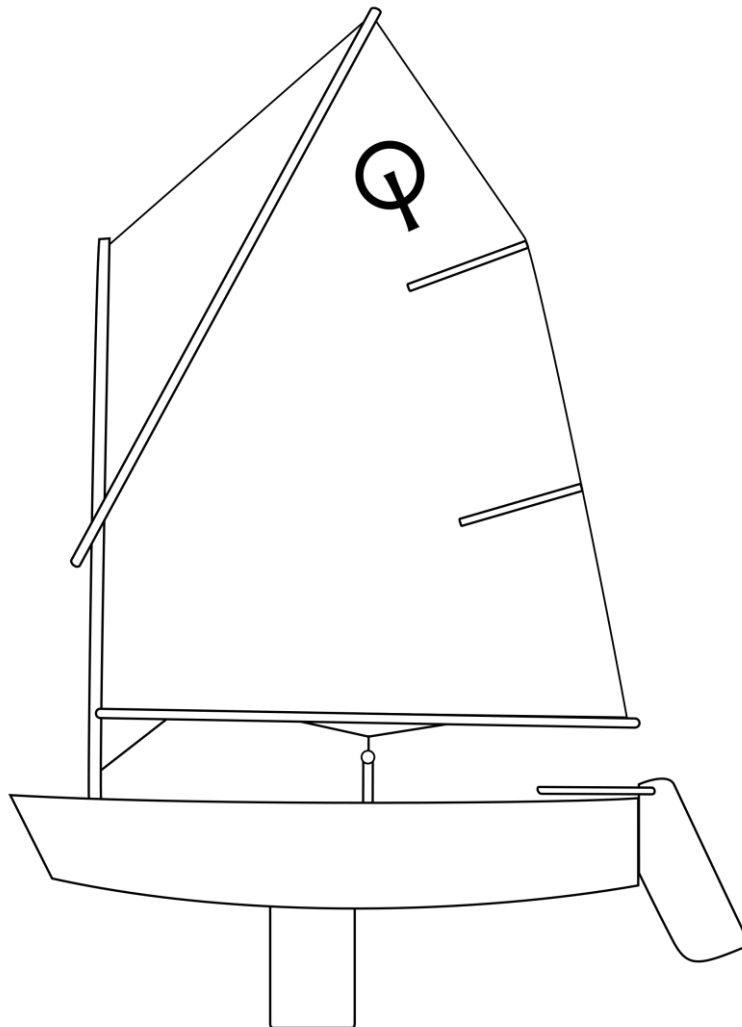




CHALMERS



Cellulosafiberförstärkta plastbåtar **Cellulose fibre-reinforced plastic boats**

Kandidatarbete inom Maskinteknik

Jonatan Boberg
Fereshteh Fasihi
Max Forkman
Hampus Martinsson
Patrik Stureson
Johannes Varosy

Examinator: Mikael Rigdahl

FÖRORD

Detta är ett kandidatarbete på Chalmers tekniska högskola vid institutionen för Material- och tillverkningsteknik. De medverkande är studenter på civilingenjörsutbildningarna Maskinteknik och Kemiteknik. Kandidatarbetet omfattar 15 högskolepoäng och genomförs under våren 2015.

Stort tack riktas till SSPA, SCA, Volvo Cars och institutionen för Material- och Tillverkningsteknik för deras hjälp och expertis. Ett särskilt tack till följande personer; Mikael Rigdahl, Britta Mattsson, John McVeagh och Christian Finnsgård för all vägledning och tid de lagt ned under kandidatarbetet.

Figuren på framsidan visar en modell över en optimistjolle
(Bild: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optimist_dinghy.svg?uselang=sv).

SAMMANDRAG

Idag används cellulosa främst inom pappersindustrin men användningen av cellulosafiber som förstärkningselement i kompositmaterial har på senare år ökat. Cellulosa i fiberform är speciellt intressant då det finns en möjlighet att skapa relativt styva kompositer med låg densitet som dessutom är ett mer miljövänligt alternativ än andra kompositer.

Syftet med arbetet är att undersöka hur väl cellulosa passar som fibermaterial i en komposit med epoxi och huruvida materialet lämpar sig i ett båtskrov till en optimistjolle. Kompositens egenskaper testas med avseende på mekaniska egenskaper, vattenbeständighet och UV-beständighet. Resultaten jämförs och analyseras med framtagna teoretisk data utifrån omfattande litteraturstudier.

Arbetet består av två olika delar, en teoretisk- och en experimentell del. I den teoretiska delen beskrivs cellulosaens olika beståndsdelar och dess egenskaper. I den experimentella delen har dragprovs-, slagseghets-, vattenabsorptions- och UV-beständighetstester genomförts på kompositen. Resultaten från drag- och slagseghetsproven visade att kompositen med 25 viktprocent (wt%) cellulosa och resten epoxi hade en högre elasticitetsmodul men en lägre brottgräns jämfört med 43 wt% cellulosa. Kompositen med 43 wt% cellulosa var alltså segare och klarade en större teknisk töjning. Testerna med vattenabsorption och UV-beständighet visade på en stor förändring i mekaniska egenskaper. Kompositen absorberade mer vatten desto mer cellulosa den innehöll och gulnade markant efter en relativt kort tid i koncentrerat UV-ljus.

De viktiga avgränsningarna i projektet var att endast dragprovs- slagseghets-, vattenabsorptions- och UV-beständighetstester genomfördes på prover med olika sammansättningar. Detta på grund av den tidsbegränsning som kandidatarbetet medför. All tillverkning sker av och hos SSPA. En annan avgränsning är att materialet som använts endast bestod av epoxi och cellulosa och de egenskaper som undersöktes här var främst mekaniska egenskaper och dimensionsstabilitet.

Större delen av arbetet utfördes på Chalmers Tekniska Högskola i samarbete med SSPA, SCA och Volvo Cars.

ABSTRACT

Usage of cellulose as a reinforcement in composites becomes more and more common due to the fact that it has low density and is a more environmental friendly alternative than other composites. Today it has mostly been used in paper industry and in this case it is proposed as reinforcement in composites. Cellulose as a fiber is interesting due to the possibility to create relatively stiff composites with low density.

The purpose of this bachelor thesis is to examine whether cellulose is appropriate as a fiber in a composite together with epoxy and analyze if the material is suitable as construction material for a small boat hull. The composite's mechanical properties, UV-resistance and its water-resistance were measured through various tests. The results were compared to data from literature.

The project contains two different parts, one theoretical and one experimental. The composite contains different components and their properties have been examined in the theoretical part. In the experimental part, tensile, Charpy impact, water absorption and UV-resistance tests were performed. The results from the tensile and impact tests show that the composite with 25 percentage by weight (wt%) cellulose had higher Young's modulus but a lower tensile strength compared to the one with 43 wt% cellulose. This means that the composite with 43 wt% is more elastic and can withstand a greater elongation. Moreover tests of the UV-resistance and water absorption showed that the material changes its appearance and mechanical properties due to the exposure of water and UV-light. A higher cellulose concentration resulted in a higher absorption of water and worse mechanical properties. When the material was exposed to UV-light it became yellow over time.

The most important restrictions in this project were to limit the practical tests to tensile, impact, water absorption and UV-resistance tests. These restrictions were made due to the time limit of the project. One other restriction applied to the material in such a way that the composite only included cellulose and epoxy. The analysis of the composite focused on the mechanical properties and the changes in dimensions that may occur.

The main part of the project was performed at Chalmers University of Technology in cooperation with SSPA, SCA and Volvo Cars.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	i
SAMMANDRAG	i
ABSTRACT.....	iii
INNEHÅLLSFÖRTECKNING.....	iv
BETECKNINGAR.....	vi
1. INLEDNING	1
1.1 Syfte.....	1
1.2 Avgränsningar	2
1.3 Precisering av frågeställning.....	2
1.4 Rapportens disposition.....	2
2. METOD	3
3. FIBER	6
3.1 Beståndsdelar & uppbyggnad	6
3.1.1 Cellulosa	6
3.1.2 Hemicellulosa	6
3.1.3 Lignin.....	6
3.1.4 Uppbyggnad.....	7
3.2 Naturfibers mekaniska egenskaper	7
3.2.1 Cellulosahalt	7
3.2.2 Fibrillvinkel	8
3.2.3 Polymerisationsgrad (molekylvikt).....	9
3.2.4 Fiberlängdens & fiberfördelningens inverkan	9
3.3 Cellulosas vidhäftningsförmåga & effekter av vattenabsorption.....	9
3.3.1 Ytbehandling.....	10
3.4 Framtidsaspekter med nanocellulosa	11
4. MATRIS.....	12
4.1 Härdplaster som matrismaterial	12
4.2 Epoxi som matrismaterial	13
4.3 Aminer & amider som härdare	14
4.4 Karakteristiska egenskaper hos epoxiplast	16
5. KOMPOSITER INNEHÅLLANDE CELLULOSAFIBRER.....	18
5.1 Volymförhållandet fiber & matris	19
5.2 Vidhäftningsförmåga	19
5.3 Kompositens vattenabsorption.....	19
5.4 Effekten av volymandelen cellulosa fiber	19
5.4.1 Mekaniska egenskaper	19
5.4.2 Kompositernas vattenabsorptionsförmåga	20
5.5 Fibermodifieringar och deras effekt på böjstyvheten	20
6. TILLVERKNING, ÅTERVINNING & ARBETSMILJÖ.....	22
6.1 Tillverkning	22
6.1.1 Härdningsgrad.....	22
6.1.2 Viskositet	22
6.1.3 Krympning.....	22
6.1.4 Tomrum eller porer	22
6.1.5 Form.....	23
6.2 Återvinning	25
6.2.1 Mikrovågspyrolys	25
6.3 Arbetsmiljö	26
7. RESULTAT	28
7.1 Teoretiska beräkningar av kompositens elasticitetsmodul	28
7.1.1 Teoretiska beräkningar av kompositens elasticitetsmodul	28
7.2 Drag- & slagprov	29

7.3 UV-ljus påverkan på materialet	34
7.4 Optimistjollen	36
8. DISKUSSION	36
8.1 Jämförelse av teoretiska beräkningar för cellulosa & glasfiber	37
8.2 Jämförelse av teoretiska beräkningar & praktiska tester av cellulosa	37
8.3 Jämförelse av cellulosa före & efter vattenbad	38
8.4 Jämförelse av epoxi före & efter vattenbad	39
8.5 Tillverkning	40
8.6 Analys av åldringssimulering i Weather-Ometer	40
9. SLUTSATS	42
9.1 Trovärdighetsanalys	42
9.2 Rekommendationer till fortsatt arbete	43
REFERENSER.....	44
BILAGOR.....	I
Bilaga A - Prioriteringslista	I
Bilaga B - Datablad från NM Epoxi	II

BETECKNINGAR

CNC – Crystalline nanocellulose

DGEBA CY 205 – Diglycidyleter av bisfenol-A

DP – Polymerisationsgrad, ”degree of polymerisation”

E_c – Elasticitetsmodul för komposit

E_{cp} – Elasticitetsmodul för komposit parallellt med fibrer

E_{ct} – Elasticitetsmodul för komposit tvärs fibrer

E_f – Elasticitetsmodul för fiber

E_m – Elasticitetsmodul för matris

f_v – Fibersvolym

HDT – Heat deflection temperature

kpcm – Kilopondcentimeter

MFR – Kompositer förstärkta med fibermatta

m_v – Matrisvolym

N – Newton

NH_2 – Aminogrupp

NH_3 – Ammoniak

Pa – Pascal

PFR – Partiklar som fiberförstärkning

PP – Polypropen

SFR – Kortfiberförstärkta kompositer

TETA – Tri etylen tetraamin

T_g – Glasomvandlingstemperatur

V_f – Volymfraktion

w_f – Fiberns vikt

w_m – Matrisens vikt

wt% – Viktprocent

ρ_f – Fiberns densitet

ρ_m – Matrisens densitet

φ – Volymandel fiber

1. INLEDNING

Cellulosa har länge använts främst inom pappersindustrin. Men med en ökad användning av elektroniska böcker och tidskrifter eftersöks idag nya användningsområden för cellulosa. Här har bland annat föreslagits att cellulosafibern skulle kunna vara lämplig som förstärkningselement i kompositmaterial.

Kompositmaterial består normalt av två material med olika egenskaper. Dels fibermaterial, ofta glas- eller kolfiber, som förstärker kompositen, dels den så kallade matrisen, ofta en hårdplast, som binder ihop materialet. Fördelen med kompositmaterial ligger i att det går att kombinera olika materials egenskaper för att erhålla ett nytt, bättre material [1].

Cellulosa i fiberform är särskilt intressant då det finns en möjlighet att skapa relativt styva kompositer med låg densitet. Cellulosafiber har en densitet på cirka $1,5 \text{ g/cm}^3$, vilket är avsevärt mindre än många av de fibermaterial som används mest i industrin idag. Glasfiber, som är det vanligaste fibermaterialet, har en densitet på cirka $2,5 \text{ g/cm}^3$ [2]. Att använda sig av cellulosa skulle alltså möjliggöra en viktminskning av produkter som idag innehåller glasfiber.

Framställning av cellulosafiber i större mängder går relativt snabbt och är lindrigt mot de verktyg som används i processen. Både glas och kol är hårda material som kräver en hög arbetstemperatur, vilket kan leda till betydande slitage av verktygen. Cellulosaframställningen kräver inte en lika hög arbetstemperatur med mindre slitage som följd. Detsamma gäller även vid tillverkningen av motsvarande kompositmaterial. Sammantaget kan detta leda till en mer effektiv tillverkning då cellulosafiber används [3]. Cellulosafiberförstärkta kompositer används inom fler och fler branscher. Bland annat finns sådana kompositer i paneler i bilar, högtalare och kontorsmaterial. En stor fördel här är att cellulosa är ett organiskt material som därmed går att återanvända och återvinna [4]. Cellulosa är alltså ett förnybart material som är tillgängligt i stora volymer vilket gör det gångbart både ur en ekonomisk och en miljömässig synvinkel. Till exempel kan fibrerna utvinnas ur spill från träd som använts till virke för husbyggnader och liknande. Ur det kvarvarande spillet separeras sedan fibrerna ut på kemisk väg [5], ibland kombinerat med en mekanisk behandling.

Cellulosafiber har hittills inte använts i kompositmaterial för att tillverka båtskrov, sannolikt beroende på att cellulosa normalt sett är fuktkänsligt. Genom att kapsla in fiber i en plast, eventuellt kompletterat med en kemisk behandling av fibermaterialet, är det tänkbart att denna fuktkänslighet kan motverkas. Härefter ligger den vetenskapliga utmaningen. Resultaten torde kunna appliceras på liknande produkter där fuktkänsligheten kan förväntas ge problem.

1.1 Syfte

Syftet med detta kandidatarbete är att genomföra en bred litteraturstudie av cellulosa som fibermaterial i en komposit med epoxi. Dessutom ska tester av mekaniska egenskaper genomföras på provstavar av materialet för både referenser, torra prover, och provstavar som legat i vattenbad. Den viktigaste aspekten att undersöka är huruvida eventuell vattenabsorption påverkar de mekaniska egenskaperna hos materialet. De mekaniska egenskaper som är viktiga i sammanhanget är styvhet, styrka, brottöjning och slagseghet. Resultaten ska ge vägledning vid byggandet av ett båtskrov i materialet.

1.2 Avgränsningar

Projektet avgränsas av att endast dragprov, slagseghetstest, vattenabsorption och UV-beständighet genomförs på de olika provstavarna. Anledningen till detta är den tidsbegränsning som finns fram till dess att projektet ska vara klart. Materialen som används är endast cellulosa och epoxi, alltså ingen blandning med andra typer av fibrer. De materialegenskaper som undersöks i detta projekt är främst mekaniska egenskaper och dimensionsstabilitet. Båten som byggs hos SSPA kommer att vara av typen optimistjolle och förhålla sig till uppsatta dimensioner för en sådan typ av båt. Tillverkningen av provstavar och båtskrov sköts enbart av SSPA på grund av sekretessbelagda projekt i deras verkstad som de inte vill att någon utomstående ska ha insyn i.

1.3 Precisering av frågeställning

Enligt kapitel 1.1 ska kandidatarbetet genomföra en grundläggande och bred litteraturstudie avseende en komposit av cellulosa och epoxi. Mer ingående åsyftas här att redovisa hur materialet påverkas av nedan listade delområden.

- Vattenabsorptionsförmåga
- Vidhäftningsförmåga
- Förändrade dimensioner
- Plastens spridningsförmåga på fibrerna
- Fibern/fibernetverket
- Matrisen
- UV-strålning
- Återvinning
- Tillverkningsmetoder
- Arbetsmiljö

Utifrån dessa delar ska en slutsats dras om huruvida cellulosa tillsammans med epoxi passar som material i ett båtskrov.

1.4 Rapportens disposition

I och med att en del av syftet är att genomföra en litteraturstudie utgår kapitlet teoretisk referensram. Detta kapitel ersätts av kapitlen 3-6 som går djupare in på tidigare forskning inom området. Det finns en mer grundläggande del i början av vart och ett av de fyra kapitlen för att sedan gå in mer på djupet kring nya metoder, principer och tidigare erfarenheter.

Efter de ingående teoridelarna kommer rapporten att beskriva resultaten från tester genomförda på provstavar för att sedan gå vidare med diskussioner och slutsatser baserade på teori tillsammans med de erhållna resultaten.

2. METOD

I början av projektet genomfördes en grundlig litteraturstudie utifrån den prioritetslista som togs fram till planeringsrapporten, se bilaga A. De delar som behandlas är fiber, matriser, kompositer, arbetsmiljö, återvinning och tillverkning. Denna litteraturstudie syftar till att lägga en grund till de tester som genomfördes i slutet av projektet. Projektet genomfördes parallellt med en grupp kemistudenter, som fokuserade än mer på strukturen hos materialet. Vid frågor som kommer upp gällande kemiska egenskaper hos materialet kommer en dialog föras, dels med denna kemigrupp och dels med handledare.

I samarbete med SSPA har fyra olika serier provstavar med olika materialsammansättning tagits fram. En serie innehållande 0 wt% cellulosafiber, två med 25 wt% samt en innehållande 43 wt%. Matris materialet hos provstavarna bestod av epoxiplast, se bilaga B. Anledningen till att det finns två serier med 25 wt% är att den första serien (serie 1) bedömdes ha för mycket porer och kunde göras bättre tillverkningsmässigt, därför tillverkades en ny serie (serie 2). Serie 1 sparades och testades för att se hur tillverkningstekniken påverkade materialets egenskaper.

En del av dessa provstavar lades i ett vattenbad på cirka 20 °C för att undersöka hur mycket vatten materialet absorberar. Provstavarna med 0 wt%, 25wt% (serie 2) och 43 wt% låg i vattnet under tre veckor. Proverna innehållande 25 wt% (serie 1) fiber låg i vatten under 6 veckor. Vattenbadet syftade till att få en uppfattning om hur materialet kommer att bete sig i den miljö som båtskrovet används i.

Tillsammans med Volvo Cars materialavdelning åldrades prover innehållande 25 wt% (serie 1) fiber i en Atlas Ci4000 Weather-Ometer, där de utsattes för stark UV-strålning och vattenstänk. Fyra prover testades i ca 100, 200, 300 respektive 400 timmar, där 500 timmar kan jämföras med den miljö som materialet utsätts för i Arizona under ett år. Andra prover lades i en fuktkammare, med relativ luftfuktighet kring 95 % och en temperatur på 38°C. Även detta syftar till att se hur miljön som materialet kommer att användas i påverkar dess egenskaper.

Den teoretiska styvheten hos kompositmaterialet beräknades för att senare kunna jämföras med den verkliga. För att beräkna kompositens elasticitetsmodul görs två beräkningar utifrån olika teorier. Ekvation (1) approximerar elasticitetsmodulen för en komposit med belastning parallellt med exakt orienterade långa fibrer. Ekvation (2) approximerar elasticitetsmodulen för en komposit som belastas vinkelrät mot fiberriktningen.

Noterbart är att i den komposit som tas fram inom projektet är fiberriktningen inte bestämd utan har en mer slumpartad karaktär. Det görs därför en medelvärdesberäkning av de två olika fallen.

Parallell:

$$E_{cp} = \varphi * E_f + (1 - \varphi) * E_m \quad (1)$$

Tvärs:

$$\frac{1}{E_{ct}} = \frac{\varphi}{E_f} + \frac{1 - \varphi}{E_m} \quad (2)$$

E_{cp} : Elasticitetsmodul hos komposit parallellt med fiber

E_{ct} : Elasticitetsmodul hos komposit tvärs fiber

φ : volymandel fiber

E_f : Elasticitetsmodul hos fiber

E_m : Elasticitetsmodul hos matris

$$\varphi = \frac{\frac{w_f}{\rho_f}}{\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m}} \quad (3)$$

w_f : fibers viktandel

w_m : matrisens viktandel

ρ_f : fibers densitet

ρ_m : matrisens densitet

Under den avslutande delen av projektet genomfördes dragprov och slagprov på både provstavar som legat i vattenbadet och referensprover, torra provstavar. Dessa prover syftar till att ta reda på E-modul, sträckgräns, brottgräns och slagseghet påverkas av vattnet. En kontroll av dimensioner och vikt genomfördes för prover som utsatts för vatten för att se hur mycket vatten som hade absorberats av kompositen.

Två olika mekaniska tester utfördes på provstavarna vid rumstemperatur, ett dragprov och ett slagprov. Dragprovet genomfördes med en Zwick Z2.5 dragprovare med en testhastighet på 1 mm/min och en maximal last av 2 kN. Provstaven spänns upp med en förlast på 1 N med en utdragningshastighet på 0.1 mm/min för att sedan starta dragprovet. För varje serie provstavar användes upp till fem prover för att erhålla ett så korrekt resultat som möjligt. Varje stavs tvärsnittsarea mättes på tre ställen för att sedan beräkna ett medelvärde för varje provstavs tvärsnittsarea. Provstavarna dras sedan ut tills de går av och dragprovaren mäter pålagd kraft och töjning under själva belastningsförloppet. Elasticitetsmodul, sträckgräns och brottgräns beräknas sedan enligt följande formler: Notera att elasticitetsmodulen avser den initiala lutningen hos spännings-töjningskurvan.

$$\text{Elasticitetsmodul [Pa]} = \frac{\text{Spänning [Pa]}}{\text{Töjning [\%]}} \quad (4)$$

$$\text{Spänning [Pa]} = \frac{\text{Kraft [N]}}{\text{Tvärsnittsarea [m}^2\text{]}} \quad (5)$$

$$\text{Sträckgräns [Pa]} = \frac{\text{Kraft(plasticering) [N]}}{\text{Tvärsnittsarea [m}^2\text{]}} \quad (6)$$

$$\text{Brottgräns [Pa]} = \frac{\text{Kraft(brott) [N]}}{\text{Tvärsnittsarea [m}^2\text{]}} \quad (7)$$

Vid slagprovet används en Frank KMO 79 med en hammare kalibrerad för 10 kpcm.

$$1 \text{ kpcm} = 9.81 \text{ Ncm} = 0.0981 \text{ J} \quad (8)$$

Samtliga fyra typer av provstavar slagtestades med två stavar av varje typ. Även här mättes tvärsnittarean på tre ställen längs varje provstav. Utifrån resultaten kan en slagseghet hos materialet beräknas med ekvation (9).

$$\text{Slagseghet} \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right] = \frac{\text{Energiabsorbtion [J]}}{\text{Tvärsnittsarea [m}^2\text{]}} \quad (9)$$

Ett båtskrov tillverkades tillsammans med SSPA för att kontrollera huruvida materialet överhuvudtaget går att använda vid båtbyggande och hur bra flytegenskaper skrovet får.

3. FIBER

Detta kapitel syftar till att beskriva en viktig komponent i kompositerna. Fibern är den del som är tänkt att ta upp stora laster och förstärka materialet. I detta avsnitt kommer cellulosafiber behandlas specifikt, men andra vanligt förekommande fibrer är glasfiber och kolfiber.

3.1 Beståndsdelar och uppbyggnad

Cellulosafibrer kan klassificeras i olika grupper beroende på vilken växt som fibrerna utvinns från. I arbetet fokuseras dock på träfibrer som består i huvudsak av tre olika polymerer; cellulosa, hemicellulosa och lignin. Dessa tre polymerer ligger tillsammans i form av cellväggar i flera lager. De fibrer som används i detta projekt fås från barrved, där fördelningen av polymererna är följande: 42 % cellulosa, 27 % hemicellulosa och 20 % lignin [6].

3.1.1 Cellulosa

Cellulosa är huvudbeståndsdelen i de flesta växtfibrer och har stor inverkan på de mekaniska egenskaperna i alla naturfibrer. Cellulosa är en linjär polymer, vilket betyder att den är uppbyggd av långa kedjemolekyler. Vidare bildar cellulosakedjorna mikrofibriller som är bundna till varandra. Mikrofibrillerna består av omväxlande kristallina och amorfa områden vilket gör att cellulosan klassas som ett delkristallint material. De mekaniska egenskaperna hos fibrillerna varierar beroende på kristalliniteten, då styvheten normalt är högre i de kristallina områdena än i de amorfa. På grund av sin höga styvhet samt fibrillära struktur lämpar sig cellulosa bra som förstärkningsmaterial [6].

3.1.2 Hemicellulosa

Trots sitt namn innehåller inte hemicellulosa någon cellulosa överhuvudtaget. I cellen är hemicellulosans huvudsakliga uppgift att ge flexibilitet åt materialet, men även att verka som bindemedel mellan cellulosan och ligninet [6]. I likhet med cellulosa är hemicellulosa en polysackarid. Hemicellulosa byggs upp av olika monomerer och sammansättningen av dessa varierar mellan olika typer av trä. Till skillnad från cellulosan, som är en linjär polysackarid, så innehåller hemicellulosan vanligen små sidogrenar och är huvudsakligen amorf. Dessutom skiljer de två ämnena sig åt genom att cellulosan har en avsevärt högre molekylvikt (eller polymerisationsgrad, DP), cirka 10-100 gånger större. På grund av sin amorfa struktur absorberar hemicellulosan mer vatten än cellulosan.

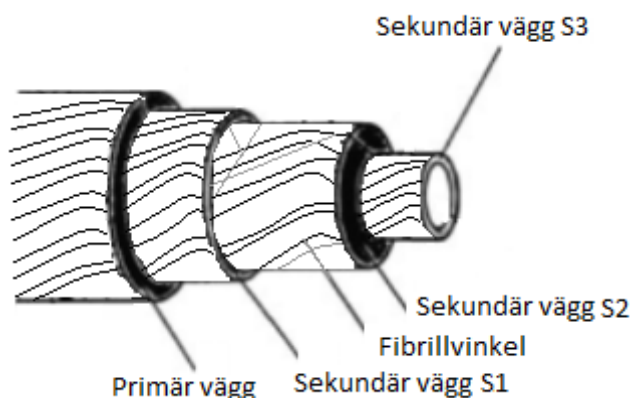
3.1.3 Lignin

Lignin fungerar huvudsakligen som bindningsmaterial mellan cellulosafibrerna för att hålla ihop dessa via en mittlamell. Bindningsmaterialet blir på sätt och vis en cellvägg och resulterar i att växten byggs upp av lignin-kolhydratsstrukturer. Den största delen av ligninet finns dock inne i själva fiberväggen där det tillsammans med cellulosan ger en ökad kompressionshållfasthet. Vidare är lignin i huvudsak ett amorft material som är svagare än cellulosa. Ligninet byggs upp av aromatiska kolväten som kopplas ihop till en komplicerad struktur. Till skillnad från hemicellulosa är lignin betydligt mindre hydrofilt och tar således upp en mindre mängd vatten [6]. De fibrer som används i det här projektet har en avsevärt reducerad ligninhalt på grund av den kemiska behandling som görs då kemisk pappersmassa framställs.

Lignin påverkar även materialet synbart vilket är välkänt inom papperstillverkning då ligninreduktionen hos fibrerna leder till en urblekning av färgen. Med lignin i pappret skulle nyansen gå åt ett gulare håll, speciellt då det utsätts för solljus under längre tider. Huruvida ligninets frånvaro påverkar UV-skyddet är intressant [7].

3.1.4 Uppbyggnad

Naturfiber kan förenklat sägas bestå av två cellväggar, där den första väggen består av okoordinerade nätverk av mikrofibrer. Den andra väggen består i sin tur av tre lager som kallas S1 (yttre lager), S2 (mellanlager) och S3 (inre lager) [8].



Figur 3.1: Naturfiberns uppbyggnad [9].

3.2 Naturfiberns mekaniska egenskaper

De mekaniska egenskaperna hos naturfibern kan i huvudsak relateras till fyra parametrar. Nedan beskrivs hur dessa inverkar samt riktlinjer för hur de bör regleras för att erhålla bästa egenskaper.

3.2.1 Cellulosahalt

Naturfiberns mekaniska egenskaper relateras i huvudsak till cellulosan, därför avlägsnas ofta ligninet och hemicellulosan i samband med massatillverkningen. Dock tas inte all hemicellulosa bort eftersom den ofta utgör ett bindemedel mellan cellulosa fibrerna i ett pappersark. Tabellen 3.1 visar exempel på hur halten cellulosa i olika växtfibrer påverkar materialets mekaniska egenskaper.

Tabell 3.1: Cellulosakoncentrationens inverkan på brottgränsen hos cellulosa fibrer [10].

Naturfibrer	Cellulosakoncentration(%)	Brottgräns (MPa)
Fredskalla	42	74
Enhjärtbladiga växter	42.5	85
Kokosvävnad	42.9	140
Kokosstam	43	80
Bark av bladskäft	47	190
Kushagräs	48.5	160
Ipomoea Camea	57	65
Jute	62.5	260
Sisal	67	550

3.2.2 Fibrillvinkel

En faktor som också påverkar de mekaniska egenskaperna är den heliska fibrillvinkeln, som syns i lager S2 i figur 3.1. Fibrillvinkeln är vinkeln mellan mikrofibrernas orientering och fiberns axel. Ju mindre fibrillvinkeln är, desto styvare blir fibern och vinkeln varierar mellan olika växtslag.

I tabellerna 3.2 och 3.3 illustreras hur cellulosafibrernas fibrillvinkel påverkar de mekaniska egenskaperna. Tabell 3.3 visar resultat från olika växtfibrer, medan tabell 3.2 avser träfibrer. Det är viktigt att ta hänsyn till att mätningarna har baserats på perfekta förhållanden, det vill säga fibrer utan tydliga defekter.

Tabell 3.2: *Elasticitetsmodulens beroende av träfibers fibrillvinkel [11].*

Fibrillvinkel(grader)	E-modul (GPa)
2	87
12	84
17	79
22	70
25	60
27	57
29	48
30	40
35	38
40	30
45	25

Barrfibers fibrillvinkel är normalt knappt 30 grader och då kommer elasticitetsmodulen för en perfekt fiber att ligga runt 40 GPa. Detta kan i viss mening uppfattas som ett teoretiskt värde. Fibrernas orientering i kompositen har en tydlig inverkan på materialets styvhet vilket gör att trots en liten fibrillvinkel kan styvheten minska till följd av en oordnad fiberorientering. Således är det svårt att förutse hur stor del av fibrillvinkelns påverkan som ger materialet den slutgiltiga styvheten.

En större fibrillvinkel leder till att materialet uppvisar en större brottöjning men lägre brottspänning [11]. Materialets töjning upp till brott är viktig att beakta då den ger ett mått på hur stor deformation materialet klarar av. I detta projekt ligger stort fokus på att jämföra E-modulerna hos olika material och sammansättningar av dessa, men det är viktigt att inte glömma brottöjningen då denna kommer att ha stor betydelse vid plötsliga okontrollerade kraftbelastningar.

I tabell 3.3 visas relationen mellan fibrillvinkeln och brottgränsen för ett antal olika växtfibrer.

Tabell 3.3: Fibrillvinkel och brottspänning för ett antal olika växtfibrer [9].

Naturfibrer	Fibrillvinkel(grader)	Brottgräns(MPa)
Jute	8	260
Rosellhibiskus	9	160
Solhampa	10	150
Banan	12	395
Sisal	16	550
Ipompea Carnea	18	65
Bark av bladskäft	20	190
Kokosstam	26	80
Fredskalla	31	74
Enhjärtbladiga växter	34	85
Kokosvävnad	39	140

Utifrån dessa resultat för olika naturfibrer är det tydligt att träfibern, i det ideala fallet, kan uppvisa väl så goda mekaniska egenskaper som andra växtfibrer på cirka 500-600 MPa vid en fibrillvinkel runt 30° [11].

3.2.3 Polymerisationsgrad (molekylvikt)

Polymerisationsgraden (molekylvikten) har betydelse för de mekaniska egenskaperna, med längre molekylkedjor blir materialet starkare och styvare. Molekylvikten bör vara så hög som möjligt, men det finns små möjligheter i praktiken att påverka denna. För cellulosa i vedmaterial brukar cellulosamolekylen bestå av 9000 - 10000 glukosenheter (monomerenheter). Detta värde kallas polymerisationsgrad, DP ("degree of polymerisation"). Då fibern behandlas kemiskt vid massaframställningen kan dock DP-värdet förväntas sjunka [11].

3.2.4 Fiberlängdens och fiberfördelningens inverkan

De mekaniska egenskaperna hos kompositen är starkt relaterade till hur effektiv spänningsöverföringen mellan matris och fibrerna är. Denna går att förbättra genom att öka vidhäftningsförmågan och interaktionen mellan de två komponenterna, men även genom att öka fiberlängden. Den optimala fiberlängden bestäms utifrån kompositens sammansättning och processförhållanden vid tillverkning och hantering [12]. Ett problem som kan uppstå med längre fibrer är dock att de kan bilda flockar, alltså sammanhopningar, och på så vis ge en sämre fiberfördelning i matrisen och därmed en sämre förstärkning.

3.3 Cellulosans vidhäftningsförmåga till matrisen och effekter av vattenabsorption

Cellulosa är ett hydrofilt material vilket innebär att det är vattenabsorberande. Att cellulosa är hydrofilt leder till en sämre vidhäftning till plastmatrisen som i de flesta fall är hydrofob. När cellulosan absorberar vatten kan detta ytterligare försämra vidhäftningen till plastmatrisen. Ibland noteras att vatten kan tränga in i gränsytan mellan fiber och matris och bryta upp vidhäftningen mellan materialen. Det torde alltså med tanke på de mekaniska egenskaperna vara en stor fördel om vattenabsorptionen hos cellulosafibern kunde begränsas [12].

Här finns ytterligare en aspekt att beakta. Cellulosafibrerna bildar gärna flockar, vilket ofta hänförs till vätebindningar mellan fibrerna och detta blir speciellt tydligt när de ska blandas med en hydrofob polymer. Fibrerna bör helst ligga homogent fördelade i plastmatrisen. Flockningen kan förstärkas av fiberformen, längre fibrer trasslar lättare in i varandra. Plastens

spridning på fiberytorna är alltså viktig och detta kan motverkas av fibrernas hydrofila karaktär och vattenabsorptionen [12].

Det bör även noteras att vattenabsorptionen i sig leder till en mjukning av fibrerna och därmed till en lägre elasticitetsmodul hos kompositen [11].

3.3.1 Ytbehandling

Följande metoder finns idag för att minska fibrernas vattenabsorption och göra dem mindre hydrofila. Nedan beskrivs fyra olika varianter av ytbehandlingar.

3.3.1.1 Coronabehandling

Coronabehandling innebär att fibrerna utsätts för en elektrisk urladdning i luft varpå de kemiska grupperna förändras i ytskiktet hos fibern. I första hand bildas olika polära grupper i ytan vilket förändrar ytegenskaperna och leder till ökad vidhäftning till matrismaterialet. Coronabehandlingen är dock inte optimal då det inte går att styra vilka olika grupper som skapas med urladdningen och på så sätt få någon kontroll över ytstrukturen för att kunna bibehålla andra egenskaper hos fibern [8].

3.3.1.2 Plasmabehandling

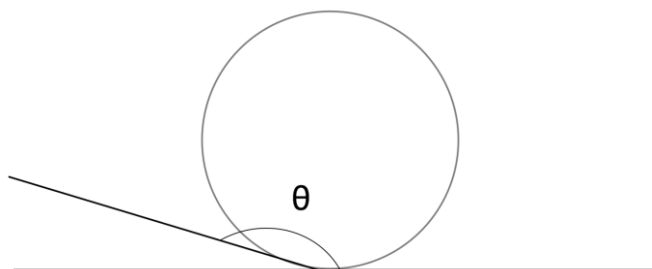
Med plasmabehandling strävas efter liknande resultat som med coronabehandlingen. Skillnaden är att plasmabehandlingen är mer kontrollerad och reaktionerna är kända i förväg. Ytan behandlas med hjälp av gas, oftast syrgas. På så vis skapas mer specifika kemiska grupper än med coronabehandlingen som kan höja vidhäftningsförmågan och förbättra vattenresistensen. Det är dock en dyrare metod då den kräver gasanvändning och speciell utrustning [8].

3.3.1.3 Ester- och eterifiering

Med esterifiering avses en reaktion av cellulosaens hydroxylgrupper med syror och deras derivat. Vanligtvis bildas exempelvis en cellulosaeater genom acetylering av cellulosa-fibrerna med en fettsyra. Cellulosaestern har då en förlängd kolkedja och den behandlade fibern får nu mer hydrofoba egenskaper genom sin nya ytstruktur eftersom esterifieringen inte påverkar fibrerna mer än till den första cellväggen [13]. Esterifieringen utförs genom att fibrerna dränks i fettsyran, torkas med hjälp av en vakuumpump och därefter upphettas i en ugn. En eterifiering av cellulosa-fibern har en liknande effekt, men kolkedjans längd på fiberytan kan skilja sig åt.

3.3.2 Kontaktvinkelmätningar

I samtliga fyra fallen ovan kan man fastställa hur hydrofob cellulosa blivit genom en kontaktvinkelmätning. Med hjälp av en byrett appliceras en eller flera vattendroppar på testmaterialet och kontaktvinkeln mellan testmaterialet och vattendroppen mäts. Ju högre kontaktvinkeln är, helst mer än 90° , desto mer hydrofobt är testmaterialet, se figur 3.2 [14].



Figur 3.2: Kontaktvinkel på en hydrofob yta.

Av dessa fyra olika ytbehandlingsmetoder kommer projektets kemigrupp gå vidare med att använda både esterifiering och eterifiering, där esterifieringen är den mest ekonomiska metoden och det är väl beprövad metod. Anledningen till att även eterifiering tas med beror på att behandlingsmetoden är nästan densamma och blir därför enkel att tillämpa.

3.4 Framtidsaspekter med nanocellulosa

Nanocellulosa innebär i princip att ta fram cellulosakristallerna ur mikrofibrillerna och använda dem som förstärkningselement. Dessa kallas ibland "crystalline nanocellulose", CNC, men andra namn kan även förekomma.

Styvheten hos CNC antas vara mycket hög, i teorin skulle en elasticitetsmodul på cirka 135 GPa kunna uppnås [15]. I nuläget är det dock svårt att ta fram CNC i större mängder. Framställningen kan kräva en kombination av mekanisk separering och syrabehandling. Slutprodukten är en vattenbaserad suspension med en låg cellulosakoncentration, typiskt 2 %. Suspensionen är dessutom svår att torka då CNC eller motsvarande bildar en "fiberkaka" som är svår att lösa upp och blanda med en plastmatris [16]. Ett framkomligt sätt skulle kunna vara att lösa plasten i CNC-suspensionen men detta ställer krav på att plasten skall vara vattenlöslig vilket de flesta plaster inte är [17]. Alternativt utförs ett lösningsmedelsbyte vilket är en relativt omständlig process. I dagsläget finns ingen enkel lösning på de ovan nämnda problemen. Detta är ett område som forskningen är på frammarsch inom och då det lyckas kommer marknaden för cellulosaförstärkta plaster sannolikt att bli väsentligt större.

4. MATRIS

Matrisen är den andra viktiga beståndsdel av ett kompositmaterial. Matrisen finns till för att ge kompositen stadga och skydd mot omgivningen, vilket fibermaterialet självt inte skulle kunna klara av. Matrisen upptar vanligtvis ca 30-40 % av kompositen, men kan vara betydligt högre och är viktig för många kritiska funktioner, varav en av de viktigaste är att hålla kompositens form. Då matrisen håller ihop kompositens olika komponenter bestäms också kompositens termiska beteende av matrisens termomekaniska stabilitet. Matrisen skyddar fibrerna, som ofta är ganska styva och spröda, från slitage och korrosion [18].

En mycket viktig egenskap som matrisen har är att den distribuerar lasten jämnt över fibrerna. Detta innebär att om en enskild fiber skulle falla så påverkar inte detta materials egenskaper något nämnvärt. Vid tryckbelastning förhindrar matrisen fibrerna ifrån att böjas eller knäckas.

De egenskaper hos matrisen som är viktigast för kompositens prestanda är:

- Elasticitetsmodul
- Styrka (drag-, tryck- och skjuvstyrka)
- Sträckgräns och brottöjning
- Resistens mot aggressiva organiska vätskor
- Brottseghet och skadetålighet
- Motstånd mot oxidering, fukt och temperaturskillnader

4.1 Härdplaster som matrismaterial

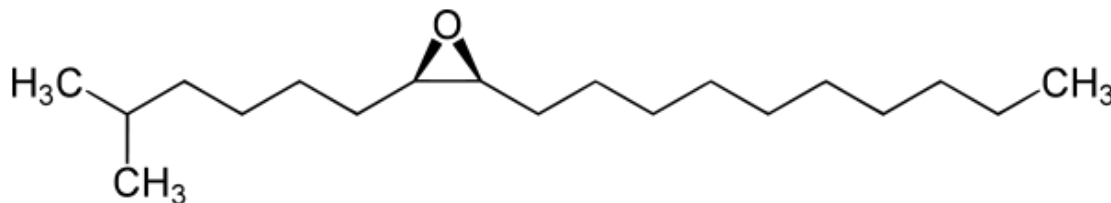
Kompositmaterialet innehåller vanligen en matris som är från en av två huvudkategorier: termoplaster eller härdplaster. En härdplastmatris är en matris som har bildat starka kovalenta bindningar mellan polymerkedjorna i ett tredimensionellt nätverk, vilket då bildar en olöslig substans efter härdningen. Det ohärdade materialet karaktäriseras av låg viskositet, vilket gör att det är enkelt att forma härdplastmatriser i många olika former. Den låga viskositeten möjliggör även en god impregnering av fibernätverket, vilket är nödvändigt för att få en tillräckligt bra fiber-matris-vidhäftning. Vanliga härdplaster som används är: epoxiplaster, omättad polyester och fenoplast [18].

Under härdningen bildas starka kemiska tvärbindingar mellan polymerkedjorna, vilket ger matrisen styrka, styvhet och god termisk och oxidativ stabilitet. Antalet tvärbindingar och polymerens molekylvikt är direkt kopplade till dessa mekaniska egenskaper. Det är uppenbart att styvheten hos matrisen ökar med antalet tvärbindingar, ett allt för högt antal tvärbindingar per volymenhet riskerar dock att ge ett sprött material. Vice versa, så ger en ökad molekylvikt mellan tvärbindingarna ett mindre styvt system då det ger polymerkedjorna en ökad mobilitet. Duktilitet, seghet och tyvänn även känslighet mot svällning och sprickbildning ökar i takt med molekylvikten.

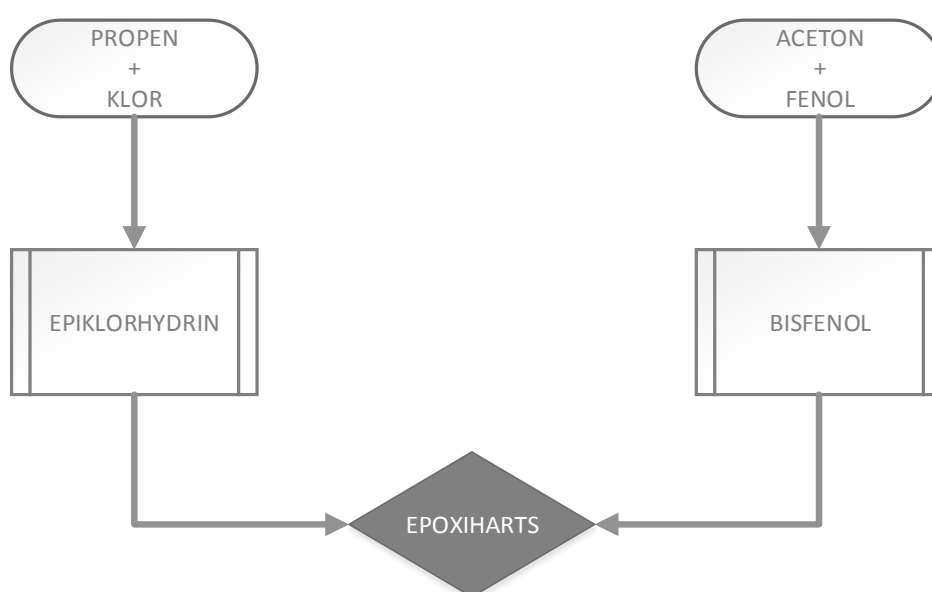
Härdningen sker ofta genom tillsats av en katalysator och en förhöjd temperatur. Under härdningen ökar tvärbindningsdensiteten snabbt, vilket ger en starkt ökad viskositet. Detta kan uppfattas som en gelbildning då vätskan går irreversibelt från en viskös till en elastisk gel. En viktig variabel under härdningen är trycket. Ett applicerat tryck kan hjälpa plasten att penetrera fiberstrukturen.

4.2 Epoxi som matrismaterial

Epoxiharts är ett harts, innehållande epoxigrupper, som kan härdas till en hårdplast med starka tvärbindingar. Namnet epoxi kommer från grekiskans "epi", vilket betyder "på utsidan av", och "oxi" vilket är namnet på syre. Namnet är helt logiskt då en epoxigrupp består av en ensam syreatom som är bunden till en lång kolkedja (se figur 4.1) [20].



Figur 4.1: Exempel på hur en epoxipolymer kan vara uppbyggd, där den ensamma syreatomen(O) bildar en epoxigrupp med de två kolatomer som den är kopplad till [19].



Figur 4.2: Schematisk bild av hur epoxiharts kan tillverkas av propen, klor, aceton och fenol [20].

Epoxiharts går att tillverka i stora mängder, då det består av ämnen med stor tillgänglighet. [20]

Olika blandningar av epiklorhydrin och bisfenol A ger harts med olika molekyelvikt. Det är viktigt att veta molekylvikten hos hartset, då denna är direkt kopplad till reaktionshastigheten för blandningen (låg molekylvikt ger mer reaktiv lösning). Då det oftast inte går att få tag på bisfenol och epiklorhydrin med samma molekylvikt, används istället ett annat mått: medelmolekylvikt. Ett harts med en medelmolekylvikt på över 700 kallas för högmolekylärt, och ett med under 700 är lågmolekylärt.

Epoxi är allergiframkallande. Detta är direkt kopplat till medelmolekylvikten, där risken för allergi minskar i takt med att molekylvikten ökar (i likhet med reaktiviteten).

Ett epoxiharts med en medelmolekylvikt under 380 är flytande vid rumstemperatur, medan ett harts med en molekylvikt av 1000 är fast vid rumstemperatur. Tillståndet är avgörande för

vad hartset kan användas till. Ett lågmolekylärt harts kan användas utan lösningsmedel och kan därför användas till gjutning, beläggningar, lim med mera. Ett högmolekylärt harts måste däremot i regel lösas för att vara användbart, vilket reducerar användningsområdena till färg och lack.

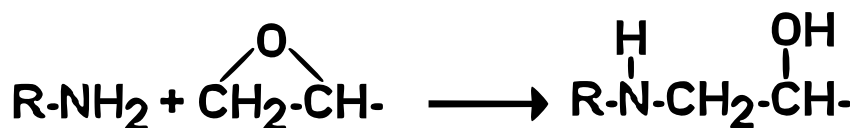
För att överföra epoxihartset till epoxiplast är en reaktion där tvärbindningar skapas nödvändig. Ämnet som hartset reagerar med kallas för "härdare". Exempel på härdare kan vara: aminer, amider, syraanhydrider, imidazoler, bortrifluoridkomplex, fenoler, merkaptaner och metalloxider. För härdning vid rumstemperatur används mestadels aminer och amider, då övriga härdningsmedel ofta kräver temperaturer över 150°C för att kunna reagera med hartset.

4.3 Aminer och amider som härdare

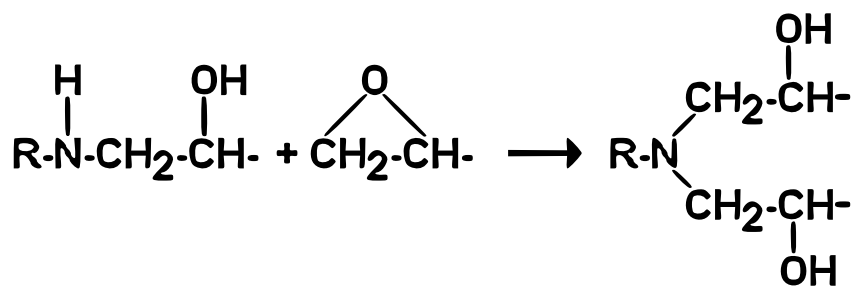
Aminer är ämnen nära besläktade med ammoniak (NH₃). Aminerna namnges beroende på hur många väteatomer (H) som ersätts av alkylgrupper (R). Det finns primära aminer (NH₂-R), sekundära aminer (NH-R1) och tertiära aminer (N-R2). Antalet aminogrupeer (NH₂) bestämmer om aminen är monoamin, diamin eller polyamin [20]. Som härdare används i huvudsak diaminer och polyaminer.

Aminerna delas även in i grupper beroende på utseendet på kolkedjan. Det finns raka kolkedjor, cykloalifatiska (ringformade) och aromatiska kolkedjor (där aminogruppen är bunden till en bensenring).

I reaktionen mellan harts och härdare utgör väteatomerna hos aminen (härdare) den reaktiva delen tillsammans med syret i epoxigruppen (harts). Något förenklat ser den kemiska reaktionen som i figurerna 4.3 och 4.4.

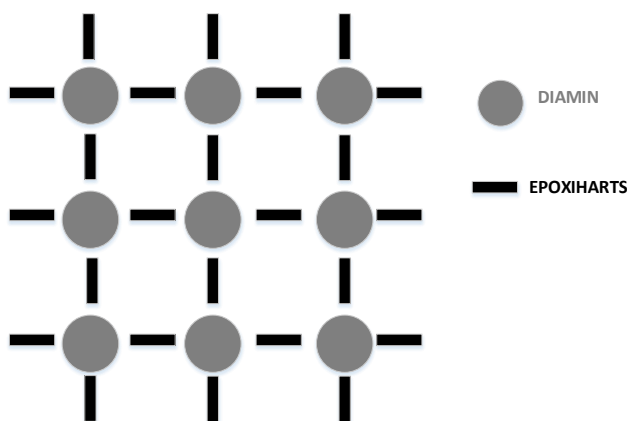


Figur 4.3: Primär amin + Epoxigrupp ger sekundär aminogrupp [20]



Figur 4.4: Den sekundära aminen reagerar med ytterligare en epoxigrupp och reaktionen är fullgången [20]

En epoxiplastmolekyl innehåller vanligtvis två epoxigrupper och en diamin med fyra väteatomer, vilket resulterar i att det slutgiltiga 3D-nätet med tvärbindningar kan se ut som i figur 4.5.



Figur 4.5: Schematisk bild av den slutgiltiga strukturen i epoxiplaster. För att enklare visualisera strukturen visas den endast i två dimensioner (givetvis är strukturen tredimensionell i verkligheten) [20].

Den epoxi som använts i projektet har en medelmolekylvikt <700 och härdades med en blandning innehållande diaminer.

Reaktionen mellan härdare och epoxiharts kallas för en irreversibel polyaddition, vilket innebär att inga biprodukter bildas samt att epoxiplasten inte kan uppdelas i härdare och harts igen. Reaktionen är även exoterm, vilket innebär att värme utvecklas under härdningen. Härdningstiden kan variera mycket beroende på vilken typ av härdare som används och har stor praktisk betydelse vid arbete med epoxi. Ett mått på reaktionstiden som används är "potlife", vilken är tiden som förbrukningen av en blandning mellan harts och härdare tar på sig. Denna kan variera så mycket som från ett par sekunder till flera år. Ett sätt att bestämma potlife är att temperera harts och härdare till 20°C , för att sedan blanda komponenterna (med en totalvikt av 100 g) i ett lämpligt kärl. Den tid som det tar för blandningen att värmas upp till 50°C blir då potlife. För blandningar med låg reaktivitet (~lång potlife) mäts oftast istället tiden det tar för viskositeten att fördubblas [20].

Den kemiska reaktionen (härdningen) följer Arrhenius lag, som säger att reaktionshastigheten fördubblas för varje tiotal grad som temperaturen höjs. Detta, tillsammans med att mer värme alstras i takt med massan, gör att potlife blir kortare för en blandning av större vikt.

Tabell 4.1 visar potlife för två prover med olika vikt, 100 respektive 500 g, bestående av samma blandning av harts och härdare. Det framgår tydligt av tabellen hur mycket vikten påverkar potlife [20].

Tabell 4.1: Visar potlife för två olika stora prover där det framgår tydligt hur potlife blir kortare i takt med vikten av provet [20].

Tid(min)	Prov(100g)	Prov(500g)
0	20°C	20°C
5	22°C	23°C
10	24°C	27°C
15	26°C	33°C
20	30°C	44°C
25	35°C	$50^{\circ}\text{C}(\text{vid } 22 \text{ min})$
30	50°C	-

Potlife kan alltså ge användaren viss information om brukstid efter blandning, men då måste mängden material och utgångstemperatur tas i beaktande. Ett annat mått som används är "härdningstid", eller den tid som det tar från det att epoxin appliceras fram tills att den bildade plasten nått sina slutliga egenskaper (hållfasthet och beständighet).

Det är vanligt att epoxin appliceras i tunna skikt, vilket gör att den utvecklade värmen inte kommer att påverka temperaturen något nämnvärt inne i skikten. Tack vare detta går reaktionen mellan harts och härdare snabbt till en början, då det fortfarande finns en stor tillgång på reaktiva molekyler. En annan anledning till att härdningen går fort till en början är att utgångsviskositeten är låg, vilket tillåter en stor rörlighet hos molekylerna. Allt eftersom att härdningen pågår minskar antalet reaktiva molekyler och viskositeten ökar, vilket leder till att reaktionshastigheten succesivt avtar. En tumregel brukar vara att rumstempererad härdning av epoxiharts bör ske i sju dygn vid 20°C för att uppnå materialets slutegenskaper, men redan efter ett dygn kan så mycket som 70-80 % ha uppnåtts [20], se även Tabell 4.2.

Tabell 4.2: Exempel på härdningsförloppet för ett epoxiharts. Tydligt är att härdningshastigheten avtar med tiden [20].

Antal dygn	Slutegenskap(%)
0	0
1	70
2	85
3	93
4	95
5	97
6	98
7	100

4.4 Karakteristiska egenskaper hos epoxiplast

Eftersom att det finns ett femtiotal olika harts som klassificeras som epoxi och över hundra olika härdare så kan epoxiplaster få många olika slutegenskaper, men vissa egenskaper har de dock gemensamt [20].

- **Liten krympning**

Jämfört med till exempel polyester och metylmetakrylat uppvisar epoxiplaster en mycket liten krympning under härdningsförloppet, vilket gör att det slutgiltiga materialet inte utsätts för några höga inre spänningar. Den lilla krympningen är ett resultat av en liten omorientering av epoximolekylerna under härdningen.

- **Mekanisk hållfasthet**

Av alla härdplaster har epoxi högst hållfasthet, mycket tack vare bristen på inre spänningar i plasten. Draghållfastheten kan vara så hög som 80 MPa.

- **Vidhäftning**

En utmärkande egenskap är epoxiplasternas förmåga att häfta vid de flesta underlag. Detta dels på grund av de polära hydroxylgrupperna, men också eterbindningarna. Den låga krympningen gör också att vidhäftningen inte störs av spänningar.

- **Beständighet mot kemikalier**

Tack vare den stora variationen hos olika epoxiplaster går det att få epoxi beständigt mot de allra flesta kemikalier.

- **Vattentäthet**

Epoxiplaster kan betraktas som mycket vattentäta och används därför ofta i till exempel båtskrov.

- **Elektrisk isoleringsförmåga**

Epoxiplaster är utmärkta elektriska isolatorer. Detta, tillsammans med den goda kemiska resistansen och vattentätheten, gör epoxi till en lämplig plast vid tillverkning av elektriska komponenter.

- **Värmebeständighet**

Värmebeständigheten skiljer sig mycket mellan rumstemperaturhärdad plast och värmehärdad. Värmebeständighet brukar anges i antingen HDT (Heat Deflection Temperature) eller T_g (glasomvandlingstemperatur). Den mekaniska hållfastheten och styvheten minskar kraftigt vid HDT (vilken är ca 70°C för plaster härdade i rumstemperatur, värmehärdade kan komma upp till 250°C).

- **Ljusbeständighet**

Epoxiplaster som baseras på aromatiska epoxihartser är känsliga för UV-ljus. UV-skadad plast kännetecknas av en mycket snabb gulning av plasten. Bäst UV-resistent är epoxiplaster som är baserade på alifatiska epoxihartser som är anhydrid- eller aminhärdade.

5. KOMPOSITER INNEHÅLLANDE CELLULOSAFIBRER

På senare tid har intresset för cellulosa som förstärkningselement i kompositmaterial ökat avsevärt och anledningarna är många. De flesta undersökningar som genomförts är gjorda med polypropen (PP) som matrismaterial men i det här projektet kommer epoxi användas som sannolikt är mer lämpat för båtskrov. Jämförs kompositer innehållande oorganiska fibrer, såsom glasfiber, med kompositer innehållande cellulosafibrer finns en rad huvudsakliga fördelar:

- Låg densitet, runt $1,5 \text{ g/cm}^3$ jämfört med glasfibers $2,5 \text{ g/cm}^3$
- Relativt bra styvhet
- Låg kostnad
- Återvinningsbart
- Flexibilitet, till skillnad från spröda fibrer är risken för att cellulosafibrer går av vid tillverkningen av kompositen lägre
- Inte giftigt

Dock finns det även nackdelar med material av cellulosafibrer i kompositer såsom deras naturligt polära karaktär eftersom de flesta termoplaster är opolära, vilket medför svårigheter att blanda fibrerna och matrisen och därmed få en acceptabel vidhäftning materialen emellan. En annan nackdel är att fibrerna har en hydrofil karaktär vilket medför absorptionsförmåga och när de suger upp vatten försämras de mekaniska egenskaperna samtidigt som materialet sväller, det vill säga dimensionsstabiliteten kan bli sämre. Cellulosa tål inte alltför höga temperatur; 200°C är en hög temperatur och då kan materialet brytas ner. Detta är dock främst ett problem då termoplaster används som matris. Eftersom epoxi används som hårdplast borde detta vara av mindre betydelse.

De väsentligaste faktorerna som styr egenskaperna hos kortfiberarmerade termoplastkompositer är volymandelen fibrer, vidhäftningsförmågan, fiberdimensionerna (främst förhållandet mellan längd och diameter) samt fibrernas orientering. Nedan tas dessa faktorer upp mer ingående.

Det går även diskutera fördelarna med hårdplast som matrismaterial jämfört med termoplast när det gäller tillverkning av naturfiberförstärkta kompositer. Naturfibern kan lättare blandas med hårdplasten, eftersom hårdplasten är mer lättflytande från början (innan härdning) och kräver även lägre tryck och temperatur jämfört med termoplast.

Eftersom naturfibrer lättare påverkas av fukt kan det vara nödvändigt att behandla fiberytan, dels för att förbättra bindningen mellan matrisen och fibern och dels för att minska fiberns vattenabsorption. Detta eftersom den hydrofila karaktären hos fibern påverkar mekaniska och termiska egenskaper hos kompositen [21].

5.1 Volymförhållandet fiber och matris

Precis som för andra kompositsystem är volymandelen fiber väldigt viktig för egenskaperna hos kompositen. Mekaniska egenskaper som elasticitetmodul och dragstyrka kan förbättras avsevärt om mängden fibrer i materialet ökas, medan brottöjningen kan minska. Beteendet skiljer sig dock avsevärt mellan olika material och kompositer. Antagandet om att dragstyrkan ökar linjärt med fibermängden gäller till en viss gräns. I vissa fall är den optimala fiberandelen 20 wt% cellulosa då samtliga mekaniska egenskaper är som högst vid denna fibermängd [22]. Detta gäller dock inte generellt.

5.2 Vidhäftningsförmåga

Fibern och matrisens inbördes vidhäftningsförmåga spelar en viktig roll när det gäller styrkeegenskaperna hos kompositer med korta fibrer. För att den applicerade kraften ska kunna tas upp av fibern är det av yttersta vikt att den är väl sammanfogad med matrisen. Detta då kraften kommer appliceras på matrisen som ligger ytterst och ska leda krafterna vidare in till fibern. Att ha en effektiv kraftöverföring för att försäkra goda mekaniska egenskaper kräver en god vidhäftningsförmåga. Då cellulosa är tydligt hydrofil och inte kompatibel med en hydrofob polymer utgör detta ofta ett problem. En ofta använd metod är att införa en tredje komponent som reducerar de inre spänningarna som uppstår i materialet och ökar vidhäftningsförmågan. En variant är alltså den kemiska vägen vilken kräver en reaktion med en tredje komponent (det finns även andra alternativ såsom fysiska behandlingar). Senare i detta kapitel kommer ett antal kemiska behandlingar beskrivna i litteraturen tas upp.

5.3 Kompositens vattenabsorption

Cellulosa är hygroskopisk/hydrofil eftersom den innehåller hydroxylgrupper som växelverkar med vattenmolekyler, även om cellulosa inte är lösbar i vatten. Detta borde vara en nackdel när det gäller båtar. Interaktionen cellulosa-vatten kan beskrivas som en tävling om att bilda vätebindningar mellan en hydroxylgrupp på polymerkedjan och en vattenmolekyl [23]. Även då kompositen kommer att ha formen av ett laminat med epoxiplast ytterst finns en stor sannolikhet att vattnet tränger in i kompositen efter längre tid. Då vattnet kommer i kontakt med cellulosan kommer materialet bli tyngre och antagligen även få försämrade mekaniska egenskaper (sämre vidhäftning mellan fiber och matris samtidigt som de mekaniska egenskaperna hos själva fibern påverkas). I det här projektet kommer detta att undersökas genom att lägga provstavar i vatten under en längre period. Därefter mäts viktökningen och de mekaniska egenskaperna innan och efter vattenexponeringen.

5.4 Effekten av volymandelen cellulosafiber

Volymandelen cellulosafiber i kompositen påverkar främst de mekaniska egenskaperna och vattenabsorptionen. Detta beskrivs i nedanstående avsnitt, som sammanfattar litteraturreultatet.

5.4.1 Mekaniska egenskaper

I en forskningsstudie undersöktes draghållfastheten hos epoxi förstärkt med luffafiber, en variant av cellulosa. Draghållfastheten hos kompositer förstärkta med en fibermatta (MFR), material innehållande cellulosapartiklar (PFR) samt kortfiberförstärkta kompositer (SFR) bestämdes här som funktion av volymandelen fiber. Både alkalibehandlade och obehandlade fibrer ingick i studien. Alkalibehandlingen reducerar antalet vätebindningar i nätverksstrukturen hos fibrer vilket skall underlätta blandningen (dispergeringen) av fiber och epoxi. [21].

I det här arbetet noterades, som väntat, att draghållfastheten ökade när volymfraktionen fiber, V_f , ökade från 0.3 till 0.4, men minskade då V_f ökade ytterligare upp till 0.5. Detta beror på

att vid ytterligare fiberökning kommer blandningen mellan fibern och hartsen bli otillräcklig. MFR-kompositer med $V_f = 0.4$ hade 105 % och 35 % högre draghållfasthet än MFR med 0.3 respektive 0.5 volymfraktion fiber. Det konstaterades också att behandlade MFR -kompositer med $V_f = 0.4$ hade 14 % högre hållfasthet jämfört med obehandlade kompositer. Det visades även att kompositer som förstärkts med fibermatta hade en högre hållfasthet än SFR och PFR [21].

5.4.2 Kompositernas vattenabsorptionsförmåga

I samma arbete som ovan användes viktökningen, ΔM , då provet var nedsänkt i vatten en viss tid, som ett mått på kompositens vattenabsorptionsförmåga enligt ekvation (10).

$$\Delta M(t) = 100 * \frac{M_t - M_0}{M_0} \quad (10)$$

Här är M_0 och M_t kompositens massa vid tiden noll respektive tiden t . Fibrernas dimensioner hade stor inverkan på vattenabsorptionen. Det framkom att PFR-kompositernas vattenabsorptionsförmåga var ungefär hälften av SFR-kompositernas, medan vattenabsorptionen hos SFR-kompositerna var 20 % lägre jämfört med MFR-kompositerna. Detta på grund av att vattenupptagningen är en följd av att cellulosafibrerna absorberar vatten, även efter behandlingen. Dock ökar sannolikt vidhäftningen mellan fiber och matris samtidigt som vattenabsorptionen minskar hos partiklar och enkla fibrer som är täckta av harts [21].

De kompositer som förstärkts med behandlade fibrer uppvisade 13.8 % lägre vattenabsorption än de obehandlade kompositerna. Ytbehandlingen av fibern minskade alltså fuktabsorptionen samtidigt som den ökar fibrernas vätkbarhet gentemot hartset. Därmed förbättrades även vidhäftningsförmågan och dimensionsstabiliteten hos kompositen. Det noterades också att epoximatrisen absorberade mer vatten då mer fibrer tillsattes, vilket då i sin tur ökade kompositens vattenabsorption. Detta härleddes till hydroxylgrupperna i fibern [21].

5.5 Fibermodificeringar och deras effekt på böjstyvheten

I en annan studie undersöktes effekten av hur en fiberbehandling förändrade böjstyvheten hos kompositen med hjälp av ett trepunktböjtest¹. Testet utfördes på ren polyester (PES), obehandlad luffafiberförstärkt polyester, behandlad luffafiberförstärkt polyester där fibrerna behandlats i en kombinerad process², acetylerad luffafiberförstärkt polyester och cyanoetylerad luffafiberförstärkt polyester. Resultaten visade att förstärkning med luffaytterväggsfibrer (ComLEmat) ändrade böjningsegenskaperna hos kompositen. Böjstyvheten hos den rena polyestern var 3.4 GPa men minskade till 2.45 GPa för kompositer innehållande 5 wt% ComLEmat fibrer som var behandlade med den kombinerade processen. Således försämrades de mekaniska egenskaperna hos kompositen som förstärkts med den behandlade luffafibern. Detta kan bero på en försämring av fibrernas mekaniska egenskaper till följd av den kemiska behandlingen eller en minskad vidhäftning [24].

1. Trepunktsböjningstest ger värden på böjmodulen E_f , böjspänningen vid brott σ_f , brotttöjningen ε_f samt sambandet mellan böjspänning och töjning hos materialet.

2. Kombinerad process används för att separera vaxartade och gummiliknande ämnen såsom lignin och hemicellulosa från fiber.

Svepelektronmikroskopbilder av kompositernas tvärsnitt visade på en sämre vidhäftning mellan fiber och matris då fibrerna var obehandlade. Det fanns en klyfta mellan fibern och matrisen. Den svaga vidhäftningen förbättrades med hjälp av acetylering och cyanoetylering av luffafibern, vilket även gav bättre mekaniska egenskaper hos kompositen. Här konstaterades också att klyftan mellan matris och fiber var mindre synlig i det fallet då fibrerna var behandlade. Acetylering och cyanoetylering gör att fibrerna blir mer hydrofoba genom substitution av hydroxylgrupperna med acetyl- och cyanoetylgrupper. Fibrerna blir då mer kompatibla med den hydrofoba matrisen, vätbarheten förbättras och då också de mekaniska egenskaperna. Men det bör beaktas att vidhäftningen mellan matris och fiber även påverkas av en rad andra parametrar såsom grovhet och ytarean hos fibern [24].

6. TILLVERKNING, ÅTERVINNING & ARBETSMILJÖ

En viktig aspekt vid framtagandet och testning av ett material för nya användningsområden är att undersöka hur detta påverkar tillverkningsprocessen, återvinningen och arbetsmiljön.

6.1 Tillverkning

Av praktiska skäl utförs ofta hela tillverkningen av en produkt vid ett och samma tillfälle. Idag används främst hårdplast som matrismaterial vilket gör att det är omöjligt att omforma produkten efter härdning. Ett vanligt tillverkningssätt är att fiber och epoxi läggs i laminat tills dess att önskad tjocklek uppnås. Ett alternativ till den tekniken är att tillverka en så kallad sandwichkomposit. Dessa typer av kompositmaterial utgörs normalt av två sidor kompositmaterial med en tjockare mellanliggande kärna av ett lättviktsmaterial, ofta någon form av skummad plast. På så sätt kan materialets böjstyvhet förbättras utan att vikten ökar nämnvärt.

Oberoende av vilken teknik som används finns det några parametrar som bör tas hänsyn till för att uppnå så bra resultat som möjligt. Följande avsnitt baseras till stor del på institutionen för Material- och Tillverkningstekniks eget kompendium [25].

6.1.1 Härdningsgrad

Optimalt önskas en 100 % härdningsgrad. Beroende på vid vilken temperatur och vid vilket tryck härdningen sker kan resultatet variera. Med för låga temperaturer finns det en risk för att härdningsgraden inte når 100 % inom en rimlig tid.

6.1.2 Viskositet

Ofta startar processen med ett lågvisköst ohärdat harts som under härdningsprocessen går från flytande till fast form och binder samman kompositen. Normalt går ändringen av viskositeten sakta i början för att sedan snabbt öka. Det är vid tidpunkten för den snabba ökningen som den så kallade ”gel time” nås. Beroende på olika tillsatser kommer viskositeten hos hartset att variera och med det tiden att gå från flytande till fast form. För att undersöka karaktären hos olika typer av harts och härdningsförlopp används ett gel time-test, också kallat potlife-test. Detta beskrivs i kapitel 5.4.

Används injektion av harts i en form kommer flödet av harts försvåras med tiden då viskositeten ökar. Viktigt att tänka på då är var inloppet placeras.

6.1.3 Krympning

Ändringar i volymen till följd av härdningen eller termisk kontraktion är synnerligen viktiga att beakta. Detta är en följd av att de polymera molekylerna omgrupperas till ett mer kompakt tillstånd så länge härdningen fortgår. En tillsats av fibrer eller fyllnadsmaterial reducerar krympningen hos kompositen. En kraftig krympning kan bland annat leda till inre spänningar och deformationer och bör således förebyggas.

6.1.4 Tomrum eller porer

Tomrum eller porer bildas innan matrisen har stelnat och kan ha flera olika orsaker.

- Ofullständig impregnering (vätning) av fibrerna.
- Luft eller ångor blir kvar i matrisen när den stelnat.
- Viskositeten hos hartset är för hög.
- Otillräcklig vidhäftning mellan fibrer och harts.

Porer uppkommer oftast i fickor med mycket harts, i fiberfria regioner mellan laminat eller på individuella fibrer. Dessa typer av defekter kan leda till ökad fuktabsorption samt en

försämring av materialets mekaniska egenskaper och kan undvikas genom användning av vissa beprövade metoder.

- Avgasning av det flytande hartset.
- Användning av vakuum under formningsprocessen.
- Formens utformning. Om hartset får flöda fritt transporteras luft och gaser lättare ut genom formens ventiler.

6.1.5 Form

Att förbereda en välfungerande form kan vara en stor utmaning. Beroende på ändamål och tillverkningsteknik kan formen vara tillverkad av flera olika material, allt från metall till engångsformar av sand eller salt. Ska formen bara användas en eller ett fåtal gånger är en form av metall onödigt dyr, på samma sätt skulle engångsformar vara ett dåligt val vid tillverkning av stora volymer.

Ett av projektets delsyften har varit att tillverka en optimistjolle av en cellulosafiberkomposit. Med tanke på projektets tidsram faller det sig naturligt att tillverkningen utgår från en färdig form snarare än att göra allt från grunden. Något att ta hänsyn till vid val av form är den termiska expansionen och kontraktionen hos både komposit och form. Relativt stora skillnader i dimensionsändring mellan de båda leder till inexakta komponenter och eventuellt till restspänningar. Förslagsvis används en form med liknande värmeutvidgningskoefficient som kompositen.

Vid tillverkning av kompositbåtar används i regel en form som kan användas för att producera flera båtar. För att tillverka en form utgår arbetet ofta från en så kallad plugg. Pluggen är en fullskalig modell av produkten som ska tillverkas. Materialet för pluggen kan skilja sig från det tänkta skrovet, från plywood till polystyren. Inom industrin används till exempel stora block av polystyren som den tänka formen fräses ut från, dessa täcks sedan med ett lager epoxi eller polyuretan. Vid användning av polystyrenpluggar behöver ofta hela ytan spacklas med någon form av epoxibaserat spackel. Ett lämpligt nästa steg vore att lägga ett skikt lamineringsepoxi och när detta har härdats, våt slipas ytan till önskad ytfinish för att sedan lackeras. Den lackerade ytans finish är densamma som komponenten senare kommer att få [26].

Det är oerhört viktigt att pluggen har en bra ytfinish då formen och således komponenten kommer få samma ytfinish. Det går att använda pluggen direkt som en form, nackdelen kan vara att insidan av formen blir den fina ytan och utsidan måste bearbetas ytterligare. Detta torde vara mindre lämpligt vid tillverkning av båtskrov då utsidan önskas fin samt tålig mot väder och vind.

Pluggen bör inte ha för skarpa vinklar eftersom det gör det svårt att fylla ut med material på dessa ställen. Skarpa vinklar kan också leda till spänningskoncentrationer vilket inte är önskvärt. Släppvinklarna bör vara minst 1-3 grader beroende på längden på sektionen, längre sektion kräver större vinkel.

Om pluggen antas vara klar kan formen börja tillverkas. Pluggens yta behandlas med ett släppmedel, beroende på vilken matris som används fungerar olika släppmedel olika bra.

I nästa steg appliceras en gelcoat på formens ytor, vilken typ av gelcoat som är lämplig beror på vid vilka temperaturer komponenten senare ska härdas vid. Gelcoaten appliceras lämpligen

med en pensel med en skiktjocklek av cirka 0.4 mm och härdas vid rumstemperatur (20-23°C). Viktigt att förhållandet gelcoat och härdare är korrekt för att blandningen ska uppträda på önskat sätt. Härdningen tar vanligtvis 2-6 timmar vid rumstemperatur. I nästa steg appliceras fiber och epoxi på samma sätt som vid tillverkning av andra kompositkomponenter.

Formen SSPA arbetar med kommer från OSIS båtar i Göteborg. OSIS har lång erfarenhet av att tillverka optimistjollar så formen bedöms hålla hög kvalitet och uppnå uppsatta dimensionskrav för optimistjollar.



Figur 6.1: Form som används vid tillverkning av projektets optimistjolle [27]

I formen läggs sedan stora ark av cellulosafiber som impregneras med epoxi. Arken av cellulosafiber hade en ytvikt av 800 g/m². All tillverkning sker genom handpåläggning. När materialet lagts på täcks hela formen med en plastfilm med hål för ventiler. Den instängda luften sugas ut genom ventilerna så att vakuum skapas, hartset blir på så sätt jämnare fördelat och mängden porer i kompositen minskar.



Figur 6.2: Båten under härdning [27]

Båtens botten är tillverkad av en komposit med ungefär 30 wt% cellulosafiber medan sidorna tillverkades med ungefär 40 wt% fiber. Detta är en följd av att botten är tillverkad av en sandwichkomposit och följaktligen blev andelen fiber lägre där. Sandwichens kärna bestod av ett cirka 10 mm tjockt hårt PVC-skum (PVC – polyvinylklorid) medan ovan- och undersidan

utgjordes av cellulosa/epoxilaminat. Härdningen av kompositen ägde rum vid 50°C i vakuum under 12 timmar.

6.2 Återvinning

Kompositer är komplext sammansatta material och idag är metoderna för återanvändning och återvinning begränsade. Det går till viss del att återanvända vissa kompositer, då som fyllmedel i nya kompositer eller som isolering. Ofta deponeras de använda produkterna vilket leder till en stor mängd outnyttjad energi. Enligt en rapport Naturvårdsverket sammanställt [28], återvinns det under 100 stycken småbåtar per år i Sverige vilket är en mycket låg siffra i förhållande till de cirka 62 000 båtar som beräknas vara övergivna eller uttjänta. Cirka 80 % av alla fritidsbåtar är tillverkade i någon form av plastkomposit, nästan uteslutande glasfiberarmerade båtar.

Kommunerna tar i regel inte emot kompositbåtar utan hanteringen sker oftast av separata återvinningsföretag. Detta tillsammans med att det inte är särskilt ekonomiskt lönsamt kan vara en anledning till det låga antalet båtar som återvinns [29].

I frågan om återvinning/återanvändning av kompositbåtar skriver återvinningsföretaget Renova [30]:

“Vi kan ta emot dessa på Skräppekärr. Motorer, elektronik och eventuella bränslerester måste tas bort. Båten vägs in på den materialkod som är aktuell. En plast eller träbåt blir Grovt Brännbart. Glasfiberbåten blir obrännbart osv. Kommer man med flera båtar av olika material samtidigt blir det Blandat osv. Därefter lägger vågen till materialkod 990. Hur lång tid det tar beror helt och hållet på båtens storlek, m.m. Vindsurfingbräda t. ex kommer gå direkt till krossen och behöver inte demonteras.”

Allt som oftast går kompositer alltså till deponi och enligt en förstudie av återvinning av plastbåtar [31] finns det i dagsläget enbart två företag som specialiserat sig på att ta hand om uttjänta kompositbåtar. Företagen grundades 2008 respektive 2013 vilket också det vittnar om att marknaden för återvinning av detta slag inte är särskilt utbredd.

Även om det går att bränna kompositer så innehåller de ofta stora mängder oorganiskt material vilket har ett lågt energiinnehåll och förbränning är således en ineffektiv metod. Om det går bättre att bränna cellulosafiberförstärkta kompositer är inte testat men det finns potential för den cellulosafiberförstärkta kompositen att ge en större mängd energi vid förbränning än till exempel glasfiberarmerade kompositer. Detta beror på att i glasfiberkompositer är ofta viktsandelen fiber hög och således den energirika brännbara massan låg. I fallet med cellulosafiber kommer troligtvis hela kompositen kunna förbrännas och på så sätt kommer mer energi att kunna utvinnas.

6.2.1 Mikrovågspyrolys

I en studie gjord på Högskolan i Borås i samarbete med Stena Metall [32] användes mikrovågspyrolys för att separera materialen i en glasfiberkomposit. Processen går ut på att värma upp materialet med mikrovågor och på så sätt separera ut fraktioner av ingående delmaterial. I rapporten användes en glasfiberkomposit där pyrolysen gav två större fraktioner, en fraktion av olja och en fraktion av de oorganiska glasfibrerna.

Oljan kan användas till att tillverka syntesgas vilket ofta används inom kemisk industri. De återvunna glasfibrerna användes återigen i en komposit men de mekaniska egenskaperna

nådde inte upp till samma nivåer som i en ”jungfrulig” komposit. Detta tros bero på att vidhäftningen mellan fibrer och matris blivit sämre till följd av pyrolysen. Troligtvis har glasfiberns ytbehandling delvis förstörts under processen. Processen är relativt dyr och måste göras i stora volymer för att möjligtvis vara ekonomiskt gångbar.

Huruvida det går att återanvända cellulosafibrer genom mikrovågspyrolys är kvar att utvärdera, men att denna process skulle ge bättre resultat för cellulosafiber än för glasfiber känns föga troligt.

6.3 Arbetsmiljö

I projektet behandlas hårdplasten epoxi vilket ställer särskilda krav på arbetsmiljön. Detta eftersom att hårdplaster generellt kan medföra personskador om materialet hanteras felaktigt och utan särskild skyddsutrustning. Riskerna i samband med epoxiplastkomponenter är bland annat allergiska eksem och ögonskador, därför krävs det att arbetstagaren genomgår en medicinsk kontroll. Kontrollen varierar beroende på vilken hårdplast som åsyftas och delas in i tre olika grupper. Gemensamt för de tre grupperna är att uppgifter inhämtas om tidigare arbete, tobaksbruk, hud- och luftvägsbesvär, samt om allergi eller annan överkänslighet. Dessutom genomförs en kroppsundersökning och ett andningsprov, så kallad spirometri [33].

Samtliga av gruppens medlemmar har därför genomgått en läkarundersökning för att säkerställa att någon inte har några komplikationer som skulle innebära en risk i arbetet. Dessutom för att gruppen skall få en större insikt i hur den framtagna kompositen behandlas vid byggandet av båten.

Arbetsmiljöverket har upprättat följande två föreskrifter som anses relevanta vid arbete med hårdplast. Regelverken innehåller riktlinjer och allmänna råd för att säkerställa att arbetets risker minimeras.

- AFS 2005:18 - Hårdplaster
- AFS 2005:06 - Medicinska kontroller i arbetslivet

Fullt uthärdad epoxi utgör inte någon fara för människor, även om det i vissa fall kan rester av harts finnas kvar som kan leda till eksem. Det som däremot kan bli hälsofarligt är ohärdad harts och hårdare, vilka båda är starkt reaktiva ämnen som kan irritera hud och luftgångar. Upprepat arbete med epoxi kan leda till en framkallad allergi. I vissa hårdare finns dessutom aromatiska aminer, vilka kan vara cancerframkallande [34].

Arbetsmiljöverkets föreskrifter kan sammanfattas i ett antal punkter:

- **Riskbedömning och produktval:** Innan påbörjat projekt ska en grundlig genomgång av arbetet göras och farliga produkter ska, om möjligt, bytas ut mot mer skonsamma alternativ.
- **Tillstånd:** För hantering av vissa cancerframkallande hårdplastkomponenter krävs tillstånd av Arbetsmiljöverket innan arbetet kan påbörjas. För tillstånd krävs åtgärder mot bland annat luftföroreningar.
- **Arbetande personer:** Endast personer som regelbundet har genomgått läkarundersökning och teoretisk utbildning får arbeta med hårdplaster. Obehöriga

personer får inte vistas i lokalen.

- **Skyddsinstruktioner:** Regler och föreskrifter ska finnas tillgängliga på alla arbetsplatser. Hudkontakt med plast ska undvikas i största möjliga mån.
- **Arbetslokal:** Lokalen ska om möjligt ha undertryck till omgivande lokaler och miljö. Härdningskammare och ugn likaså. Utsugningsanordningar för att undvika luftföroreningar ska finnas. Lokalerna ska vara städade och saneras ofta.
- **Olycksfall:** Vid olycksfall ska en tydlig plan finnas över hur saneringsarbetet av lokal och utrustning ska gå till. Arbetstagare ska känna till denna plan.
- **Avfall:** Avfall och spill ska så fort som möjligt placeras i särskilda behållare utrustade med lock och text - 'Farligt avfall'.
- **Skyddsutrustning:** Vid arbete med hårdplast ska andningsskydd, ögonskydd, skyddshandskar och skyddskläder användas. Möjligheter till ögonspolning ska finnas.

7. RESULTAT

Nedan följer de resultat som har tagits fram under projektet. Resultaten är baserade på teoretiska beräkningar, praktiska drag- och slagprov, åldringssimulering i Weather-Ometer av provstavar samt tillverkning av optimistjolle innehållande cellulosafiber.

7.1 Teoretiska uppskattningar av kompositens elasticitetsmodul

Inför dragprovstester av kompositen gjordes teoretiska beräkningar av elasticitetsmodulen utifrån data från litteraturstudier av vad kompositmaterialet bör uppnå. Kompositens elasticitetsmodul, E_c , beräknades med hjälp av ekvation (1) och (2) från kapitel 2. Då fiberriktningen inte är bestämd utan har en mer slumpartad karaktär gjordes en medelvärdesberäkning av dessa två.

Ett medelvärde tas ut ifrån tabell 3.2 som illustrerar hur träfibers E-modul påverkas av fibrillvinkeln. Genom att ta ett medelvärde av värden mellan en fibrillvinkel på 20 till 30 grader, fås en E-modul på 55 GPa. Det specifika vinkelintervallet användes då det bedömdes vara representativt för den cellulosa som används.

Då epoxins slutgiltiga egenskaper beror av härdningstider och tillverkningsmetod är det svårt att exakt bestämma E-modulen för epoxi utifrån teori. Enligt databladet från NM Epoxi uppnår epoxi en E-modul på 2.7 GPa efter 16 timmar härdning vid 50 °C, se bilaga B. Då tillverkningen skedde under andra omständigheter än dessa, framförallt andra härdningstider, tas epoxins E-modul istället från det värde dragprovet gav, vilket är 1.22 GPa, se tabell 7.1.

De provstavar som tillverkades innehöll 25 wt% respektive 43 wt% cellulosa. Därmed genomfördes två olika beräkningar för dessa två fiberandelar i kompositen. Innan beräkningarna kunde göras måste viktandelen fiber översättas till volymsandel fiber av totala kompositen. Ekvation (3) i kapitel 2 användes för detta.

7.1.1 Teoretiska beräkningar av kompositens elasticitetsmodul

Genom att beräkna de olika E-modulerna för cellulosa- och glasfiberkompositer kan en jämförelse göras mellan dessa material och hur andelen fiber i kompositen påverkar kompositens styvhet. Nedan visas hur E-modulen för en cellulosakomposit med 25 wt% cellulosa kan beräknas.

$$\varphi = \frac{\frac{0.25}{1.5}}{\frac{0.25}{1.5} + \frac{0.75}{1.096}} = 0.19$$

$$E_{cp} = 0.19 * 55 + 0.81 * 1.22 = 11.75 \quad (\text{ekvation 1})$$

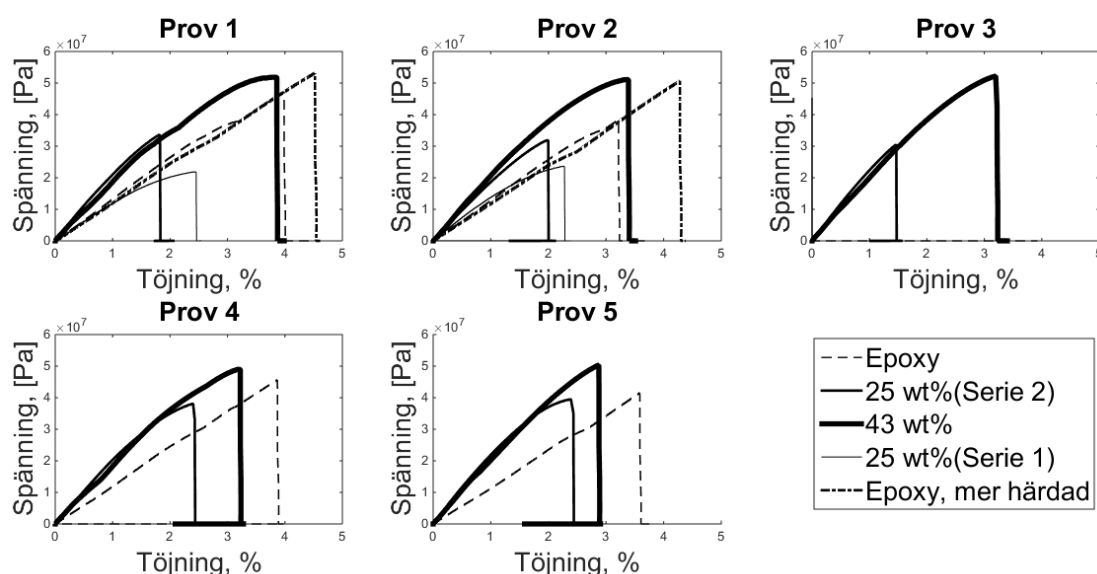
$$\frac{1}{E_{ct}} = \frac{0.19}{55} + \frac{0.81}{1.22} = 0.66 \rightarrow E_{ct} = 1.5 \quad (\text{ekvation 2})$$

$$E_c = \frac{11.75 + 1.50}{2} = 6.63 \quad (\text{medelvärde av ekvation 1 och 2})$$

Med en viktsandel av 25 % cellulosa fås en teoretisk E-modul på cirka 6.6 GPa. Motsvarande beräkningar för en cellulosakomposit innehållande 43 wt% cellulosa ger en teoretisk E-modul på cirka 11 GPa. Som en jämförelse beräknas på samma sätt modulen för glasfiberförstärkta kompositer med samma volymandel fibrer. Elasticitetsmodulen för glasfibern sattes till 70 GPa. Då en fiberkomposit med 25 wt% glasfiber används fås en teoretisk E-modul på cirka 14.2 GPa och med 43 wt% glasfiber cirka 21.5 GPa. I fallet med 25 wt% fiber ger alltså glasfibern 115 % högre E-modul. Jämförs kompositerna med 43 wt% fiber ger glasfibern 94 % högre E-modul.

7.2 Drag- och slagprov

Figur 7.1 visar spännings-töjningskurvorna från dragproven på de fem, torra, referensproverna. En viss spridning i de experimentella resultaten kan noteras, men några slutsatser kan ändå dras.



Figur 7.1: Resultat från dragprov innan vattenbad. Lutningen på kurvorna nära origo ger E-modulen.

Om man beaktar medelvärdena för respektive sammansättning så framkommer det att kompositen med 25 wt% cellulosa (serie 2) hade högst E-modul men lägst brottgräns. Ökas andelen cellulosa till 43 wt% minskade E-modulen men materialet blev segare och klarade en större töjning innan brott. Brotttöjningen hos materialen var relativt låg ($<5\%$) och kurvorna visar att brottgränsen och sträckgränsen ligger i princip på samma nivå. Det innebär att materialet är relativt sprött och inte plasticerar innan brott. Jämfört med den rena epoxin blev de fiberförstärkta materialen i allmänhet styvare och proverna med 43 wt% cellulosa klarade av ca 50 % högre spänning innan brott än de innehållande 25 wt%. Det var stor skillnad mellan hur mycket materialet töjdes innan brott och av figur 7.1 framgår det att stavarna med 43 wt% cellulosa hade en högre brotttöjning än de som innehöll 25 wt%. Högst brotttöjning hade dock den oförstärkta epoxin. Noterbart är att en längre härdningstid för epoxin gav en något högre brottgräns och E-modul, se även tabell 7.2.

Notera att något blivit fel under mätningen på epoxiprov 3 och dessa data användes inte vidare i beräkningarna. Endast två provstavar av 25 wt% (serie 1) och mer härdad epoxi fanns tillgängliga vid testernas tidpunkt och finns därför bara representerade i två av graferna i figur 7.1.

Tabell 7.1 visar medelvärdena av de olika mekaniska egenskaperna hos de testade materialen. Värdena i tabell 7.1 är beräknade med hjälp av ekvationerna (4), (5), (7) och (8).

Tabell 7.1: *Medelvärden av de mekaniska egenskaperna hos materialen med olika sammansättning.*

Mekaniska egenskaper	E-modul (GPa)	Brottgräns (MPa)	Slagseghet (kJ/m ²)
Ren epoxi	1.22	43.62	9.46
Ren epoxi, mer härdad	1.27	50.23	-
25 wt% cellulosa serie 1	1.24	22.75	-
25 wt% cellulosa serie 2	2.02	34.70	12.65
43 wt% cellulosa	1.76	50.90	17.18

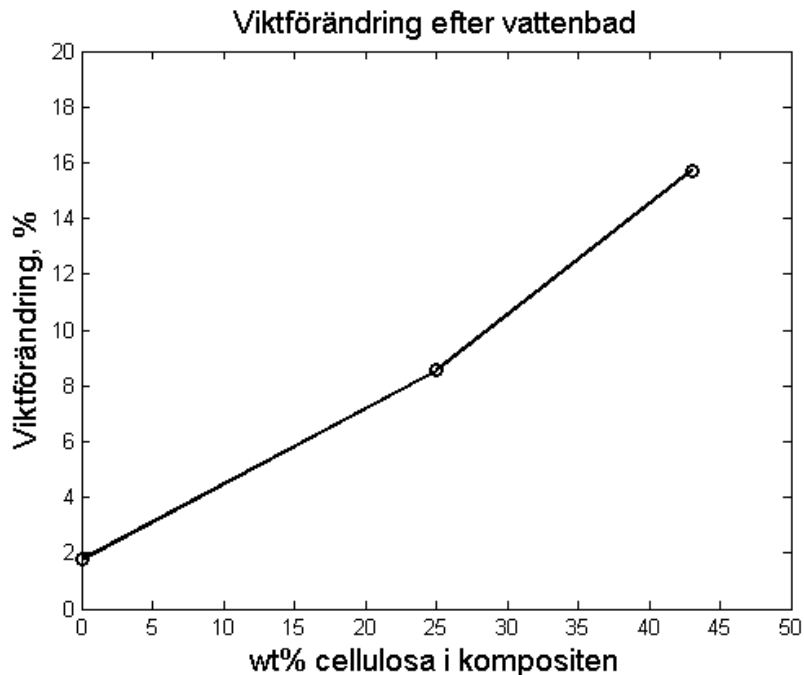
Här skall noteras att en tillsats av cellulosafibrer ökade slagsegheten tydligt. Detta tack vare fibernätverkets förmåga att hålla ihop materialet. Högst slagseghet hade kompositen med 43 wt% fiber. I två fall genomfördes inga slagtest till följd av det begränsade antalet provstavar.

För att beräkna elasticitetsmodulen för fiber utifrån de värden som fåtts från dragproven användes ekvation (1). Genom att använda E-modulerna från tabell 7.1 för 25 wt% cellulosa (serie 2) och ren epoxi kan fiberns verkliga elasticitetsmodul beräknas.

$$2.02 = 0.19 * E_f + 0.81 * 1.22 \rightarrow E_f = \frac{2.02 - (0.81 * 1.22)}{0.19} = 5.31$$

Fiberns E-modul beräknad utifrån dragprovet blir alltså 5.3 GPa, vilket är en tiondel av det teoretiska värdet. Orsakerna till denna skillnad kan vara flera vilket diskuteras senare.

Alla olika typer av provstavar har lagts i vatten för att kunna dra slutsatser huruvida stavarna absorberar vatten och om deras mekaniska egenskaper påverkas av vattnet. I figur 7.2 och 7.3 visas hur provstavarnas vikt och dimensioner förändrades till följd av tre veckors vattenexponering.

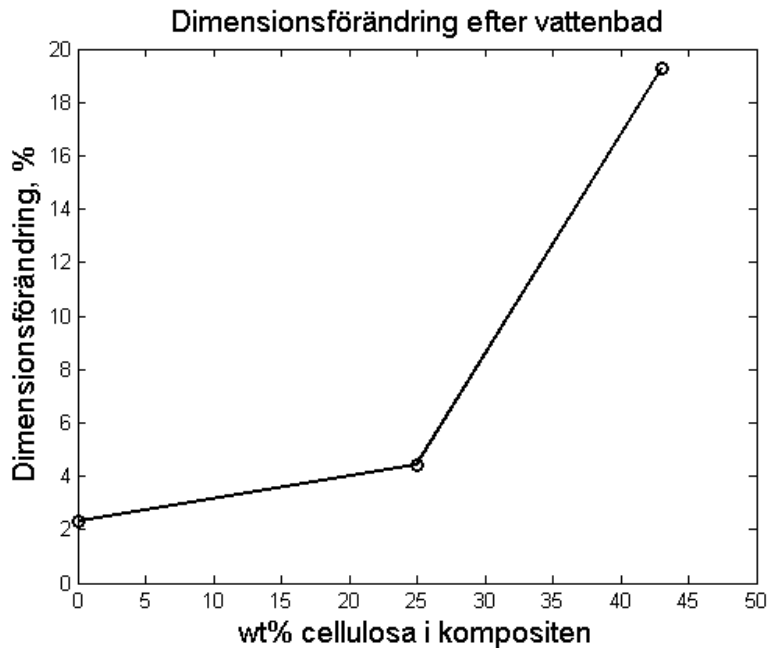


Figur 7.2: Viktförändringen hos provstavar som funktion av volymandelen fibrer efter tre veckor i vattenbadet.

Sambandet mellan viktförändringen och andelen cellulosa i provstavarna är näst intill linjärt och det är tydligt att epoxin inte helt och hållet motverkar cellulösans vattenabsorption. Provstavarna ökade som mest med 16 % i vikt och påverkades helt klart av vattnet. Kurvan i figur 7.2 skär inte genom origo vilket innebär att även epoxi absorberar vatten med en viktökning på knappt 2 %. Här bör påpekas att provstavarnas kantsidor inte är helt täckta av epoxi, på grund av skärytorna som blir då provstavarna skärs ut, och det är sannolikt fibrerna närmast dessa kantytter som sugit upp mest vatten.

Ytterligare ett test genomfördes på provstavarna innehållande 25 wt% cellulosa där de i tre veckor utsattes för 38 °C och en relativ luftfuktighet av 95 %. Detta gav en viktökning på 0.55 % i medel, vilket är väsentligt lägre jämfört med resultaten ifrån vattenbadet. Detta innebär att enbart en hög luftfuktighet inte resulterar i någon nämnvärd vattenabsorption utan det är då materialet ligger i vatten absorptionen sker.

Både innan och efter vattenbadet mättes dimensionerna hos alla provstavar på tre ställen längs staven, både bredd och tjocklek. Detta användes för att bestämma hur stavarnas tvärsnittsarea förändrades till följd av vattenbadet, se figur 7.3.

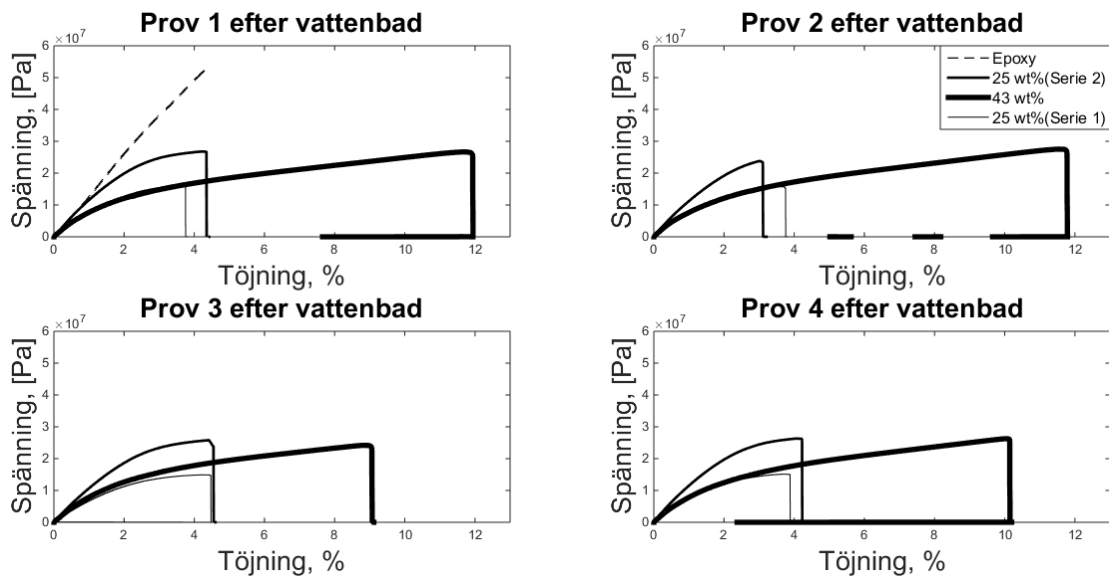


Figur 7.3: Förändringen av tvärsnittsarean hos provstavar som funktion av volymandelen fibrer efter tre veckor i vattenbadet.

Provstavarorna svällde inte på samma linjära sätt som de tog upp vatten, se figur 7.2, utan resultatet är mer åt det exponentiella hållet. De provstavar som innehöll 43 wt% cellulosa hade en tvärsnittsarea som var nästan 20 % större än innan vattenbadet. Med 25 wt% cellulosa var dimensionsförändringarna inte alls lika markanta; tvärsnittsarean var kring 4 % större. Värt att notera är även att enbart epoxiproverna svällde med lite drygt 2 %.

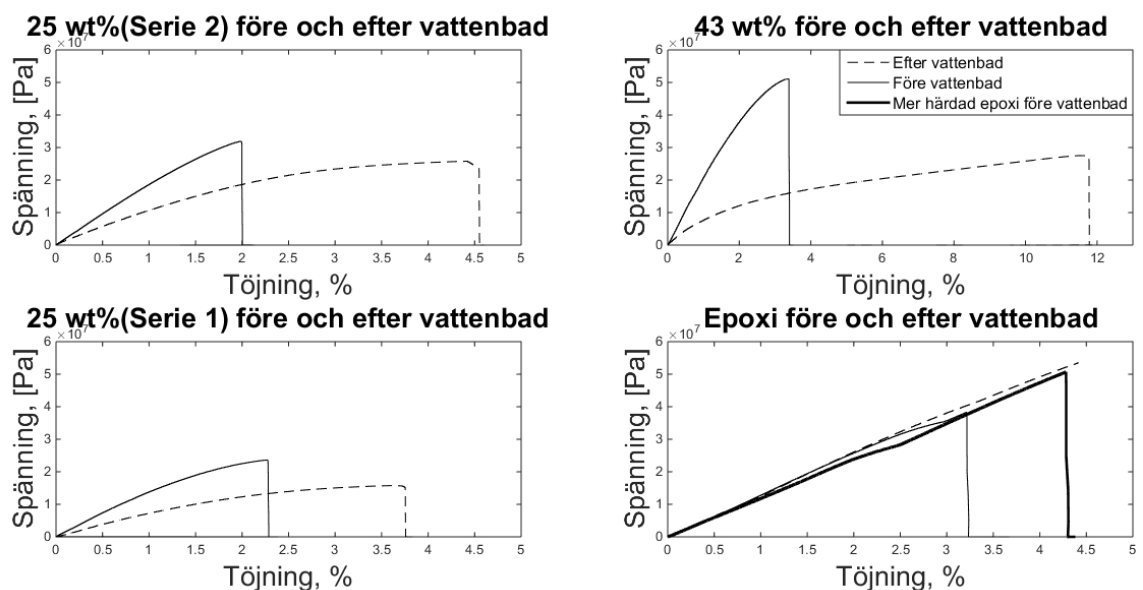
Jämförs figur 7.2 och 7.3 syns att dimensionsförändringarna var större än viktförändringarna för oförstärkt epoxi och provstavar med 43 wt% cellulosa. Däremot var dimensionsförändringarna betydligt mindre än den procentuella viktuppgången för provstavar innehållande 25 wt% cellulosa.

I figur 7.4 visas spännings-töjningskurvor från dragproven på provstavar efter vattenbadet. Endast i ett fall (prov 1 efter vattenbad) kunde den oförstärkta epoxin dras till brott efter vattenexponeringen. Dragprovaren hade en maximalt tillåten last av 2 kN, vilket inte räckte för att dra epoxiprovstavar till brott. Det innebär att materialet blivit starkare av vattnet och inte lika sprött. Eftersom provstavar inte gick av efter en längre tid i vattnet genomfördes nya dragprov på stavar som inte legat i vatten, men i luft under tre veckor. Detta för att undersöka huruvida provstavar härdats ytterligare under sina tre veckor i vattenbadet. Hypotesen visade sig vara sann och de nya testerna på torra provstavar klarade en högre spänning innan brott än tidigare uppmätt. Däremot uppmättes samma E-modul för epoxin innan och efter vattenbadet.



Figur 7.4: Resultat från dragprov efter tre veckors vattenbad.

För att tydligt se hur de mekaniska egenskaperna förändrats till följd av vattenbadet visas i figur 7.5 spännings-töjningskurvorna för de olika materialen innan och efter vattenexponeringen. De streckade linjerna visar resultaten från dragproven efter vattenbadet och de heldragna från innan.



Figur 7.5: Spännings-töjningssamband för de olika materialen före och efter vattenbadet.

Figur 7.5 visar tydligt på förändringar i de mekaniska egenskaperna till följd av vattenexponeringen. Alla prover som innehöll cellulosa uppvisade en lägre E-modul, en lägre brottspänning och töjdes ut mer innan brott. Störst skillnad mellan innan och efter vattenbadet syns hos provstavar med 43 wt% cellulosa. Dessa absorberar mest vatten och av figur 7.5 framgår att detta resulterar i en markant minskning av E-modulen och styrkan hos materialet. Längs ner till höger visas hur epoxi påverkades av vattnet. Tydligt här är att E-modulen inte

förändrats utan enbart hur långt materialet töjs ut innan brott. Då provstavarna som legat i vattenbad inte gick av har materialet blivit mer töjbart. Tabell 7.2 nedan sammanfattar resultaten av de mekaniska mätningarna på provstavar som legat i vattenbadet.

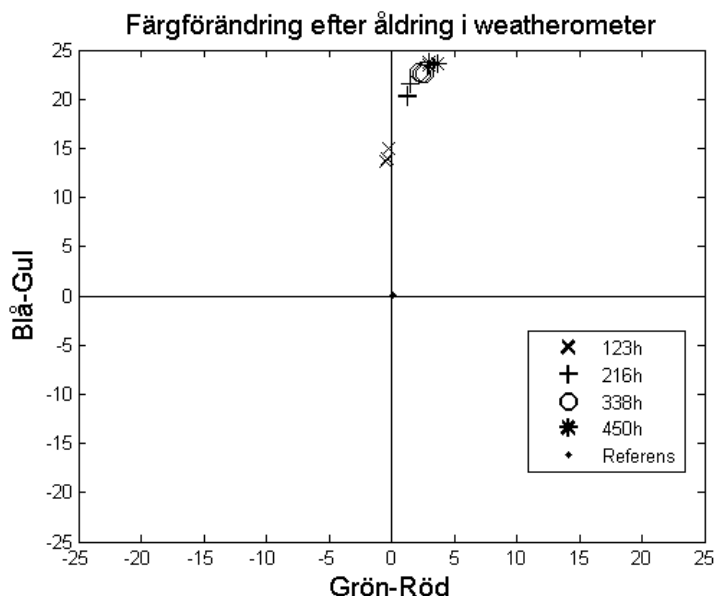
Tabell 7.2: Medelvärden av de mekaniska egenskaperna hos materialen med olika sammansättning efter vattenbadet.

Mekaniska egenskaper	E-modul (GPa)	Brottgräns (MPa)	Slagseghet (kJ/m ²)
Ren epoxi	1.26	Gick inte av	8.12
25 wt% cellulosa serie 1	0.68	15.50	-
25 wt% cellulosa serie 2	1.08	25.68	Gick inte av
43 wt% cellulosa	0.73	26.16	Gick inte av

Som tidigare nämnts minskade E-modulen och brottgränsen avsevärt till följd av vattenbadet för de prover som innehöll cellulosa. Gällande slagsegheten och hur den påverkas av vatten var effekten tydlig i de flesta fall. För ren epoxi har slagsegheten minskat från 9.46 kJ/m² till 8.12 kJ/m², de övriga materialen gick inte att slå av efter vattenbadet. De cellulosa-innehållande kompositerna blev alla mer duktila, vilket resulterat i att de böjdes och gick igenom slagprovaren utan att gå av. Även om en tyngre hammare användes vid slagprovningen gick inte stavarna av. Vattenexponeringen gjorde kompositerna mer duktila och slagtåliga. Detta är i överensstämmelse med den ökade brotttöjningen vid dragprovningen.

7.3 UV-ljusets inverkan på materialet

För att undersöka huruvida materialet påverkas av solljus placerades provstavar i en åldringskammare, Ci4000 Weather-Ometer. Mer om hur den fungerar beskrivs i kapitel 2. Fyra prover innehållande 25 wt% cellulosa (serie 1) exponerades för UV-ljus i upp till 450 timmar. Resultatet visas i figur 7.6.



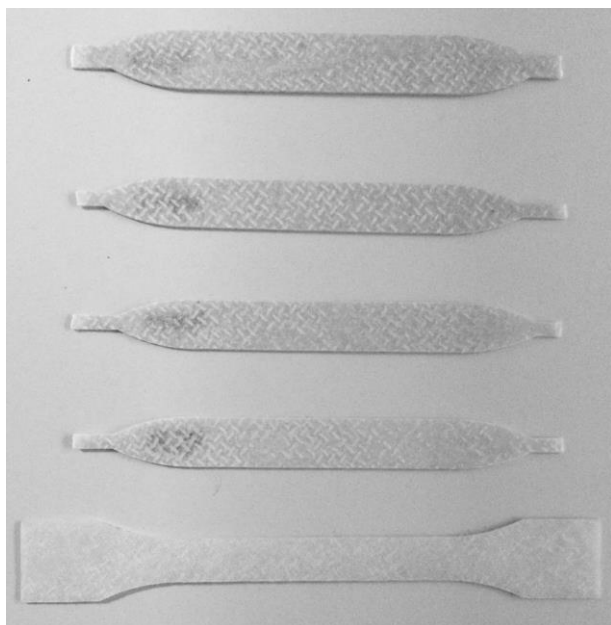
Figur 7.6: Figuren visar färgförändringen hos de provstavar som åldrats i åldringskammaren.

I tabell 7.3 representerar CIEDa ändringar i den grön-röda färgskalan, där ett positivt värde innebär rödare färg, och CIEDb är ändringarna i den blå-gula skalan. Tillhörande figur 7.6 illustrerar de tabulerade färgändringarna i förhållande till referensprovet. Provbitarna exponerades under 123, 216, 338 och 450 timmar i Weather-Ometern. För varje prov gjordes tre färgmätningar med en spektrofotometer. Till följd av UV-exponeringen ändrade sig till en början färgvärdena bara åt det gula hållet, längs den blå - gula axeln, vilket bekräftar vad som kunde observeras visuellt.

Tabell 7.3: Färgförändringen hos provstavar som åldrats i Weather-Ometern

Tid i Weather-Ometer (h)	CIEDa (Grön-Röd)	CIEDb (Blå-Gul)
0	0.09	0.10
123	-0.51	13.63
123	-0.28	14.96
123	-0.38	14.03
216	1.26	20.35
216	1.45	21.61
216	1.23	20.24
338	2.39	22.58
338	2.14	22.74
338	2.66	22.59
450	3.70	23.56
450	3.03	23.83
450	2.97	23.49

Volvos materialavdelning räknar färgändringar över 0.5 som stora förändringar. Detta kan jämföras med den största ändringen i b-koordinaten för referensprovet på $23.49 - 0.10 = 23.39$ som noterades efter 450 h. Redan vid 100 h går det att se en stor förändring i färg med blotta ögat, se figur 7.7 nedan.



Figur 7.7: Provstavarna efter olika lång tid i Weather-Ometern

I figur 7.7 syns tydligt skillnaderna i färg efter olika lång tid i åldringskammaren. Det understa provet är en referensstav som inte utsatts för UV-ljus. Nerifrån och upp ökar sedan åldringstiden, med det provet som legat längst, 450 timmar, överst.

7.4 Optimistjollen

Hela projektet har lett fram till tillverkningen av en optimistjolle. Tillsammans med SSPA har ett skrov byggts av en komposit med cellulosa och epoxi. Båten innehåller, som tidigare nämnts, olika fiberkoncentrationer i de olika delarna. Botten av båten är uppbyggd av laminat innehållande 30 wt% cellulosa och sidorna består av 40 wt% cellulosa i en epoximatrix. Vid tillverkningen av båten har en sandwichmetod nyttjats där ett cellmaterial använts i botten av skrovet. Tillverkningen av båten gick till synes utan några större problem. Fiberväven har för det mesta väts av epoxin på ett bra sätt. På ett fåtal ställen har dock epoxin haft svårt att impregnera fibernätverket, vilket visade sig som vita områden på skrovet. Fibernätverket har även släppt på några ställen, främst mot aktern i båten, vilket har gett områden med endast epoxi.

På grund av den sena tidpunkt då båten var färdighärdad, fanns inte någon möjlighet att testa skrovets sjöduglighet. Denna behöver säkerställas i framtiden. Den lätta cellulosan har möjliggjort ett lätt båtskrov, som väger betydligt mindre än ett skrov innehållande glasfiber. Figur 7.8 är ett foto av det färdiga skrovet. Båten vägde 22,5 kg, medan en vanlig optimistjolle väger 35 kg. De mörka fläckarna är områden med modifierad cellulosa, framställt i avsikt att förbättra vattenresistensen. Dessa modifierade cellulosastrukturer har tagits fram av kemigruppen.



Figur 7.7: Den färdiga optimistjollen [27].

8. DISKUSSION

Något som är viktigt att ha med sig då följande kapitel behandlas är de fyra olika serier provstavar som har använts i de tester som har genomförts i projektet. De fyra serierna är:

- 25 wt% cellulosa (Serie 1)
- 25 wt% cellulosa (Serie 2)
- 43 wt% cellulosa
- Epoxi (0 wt% cellulosa)

Den första serien som tillverkades var 25 wt% cellulosa. Den fiberväv som användes vid tillverkningen av dessa provstavar var en väv som innehöll mycket luft, var relativt svag och som visade sig därmed vara svår att hantera. Resultatet blev en komposit med många luftporer. Då porer tydligt påverkar de mekaniska egenskaperna hos en komposit bestämdes det att en annan typ av fiberväv skulle användas och nya provstavar tillverkas. De nya fiberstrukturerna som användes var mycket mer kompakta och därmed lättare att hantera. Resterande två serier (25 wt% (serie 2) och 43 wt%) innehåller denna fiberväv. Samtidigt som nya provstavar tillverkades framställdes också provstavar av enbart epoxi.

8.1 Jämförelse av teoretiska beräkningar för cellulosa och glasfiber

Utifrån de teoretiska beräkningarna noteras att skillnaden i styvhet mellan kompositen innehållande glasfiber och cellulosa är påfallande stor. Vid 25 wt% fiber skiljer det 7.5 GPa och vid 43 wt% skiljer det 10.5 GPa, vilket motsvarar ungefär en dubbling av cellulosans styvhet i respektive fall. Däremot kan forskningen inom nanocellulosaområdet möjligtvis kunna innebära en förändring av detta. I dagens läge behövs dock tjockare laminat för att kunna kompensera denna styvhetsdifferens. Risken till följd av en sådan justering är att den nya kompositen skulle kunna uppfattas som osmidig på grund av sin tjocklek och på så vis bli ointressant inom flera av kompositmaterialens användningsområden.

8.2 Jämförelse av teoretiska beräkningar & praktiska tester av cellulosa

Vid jämförelse av resultaten från dragproven och de teoretiska beräkningarna noterades en markant skillnad i elasticitetsmodul. Med de teoretiska beräkningarna erhöles värden på 6.6 GPa och 11 GPa för 25 wt% (Serie 2) respektive 43 wt% cellulosa, samtidigt som dragproven visade på värden på 2 samt 1.75 GPa. Anmärkningsvärt är att med de teoretiska beräkningarna fås en högre elasticitetsmodul för fallet med 43 wt% fiber medan dragproven visar på motsatsen, det vill säga en högre elasticitetsmodul med 25 wt% fiber. Rent allmänt så ger alltid ekvationerna (1) och (2) i kapitel 2 en högre modul om en högre fiberandel används i kompositen. I realiteten skulle detta innebära att en optimal komposit skulle innehålla en fiberandel på närmare 100 wt%. Detta är dock inte realistiskt då även andra aspekter, så som vidhäftningsförmåga, är starkt kopplade till de mekaniska egenskaperna. Ekvationerna (1) och (2) är således förenklingar av verkligheten och kan snarare endast användas som en fingervisning om kompositens potentiella egenskaper. Med en lägre fiberkoncentration kan en större andel fiber omfamnas av matris, vilket ger en starkare bindning i kompositen och således bättre mekaniska egenskaper. I det här fallet torde den lägre E-modulen för kompositen innehållande 43 wt% bero på att epoxihartset inte kunnat tränga in i det täta fibernätverket i tillräckligt hög grad. Då kan spänningarna vid belastningen inte heller överföras till alla fibrer. Dragproven visar alltså på att en fiberhalt runt 25 wt% torde vara optimal när det gäller styvheten, i det här fallet. För andra typer av fiber kan det vara en annan

sammansättning av fiber och matris som ger styvast möjliga material. Exempelvis för glasfiber ligger den optimala fiberandelen på cirka 70 wt% fiber.

Vad gäller den stora skillnaden mellan teori och realitet för de mekaniska egenskaperna kan inledningsvis nämnas att teorin utgår ifrån en fiberstruktur med perfekt parallellorienterade långa fibrer. I projektet användes en fiberväv med slumporienterad struktur med korta fibrer, vilket intuitivt bidrar till sämre egenskaper hos kompositen. För att få en tydligare bild av styvhetsdifferensen beräknades fiberns elasticitetsmodul utgående från det uppmätta värdet för kompositens styvhet (25 wt% cellulosa (serie 2)) enligt ekvation (1) i kapitel 2 där kompositen endast beskrivs med en parallell struktur. Utifrån detta resultat (5.3 GPa för fibern) konstateras att det skiljer ungefär en faktor 10 mellan det teoretiska värdet och det verkliga ($\frac{55}{5.3} \approx 10$). Resultatet bör beaktas kritiskt då det finns ett flertal aspekter till att skillnaden är så stor. Främst beror det på de antaganden som görs i de teoretiska modellerna. En parallellt fiberorienterad struktur leder till att andra viktiga aspekter i kompositen ej påverkar styvheten i någon större mån. I det här fallet är det två faktorer som leder fram till det låga beräknade värdet på fiberns elasticitetsmodul. Dels att fibrerna i den använda strukturen är mer slumpmässigt fördelade och dels att fibrerna är korta. Ekvation (1) förutsätter långa parallellt orienterade fibrer. Ekvationen kommer därför att underskatta fibrernas verkliga modul, även om den sannolikt inte kommer upp till det teoretiska värdet på 55 GPa.

Detta påvisar då tydligt skillnaden mellan teori och verklighet. Med en mer realistisk modell kan aspekter såsom fiberlängd och fiberorientering tas hänsyn till, vilket reducerar fiberns sammanlagda påverkan på kompositens styvhet.

8.3 Jämförelse av kompositernas mekaniska egenskaper innan och efter vattenbadet

Efter att provstavarna legat i vattenbad under 3 och 6 veckor så utfördes dragprov på samtliga materialserier och tydliga förändringar i respektive fall observerades. Det var endast provstavarna med 25 wt% cellulosa (serie 1) som legat i vattenbadet under 6 veckor på grund av att de andra stavarna togs fram senare i projektet. Cellulosakompositens mekaniska egenskaper förändrades markant, en skillnad på 0.94 och 1.03 GPa för 25 wt% (serie 2) respektive 43 wt% cellulosa. Detta motsvarar en minskning av 47 % respektive 59 % i elasticitetsmodul. Vidare ökade dock brottöjningen med 130 % och 240 % för 25 respektive 43 wt% cellulosa vilket tyder på att materialet fått en mer duktil karaktär. Även förändringar av brottgränsen noterades. Innan vattenbadet uppnåddes en brottgräns på 34.7 MPa med 25 wt% fibrer (serie 2) vilken efter vattenbadet sjunkit till 25.7 MPa. Med 43 wt% cellulosa var beteendet liknande med en försämring från 50.9 MPa till 26.2 MPa. Efter vattenbadet hade alltså båda proverna nästan samma brottgräns trots att kompositen med 43 wt% cellulosa innan vattenbadet hade en betydligt högre brottgräns. En högre fiberandel gav alltså en större försämring av brottgränsen. Vatten har därmed helt klart en negativ påverkan på materialet och att använda detta material i båtar, som kommer utsättas för vatten dagligen, kan vara tveksamt. Dock får man komma ihåg att vid provstavarnas kantar är inte fibrerna skyddade av epoxin utan de exponerades mer direkt för vattnet. Om dessa kanter varit skyddade hade försämringen av de mekaniska egenskaperna sannolikt varit mindre markant.

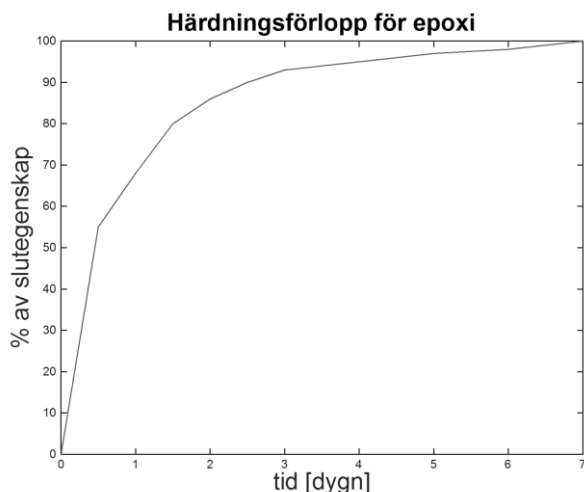
Noterbart är att E-modulen för kompositen med 43 wt% cellulosa påverkats mer än den för provstavarna innehållande 25 wt%, något som troligen beror på mängden vatten de olika provstavarna absorberat. Genom att mäta provstavarnas vikt före och efter vattenbadet kunde vattenupptagningsförmågan kvantifieras. Med 25 wt% cellulosa (Serie 2) ökade kompositens vikt med 8.6 % och med 43 wt% cellulosa ökade vikten med 15.7 %. Sammanfattningsvis kan det konstateras att en högre fiberkoncentration leder till en större vattenabsorption och på så vis en försämring av de mekaniska egenskaperna. Detta beror på, som nämnts tidigare i kapitel 3.3, en försämring av vidhäftningsförmågan mellan fiber och matris samt att fibrernas mekaniska egenskaper försämras då de tar upp vatten. Appliceras dessa resultat på en optimistjolle som väger 35 kg innebär en viktuppgång på 15.7 % att båten efter 3 veckor i vatten kommer väga 40.5 kg. Det är inte säkerställt att vattenabsorptionen är mättad och således är det osäkert hur mycket mer vatten båten kommer absorbera. Samtidigt är inte hela båten nedsänkt i vatten vilket leder till en lägre viktökning.

Vattenabsorptionen har varit ett av de problem som det legat stort fokus på under hela projektet. En målsättning har varit att kunna minimera denna med hjälp av behandlad cellulosa. Det togs fram två lösningsalternativ som var möjliga för projektet av kemigruppen. En eter- respektive esterbehandlad cellulosa framställdes i mängder av cirka 30 gram. Tyvärr blev fiberstrukturens yta såpass ojämn att några hanterbara provstavar inte kunde tillverkas. Därmed har inte några slutsatser kunnat dras rörande dessa materials mekaniska egenskaper. Teoretiskt skall dock behandlingarna resultera i en tydligt minskad vattenupptagning och därmed en mindre inverkan på elasticitetsmodulen efter vattenbadet. Om projektet kommer att bearbetas vidare i framtiden av en ny grupp, i form av ett kandidatarbete, är en stor utmaning att klargöra hur tillräckligt med behandlad cellulosa skall kunna tillverkas.

Ytterligare tester i form av slagprov genomfördes på provstavar som legat i vattenbad och jämförts med torra referenser. Ingen av provstavarna som innehöll cellulosa som legat i vattenbad gick av medan alla som inte utsatts för vatten bröts. Detta är troligen en följd av att det vatten som cellulosan har absorberat gjort materialet mer duktilt. Provtavarna böjdes därmed istället för att gå av. Detta är faktiskt i princip positivt eftersom det innebär att båtskrovet inte blir sprött utan klara av plötsliga slag.

8.4 Jämförelse av de mekaniska egenskaperna epoxi innan och efter vattenbadet

Det konstaterades att provstavarna av ren epoxi kunde ta upp en marginellt högre belastning efter tre veckor i vattenbad, en ökning på 0.04 GPa i E-modul jämfört med det torra materialet. Denna förändring är dock nästintill försumbar sett till den experimentella osäkerheten. De blöta stavarna gick inte heller av under dragproven. Någon brottgräns kunde därmed inte fastställas, men säkert är att den är högre än innan vattenbadet. En intressant observation var att både E-modul (dock marginellt) och brottöjning ökade jämfört med de torra proverna. Vanligtvis ökar endast en av dessa två parametrar men i detta fall har troligtvis epoxin härdat under längre tid än referensen. För att undersöka detta närmre gjordes ytterligare dragprov av torra provstavar. De nya testerna visade på en E-modul av 1.27 GPa samt en töjning på cirka 4.3 % och det kunde därför bekräftas att epoxins mekaniska egenskaper har förbättrats. Sannolikt har epoxins långa härdningsprocess orsakat detta fenomen, se figur 8.1.



Figur 8.1: Härtningsförlopp för epoxi [20]

Figur 8.1 visar att epoxins härtningsgrad uppgår till 90 % efter ungefär tre dygn. Resterande 10 % tar dock betydligt längre tid. Eftersom att de första proverna genomfördes relativt nära inpå provstavarnas tillverkningsdatum är det därmed rimligt att anta att de sannolikt inte var helt och hållet uthärdade.

8.5 Tillverkning

En viktig del att diskutera är tillverkningens inverkan på materialegenskaperna. Ett tydligt exempel på detta från projektet är serie 1 och serie 2 av provstavarna som innehöll 25 wt% cellulosa. Serie 1 tillverkades med en annan fiberväv än serie 2 vilket resulterade i betydligt sämre mekaniska egenskaper. I serie 1 bildades porer i kompositen och troligen blev vidhäftningen inte blev lika bra mellan epoxi och fibrerna. En trolig anledning till detta är att cellulosanätverket i serie 1 hade en lösare struktur och föll enklare samman. Denna väv var således svårare att hantera och få jämnt utbredd.

Exemplet ovan visar att tillverkningstekniken och materialet som används har haft stor betydelse för de resultat som testerna sedan gav. För att få bättre resultat är det lämpligt att tillverka flera kompositserier på olika sätt från samma fiber och matris och på så vis få en tydligare bild över hur de mekaniska egenskaperna kan förändras av tillverkningen. De fibervävar som använts skiljde sig avsevärt åt och det vore lämpligt i ett senare steg att testa olika fibervävar för att ta fram den bästa för båtskrovet.

8.6 Analys av åldringssimulering i Weather-Ometer

Anledningen till att endast den första serien provstavar med 25 wt% cellulosa testades med avseende på UV-känsligheten var att det inte fanns några andra provstavar att tillgå vid tidpunkten då testerna behövde påbörjas för att kunna få ut någon relevant information.

Det resultat som testerna visade på var inte särskilt positiva då stora färgändringar observerades. De prover som varit inne längst uppvisade även ett ökat rött färginslag, vilket kan tolkas som att den gula färgen är mättad efter ungefär 340 timmar. Att proverna gulnar är också något som stämmer överens med vad som diskuteras i kapitel 3.1.3 och 4.5. Det fanns ingen tyvärr inte någon möjlighet att testa dessa provstavar mekaniskt men det är ändå rimligt att anta att materialets mekaniska egenskaper har försämrats. Detta på grund av den nedbrytning som UV-ljus medför. Provstavarnas yta är ojämn och inte helt enfärgad, detta

skulle kunna leda till små felaktigheter i mätdata. Provresultaten stämmer dock bra överens med vad som kan ses med blotta ögat och kan anses som relevanta.

Vid fortsatta studier bör fler provstavar med olika sammansättningar testas för att se om det går att dra ytterligare slutsatser kring åldringen. Dessa bör även åldras under längre tid och vara utformade på ett sådant sätt att det går att göra dragprov.

Åldringen av materialet sker alltså mycket snabbt och materialet i sin grundform rekommenderas inte att utsättas för direkt solljus under längre tid. Om materialet används i någon komponent bör det täckas av en gelcoat och infärgas. Detta är ett vanligt sätt att behandla kompositer och kommer ge ett ökat skydd mot UV-strålning.

9. SLUTSATSER

Projektets inledande litteraturstudie utgjorde grunden till det vidare arbetet och gav en god inblick i vad som krävs av ingående material i en komposit. Dels behandlades mekaniska egenskaper och dels tillverkningsaspekter såsom tillverkningsmetoder och lagkrav. De teoretiska beräkningar som gjordes var nödvändiga för att kunna jämföra med den praktiska testningen av materialet.

Inte helt oväntat stämmer de teoretiskt beräknade värdena inte överens med de värden som erhöles vid experimentella tester av materialet. En bidragande orsak till detta är att de teoretiska värden och matematiska modeller som fanns att tillgå använder sig av flertalet antaganden och förenklingar av verkligheten. Kanske framförallt då fiberorienteringen i kompositen är av oordnad karaktär i verkligheten, men parallell eller tvärorienterad i teorin samt att ingen hänsyn tas till den ändliga fiberlängden i de enkla modeller som använts.

Experimenten visade att cellulosafibrerna har en förstärkande effekt. Den epoxi som användes hade en E-modul på 1.2 GPa, vilket kan jämföras med den styvaste kompositen med 25wt% cellulosafiber som hade en E-modul av cirka 2 GPa (detta gäller de torra proverna). Här finns sannolikt ett utrymme för att ytterligare förbättra de mekaniska egenskaperna. Vidhäftningen till harts och impregneringen av fibernätverket utgör idag problem och förbättringar skulle sannolikt kunna uppnås genom att kemiskt göra cellulosan mer hydrofob. Betydelsen av ofullständig genomträngning syntes tydligt i skillnaden mellan de två serierna av kompositer med 25 wt% respektive 43 wt% fibrer. Även i båtskrovet fanns det områden där fibernätverket inte blivit helt impregnerat av epoxin.

Obehandlade cellulosafiber kan i dagsläget inte anses vara en fullgod ersättare för glasfiber i en komposit med epoxi, främst med tanke på den avsevärt lägre styvheten hos cellulosan. En annan anledning, som såväl litteraturstudierna som de praktiska testerna visat, är cellulosa's allt för höga vattenabsorption i en applikation som båtskrov. Cellulosafiberkompositen skulle kunna vara ett alternativ i komponenter där en glasfiberkomposit är överdimensionerad. Känsligheten mot UV-ljus är också något som måste beaktas, speciellt i utomhusapplikationer.

9.1 Trovärdighetsanalys

De mätresultat som erhållits kan inte med 100 % säkerhet sägas stämma överens med verkligheten och bör ses som riktlinjer. Mätningarna av provstavarnas dimensioner har gjorts för hand med skjutmått med digital avläsning, det finns alltså en risk för fel till följd av den mänskliga faktorn. De beräknade tvärsnittsareorna är medelvärden av dessa mätningar och kan skilja sig från provstavarnas verkliga dimensioner. De beräknade mekaniska egenskaperna står i direkt relation till de uppmätta areorna och eventuella mätfel följer alltså med. Även de dimensionändringar som uppmäts kan vara påverkade av inexakta mätningar. De mekaniska mätningarna är alltid behäftade med en viss onoggrannhet som kan relateras till den mätutrustning som använts. De faktorer som nämnts här brukar dock anses ha en liten inverkan och inte påverka några generella slutsatser. Detta gäller även i detta projekt.

Att enbart testa fem provstavar av varje serie kan egentligen inte anses vara tillräckligt många för att erhålla statistisk säkerhet kring respektive series mekaniska egenskaper. Detta gäller i första hand de provstavar där endast två tester har genomförts.

9.2 Rekommendationer till fortsatt arbete

- Ytterligare tester av provstavar innehållande flera olika sammansättningar av cellulosa och epoxi behöver undersökas för att med säkerhet kunna fastställa cellulosafibers potential. Framförallt gäller detta test av UV-beständigheten, där endast ett slags provstavar har testats i dagsläget.
- Drag- och slagseghetsprov behöver göras på åldrade provstavar för att undersöka hur UV-ljuset påverkar materialets mekaniska egenskaper. Mer ingående test av vattenbeständigheten bör genomföras, med provstavar som legat i vatten längre. Detta för att kunna fastställa hur mycket vatten som absorberas vid jämvikt.
- Högsta prioritet bör läggas vid att ta fram stora mängder modifierad cellulosa, som står emot vatten på ett bättre sätt, och sedan testa denna på samma sätt som den omodifierade cellulosan.
- Huruvida båten kommer flyta och vara sjöduglig behöver utvärderas vid fullskaliga tester.

REFERENSER

- [1] Salar Bagherpour, *Fibre reinforced polyester composites*. Najafabad: INTECH, 2012.
- [2] Lope G. Tabil and Satyanarayan Panigrahi Xue Li, *Chemical treatments of tatural fibre for use in natural fibre-reinforced composites: A review*," Journal of Polymers and the Environment, vol. 15, no. 1, pp. 25-33, 2007.
- [3] Ann R. Thryft. (2012, Oct.) Design News. http://www.designnews.com/document.asp?doc_id=252129&dfpPPParams=ind_183,industry_auto,industry_consumer,industry_machinery,aid_252129&dfpLayout=article&dfpPPParams=ind_183,industry_auto,industry_consumer,industry_machinery,aid_252129&dfpLayout=article&dfpPPParams=ind_183,industry_auto,industry_consumer,industry_machinery,aid_252129&dfpLayout=article, (Accesed 2015-02-15)
- [4] James Holberry and Dan Houston, *Natural-fibre-reinforced polymer composites in atomotive applicatinos*, The Member Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, vol. 58, no. 11, pp. 80-86, 2006.
- [5] Weyerhaeuser. (2013, Dec.) Weyerhaeuser. <http://www.weyerhaeuser.com/Businesses/CelluloseFibers/Plastics>, (Accesed 2015-02-05).
- [6] B. Norman C. Fellers, *Pappersteknik*. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm: KTH, 1996. p. 44-45
- [7] Mikael Rigdahl, Personlig kontakt, Material och tillverkningsteknik, Chalmers, Göteborg, Feb. 2015.
- [8] Alain Dufresne, *Monomers, polymers and pomposites from renewable resources*. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2008.
- [9] Manjusri Misra, Lawrence T. Drzal Amar K. Mohanty, Chapter 5 in *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. Boca Raton, Florida, USA: Taylor & Francis Group, 2005, p. 13.
- [10] Manjusri Misra, Lawrence T. Drzal Amar K. Mohanty, Chapter 2 in *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. Boca Ranta, Florida, USA: Taylor & Francis Group, 2005, p. 13.
- [11] B. Norman C. Fellers, *Pappersteknik*. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm: KTH, 1996. p. 46-50
- [12] Alain Dufresne, *Monomers, Polymers and composites from renewable resources*. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2008.
- [13] Ruth Ariño, *On the processing and properties of cellulose-containing polymeric materials*. Doktorsavhandling, Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola, 2013.
- [14] Kristina Karlsson, Personlig kontakt, Material och tillverkningsteknik, Chalmers, Göteborg, Mars 2015.
- [15] R.D. Anandjiwala M.J. John, *Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforces composites*, Wiley InterScience, vol. 29, no. 2, 2008.
- [16] F. Kramer, S. Moritz, T. Lindström, M. Ankerfors, D.Grey, A. Dorris D. Klemm, *Nanocelluloses: a new family of -nature-based materials*, Wiley InterScience ,no. 50, 2011.
- [17] Mikael Rigdahl, Personlig kontakt, Material och tillverkningsteknik, Chalmers Göteborg, Mars 2015.

- [18] Barbara J. Kinzig Tyrone L. Vigo, *Composite applications*. New Orleans: VCH Publishers Inc., 1992.
- [19] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Disparlur.svg>, (Accesed 2015-04-29)
- [20] Curt Augustsson, *NM Epoxihandbok*, 3rd ed. Ytterby: Nils Malmgren AB, 2004.
- [21] S. Kalaiselvam K. Anbukarasi, *Study of effect of fibre volume and dimension on mechanical, thermal, and water absorption behaviour of luffa reinforced epoxy composites*, International Journal of Materials in Engineering Applications, p. 321-330, 2015.
- [22] Man Jiang, Zhongguo Jiang, David Hui, Zeyong Wang, Zuowan Zhou Tingju Lu. (2013, Feb.) *Effect of surface modification of bamboo cellulose fibers on mechanical properties of cellulose/epoxy composites*, Elsevier.
- [23] Magnus Bergh, Master Thesis, *Absorbent cellulose based fibers*, Gothenburg, Sweden, 2011.
- [24] Slah Msahli, Mondher Zidi, Faouzi Sakli Lassaad Ghali, *Effects of fiber weight ratio, structure and fiber modification onto flexural properties of luffa-polyester composites*, Advances in Materials Physics and Chemistry, p. 78-85, 2011.
- [25] Institutionen för Material- och Tillverkningsteknik, "*Composite and Nanocomposite Materials, Compendium*," in *Part C: Manufacturing*. Göteborg: Chalmers, 2012, vol. 6.
- [26] Epotex, *Formtillverkning samt byggnation av båt i form*. <http://www.epotex.se/nm-bat-epoxi/bygga-i-form/formtillverkning-samt-byggnation-av-bat-i-form>, (Accesed 2015-04-01).
- [27] Christian Finnsgård. Personlig kontakt, SSPA, Göteborg, Maj 2015.
- [28] Naturvårdsverket, *Nedskräpande och uttjänta fritidsbåtar*, 2011.
- [29] Mikael Skrifvars, Avhandling, *Återvinning av fiberkompositer - en ekonomisk analys*, Borås, 2005.
- [30] Processledare, Kretslopp och vatten, Göteborgs stad, Personlig kontakt, Göteborg, Mar. 2015.
- [31] Karin Malmcrona, Hans Grönwall, "*Återvinning av plastbåtar - förstudie*", 2014.
- [32] Dan Åkesson, Mikael Skrifvars, Avhandling, *Återvinning av kompositer genom mikrovågspyrolys*. Borås: Högskolan i Borås, 2009.
- [33] Urban Lindblom, Personlig kontakt , Göteborg, Mars 2015.
- [34] Arbetsmiljöverket, *AFS 2005:18.*, 2005.

BILAGOR

Bilaga A - Prioriteringslista

Detta är en prioriteringsmall samt en översikt på vad som ska tas upp först i respektive kategori.

Fibrer

- Vattenabsorption och svällning
- Mekaniska egenskaper
- Nätverk, vävnader
- Långa och korta fibrer
- UV-skydd
- Framtidsaspekter

Matriser

- Mekaniska egenskaper
- Viskositet
- UV-skydd

Kompositer

- Spridningsförmåga
- Vidhäftningsförmåga
- Dimensionsförändringar

Tillverkning

- Metod
- Form
- Möjliga problem

Arbetsmiljö

- Gifter
- Risker

Återvinning

- Separera kompositen
- Miljökonsekvenser

Eventuella problem som uppkommer



Datablad NM Laminering 650

Utg: 2003-12-11

Ers: 2008-02-07

Rev: 2014-08-05

Sida 1 av 3

Beskrivning

NM Laminering 650 är ett tvåkomponent lösningsmedelsfritt lamineringssystem med hög T_g och mycket höga hållfasthetsvärden.

Den låga viskositeten innebär att alla typer av fiber väts snabbt.

NM Laminering 650 kan användas vid både injicering och handuppläggning. Potlife är extremt lång, vilket innebär att det går att arbeta med stora objekt utan problem. **Systemet med NM Härdare 650 F** kan accelereras med **NM Accelerator 254**. **Accelerator rekommenderas inte vid injicering p.g.a. risk för blåsbildning.**

NM Laminering 650 har ett mycket lågt ångtryck och därför är systemet i det närmaste luktfritt. Vakuum ger ingen gasbildning i kombination med **NM Härdare 650 B** eller **NM Härdare 650 M**.

Utförande

Blandningen av komponenterna är mycket viktig.
En dålig blandning resulterar i mjuka fläckar.

Blanda noga i ett kärl, för över blandningen i ett rent kärl och blanda ytterligare. Dosering skall alltid göras på våg med tillräcklig noggrannhet.

Applicering sker bäst med roller, men uppläggning med pensel är möjlig.

Släppmedel

Vi rekommenderar filmbildande släppmedel som t.ex. Marbocote 220.

Vaxbaserade släppmedel rekommenderas normalt inte. För detta måste prover göras först.

Härdning

Härdning kan ske vid såväl rumstemperatur som vid förhöjd temperatur.

NM Laminering 650 skall först härda vid rumstemperatur (20 – 23°C) i 16 – 24 timmar innan efterhärdning påbörjas.

En typisk härdcykel kan vara en dag vid 23°C och sedan en efterhärdning vid 50°C i 16 timmar, alternativt fyra timmar vid 100°C.

Det är viktigt att temperaturen rampas upp långsamt till sluthärdningstemperaturen. Normala höjningar är mellan 0,1 – 0,3°C per minut. Ofta är det en kombination av laminatets tjocklek och konstruktionen som avgör hastigheten. Den optimala härdningscykeln måste fastställas för varje enskilt fall.

NM Laminering 650 kan ligga en längre tid vid rumstemperatur och sedan efterhärddas enligt önskad cykel.

NM Laminering 650 kan användas i kombination med våra härdare:

NM Härdare 650 B, ca 180 minuters potlife. [Normal]

NM Härdare 650 F, ca 90 minuters potlife.

NM Härdare 650 M, ca 120 minuters potlife.

Efterarbete

Vid handuppläggning är det viktigt att vidarebehandling som laminering, spackling etc. sker när ytan fortfarande är tejpklabbig. En torr yta måste slipas för att säkerställa vidhäftningen till nästa skikt.

Tekniska data

Bas	NM Laminering 650 A
Härdare	NM Härdare 650 B NM Härdare 650 M NM Härdare 650 F

Blandningsförhållande

Bas – Härdare	100 – 35 viktdelar
---------------	--------------------

<i>Densitet:</i>	1096 kg/m ³
<i>Viskositet:</i>	0,36 Pa·s
<i>Torrhalt:</i>	100%

	NM Härdare 650 B	NM Härdare 650 M	NM Härdare 650 F
<i>Potlife 100 g 20°C:</i>	>180 minuter	120 minuter	90 minuter
<i>+5% NM Accelerator 254:</i>	20	17	13 minuter
<i>+10% NM Accelerator 254:</i>	10	9	7,5 minuter (endast 50 gram)

Utveckling av T_g

<i>24 tim, 23°C:</i>	32°C	41°C	45°C
<i>7d, 23°C:</i>	55°C	55°C	55°C
<i>7v, 23°C:</i>	71°C	63°C	63°C
<i>16t, 50°C:</i>	71°C	71°C	73°C
<i>16t, 60°C:</i>	81°C	83°C	84°C
<i>16t, 60°C + 2t 100°C:</i>	101°C	94°C	90°C

Böjhallfasthet

<i>7 dygn vid 23°C:</i>	91,5 MPa	91 MPa	91 MPa
<i>16 timmar vid 50°C:</i>	116 MPa	116 MPa	120 MPa
<i>16 timmar vid 60°C:</i>	123 MPa	123 MPa	—

E-modul

<i>7 dygn vid 23°C:</i>	3,3 GPa	3,2 GPa	3,1 GPa
<i>16 timmar vid 50°C:</i>	2,9 GPa	2,8 GPa	2,7 GPa
<i>16 timmar vid 60°C:</i>	2,9 GPa	—	—

Draghallfasthet

<i>7 dygn vid 23°C:</i>	69 MPa	69 MPa	—
<i>16 timmar vid 50°C:</i>	70 MPa	70 MPa	—
<i>16 timmar vid 60°C:</i>	72 MPa	72 MPa	—

Brottöjning

<i>7 dygn vid 23°C:</i>	6,4 %	6,3 %	—
<i>16 timmar vid 50°C:</i>	6,0 %	6,0 %	—
<i>16 timmar vid 60°C:</i>	6,0 %	6,0 %	—

Vattenabsorption

Prov härdat 7 dygn vid 23°C

<i>24t:</i>	+0,13 %	+0,13 %	+0,16%
<i>7d:</i>	+0,43 %	+0,44 %	+0,44%

NILS MALMGREN AB

Box 2039
S-442 02 YTTERBY

Tel: 0303-936 10
Fax: 0303-928 55

Kvalitetscertifierade sedan 1990

E-post: info@nilsmalmgren.se
Hemsida: www.nilsmalmgren.se

Prov härdat 16 timmar vid 50°C

24t:	+0,09 %	+0,10 %	+0,14%
7d:	+0,37 %	+0,38 %	+0,40%

Prov härdat 16 timmar vid 60°C

24t:	+0,11 %	+0,12 %	+0,14%
7d:	+0,40 %	+0,42%	+0,39%

Värden för system med +5 % NM Accelerator 254**Utveckling av T_g :**

24 tim, 23°C:	—	—	48°C
7d 23°C:	—	—	56°C
16t 50°C:	—	—	71°C

Böjhållfasthet:

7 dygn vid 23°C:	—	—	105 MPa
16 timmar vid 50°C:	—	—	60 MPa

E-modul:

7 dygn vid 23°C:	—	—	2,6 GPa
16 timmar vid 50°C:	—	—	2,9 GPa

Egenskaper för härdat laminat med NM Härdare 650 B

Provbitar tillverkade av 4 lager 290 grams Twill.

Böjhållfasthet, provat enligt ISO 178

7 dygn vid 23°C:	465 MPa	462 MPa	—
16 timmar vid 60°C:	501 MPa	505 MPa	—

E-modul, provat enligt ISO 178

7 dygn vid 23°C:	16 GPa	15,7 GPa	—
16 timmar vid 60°C:	16 GPa	15,8 GPa	—

Kulör:	Transparent
Satsstorlek:	27,0 kg
	6,75 kg
	1,350 kg

Verktyg rengörs i aceton.

Böjhållfasthet och E-modul mätt enligt ISO 178.

Draghållfasthet och brottöjning mätt enligt ISO 527.

Vattenabsorption mätt enligt ISO 62.

T_g mätt med DSC.

Allmänt

Denna produkts tekniska data är framtagna efter erfarenheter i fält och på laboratorium.

Vi förbehåller oss rätten att ändra såväl produkter som data. Aktuellt datablad finns att tillgå på vår hemsida eller hos oss. Vi kan inte ta ansvar för användning inom områden som vi inte känner till. Användaren skall själv utvärdera produkterna för sitt användningsområde och vi garanterar endast materialegenskaperna. Önskas referensobjekt så kan vi lämna detta separat för varje produkt.

NILS MALMGREN AB

Box 2039
S-442 02 YTTERBY

Tel: 0303-936 10
Fax: 0303-928 55

Kvalitetscertifierade sedan 1990

E-post: info@nilsmalmgren.se
Hemsida: www.nilsmalmgren.se