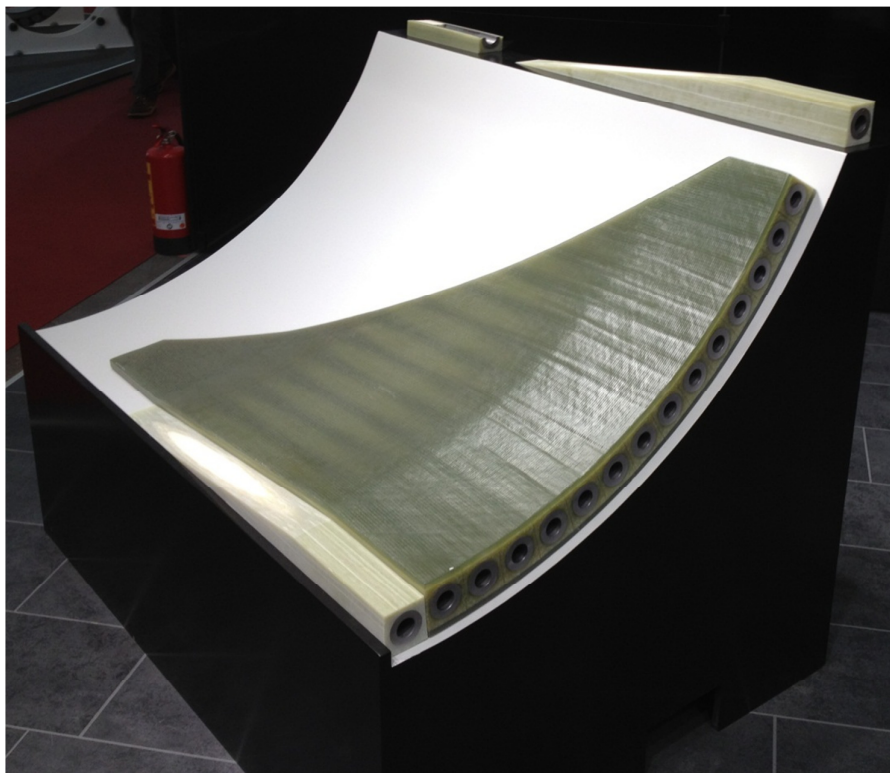


Innovative Blade Root Joint

Projekt slutrapport
Marts 2014

- fortrolig -

Projekt nr: ENS-64011-0083



Deltagende partnere:



 **DTU Mekanik**
Institut for Mekanisk Teknologi

Støttet af:





Indholdsfortegnelse

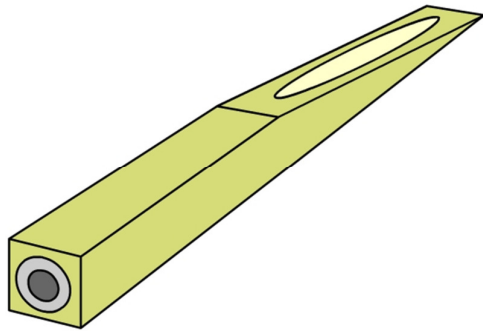
Resume.....	3
WP1 – Komponentdesign	4
WP2 – Test og karakterisering	11
WP3 – Udvikling af pilotanlæg.....	15
WP4 – Dokumentation og marketing.....	17
Konklusion	18



Resume

Projektet omhandler udvikling, fremstilling og styrkekarakterisering af en komponent til montering af en vindmøllevinge på vingelejet i navet. Da komponenten bliver en vigtig strukturel bærende del af vingen skal styrken eksperimentelt karakteriseres, hvilket er udført i samarbejde med DTU Mekanik. Yderligere er der i projektet udviklet, konstrueret og fremstillet test og produktions-udstyr hvormed en række prototypeemner er testet og fremstillet.

Den udviklede komponent er et pultruderet kompositemne med en integreret stålbøsning som skitseret på figuren herunder. Denne implementeres i en vingskal som illustreret på demonstrationsmodellen vist på rapportens forside.



Projektet har været opdelt i arbejdspakkerne WP1 til WP4, som hver vil blive beskrevet i de følgende afsnit.

Resume, English:

The project comprises the development of a component for the mounting of a wind turbine blade on the blade bearing of the hub. As the component will become an essential structural part of the blade, the strength is experimentally and numerically characterized, which is carried out in collaboration with the mechanical department of the technical university of Denmark (DTU Mekanik).

Furthermore the project covers the development, design and production of test and prototype manufacturing equipment, with which a number of prototype units have been produced.

The new component is a pultruded composite component with an integrated steel bushing – as shown in the sketch above. This is to be implemented in a blade shell, as illustrated in the photo of the demonstration model on the front page.

The project has been split into 4 work packages (WP1 to WP4). The description follows in the following report sections.



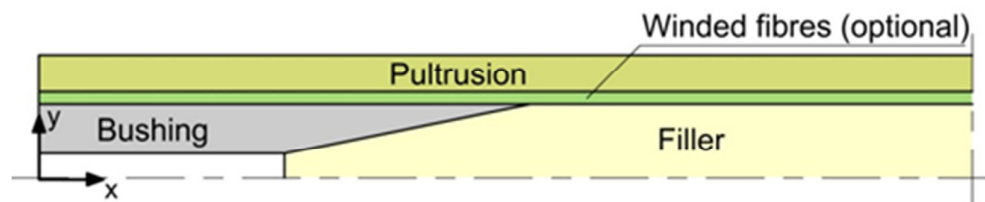
WP1 – Komponentdesign

Work package	Activities	Technological challenges
1. Component design	<p>a) Bushing design</p> <ul style="list-style-type: none">- Establish computational model (Finite Element Model)- Model analysis and hot spot identification- Geometrical shape optimisation of bushing design <p>b) Interface compatibility</p> <ul style="list-style-type: none">- optimisation of secondary bonding between Fiberline product and customer resin system- definition of surface preparation of metal surfaces <p>c) Process optimisation</p> <ul style="list-style-type: none">- process development regarding pultrusion of multiple materials with different thermal properties <p>d) Prototype manufacturing</p>	<p>1.a. Likely that FEM will be computational heavy reducing the model efficiency.</p> <p>1.b. Key players have different material systems which have different interface characteristic. Development of multiple resin systems for integral pultruded profile is likely.</p> <p>1.c. Steel, polymers and glass have significantly different thermal properties. This is likely to give significant internal stresses resulting in curing cracks.]</p>

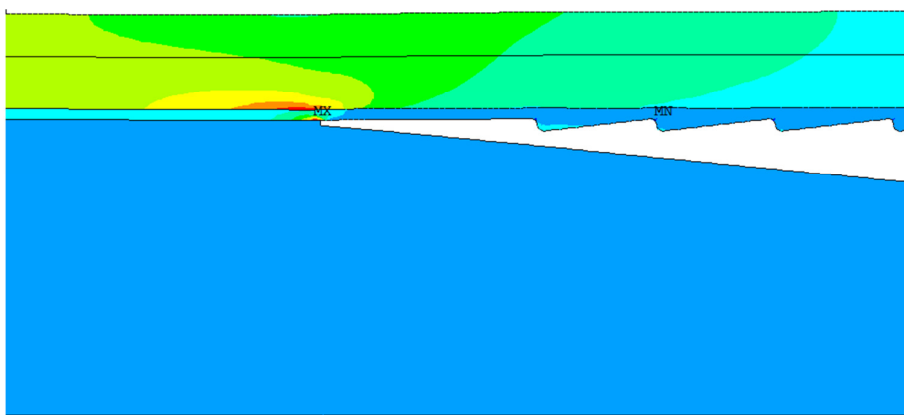
Denne første arbejdsopgave fokuserer på at fastlægge det strukturelle design, materialesystem samt procesindstillinger.

Bøsningsdesign

For at fastlægge de vigtigste designparametre er der indledningsvist lavet en finite element (FE) model af en vingerodskomponent indeholdende en enkelt bøsning. Denne er lavet som en aksesymmetrisk 2D model som vist i Figur 1. Beregningerne viste at den langsgående spænding i kompositmaterialet omkring enden af bøsningen er stærkt påvirket af bøsningens affasning, som illustreret i Figur 2.



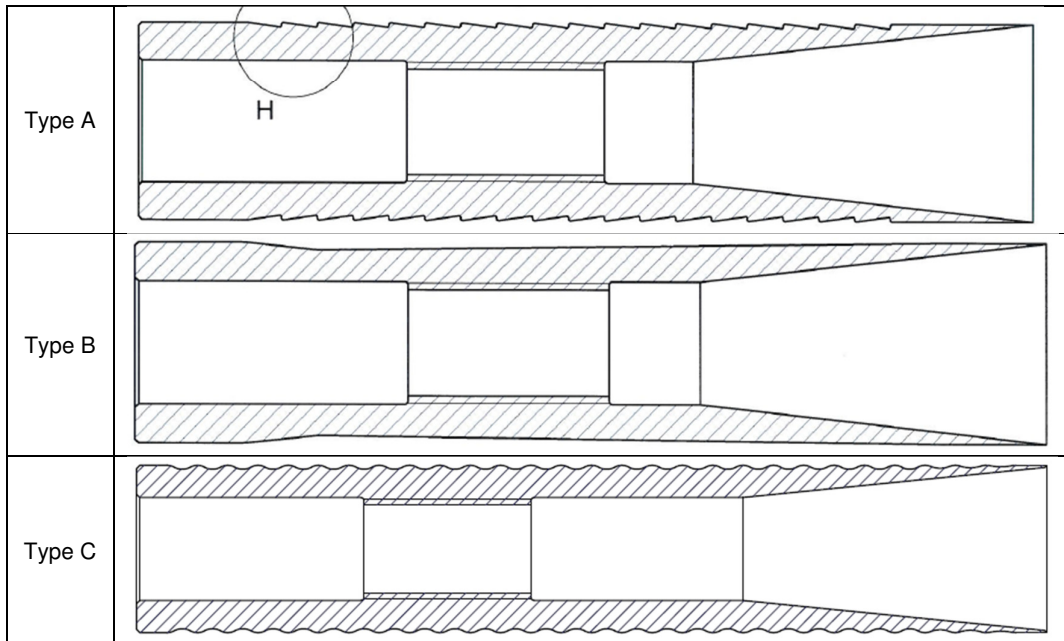
Figur 1: Aksesymmetrisk FE model af enhedscelle.



Figur 2: Beregnet spænding i kompositmaterialet omkring spidsen af stål bøsningen.



Baseret på FE beregningerne blev det valgt at gå videre med tre forskellige bøsningdesigns som vist i Figur 3. Alle tre typer har samme affasning af bøsningssenden men har forskellige overfladegeometrier for optimal mekanisk låsning til kompositdelen.



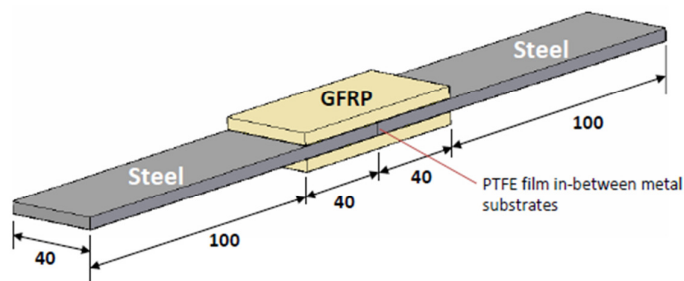
Figur 3: Udvalgte bøsningdesigns.

Materialekompatibilitet

Ved anvendelse af Fiberlines pultruderede bøsningselementer i en vingerod haves to materialeovergange, hvor vedhæftningen har direkte betydning for vingerodens strukturelle bæreevne. Projektet har derfor haft stort fokus på at optimere materialekompatibiliteten dels mellem stålbøsning og pultruderet kompositmateriale og dels mellem det pultruderede kompositmateriale og vingelaminatet.

Stål-komposit overgang

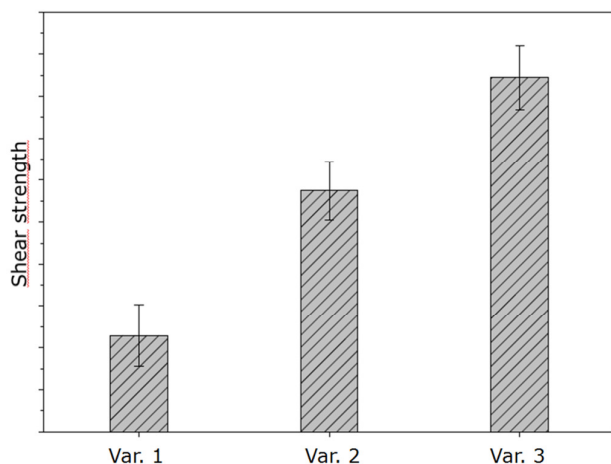
For at teste forskellige typer af overfladebehandlinger for ståldelen er der fremstillet testemner, hvor stålet dels er ubehandlet og dels er sandblæst med forskellige kornstørrelser. Testemnerne er fremstillet ved at pultrudere et fladprofil med stålkerner, som efterfølgende er bearbejdet til et emne som vist på Figur 4.



Figur 4: Testemne til undersøgelse af vedhæftning mellem stål og pultruderet kompositmateriale.



Testresultaterne for en referenceprøve (kun affedt) og to varianter af sandblæst stål er vist i Figur 5. Det ses at overfladebehandlingen har stor indflydelse på vedhæftningen. Det er valgt at anvende overfladebehandlingen Var. 3 til bøsningerne produceret i projektet.

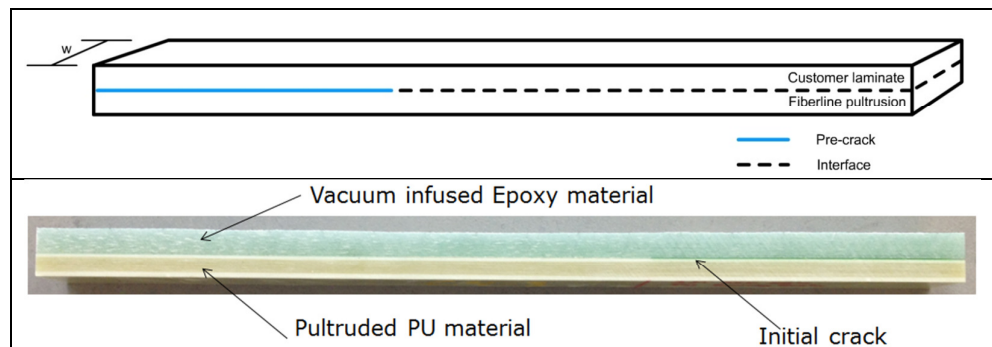


Figur 5: Målt vedhæftningsstyrke mellem stål og komposit for tre forskellige overfladebehandlinger af staldelen.

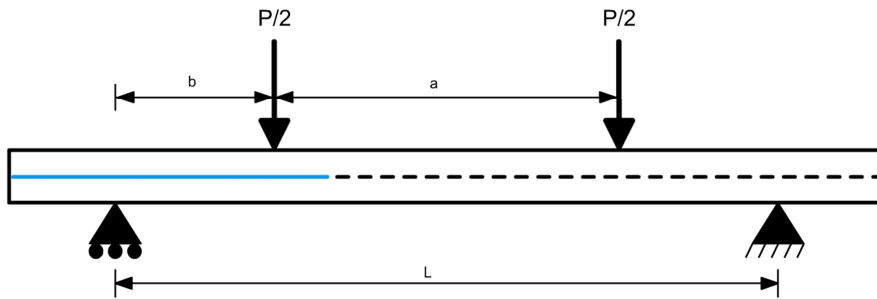
Pultruderet komposit - vingelaminat overgang

I anvendelsen af de pultruderede bøsningselementer bliver de støbt ind i et vingelaminat med enten polyester eller epoxy resin. En testmetode til at undersøge vedhæftningsstyrken af denne materialesamling er fastlagt og et omfattende testprogram er udført. Testen er udført som en brudmekanisk test under en forskydningsbelastning (mode II).

Testemnerne fremstilles ved at pultrudere et rektangulært profil og bearbejde overfladen ved en fræse/slibe proces for bedst mulig vedhæftning. Der vakuumbæstes et laminat oven på det pultruderede profil for at efterligne vingestøbningsprocessen, men inden da placeres et slipfolie på en del af overfladen på det pultruderede profil for at skabe en startrevne. Skitse og foto af testemne er vist i Figur 6. Emnet belastes i 4-punkt bøjning som skitseret på Figur 7.



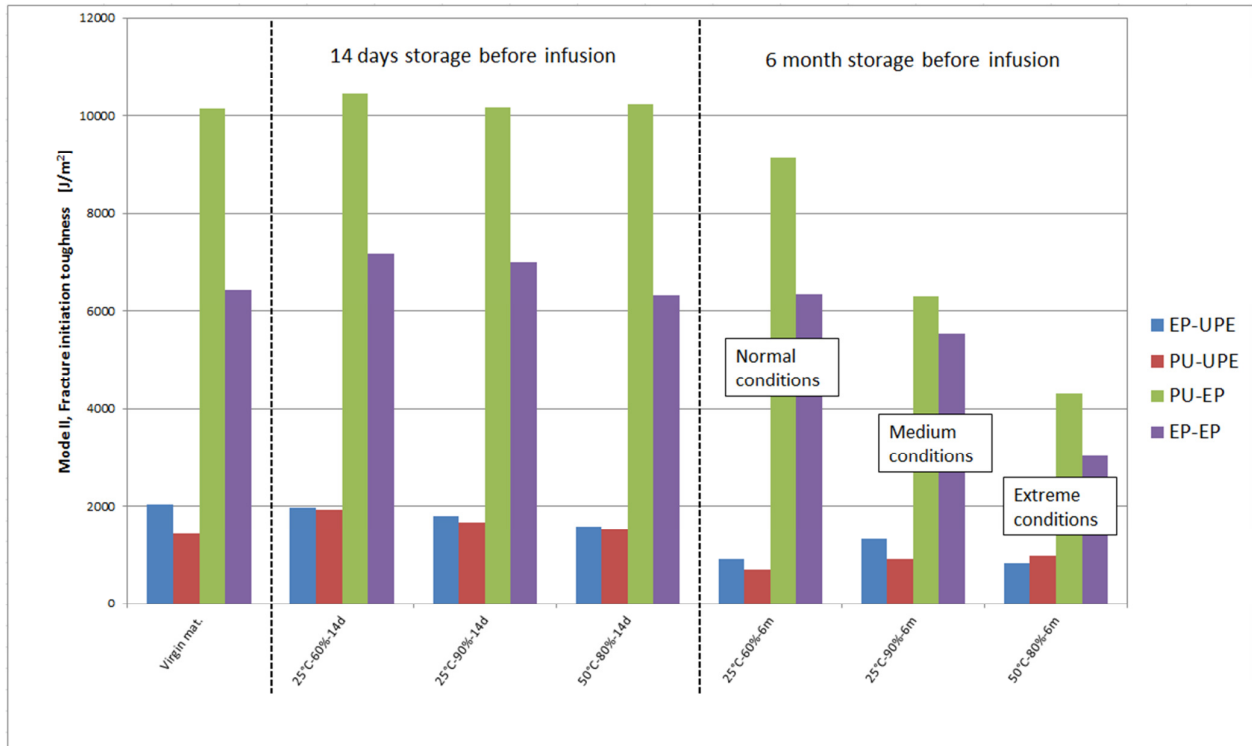
Figur 6: Brudmekanisk testemne til at teste modstandsdygtigheden overfor initial revnevækst i overgang mellem pultruderet profil og vingelaminat.



Figur 7: 4-punkt bøjningsbelastning på testemne med startrevne i materialeovergang.

Testresultaterne er vist i Figur 8 som den initielle brudsejhed (energigrønselsrate), dvs. den mængde energi der skal til for at startrevnen i materialeovergangen begynder at vokse. Der er i dette tilfælde lavet fire forskellige materialekombinationer med det pultruderede profil i henholdsvis epoxy (EP) og polyurethan (PU), og de vakuum støbte laminat i henholdsvis polyester (UPE) og epoxy (EP). Som forventet er vedhæftningen af et vakuum støbt epoxy laminat væsentligt bedre end af et vakuum støbt polyester laminat.

Figuren viser at vedhæftningen mellem epoxy laminat og pultruderet PU faktisk er bedre end vedhæftningen mellem epoxy laminat og pultruderet epoxy. Figuren viser desuden hvordan vedhæftningen påvirkes af opbevaringsforhold (tid, temperatur, fugtighed) for de pultruderede profiler før de støbes ind i en vinge. Det ses at kun for ekstreme forhold ses en betydelig nedgang i vedhæftning.



Figur 8: Testresultater for vedhæftning mellem pultruderet profil og vingelaminat.



Procesoptimeringer

Ved konventionel pultrudering af kompositprofiler indgår en armering i form af fibertråde eller måtter samt en resin til at binde det sammen med. Ved pultrudering af de i projektet udviklede rodelementer med integrerede stålbøsninger opstår derfor en række procesmæssige udfordringer. En af disse udfordringer er forårsaget af de væsentligt forskellige termiske udvidelseskoefficienter på stål, polymerresin og glastråde, som kan give anledning til revnede profiler. Dette er løst ved bl.a. at optimere på temperaturindstillinger på forvarmning af stålbøsninger og glastråde.

Det er valgt at anvende en PU resin til de pultruderede rodelementer, da denne dels har procesmæssige fordele, har en konkurrencedygtig pris, har vist god vedhæftning til både stålbøsning og vingelaminat samt har stærke mekaniske egenskaber. Den valgte armering består hovedsageligt af texturede glastråde, som giver mulighed for god vædning og gode styrkemæssige egenskaber i tværretningen.

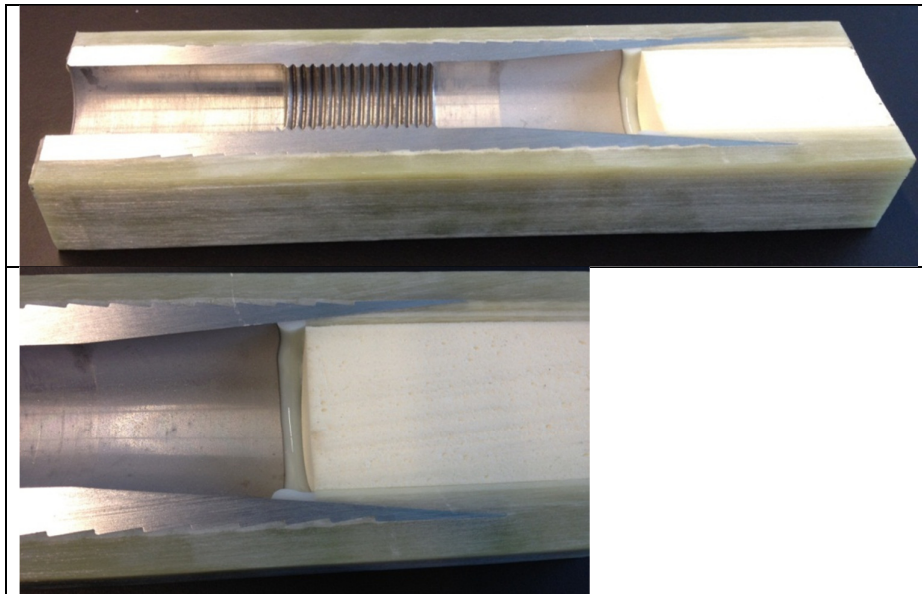
Prototypefremstillinger

Som en del af de procesmæssige optimeringer og som en demonstration af fremstillingsprocessen er der fremstillet en række prototyper. Før pultruderingsprocessen forberedes bøsningskerneemner, som vist i Figur 9. Disse kerneemner består af en stålbøsning i hver ende, som forbindes med et afstandsstykke. Afstandsstykket mellem bøsningerne er lavet både med en pultruderet massiv glasfiberstang og med et skumfyldt pultruderet glasfiberrør, som vist i Figur 9, for at spare materiale.

Bøsningerne vikles med et tyndt lag glastråde for at udjævne den bearbejdede overfladegeometri, som giver den mekaniske låsning af bøsningen i det pultruderede element. Et opskåret pultruderet emne med stålbøsning er vist i Figur 10, hvor limsamlingen mellem det skumfyldte rør og stålbøsningen fremgår.

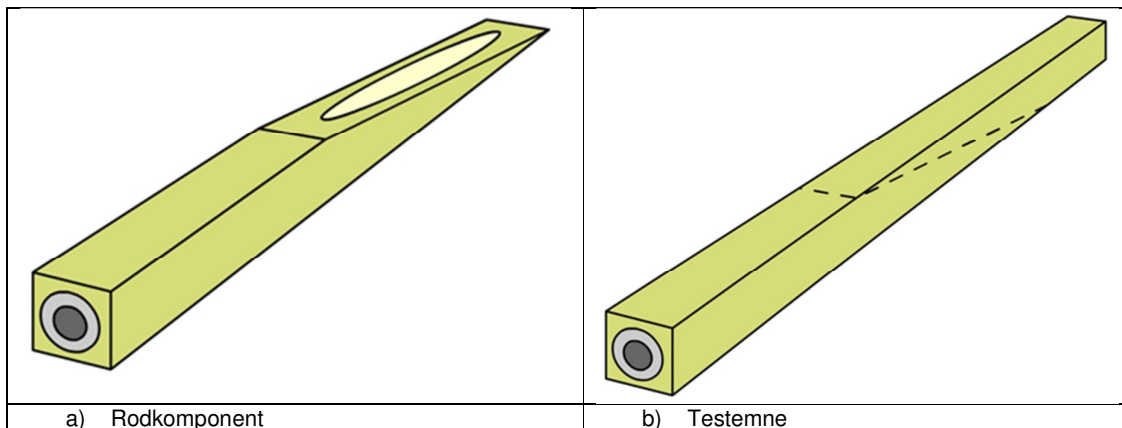


Figur 9: Bøsningskerneemner klar til pultruderingsprocessen.

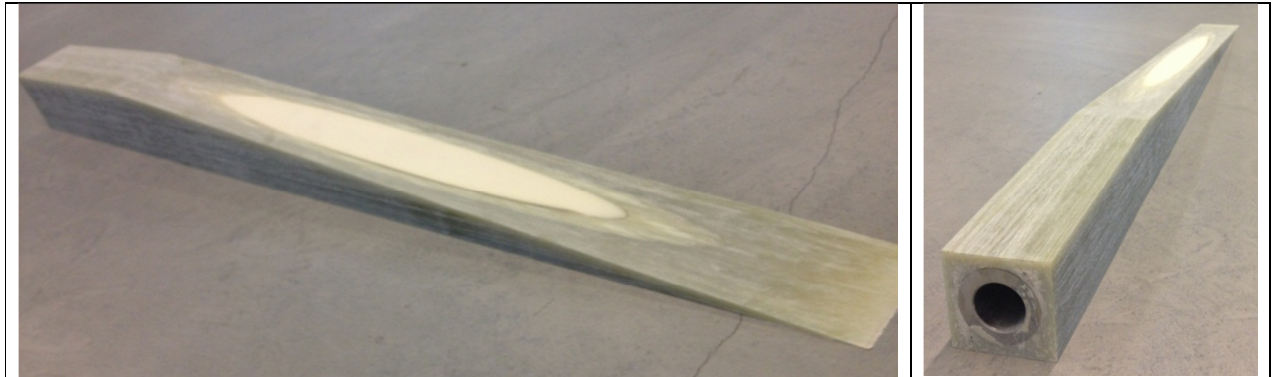


Figur 10: Opskåret pultruderet emne, som viser samling mellem bøsning og skumfyldt mellemstykke.

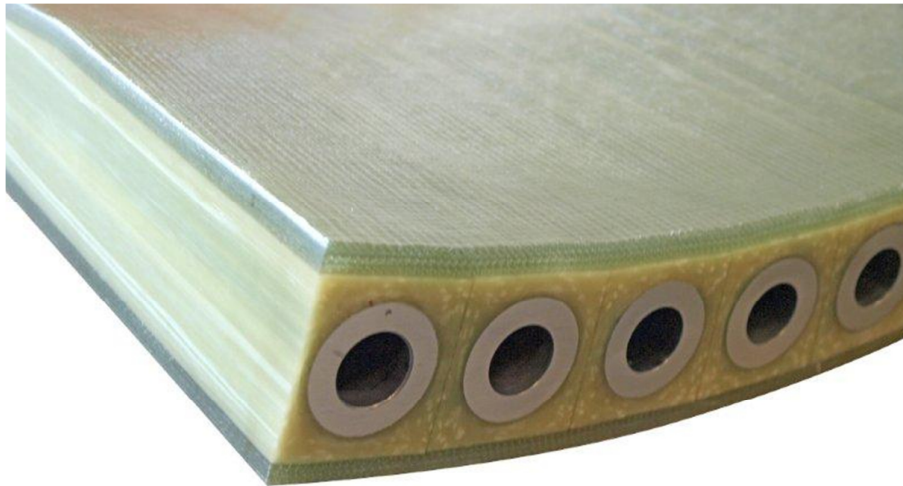
De pultruderede emner kommer ud som dobbeltemner med en bøsning i hver ende (Figur 11b), som efterfølgende flækkes på en sav så der fås to rodkomponenter som vist i Figur 11a. Billeder af fremstillede rodkomponenter er vist i Figur 12. Der er bl.a. fremstillet rodkomponenter til en vingerodsmodel, som er anvendt til udstilling på messer for at demonstrere anvendelsen af rodkilerne. Dobbelttemnerne vist på Figur 11b kan desuden anvendes direkte som testemner, hvor der trækkes i en monteret bolt i hver ende.



Figur 11: Skitser af færdigbearbejdet rodkomponent samt testemne med bøsning i hver ende.



Figur 12: Billeder af fremstillede rodkomponenter.



Figur 13: Billede af fremstillet vingerodsdeemonstrator til udstilling på messer.



WP2 – Test og karakterisering

2. Test and characterisation	a) Development of test methods for <ul style="list-style-type: none">- Establish FEM of tests for screening, static and fatigue test.- Analyse and evaluate test methods against real-life loading. b) Screening <ul style="list-style-type: none">- variant screening of component production trials c) Static testing <ul style="list-style-type: none">- characterisation of min. two component variants d) Fatigue testing <ul style="list-style-type: none">- characterisation of most promising component variant	2.a. Achieving test methods with good correlation to reality. 3.d. Low cycle frequencies are likely to cause very long test runs.
------------------------------	--	--

Et betydeligt mekanisk test program er sat op for at verificere de mekaniske egenskaber af rodkomponenterne, da de indgår som en vigtig strukturel bærende del i vingerne. Foruden de forskellige vedhæftningstest beskrevet under WP1 er der udført bøsningssudtrækstest (komponenttest) og materialekarakteriseringstests, samt udviklet en ny test-metode og multi-aksial testrig til bøsning-komponenter, der kan påføre en kombineret aksial og moment-belastning, der er fundet relevant at teste for via et omfattende modellerings-arbejde på rods-ender i vindmøllevinger.

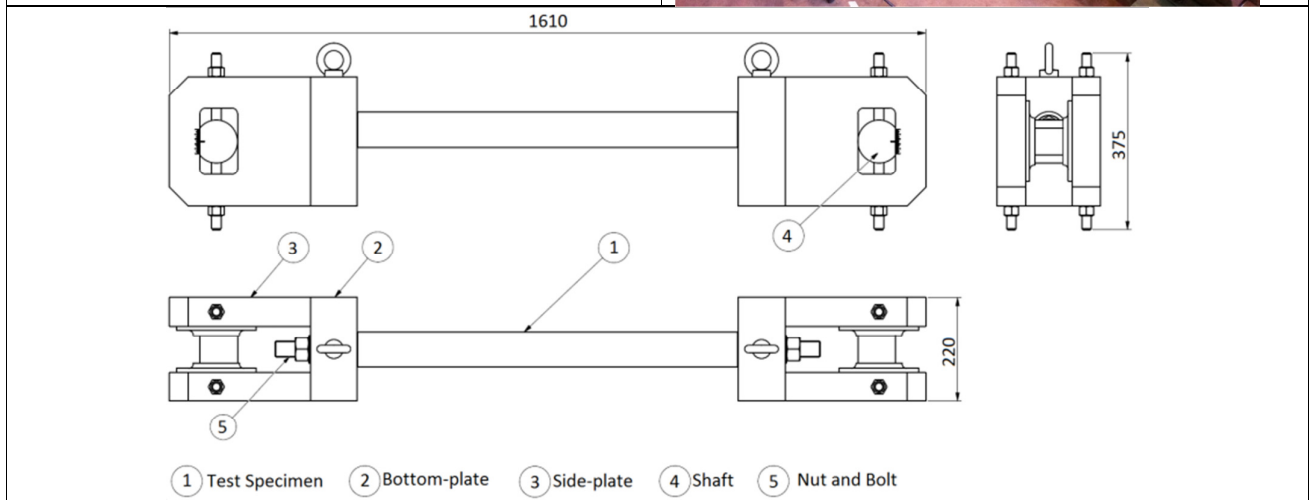
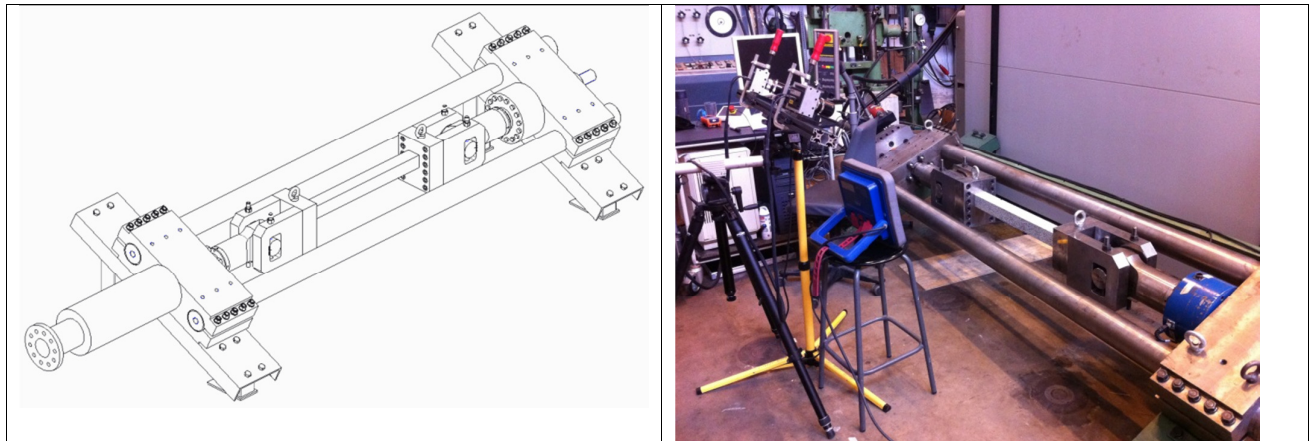
Komponenttest (bøsningssudtræk)

En kendt testmetode indenfor lignende vingerodselementer er aksial belastning af et element med en bøsning i hver ende. Dette er desuden den dominerende testmetode til opnåelse af en komponentcertificering ifølge certificeringsorganers guidelines. I et eksamensprojekt på DTU Mekanik er det undersøgt, hvorvidt denne metode er realistisk eller om også andre belastningsformer (som f.eks. bøjning, torsion og forskydning) bør inkluderes i testmetoden. FEM analyser af en vingerod viste at den dominerende belastning på bøsningselementerne er en kombination af en aksial belastning og en bøjningsbelastning.

Med udgangspunkt i dette er en testrig udviklet og fremstillet i forbindelse med endnu et eksamensprojekt på DTU Mekanik, som kan påføre et vingerodselement en kombination af bøjning og aksial last, se Figur 14. Potentielle kunder og certificeringsorganer har hovedsageligt efterspurgt testresultater med en ren aksial belastning, og det er derfor valgt at fokusere testarbejdet i EUDP projektet på denne testtype.

Med den aksiale belastning af bøsningsemnerne er der udført både statiske tests og udmattelsestests. En udmattelsestest er væsentlig mere kompliceret og tidskrævende end en statisk test, så de indledende screeningstests er hovedsageligt udført som statiske tests. Dette dannede grundlaget for de indledende materialevalg og bøsningdesign. De i Figur 3 viste bøsningdesign er desuden testet under udmattelsesbelastning, hvilket resulterede i et valg af bøsningstype C som den bedste løsning. Yderligere udmattelsestests er derefter udført på denne variant for at verificere løsningen. En række bøsningstemper klar til test er vist på Figur 15.

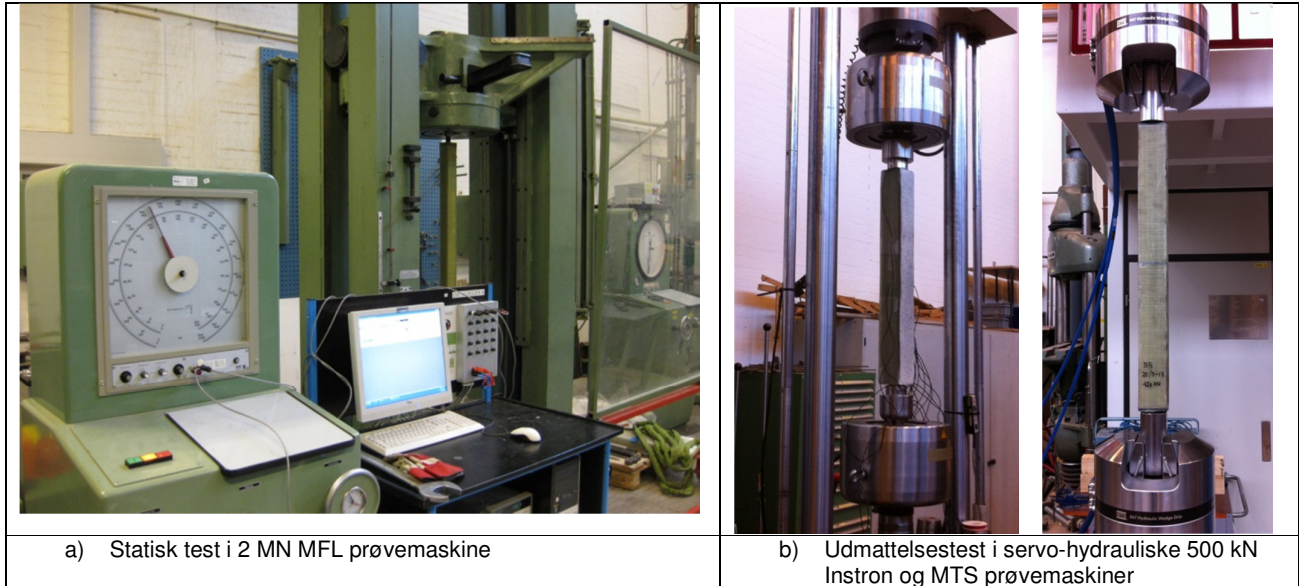
Alle bøsningstests er udført på DTU Mekanik i DTU Structural Lab faciliteterne. De statiske tests er alle udført på 2MN trækprøvemaskinen vist på Figur 16a, mens udmattelsestestene er udført på en række forskellige trækprøvemaskiner (en af disse er vist på Figur 16b). Alle udmattelsestests er kørt med et belastningsforhold på $R = 0.1$ (træk-træk). Ved høje belastningsfrekvenser blev en betydelig emneopvarmning observeret, hvilket er urealistisk for anvendelse og derfor ville give urealistisk lave styrkeværdier. Med en belastningsfrekvens omkring 1 Hz fandtes en acceptabel emneopvarmning. Dette har naturligvis den ulempe at udmattelsestestene er meget tidskrævende.



Figur 14: Nyudviklet multi-aksial testrig til afprøvning af bøsningstestemner udsat for kombineret aksiel og bøjnings-belastning

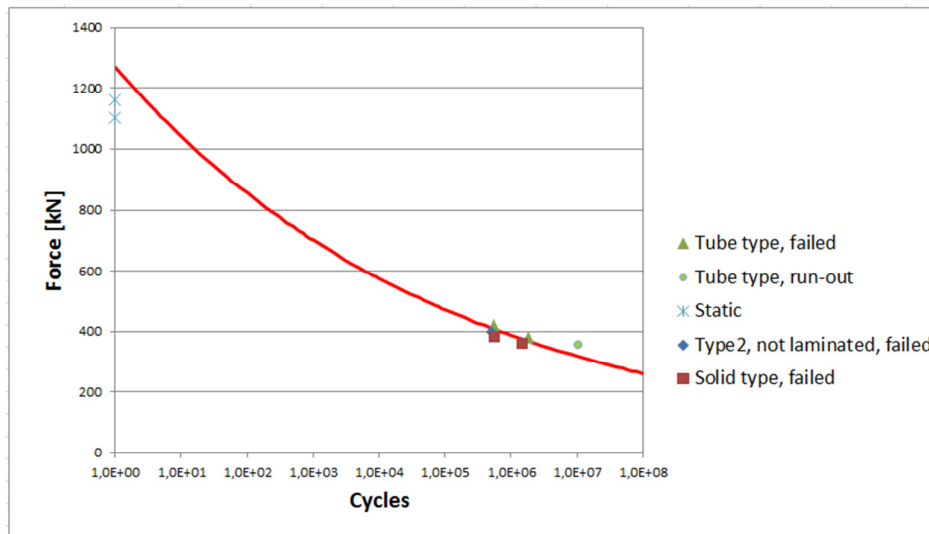


Figur 15: Bøsningstestemner klar til test.



Figur 16: Trækprøvemaskiner anvendt til statisk test og udmattelsestest.

Til den statiske test påføres der ikke nogen forspænding af boltene, men til udmattelsestestene blev en forspænding på 500 kN påført. Udvalgte testresultater er vist på Figur 17 i form af en SN-kurve.

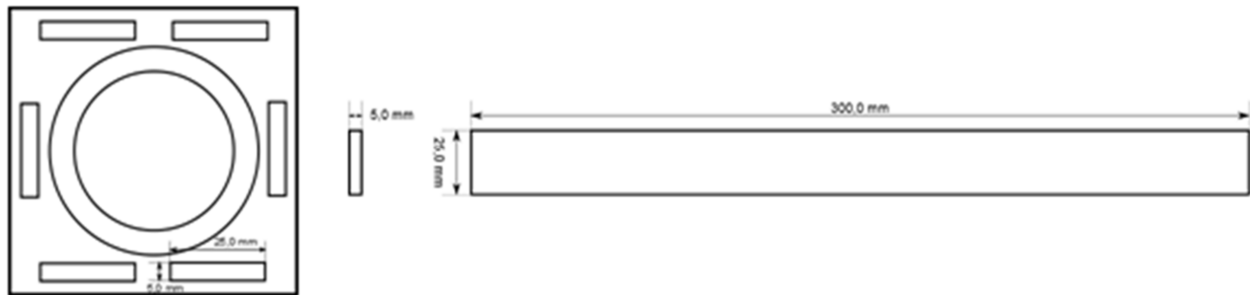


Figur 17: Testresultater for bøsningsudtræk.



Materialekarakteriseringstest

For at karakterisere det pultruderede materiales styrke og stivhed er der udført standard materialekarakteriseringstests i hht. gældende internationale test-standarder (ASTM og ISO) på udskæringer fra et pultruderet emne. Et eksempel på dette er vist på Figur 18 for trækprøveemner i profilets længderetning.



Figur 18: Eksempel på udskæring af testemner fra pultruderet profil.

De målte testresultater er angivet i Figur 19. For et pultruderet profil kan der antages transvers isotropi i 2-3 planet, så der kun haves 5 uafhængige elastiske parametre.

Fiber-direction E1 average: 38 GPa Poisson 12: 0.35 Tensile strength: 725 MPa Tensile strain: 1.98 %
Transverse direction E2 average: 11 GPa Poisson 23: 0.47 Tensile strength: 51 MPa Tensile strain: 0.53 %
G12 average (Iosipescu): 4.9 GPa

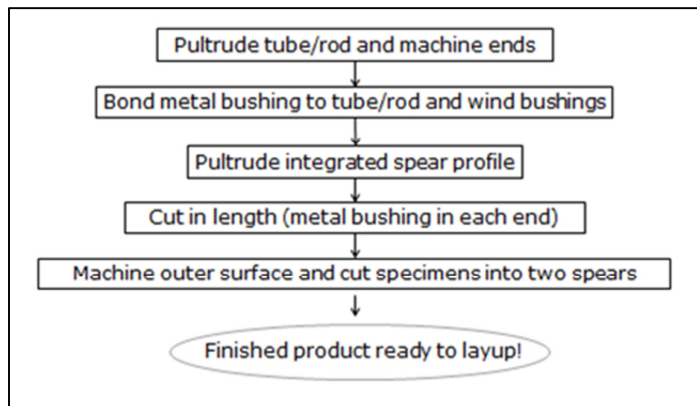
Figur 19: Testresultater fra materialekarakteriseringstest.



WP3 – Udvikling af pilotanlæg

3. Development of pilot plant	a) Development of a machining strategy - developing the order of operations and handlings b) Design of a pilot plant for surface machining - physical lay-out and machine design for pilot plant c) Preparing pilot plant design for construction - creating technical documentation for pilot plant manufacturing d) Installation of pilot plant - characterisation of most promising component variant	3.a. Minimizing number of machining stations and handling is crucial to efficiency and plant cost. 3.b. Interaction / conflict with existing machining lines. 3.d Minimising disturbance of running production
-------------------------------	---	--

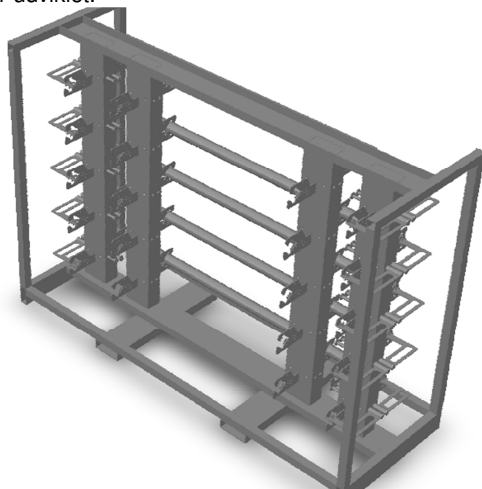
Den valgte fremstillingsprocedure er vist skematisk i Figur 20 i form af overordnede grupperinger.



Figur 20: Skematisk produktionslayout.

Det første punkt omhandler pultrudering af afstandsstykkerne mellem bøsninger samt efterfølgende bearbejdning af disse. Til de mindre produktionsserier i opstartsfasen er det valgt at få udført denne bearbejdning eksternt, men når styktallet bliver højere kan en drejebænk indkøbes.

Det næste punkt omhandler limning af bøsning til afstandsstykke samt vikling af bøsningerne. Et fiksturrack som vist i Figur 21 er designet til at håndtere de limede emner under udhærdningen, og en limetode egnet til små-mellemstore produktionsserier er udviklet.



Figur 21: Rack til udhærdning af limede bøsninger.

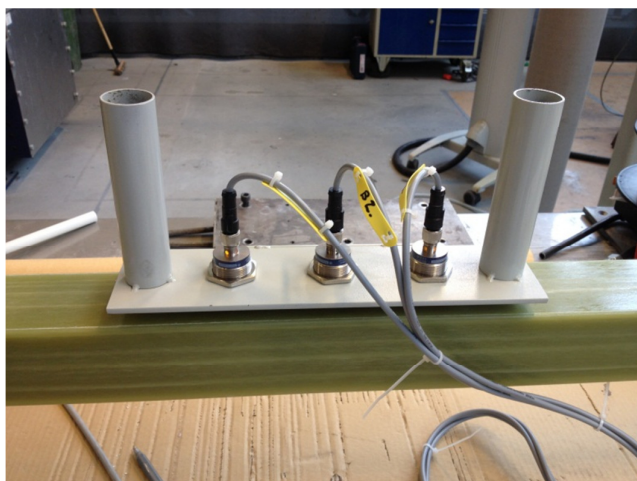


Til pultruderingsprocessen af vingerodselementerne er der til de fremstillede prototyper anvendt udstyr med betydelig manuel håndtering (se f.eks. indfødningsystem i Figur 22). Dette fungerer til små produktionsserier, men for at kunne fremstille emner til mellemstore produktionsserier er et modificeret indfødningsudstyr designet og konstrueret, men fremstilling venter til behovet for større styktal opstår. Det anvendte resinsystem kræver en pumpe, som kan blande to komponenter umiddelbart før indsprøjtning i værktøjet. En sådan pumpe har været lejet i den periode, hvor prototypeemner er blevet fremstillet.



Figur 22: Indfødningsystem til pultruderingslinjen.

Det næste punkt er afsavning på korrekt længde på pultruderingslinjen, hvilket er en udfordring, da metalbøsningerne ikke er visuelt synlige gennem profilet. En sensor som vist på Figur 23 er derfor udviklet og fremstillet for at kunne registrere bøsningernes position.



Figur 23: Sensor til registrering af bøsningens position.

Det sidste punkt i fremstillingsprocessen omhandler bearbejdning af det pultruderede profils overflade samt flækning til to kileformede emner. Det er valgt at bearbejde overfladen på en CNC fræser, hvor lignende profiler i forvejen bearbejdes. Profilerne flækkes på en eksisterende modificeret sav.



WP4 – Dokumentation og marketing

<p>WP 4: Documentation Result gathering, analysis and documentation Establishing marketing strategy</p>
--

En marketingsstrategi er etableret og rapporteret i separat dokument.



Konklusion

De opstillede milepæle ved projektets begyndelse er listet i Figur 24. Ved afslutning af projektet er samtlige opstillede milepæle blevet indfriet. Et pultruderet vingerodselement er blevet udviklet i projektet via en kombination af modellering og eksperimentelt arbejde. Med de udviklede testmetoder og numeriske beregninger er det desuden lykkedes i projektet at karakterisere vingerodselementernes styrke ved både statisk belastning og udmattelsesbelastning. Funktionen af den udviklede fremstillingsproces er blevet demonstreret ved fremstilling af emner til både test og prototyper med succesfuldt resultat. Produktet er dermed klar til at blive implementeret i en vinge, så der arbejdes nu mod at få lavet en aftale med en vingeproducent.

- | |
|--|
| <p>M1: Optimized bushing design completed</p> <p>M2: Final component design established</p> <p>M3: Component properties characterised and documented</p> <p>M4: Pilot plant installed and tested</p> <p>M5: Project report finalised</p> <p>M6: Marketing plan established</p> |
|--|

Figur 24: De opstillede milepæle ved projektets begyndelse.