

MIMIC: Micromechanics -based modeling and condition MonItoring of rotor blade Composites

Beknopte publieke samenvatting (NL), Rogier Nijssen, oktober 2018

Organisatie

MIMIC is een project in het kader van TKI-Wind op Zee, dat uitgevoerd werd door stichting Kenniscentrum WMC (verder: WMC; nu onderdeel van LM Wind Power Holland B.V.), TU Delft, TNO, en drie bedrijven: Bright Composites, Composites Technology Centre, en Tres4/We4Ce, tussen 2014 en 2018. Hoofdaanvrager en penvoerder van het project was WMC. Tijdens dit project zijn numerieke modellen en experimenten ontwikkeld bij WMC, TU Delft en TNO. Daarnaast is door de hoofdonderzoeker Iuri Barcelos gebruik gemaakt van het IRPWIND mobility scheme om een onderzoeksbezoek te brengen aan de Deense Technische Universiteit.

Achtergrond

Het verder kunnen optimaliseren van materiaalgebruik in de rotorbladen van windturbines is een ontzettend belangrijke voorwaarde voor het kunnen volhouden van de groei van rotorbladen. Deze groei wordt op zijn beurt gedreven door de wens om de prijs per kWh van de geleverde energie omlaag te brengen. In de afgelopen twee decennia is het door betere ontwerp- en productiemethoden en slimmer materiaalgebruik gelukt om het gewicht van rotorbladen ten opzichte van hun lengte sterk terug te brengen. Zo woog een 20m rotorblad rond het jaar 1995 ca. 2000kg. Op basis van klassieke schaalwetten zou een typisch rotorblad 20 jaar later, van 60m dan $2\text{ton} \cdot 60\text{m} / 20\text{m}^3 = 60\text{ ton}$ moeten wegen. In de praktijk is dit rond de 20 ton. Met andere woorden, de verwachte massa van een rotorblad is met een factor 3 gedaald. In het algemeen is dat, in vergelijking met andere efficiëntiewinsten die de afgelopen 20 jaar behaald zijn, spectaculair te noemen.

Het optimaliseren van materiaalgebruik kan langs verschillende wegen bereikt worden. Zo kunnen er bijvoorbeeld sterkere en stijvere vezelmaterialen ontwikkeld worden. Een andere aanpak is om de kennis van het materiaalgedrag te vergroten. Daarmee kunnen 'toeslag'factoren op de ontwerpparameters verkleind worden – deze toeslagfactoren dienen immers om onzekerheden in het materiaalgedrag te verdisconteren.

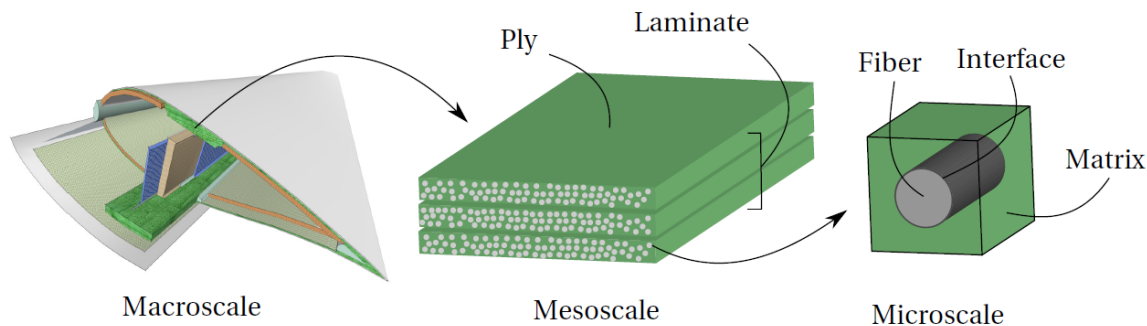
Doel en aanpak

Het belangrijkste doel van dit project is om een beter begrip te scheppen van het gedrag van composieten in windturbinerotorbladen. De gevolgde aanpak hierbij is voornamelijk het ontwikkelen en valideren van micro-mechanische modellen.

Ontwikkeling van micro-mechanische modellen

Het idee achter de ontwikkeling van micro-mechanische modellen is, dat als het gedrag van composieten op micro-schaal begrepen wordt (de schaal van individuele vezels, omringende hars, en de tussenliggende vezel-hars-interface), hiermee het gedrag van laminaten en uiteindelijk ook constructies op macroscopische schaal beter voorspeld kan worden (zie Figuur 1).

Naast 'standaard' numerieke methoden als FEM, is in dit project gebruik gemaakt van FE^2 -technieken voor de multi-schaal modellen. Daarnaast is onderzoek gedaan naar toepassing van *Reduced Order Modelling*. De implementatie van numerieke modellen is gedaan in 'Jive', een softwaretool die bij de TU Delft wordt ontwikkeld door projectpartner Frans van der Meer en collega's.



Figuur 1: Multi-scale modeling: een concept om het gedrag op macroscopisch niveau te verklaren aan de hand van micromechanisch modelleren

Experimenten

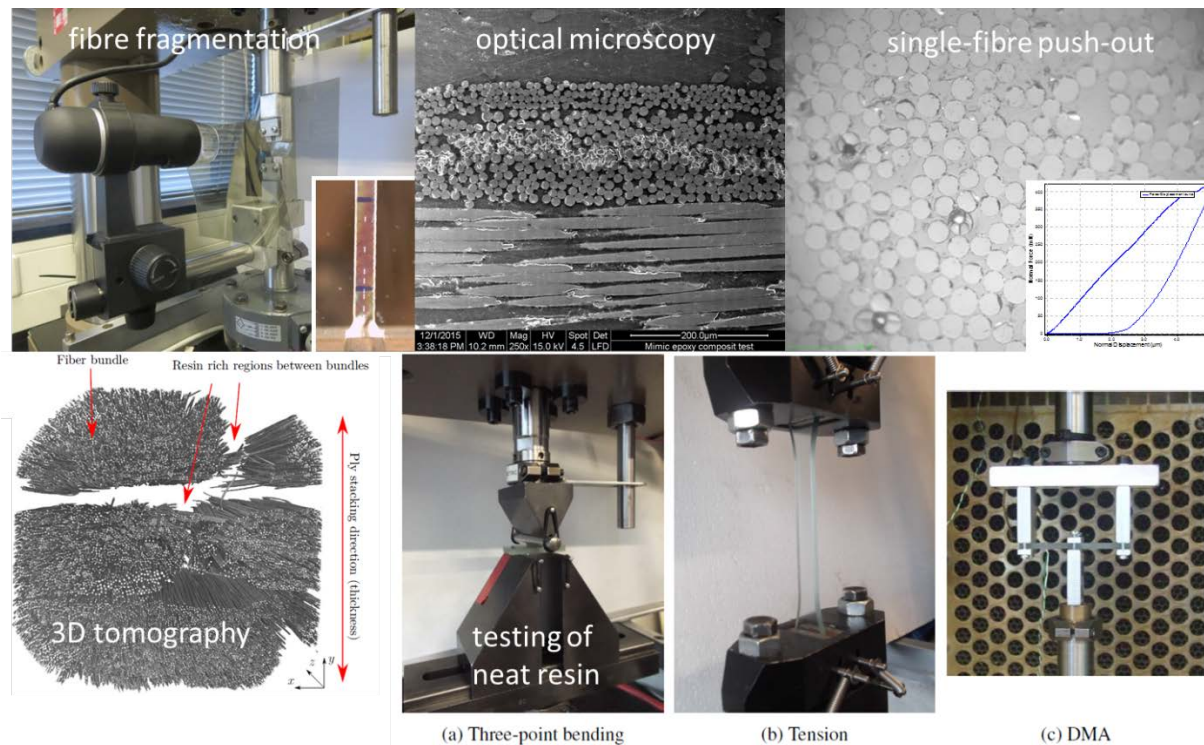
De micro-mechanische modellen die in MIMIC zijn ontwikkeld, zijn gebaseerd op observaties die in experimenten zijn gedaan. Ter ondersteuning van de ontwikkeling van de multi-scale modellen is een scala aan experimenten uitgevoerd. Voor een deel van de experimenten is het niet mogelijk om gestandaardiseerde testen uit te voeren; hiervoor zijn specifieke opstellingen ontwikkeld.

Een belangrijk thema in dit project is de invloed van vochtindringing. Coupons van testmateriaal zijn, bij verhoogde temperatuur, blootgesteld aan waterindringing. Periodiek werden coupons getest op mechanische eigenschappen, als stijfheid en (interlaminare) sterkte. Specifieke experimenten op in verschillende loodrechte richtingen uit het laminaat gesneden 'plakjes' waren bedoeld om de richtingsafhankelijkheid van de waterindringing te meten. Om een goed beeld te krijgen van de relatieve bijdrage van de hars, de vezels, en de hars-vezel-tussenfase, zijn zowel experimenten uitgevoerd op composieten als op onversterkte hars. Naast de testfaciliteit van WMC is een opstelling in gebruik genomen waar testmaterialen blootgesteld kunnen worden aan het actuele weer, waarbij de weersomstandigheden doorlopend gedocumenteerd worden.

Verder zijn bij TNO *fibre push-out* testen gedaan, waarbij een enkele glasvezel uit een zeer dun plakje hars wordt geduwd, teneinde de vezel-hars binding te kwantificeren. Ter vergelijking zijn bij WMC *fibre fragmentation* testen uitgevoerd. Hierbij is, om de spanningen te visualiseren en de rekken te kunnen meten, gebruik gemaakt van gepolariseerd licht (fotoelasticiteit), en van een eenvoudige *digital image correlation* opstelling.

Tijdens een onderzoeksbezoek aan de Deense Technische Universiteit zijn in variërende mate aan testen blootgestelde proefstukken onderworpen aan 3D-Röntgentomografie, waarmee de interne schade in

een meso-schaal element van het proefstuk zichtbaar gemaakt kon worden. Tenslotte is bij WMC een opstelling ontworpen en gebouwd waarmee een willekeurig belastingsregime in combinatie met een willekeurige sequentie van *immersed* of *dry* uitgeoefend kan worden op een coupon.



Figuur 2: MIMIC maakte gebruik van diverse experimentele methoden

Toepassingsbereik van de resultaten

De experimenten in dit project zijn uitgevoerd op materialen die typisch zijn voor veelgebruikte materialen in rotorbladen voor windturbines: glasvezels in een matrix van epoxy. De voor de experimenten gemaakte laminaten bestaande uit deze componenten zijn vervaardigd met vacuuminfusie. De gebruikte vervaardigingsmethode en materialen worden zeer frequent in de windenergie toegepast, maar zijn ook relevant voor andere industrieën, zoals de botenbouw en de civiele techniek.

Een belangrijk deel van de onderzoeksdoelstelling hangt samen met het langeduurgedrag van met name de epoxy-component in het composiet, onder invloed van vocht en temperatuur. Onderdelen van dit werk zullen daarom ook buiten de windenergie van belang zijn, bijvoorbeeld in constructies die aan hoge vochtbelastingen worden onderworpen (bijv. sluisdeuren en getijdeturbines).

De numerieke modellen zijn nogal fundamenteel en in zoverre materiaalafhankelijk, dat wanneer metingen vergelijkbaar materiaalgedrag aantonen, de relevante parameters als invoer gebruikt kunnen worden voor het voorspellen van bijvoorbeeld carbon/polyester composieten. Het mogelijke toepassingsbereik van de numerieke modellen is daarmee zeer breed.

In het kader van het ontwikkelen van testen voor ontwerp en validatie van windturbinerotorblad-materialen zijn de resultaten van het MIMIC project met name interessant voor het ontwerpen van

nieuwe testcoupons die voor specifieke gevallen representatiever kunnen zijn dan de door de standaarden voorgeschreven coupons.

Conclusies

Het MIMIC-project heeft ertoe bijgedragen dat het begrip van langeduurgedrag van glasvezel/epoxy-composieten beter begrepen wordt. Met name de invloed van vocht, temperatuur, en de daaruitvolgende verschijnselen zoals veroudering van de hars, zijn gemeten en kunnen nu beter gemodelleerd worden.

Vooruitblik

Veel aandacht in dit werk ging uit naar de fundamentele reactie van de onderzochte materialen op (combinaties van) temperatuur en vochtigheidsgraad. De invloed op de quasi-statische mechanische eigenschappen zoals sterkte en stijfheid zijn in enig detail onderzocht. Voor wat betreft de vermoeiingslevensduur is de gegenereerde dataset beperkter, en is gebleken dat bestaande numerieke methoden door hun groot aantal benodigde berekeningen ongeschikt zijn. Innovatieve numerieke methoden, zoals *Reduced Order Modelling*, maken gebruik van datacompressietechnieken en *machine learning*, en lijken daardoor beter in staat om langeduurgedrag inclusief vermoeiingsbelasting en vochtingwerking in rekening te brengen.

Nieuwe beeldgenererende en –verwerkende technieken zijn zeer behulpzaam gebleken in de observatie van (vermoeiings)schade. Gezien deze en andere recente resultaten waarbij o.a. patroonherkenning wordt ingezet, ligt het in de lijn der verwachting dat deze methoden, waarbij soms ‘in’ het materiaal kan worden gekeken, een grotere rol gaan spelen in de beschrijving en kwantificering van diverse schademechanismen in composieten.

Meer weten?

Het project MIMIC heeft geleid tot de nodige publicaties. Deze zijn alle te vinden via het proefschrift van Iuri Barcelos, dat begin 2019 verdedigd wordt aan de Technische Universiteit Delft. Het proefschrift is na de verdediging beschikbaar via www.repository.tudelft.nl.

Organisation

MIMIC is a project in the framework of TKI-Wind op Zee, which was executed by the Foundation Knowledge Center WMC (WMC, now part of LM Wind Power Holland B.V.), Delft University of Technology, TNO, and three companies: Bright Composites, Composites Technology Centre and Tres4/We4Ce, between 2014 and 2018. The main applicant and project leader was WMC. During this project, numerical models and experiments were developed at WMC, Delft UT and TNO. Furthermore, the principal investigator Iuri Barcelos conducted a research visit to Danish University of Technology in the framework of the IRPWIND mobility scheme.

Background

The possibility of further optimising material usage in wind turbine rotor blades is a very important prerequisite for being able to sustain continued growth of rotor blades. This growth is in turn driven by the wish to bring down the kWh-price of wind energy. In the past two decades, better design and manufacturing methods and smarter material usage have enabled a significant reduction of blade mass with respect to their length. As an example, a 20m rotor blade of around the year 1995 weighed ca. 2000kg. Based on similarity scaling rules, a typical rotor blade of 20 years later, of 60m length, would then be expected to weigh $2\text{tonnes} \cdot 60\text{m}/20\text{m}^3 = 60\text{tonnes}$. In practice, this is more in the order of 20tonnes. In other words: the expected mass of a rotor blade has decreased with a factor of 3. In general, this is quite astounding when compared to other efficiency-gains that have been achieved in the past 20 years.

Optimising material usage can be achieved in two ways. Stronger and stiffer materials can be developed. Another approach is to increase the knowledge of the materials' behaviour. In that way, additional factors on the design parameters –that are used to account for uncertainties in material behaviour- can be reduced.

Objective and approach

The most important objective of this project is to create an improved understanding of the behaviour of composites in wind turbine rotor blades. The approach predominantly consists of the development and validation of micro-mechanical models.

Development of micro-mechanical models

The idea behind the development of micro-mechanical models is, that if the behaviour of composites is understood at the micro-level (the scale of individual fibres, surrounding resin and the fibre-resin interphase), the behaviour of laminates and, eventually, structures on a macroscopical scale can be better understood (see Figure 1).

Apart from 'standard' numerical methods such as FEM, FE^2 -techniques were used in this project for the multi-scale models. In addition, research was done into the application of Reduced Order Modelling. The implementation of numerical models was done in 'Jive', a software tool which is developed at Delft University by project partners Frans van der Meer and colleagues.

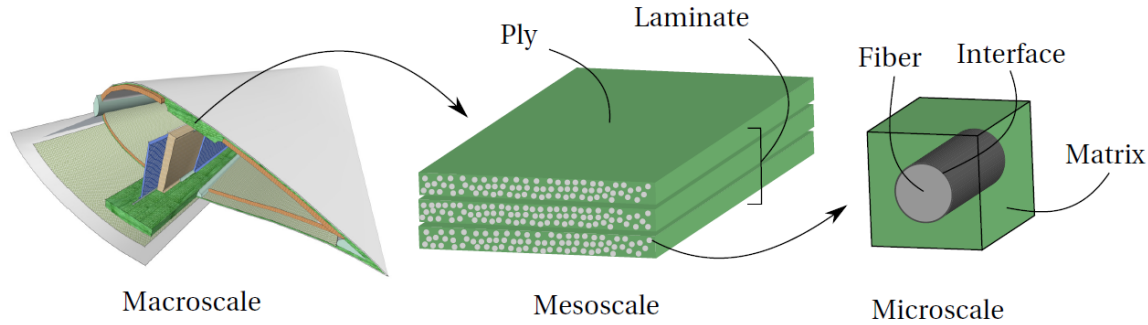


Figure 1: Multi-scale modelling: a concept to explain macroscopic behaviour based on micro-mechanical modelling

Experiments

The micro-mechanical models that are developed in MIMIC are based on observations done in experiments. A variety of experiments was carried out in order to support the development of multi-scale models. For a part of these experiments, no standard exists; specific test set-ups were therefore required to be developed.

An important theme in this project is the influence of moisture ingress. Test coupons were exposed to water at elevated temperature. Periodically, coupons were then tested for mechanical properties such as stiffness and (interlaminar) strength. Particular experiments on slices cut at different orthogonal directions were dedicated to the measurement of direction dependence of the water ingress. To obtain a clear image of the relative contributions of the resin, fibres and resin-fibre interphase, experiments were conducted both on composites and on unreinforced resin. Next to WMC's test facility, a set-up was made operational where materials can be exposed to the weather, and weather conditions are continuously monitored.

Furthermore, fibre push-out tests were conducted at TNO, in which a single glass fibre is pushed out of a very thin slice of resin, in order to quantify the fibre-resin connection strength. For comparison purposes, fibre fragmentation tests were carried out at WMC. In order to visualise the stresses and to measure the strains, polarised light (photo-elasticity) and a simple digital image correlation set-up were utilised.

In the frame of a research visit to the Danish Technical University, test coupons which had been subjected to varying test conditions, were observed using 3D X-ray tomography, which can be used to see the internal damage in a meso-scale element of the test article. Finally, a test set-up was designed and built at WMC in which a random load regime can be combined with any sequence of immersed or dry conditions on a coupon.

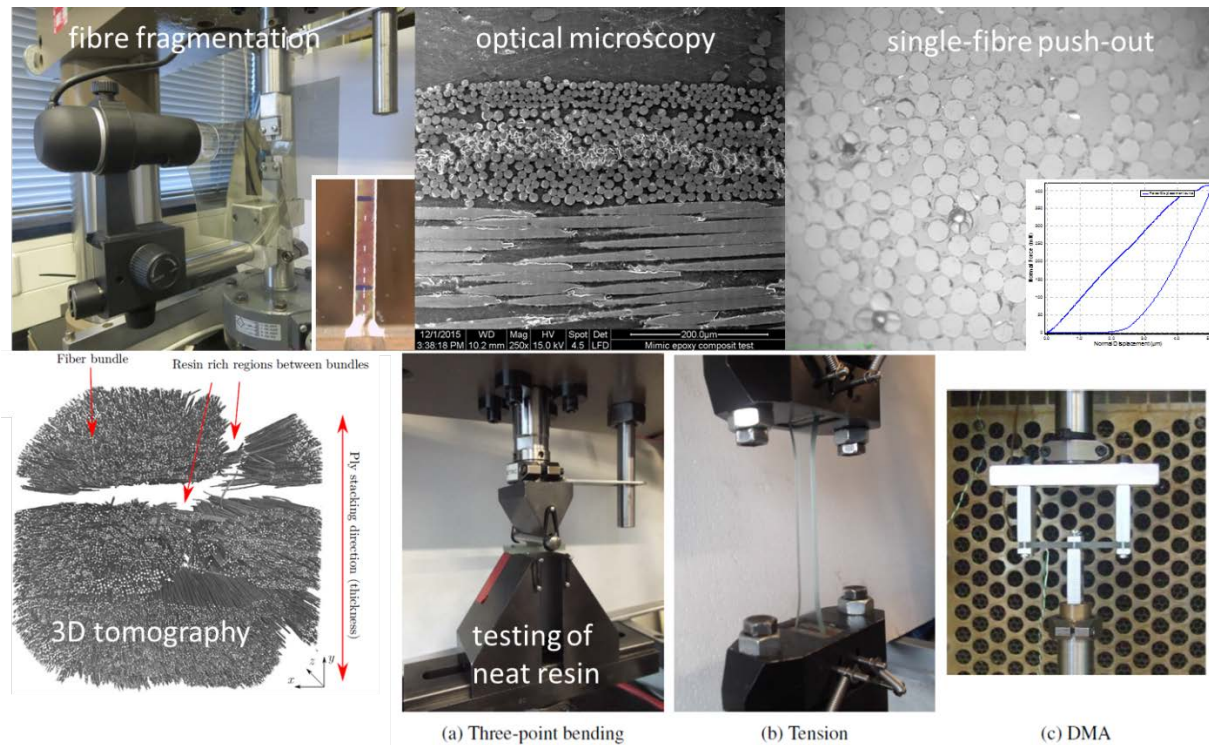


Figure 2: MIMIC featured various experimental methods

Application scope of the results

This project's experiments were performed on materials that are typical for frequently used materials in rotor blades for wind turbines: glass fibres in an epoxy matrix. The laminates manufactured from these components for the experiments were produced using vacuum infusion. These method and materials are frequently applied in wind energy, but are also relevant for other industries, such as ship building and civil engineering.

An important part of the research objective is related to the long-term behaviour of, especially, the epoxy component of the composite, and the relevant influence of moisture and temperature. Parts of this work will therefore also be of use outside wind energy, for example in structures that are subjected to high moisture loads (e.g. lock doors and tidal turbines).

The numerical models are rather fundamental and insofar material dependent, that when measurements indicate comparable material behaviour, the relevant parameters can be used for the prediction of, for example, carbon/polyester composites. The possible application area of the numerical models is therefore quite broad.

In the framework of test development for design and validation of wind turbine rotorblade materials, the results of the MIMIC project are predominantly of interest for design of new test coupons that can be more representative in specific cases than the coupons prescribed by the standards.

Conclusions

The MIMIC-project has contributed to a better understanding of long-term behaviour of glass-fibre/epoxy composites. Particularly the influence of moisture, temperature and the resulting phenomena such as aging, were measured and can now be better modelled.

Outlook

The fundamental response of the investigated materials to (combined) temperature and moisture has received quite some attention in this work. The influence on the quasi-static mechanical properties such as stiffness and strength were investigated in some detail. As far as fatigue life is concerned, the data generated is more limited, and existing numerical methods have been demonstrated to be not appropriate due to their large amount of required calculations. Innovative numerical methods, such as Reduced Order Modelling use datacompression and machine learning and seem to be better capable of accounting for long-term behaviour including fatigue and moisture effects.

New image generating and –processing techniques have proven to be quite helpful in the observation of (fatigue) damage. In view of these and other recent results in which, a.o. pattern recognition is applied, it may be expected that these methods, which sometimes allow to look ‘inside’ the material, will play a more important role in the description and quantification of various damage mechanisms in composites.

Want to know more?

The MIMIC project has resulted in ample publications. These can all be found through Iuri Barcelos’ dissertation, which is defended in early 2019 at Delft University of Technology. The dissertation is subsequently made available via www.repository.tudelft.nl.