

FRP i byggbranschen – ett avancerat demonstrationsprojekt

studio Material och Design

Göteborg i december 2002

UDK 62-037

Nyckelord: Fiberkompositer, FRP, Tillämpningar, egenskaper

Publikation XXX

ISSN XXX-YYY

Antal sidor: 46

Sektionen för Arkitektur och Sektionen för Väg-och vatten

Chalmers tekniska högskola

Göteborg i december 2002

Arbetsgrupp

Per Eriksson, projektledare, Studio material och design, Chalmers

Ulf Janson, professor, Form och teknik, A-sektionen, Chalmers

Rolf Jonsson, NCC, Egen verksamhet.

Karl-Gunnar Olsson, universitetslektor, Form och teknik, A-sektionen, Chalmers

Mario Plos, Tekn.dr. konstruktionsteknik, Chalmers

Graham Stacy, skulptör

Ralejs Tepfers, bitr. professor emeritus, Chalmers, Ralejs Tepfers Consulting

Rapportens första fyra kapitel är författade av Per Eriksson och Graham Stacy, kapitel 5 av Karl-Gunnar Olsson, kapitel 6 och 7 av Ralejs Tepfers och kapitel 8 av Mario Plos.

Referensgrupp

FoU-Väst

Finansiärer

Chalmers

SBUF (Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond)

Innehållsförteckning

	Sida
Definitioner	5
1 Inledning	5
2 Val av projekt: Tre spår	5
3 Fallstudie: Ett skyddstak över Ponnykarusellen på Liseberg	6
4 Triangulering: Ett utvecklingsbart stickspår	20
5 Materialegenskaper	23
5.1 Inledning	23
5.2 Densitet	23
5.3 Styvhet och styrka	25
5.4 Krypning och utmattning	28
5.5 Termiska egenskaper	30
5.6 Elektromagnetiska egenskaper	31
5.7 Övrigt	31
5.8 Referenser	32
6 Miljöpåverkan	32
6.1 Livscykelanalys	33
6.2 Återvinning av FRP	34
6.3 Arbetsmiljö	34
6.4 Lagar	34
6.5 Referenser	34
7 Processer och produkter, kostnadsjämförelser	35
7.1 Inledning	35
7.2 Profildragning	35
7.3 Flätning	36
7.4 Lindning	37
7.5 Pressformning	38
7.6 Handuppläggning	39
7.7 Vakuuminjicering	42
7.8 Kostnadsjämförelser	43
7.9 Referenser	44
8 Bearbetning och sammanfogning	45
8.1 Bearbetning	45
8.2 Sammanfogning	46
8.3 Referenser	47

Definitioner

FRP – ”Fiber Reinforced Polymer”, allmänt vedertagen benämning av fiberkomposit använd inom byggeri.

1 Inledning

Avsikten med detta arbete har varit att ta fram ett trovärdigt byggnadsförslag där FRP ingår som en viktig del. Som fallstudie har vi arbetat med ett förslag till ett vintertak över ponnykarusellen på Liseberg. Vi har sökt ett förslag som förmår illustrera det som är unikt med FRP och hur detta skulle kunna utnyttjas i byggsammanhang. Under arbetets gång har flera idéer och spår som skulle kunna utvecklas naturligtvis dykt upp och dessa beskrivs mer eller mindre kortfattat i rapporten.

Det har inte varit vår avsikt att göra en fullständig rapport om materialets egenskaper. Under vårt arbete har vi naturligtvis lärt oss mycket om materialet och en sammanställning av dessa lärdomar bifogas.

Om vi skall lyckas vidmakthålla vår levnadsstandard och samtidigt minska vår resursförbrukning så den räcker åt alla måste vi bli mer resurseffektiva. Att bygga lätt och starkt är därför inte bara önskvärt utan en förutsättning för vår långsiktiga överlevnad. Fiberkompositer har i alla tider använts för att skapa lätta och samtidigt starka konstruktioner. Genom att kombinera fibrer från växt och djurriket i t.ex. tältkonstruktioner har människosläktet förmått anpassa sig till förändrade livsbetingelser under tiotusentals år. Miljontals människor är än i dag beroende av tältkonstruktioner för sin överlevnad.

Med FRP kombineras fibrer och bindemedel för att erhålla önskvärda egenskaper. Denna utveckling är fortfarande i sin linda och utvecklingspotentialen är mycket stor. I takt med att nya krav ställs är det troligt att nya materialegenskaper tas fram. Om byggbranschen med sitt enorma materialbehov deltar aktivt i utvecklingen av nya material kommer dessa material rimligen att kunna skräddarsys för byggandets behov och kostnadsbild.

2 Val av projekt: Tre spår

- Inom byggindustrin börjar man så sakta få upp ögonen för de nya materialens möjligheter. Ett område, där Chalmers har en framträdande roll, är inom FRP-armering av betong. Stora utvecklingsmöjligheter torde finnas i att bygga lätta kvarvarande fomar med armering och kanalisation förberedd för betonggjutning av t.ex. broar och husgrundläggning. I dessa sammanhang kan FRP-materialens styrka och formbarhet utnyttjas samtidigt som deras vekhet inte är till någon nackdel.
- FRP lämpar sig väl för lätta skal- och sandwichkonstruktioner. Materialen används exempelvis i båtar och vindkraftverk där komplex form och låg vikt är avgörande designfaktorer. I byggsammanhang där vikt inte är lika avgörande och behovet av komplex form tycks mindre finns det få exempel på tillämpningar av detta slag.
- Komplexa prefabricerade profiler är ett tredje område där FRP är intressant. Utöver goda beständighets- och hållfasthetsegenskaper möjliggör materialets termiska och elektriska isoleringsförmåga att det kan anpassas till en rad olika tillämpningar. Demonstrationsprojektet ger exempel på hur man kan arbeta med prefabricerade FRP-profiler i byggsammanhang

3 Fallstudie: Ett skyddstak över Ponnykarusellen på Liseberg



Figur 3.1 Ponnykarusellen på Liseberg

Vid samtal med Lisebergs tekniske chef Lars-Erik Hedin och några av hans medarbetare framkommer att det finns behov av en övertäckning av en av Lisebergs äldsta attraktioner, Ponnykarusellen, vars trädekorationer far illa under vintern. Tidigare har man kunnat täcka in denna i presseningar, men när man nu har öppnet också under delar av vintern vill man ha en estetiskt tilltalande lösning. Karusellen står nära Mölndalsån och markförhållandena medger inte att tyngre konstruktioner byggs. Det var ett önskemål att hästen som kröner karusellen skulle vara synlig också vintertid. Övertäckningen skulle antingen vara lätt att demontera eller kunna öppnas upp så att den inte inkräktade på upplevelsen av karusellen sommartid. Arbetsgruppen bedömde att detta fall var intressant, inte minst med tanke på att det fanns en möjlighet att få demonstrationsprojektet uppfört.

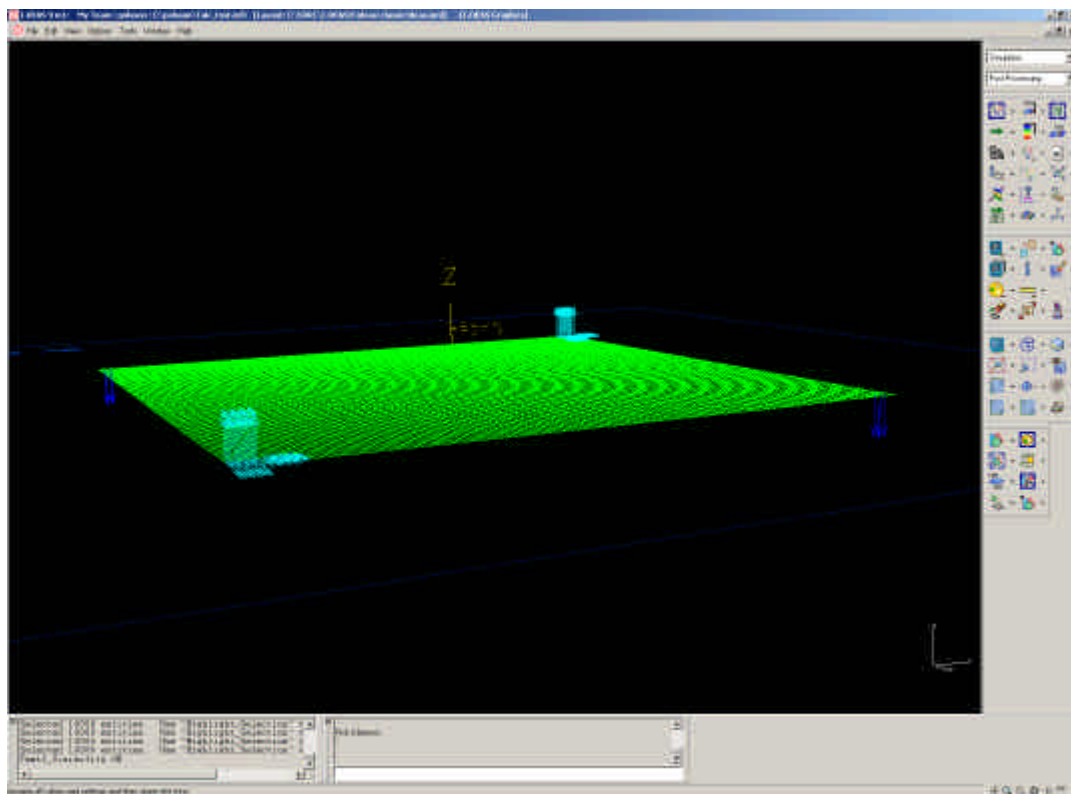
Uttryck

Det är mycket vanligt att ett nytt material ”härmar” andra material innan det får sin eget identitet. Profiler i FRP liknar, vid första ögonkastet, profiler i stål eller aluminium, och det är först efter ett tag det framgår att de verkar ha för tjockt gods och en annorlunda yta med synliga fibrer, m.m. Första intrycket blir att de är ”klumpiga ” och ”tunga”, t.o.m. över-dimensionerade. Om materialet skall

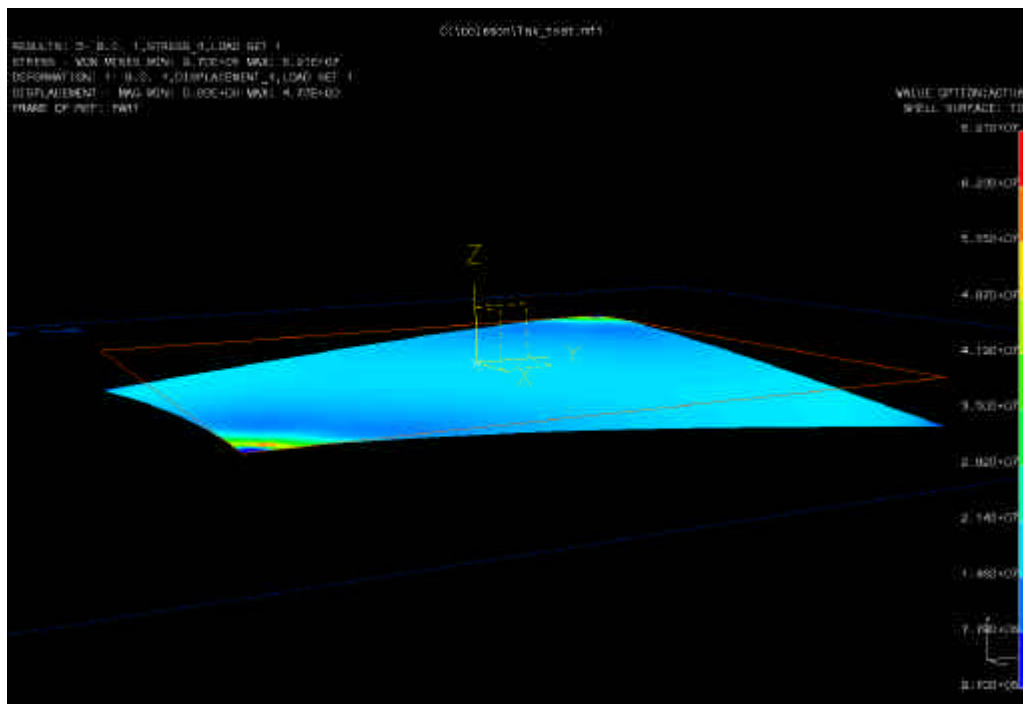
komma till sin rätt är det viktigt att förstå var det har sin styrka och sina svagheter.

Starkt men vekt

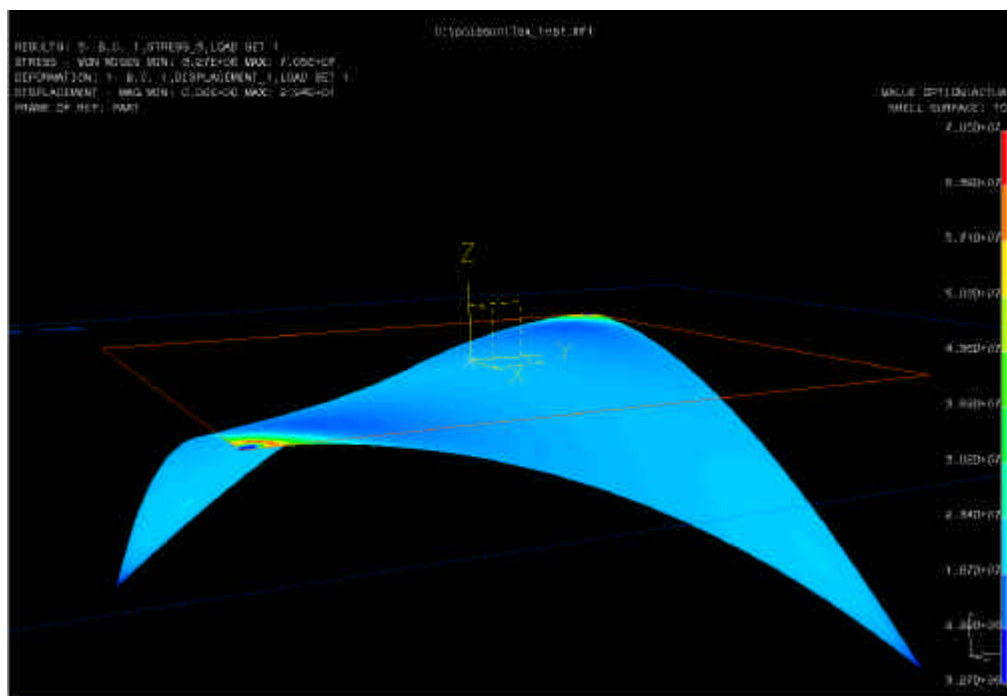
För att få ett intryck av FRP-materialets formbarhet genomfördes datasimuleringar. Som framgår av simuleringarna, figurerna 3.2 till och med 3.5, så är fiberriktningen helt avgörande för materialets beteende. Detta har naturligtvis stor betydelse för hur exempelvis en profil bör utformas. För att kunna utnyttja materialets styrka fullt ut behöver man hantera dess relativa vekhet. Ett vanligt sätt är att utnyttja skalkonstruktioner för att åstadkomma styvhet, ett annat borde vara att arbeta med veckade ytor.



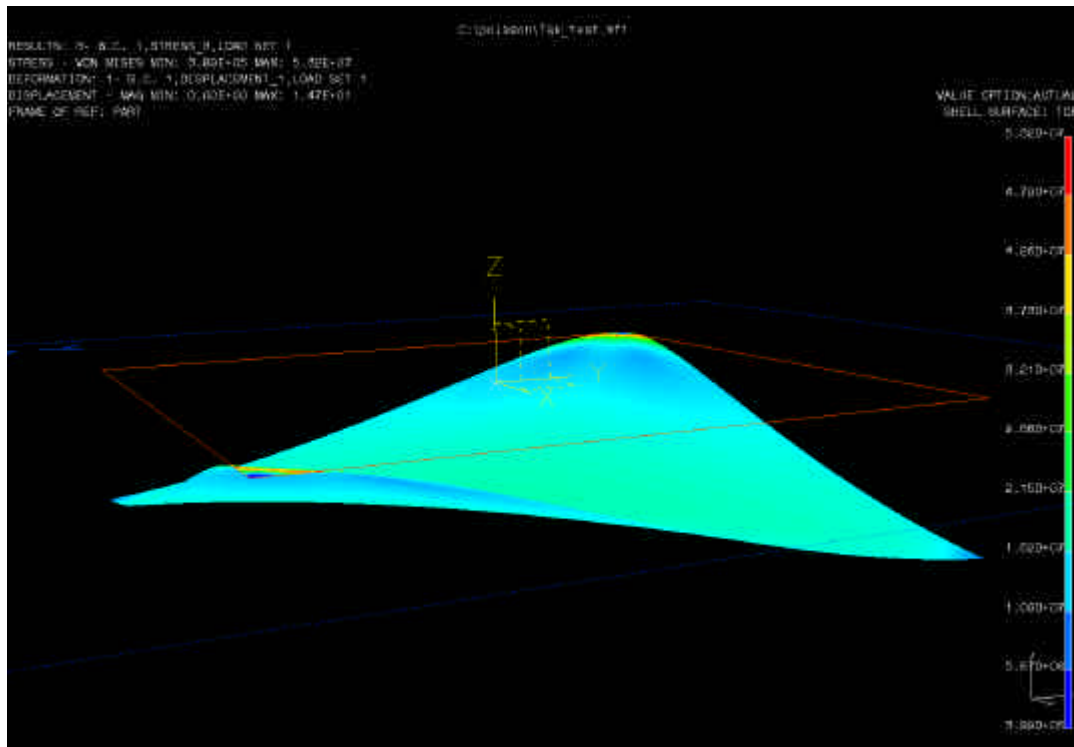
Figur 3.2 Simuleringar av hur deformationen av en FRP-skiva varierar med fiberriktningen. Två av hörnen på en kvadratisk skiva av FRP placerades på upplag (pilar uppåt) och dragkrafter applicerades på de två fria hörnen (pilar neråt).



Figur 3.3 I det första försöket användes en isotrop (fibrer i alla riktningar) FRP. Den ursprungliga formen beskrivs av den kvadratiska linjen. I samtliga fall utsätts skivan för lika stor belastning. Deformationen är liknar den som en stålskiva skulle uppvisa.



Figur 3.4 När fiberriktningen ligger från stöd till stöd framgår det tydligt hur materialet är styvt i fiberriktningen och vekt tvärs densamma.



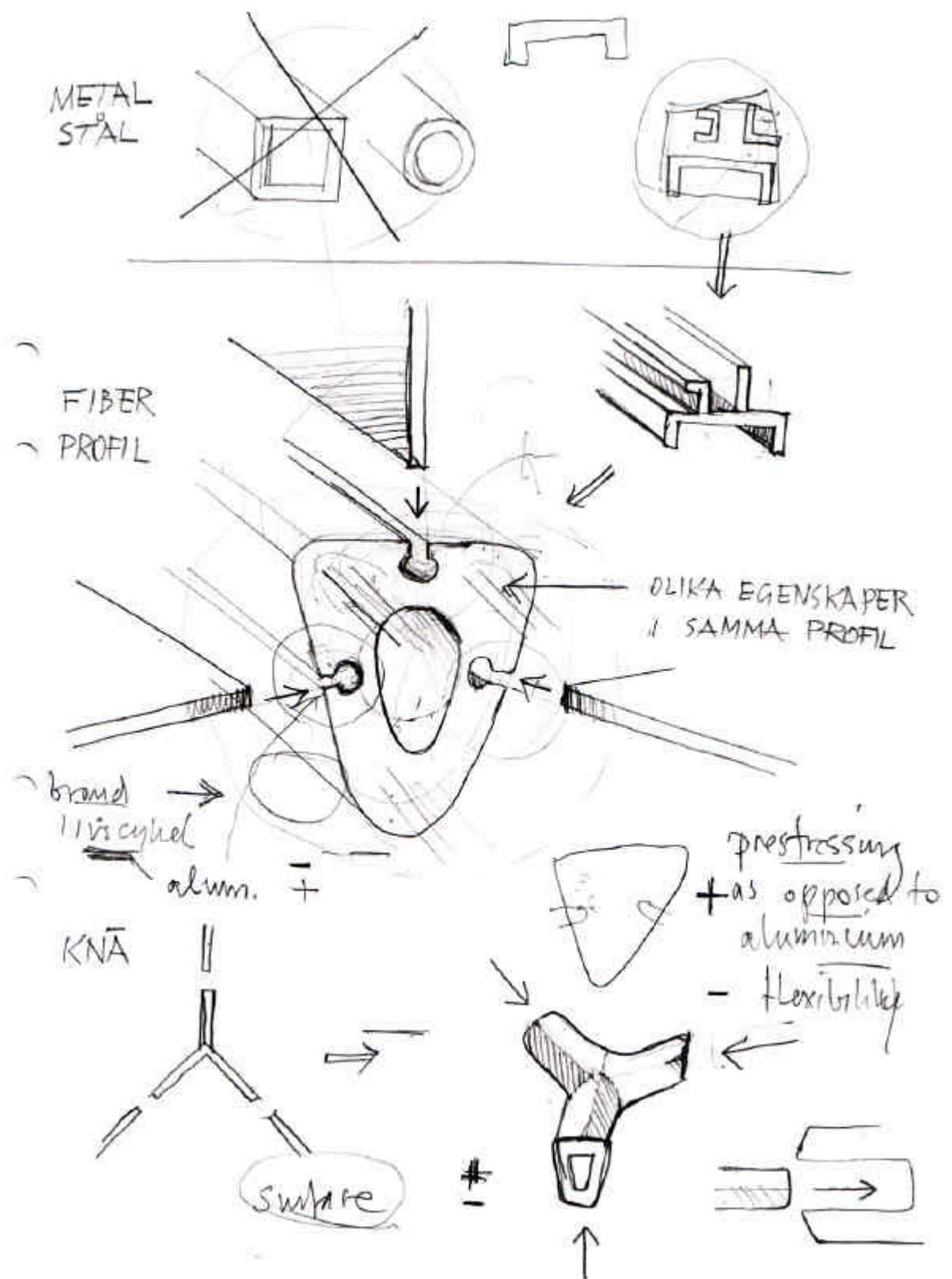
Figur3.5 Fiberriktning från kraft till kraft.

Komplexa prefabricerade profiler

För profiler som skulle vara svåra och mycket kostsamma att göra i stål eller andra metaller, får det nya materialet ett eget värde. Vål befriade från stål- och metall-profilernas utseende kan fiberkompositytan se attraktiv ut.

Ett problem är övergången från en profil till en annan. Med stål och metall kan detta lösas genom svetsning med möjligheter till en mjuk och homogen övergång från en form till en annan. I och med att fiberkompositerna inte kan flyta samman kommer man att behöva ett annat system för att lösa detta. Idag använder man sig av stålplattor m.m. men detta ger ett klumpigt uttryck.

Med nuvarande tillverkningsmetoder får man endast raka profiler. I gengäld kan man skapa relativt korta skräddarsydda serier som tillåter stor variation i utformningen av olika objekt. Det är inte otänkbart att man i framtiden kan göra böjliga profiler som kan "frysas" på plats med svängda former.



Figur 3.6 Skissade specialiserade profiler som ingår i ett flexibelt system alternativt standardprofiler som kombineras för att möta speciella behov.

Genomfärgning och ytskikt

Fiberkomposit kan infärgas under tillverkningsprocessen och ger en färgskala med dämpade jordfärger. Vissa färger framhäver fiberytan mera än andra och på detta sätt förtydligar att det är ett material för sig. Eftersom färgerna finns i materialet får skador på ytan mindre betydelse.

Det går att ytbehandla materialet, antingen med en top-coat (gel-coat) under tillverkningen eller med lack i efterhand. En fördel med lack är att smuts och klotter inte tränger in i materialet lika lätt.

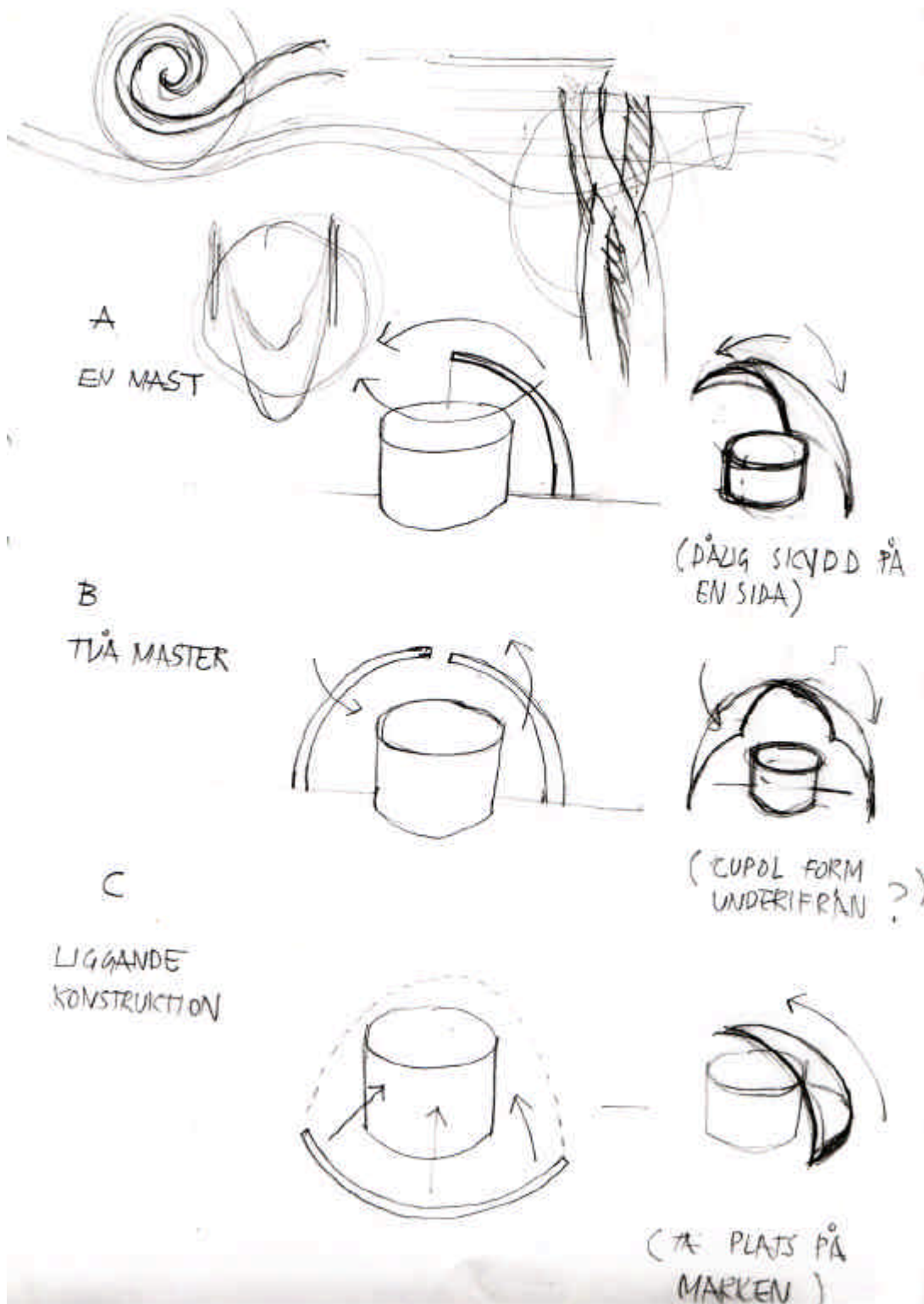
Ytan kan finnas i den färgskala som nämns ovan men kan även ha tryckta och präglade mönster. Troligtvis är det möjligt att väva in ljusemitterande fibrer i en duk och på detta sätt skapa stora belysta ytor.



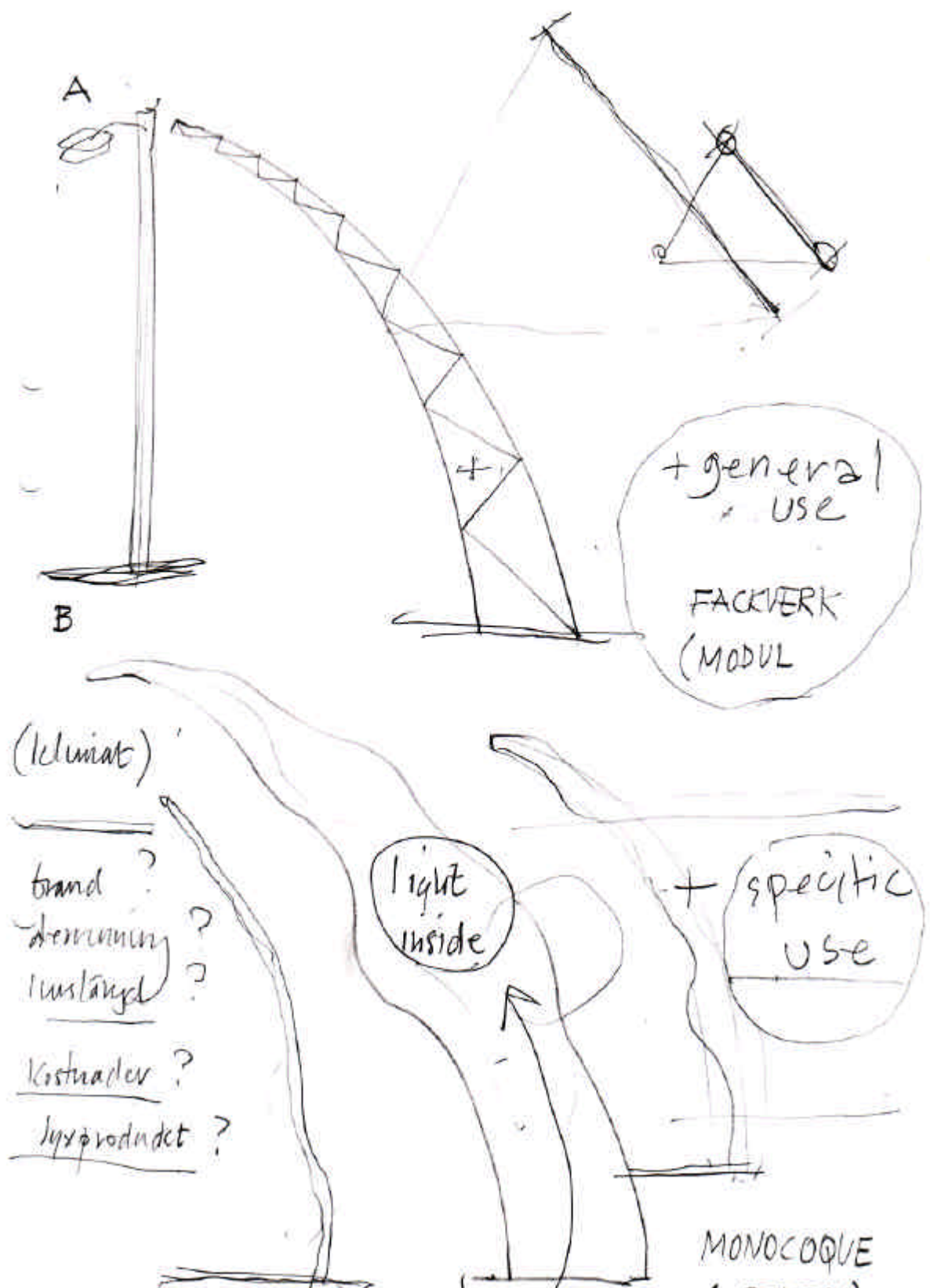
Figur 3.7 Lackerade FRP-skivor för Metron i Köpenhamn

Förslag

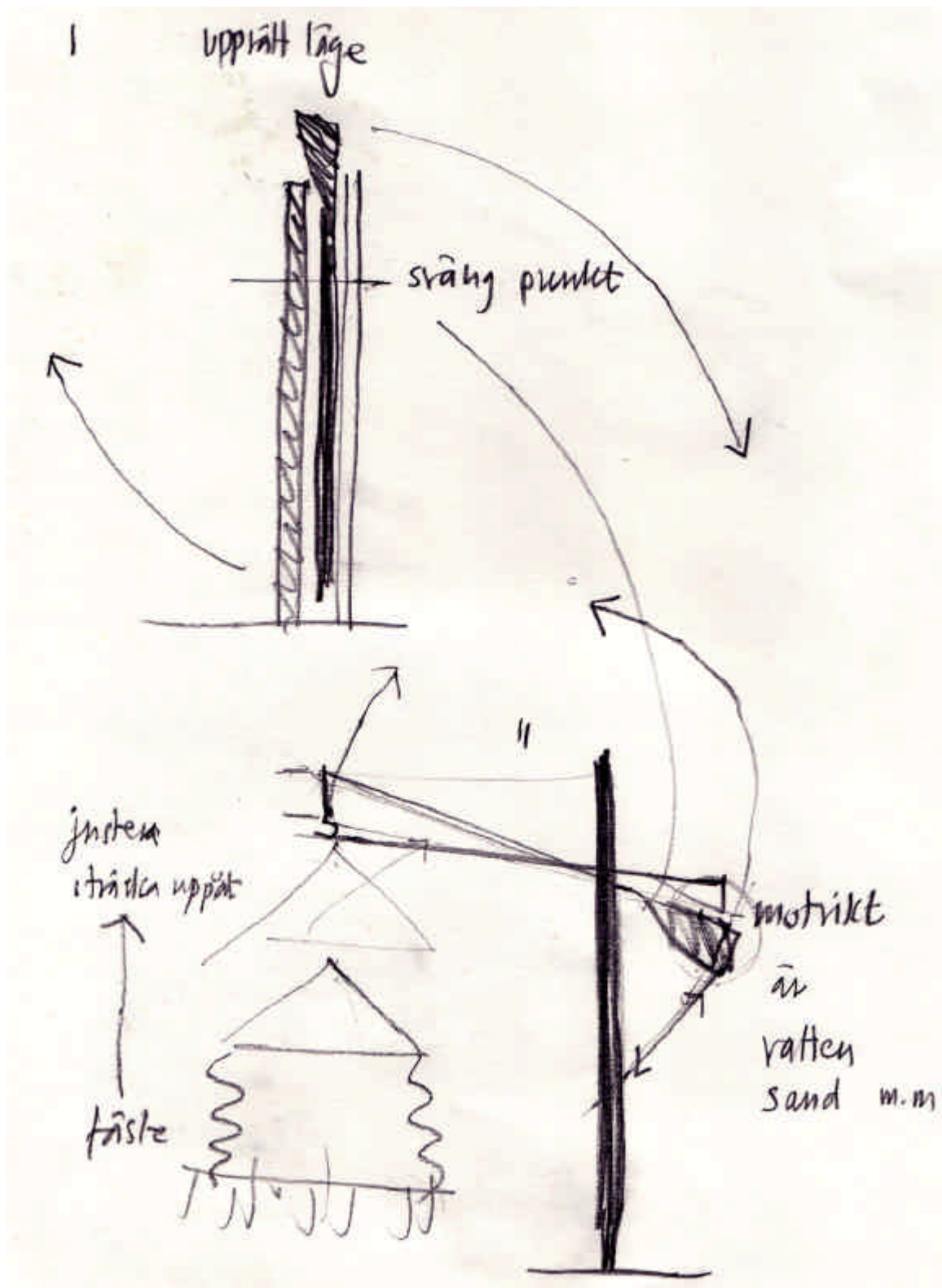
Framarbetandet av förslaget åskådliggörs med i figurerna 3.7 tom 3.14.



Figur 3.8 Efter en del diskussioner övergavs tanken på en skalkonstruktion till förmån för ett förslag som bygger på användningen av mer eller mindre standardiserade strängdragna profiler i FRP.

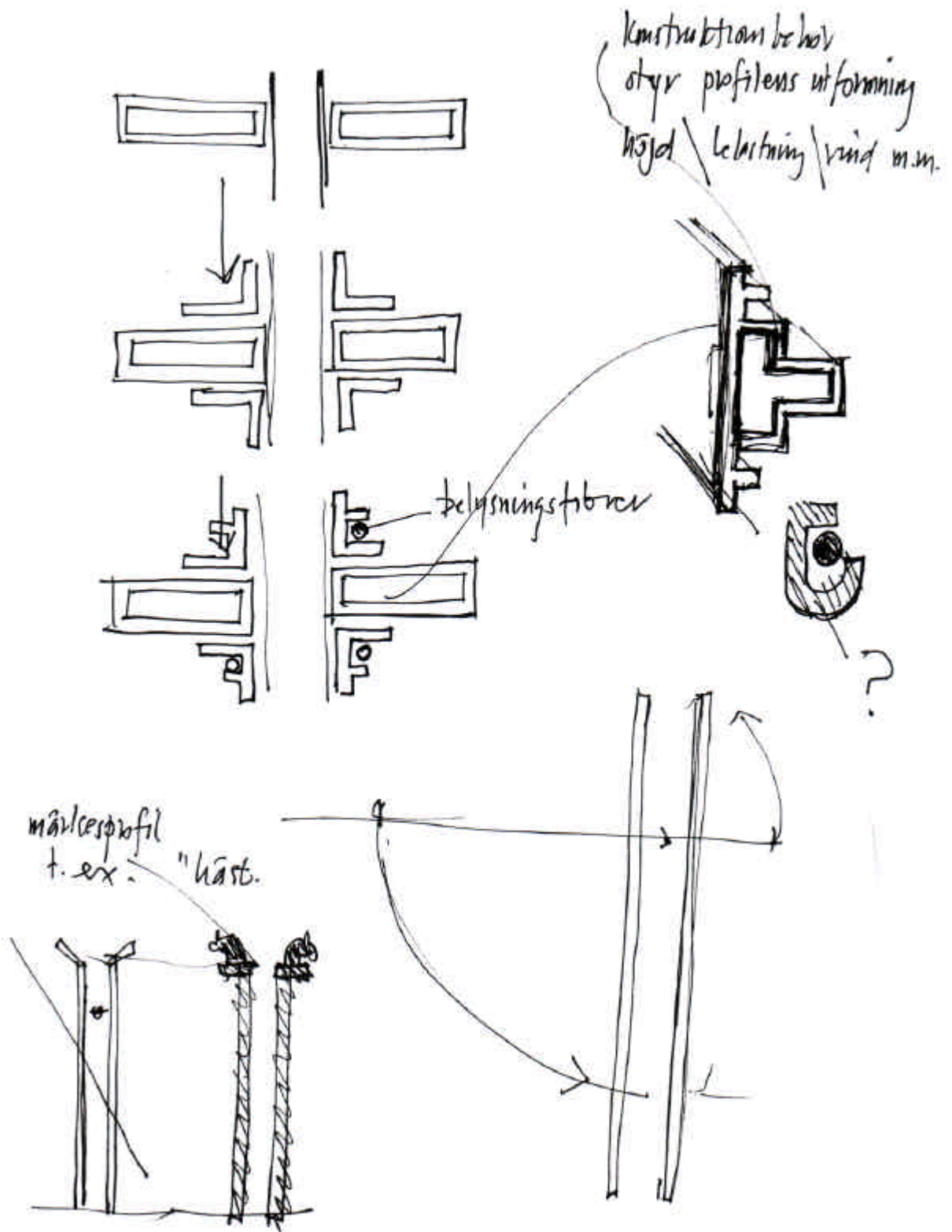


Figur 3.9 Huvudargumentet för detta val var att vi ville titta på lösningar som kan ha fler tillämpningar än det fall vi just nu arbetade med.



Figur 3.10 En knappt 12 meter meter hög pelare uppbyggd av ett antal standardiserade FRP-profiler placeras permanent mellan karusellen och ån. Sommartid kröns pelaren av en konstfullt utformad motvikt (övre figur). Motvikten fälls vintertid ner och balanserar en kranbalk som sträcker sig över karusellen. Med hjälp av denna balk kan sommartaket lyftas upp och utgöra övre delen av karusellens vintertäckning. Under sommartaket monteras PVC-skyddade polyesterdukar som sträcks med hjälp av skyddsräcket nere vid mark.

MAST

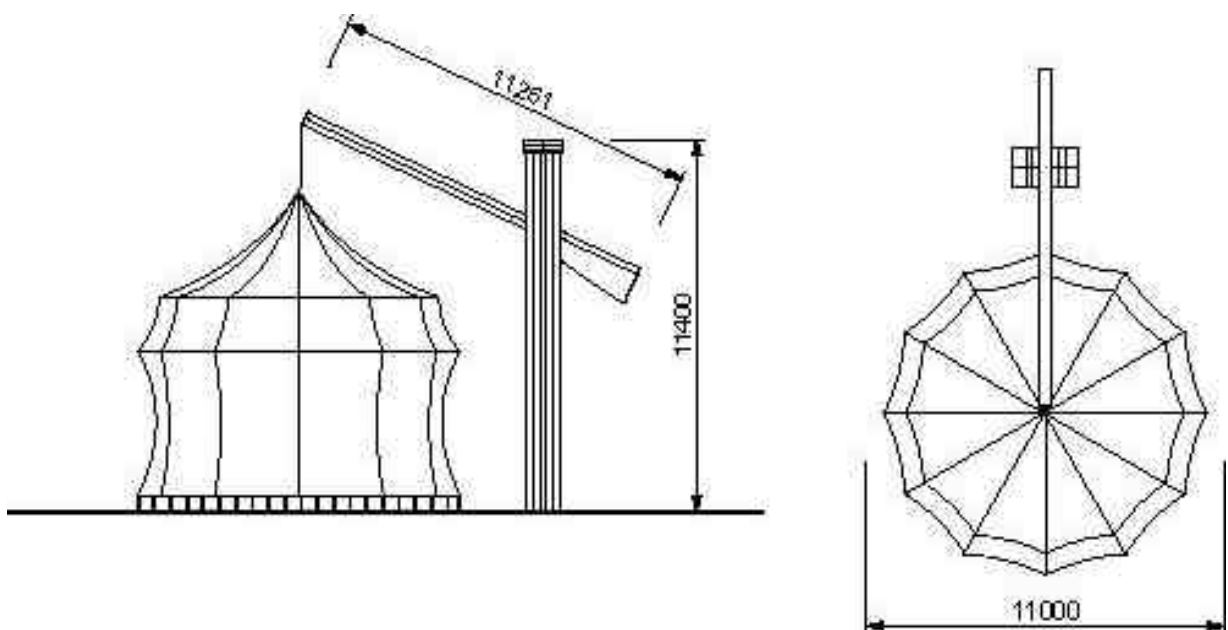


Figur 3.11 Pelaren är uppbyggd av två profilset som förenas i grundläggningen och med kranbalkens axel. Profilseten är uppbyggda av ett antal standardprofiler som limmas till varandra. Sidoemitterande optisk fiber

monteras i särskilda spår.



Figur 3.12 Modell av delvis intäckt karusell.



Figur 3.13 Förslagets huvudmått.



Figur 3.14 Pelaren lysen kvällstid upp av i profilerna monterad optisk fiber. Tältet belyses från insidan. Om armaturer placeras kring karusellens centrum ger ponnyhästar och elefanter ett vackert skuggspel.

4 Triangulering: Ett utvecklingsbart spår

En idé om ett taksystem som bygger på triangelformade takskivor med kanter av FRP-profiler bedömdes som intressant att bearbeta vidare, dock inte som en lösning på det aktuella fallet då formen inte ansågs fungera ihop med ponnykarusellen. Man kan dock tänka sig en rad andra tillämpningar som t.ex. hållplatstak.

Ett antal triangelformade skivor hålls samman i pyramidform av FRP-profiler. Pyramider kan sedan kombineras på en mängd olika sätt.

Med ett dylikt system skulle flera fördelar nås:

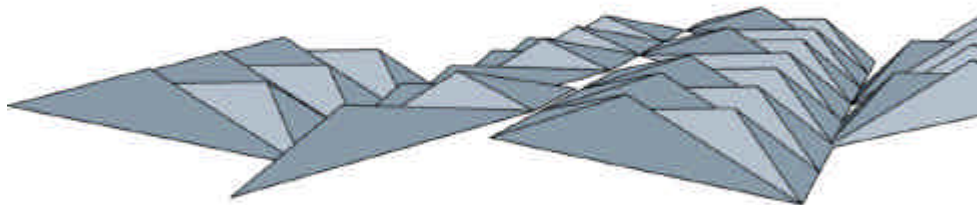
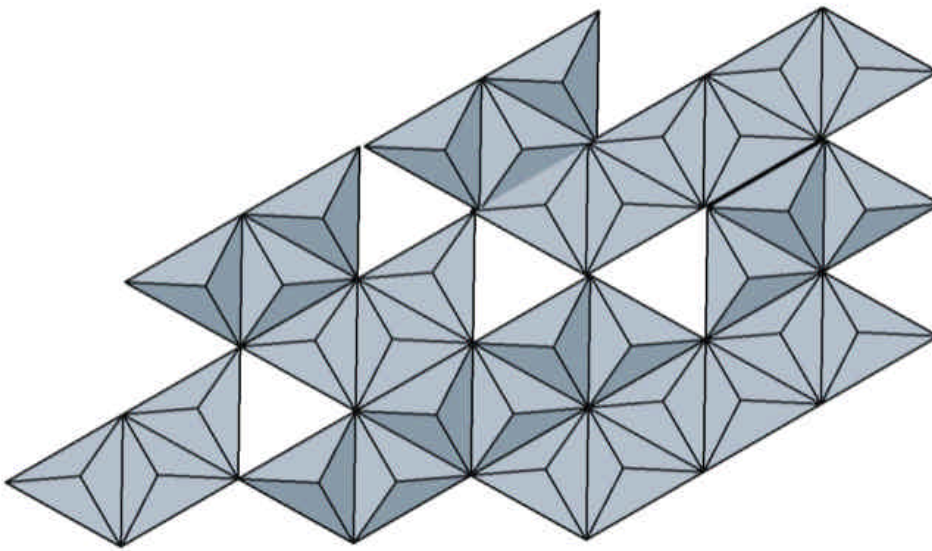
- Materialets relativa vekhet skulle motverkas av den förstyvande geometrin
- Systemets grundkomponenter skulle kunna tillverkas genom strängdragning, en relativt billig tillverkningsmetod
- Geometrin har stora variationsmöjligheter och kan anpassas till en rad olika tillämpningar
- Materialets termiska egenskaper lämpar sig för glas och fasadsystem



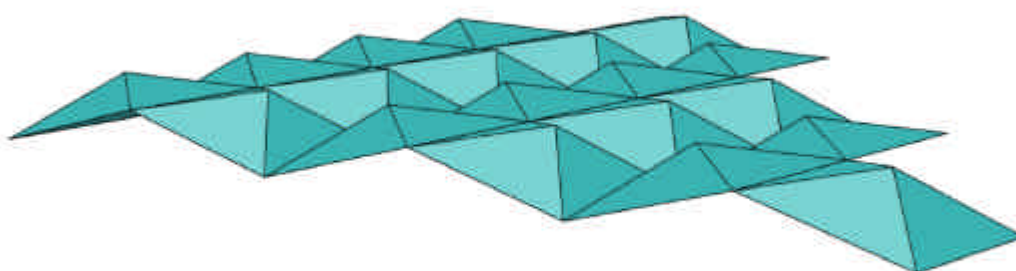
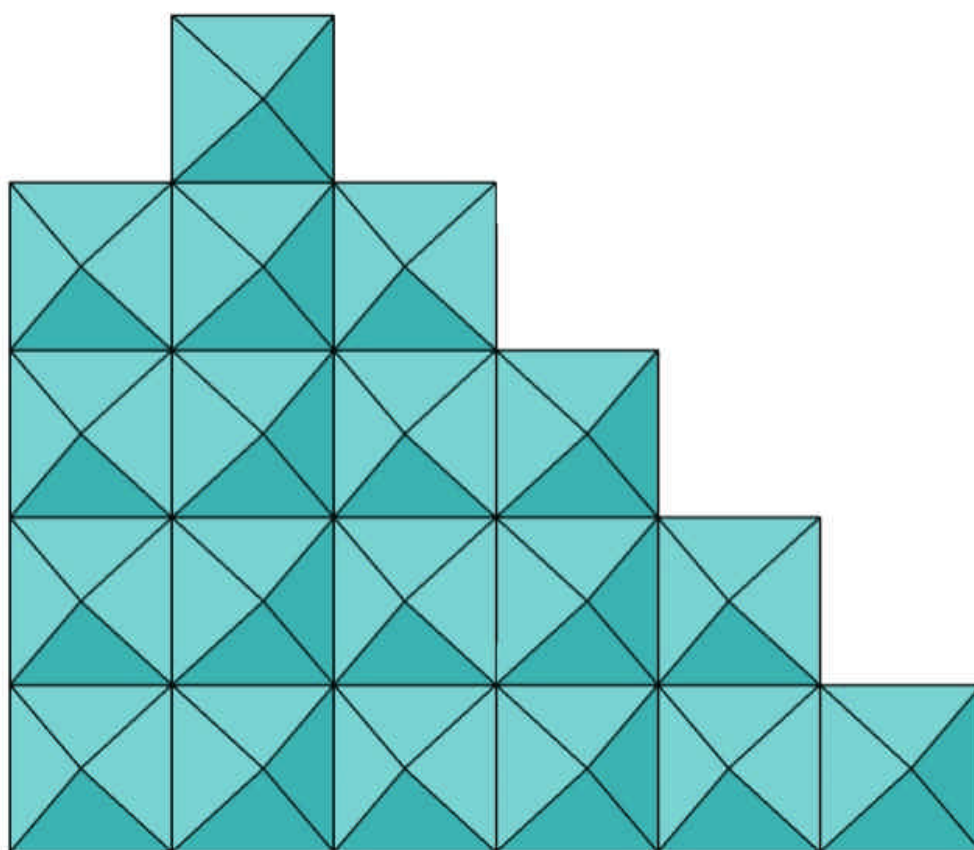
Figur 4.1 Materialets lätthet och korrosionsbeständighet kan utnyttjas arkitektoniskt i svåra och mycket utsatta områden där materialets lätta uttryck står i kontrast till mycket tuffa miljöer. Likheten med tältkonstruktioner är påfallande – det är ett material som behöver förankras, hållas ner, spänns fast kring lättaväl förankrade ramar.

Variationer på taksystem av triangelformade skivor

Triangelformade toppar sammanfogade till ett system.



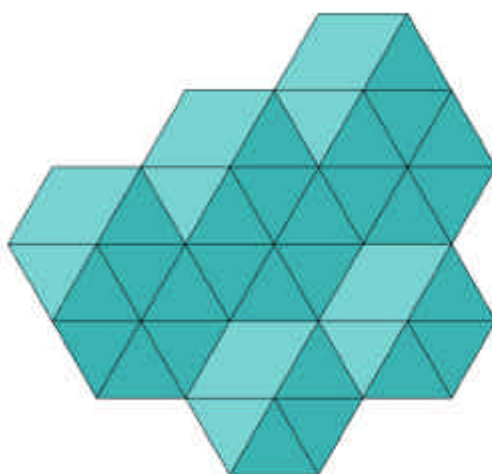
Figur 4.2 Triangulär uppbyggnad i plan och sidovy. En triangulär uppbyggnad ger raka och därmed veka linjer. Dessa kan dock utnyttjas för att vika taket vilket kan utnyttjas arkitektoniskt.



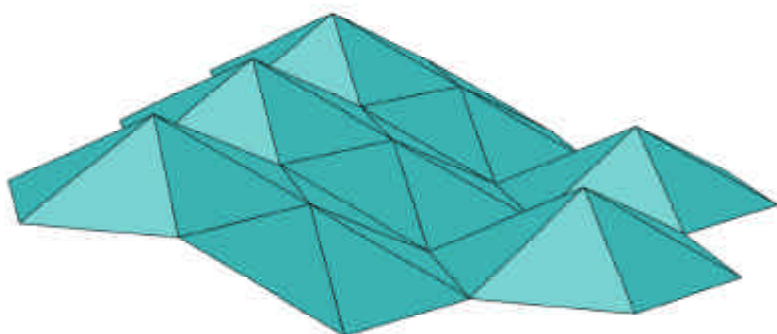
Figur 4.3 Kvadratisk uppbyggda toppar i plan och sidovy. Dessa två exempel har en geometri som medger att takkonstruktionen ledas så att viss balkverkan erhålles.



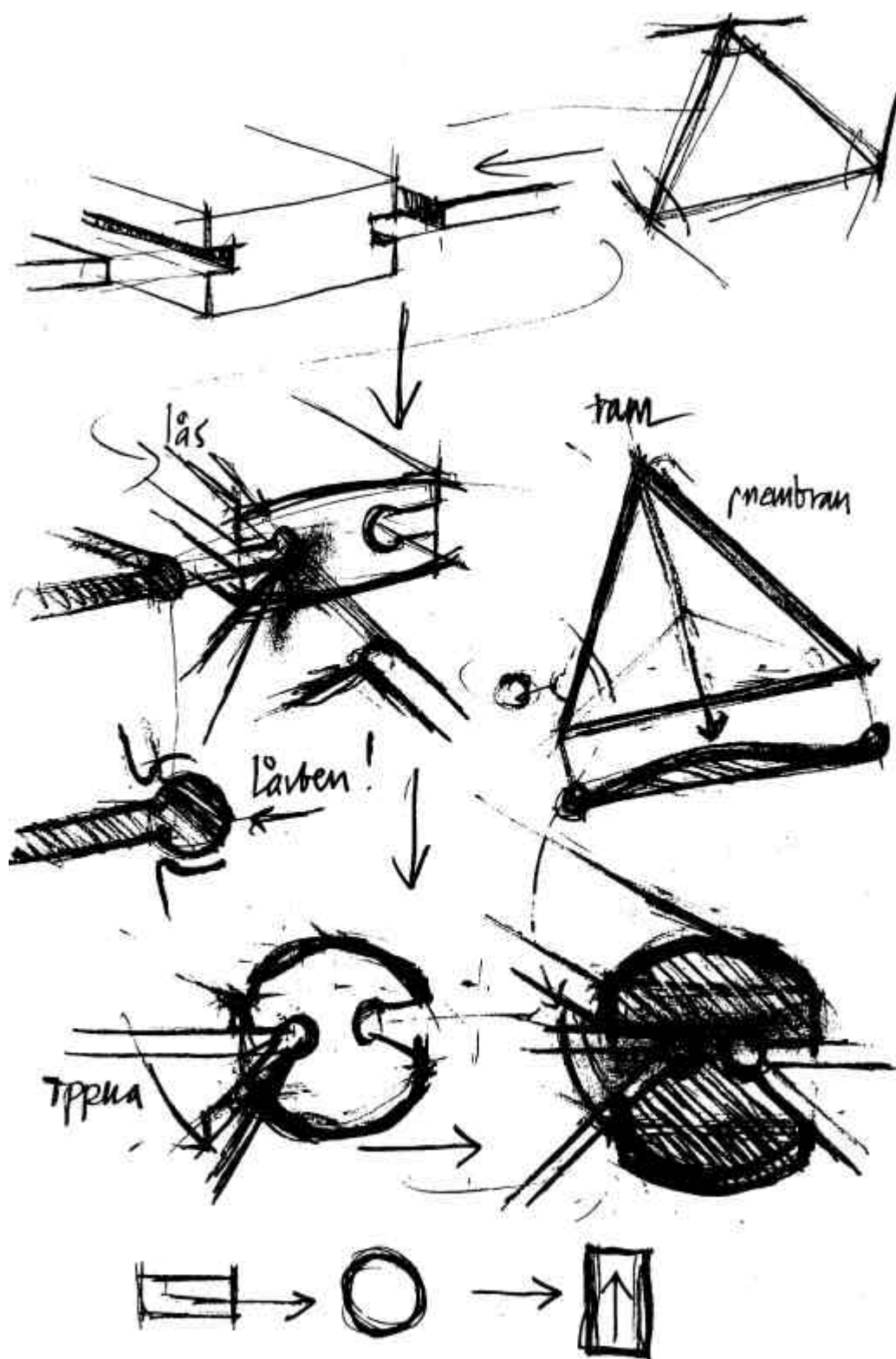
Figur 4.4 Femsidiga toppar genererar en sfärisk form.



Figur 4.5 Av de undersökta variationerna är en sexsidig uppbyggnad att föredra för takkonstruktioner. Geometrin innehåller inga veka linjer och kan varieras på en mängd olika sätt.



Figur 4.6 Enkla grundkomponenter med stora variationsmöjligheter.



Figur 4.7 Några få specialiserade profiler och knutar möjliggör ett mångsidigt system som kan anpassa till en mängd olika situationer.

5 Materialegenskaper

5.1 Inledning

Fiberkomposit är inte ett enskilt material utan ett samlingsnamn på en mängd material med olika uppbyggnad och därmed olika egenskaper. Egenskaperna hos en specifik fiberkomposit fås som en kombination av tre delar:

- 1 Egenskaperna hos kompositens matris
- 2 Form, mängd och egenskaper hos kompositens fibrer
- 3 Egenskaperna i kontaktytorna mellan fiber och matris

De egenskaper som redovisas nedan relaterar främst till de materialprodukter som vi har studerat i projektet, dvs. kompositer med polymera matriser, FRP. Endast några av de viktigaste egenskaperna är redovisade. Kompositer med matriser av metalliska och keramiska material faller utanför denna studie. Avgörande för projektet är de form- och konstruktionsmässiga möjligheter som blir en konsekvens av FRP-kompositens materialegenskaper. Exempel på produkter följer därför efter varje redovisad egenskap.

Figur 5.1 Vanligt förekommande fiber- och matriskombinationer.

Matris	Glasfiber	Kolfiber	Aramidfiber
Polyester	x	x	x
Vinylester	x	x	x
Fenol	x	x	x
Epoxi	x	x	x

5.2 Densitet

En fiberkomposits densitet avgörs av densiteter hos matris respektive fibrer, samt av andelen fibrer i kompositen.

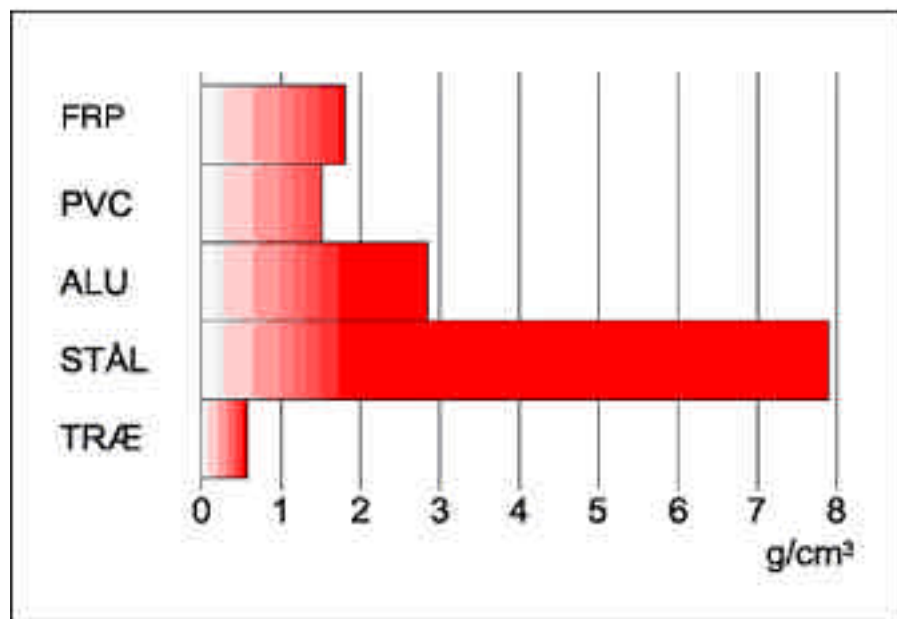
Densiteter för några fibermaterial:

Glasfiber	2500 kg/m ³
Kolfiber	1800 kg/m ³
Aramid (kelvar)	1400 kg/m ³
Polyamid	1200 kg/m ³

Densiteter för några matrismaterial:

Polyester	1100 – 1500 kg/m ³
Vinylester	1100 – 1500 kg/m ³
Fenol	1300 kg/m ³
Epoxy	1100 - 1400 kg/m ³

Den resulterande desiteten för FRP-material ligger typiskt i intervallet 1100- 2000 kg/m³. Se t.ex. Westerlund(1992) och Matthews and Rawlings (1994).



Figur 5.2 Exempel på typiska desiteter för olika byggmaterial. Från Fiberline (2002).



Figur 5.3 Flyttbar bro, Pontresina Schweiz. Källa: Fiberline [2002].

Den låga densiteten är en viktig parameter för många tillämpningar. Konstruktioner blir lätta att transportera. Konstruktioner kan adderas till befintliga byggnader.



Figur 5.4 Lätta konferensrum, idéskiss. Källa: David Kendall.

5.3 Styvhet och styrka

Liksom för densitet bestäms en fiberkomposits styvhet respektive styrka av motsvarande egenskaper hos matris respektive fibrer, samt av andelen fibrer i kompositen. Hillerborg (1981) anger ett samband för beräkning av styvhet:

$$E^n = \beta E_f^n + (1 - \beta) E_m^n$$

där n beror på fiberkompositens struktur i förhållande till belastningsriktningen, $-1 \leq n \leq 1$, och där β anger volymandelen fibrer. Olika specialfall av detta samband redovisas oftast, se till exempel Askeland (1996).

Typiska styvheter för några fibermaterial (E_f) är:

Glasfiber	72 000 MPa
Kolfiber	200 000-800 000 MPa
Aramid (kelvar)	130 000 MPa
Polyamid	5000 MPa

Typiska styvheter för några matrismaterial (E_m) är:

Polyester	1 300 – 4 500 MPa
Fenol	4 400 MPa

Epoxi

2 100 – 6 000 MPa

Källor: Westerlund (1992), Matthews and Rawlings (1994) och Bjärbo (1994).

Med de redovisade styvheterna för fiber och matrismaterial blir styvheten parallellt med fibrerna mellan 10 och 100 gånger större än styvheten vinkelrätt fibrerna.

Hållfasthetsegenskaper för fiberkompositer redovisas oftast som draghållfasthet. I speciallitteratur, till exempel Matthews and Rawlings (1994), kan man finna uppgifter om böjhållfasthet och tryckhållfasthet, samt samband för beräkning av hållfastheter i olika riktningar.

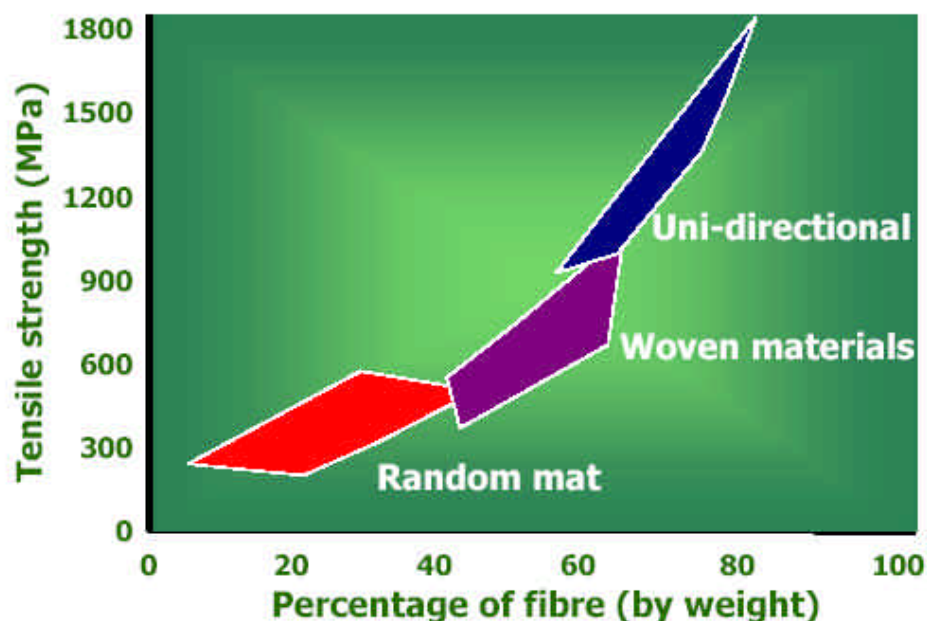
Typiska värden på draghållfasthet för några fibermaterial:

Glasfiber	2 200 MPa
Kolfiber	4 000 MPa
Aramid (Kevlar)	3 600 MPa
Polyamid	600 MPa

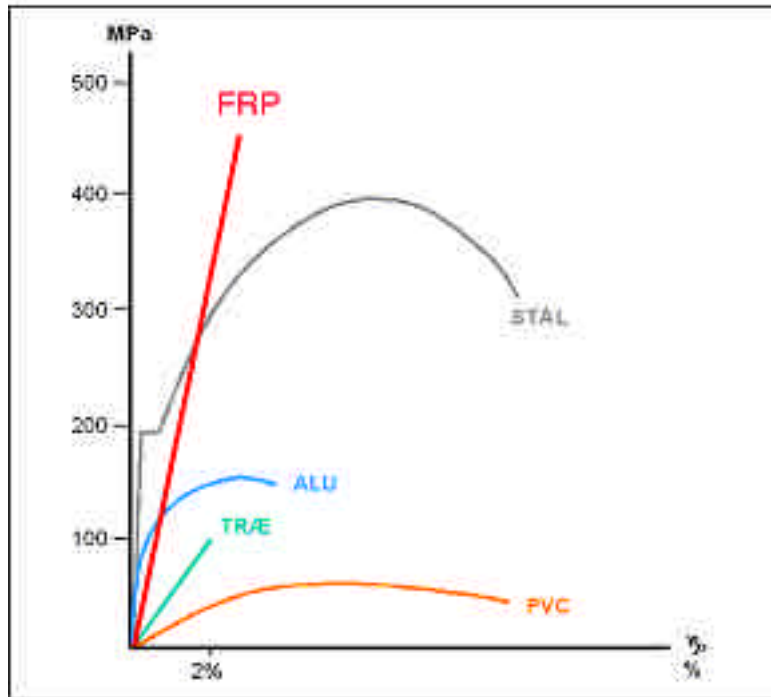
Typiska värden på draghållfasthet för några matrismaterial:

Polyester	60 MPa
Polypropen	30 MPa
Cellulär polyuretan	0.3 – 6 MPa

Källor: Westerlund (1992).

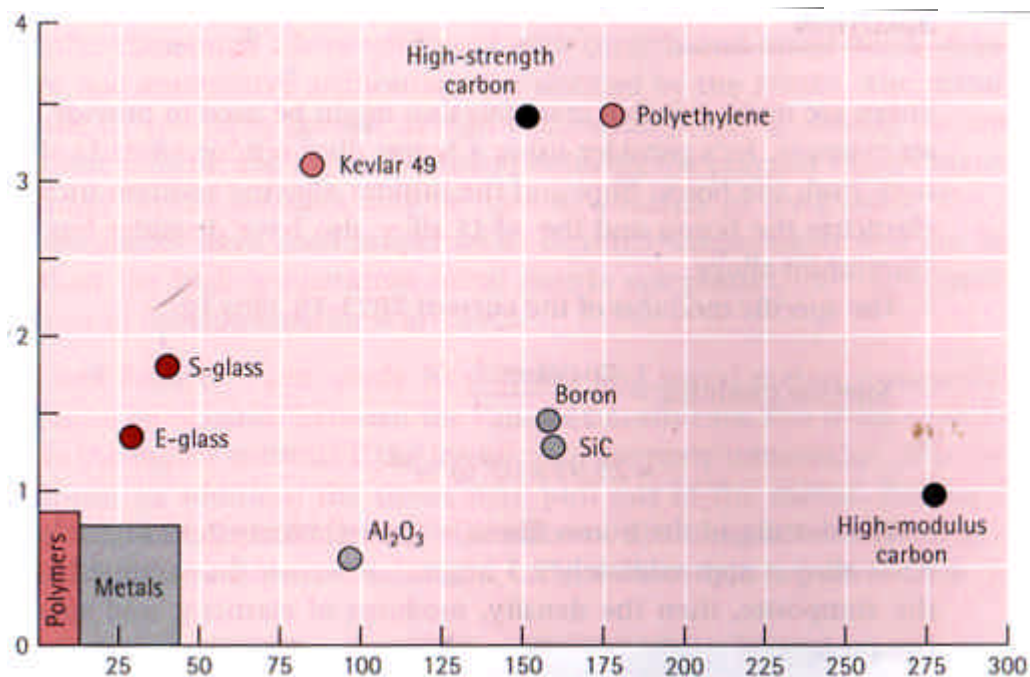


Figur 5.5 Hållfasthetens beroende av fiberandel och fiberriktningar. Källa: NGCC.

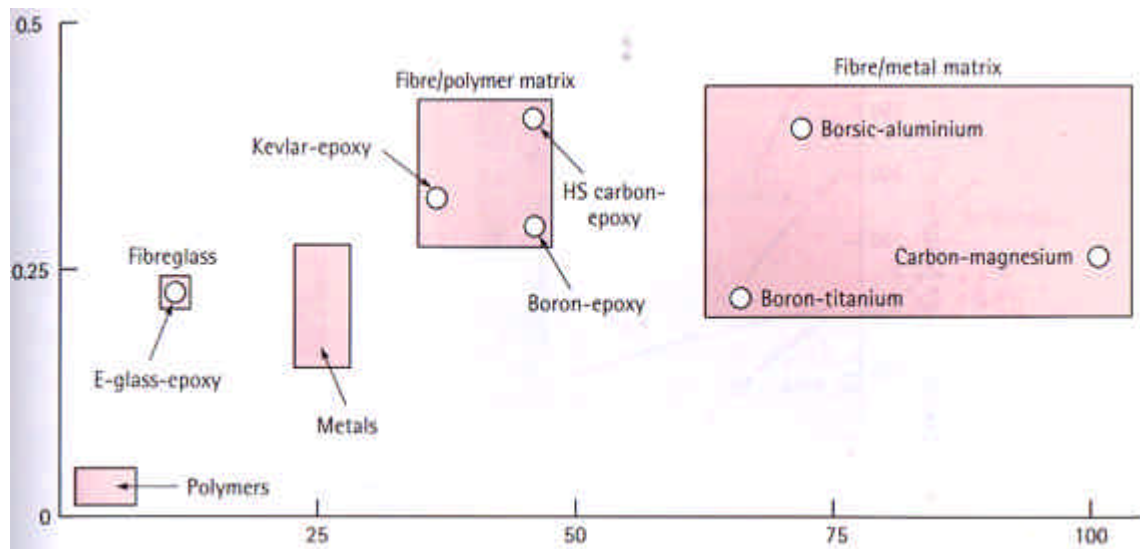


Figur 5.6 Exempel på arbetskurvor för olika material. Källa: Fiberline (2002).

I många applikationer med fiberkompositer är hög hållfasthet och hög styvhet i kombination med låg densitet de avgörande egenskaperna. Därför är måtten specifik hållfasthet σ/ρ och specifik styvhet E/ρ är intressanta, framför allt om man vill jämföra olika fiberkompositer med varandra eller med andra material. I figur 5.7 visas specifik hållfasthet i förhållande till specifik styvhet för några olika fibermaterial i jämförelse med typiska värden för metaller och polymerer. I figur 5.8 visas motsvarande egenskaper för några fiberkompositer i jämförelse med metaller, polymerer och fiberarmerade metaller.



Figur 5.7



Figur 5.8

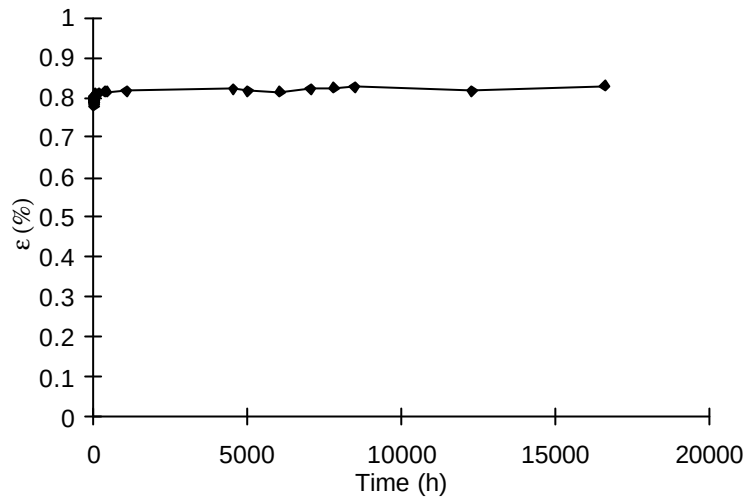


Figur 5.9 Exempel på tillämpning där hög hållfasthet och styvhet i förhållande till densiteten varit avgörande. Källa: Fiberline (2002).

5.4 Krypning och utmattning

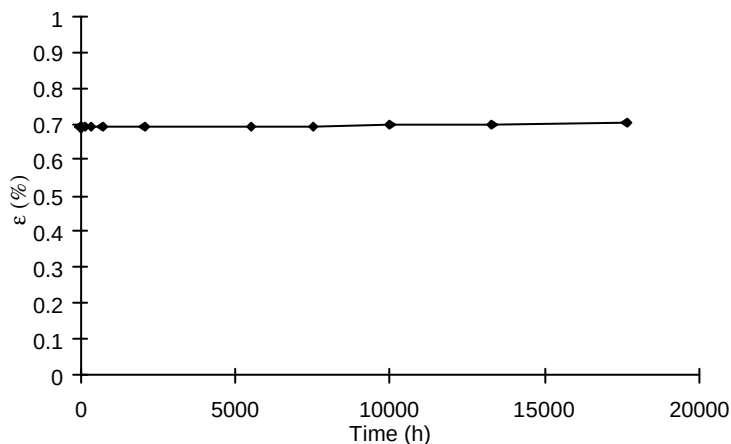
Polymerer kryper vid rumstemperatur vid spänningar långt under hållfastheten. Fibrer kryper betydligt mindre. Nedan visas krypningen för glas-, kol- och aramid- fibrer vid olika spänningsnivåer. Krypning beskriver förändringen i töjning som funktion av tiden vid konstant spänning. För fiberkompositer är dessa långtidsegenskaper starkt beroende av belastningsriktningen i förhållande till fiberriktningen.

För GFRP bör spänningsnivån begränsas med hänsyn till risken för spänningsskorrosionsbrott. Det rekommenderas att spänningen för GFRP ej överstiger 25% av korttidshållfastheten. Vid så låg spänningsnivå sker endast en mycket liten krypning. I Figur 5.10 visas krypkurvan för en komposit med raka E-glasfibrer. Krypningen är ringa när spänningen bara är 32% av korttidshållfastheten.



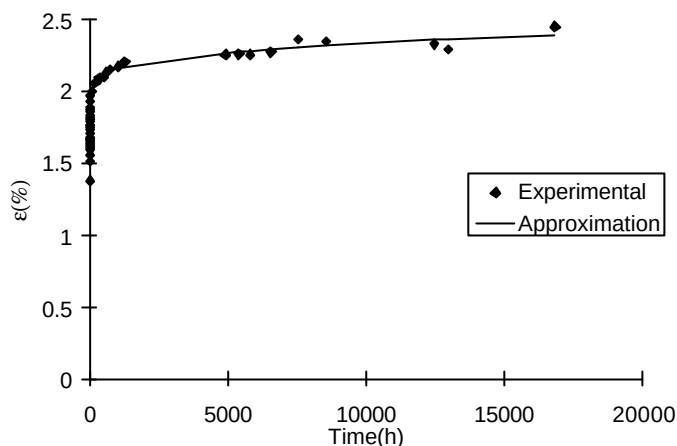
Figur 5.10 Krypkurva för GFR kompositmaterial med lettiska Valmiera E-glasfibrer. Volymfraktion fibrer $m = 0.39$, spänning $s = 232 \text{ MPa}$ och last 32% av korttidsbrottlasten. Apinis et al (2000).

I figur 5.11 visas krypkurvan för en komposit med Toray kolfibrer. Krypningen är försumbar vid en spänning som är 62% av korttidsbrottspänningen.



Figur 5.11 Krypdiagram för CFRP kolfiberkompositmaterial med japanska Toray T400HB-kolfibrer. Volymfraktion fibrer $m = 0.42$, spänning $s = 744 \text{ MPa}$ och last 62% av korttidsbrottlasten. Apinis et al (2000).

Aramidfiberkomposit kryper mer än GFRP och CFRP. I figur 5.12 visas krypkurvan för en komposit med aramidfibrer (AFRP). Krypningen ökar den elastiska stångtöjningen med ungefär 50% under 1000 timmars belastning vid spänningsnivån 65% av korttidsbrottlasten.

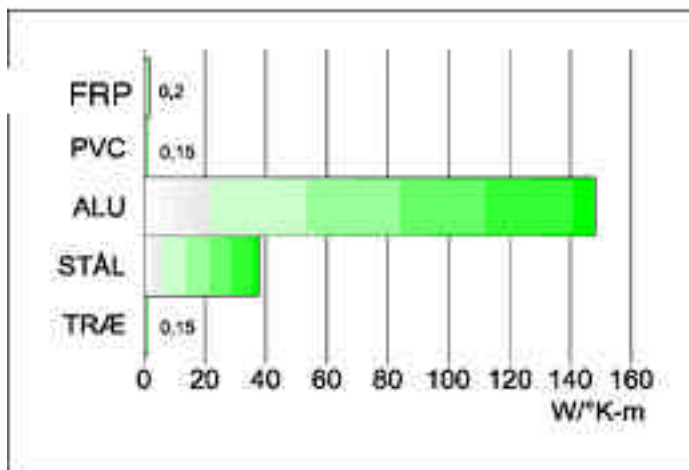


Figur 5.12. Krypkurva för AFRP kompositmaterial med ryska ZSVM-300 aramidfibrer. Volymfraktion fibrer $m = 0.30$, spänning $s = 528$ MPa och last 65% av korttidsbrottlast. Apinis et al (2000).

Utmattningsegenskaperna för fiberkompositer med matris av polymerer är relativt goda. Som exempel kan nämnas att efter 10^7 cykler har en ordinär aluminiumlegering utsatt för en viss cyklisk belastningen resthållfasthet på 20%. Vid samma förutsättningar har en kolfiberarmerad epoxy en resthållfasthet på 30%. Består cykeln av bara dragspänningar är dock resthållfastheten för kolfiberkompositen större än 90%. Källa: Pigott (1980).

5.5 Termiska egenskaper

Viktiga termiska egenskaper är värmeledningsförmåga, värmeutvidgning, samt hållfasthetens temperaturberoende. För de två senare egenskaperna har det varit svårt att få fram data. Generellt tappar polymera material mycket av sin hållfasthet redan vid temperaturer kring 150 °C. FRP har en relativt låg värmeledningsförmåga, ungefär som trä. FRP kan därför med fördel användas där andra material i en värmeisolerad konstruktion skulle ha varit problematiska på grund av köldbryggor.



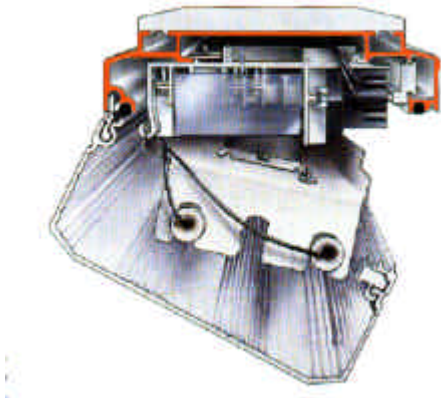
Figur 5.13 Exempel på värmeledningsförmåga för några olika byggnadsmaterial. Källa: Fiberline (2002).



Figur 5.14 Exempel på tillämpningar där den låga värmeledningsförmågan hos FRP-material utnyttjats. Källa: Fiberline(2002).

5.6 Elektromagnetiska egenskaper

Karakteristiskt för FRP är att de är elektriskt isolerande samt elektromagnetiskt transparenta. FRP kan därför med fördel användas som lätta och hållfasta elektriska isolatorer i armaturer såväl som i byggnader nära elektriska ledningar. Materialet kan också användas i sammanhang där man inte vill att konstruktionen ska påverka elektromagnetiska fält.



Figur 5.15 Elektrisk isolering i armaturer. Källa: Fiberline (2002).

5.7 Övrigt

FRP är korrosionsbeständigt och kan användas i starkt korrosiva miljöer. Exempel är konstruktioner i anslutning till havsvatten, konstruktioner i reningsverk och konstruktioner i andra aggressiva industriella miljöer, till exempel grafisk industri.



Figur 5.16 Beständighet i korrosiva miljöer, Off shore. Källa: Fiberline (2002).

5.8 Referenser

Matthews and Rawlings (1994) *Composite Materials: Engineering and science*. Chapman & Hall, ISBN 0-412-55960-9.

Fiberline.(2002) Presentationsmaterial. Kolding.

Kendall, David. *Novel Architectural Applications of Composites*.
www.ngcc.org.uk/news/archive.html.

Hillerborg, Arne (1981) *Byggnadsmateriallära FK1*, Lunds tekniska högskola.

Askeland, Donald R.(1996) *The Science and Engineering of Materials*.
 Chapman & Hall,. ISBN 0-412-53910-1.

Bjärbo, Anders(1994) *Konstruktionsmaterial*, Liber. ISBN 91-47-00420-7.

NGCC, Network Group for Composites in Construction. www.ngcc.org.uk/ - 2k.

Pigott, Michael R (1980) *Load Bearing Fibre Composites*. Pergamon Press.
 ISBN 0-08-024230-8.

Westerlund, G.,(1992): *Armerade hårdplaster - Helt enkelt. Sveriges plastförbund, Stockholm. 164 sid.*

6 Miljöpåverkan

6.1 LCA-analys

LCA (Life-Cykel-Analys) har veterligen inte utförts på FRP-material. FRP-material har rätt låg densitet vilket är positivt ur transportsynpunkt. Dock innebär den låga elasticitetsmodulen (framförallt hos GFRP) att man i vissa tillämpningar kan behöva använda en större volym FRP-material vid ersättning av stål, något som till viss del reducerar den förra miljöfördelen. FRP-material tillverkning kräver ej så stora investeringar och kan göras i mindre skala på många platser med mindre transporter som följd.

Beträffande **byggnadstekniska aspekter** så tål FRP material miljöer där stål inte

är resistent. Dock finns miljöer där FRP-materialen har problem och måste skyddas. Sådana miljöer är mycket alkaliska, där starkt solljus råder och vid högre temperaturer och brand. Vid temperaturer över glasomvandlingstemperaturen T_g som är olika för olika fiberkompositer förändrar sig materialegenskaperna radikalt. Det är nödvändigt att känna denna temperatur vid projektering och byggnation. Om FRP-materialen används på lämpligt sätt i **bruksstadiet** kan underhållsintervallerna och antalet reparationer minskas och detta är fördelaktigt ur LCA synpunkt. Det är relativt enkelt att reparera FRP-material i de flesta fall.

6.2 Återvinning av FRP

Fram till i mitten av 90-talet förekom ingen återvinning av armerade plaster i Sverige. Anledningen var bl a materialets relativt långa livslängd. Trenden är idag att krav och regler med avseende på miljöpåverkan kommer att skärpas. Deponiavgifter kommer att höjas.

Materialåtervinning kan vara primär då den uttjänta produkten används inom ett liknande användningsområde. Vid sekundär återvinning utnyttjas produkten som delmaterial till en ny produkt.

Till FRP armering används normalt en hårdplast som är tvärbunden och därmed inte kan omsmältas. Möjlig återvinning kan göras genom att fiberkompositer mals ner till lämplig fraktion och därefter används som fyllmedel/armering i nya plastprodukter

Vid **primär återvinning** kommer det återvunna FRP-materialet normalt få lägre kvalitet än ny tillverkat FRP-material, då det inte kan uteslutas att skador uppkommer vid nedmonteringen. FRP-materialet kan komma till användning som produkter med reducerade kvalitetskrav.

Vid **sekundär återvinning** av fiberkompositer mals/krossas materialet till önskad fraktion och används därefter som armering eller fyllmedel i plaster. Vid vissa tillfällen kan fiberkompositen fragmenteras försiktigt varvid fibrer kan återvinnas från produkten.

Vid **råvaruåtervinning** nedbryts det polymera materialet till lågmolekylära komponenter som sedan kan användas för tillverkning av nya plastprodukter. Emellertid är många FRP-material kemiskt mycket stabila vilket försvårar nedbrytning.

FRP-polymer kan brännas och energi utvinns, då den innehåller ungefär lika mycket energi som råolja (ca. 40 MJ/kg). Förbränning av plastavfall har i vissa sammanhang kritiserats eftersom en ofullständig förbränning kan ge upphov till dioxiner och andra klorerande aromatiska kolväten. Dock finns undersökningar som visar att förbränning av blandade plastavfall är fullt möjlig med utsläpp som understiger de som fås vid förbränning av kol. Sådan förbränning kan åstadkommas vid användande av en så kallad fluidiserad bädd. Orsaken till de lägre utsläppen är att de flesta plasterna inte innehåller svavel eller kväve, till skillnad från de fossila bränslena, DeJke (2002).

Kolfibrer är ej brännbara. Glasfibrer kan smälta fast i ugnen. Aramidfiber är brännbara. Små mängder FRP-material (1-5%) inblanding vid bränning bör kunna tolereras.

Vid **deponi** av FRP-materialet, så är det ur kemisk synvinkel ett mycket stabilt material och bör därför inte bidra till att förgifta miljön.

6.3 Arbetsmiljö och hälsa

Beträffande hälsoaspekter har man ansett att själva fibermaterialet är ofarligt. Man måste dock skydda sig mot kontakt med vissa matrisplaster samt mot inandning av ångor vid tillverkningen. Det finns ställda krav och utvecklade tekniker för detta. Kompositer är ofarliga i oskadat skikt. Men om kompositen är söndertrasad, har brunnit eller brinner eller både och då frigörs damm, finfördelad fiberkomposit, som kan inandas och bli kvar i kroppen och som i farlighet likställs med asbest. Detta gäller främst kolfiberkompositer, Rådelius (2002). Glasfiber brister med spets som kan sticka in i människokroppen och fastna. Dock blir därvid fiberlängden större än 13 µm. Fibern kan därför inte hålla sig svävande och dras in i andningsorganen.

6.4 Lagar

Kemikaliestrategi för giftfri miljö (MJU15)

Riksdagen beslutade om fem delmål under miljö kvalitetsmålet Giftfri miljö. De fem delmålen avser kunskap om kemiska ämnens hälso- och miljöegenskaper, miljö- och hälsoinformation om varor, utfasning av särskilt farliga ämnen, fortlöpande minskning av hälso- och miljöriskerna med kemikalier samt riktvärden för miljö kvalitet. Giftfri miljö är ett av 15 miljö kvalitetsmål som riksdagen beslutade om våren 1999 (se 1998/99: MJU6).

Kemikaliestrategi för giftfri miljö

Proposition 2000/01:65

6.5 Referenser

Dejke V., (2002), "Fiberkompositer (FRP) för betongkonstruktioner, kapitel 10", Svenska betongföreningens rapportserie, rapport nr 9. Stockholm 2002.pp. 121-125.

fédération internationale du béton, fib, TG 9.3, Winkler, "FRP reinforcement for concrete structures", Chapter 2 Material characteristics, Recyclability, 20/3-2000.

Pettersson J (1994) (SICOMP), Hedlund-Åström, A., (KTH-ILK), Skrifvars,

M., (Neste Oy), "Återvinning av Hårdplastkompositer". SICOMP teknisk

rapport, 95-005, Juni 1994.

Reinink, A.(1993) "Chemical recycling – back to feedstock". Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications, Vol. 20, nr. 5, 1993. p. 259-262.

Rådelius M-L (2002, "Skadat kompositmaterial lika farligt som asbest". Dagens forskning 2 – Nyheter, Stockholm 8-19 mars 2002.

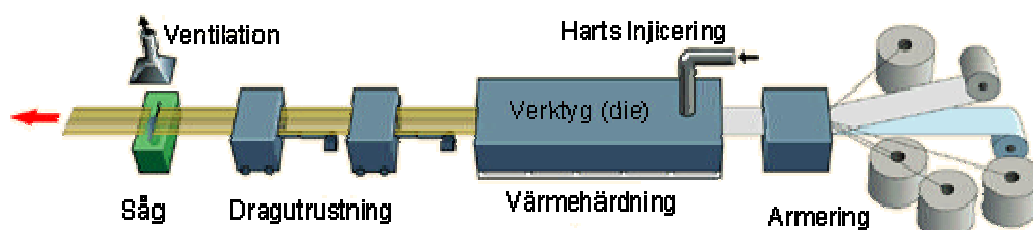
7 Processer och produkter, kostnadsjämförelser

7.1 Inledning

Det finns åtskilliga metoder för tillverkning av fiberkompositer, allt från enkla handuppläggningsmetoder till avancerade med komplicerade utrustningar. Här ges endast en övergripande metodbeskrivning. Vissa av de beskrivna metoderna används för produkter inom byggnadsindustrin. En kontinuerlig utveckling medför också att flera av tillverkningsmetoderna kan anpassas för produkter som är knutna till byggnadsindustrin.

7.2 Profildragning

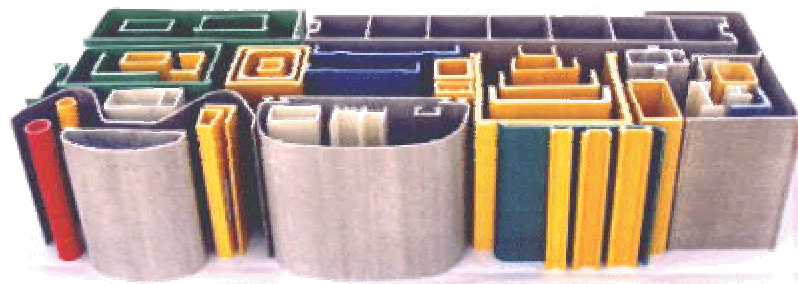
Profildragning (ibland sägs pultrudering av eng. pull-trusion), är en process för att tillverka kontinuerliga längder av samma profil. Kontinuerliga profiler tillverkas genom att fiberspolar eller i vissa fall mattor placeras på speciella positioner och matas genom maskinen. Fibern impregneras i ett hartsbad och dras med en för ändamålet avsedd utrustning in i ett sk verktyg (die). I verktyget formas och värmehärdas den kontinuerliga profilen. Profilen kapas därefter i avsedda längder. Tillverknings-processen visas i figur 7.1 och 7.2. Exempel på profildragna profiler visas i figur 7.3.



Figur 7.1 Schematisk framställning av profildragningsprocessen. (Bild: Fiberline A/S, Danmark).



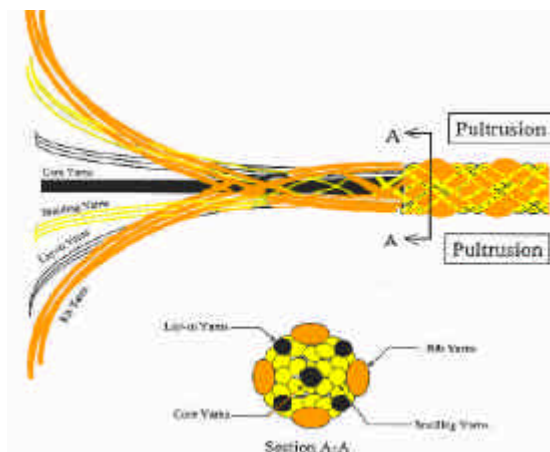
Figur 7.2 Profildragningsmaskin. (Bild: Fiberline A/S, Danmark).



Figur 7.3 Exempel på profildragna fiberkompositer. (Spare Composites Co.,Ltd.)

7.3 Flätning

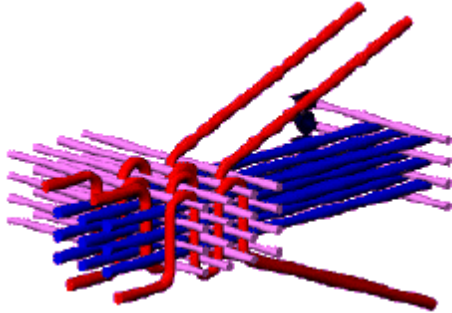
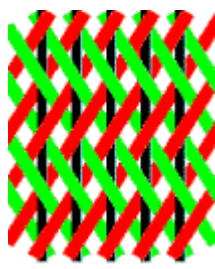
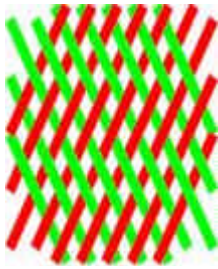
Flätning (eng. braiding) innebär att flera fibertrådar eller fiberknippen sammanbinds i en integrerad struktur. Två- och treaxlig samt tredimensionell flätning är möjlig vilket då medger komplexa former på kompositen. I figur 7.4 visas principiellt hur flätning går till. Exempel på flätade produkter för byggindustrin är armeringsstänger. När fibrerna vinklas mot kraftriktningen i komposit-konstruktionen kommer hållfastheten och elasticitetsmodulen att bli lägre än om fibrerna ligger i kraftriktningen. I figur 7.5 visas en flätad armeringsstång av aramidfiber.



Figur 7.4 Flätning av seg hybrid FRP stång (D-H-FRP) med efterföljande profildragning enligt: Harris, Hampton, and Ko(2002).



Figur 7.5 Flätad japansk FiBRA armeringsstång. (Foto: R. Tepfers).



Figur 7.6

Figur 7.7

Figur 7.8

Biaxialt flätad väv.

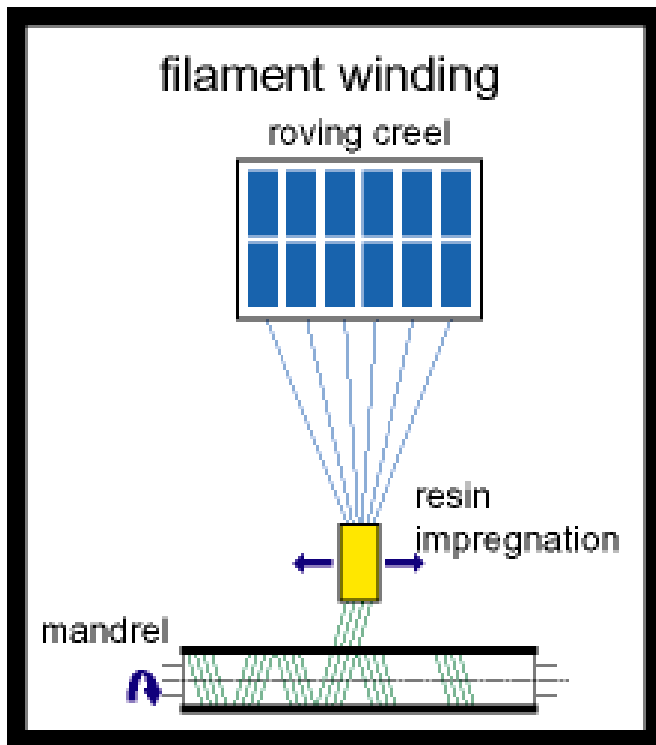
Triaxialt flätad väv.

3-D flätad väv.

Enligt: Alliance of the FRP Composites Industry.

7.4 Lindning

Lindning (eng. filament winding) benämner man den process där impregnerade parallella fibrer lindas kring en roterande cylinder, figur 7.9. De impregnerade fibrerna förs fram och tillbaka över cylindern. En maskin för fiberlindning visas i figur 7.10. En kontrollerbar tjocklek, lindningsvinkel och fibervolymförhållande kan bibehållas under processen. Exempel på lindade produkter är rör av olika dimensioner och kvalitet. I figur 7.11 visas en turbinvinge till vindkraftverk som tillverkas genom fiberlindning.



Figur 7.9. Lindning av cylindriskt fiberkompositrör. (Saint-Gobain, Vertrote).



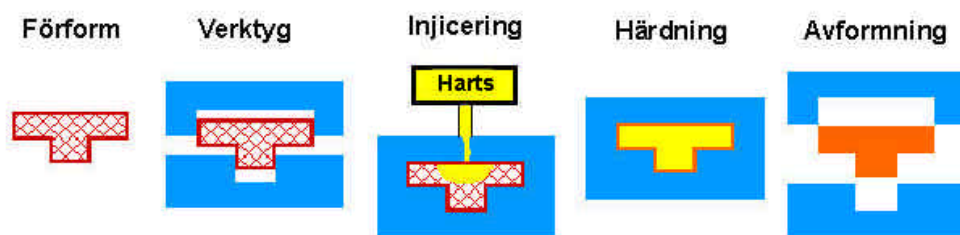
Figur 7.10. Fiberlindningsmaskin. (Entec Composite Machines, Inc, a Zoltec Company).



Figur 7.11. Turbinvinge till vindkraftverk tillverkas med bland annat fiberlindning, (Entec Composite Machines, Inc a Zoltec Company).

7.5 Pressformning

Pressformning (eng. molding) innebär att impregnerade fibrer sammansatta till önskad form och placerade i avsedd riktning placeras i en kraftig form. Sedan impregneras fibrerna med harts och alltsammans sammanpressas med ett mekaniskt tryck och tillåts härda under värme. Den enklaste tekniken är användandet av hydrauliska pressar. I figur 7.12 visas först hur man tillverkar en form. Denna form ligger därefter till grund för ett sk verktyg. När verktyget är färdigt placeras fiber och eventuellt distansmaterial i formen. Harts injiceras (i vissa fall kan förimpregnerade vävar så kallade prepregs användas) och härdning sker under höjd temperatur och tryck. Efter härdning borttages formen och den tillverkande produkten kan lossgöras.



Figur 7.12. Pressformningsprocessen. (Bild: B. Täljsten).

Tekniken är vanlig inom bilindustrin men det finns också detaljer för byggindustrin som man kan tillverka med denna teknik. Ett exempel är förtillverkade formar eller förtillverkade element. Profildragning av armeringsstång kan kombineras med efterföljande pressformning av stångens ytdeformationer - kammar. Så tillverkas till exempel GFRP-stången C-BAR.

7.6 Handuppläggning

Handuppläggning (eng. hand-lay up) är en relativt primitiv, men vanlig, tillverkningsprocess vilken även används inom båt-, flyg- och bilindustrin. Kort innebär det att en form tillverkas, formen bestryks med ett släppmedel och ofta placeras en gelcoat (yttre estetiskt och skyddande lager), direkt mot släppmedlet. Därefter appliceras harts på ytan och antingen läggs fiber dit för hand eller sprutas. Korta fibrer blandas med långa och i vissa fall hela mattor. Det finns ett stort antal olika typer av produkter tillverkade med denna teknik men de mest kända är båtar av olika form och storlek. Handuppläggningsförfarandet visas i figur 7.13.



Figur 7.13 A

Lägg ut en polyesterduk för att få släppning från formen. Eventuellt lägg ett gelcoatlager på duken.



Figur 7.13 B

Sprid ett jämnt lager med harts.



Figur 7.13 C

Lägg ut och positionera ett lager glasfiberväv.



Figur 7.13 D

Tillför mera harts.



Figur 7.13 E

Lägg ut en matta med choppade fibrer.



Figur7.13 F

Tillför mera harts och lägg ut nästa matta.



Figur 7.13 G

Tillför lite mera harts och lägg ut fiberväv.



Figur 7.13 H

Rulla noggrant fiberväven in i hartsen



Figur 7.13 I

Lägg ut matta med choppade fibrer.



Figur 7.13 J

Avsluta med vaxbeläggning.

Alla figurerna 7.13 A-J är hämtade från The Dow Chemical Company, Derakane fabrication. (1995-2002). Internetsida.



Figur 7.14 Plastbåt tillverkad genom handuppläggning. (Balux Marin AB).

I princip är de förstärkningsarbeten som genomförs i byggindustrin genomförda med handuppläggningsprocessen, i figur 7.15 visas hur en betongbro förstärks med kolfiberväv. Systemet som används här heter BPE[®] Composite och består av en ensriktad väv tillsammans med primer, spackel och lim.

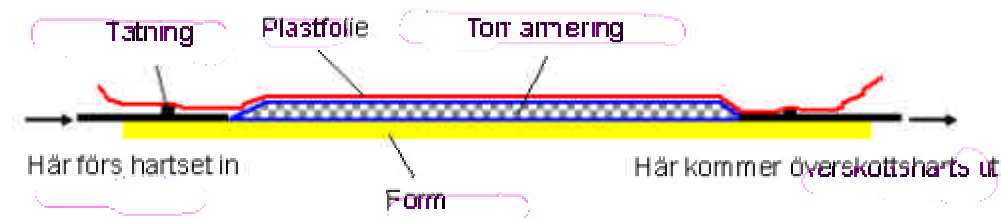


Figur 7.15 Förstärkning av järnvägsbro med kolfiberväv. (Foto: Spännarmering AB).

7.7 Vakuuminjicering

Med vakuuminjicering (vacuum injection) kan man tillverka färdiga kompositer med en förhållandevis miljövänlig process, då hartsen finns i slutet system. Korfattat innebär metoden att man tillverkar en form för den produkt man önskar ha. I formen rollar man därefter på ett släppmedel. Väv placeras i önskade riktningar och även distansmaterial (cellplast eller balsaträ) och ny väv kan monteras. Ovanpå det sista lagret, som oftast också är insidan av

kompositen läggs en tunn plastfolie. Plastfolien tätar mot formens kanter och vakuum appliceras. Vid några ställen låter man hartset (limmet) flyta in under plastfolien genom slangar som på grund av tryckskillnaden rör sig mot en öppning, ett litet hål, där luft sugas ut. När hela fibern och distansmaterialet väts med hartset så kan temperaturen höjas för snabbare härdning. I figur 7.16 visas principiellt hur vakuuminjicering utförs och i figur 7.17 visas en pågående vakuuminjicering av ett båtskrov.



Figur 7.16 Princip för vakuuminjicering. (Bild: B. Täljsten).

Tekniken är inte så vanlig när det gäller tillämpningar inom byggindustrin, men man skulle kunna tänka sig att stora bärande konstruktionsdelar tillverkas på detta sätt när man kräver hög noggrannhet och bra styrning av harts och fiberåtgång, t ex brodäck och kvarsittande formar.



Clear tubes connect the resin distribution manifold, on the left side, to the resin feeder lines (dark-colored lines) along the hull half.

Figur 7.17 Vakuuminjicering. Genomskinliga plaströr tillför harts från vänster och fördelar till kanaler (mörka) genom vilka hartsen fördelar sig i båtens skrov. (Interplastic Corporation, <http://www.interplastic.com>).

7.8 Kostnadsjämförelser

Det är svårt att göra kostnadsjämförelser då teknikerna och materialen inte är sinsemellan utbytbara utan att påverka kvaliteten. Många produkter kräver sin egen teknik. Sålunda för tillverkning av armeringsstänger och balkprofiler kan bara pressformning komma ifråga.

Vanligen görs materialvalet under intimt samarbete av inte bara konstruktören och materialspecialisten, utan även av tillverkare och inköpsagenter. Besparing skall göras där besparing kan göras. Om svaret är ”ja” på någon av nedanstående tio frågor är den gjorda materialvalsundersökningen ofullständig. Varje material, varje konstruktionsdel, varje arbetsmoment måste klara denna test.

- 1) Kan vi vara utan materialet?
- 2) Klarar det mer än vi fordrar?
- 3) Kostar det mer än det är värt?
- 4) Finns det något annat som har bättre funktion?
- 5) Kan det tillverkas med en billigare metod?
- 6) Kan ett standardiserat tillverkningsförfarande användas?
- 7) Med hänsyn till de använda mängderna, kan en billigare tillverkningsmetod användas?
- 8) Är det dyrare än kostnaderna för skäligt arbete, råmaterial, administration och förtjänst?
- 9) Kan någon annan leverera det utan att rubba beroendeförhållanden?
- 10) Om det vore Dina pengar, skulle Du vägra att köpa det eftersom det kostar för mycket?

Vid serieproduktion bör man:

- 1) Omvärdera det valda materialet;
- 2) Omvärdera materialets utformning;
- 3) Omkonstruera och utnyttja materialegenskaperna fullständigt.

I många situationer kan besparingar göras genom att bara byta material, och inte vidta andra åtgärder. Ibland kan valet mellan material bestämmas av fluktuerande marknadspriser som beror på lagerhållning och efterfrågan. Ofta kan samma besparingar göras genom att förändra tillverkningsprocessen eller utförandeformen för materialet.

7.9 Referenser

Svenska Betongföreningen: (2002). Arbetsgrup: Tepfers. R. (odförande), Karlsson M., Carolin A., Claesson Jonsson Ch., Dejke V., Täljsten B., Utsi S., Wiberg A.: “ Fiberkompositer (FRP) för betongkonstruktioner”. Betongrapport nr 9. ISSN 1102-3341, ISRN SBF-RS--9--SE, ISBN 91-973445-2-4. Stockholm i februari 2002. p. 171.

Harry G. Harris, Francis P. Hampton, and Frank K. Ko. (2002), “ Creep, stress rupture, and behavior of a ductile hybrid fiber reinforced polymer (D-H-FRP)

for concrete structures, Drexel University. Internet.

*Alliance of the FRP Composites Industry, 600 Mamaroneck Avenue, 4th Floor
Harrison, NY 10528. <http://www.mdacomposites.org/materials.htm>.*

8 Bearbetning och sammanfogning

8.1 Bearbetning

Bearbetning av komponenter med glasfiber som armering (GFRP) är som regel enkel och kan jämföras med bearbetning av träprodukter. Man kan använda samma typ av handverktyg som för trä, t.ex. för att kapa, borra, slipa, hyvla och fräsa. Sågklingor, borrar etc. för metallbearbetning bör dock användas. Vid stora serier rekommenderas diamantbelagda sågklingor, respektive specialbollar, för att erhålla släta snitt och hål utan grader och för att undvika delaminering av materialet.

Med armering av kolfiber får man räkna med ett ökat slitage på verktygen och behovet av diamantbelagda sågklingor, specialbollar etc. ökar. Då komponenter av kolfiberarmerade polymerer (CFRP) används krävs dessutom ofta högre precision vid bearbetningen, till exempel att sågsnitt följer armeringsriktningen, och CFRP är känsligare för t.ex. delaminering. Komponenter armerade med aramidfiber (AFRP) är generellt sett svårare att bearbeta mekaniskt än komponenter med glas- eller kolfibrer.

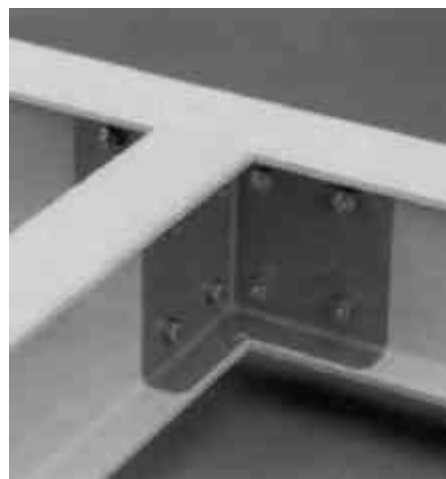
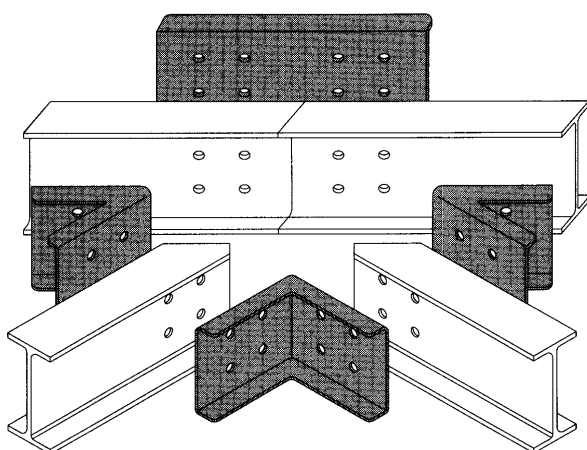
Vid industriell tillverkning, och då högre krav ställs på precision och skadefrihet vid bearbetningen används även metoder som vattenjet och laserskärning. Med vattenjet undviks den upphettning av materialet som är förknippade med övriga metoder. Med vattenjet kan relativt tjocka laminat (upp till åtminstone 20 mm) av glas- eller aramidfiberarmerade kompositer skäras, medan betydligt mindre tjocklekar kan skäras i kolfiber. Med hänsyn till hur mycket delmaterialens värmeledningsförmåga skiljer sig är laserskärning olika effektivt för olika typer av fiberarmerade polymerer, och är mest lämpad för aramid-, och minst lämpad för kolfiberarmerade kompositer.

Det damm som bildas vid bearbetning anses inte vara direkt hälsovådligt, åtminstone inte för glasfiberarmerade kompositer, men det rekommenderas ändå att sörja för god ventilation och att undvika hudkontakt.

8.2 Sammanfogning

Kraftöverförande fogar mellan komponenter av fiberarmerade kompositer sker idag huvudsakligen genom skruvförband eller genom sammanplastning. Sammanfogning genom limning ökar emellertid alltmer och förutspås bli mycket vanligt i framtiden. Där det är fråga om överföring av mycket stora krafter integreras ofta ståldetaljer direkt i komponenten av FRP. För sammanfogning av sandwichpaneler är det inte ovanligt att de limmas samman via t.ex. en aluminium- eller FRP-profil med spår för panelen.

Skruvförband utförs på i princip samma sätt som vid stålbyggnad, men det är vanligt att beslag används för att förhindra spänningskoncentrationer under skruvskallar etc., se figur 8.1. Det är vanligt att skruv och beslag väljs av rostfritt stål för att matcha grundmaterialets goda korrosions- och kemikaliemotstånd. Denna typ av förband finns som standardförband för t.ex. dragna (pultruderade) profiler.



Figur 8.1. Exempel på beslag och skruvförband (från Fiberline (1995)).

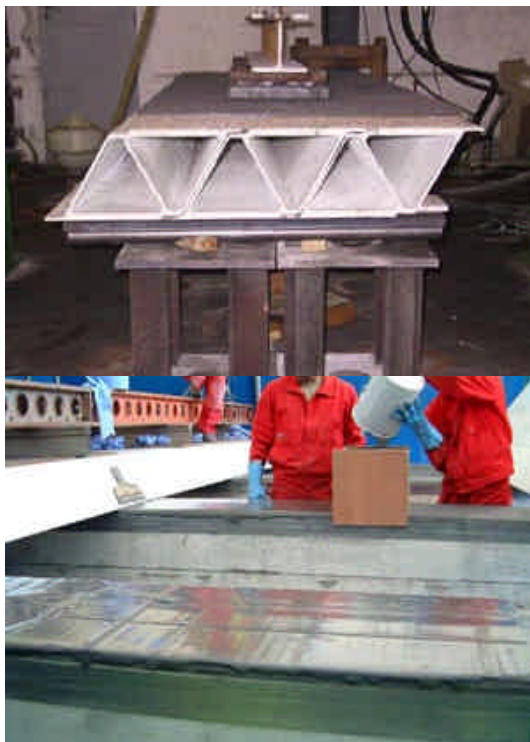
Sammanplastning innebär att delarna fogas samman genom att plastas ihop med hjälp av extra överlappande lager av fibrer och matrismaterial. Detta sker oftast genom handuppläggning. Efter att ytorna på de delar som skall sammanfogas preparerats byggs skarven successivt upp genom att allt större fibermattor successivt plastas till de båda delarna över fogen.

En limfog överför krafter huvudsakligen genom skjuvning och bör utformas för denna funktion. I en limfog uppstår som regel stora spänningskoncentrationer i fogens ändar, vilket kräver ett relativt segt material i limmet, kombinerat med möjlighet till spänningsomlagringar inom limfogen. Det är viktigt att limfogen utformas så att man undviker dragpåkänningar, till exempel till följd av deformationer i fogområdet. Risken för fläkbrott är annars stor.

De vanligaste limmen är epoxi-baserade, och utformas för att vara relativt sega (jämfört med matrismaterialet i kompositen), med stor brottenergi, goda utmattningssegenskaper och med god brottseghet även för kombinerad drag- och skjuvpåkänning. Detta får till följd att de blir mindre styva, får högre benägenhet att krypa och blir mer känsliga för temperaturförändringar och fukt än matrismaterialet i kompositen.

Limfogar utnyttjas idag inte i primära kraftöverförande fogar. I sådana fogar, där konstruktionens bärförmåga och stabilitet är beroende av fogens funktion, används som regel skruvförband, eventuellt i kombination med limning för ökad styvhet. Tveksamheten att förlita sig helt på limfogar i sådana fall beror delvis på att de kan vara känsliga för nedbrytning och långtidseffekter, men också på svårigheterna att säkerställa att avsett påkänningstillstånd verkligen uppträder i fogen.

För sammanfogning av stora kontaktytor mellan relativt sett tunna komponenter kan rena limfogar utgöra ett bra alternativ. De kan också vara fördelaktiga för att skapa samverkan mellan komponenter där konstruktionens bärförmåga primärt inte är avhängig limfogen. Ett sådant exempel visas i figur 8.2 där en vägbro av FRP byggs upp genom sammanlimning av pultruderade profiler till ett brodäck, vilket i sin tur limmas till huvudbalkarna.



Figur 8.2. Exempel på limförband för vägbro av FRP. Bron är utvecklad och byggd med stöd av ett europeiskt forskningsprogram, ASSET (bilder från projektets hemsida, Mouchel (2002)).

8.3 Referenser

- Damberg H. (red) (2001): *Komposithandboken - Polymerbaserade fiberkompositer*. VI, Sveriges Verkstadsindustrier och Industrilitteratur AB, Stockholm, 447 sid.
- Fiberline (1995): *Fiberline Designmanual*, Fiberline Composites A/S., Kolding, Danmark.
- Godonou P. (2002): *Preliminary Design and Analysis of a Pedestrian FRP bridge deck*. Licentiate thesis. Department of Civil and mining Engineering, Luleå University of Technology, 2002:18, Luleå, 205 sid.
- Mouchel (2002): Hemsida för Brite Euram forskningsprojekt ASSET (2002-12-02),
http://xnet.mouchel.com/QuickPlace/rtcomp/main.nsf/h_Toc/4df38292d748069d0525670800167212/?OpenDocument#Top
- Åström B. T. (1997): *Manufacturing of Polymer Composites*. Chapman and Hall, London, sid 307-349.