er "dagligdagens æstetik" kommet på dagsordenen.

- Visuelt udtryk

Derfor skal den infrastruktur vi benytter hver dag være skøn at se på og bevæge sig i. Slankere strukturer kan styrke infrastrukturens æstetik, dels fordi de tillader et større udsyn til det landskab og miljø vi bevæger os i, og dels fordi selve konstruktionen fremstår mere elegant.

1.2 Kraftforløb og konstruktionens udtryk

I relation til slankhed er broer den væsentligste kategori af infrastrukturens konstruktioner. Broens formål er at bære nyttelasten. Hertil skal lægges lasten fra selve konstruktionens egenvægt samt laster fra vind, vejr, temperatursvingninger mv. – såkaldte naturlaster, samt i passende omfang de såkaldte uforudsete laster.

Summen af disse laster er typisk mangefold større end selve nyttelasten, dvs. broen i stor udstrækning er til for at bære sig selv. Lasternes kraftpåvirkning skal overføres sikkert til jorden på brostedet, og det bliver de gennem kraftforløbene i bro-konstruktionen. Der findes fem typer kræfter.

1. Trækkrafter
2. Trykkrafter

3. Bøjningsmomenter

Træk- og tryk-kræfter kaldes *normalkræfter*, og ved bøjningsmoment er der træk i den ene side af materialet og tryk i den anden side. Disse tre typer påvirkning kan let anskues i et todimensionelt plan – som dette papir - hvor kræfterne er stabiliseret af det todimensionelle plan og mødet mellem kræfter beskrives stiliseret. Men konstruktioner er imidlertid tredimensionelle, så en fjerde, og rumlig kombination af normalkræfterne findes og kaldes:

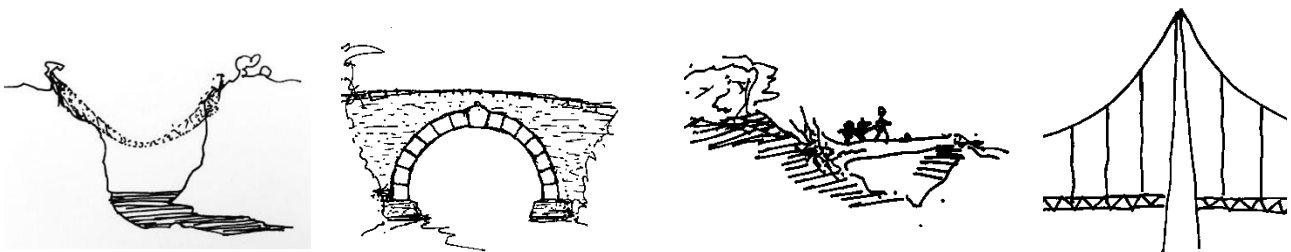
4. Vridningsmomenter

Sidst men ikke mindst mødes kræfterne i knudepunkter, hvor der kan opstå kraftophobninger på tværs af materialet, der kaldes:

5. Forskydningskræfter

Forskydningskræfters virkemåde er mere kompleks end normalkræfternes. Forskydningsbrud ses typisk i knudepunkter, ofte hvor konstruktionsmaterialet er blevet svækket lokalt, fx ved svejsning, bolthuller og fugt. Designet af samlingen er altså helt afgørende for hensigtsmæssig kraftoverførsel mellem konstruktionselementerne og for konstruktionens levetid.

Normalkræfterne vil typisk 'tegne broen' i stor skala i et vertikalt plan på brostedet. Selve kraftforløbet karakteriserer konstruktionen, fx som hængebro, trykbue, bjælke eller som konstruktion sammensat af forskellige elementer: Trækkabler, piller, pyloner, brodragere, mv. (Figur 1.2-1).



Figur 1.2-1 Eksempler på at kraftforløbet karakteriserer og 'tegner' broen. Fra venstre: Træk-kræfter (Hængebro), Tryk-kræfter (Trykbue), Bøjningsmoment (Bjælke) og til højre sammensatte kræfter (sammensat konstruktion).

De tre første tilfælde repræsenterer eksempler på kraftpåvirkning(-er) og konstruktionen fremstår sammenvokset i ét materiale. For den sammensatte konstruktion er det tydeligt at hver konstruktionsdel afspejler netop sin funktion og sine materialeegenskaber. Helt overordnet kan siges, at en sammensat konstruktion er nødvendig for at opnå store spænd, og generelt forholder krafttyper sig til skala, således at de største spænd opnås med træk (kabler), mellemafstande ses i konstruktionens trykzoner (pyloner/master) og de mindste spænd tages med bøjningsmoment (brodæk, -bjælke). Vridningsmomenter og forskydningskræfter tegner broen i mindre skala og på detaljeniveau, og i samlingerne spiller også andre materiale tekniske aspekter ind, så som termisk udvidelse, vagabonderende elektriske strømme, galvanisk korrosion mv.

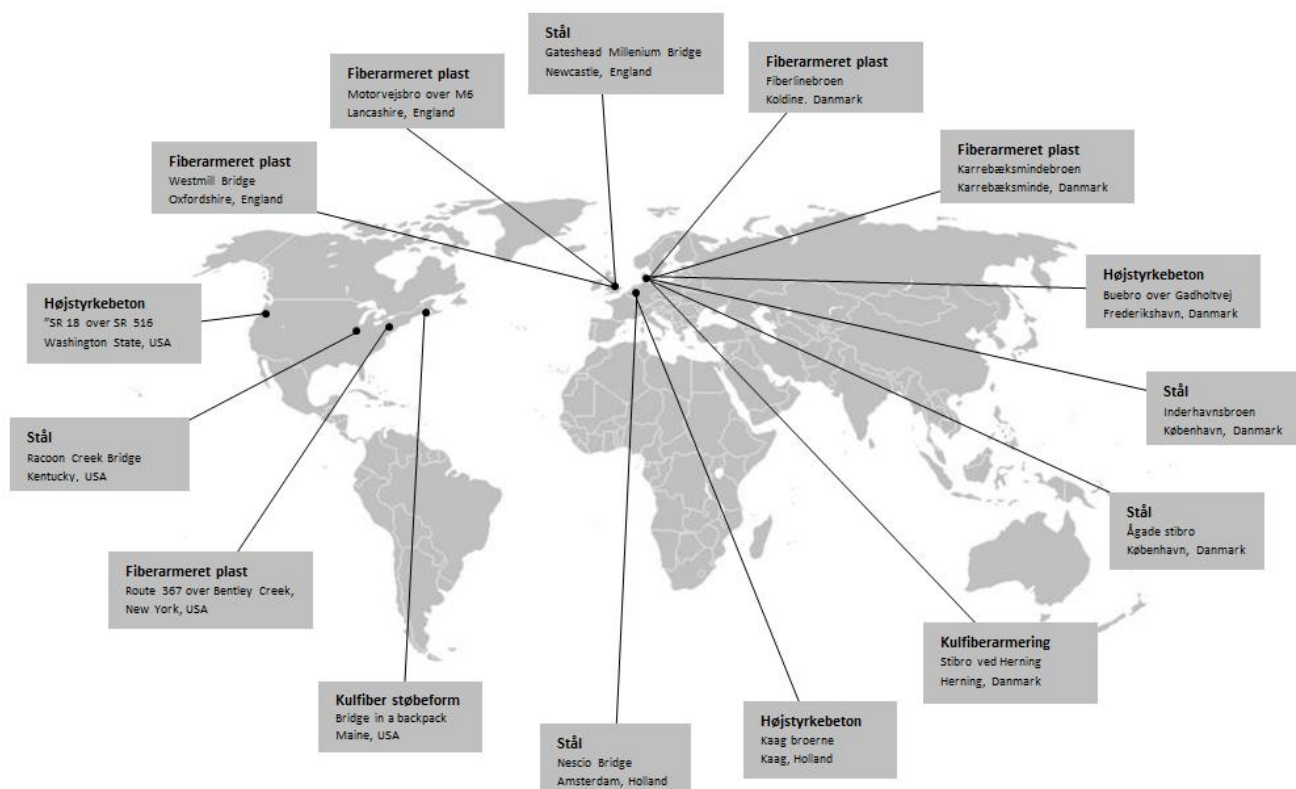
Disse aspekter er særligt væsentlige fordi infrastrukturens konstruktioner står i et barskt miljø med store temperatursvingninger, vibrationer og saltpåvirkninger.

Nye materialer og nye materialesammensætninger finder anvendelse i infrastrukturen, og dette åbner mulighed for nye typer sammensatte konstruktioner. Disse har potentiale til at løse nye konstruktive udfordringer, men kræver også særlig opmærksomhed på førnævnte materialetekniske aspekter. Det er nødvendigt, at erfaring med materials brug i praksis løbende opsamles og kombineres med teori og eksperimentelt arbejde, for at danne det videns-grundlag som kræves for at udnytte de nye materials fulde potentiale.

Konstruktionens udtryk vedrører altså alle skalatrin og materialevalg. Konstruktionens udtryk tager grundlæggende afsæt i brostedets kontekst, og designes derefter i et samspil mellem økonomiske, arkitektoniske og miljømæssige aspekter. Innovativt design og udførsel er vigtigt, fordi broer skal spænde stadigt længere, de repræsenterer en stor samfundsinvestering og konstruktionerne er væsentlige bygningskulturelle markører, som i mange tilfælde står i det naturlige landskab og repræsenterer det menneskeskabte.

2 Eksempler på slanke konstruktioner i infrastrukturen

Denne rapport tager udgangspunkt i udvalgte nyere eksempler fra Danmark og udland og organiserer dem efter konstruktionsmaterialet: Stål, højstyrkebeton, glasfibre og kulfibre. Eksempelernes geografiske placering gør dem sammenlignelige med klimamæssige og byggekulturelle forhold i Danmark. Eksemplerne er derfor relevante i forhold til vores danske byggekontekst.



Figur 2-1 Geografisk placering af rapportens eksempler og oversigt over konstruktionsmaterialer.

2.1 Stål

Stål er i sig selv ikke et nyt og innovativt byggemateriale til konstruktioner i infrastrukturen, men måden det anvendes på kan nytænkes og udvikles. Stål er et meget alsidigt og stærkt materiale som giver mange designmuligheder for arkitekter og ingeniører. Som historisk konstruktionsmateriale favner stål enormt bredt, og ses i infrastrukturen anvendt lige fra store vejbroer over mellemstore hybride konstruktioner til mindre gang- og cykelbroer. Ståls styrkeegenskaber er i høj grad den faktor, der historisk set har betydet og fortsat betyder, at stål er et af de primære byggematerialer i infrastrukturen. Der kan dog være en række andre fordele forbundet med stål som konstruktionsmateriale til broer i infrastrukturen. I det følgende opstilles eksempler på innovative brodesigns udført i Danmark og udlandet med stål som det primære konstruktionsmateriale.

2.1.1 Eksempler fra Danmark

Danmark har en stor betonindustri og har en konsolideret byggekultur med opførelse af broer i beton. Langt de fleste større brokonstruktioner herhjemme er således opført i beton, mens man oftest ser stål anvendt til mindre konstruktioner som cykel- og gangbroer. I det følgende opstilles eksempler på ståls anvendelighed til netop denne type konstruktioner.

2.1.1.1 Ågade stibro

Slanke og innovative konstruktioner i infrastrukturen behøver ikke nødvendigvis at være konstrueret af nye og innovative materialer. Således er Ågade Stibro over Åboulevarden i København et eksempel på en slank og innovativ konstruktion i stål

Ågade stibro er en slank konstruktion, hvis design kun muliggøres af at være udført i et meget stærkt og strukturelt alsidigt materiale. Elementerne er fremstillet på fabrik og herefter samlet ved brostedet for efterfølgende at blive løftet på plads i én arbejdsdag. Det tog således 4 mobilkraner en enkelt dag at løfte det 63 m lange dæk på plads. Der er altså tale om en slank konstruktion med et meget stort spænd. Den samlede vægt af stålet brugt til konstruktionen løber op i 220 t.



Figur 2.1-1 Ågade Stibro – slank konstruktion i stål.

Ud over de logistiske fordele forbundet med at fabriksfremstille elementerne og efterfølgende samle og montere dem i løbet af bare en enkelt arbejdsdag, er det de arkitektoniske argumenter der ofte vejer tungt

i forhold til valget af konstruktionsform. Således også i dette tilfælde, hvor arkitektonisk frihed og stålets formbarhed er blandt hovedargumenterne for valget af stål som konstruktionsmateriale.

2.1.1.2 Inderhavnen i Københavns havn

I inderhavnen i Københavns havn er endnu en innovativ gang- og cykelbro i stål ved at blive opført. Inderhavnsbroen er en særdeles slank bro, som på midten kun måler 60 cm i højden. Broen er endnu ikke færdigbygget, og arbejdet med opførelsen af broen er foreløbigt indstillet pga. entreprenørfirmaet Pihl & Søns konkurs, men projektet belyser meget godt ståls anvendelighed til netop denne type af konstruktioner.

Københavns Kommune, som er bygherrer på projektet, ønskede en bro som i så høj grad som muligt går i ét med omgivelserne. Ved at lade broen udføre i stål kan konstruktionen udføres med et særdeles slankt udtryk og dermed opfylde bygherrens ønske. Broens midterste sektioner kan skydes fra hinanden og give plads til sejlene trafik. Netop denne del af konstruktionen er særlig følsom overfor dynamiske påvirkninger og derfor har man ved hjælp af store svingningsdæmpere sikret sig, at broen kan modstå de svingningspåvirkninger den kan forventes udsat for i anvendelsestilstanden. Broen er endnu ikke færdigopført idet stålsektionen mangler, og derfor foreligger der ingen erfaringer om svingningsdæmpernes faktiske virkning i københavnsk kontekst.



*Figur 2.1-2 Inderhavnsbroen – slank konstruktion med mellemfag i stål
Visualisering. Broen er ikke færdig opført, og dens skæbne er pt. uvis.*

2.1.2 Eksempler fra udlandet

I udlandet er der regionale forskelle og det er vanskeligt via opstillede eksempler at tegne et generelt billede af ståls anvendelse til broer i udlandet. De tre valgte eksempler fra udlandet beskriver dog godt de muligheder der også er med stål som konstruktionsmateriale. Hvor der generelt kan herske en opfattelse af stålkonstruktioner som store og tunge viser følgende eksempler nogle af de arkitektoniske og udførelsesmæssige muligheder og fordele der også kan være forbundet med stål som konstruktionsmateriale.

2.1.2.1 Nescio Bridge

Nescio Bridge er en prisvindende hollandsk hængebro i stål, som blev opført i en forstad til Amsterdam i 2005-2006. Broen er en gang- og cykelbro på hele 780 meter med et frit spænd på 170 m og en frihøjde til sejlene trafik på 10 m. Broens ramper er udført i insitu-beton mens den del af broen, der spænder over

kanalen, er udført udelukkende i stål. Broen vandt i 2006 den hollandske stålpris i kategorien for "Infrastruktur og andre stålkonstruktioner" og året efter blev broen hædret med den internationale "Arthur G. Hayden pris", som uddeles til innovative brodesigns i kategorien for utraditionelle konstruktioner.



Figur 2.1-3 Nescio Bridge, Amsterdam Holland.

Tv: Broens hoveddæk løftes på plads i et stykke ved hjælp af to kranpramme.

Th: Den færdige bro.

Nescio Bridge er Hollands første hængebro og blev udført på et budget på 12 millioner euro. Konstruktionsmetoden blev afgjort af et krav om en tidmæssig begrænsning af afspærringen af den underførte kanal på 12 timer, samt behovet for at kunne selvforankre hovedkablet. Disse udfordringer blev løst ved at udforme dækket i ét stykke, som var stift nok til at blive løftet på plads med kran og stift nok til at spænde midlertidigt mellem to interimsunderstøtninger ved enderne.

Løft af dæk og montage af hovedkabel ved enderne blev klaret på sammenlagt 10 timer, og efterfølgende kunne sejlende trafik genoptages mens den endelige montage af bøjler mellem hovedkabel og dæk blev udført. Materialets stivhed og styrkeegenskaber gav nogle udførelses- og designmæssige muligheder, som var afgørende for, at valget faldt på stål som konstruktionsmateriale.

2.1.2.2 Raccoon Creek Bridge

Raccoon Creek Bridge er en firesporet motorvejsbro i stål som blev opført i 2007 i Pike County, Kentucky USA. Broen vandt i 2007 en national pris i konkurrencen "National Steel Bridge Alliance 2007 Prize Bridge Competition" for at have udmærket sig med hensyn til innovation, æstetik og designløsninger. Broen krydser en kløft og udspringer mellem klippeformationer på hver sin side af dalen, hvilket betyder at broens endepunkter er meget klart defineret af det omkringliggende landskab. For at sikre et glidende forløb af vejen var det derfor nødvendigt at udforme broen med et kurvet forløb.



Figur 2.1-4 Raccoon Creek Bridge
Tv: Broen under opførelse
Th: Den færdige konstruktion.

Broen krydser i dalen en mindre vej, to jernbanespor, en å samt adgangsvejen til en kulmine, hvilket medførte et behov for så få understøtningspunkter som muligt og dermed store spænd. De stærke stål-boks-gitterkonstruktioner, som udgør den bærende del af broens overbygning tillod broen at blive udført med kun 3 understøtningspunkter og et spænd på op til 116 m. Broens samlede længde er 389 m med en maksimal højde til den underliggende dal på 65 m.

På grund af broens kurvede forløb var det ikke muligt at lade broen opføre som en traditionel bjælke-gitterkonstruktion, idet denne konstruktionsform ville medføre for stort et vridningsmoment i I-profilerne under trafikal belastning. Løsningen blev i stedet en boks-gitterkonstruktion, som både var stærk nok til at optage vridningsmomentet under trafikal belastning samt til at opnå de ønskede spænd. Stålfilerne er i sig selv ikke umiddelbart slanke i udtrykket, men tager man broens samlede størrelse og de store spænd i betragtning, fås samlet set et utroligt slankt udtryk, som med sin snoede form falder godt ind i omgivelserne. Raccoon Creek Bridge er således et godt eksempel på de designmuligheder der opnås med stål som konstruktionsmateriale i form af materialets formbarhed, styrke og stivhed.

2.1.2.3 Gateshead Millenium Bridge

Gateshead Millenium bridge er en innovativ stibro i stål som blev opført i år 2000-2001 i Newcastle, England. Broen krydser floden River Tyne, og brodækket blev løftet på plads af en af verdens største flydekraner i ét helt stykke, hvilket satte store krav til konstruktionens stivhed. Broen består af to buede stålsektioner, som er forbundet af kabelstag. Den ene stålsektion danner platformen for den gående og cyklende trafik, mens den anden stålbue danner modvægt og stabilitet både når broen er lukket og giver adgang for gående trafik, og når den skal åbne for sejlene trafik.

I hver ende af broen findes to overdækkede glasburer, hvorfra det hydrauliske system betjenes. Stålbuer-nes stivhed, indbyrdes placering i forhold til hinanden samt hver sektionsspecifikke egenvægt sørger for, at anvendelsen af elektricitet i forbindelse med hver rotation/tilt er minimal.

Gateshead Millenium Bridge er opført for 22 millioner pund, hvilket er en høj pris for en stibro af denne størrelse. Det æstetiske udtryk har i dette tilfælde haft høj prioritet, ligesom man med valget af design har skabt et prestigefyldt bygningsværk som giver genlyd rundt om i verden. Broen har således vundet adskillige priser² for dens unikke design.

Gateshead Millenium Bridge er et godt eksempel på de designmæssige muligheder der kan opnås med stål som konstruktionsmateriale til broer, idet netop ståls formbarhed og styrke i dette tilfælde har givet ingeniører og arkitekter muligheden for at skabe et unikt bygningsværk.



*Figur 2.1-5 Gateshead Millenium Bridge:
Tv: "Lukket bro" med adgang for cyklister og fodgængere.
Th: "Åben bro" med øget frihøjde til den sejlen-
de trafik under broen.*

2.1.3 Stål - sammenfatning

Stål er ikke noget nyt materiale i konstruktionssammenhæng, men måden hvorpå det anvendes kan nytænkes. Der er således i de opstillede eksempler tale om konstruktionsforme som er innovative og arkitektoniske udtryk som er slanke og moderne. Den store arkitektoniske frihed der opnås med stål som konstruktionsmateriale er sammen med styrkeegenskaberne blandt de største fordele ved materialet. Dertil kommer en række udførelsesmæssige fordele, som i kombination med ståls lave materialepris, ofte vil være blandt de afgørende argumenter for valget af netop stål som konstruktionsmateriale.

Ligeledes kan dog nævnes en række ulemper der kan være forbundet med stål som konstruktionsmateriale i infrastrukturen. Stål som råmateriale korroderer og kræver derfor overfladebehandling samt løbende vedligehold for at undgå nedbrydning. Ståls evne til at optage både tryk-, træk- og moment-kræfter betyder at stål kan omfordele laster effektivt, hvilket kan medføre utilsigtede koncentrationer af kræfter. Ydermere gælder at stål ikke giver varsel om øget last, som man fx kender det fra armeret beton, hvor revnevidder i betonens trækzoner bruges som lastindikator. Derfor er løbende eftersyn og kontroller nødvendige for at imødekomme risikoen for sætninger eller kollaps.

² <http://www.gateshead.gov.uk/Leisure%20and%20Culture/attractions/bridge/Awards.aspx>

Som det fremgår af de opstillede eksempler med stål er der i fire ud af fem tilfælde tale om konstruktioner som har små daglige belastninger. Særligt i forbindelse med sådanne konstruktioner kan der opnås en række af de fordele beskrevet ovenfor, men som eksemplet med Raccoon Creek Bridge viser, er det også muligt at opnå slanke udtryk i forbindelse med større og tungere konstruktioner.

Historisk set har stålkonstruktioner i infrastrukturen ikke været slanke i udtrykket. Der er typisk tale om tunge boks-gitterkonstruktioner, som fylder godt i landskabet. Ståls styrkeegenskaber og høje elasticitetsmodul betyder dog, at der netop med stål som konstruktionsmateriale er unikke muligheder for at skabe slanke udtryk, som falder godt ind i omgivelserne.

I takt med at der er kommet et øget fokus på æstetik og materialeforbrug i forbindelse med konstruktioner i infrastrukturen, ser man dog flere og flere eksempler på slanke konstruktioner i stål – også i forbindelse med konstruktioner til tungere trafik.

Foruden ovenstående eksempler, som alle er rene stålkonstruktioner, ses stål også anvendt i kombination med andre konstruktionsmaterialer, som beton eller fiberarmeret plast. Disse såkaldte hybridkonstruktioner³ vil ofte bestå af et bjælkelag i stål og et dæk i beton eller plastkomposit. Der kan opnås en række anlægsmæssige og økonomiske fordele ved netop denne konstruktionsmetode. Eksempler på sådanne hybridkonstruktioner vil blive beskrevet senere i rapporten under afsnittene som behandler konstruktioner i højstyrkebeton og fiberarmeret plast.

³ Terminologien varierer. Konstruktioner, hvor bygningselementer i hhv. stål og beton kombineres, betegnes i nogle sammenhænge for *kompositkonstruktioner* eller *kompositbroer*. Hybride konstruktioner/hybridbroer er konstruktioner som er sammensat af to forskellige materialer og denne term forveksles ikke med broer i nyere kompositmaterialer.

2.2 Højstyrkebeton

Som beskrevet indledningsvis er det et generelt problem i infrastrukturen, at en stor del af den eksisterende bropakke er i så dårlig stand, at nationale broejere tvinges til at bruge store summer på reparationer og vedligehold. En stor del af de betonbroer, der i dag ses omfattende skader på, er dog opført før indførelsen af basisbetonbeskrivelsen⁴ i 1986, og således ses der i betonkonstruktioner fra tiden herefter langt færre skader end i konstruktioner fra før denne tid. Der er dog fortsat et potentiale i forhold til at forbedre holdbarheden af traditionelle betonkonstruktioner og i den forbindelse kan højstyrkebeton byde på en række fordele. Men det er vigtigt at nævne, at vurderingen af om den ene løsning er bedre end den anden skal baseres på totaløkonomiske betragtninger samt en vurdering af miljøpåvirkningerne set i et livscyklus perspektiv.

Definitionen af hvornår en beton kaldes højstyrkebeton kan variere fra land til land⁵, men generelt gælder, at højstyrkebeton har en højere trykstyrke end traditionel beton. For at opnå den øgede trykstyrke er der anvendt et højere cementindhold, hvoraf også en større tæthed i betonen følger. På grund af den øgede tæthed og modstandsevne over for bl.a. chloridindtrængning og karbonatisering har konstruktioner i højstyrkebeton ofte en lang levetid på langt mere end 100 år. Den øgede tæthed af betonen medfører mindre vedligehold og dermed færre omkostninger til inspektioner og reparationer.

Højstyrkebetons forbedrede mekaniske egenskaber kan betyde, at længere spænd muliggøres, hvilket kan medføre besparelser i form af færre understøtningspunkter, større afstand mellem bjælker samt mindre dimensioner på bjælker, dæk og søjler, hvilket samlet set kan reducere materialeforbruget. Samtidig kan de forbedrede styrkeegenskaber medføre større frihedsgrader for arkitekter og ingeniører i forhold til designløsninger og arkitektonisk udformning. Der kan desuden opnås en reduceret egenvægt på grund af muligheden for meget smalle materialedybder.

Ovenstående er en sammenfatning af de fordele der samlet set kan opnås på konstruktioner i højstyrkebeton og gælder således ikke nødvendigvis for alle konstruktioner. I hvilken grad de enkelte fordele vil gøre sig gældende på en given konstruktion afhænger af en lang række variable parametre som knytter sig til de specifikke projekter. Der er således en del vigtige overvejelser som skal med i vurderingen af, om højstyrkebeton kan skabe værdi for det enkelte projekt.

Anlægssummen er eksempelvis ofte højere end for traditionel beton, og da erfaringsgrundlaget for højstyrkebeton til broer samtidig er spinkelt, er det ofte usikkert, hvorvidt den øgede startomkostning vil kunne tjene sig hjem over konstruktionens levetid. I tilfælde med meget særegne betonegenskaber og hvor højstyrke-elementerne er produceret på fabrik kan der være usikkerhed omkring konstruktionernes reparationsegnerhed i udendørs miljø, hvor eksponeringen er helt anderledes end i produktionsmiljøet.

⁴ Basisbetonbeskrivelsen indførte et fokus på betonkonstruktioners holdbarhed, hvorimod daværende betonnorm, DS 411, primært fokuserede på betonkonstruktioners styrkemæssige forhold.

⁵ I Danmark defineres højstyrkebeton som beton med en trykstyrke højere end 50 MPa, jf. EN 206-1 pkt. 3.1.10.

Det er muligt at anvende højstyrkebeton til insitu-støbninger, men hér må stilles de samme eller endda større krav til udførelsen i forhold til udførelse med almindelig beton. Ved insitu-støbninger med højstyrkebeton skal der i design- og udførelsesfasen således tages særlige hensyn til svind, kryb og varmeudvikling. Risikoen for initialdefekter i betonen er dermed de samme eller måske endda større i sammenligning med almindelig beton.

Ved støbninger med ultra højstyrkebeton (UHPC)⁶ anvendes ofte meget små dæklag, hvilket både kan være en fordel og en ulempe. Der spares herved noget beton, men dannelsen af initialdefekter i forbindelse med støbninger vil være af enormt kritisk betydning for konstruktionens levetid, fordi UHPC er en meget tæt beton, som beskytter armeringen, men er der skader i dæklaget nedsættes konstruktionens levetid markant. Generelt bevæger man sig i forbindelse med ekstreme højstyrkebetoner udenfor almindelige normer og standarder⁷. Kendskabet til hvordan materialet opfører sig under belastning over tid er derfor afgørende for eventuelle forudsigelser om konstruktionens levetid. Omfattende dokumentation fra producenten samt prøvning af den anvendte beton vil ofte være den eneste sikkerhed bygherren har.

Endelig vil det ikke altid være muligt at udnytte højstyrkebetonens forbedrede mekaniske egenskaber⁸, hvilket i høj grad afhænger af det enkelte brodesign. Dermed kan den øgede tæthed i nogle tilfælde være eneste incitament for at vælge højstyrkebeton frem for almindelig beton, og i sådanne tilfælde bør man nøje vurdere forventningerne til og omfanget af den forlængede levetid og det reducerede vedligeholdelsesomfang i forhold til den øgede startomkostning.

2.2.1 Eksempler fra Danmark

Erfaringerne med højstyrkebeton til broer i Danmark er ganske få. Vejdirektoratet har dog foretaget enkelte forsøg med højstyrkebeton til broer i Danmark. Blandt andet er der opført en buebro over Gadholtvej ved Frederikshavn, hvor brodesignet sikrer en udnyttelse af højstyrkebetonens gode mekaniske egenskaber.

Vejdirektoratet har tidligere opført lignende demonstrationsprojekter, som dog modsat buebroen over Gadholtvej er traditionelle bjælkebroer, hvor højstyrkebetonens forbedrede mekaniske egenskaber ikke udnyttes i samme grad. Broen over Gadholtvej er opført i midten af 90'erne, men har altså ikke dannet tilstrækkeligt erfaringsgrundlag for, at højstyrkebeton i dag har nået et gennembrud som konstruktionsmateriale til broer i Danmark.

2.2.1.1 Buebro over Gadholtvej

I forbindelse med etableringen af en ny motorvej mellem Sæby og Frederikshavn opførte Vejdirektoratet i 1995 en ny bro i højstyrkebeton. Ved at lade broen udføre som en buebro er højstyrkebetonens høje tryk-

⁶ Ultra High Performance Concrete refererer normalt til ekstremt høje styrker, ca. 150 MPa og derover.

⁷ Gældende standarder for HPC dækker trykstyrker 50-90 MPa, Jf. EN 1992-1-1 3.1. UHPC bruges pt. kun i elementfabrikation, og der kan være udfordringer i sammenkøring af disse og standarder for bygge og anlæg, fx at dække området 90-150 MPa.

⁸ Reference: <http://ing.dk/artikel/slankebro-i-superbeton-11304>

styrke blevet udnyttet. Trykbuen er således udført med mindre tværsnit end hvis trykbuen var blevet udført i almindelig beton og dermed har man opnået en materialebesparelse. Konstruktionsformen betyder samtidig, at der er sparet en understøtning på midten af broen væk. Den økonomiske gevinst, ved at spare en understøtning væk, er dog mindre end den meromkostning, der er forbundet med opførelsen af trykbuen. Incitamentet i forhold til valg af netop denne konstruktionsform vil således først og fremmest være til stede, hvis der er praktiske eller æstetiske forhold som betyder, at en mellemunderstøtning ikke ønskes.



Figur 2.2-1 Buebro over Gadholtvej syd for Frederikshavn. Trykbue fjerner behovet for mellemunderstøtning.

Et væsentligt formål med demonstrationsprojektet er netop at få klarhed over højstyrkebetons anvendelighed til broer i forhold til holdbarhed og eventuelt vedligehold, idet netop disse parametre oftest vil være blandt hovedårsagerne til at vælge højstyrkebeton frem for almindelig beton.

2.2.2 Eksempler fra udlandet

Som med stål er det vanskeligt via opstillede eksempler at skabe et generelt billede af højstyrkebetons anvendelse til broer i udlandet. Nedenfor er dog opstillet to eksempler, som på forskellig vis viser, hvordan højstyrkebetons egenskaber kan udnyttes i forbindelse med brokonstruktioner.

2.2.2.1 Demonstrationsprojekt. Motorvejsbro "SR 18 over SR 516" i højstyrkebeton

I USA er anvendelsen af højstyrkebeton til broer udbredt og således indledte flere amerikanske stater i 1990'erne forsøg med broer i højstyrkebeton. Resultaterne derfra viser overodnet set, at der kan opnås en række fordele med brugen af højstyrkebeton til broer sammenlignet med broer i traditionel beton. I staten Washington blev den første bro i højstyrkebeton opført i 1992. Washingtons transportdepartement ønskede allerede tre år efter i 1995 at udvide brugen af højstyrkebeton i broer og i samarbejde med den føderale motorvejsadministration (FHWA⁹), indledtes et demonstrationsprojekt, som havde til hensigt at udbrede viden om, og klarlægge potentialet for, højstyrkebeton til broer.

⁹ Federal Highway Administration, USA

Broen er en lang motorvejsbro på 86 m, med et maksimalt spænd på 42 m og en bredde på 11,6 m. Broens overbygning består af en forspændt gitterkonstruktion af bjælker i højstyrkebeton og herpå dæk som også er udført i højstyrkebeton. Ved at anvende højstyrkebeton frem for almindelig beton i gitterkonstruktionens forspændte bjælker er antallet af bjælker reduceret fra syv til fem. Betonen anvendt til bjælkerne har en 56-dages styrke på 69 MPa, frost-tø bestandighed som er større end 80 %¹⁰ samt en chlorid-permeabilitet lavere end 1.000 coulombs¹¹.



Figur 2.2-2: Demonstrationsprojekt med motorvejsbro "SR 18 over SR 516" i højstyrkebeton fra staten Washington.

Den umiddelbare konklusion på demonstrationsprojektet fra Washington er, at der ved brugen af højstyrkebeton til broer kan opnås en række både kort- og langsigtede fordele, herunder:

- Mere effektive designs
- Længere spænd
- Færre bjælker

Der er i ovenstående tilfælde ikke opnået et slankt udtryk ved brugen af højstyrkebeton, men derimod har man opnået materialebesparelser gennem et mere effektivt design i form af en reduktion af antallet af bjælker i gitterkonstruktionen. Derudover er der fortsat en forventning om, at konstruktionen har en meget lang levetid, samt at vedligeholdelsesomfanget er lavt, hvilket samlet set skal resultere i lave livscyklusomkostninger.

2.2.2.2 Kaag-broerne

I 2002 restaureredes Kaag-broerne i Holland ved hjælp af CRC højstyrkebeton¹². De gamle motorvejsbroer bestod af en gitterkonstruktion i stål med dæk af azobetræ. Trædækkene krævede dog løbende vedligehold og udskiftninger, og derfor var det et ønske, at de nyrestaurerede dæk skulle være så vedligeholdelsesfri og holdbare som muligt. Gitterkonstruktionen i stål er designet til dækkene i azobetræ, og det var derfor et

¹⁰ Jf. ASTM C 666/C 666M - 03

¹¹ jf. Prakash Joshi & Cesar Chan, Rapid Chloride Permeability Testing, 2002

¹² CRC er forkortelse for "Compact Reinforced Composite". CRC er højstyrkebeton, hvor en stor mængde stålfibre i forskellige størrelser medfører stor duktilitet (sejhed).

strukturelt krav, at de nye dæk skulle have en lav egenvægt, svarende til lastkriterierne for gitterkonstruktionen i stål.

Valget faldt på dæk i ultra højstyrkebeton, hvormed ønsket om holdbarhed, styrke og lav egenvægt blev opnået på en gang. Betonen der blev anvendt er en højstyrke beton med trykstyrke C155/180 Mpa, hvilket muliggjorde en dæktykkelse på kun 45 mm og dermed lav egenvægt til følge. For at opnå den rette trækstyrke er dækkene tæt armeret i tre lag og der er anvendt stålfibre til styrkelse af matricen. Egenvægten af beton og armering i dækkene løber op i 3350 kg/m³, men på grund af dækkenes lave profilhøjde er den samlede egenvægt altså lav nok til, at den underliggende gitterkonstruktion i stål kunne bevares.



Figur 2.2-3: Ultratyndt dækpanel i CRC højstyrkebeton løftes på plads på den ene af Kaag-broerne.

De gamle trædæk havde en levetid på ca. 15 år, mens man regner med en levetid for de nye dæk på minimum 50 år. En livscyklus beregning foretaget på en 50 årig periode overbeviste bygherren, idet den viste, at en restaurering med dæk i højstyrkebeton ville være markant billigere end at udskifte dækket med et tilsvarende i træ.

2.2.3 Højstyrkebeton - sammenfatning

Som det fremgår af de opstillede eksempler ovenfor kan der være en række fordele forbundet med højstyrkebeton til broer afhængig af projektets karakter, dels i forbindelse med opførelsen af helt nye broer samt ved restaurering af ældre broer, hvor eksempelvis en lav egenvægt af et nyt dæk ønskes.

Generelt har højstyrkebeton en række materialemæssige fordele i form af stor styrke og høj tæthed, og dermed kan holdbarheden øges og materialeforbruget reduceres. Disse parametre kan være medvirkende til, at de samlede livscyklus omkostninger for broer i højstyrkebeton er lave, hvilket er en væsentlig faktor i forhold til at sikre materialets udbredelse i infrastrukturen.

Højstyrkebeton har ydermere den fordel, at materialet umiddelbart kan indgå i anlægsbranchens byggekultur, uden at der brydes med de byggemæssige traditioner. Højstyrkebeton kan således både leveres som præfabrikerede elementer eller som insitu-beton, afhængig af hvilken type højstyrkebeton der er tale om. Arkitekterne opnår således udvidede designmuligheder med brugen af højstyrkebeton. Samtidig betyder

muligheden for insitu-støbning dog også, at risikoen for udførelsesfejl er til stede. Da erfaringerne med højstyrkebeton i forbindelse med insitu-støbninger er noget mindre end med traditionel beton, kan risikoen for udførelsesfejl og dermed tilstedeværelsen af initialdefekter i konstruktionerne være større end ved traditionelle betonstøbninger.

Såfremt insitu-støbning med højstyrkebeton skal være et reelt alternativ til præfabrikeret elementmontage ligger der et behov for at udvikle nogle udførelsesmæssige metoder og arbejdsbetingelser som særligt relaterer sig til insitu-støbninger med højstyrkebeton.

Derudover er højstyrkebeton trods elimineringen af udførelsesfejl og den forøgede tæthed ikke 100 % korrosionsbestandig og er derfor stadig sårbar over for nedsivende vand og salt.

Den manglende erfaring med højstyrkebeton i infrastrukturen betyder samtidig, at der mangler dokumenterede erfaringstal på den forventede forøgelse af levetiden samt lavere grad af vedligeholdelse. Dette kan medføre tvivl og skepsis i kredse af ingeniører, arkitekter og bygherrer omkring, hvorvidt gevinsten ved at vælge højstyrkebeton til broer er til stede eller ej. Kombinationen heraf samt den forøgede initialomkostning, der som regel vil være forbundet med konstruktioner i højstyrkebeton, kan derfor være hæmmende for udbredelsen af højstyrkebeton til broer.

Det er i høj grad de samme delmaterialer der udgør beton og højstyrkebeton og i forhold til materialeindvinding og bortskaffelse af materialet efter konstruktionernes levetid vil der ofte ikke være den store miljømæssige forskel på om der er anvendt almindelig beton eller højstyrkebeton. Cementindholdet i højstyrkebeton er dog højere end i traditionel beton, og CO₂-aftrykket fra produktionen af højstyrkebeton vil derfor være højere end ved produktionen af en tilsvarende mængde traditionel beton. Dette forhold kan dog opvejes af mulige materialebesparelser og forlængede levetider på konstruktioner i højstyrkebeton.

Selvom der ses mange eksempler på nedslidte betonbroer i Danmark er udviklingen af traditionelle betonbroers holdbarhed allerede langt fremme. Holdbarheden af højstyrkebeton, eller andre nye materialer, som glas- og kulfiberarmeret plast, skal derfor sammenlignes med nyere konstruktioner i traditionel beton, hvor holdbarheden vurderes at være 100 år eller mere, og ikke fortidens betonbroer, som ofte blev udført i en kvalitet, der er ringere end den der ses i dag.

Chancen for at højstyrkebeton opnår et gennembrud som konstruktionsmateriale i infrastrukturen vurderes at være størst såfremt alle materialets egenskaber udnyttes fuldt ud. Overordnet set vil højstyrkebetons anvendelighed og værdi derfor afhænge af det enkelte projekt. Der er mange parametre der spiller ind, og derfor vil det skulle opvejes fra projekt til projekt, om fordelene ved at vælge højstyrkebeton kan forsvare den højere initialomkostning. Parametre som levetidsanalyser, materialebesparelsesberegninger samt eventuelle ønsker om særlige arkitektoniske udformninger kan danne grundlag for en vurdering af, hvorvidt højstyrkebeton har værdi for det enkelte projekt.

2.3 Glasfiberarmeret plastkomposit

Både i Danmark og udlandet findes der flere eksempler på broer udført i fiberarmeret plast, som er et byggemateriale, der forener høj styrke med lav egenvægt. I det følgende afsnit behandles udelukkende broer i glasfiberarmeret plast. Det er dog også muligt at anvende kulfibre til armering af plastmatrixen, hvilket giver endnu stærkere materialer, men da det samtidig er noget dyrere, udvaskes den økonomiske gevinst og dermed forudsætningen for materialets udbredelse som byggemateriale i infrastrukturen. Konstruktionselementer, der har til formål at konkurrere med lignende elementer i stål eller beton, produceres derfor langt oftest i glasfiberarmeret plast. Senere i rapporten vil alternative koncepter for kulfibres anvendelse i infrastrukturen blive beskrevet særskilt.

Fordelen ved at anvende glasfiberarmeret plast som byggemateriale er først og fremmest relateret til materialets holdbarhed og lave egenvægt. Konstruktioner af fiberarmeret plast påvirkes hverken af regn, salt eller frost og vedligeholdelse er ofte kun af kosmetisk karakter ligesom levetiden er lang. Den lange levetid og lave grad af vedligeholdelse vil ofte resultere i lave livscyklus omkostninger.

Forholdet mellem plastkompositers styrke og densitet er væsentligt højere end for stål og beton. Derfor er kompositelementers egenvægt relativt lav og der frigøres dermed ekstra kapacitet i fundamenter og vederlag, som enten kan anvendes til at optage en øget nyttelast (ved renovering) eller til at reducere dimensioner og materialeforbrug (ved anlæg af nye konstruktioner). Plastmatrixen kan desuden tilegnes så den er termisk og elektrisk isolerende og ved brodæk i fiberarmeret plast kan fugtmembran undværes på grund af materialets korrosionsbestandighed.

Elementerne produceres på fabrik og kan herefter monteres hurtigt på stedet, hvilket medfører en reduceret byggetid og heraf en reduktion af de trafikale gener i anlægsperioden. Den fulde besparelse opnås dog primært i sammenligning med insitu-støbte betonbroer, hvor etableringen af overbygningen er en tidsmæssigt og økonomisk krævende ressource. Etableringen af fundamenter og vederlag vil være nødvendig på samme måde som ved traditionelle betonbroer, ligesom den tidsmæssige besparelse på etableringen af overbygningen ikke overstiger den der kan opnås ved anvendelsen af præfabrikerede betonelementer.

En hollandsk undersøgelse¹³ peger på, at glasfiberarmeret plast til broer er et miljøvenligt materiale. Materialets lange levetid bidrager positivt til den samlede miljøprofil, og samtidig er det muligt at genanvende glasfiberkompositten når konstruktionernes levetid er opbrugt. Genanvendelsen af kompositten fungerer i et teknisk kredsløb, hvor den både indgår som råvare og erstatningsbrændstof ved cementfremstilling, hvilket blandt andet medvirker til at fortrænge brugen af fossile brændstoffer i forbindelse med cementproduktionen.

Foruden ovenstående fordele er der samtidig en række ulemper/begrænsninger knyttet til teknologien, som særligt relaterer sig til den manglende erfaring der er med materialet i infrastrukturen. Den manglende

¹³ Ryzard A. Daniel, *Environmental considerations to structural material selection for a bridge*, European bridge engineering conference, Rotterdam, 2003

tradition med materialets anvendelse i infrastrukturen betyder således, at der kun er ganske få erfaringer at gøre brug af i både design-, udførelses- og driftsfasen, hvilket kan give anledning til usikkerhed om flere af ovenstående fordele.

Konstruktionsprofilerne produceres på fabrik i et indendørs miljø, hvilket i sig selv både kan være en fordel og en ulempe. Produktionsformen medfører en forkortet anlægsperiode, men der kan samtidig stilles spørgsmål ved de færdige konstruktioners reparationsegnerhed. Hvordan er konstruktionerne således egnede i forhold til reparationer af mekaniske skader, som er opstået i forbindelse med ulykker? I denne forbindelse er der eksempelvis stor erfaring med reparation af skader på betonbroer, som kan foretages på stedet, mens en udskiftning af beskadigede profiler kan være nødvendig med elementer i plastkomposit.

Den manglende erfaring med materialet kan give anledning til en række yderligere tvivlsspørgsmål omkring materialet så som egensvingninger i anvendelsestilstanden, vedhæftningsproblemer mellem kompositprofilerne og belægningen, samt fleksibilitet i forhold til design, reparationsmetoder og vedligehold. Hvor egensvingninger og udbøjning er forhold ingeniørerne må dimensionere efter i designfasen, så dækker de øvrige forhold områder, som primært vil blive afdækket i takt med at der opbygges en mere solid erfaringsdatabase på området.

Kombinationen af materialets høje styrke og lave elasticitetsmodul betyder yderligere, at det ofte vil være udbøjningen som er den dimensionsgivende faktor i designfasen. Dermed er det nødvendigt at overdimensionere konstruktionsprofilerne, således at de udføres med en forøget profilhøjde. De slanke udtryk er altså ikke i samme grad mulige at opnå med glasfiberarmeret plast som med eksempelvis stål, der har et ganske højt elasticitetsmodul og en tilsvarende høj styrke.

Endelig er der forhold omkring de design- og udførelsesmæssige traditioner som brydes med implementeringen af plastkompositterne ligesom den nuværende udbudspraksis, hvor den samlede anlægssum ofte er et væsentligt parameter, er en forhindring for materialets udbredelse, idet startomkostningerne er højere for konstruktioner i plastkomposit sammenlignet med konstruktioner i traditionelle materialer som stål og beton.

2.3.1 Eksempler fra Danmark

Danmark kæmper, som mange andre lande, med en række nedslidte betonbroer. Mange af broerne opført i 60'erne og 70'erne står således overfor enten omfattende renovering eller sågar nedrivning. De mange renoveringsprojekter slider både på trafikbudgetterne og den eksisterende infrastruktur, som belastes af vejarbejder og trafikomlægninger. Én af løsningerne på at sikre en forbedret bæredygtighed af infrastrukturens konstruktioner fremover kan være at indføre nye materialer i infrastrukturen, herunder broer i glasfiberarmeret plast.

2.3.1.1 Fiberlinebroen

Den første glasfiberarmede bro i Skandinavien blev opført i Kolding og indviet i 1997 og kaldes Fiberlinebroen efter firmaet Fiberline, som har produceret konstruktionsprofilerne i glasfiberarmeret plast.



Figur 2.3-1 Stibro ved Kolding udført i plastbaseret komposit fra danske Fiberline.

Fiberlinebroen er en stibro, som spænder 40 m i længden, og kun vejer 12 t, hvilket er meget lavt sammenlignet med lignende konstruktioner i stål eller beton. Dækelementerne er fremstillet på fabrik og er efter fremstilling transporteret til samling og montage ved brostedet, hvilket har betydet, at de trafikale gener på den travle jernbanestrækning har været minimale i forbindelse med anlægsarbejdet.

Broen vurderes at have en levetid på minimum 100 år, og er hverken påvirket af regn, salt eller frost og forventes kun at undergå kosmetisk vedligehold i broens levetid. Endelig har broen i plastkomposit en god elektrisk isoleringsevne, hvilket er en fordel, når broen krydser en travl jernbanestrækning med højspændningsledninger. Kun boltene til samling af dækprofilerne samt lejerne¹⁴ ved broenderne er af stål, mens resten af broen er udført i glasfiberarmeret polyester.

Broen har i 2013 gennemgået et særeeftersyn, hvor kun mindre kosmetiske skader på den bærende konstruktion blev konstateret. Herudover konstateredes enkelte skader i belægningen, som vurderes at stamme fra snerydningsmateriel på broen. Dermed lever broen i sine første leveår foreløbigt op til forventningerne om en lav vedligeholdelsesgrad. Nye betonbroer spås dog også at have en levetid på op til mere end 100 år, så den endelige konklusion og erfaringsmæssige dokumentation i sammenligning med danske betonbroer, ligger derfor noget længere ude i fremtiden.

2.3.1.2 Karrebæksmindebroen

Et andet eksempel på en dansk bro i glasfiberarmeret plast, er Karrebæksmindebroen, der forbinder Sjælland med Lungshave og Enø. Der er her tale om en vejbro med væsentligt højere belastning end på ovennævnte stibro, og derfor ligger dækkene her af på bærende bjælker af stål.

¹⁴ Lejet ligger mellem dækket og vederlaget og sørger for at de bevægelser der opstår mellem dæk og vederlag kan optages i konstruktionen. Vederlag kan være både fundamenter, vægge eller søjler, afhængig af den enkelte bros udformning.



Figur 2.3-2 Karrebæksmindebroen der forbinder sjælland med Lungshave og Enø.

I dette tilfælde er der ikke tale om en nyopført bro, men derimod en restaurering af den gamle og nedslidte Karrebæksmindebro, hvor dækket bestod af træplanker, som efterhånden var så medtaget at de stod til udskiftning. I slutningen af den gamle Karrebæksmindebros levetid, blev slidplankerne skiftet ca hvert 5. år. Netop den lave mængde af vedligeholdelse, der kræves i forbindelse med plastbaserede kompositdæk, er en af årsagerne til, at bygherrens valg faldt på netop denne type dæk til den restaurerede bro. Derudover bevirkede den lave egenvægt af dækkene, at et ekstra dæk til fodgængere og cyklister kunne installeres på siden af broen.

Dækelementerne blev fremstillet på fabrik, og herefter transporteret til karrebæksmindebroen, hvor samling og montage blev klaret i løbet af få nattetimer med minimal gene af trafikken til følge, hvilket var et væsentlige argument for bygherren i forhold til valg af konstruktionsmateriale.

Broen er en klapbro, som kan slås op når sejlende trafik skal passere broen. Den lave vægt af det nye brodæk betød, at de eksisterende kontravægte på broen kunne bevares i forbindelse med restaureringen af broen.

Efter broens åbning opstod der uforudsete vedhæftningsproblemer mellem belægning og dæk, hvilket betød at belægningen på broen måtte repareres. De opståede problemer var ikke direkte relateret til fejl i materialet, men i højere grad til den mangel på erfaring der på daværende tidspunkt var med materialets anvendelse i infrastrukturen. Netop løsningen af denne form for uforudsete problematikker vil være medvirkende til at danne den erfaringsdatabase, der skal sikre, at lignende problemer ikke opstår i fremtiden.

Generelt er erfaringerne med glasfiberarmerede plastkompositbroer i Danmark få, og foruden eksemplerne opstillet ovenfor findes kun få øvrige broer i Danmark i plastkomposit.

2.3.2 Eksempler fra udlandet

Brugen af glasfiberarmeret plast til strukturelle konstruktioner i infrastrukturen har udviklet sig væsentligt over de sidste 20 år, og blandt andet i USA har man gennem længere tid arbejdet med materialet som supplement eller erstatning for traditionelle byggematerialer som træ, stål og beton i infrastrukturen. I mere end 25 år har den føderale amerikanske motorvejs administration (FHWA) således deltaget i arbejdet med at udvikle og udbrede teknologien for glasfiberarmeret plast til brokonstruktioner. Det har resulteret i, at USA, ifølge FHWA, i dag er det land med flest vejbroprojekter, hvori fiberarmeret plast indgår som strukturelt byggekomponent. Mange af disse projekter er finansieret gennem FHWA's forsknings- og udviklings-

programmer for innovative brodesigns, og FHWA's nuværende fokus ligger på at udbrede brugen af fiberarmeret plast yderligere i forbindelse med både ny-opførte og renoverede anlægsprojekter i fremtiden.

Der er på nuværende tidspunkt mere end 150 registrerede vejbroprojekter under FHWA i USA, hvor komponenter af fiberarmeret plast indgår i den strukturelle konstruktion. En del af disse projekter er allerede opført, mens resten er i projektfasen og forventes opført inden for den nærmeste fremtid.

I Europa arbejdes der også intensivt med at afsøge og udvikle brugen af alternative byggematerialer og anlægsmetoder til byggeprojekter i infrastrukturen. Den danske producent af glasfiberarmerede konstruktionselementer, Fiberline, har tidligere deltaget i det såkaldte ASSET¹⁵-projekt, som er et delvist EU-støttet samarbejdsprojekt, som har til formål at finde nye og mere holdbare materialer til anvendelse i infrastrukturen. I den forbindelse er der bl.a. gennemført et demonstrationsprojekt med fiberarmeret plast på en vejbro i England.

Derudover er der med støttemidler fra EU-kommissionen under det 7. rammeprogram for forskning og teknologisk udvikling oprettet et offentligt tilgængeligt forskningsprojekt ved navn PANTURA, som har netop broer i infrastrukturen som sit omdrejningspunkt. Formålet med PANTURA er at forbedre og udvikle off-site produktionsprocesser, skabe ressource-effektive byggepladser, forbedre teknologier og værktøjer til brobygning, forbedre reparations- og renoveringsmetoder i tætbefolkede områder samt at forbedre kommunikationen imellem interessenter, myndigheder og byggefirmaer.

I dette øjemed spiller broer i fiberarmeret plast en væsentlig rolle. De endelige resultater fra forskningsprojektet vil foreligge i 2014. I det følgende opstilles en række eksempler på nogle af de projekter som er opført i fiberarmeret plast og som kan siges at opfylde nogle af de mål der er opstillet i ASSET og PANTURA.

¹⁵ Advanced Structural SystEms for Tomorrows infrastructure

2.3.2.1 Route 367 over Bentley Creek

I Wellsburg New York blev en stål-gitter-bro med nedslidt betondæk i 1999 restaureret, idet man udskiftede det nedslidte betondæk med et nyt dæk i fiberarmeret plast. Den gamle bro var ellers i en stand, hvor alder og indført vægtbegrænsning for køretøjer på broen, gjorde det oplagt at rive den ned.



Figur 2.3-3: Restaurering af broen "Route 367 over Bentley Creek" i Wellsburg, New York.

Det nye og lettere dæk i glasfiberarmeret plastkomposit viste sig dog at kunne reducere egenlasten så betydeligt, at broens bæreevne ikke blot nåede samme bæreevne for nyttelast som da broen var nyligt opført, men endnu højere. Dermed har vægtrestriktionerne på broen efterfølgende helt kunne fjernes, til stor gavn for lokalsamfundets borgere. Foruden en fjernelse af vægtrestriktionen sørger de ny-restaurerede dæk også for, at konstruktionen er vandtæt, og dermed beskyttes de underliggende stålbjælker mod nedsivende regn og salt.

Den valgte løsning resulterede desuden i en meget effektiv og kort byggeperiode, som samlet set løb op i kun 30 kalenderdage. Som en konsekvens heraf samt af at man kunne nøjes med at udskifte dækkene frem for at rive hele broen ned og bygge en ny, opnåede bygherren altså en væsentlig både økonomisk og tidsmæssig besparelse ved at vælge en løsning med fiberarmeret plastdæk.

Anvendelsen af byggekomponenter i glasfiberarmeret plast til broer i USA spænder bredt og har foruden ovenstående broprojekt i Wellsburg været anvendt i forbindelse med både ny-opførte broer samt andre projekter som dette, hvor nedrivninger har kunne undgås ved at renovere med letvægtsdæk i fiberarmeret plast.

Selvom USA har stort fokus på udbredelsen af fiberarmeret plast til konstruktioner i infrastrukturen og har mere end 150 registrerede vejbroprojekter under FHWA med fiberarmeret plast som byggekomponent, så er udbredelsen på landsplan stadig meget lille. 150 broer er således en forsvindende lille andel af USA's samlede bropakke, som stadigvæk hovedsageligt består af broer og broprojekter i stål og beton.

For at forbedre mulighederne for videre udbredelse af fiberarmeret plast i infrastrukturen har interesseorganisationen for transportformerne fly, skibsfart, biler, offentlig transport og jernbane, AASHTO, sammen med det amerikanske standardiserings- og testcenter ASTM og det Amerikanske Beton Institut etableret en

række tekniske udvalg til udvikling af design specifikationer, standarder, retningslinjer og testmetoder i forbindelse med anvendelsen af fiberarmeret plast i infrastrukturen.

2.3.2.2 West Mill Bridge

Et eksempel fra Europa på en bro i fiberarmeret plast er broen West Mill Bridge i Oxfordshire, UK, som er Vesteuropas første vejbro i fiberarmeret plastkomposit. Broen blev indviet i 2002. Brodæk samt sideafskærmninger er af glasfiberarmeret plast, mens de bærende bjælker er forstærket med kulfibre for at sikre den nødvendige bæreevne af broen. Denne dyre løsning har været muliggjort af, at broen er det første resultat af ASSET-projektet, og således er en del af et demonstrationsprojekt til udbredelse og oplysning om brugen af plastbaseret komposit til vejbroer. Ved lignende projekter af kommerciel karakter, vil de bærende bjælker typisk konstrueres i stål, idet denne løsning er væsentlig billigere.



Figur 2.3-4 Det første produkt af ASSET-projektet: West Mill Bridge, Oxfordshire.

Broen inkl. belægning, kantbjælker i beton og rækværker har en samlet vægt af 37 t, hvoraf dæk og bjælker kun udgør 12 t. Spændvidden af dækket er 10 m og bredden er 6,8 m. Der er tale om en forholdsvis lille, men stærk vejbro, der har en kapacitet for kørende trafik på op til 46 t med maksimalt akseltryk på 13,5 t.

Kantbjælkerne er støbt i beton, og dermed opnåede man langt fra de fulde fordele af et dæk i plastkomposit, idet størstedelen af den totale egenvægt kommer fra kantbjælkerne i beton ligesom kantbjælkerne vil skulle vedligeholdes i samme omfang som hvis der var tale om en traditionel betonbro. Producenten af dækprofilerne har derfor blandt andet i forlængelse af dette projekt udviklet en løsning, hvor autoværnene kan monteres direkte på dækprofilerne i fiberarmeret plast.

Brodækket vurderes at have en lang levetid med en lav grad af vedligeholdelse. Den korte byggetid samt dertilhørende reduktion af trafikbelastningen i byggeperioden er desuden en væsentlig fordel ved den valgte konstruktionstype og dermed lever broen i høj grad op til målene med ASSET-projektet.

2.3.2.3 Moderne hybridbro over M6 motorvejen ved Lancashire

I forlængelse af ASSET-projektet fik det engelske vejdirektorat, Highway Agency, i 2006 installeret en moderne hybridbro med dæk i glasfiberarmeret plast og bjælker i stål over M6 motorvejen i Lancashire. Netop i England har man stor erfaring med hybride konstruktioner, som er en konstruktionsform, der er sammensat af to forskellige materialer. Typisk ses disse konstruktioner udført med bjælker i stål og et dæk af beton, hvilket er en konstruktionsform, som er meget anvendt i netop England, men i dette tilfælde er betondæk-

ket skiftet ud med et dæk i plastkomposit. Dette konstruktionsprincip byder først og fremmest på en række udførelsesmæssige fordele sammenlignet med insitu-støbte betonbroer.

Det engelske vejdirektorat opnåede ifølge dem selv, foruden en forventning om reducerede vedligeholdelsesomkostninger og en lang levetid, en forkortet anlægsperiode samt en reduktion af den dertilhørende trafikale belastning. Overbygningen i stål og glasfiberarmeret plast blev således løftet på plads i løbet af en enkelt nat. Det primære arbejde i anlægsperioden bestod derfor i etableringen af fundamenter og vederlag.



Figur 2.3-5 Moderne hybrid-konstruktion over M6 motorvejen ved Lancashire.

Den samlede anlægssum for brodækket i glasfiberarmeret plast oversteg den for en lignende løsning med dæk i beton. En nærmere beregning foretaget af det engelske vejdirektorat viste dog, at de øgede etableringsomkostninger dels kunne reduceres via besparelser på kran- og transportudgifter i anlægsperioden og herefter opvejes og muligvis indhentes via reducerede omkostninger til vedligehold i konstruktionens levetid.

Som nævnt ovenfor er der stor erfaring med hybridbroer i England, hvor man ofte anvender en løsning med dæk i færdigstøbte betonelementer samt bjælker i stål. Denne byggeteknik opstod som følge af et midlertidigt forbud i Storbritannien ¹⁶ mod brugen af efterspændt armering til betonbroer. Da forbuddet blev ophævet, var blevet etableret en byggetradition, som fortsat bliver brugt, fordi det viste sig at denne konstruktionsform har nogle anlægsmæssige fordele, i sammenligning med insitu-støbte betonbroer. Fordele ved hybridbroer er følgende:

- Reduceret anlægsperiode.
- Besparelser på form, stillads og arbejds løn i forbindelse med etableringen af overbygningen
- Reduktion af de trafikale gener i anlægsperioden

Ved hybridbroer med dæk i plastkomposit kan der desuden opnås yderligere besparelser på omkostningerne i anlægsperioden i form af færre udgifter til kran og transport. Derudover vil der være en forventning om reducerede vedligeholdelsesomkostninger i konstruktionens levetid. Den samlede anlægssum for løs-

¹⁶ <http://www.danskbeton.dk/files/DanskBeton/Dansk%20Beton/7%20Bladet%20Beton/2-2010.pdf>

ningen med et dæk i plastkomposit vil dog ofte overstige den for et dæk i beton pga. af den forhøjede materialepris, og det er dermed forventningen om fremtidige besparelser, der vil være det afgørende argument i forhold til at vælge et dæk i plastkomposit fremfor beton.

2.3.3 Glasfiberarmeret plast - sammenfatning

Som det fremgår af de eksempler, der er opstillet med fiberarmeret plast til broer, er der tale om en teknologi som på nuværende tidspunkt primært har været anvendt på mindre eller mellemstore broer¹⁷. De første broer, der blev opført i glasfiberarmeret plast, var finansierede demonstrationsprojekter, som havde til hensigt at belyse materialets anvendelighed i infrastrukturen. De indledende forudsigelser var meget positive, og det forventedes at efterspørgslen på fiberarmeret plast ville stige voldsomt. I takt med at demonstrationsprojektfasen er overstået og materialet på lige konkurrencevilkår med traditionelle byggematerialer som stål og beton har skulle vinde indpas, har det dog vist sig, at materialet ikke har opnået den fremgang, der var spået.

Som beskrevet i eksemplerne ovenfor kan der ellers være mange fordele forbundet med materialet, hvor den øgede holdbarhed, korrosionsbestandighed, lave egenvægt og hurtige montering er blandt de mest åbenlyse fordele.

Kombinationen af ovenstående parametre betyder, at den samlede totaløkonomi for broer i fiberarmeret plast ofte er god. Når materialet alligevel endnu ikke har nået et gennembrud på markedet, er det dog fordi der stadig er en række ulemper og udfordringer forbundet med materialets implementering i infrastrukturen.

En af de primære tekniske udfordringer, som glasfiberarmeret plast som konstruktionsmateriale står over for, er at forbedre den ringe modstandsevne, som materialet har over for brand. Det er muligt at tilegne plastmatricen således at konstruktionsprofilerne ikke selv kan antændes, men under påvirkning fra en ekstern brand, vil konstruktionsprofilerne svækkes markant. Denne risiko er ved broer primært begrænset til tilfælde, hvor køretøjer bryder i brand netop under brostedet, men selvom risikoen herfor er lav, repræsenterer broer en kategori af konstruktioner, hvor brandmodstandsevnen ikke kan negligeres.

Den overvejende årsag til materialets manglende gennembrud som konstruktionsmateriale er dog af økonomisk karakter, idet initialomkostningerne er højere for broer i fiberarmeret plast end for traditionelle broer i beton eller stål. Da teknologien samtidig er forholdsvis ny, kan det på nuværende tidspunkt være svært at overbevise bygherrer og broejere om udelukkende at kigge på totaløkonomien, når der endnu ikke foreligger nogle langtidsdokumenterede eksempler på holdbarheden og vedligeholdelsesomfanget af broer i fiberarmeret plast.

¹⁷ Potentialet for større broer er formentlig stort: I fald de fordele vi ser på de mindre konstruktioner kan overføres til større konstruktioner vil gevinsten hypotetisk være enormt stor.

Materialets udbredelse afhænger derfor med den nuværende udbudspraksis i høj grad af mere konkurrencedygtige priser. På lang sigt vil en bredere erfaring med materialets anvendelse i infrastrukturen samt en ændring af den nuværende udbudspraksis dog formentlig kunne bidrage til en bredere anvendelse af plaskompositter som konstruktionsmateriale i infrastrukturen. Et større fokus på ydelsesorienterede egenskaber i udbudsfasen vil automatisk være til gunst for bæredygtige materialer som i et livscyklusperspektiv har lave omkostninger, og et sådant fokus vil også i sidste ende være til gavn for samfundet.

Manglen på erfaring med broer i plastkomposit kan medføre en generel usikkerhed omkring materialet. Mere uddannelse og oplysning om fiberarmeret plast som konstruktionsmateriale er derfor et vigtigt parameter for at forbedre materialets muligheder for at blive implemteret i infrastrukturen og ikke mindst for at fjerne den skepsis der kan omgive materialet.

Denne mangel på erfaring med materialet betyder desuden at der kan være tale om ekstra omkostninger eller komplikationer i designfasen, idet ingeniører kun har få, eller ingen designmæssige referencer og erfaringer at forholde sig til, modsat traditionelle byggematerialer som stål og beton. Der er dog udarbejdet en standard, EN13706, for pultruderede konstruktionsprofiler i fiberarmeret plast, som skal være med til at lette implementeringen af plastkompositter som konstruktionsmateriale.

2.4 Kulfibre

Kulfibre anses traditionelt for at være ekstremt bekosteligt, men i takt med teknologiens udvikling er prisen faldet de seneste årtier. Denne tendens kombineret med stigende stålpriser betyder, at vi kan se kulfibre begynder at spille en rolle i konstruktionssammenhæng.

I praksis ses eksempler på at kulfiber anvendes i samspil med beton i tre typer applikationer:

- Støbeform
- Forstærkning
- Armering.

Kulfiberstøbeforme kan sammenlignes med andre tekstilstøbeforme, fordi et tryk udspiler den præfabrikerede støbeform, hvorved den opnår sin endelige form. Kulfibres høje styrke og forlængelsesstivhed gør, at kulfiberstøbeforme er formstabile og kan optage et stort støbetryk og dermed også lader sig udstøbe hurtigt med selvkompakterende betoner¹⁸.

Kulfiberforstærkning kan sammenlignes med andre forstærkningssystemer, men har vundet indpas fordi stor styrke kan opnås uden at forøge konstruktionstykkelsen nævneværdigt.

Sammenlignes kulfiberarmering med traditionel stålarmring er den store udfordring at opnå mekanisk forbindelse imellem de glatte kulfibre, men denne udfordring kan løses på forskellig vis, hvorved kulfibre-

¹⁸ Også kendt som SCC-beton, vibrationsfri beton, lavabeton mv.

nes trækstyrke kan udnyttes og man opnår fordele i form af tyndere dæklag end ved stålarmering, fordi kulfibre ikke korroderer.

2.4.1 Støbeform. "Bridge in a backpack"-konceptet

Kulfibre som byggemateriale i anlægssektoren har længe været omgivet af skepsis, idet materialet er meget dyrt. Måles omkostningerne på den mængde af kulfibre der anvendes i forhold til den styrke der opnås, er scenariet dog anderledes. Et amerikansk forskningsprojekt fra University of Maine har således vist, at man ved at kombinere beton og kulfibre, kan få en konstruktion som både er stærk, holdbar og økonomisk fornuftig.

Der er tale om konceptet "bro-i-en-rygsæk", som består af kulfiberrør, beton, skal af korrugeret plastkomposit samt tilfyldningsmaterialer i form af jord, og grus. Kulfiberrørene ankommer til byggepladsen som en let pakke med en sammenrullet kulfiberslange. Slangestykkerne placeres på en form, som har den rette kurvede profil og blæses herefter op med trykluft. Herefter sprøjtes en blanding af kulfibre og vinylester ind i slangens skal, som efterfølgende hærder i løbet af en enkelt nat. Herefter kan kulfiberrøret, som har en så lav egenvægt, at det kan placeres ved håndkraft, placeres på fundamenterne for den fremtidige bro.



Figur 2.4-1 Kulfiberslanger placeres på fundamenter.

Når rørene er på plads lægges en skal af korrugeret plastkomposit oven på rørene som herefter fyldes op med beton gennem et hul i buernes toppunkt. Hermed øges buernes bæreevne ifølge forskerne med det dobbelte i forhold til tilsvarende buer i stål. Ovenpå fyldes efterfølgende til med jord, grus og asfalt. Siderne dækkes ind med præstøbte betonelementer og spuns i fiberarmeret plast. Da betonen er kapslet ind og der ikke er tale om en stålarmet konstruktion, kan fugtisoleringen undværes og konstruktionen er således heller ikke sårbar over for nedsivende salt fra vinterens glatførebekæmpelse.



Figur 2.4-2 Skal af korrugeret plast lægges oven på rørene.

Foruden den holdbarhedsmæssige fordel der er ved denne konstruktionsform, ligger der også en betydelig fordel i den korte byggeperiode, der er tilknyttet denne metode. Samtidig viser erfaringerne for de første broer opført i 2009 efter denne metode, at de samlede byggeomkostninger ligger på samme niveau som for broer i tilsvarende størrelsesorden bygget efter traditionelle byggemetoder. Forskerne forventer dog, at omkostningerne på sigt vil ligge 20% under omkostningsniveauet for lignende broer bygget på traditionel vis. Dertil kommer, at levetiden for denne type broer forventes at være to til tre gange så stor, som for broer i stål og beton.



Figur 2.4-3 Færdig bro efter "bro-i-en-rygsæk"-konceptet.

Afløst af et kollaps på en større motorvejsstålbro over Mississippi i Mineapolis i 2007, har udviklerne af konceptet valgt at fylde de nye type broer med sensorer, som automatisk registrerer og overvåger den styrkemæssige tilstand broen befinder sig i. Dermed har man mulighed for at gribe ind i tide, hvis der skulle opstå uforudsete spændinger i konstruktionen.

Konceptet er foreløbig udført på i alt 7 broer i staten Maine. På trods af de holdbarhedsmæssige og økonomiske fordele, der er forbundet med konceptet, har det endnu ikke vundet indpas i øvrige stater i USA eller i resten af verden, hvilket kan skyldes flere faktorer. Dels er konceptet meget nyt, og kendskabet til det blandt ingeniører og arkitekter rundt om i verden er derfor begrænset. Derudover er det vanskeligt for design-ingeniører rundt omkring i verden at dimensionere nye broer efter konceptet, idet der ikke foreligger standarder, normer og specifikationer for denne type konstruktioner.

Da konceptet er nyt mangler der desuden erfaringsmæssig dokumentation for holdbarheden som derfor fortsat kan være omgivet af skepsis blandt broingeniører, arkitekter og bygherrer. Endelig er konceptet

meget fastlåst i forhold til det æstetiske udtryk, fordi brotypen har meget tilfælles med en traditionel muret trykbuebro (se fig. 1.2-1) både hvad angår visuelt udtryk og virkemåde, som kræver skrånende vederlag på brostedets sider. Arkitekter har derfor ingen eller meget begrænsede muligheder i forhold til at præge det visuelle udtryk, og det er derfor langt fra alle typer af projekter konceptet egner sig til.

2.4.2 Kulfiberforstærkning af eksisterende konstruktioner

Flere og flere udslidte stål- og betonbroer står over for renovering eller sågar nedrivning pga. defekter som har resulteret i bæreevnereduktioner i konstruktionerne. Ligeledes kan der være tale om øgede krav til konstruktionernes styrke pga. forøgelse i de daglige belastninger. I disse tilfælde kan det være fordelagtigt at anvende kulfiberforstærkning af de eksisterende konstruktioner. Kulfiberforstærkning kan anvendes på søjler, bjælker, dæk og vægge og kan ses i form af væv, net, laminater eller stave. Kulfibersystemerne limes på en eksisterende konstruktionsdel med enten en epoxy- eller mineralbaseret mørtel, afhængig af konstruktionens form, materiale og funktion. Metoden kan anvendes på både træ-, stål- og betonkonstruktioner.

Kulfibers anvendelighed til forstærkning af eksisterende konstruktioner er stor fordi materialet har en enormt stor styrke samt en lav densitet. Forstærkning med fladstål er en gammelkendt metode, som blev anvendt tilbage i slutningen af 1960'erne, men metoden er ikke meget anvendt i dag, da fordelene ved kulfiberforstærkning er mange i forhold til stål. Foruden den større styrke og lavere densitet kan kulfiberprofilerne let tildannes på stedet, hvilket er en væsentlig udførelsesmæssig fordel.

I forhold til metodens anvendelighed på broer er der en række forholdsregler der er nødvendige at træffe, før metoden iværksættes. På grund af broernes eksponering i udendørs miljø er det vigtigt at undersøge konstruktionernes fugtvandringsforhold inden på-limning af kulfiberforstærkningerne idet disse ofte er helt vanddampsdiffusionstætte. Der har således været tilfælde hvor forstærkningerne er sprunget af pga. fugtophobning og frost på indersiden af forstærkningen.

De limtyper der anvendes i dag er desuden ikke brandsikre, og derfor skal forstærkningerne såfremt de er placeret hvor der er risiko for brand, brandisoleres.

2.4.3 Kulfiber - armering

Betonkonstruktioners levetid og nedbrydning er i høj grad betinget af den indstøbte armerings korrosionstilstand. Korroderet armering er således et væsentligt problem for betonkonstruktioners holdbarhed. For at komme det problem til livs har Vejdirektoratet foretaget et forsøg med indstøbning af kulfiberarmering frem for traditionel stålarmring i en 80 meter lang skråtagsbro ved Herning. Projektet er et demonstrationsprojekt, hvor halvdelen af armeringen i broen samt kabelstagene er af kulfibre og hvor den anden halvdel af armeringen er rustfrit stål.



Figur 2.4-4 Skråtagsbro ved Herning med armering og kabelstag i kulfiber.

Tv: Overbliksbillede af broen. Th: Kabelstag fastgjort i vederlag.

I forbindelse med projektet har man blandt andet foretaget en række økonomiske beregninger på materialets anvendelse som armering, idet netop økonomien anses som den væsentligste faktor for kulfiberarmers udbredelse i betonkonstruktioner. Kulfiber i sig selv var i anlægsperioden 80-100 gange dyrere pr. kg end stål, men tog man den øgede styrke i forhold til densitet i regning, endte kulfiberarmeringen med kun at være ca. 6 gange dyrere end armering i stål. Denne ekstra omkostning kunne så yderligere reduceres ved en besparelse på etablering og vedligehold af fugtmembran.

I tillæg hertil kom en forventning om, at prisen på kulfibre i fremtiden ville falde med op til 25 % og dermed i fremtiden gøre kulfiberarmede broer konkurrencedygtige med stålarmede broer. Foreløbig er det dog ikke sket, og prisen på kulfibre er fortsat for høj i forhold til at gøre kulfiberarmede broer konkurrencedygtige. Dermed er incitamentet endnu ikke til stede i forhold til indførelsen af kulfiberarmede broer i infrastrukturen. Der er dog derimod en forventning om, at erfaringerne omkring kabelstægene i kulfiber i høj grad vil kunne udnyttes i forbindelse med nye store broprojekter i fremtiden.

Generelt bevæger man sig i forbindelse med kulfiberarmering uden for almindelige normer og standarder og ingeniører har ingen eller kun få erfaringer at forholde sig til i designfasen. I mindre skala og i udviklings-sammenhæng ses kulfiberarmering i form af måtter. En teknologi, som ligner en videreudvikling af forstærkningsteknologien bekræftet i afsnit 2.4.2. Kulfiberen som bøjelig tekstilarmering giver formfrihed, og kan anvendes i traditionelle plane paneler, men er især fordelagtig i forbindelse med krumme betonpaneler og konstruktioner, fordi armeringen let følger formen, og når betonen er støbt kan kulfibermåtten modstå ekstreme trækkræfter i to retninger. Dermed kan trækkræfter i resulterende retninger også optages, dvs. hele kulfibermåttens krummede flade bliver trækstabil, og da betonen optager trykkræfter i alle retninger, og dæklaget ikke skal beskytte mod korrosion kan opnås en tynd, formstabil og stærk skalkonstruktion.



Figur 2.4-5 Eksperimental tekstilarmering fra EU-projektet Tailorcrete. Tv.: Udvalg af tekstilarmering, måtter i glas-, plast- og kulfibre. Th.: Krum, slank betonskal armeret med kulfiber-tekstil.

2.4.4 Kulfiber – sammenfatning

Kulfibres anvendelse til konstruktionsformål i infrastrukturen favner bredt. Materialets høje trækstyrke, korrosionsbestandighed samt lette bearbejdelighed gør det isoleret set til et ideelt konstruktionsmateriale i infrastrukturen, hvor der netop er høje krav til såvel styrke som holdbarhed. Samtidig er materialet dog også ganske dyrt, og derfor er der de senere år udført en række eksperimenter og studier med det formål at udvikle nye koncepter, hvori kulfibers anvendelse også giver økonomisk fornuft.

Det har blandt andet resulteret i udviklingen af ovenstående koncepter, som i større eller mindre grad har vist sig succesfulde. I forbindelse med forstærkning af eksisterende konstruktioner har kulfibre allerede nået et gennembrud, og metoden er i dag anerkendt og velanvendt.

Der har dog også været gennemført mindre succesfulde eksperimenter, og man har blandt andet konstateret, at kulfiberarmerede betonbroer endnu ikke er konkurrencedygtige med traditionelle stålarmerede broer.

I USA har et forskningshold fra University of Maine udviklet et helt nyt koncept, hvor man ved at fylde en række kulfiberslanger med beton får en konstruktion som både er utrolig stærk, holdbar, hurtig at opføre samt økonomisk fornuftig¹⁹. Ulempen ved denne konstruktionstype er først og fremmest at designmulighederne er yderst begrænsede og at konceptet derfor ikke egner sig til alle typer af projekter.

Konceptet viser dog, at potentialet for kulfibres anvendelse til konstruktioner i infrastrukturen er til stede. Det drejer sig i høj grad om at udvikle nye koncepter, hvor kulfibres materialeegenskaber udnyttes fuldt ud. De eksisterende byggemetoder og designs er i høj grad udviklet og optimeret efter de traditionelle byggematerialers egenskaber. I lige så høj grad bør der ved implementeringen af et nyt materiale som kulfibre søges at udvikle et koncept, hvor alle materialets styrker kommer til sin ret. Forskningsholdet i Maine har lavet et mindre gennembrud ved at bevise, at kulfibre som konstruktionsmateriale rent økonomisk kan konkurrere med de traditionelle byggematerialer, og resultaterne derfra kan være medvirkende til at fremme udviklingen af nye og forbedrede koncepter.

¹⁹ Holdbarheden ser lovende ud, men er endnu ikke dokumenteret.

Udviklingen af konstruktioner i kulfibre er på nuværende tidspunkt noget efter udviklingen af konstruktioner i glasfibre, hvilket i høj grad skyldes prisforskelle. Hvor glasfibre i højere grad kan konkurrere med priserne på de traditionelle byggematerialer er man i forbindelse med kulfibre nødt til at tænke mere alternativt, for at gøre materialet konkurrencedygtigt over for de eksisterende materialer. Omvendt er udviklingsmulighederne for kulfibre enormt store, idet forholdet mellem styrke og vægt er endnu større for kulfiberarmerede plastkompositter end de er for eksempelvis glasfiberarmerede plastkompositter.

3 Resumé og udviklingspotentialer

Nærværende rapportens eksempler repræsenterer en relativt kort periode i infrastrukturens historie, men denne korte periode repræsenterer tilsyneladende et skæringspunkt: Historiske konstruktioner er let aflæselige, eftersom de traditionelle materialer knytter sig til kræfternes forløb, således at sten tager tryk, tov tager træk og træ og gitterkonstruktioner tager bøjning/moment, metal tager forskydninger og koncentrede laster i knudepunkter. Den traditionelle sammenhæng mellem materialet, dets egenskaber og udtryk udbygges og udvides i takt med at nye materialer og fabrikationsprocesser udvikles og finder vej til anlægssektoren.

I stor skala er det stadig beton og stål der er altdominerende, men i mindre skala begynder nye kompositte materialer og nye hybride teknologier at vinde indpas. Disse kan erstatte eksisterende materialer – fx kan glasfibre og kulfibre erstatte stålarmering – men vi ser også hvordan nye materialer giver mulighed for nye applikationer og løsninger – fx de slanke kulfiberarmerede betonskaller, som ikke er mulige med stålarmering.

De fem kendte typer kraftpåvirkninger - trækkkræfter, trykkkræfter, bøjningsmomenter, vridningsmomenter og forskydningskræfter – forholder sig til lastkriterier, der typisk er statiske. I dag er det muligt at håndtere og beregne dynamiske laster og det vil forenklet sige, at statikken bliver dynamisk. Det er muligt at analysere og beregne ekstremt store konstruktive sammenhænge samt analysere og simulere materialets performance på atomgitterniveau. Denne spændvidde kobler konstruktive kræfter og materialespændinger, og de nye beregnings- og simulerings-metoder hjælper til at håndtere de udfordringer med fx udbøjning, vibrationer og dæmpning, der kommer som følge af øget trafikbelastning samt med anvendelsen af lettere materialer. Risikozoner kan kortlægges, konstruktioner kan optimeres og materialeforbrug reduceres. Dermed opnås slankere konstruktioner, men de nye teknologier medfører også nye innovative designs.

Et vigtigt, nyt og innovativt designtræk vi ser i netop disse år er, at broforløb bevæger sig i en kurve i det vandrette plan. Tidligere broer er typisk en lige linje over brostedet, men i dag kan broer slå sving. Denne dynamik er udtryk for trafikens forløb og ses ofte i byområder, hvor broens vejforløb må tilpasse sig byrumsarkitekturen. Eksemplerne er mange, men i nærværende rapport refereres til Ågade Stibro, Nescio Bridge, Gateshead Bridge og Raccoon Creek Bridge. Det fjerde og sidste eksempel står på piller, pga. den store last fra motorvejen samt pladsen under broen giver god mulighed for dette. De tre første eksempler har derimod væsentlig trafik på tværs af brostedet, og kræver derfor relativt længere frit spænd, så momentstivhed er ikke nok til at bære nyttelasten. For både Ågade Stibro, Nescio Bridge og Gateshead Bridge gælder, at brodækket en let og stiv konstruktion, der kunne håndteres med kran, og på kort tid placeres og fastholdes med stag. Fælles for eksemplerne er også, at stagene trækker skråt i en vinkel væk fra brodækkets forløb, og at brodækket udgør en trykbue, som danner modvægt ved at overføre vandrette laster til fundamenterne i brodækkets ender. Visuelt fremstår disse nye brodesigns slanke, fordi brodækket visuelt svæver over brostedet, uden pyloner der tårner sig op lige over det. Når man færdes på brodækket åbner der sig et hidtil uset himmelsyn.

Konstruktivt fungerer broen elegant ved at de skrå og vandrette kræfter, resulterer i lodrette kræfter som bærer brodækkets last. Ågade stibro og Gateshead Bridge er en særlig kategori, hvor de to trykbuer mødes og ender i to fundamenter, som hele broen hviler på. Broens tyngdepunkt ligger et sted i midten af broen og hele broen balancerer på linjen mellem de to fundamenter. Denne balance eksponeres på spektakulær vis i Gateshead Bridge, ved at hele broen kan vippe med rotationsakse i linjen mellem de to fundamenter.

Vippebevægelsen betyder, at der lukkes for gående trafik og åbnes for sejlene trafik. Funktionen giver associationer til ældre mekaniske trafikreguleringer eller jernbanens sporskifter, og broens skulpturelle karakter ændres og giver to radikalt forskellige konfigurationer af bybilledet. Bevægelsen er graciøs, og må kunne betegnes som *infrastrukturens Fosbury Flop*²⁰. Dels fordi broen praksis gør som Fosbury; lader forhindringen, den sejlene trafik, passere gennem sit tyngdepunkt, og dels fordi broen på innovativ vis refererer til både bygnings- og broarkitekturen.



Figur 3-1
Referencer i
bygnings- og
broarkitekturen.

Tv. Sydney Opera
House, Th. Salgi-
natobel

Arkitekturreferencerne er fx Sydney Opera House²¹, hvis skaller også hviler på to fundamenter, og består af betonelementer der i en 'kaleche-bevægelse' tegner rummet. I nyere tid har vi set dynamiske facader der kan åbne og lukke sig og udnytte materialer og teknologi på nye måder for at tilpasse sig vejrets påvirknin-

²⁰ Dick Fosbury opfandt den radikale teknik i højdespring over stang, hvor der springes baglæns og kroppens tyngdepunkt faktisk ikke løftes over stangen, men under i en glidende bevægelse. Han vandt OL i 1968. Fosbury Flop bruges bredt som metafor for radikale løsninger og innovative løsninger, som hæver overliggeren markant.

²¹ Bygget i perioden 1959-1973 på Bennelong Point øst for Sydney Harbour Bridge. Arkitekt Jørn Utzon, Ingeniør Ove Arup & Partners

ger og menneskers behov. Broreferencerne er fx Salginatobel²², der med sit tre-hængsel koncept var radikal for sin tid, og flyttede grænserne for udnyttelse af armeret beton som konstruktionsmateriale.

Gateshead Millium Bridge fremstår ligeledes som et hængsel i byen – og på flere niveauer. Broen binder de to bredder af River Tyne, men udgør også et hængsel mellem forskellige behov og funktioner i byen. Fremtidens broarkitektur vil kunne trække på flere byggetraditioner, nye teknologier og nye materialer. Demografi, demokratisering og fortætning i byerne vil betyde at kravene til brodesigns vil øges, både hvad angår ressourceforbrug og slankhed, men også hvad angår broens bidrag til det multifunktionelle byrum. De tættere byer vil betyde at lys, luft og åbne rum bliver en attraktion i sig selv, og broer skal derfor genopfindes og dyrkes som vigtige sociale rum i byen. Helt konkret vil Gatesheads krumme form kunne fungere fortrinsligt som tilskuertribune for vandsport: Det kunne være roning, som har en lang tradition i England, eller en ny rebelsk sport som fx kajakpolo.

Designtræk i stor skala, og deres relation i landskabet og byrummet samt designtræk i mindre skala helt ned til detaljeringen bevæger sig imod at gøre infrastrukturens konstruktioner endnu slankere. Det bidrager til reduktion af materialeforbrug og reduktion af påvirkninger fra nedbør og vind, samt til at forbedre visuelle udtryk. Disse designtræk relaterer i praksis til det konkrete konstruktionsmateriale, men principielt kan trækkene overføres på tværs af materialer. For overskuelighedens skyld opstilles i det følgende et kort resume af de forskellige konstruktionsmaterialers økonomiske, miljømæssige og arkitektoniske potentialer. Det vurderes ligeledes, hvilke udviklingsmuligheder der generelt kan være i forhold til de beskrevne materials implementering i infrastrukturen.

3.1 Stål

Økonomi: Stål er et gammelkendt materiale i infrastrukturen, hvilket blandt andet skyldes at prisen på stål som råmateriale traditionelt er lav og anlægssummen for stålkonstruktioner derfor tilsvarende. Ståls anvendelighed favner desuden meget bredt. Til vejbroer kan stål vælges som del af en hybridkonstruktion, hvor dækket består af eksempelvis fiberarmeret plast eller beton med en underliggende bjælke/gitterkonstruktion i stål. Her kan det økonomiske potentiale være stort, idet der kan være tale om væsentlige anlægsmæssige fordele og økonomiske besparelser. I Danmark anvendes stål dog oftest til stibroer, hvor der er tale om rene stålkonstruktioner og her vil det ofte være de anlægsøkonomiske, arkitektoniske og udførelsesmæssige argumenter der vejer tungt.

Miljø: Der kan være miljømæssige fordele forbundet med stål som byggemateriale i eksempelvis hybride konstruktioner, hvor reduceret byggetid og evt. længere levetid (ved dæk i plastkomposit eller højstyrkebeton) kan resultere i en forbedring af den samlede miljøprofil. Potentialet er ikke direkte koblet til stål som byggemateriale, men i højere grad til den måde, hvorpå det anvendes i det specifikke projekt.

²² Bygget 1929-1930 over en alpekløft ved Schiers, Schweiz af Robert Maillart (1872-1940), Schweizisk født ingeniør, som bl.a. er kendt for det innovative tre-hængslede buebro koncept, sin sikre analyse og teoretiske metode, samt at han altid selv som den første krydsede sine broer.

Arkitektur: Stål er et kendt byggemateriale i infrastrukturen, og har allerede været anvendt i forbindelse med flere prisvindende konstruktioner i infrastrukturen. Stor styrke og formelighed giver arkitekterne og ingeniørerne rigtig gode designmuligheder.

Udviklingspotentialer: Materialets historie går langt tilbage og der er allerede udviklet mange metoder til at øge holdbarheden af stål, så som overfladebehandlinger, varmforzinkning, katodisk beskyttelse med mere. De umiddelbare udviklingsmuligheder direkte relateret til materialet er derfor begrænsede. Derimod kan ståls anvendelse i infrastrukturen generelt udvikles. Hybride konstruktioner har en række udførelsesmæssige fordele i forhold til insitu-støbte betonkonstruktioner. Særligt i Danmark anvendes hybride konstruktioner meget sjældent, og der ligger derfor et stort udviklingspotentiale her. Ved anlæg af hybride konstruktioner kan der således opnås væsentlige reduktioner i anlægsperioden, hvilket medfører en dertilhørende samfundsmæssig besparelse.

3.2 Højstyrkebeton

Økonomi: Der kan være et godt totaløkonomisk potentiale for anvendelsen af højstyrkebeton til broer. Materialet er dyrere end traditionel beton, og ofte er initialomkostningerne større ved brug af højstyrkebeton i forhold til almindelig beton. Meromkostningerne kan dog reduceres gennem et reduceret materialeforbrug og reducerede anlægsomkostninger, og den længere levetid samt lavere grad af vedligeholdelse kan betyde, at de samlede omkostninger over konstruktionernes levetid er lave. Der er dog endnu for få erfaringer med broer i højstyrkebeton til at vurdere det endelige omfang af den eventuelt forlængede levetid, reducerede vedligeholdelsesgrad og den dertilhørende økonomiske besparelse.

Miljø: Sammenlignet med traditionel beton kan der i større eller mindre grad være tale om et reduceret materialeforbrug samt længere levetid med færre reparationer og mindre vedligehold, hvilket er parametre som vil medføre en miljømæssig forbedring. Samtidig er cementindholdet i højstyrkebeton dog højere end i almindelig beton, hvilket vil medføre en miljømæssig forringelse.

Arkitektur: De arkitektoniske muligheder udvides med brugen af højstyrkebeton, som muliggør mere slanke former at blive forenet med de styrkeegenskaber konstruktioner i infrastrukturen nødvendigvis skal besidde.

Udviklingspotentialer: Forudsat at startomkostningerne kan reduceres eller konstruktioner kan udvikles således at højstyrkebetons mekaniske egenskaber i højere grad udnyttes, vil materialet have en større sandsynlighed for at slå igennem som konstruktionsmateriale i infrastrukturen. Generelt gælder, at broer i højstyrkebeton er dyrere end broer i traditionel beton, men at den øgede tæthed i betonen kan betyde øget holdbarhed, dvs. reduceret vedligehold og forlænget levetid, hvilket i sidste ende kan resultere i en forbedret totaløkonomi. En ændring af udbudspraksis, hvor ydelse og funktion belønnes i højere grad end tilfældet er nu, kan derfor bane vejen for højstyrkebetons gennembrud som konstruktionsmateriale i infrastrukturen.

Højstyrkebeton har den fordel, at der ikke umiddelbart brydes med byggetraditionerne, og dermed kan de erfaringer der er draget i forbindelse med almindelig beton udnyttes i forbindelse med højstyrkebeton. Ved

insitu-støbninger med højstyrkebeton kan der dog være et behov for at udvikle yderligere erfaringer og arbejdsbetingelser omkring de udførelsesmæssige forhold, med henblik på at reducere risikoen for udførelsesfejl og dermed dannelsen af initialdefekter.

Det vil derudover være relevant at rette fokus mod præfabrikerede broer i højstyrkebeton, eventuelt hvor højstyrkeelementerne indgår som en del af en hybrid konstruktion. Studier, analyser og forsøg kan afdække i hvilket omfang de anlægsmæssige fordele der er forbundet hermed kan resultere i reducerede startomkostninger, samt hvad et reduceret vedligeholdelsesomfang og en eventuelt forlænget levetid kan betyde for den samlede totaløkonomi.

3.3 Glasfiber

Økonomi: Initialomkostningerne er høje for konstruktioner i glasfiberarmeret plast. Samtidig er teknologien ny og erfaringerne små, men betragtes økonomien i et livscyklus perspektiv kan broer i glasfibre grundet deres lave grad af vedligeholdelse og lange levetid vise sig at være gode økonomiske alternativer til broer i beton eller stål.

Miljø: Der er en lav miljømæssig belastning i forbindelse med materialefremstilling og bortskaffelse, hvilket sammen med den lange levetid og lave grad af vedligeholdelse, sikrer materialet en god miljøprofil.

Arkitektur: De arkitektoniske muligheder med brugen af pultruderede profiler er begrænsede, idet produktionsmetoden ikke tillader ændringer i konstruktionsprofilernes tværsnit. Anvendes derimod formstøbte elementer er der store muligheder i forhold til at opnå komplekse former. Denne metode er dyrere end pultrudering, ligesom man kender fra andre sammenhænge, hvor metervaren er billigere end specialvaren. Specialvaren kan alligevel være relevant, f.eks. som samlingsløsning, fordi den kan være nøglen til at opnå et nyt formsprog i kombination med metervaren.

Glasfiberarmeret polyester er et relativt fleksibelt materiale, hvilket betyder at glasfiberprofilers tværsnit generelt er større end for f.eks. stål. Imidlertid giver pultruderingsprocessen mulighed for mere detaljerede profiler end man ser i stål. Profiler kan dels virke bedre rent konstruktivt og samlingsteknisk, og dels have et slankere visuelt udtryk i kraft af profilets detaljer og skyggedannelser. Geometrisk størrelse og visuel slankhed hænger selvfølgelig sammen, men sammenhængen er ikke entydig, eksempelvis kan kraftige profiler slankes visuelt ved en langsgående stribning.

Udviklingspotentialer: Hvis glasfiber som konstruktionsmateriale i infrastrukturen skal have en større chance for at slå igennem på markedet kræver det en ændring af udbudspraksis i en mere ydelsesorienteret retning, hvor der i højere grad fokuseres på totaløkonomien samt ydelse og funktion. I sidste ende vil en sådan ændring af praksis ikke kun bane vejen for glasfiber, men også for andre relevante materialer og konstruktionsprincipper i infrastrukturen.

Producenterne af glasfiberarmede konstruktionsprofiler er kommet langt med den tekniske udvikling og tilpasning af profilerne til infrastrukturens statiske og miljømæssige belastninger. Der har i forbindelse med materialets implementering dog været en række tekniske udfordringer, som har skulle overvindes. En af de primære tekniske udfordringer som i dag er blevet løst, har været udviklingen af en løsning, hvor autovær-

nene kan monteres direkte på kompositprofilerne i stedet for på særskilte kantbjælker i stål og beton. Dog refterer stadig en udfordring i at sikre glasfiberarmerede konstruktionsprofiler en bedre brandmodstandsevne, hvilket i dag repræsenterer den måske primære tekniske udfordring for materialet i forhold til implementeringen som konstruktionsmateriale i infrastrukturen.

3.4 Kulfiber

Økonomi: Der findes flere forskellige forsøg med anvendelsen af kulfibre som konstruktionsmateriale i infrastrukturen. Generelt gælder det, at prisen på kulfibre endnu er for høj før materialet for alvor vinder indpas. Der har i Danmark blandt andet været gennemført et forsøg med kulfiberarmering i en betonbro, som dog ikke har vist sig at være økonomisk konkurrencedygtig med traditionel stålarmring. Eksisterende konstruktioner kan forstærkes med kulfibre og denne metode har vist sig anvendelig og økonomisk fornuftig i sammenligning med andre reparations- eller vedligeholdelsesalternativer. Der er desuden udviklet et nyt koncept med kulfibre som støbeform for beton, som har vist, at kulfiberkonstruktioner rent faktisk kan være økonomisk konkurrencedygtige med traditionelle konstruktioner.

Miljø: Der er ikke samme mulighed for genanvendelse af kulfiberkompositter som der er med glasfiberkompositter, dog bidrager materialets lange levetid positivt til den samlede miljøprofil.

Arkitektur: Det arkitektoniske potentiale varierer fra koncept til koncept. Generelt er de i denne rapport beskrevne koncepter meget begrænsede i forhold til de arkitektoniske designmuligheder.

Udviklingspotentialer: Konstruktionsprincippet, hvor kulfiberslanger anvendes som støbeform for beton, som indkapsles og beskyttes mod skadelige påvirkninger udefra, kan danne inspiration for fremtidige konstruktionstyper i infrastrukturen. Metoden er udførelsesvenlig og omkostningsniveauet for denne konstruktionsform ligger på samme niveau som for lignende broer i beton. Konceptet er dog enormt fastlåst i forhold til udformning og æstetisk udtryk, men hvis konceptet kan videreudvikles i en mere fleksibel og designvenlig retning har det langt større chance for at vinde indpas på markedet.

4 Konklusion

Overblikdiagrammet nedenfor viser helt overordnet de fordele og ulemper som denne rapport har beskrevet. Fordelene og ulemperne forholder sig dels vandret til konstruktionsmaterialerne, og dels lodret til rapportens tre hovedaspekter. Diagrammet er *ikke* en facitliste, men giver et overblik over de hovedtendenser der kan iagttages.

	Økonomi	Miljø	Arkitektur
Stål	Lav anlægssum Høje driftsomkostninger	Reduktion af trafikale belastning i anlægsperiode Materialeleganvendelse Ressourcekrævende råmaterialeindvinding Kræver vedligehold	Arkitektonisk frihed Etableret byggekultur
Højstyrkebeton	Lave driftsomkostninger Høj anlægssum	Reduktion af trafikale belastning i anlægsperiode (v. præfab.) Lang holdbarhed Højt CO ₂ aftryk pr. m ³ beton	Arkitektonisk frihed Etableret byggekultur
Glasfiberarmeret plast	Lave driftsomkostninger Høj anlægssum	Lang holdbarhed Materialeleganvendelse Reduktion af trafikale belastning i anlægsperiode	Nybrud i byggekultur Begrænset formfrihed ²³
Kulfibre	Lave driftsomkostninger Høj anlægssum ²⁴	Lang holdbarhed Reduktion af trafikale belastning i anlægsperiode	Nybrud i byggekultur Begrænset formfrihed

Figur 4-1 Overblikdiagram. Diagrammet er ikke en facitliste, men giver et overblik over de hovedtendenser der kan iagttages.

Som det fremgår af ovenstående overblikdiagram er fællesnævneren for de nyere materialer, at de har lave driftsomkostninger og høje anlægssummer. De høje anlægssummer kan være en stor hæmsko for materialernes udbredelse som konstruktionsmateriale i infrastrukturen, idet netop den lave anlægssum, ofte vægtes højt i vurderingen af projektforslag ved offentlige udbud. I mange tilfælde kan de lave driftsomkostninger ellers medføre en bedre totaløkonomi for projektet, hvilket i sidste ende vil være til gavn for

²³ Gælder primært for pultruderede profiler, formstøbte profiler kan produceres i unikke former, men denne metode er mere bekostelig end pultrudering.

²⁴ Afhængig af koncept. Sparsomt erfaringsgrundlag

både samfundet og de fremtidige trafikbudgetter, og derfor bør totaløkonomien i højere grad vægtes frem for anlægssummen.

Samtidig er det æstetiske udtryk et væsentligt parameter, idet broer er konstruktioner som skal stå i landskabet i lang tid, og dermed har bygherrerne også et ansvar i forhold til at opføre konstruktioner, som bedst muligt kan integreres i landskabet. Endelig kan en forkortet byggetid samt et reduceret vedligeholdelsesomfang i konstruktionens levetid medføre en samfundsmæssig besparelse, som ikke nødvendigvis kan måles i projektøkonomien, og her er det, særligt ved offentlige anlægsprojekter, bygherrens ansvar at inddrage dette aspekt i den samlede vurdering af et projektforslag.

Der er således flere hensyn der skal tænkes ind, når fokus skal rettes mod at forbedre bæredygtigheden af infrastrukturens konstruktioner. Foruden ovenstående bør også projekternes miljøprofil analyseres og sammen med de økonomiske, samfundsmæssige og æstetiske hensyn indgå i en helhedsbetragtning. Hvor totaløkonomien i sig selv rummer en økonomisk betragtning over hele konstruktionernes levetid bør de øvrige tre parametre lige så vel vurderes i et "vugge til grav" perspektiv. Eksempelvis bør det miljømæssige aspekt ikke kun vurderes ud fra den energi der anvendes til fabrikation og bortskaffelse af materialet, men også ud fra de ressourcer der eventuelt kan spares i byggeperioden samt i konstruktionernes levetid.

Implementeringen af ovenstående kan dels sikres ved i udbudsfasen at tillægge ydelsesorienterede egenskaber et større fokus end anlægssummen, men helt essentielt er det, at bæredygtighed tænkes ind allerede i den spæde projektstart.

5 Referencer

5.1 Primære referencer

The aesthetics of danish bridges

Kyo Takenouchi

1995, Kunstakademiets Arkitektskoles forlag, København

Grundtræk af bærende konstruktioner i arkitekturen

Hans Friis Mathiasen og Erik Reizel

1999, Kunstakademiets Arkitektskoles forlag, København

The Science and Art of the Worlds Most inspiring Structures

David Blockley

2010, Oxford University Press, New York

Failed Bridges – Case studies, Causes and Consequences

Joachim Scheer

2010, Ernst & Sohn / a WILEY company

BRIDGE Architecture+design

Chris van Uffelen

2010, Braun Publishing AG

Components and Connections – Principles of Construction

Maarten Meijs, Ulrich Knaack

2009, Birkenhäuser Verlag AG

Feasibility and Life Cycle considerations of Fiber Reinforced Polymer deck solutions for renovation of steel highway bridges

Lisbeth Tromp, Koen Schipper

2013, IABSE Rotterdam Conference Report, Vol. 99, pages 318-319

Asset Management Business model for design, realization and maintenance of fibre reinforced polymer bridges

Sebastian Rizal

2013, TNO Technical Sciences

A New Bridge Deck for the Kaag bridges, the first CRC Application in Civil Infrastructure

Nick Kaptijn, Jorrit Blom

2011, Science and Engineering of Composite materials, Vol. 10, issue 6, pages 397-402

5.2 Sekundære referencer

<http://www.pantura-project.eu/Main.aspx?uri=1,2,3>

<http://www.Fiberline.dk>

http://www.hfb.dk/fileadmin/templates/hfb/dokumenter/artikler/Komposit_et_byggemateriale_pa_vejfrem.pdf

<http://www.dac.dk/da/dac-life/copenhagen-x-galleri-1/opfoerte-projekter/aabuen/?cphxredirect=true>

Kjær, Martin, Kompositbroer, Få i Danmark – mange ude - præsentation, Carl Bro Gruppen.

<http://www.byggeteknik.dk/artikel?id=24999>

<http://www.bath.ac.uk/ace/uploads/StudentProjects/Bridgeconference2009/Papers/FOSTER.pdf>

<http://www.grontmij.com/MediaCenter/Pages/InternationalawardforNescioBridge.aspx>

<http://www.danskbeton.dk/files/DanskBeton/Dansk%20Beton/7%20Bladet%20Beton/2-2010.pdf>

<http://ing.dk/artikel/vejbroer-i-kulfiber-erstatte-tungt-stalarmeret-beton-103162>

http://www2.umaine.edu/aewc/images/stories/web_uploads/bridge_in_a_backpack_9.1.09.pdf

http://www.cement.org/bridges/br_case_washington.asp

<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/frp/>

http://www.modernsteel.com/Uploads/Issues/July_2000/0007_01_bentley.pdf

<http://www.reinforcedplastics.com/view/6137/frp-bridge-decking-14-years-and-counting/>

http://www.dtu.dk/Nyheder/2013/03/Dynamo_Ny-bro-saetter-nye-normer

http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/statens-veje/vejenes_historie/Documents/Motorvejen_Saeby_Frederikshavn.pdf

Poulsen, Ervin, Forstærkning med pålmede kulfiberbånd – status og seneste udvikling, 2004, vejtid.dk

<http://www.statensnet.dk/pligtarkiv/fremvis.pl?vaerkid=12587&repid=0&filid=2475&iarkiv=1>

<http://www.gateshead.gov.uk/Leisure%20and%20Culture/attractions/bridge/Design.aspx>

5.3 Figurreferencer

Figur nr.	Kilde
Figur 1.2-1	Forfatterens skitser, ©Teknologisk Institut
Figur 2-1	Forfatterens skitser, ©Teknologisk Institut
Figur2.1-1	http://www.cowi.dk/menu/nyhederogmedier/nyheder/nyhedsarkiv/pages/billedserieaagadebro.aspx?SlideNo=2
Figur 2.1-2	http://www.dtu.dk/Nyheder/2013/03/Dynamo_Ny-bro-saetter-nye-normer
Figur 2.1-3	http://bicycledutch.wordpress.com/2011/10/06/nescio-bridge-amsterdam/
Figur 2.1-4	http://www.highsteel.com/project_gallery/bridges/images/RaccoonCreekTubsBridge_rs_pg.jpg
Figur 2.1-5	Tv: Th: http://collabcubed.com/2013/10/15/gateshead-millennium-bridge-wilksoneyre/
Figur2.2-1	http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/statens-veje/vejenes_historie/Documents/Motorvejen_Saebby_Frederikshavn.pdf
Figur 2.2-2	google.maps
Figur 2.2-3	http://www.ferroplan.com/fileadmin/userdata/all_pages/data/DOWNLOAD_CONTEC/ENGLISH/FERRPLAN_publications/Projects/projects_contec_ferroplan_website_kaagbruggen.pdf
Figur 2.3-1	http://www.fiberline.dk/konstruktioner/anvendelser-og-case-stories/case-stories-gang-og-cykelbroer/fiberline-broen-ved-koldj/fiberline-broen-ved-kolding
Figur 2.3-2	http://www.fiberline.dk/konstruktioner/anvendelser-og-case-stories/case-stories-vejbroer/en-graeshoppe-med-glasfiber/en-graeshoppe-med-glasfiber
Figur 2.3-3	http://www.fhwa.dot.gov/bridge/frp/deck367.cfm
Figur 2.3-4	http://www.fiberline.dk/konstruktioner/anvendelser-og-case-stories/case-stories-vejbroer/west-mill-bridge-england/west-mill-bridge-england
Figur 2.3-5	http://www.fiberline.dk/structural-profiles/anvendelser-og-case-stories/vejbroer
Figur 2.4-1	http://www.maine.gov/mdot/tr/backpackphotos.htm
Figur2.4-2	http://www.maine.gov/mdot/tr/backpackphotos.htm
Figur2.4-3	http://www.maine.gov/mdot/tr/backpackphotos.htm
Figur 2.4-4	Th: http://www.statensnet.dk/pligtarkiv/fremvis.pl?vaerkid=12587&repid=0&filid=2475&iarkiv=1 Tv: http://www.geocaching.com/geocache/GC1ZCT2_carbon-bridge?guid=fa37ac98-9d44-4ab5-a587-e486f380141b
Figur 2.4-5	Tailorcrete, ©Teknologisk Institut
Figur 3-1	Tv: http://www.alien-ufos.com/general-forum/59747-sydney-opera-house-turns-40-a.html Th: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Salginatobel_Bridge_mg_4080.jpg

