



# STRETCH Eindverslag

Project TEHE118020



**TNO** innovation  
for life

**LM** WIND  
POWER  
a GE Renewable Energy business

## Introductie

Dit rapport is het publieke eindverslag van het STRETCH project (STate of art Rotor Extended To Create Higher performance). De doelstelling van het project is bijdragen aan de verlaging van de *Levelized Cost of Energy* (LCoE) van windenergie op zee door het mogelijk te maken de rotordiameter van turbines te vergroten met beperkte aanpassingen van het rotorontwerp, de turbine en de ondersteuningsconstructie. Dit wordt verwezenlijkt door innovaties in het rotorontwerp, verbeteringen in aerodynamische en structurele modellering en innovaties in testmethoden.

Het project liep van 1 mei 2019 tot 31 december 2022. Het project werd uitgevoerd door LM Wind Power R&D (Holland) B.V. (penvoerder), TNO and GE Nederland B.V. Gedurende het project ondersteunden medewerkers van LM- en GE-entiteiten buiten Nederland de projectwerkzaamheden. Dit rapport bevat een overzicht van de projectactiviteiten en -resultaten.

Het STRETCH project is uitgevoerd met Topsector Energiesubsidie van het Ministerie van Economische Zaken, project TEHE118020.

# Inhoudsopgave

Introductie .....	1
Samenvatting .....	3
1 Projectintroductie .....	5
2 Projectresultaten .....	7
2.1 Rotortest .....	7
2.2 Model- en toolontwikkeling .....	8
2.3 Rotorontwerp .....	9
2.4 Kostenmodellering en overzicht .....	10
3 Conclusies en aanbevelingen .....	12
3.1 Conclusies .....	12
3.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek .....	12
4 Publicaties .....	14

## Samenvatting

De doelstelling van het STRETCH project (State of art Rotor Extended To Create Higher performance) is bijdragen aan de verlaging van de *Levelized Cost of Energy* (LCoE) van windenergie op zee door het mogelijk te maken de rotordiameter van turbines te vergroten met beperkte aanpassingen van het rotorontwerp, de turbine en de ondersteuningsconstructie. Dit is verwezenlijkt door innovaties in het rotorontwerp, verbeteringen in aerodynamische en structurele modellering en innovaties in testmethoden.

Het werk is uitgevoerd in twee werkpakketten: WP2 over modelleren en ontwikkelen van ontwerp tools, en WP3 over testmethoden voor mechanisch gedrag. Het modelleerwerk en testwerk werden met elkaar in verbinding gebracht door het ontwikkelen van een Digital Twin.

Een 12 MW referentieturbine (de STRETCH 12 MW Reference Turbine) is ontworpen met LM Wind Powers standaard tools en processen voor bladontwerp om een robuust rotorontwerp te garanderen dat representatief is voor de huidige state-of-the-art in offshore windturbine-ontwerp. De 12 MW Reference Turbine is binnen het project veel gebruikt in de ontwikkeling van aerodynamische modellen en diende als basis voor een 14 MW verlengd rotorontwerp.

Dit 14 MW rotorontwerp is verder geoptimaliseerd met innovatieve ontwerp technieken. Hiermee werd aangetoond dat een belastingverlaging kan worden bereikt door het optimaliseren van de hoofdstijfheidsrichting middels het variëren van de hoek waaronder de lijfplaten in het blad worden geplaatst. Deze belastingverlaging leidt tot een kostenreductie. De effectiefste techniek om een belastingverlaging op de 14 MW rotor te bereiken was het gebruik in het bladontwerp van een koppeling tussen buiging en torsie van het blad. Dit kan door het toepassen van unidirectionele vezels in de gording (*spar cap*), die onder een hoek liggen ten opzichte van de gordingsrichting.

In Werkpakket 2 zijn verschillende aerodynamische modellen voor windturbine-ontwerp verbeterd of ontwikkeld:

- Verbeteringen zijn aangebracht aan de *dynamic inflow* correctie in door de industrie gebruikte simulatiemodellen. Het belang van een correcte modellering van *dynamic inflow* effecten bleek uit ontwerpsimulaties met de STRETCH 12 MW Reference Turbine waarbij uit een vergelijking tussen verschillende *dynamic inflow* modellen een significant effect van *dynamic inflow* op de vermoeiingsbelastingen kon worden opgemaakt.
- Het gebruik van een bayesiaans model met onzekerheidsbepaling leverde voorstellen op voor verbeterde parameters in ontwerpmodellen voor scheefstandscondities.
- Een tweedimensionale wervelzog panelenmethode met twee zogwervels (*2D double vortex wake panel method*) is ontwikkeld en gekoppeld aan in de industrie gebruikte ontwerp tools. De toegevoegde waarde van het model is het direct en nauwkeurig modelleren van de tweedimensionale profielvorm zonder de noodzaak tabellen met minder nauwkeurige profielcoëfficiënten te gebruiken. Een ander belangrijk voordeel is dat het model te gebruiken is voor invalshoeken van  $-90^\circ$  to  $+90^\circ$ , waardoor het model, in tegenstelling tot de meeste simulatiemodellen voor *dynamic stall*, in staat is *self-induced vortex shedding* (zelfgeïnduceerde vortex-afscheiding) te voorspellen.
- Een bestaande 3D panelenmethode is geschikt gemaakt voor toepassing bij windturbine-condities. Hierdoor kan het aerodynamisch gedrag inclusief rotatie-effecten nauwkeurig worden gemodelleerd met de driedimensionale vorm van het blad als invoer, waardoor ook hier geen tabellen met minder nauwkeurige profielcoëfficiënten gebruikt hoeven te worden. Dit model is succesvol met metingen gevalideerd.

Deze verbeterde en nieuw ontwikkelde modellen zijn direct geschikt voor het gebruik door de projectpartners in toekomstige ontwerp- en onderzoeksprojecten. De modellen moeten nog verder gevalideerd worden voor gebruik in windturbine-ontwerp voor certificering, maar stappen zijn al gedefinieerd voor het verder ontwikkelen van de aerodynamische modellen.

Er is tevens gewerkt aan modellering van het mechanisch gedrag van windturbinebladen. Als gevolg van dit werk kan een 2D Eindige Elementen programma gebruikt worden in de berekening van torsie-eigenschappen van windturbinebladen. Dit is een belangrijke stap om de koppeling tussen buiging en torsie van het blad in het bladontwerp te gebruiken om belastingen te verlagen. Componenttesten samen met Eindige Elementenmodellering en materiaaltesten hebben bijgedragen aan het begrip van torsie-effecten in grote, slanke turbinebladen.

Als onderdeel van Werkpakket 3 is een innovatieve rotortestopstelling gebouwd in LM's WMC Technology Center Netherlands te Wieringerwerf. Tijdens het project is vastgesteld dat de testopstelling aan de vooraf gestelde specificaties voldoet. De unieke mogelijkheden van de rotortestopstelling zijn belangrijk voor de versnelde verificatie van de eigenschappen van een nieuw type lager met een hogere belastingscapaciteit (draaggetal) dan andere lagers met vergelijkbare afmetingen. Dit nieuwe type lager zal gebruikt worden in de volgende generatie van grote windturbines op zee. Door de opzet van de rotortestopstelling was het mogelijk een test uit te voeren waarbij gezamenlijk het gedrag van de hoofdasverbinding, vervormingen in de naaf en de wisselwerking tussen diverse rotoronderdelen werd geverifieerd. Deze test leverde waardevolle informatie op over het gedrag bij realistische belastingen.

Tevens is een uitgebreide studie gedaan naar de mogelijkheden van het gebruik van *Digital Twin* technologie. De eerste resultaten met een Digital Twin van de rotortestopstelling inclusief testartikelen zijn bemoedigend, maar werk is nodig om de nauwkeurigheid en praktische bruikbaarheid van het model te verbeteren. Bij het valideren van de aanpak voor het maken van een Digital Twin was de rotortestopstelling een waardevol hulpmiddel.

Gebruik makend van de innovaties in bladontwerp zoals onderzocht in dit project, rekening houdend met vernieuwingen in bescherming van de voorrand om hogere draagsnelheden mogelijk te maken, de verwachte beschikbaarheid van nieuwe lagers met een hoger draaggetal en geavanceerde tests op innovatieve testopstellingen als de Stretch rotortestopstelling, is de verwachte Levelized Cost of Energy voor het gunstigste 14 MW verlengde rotorontwerp 5% lager dan voor de STRETCH 12 MW Reference Turbine.

# 1 Projectintroductie

Windturbines nemen nog steeds in omvang toe om de kostprijs per kWh opgewekte energie te verlagen. Grotere turbines zijn essentieel voor de beoogde energietransitie. De jaarlijkse opbrengst, of *Annual Energy Production* (AEP), neemt toe met het kwadraat van de rotorafmetingen, terwijl de kosten voor windparken op zee vooral afhangen van de fundering, bekabeling, installatie en onderhoud. Die kosten zijn minder afhankelijk van de rotordiameter. Deze trend van schaalvergroting leidt tot zeer grote turbines die alleen economisch haalbaar zijn als er innovatieve, lichte ontwerpen komen voor niet alleen de turbinebladen, maar ook voor de lagers en de naaf.

Om een kostenefficiënte rotor met een diameter van meer dan 220 m te ontwerpen moeten verschillende ontwerpuitdagingen worden overwonnen. Hiervoor zijn verbeterde modellen en testmethoden nodig voor de naaf, bladlagers, verbinding tussen blad en naaf en voor bladontwerp. Voor het ontwerpen en testen van grote rotoren moeten testmethodieken en ontwerpcapaciteit worden ontwikkeld. Het doel van het STRETCH project is om bij te dragen aan ontwerpmodellen en -tools, en testcapaciteit voor zeer grote rotoren te creëren.

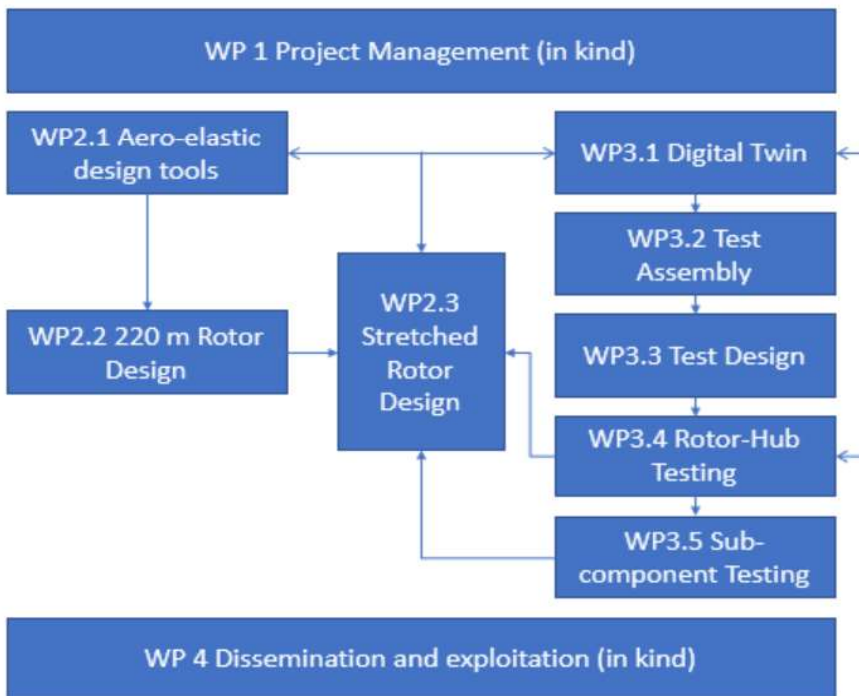
De onderzoeksactiviteiten in het project zijn ondergebracht in twee werkpakketten. In Werkpakket 2 lag de focus op ontwerptools en het ontwerp van een verlengd blad, Werkpakket 3 bevatte de bouw van een innovatieve rotortestopstelling en de ontwikkeling van geavanceerde testprocedures. Ondersteunende activiteiten vonden plaats in Werkpakket 1 (projectmanagement) en Werkpakket 4 (Disseminatie).

Het doel van het onderzoek in WP2 was het maken van een bladontwerp voor een rotor met een 10-15% langer turbineblad dan de 206 m diameter AVATAR rotor. Met deze rotor dient de belasting op de naaf en turbineconstructie vergelijkbaar te zijn met die op een 220 m diameter rotor. Het ontwerp moet rekening houden met limieten voor tipverplaatsing, stijfheid en vermoeiing. De doelen voor de deeltaken waren:

1. Ontwikkel de benodigde aerodynamische tools en modellen voor een nauwkeurig ontwerp (WP 2.1 – Aero-elastic design tools).
2. Ontwerp een 220 m rotor voor een 12 MW turbine (WP 2.2 – 220 m Rotor Design).
3. Ontwikkel innovaties om de belastingen op de naaf te beperken en pas deze toe in het ontwerpproces om binnen het toegestane belastingsbereik te blijven. Evalueer vervolgens de verlaging van de *Levelized Cost of Energy* (LCoE) (WP 2.3 – Stretched Rotor Design).

De activiteiten in WP3 waren gericht op het beschikbaar maken van innovatieve testprocedures en benodigde hardware voor het integraal testen van rotoren en daaraan verbonden onderdelen. Dit is bereikt door het ontwerp en de bouw van een rotortestopstelling bij LM's WMC Technology Center (WP 3.2 – Test Assembly), door het ontwerp van tests die de unieke mogelijkheden van de rotortestopstelling benutten (WP 3.3 – Test Design) en het uitvoeren van die tests om het gedrag en de geschiktheid van de testopstelling voor ontwerpvalidatie en -verbetering te verifiëren (WP 3.4 – Rotor-Hub Testing). *Digital Twin* technieken zijn gebruikt om een digitale replica van de testopstelling te maken en simulaties te vergelijken met metingen. De digital twin kan gebruikt worden voor efficiënter testontwerp (WP 3.1 – Digital Twin). Subcomponenten zijn getest om specifiek het torsiegedrag van lange, slanke constructies te kunnen analyseren (WP 3.5 – Sub-component testing).

Figuur 1 geeft een overzicht van de werkpakketten en hun onderlinge samenhang.



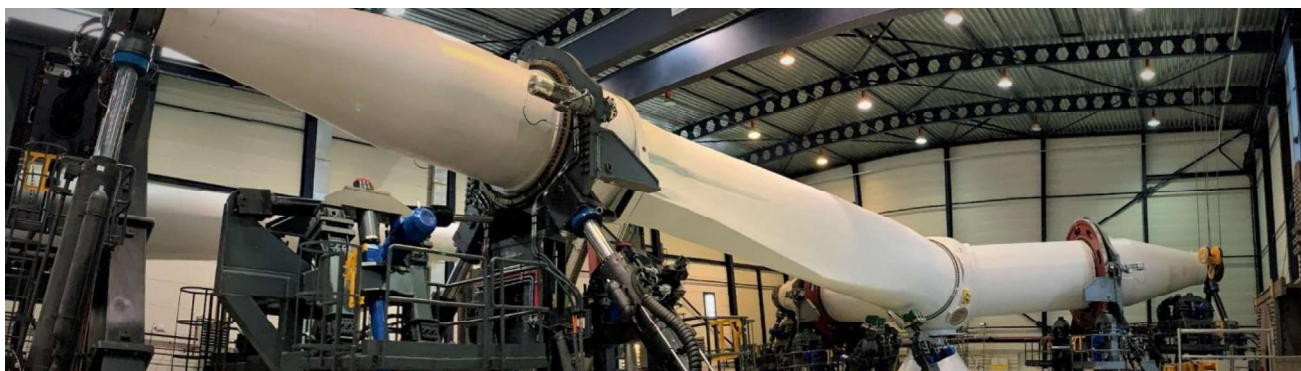
Figuur 1 Overzicht van de Werkpakketten en hun onderlinge samenhang

## 2 Projectresultaten

### 2.1 Rotortest

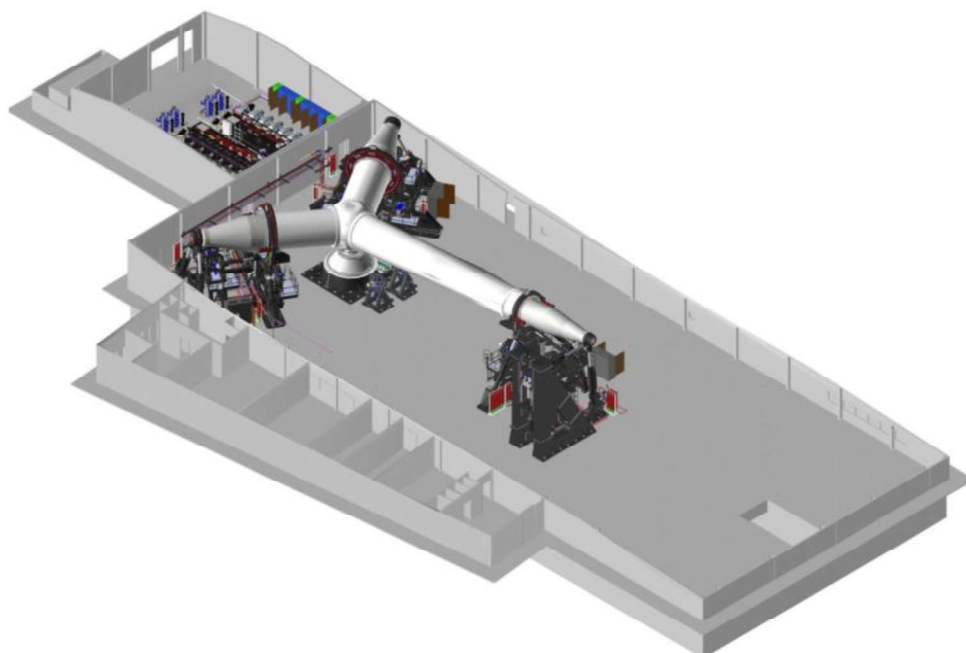
Als onderdeel van het STRETCH project is in LM's WMC Technology Center Netherlands een innovatieve rotortestopstelling, in het vervolg aangeduid als Rotor Rig, gebouwd (zie Figuur 2). Ondanks externe uitdagingen als gevolg van de COVID-19 pandemie, die vertraging veroorzaakten, is de bouw afgerond en kon tijdens het project worden vastgesteld dat de Rotor Rig functioneert en aan de gestelde specificaties voldoet.

De Rotor Rig bestaat uit drie assen met ieder een onafhankelijk systeem om belastingen aan te brengen (*Load Application System*) – een *Fore Blade Load Application System* (FBLAS) met ingekort turbineblad en twee *Aft Blade Load Application Systems* (ABLAS) met composiet buizen – en de volledige naaf met ondersteuning. De naafondersteuning, FBLAS en ABLAS zijn gemonteerd op de versterkte betonnen vloer met ankerbouten.



Figuur 2 De voltooide Rotor Rig

In Figuur 3 is ook de aparte HPU-ruimte (*Hydraulic Power Unit*) te zien die aangebouwd is tegen de zuidkant van het bestaande WMC-gebouw. De HPU bestaat uit zes pompen om de twee ABLAS aan te drijven, en zeven pompen voor de FBLAS.



Figuur 3 Rotor Rig in de grote hal van WMC met aparte ruimte voor de Hydraulic Power Unit (HPU)



De Rotor Rig biedt verschillende unieke mogelijkheden als platform voor validatietesten:

- Rotoronderdelen kunnen op ware grootte worden gevalideerd in een geïntegreerde testomgeving, onder omstandigheden die dicht bij de praktijkcondities liggen. Op traditionele opstellingen kunnen onderdelen alleen individueel getest worden. In zo'n individuele test wordt de interactie met andere onderdelen buiten beschouwing gelaten, terwijl die toch een grote impact kan hebben op het gedrag en de betrouwbaarheid van het onderdeel. Het lager van het bladhoekverstelsysteem is bijvoorbeeld gesitueerd tussen de naaf en het rotorblad. Zowel de naaf als het blad vertonen in bedrijf relatief grote vervormingen die worden overgebracht op het lager. De hieruit volgende lagervervorming heeft een grote invloed op de belastingverdeling in de rollende elementen, en daarmee op de prestaties en levensduur van het lager.
- Sommige onderdelen of aspecten konden nog niet in een testlaboratorium worden getest, en voor validatie waren veldtesten op een turbine-prototype nodig. Het nadeel van een dergelijke aanpak is dat de omgeving niet gecontroleerd is; testbelastingen hangen af van de windomstandigheden die de turbine ervaart. Ook is de toegankelijkheid van het materiaal voor metingen en inspecties veel beperkter dan in een lab-omgeving. Daardoor zijn veldtesten minder efficiënt en duurder dan testen op de Rotor Rig.
- Op onvoorziene behoeften voor test en validatie kan snel worden ingespeeld. Omdat de volledige rotor met naaf in de testopstelling is opgenomen, is ieder onderdeel ervan direct beschikbaar voor test en validatie. Voordien was de eerste stap bij de behoefte om een onderdeel te testen en valideren het ontwerpen en bouwen van een testopstelling. Dat is een grote onderneming voor onderdelen met dergelijke afmetingen. Met de Rotor Rig is de opstelling al aanwezig voor het testen van ieder onderdeel van de rotor.

De unieke mogelijkheden van de rotortestopstelling zijn belangrijk voor de versnelde verificatie van de eigenschappen van een nieuw type lager met een hogere belastingscapaciteit (draaggetal) dan andere lagers met vergelijkbare afmetingen. Dit nieuwe type lager zal gebruikt worden in de volgende generatie van grote windturbines op zee. Door de opzet van de rotortestopstelling was het mogelijk een test uit te voeren waarbij gezamenlijk het gedrag van de hoofdasverbinding, vervormingen in de naaf en de wisselwerking tussen diverse rotoronderdelen werd geverifieerd. Deze test leverde waardevolle informatie op over het gedrag bij realistische belastingen.

Een uitgebreide studie is gedaan naar de mogelijkheden van het gebruik van *Digital Twin* technologie in combinatie met de Rotor Rig [1]. De eerste resultaten met een Digital Twin van de Rotor Rig inclusief testartikelen zijn bemoedigend, maar werk is nodig om de nauwkeurigheid en praktische bruikbaarheid van het model te verbeteren. Bij het valideren van de aanpak voor het maken van een Digital Twin was de rotortestopstelling een waardevol hulpmiddel.

## 2.2 Model- en toolontwikkeling

In het project zijn verschillende aerodynamische modellen voor windturbine-ontwerp verbeterd of ontwikkeld. Deze verbeterde en nieuw ontwikkelde modellen zijn direct geschikt voor het gebruik door de projectpartners in toekomstige ontwerp- en onderzoeksprojecten. De aerodynamische modelontwikkeling is beschreven in diverse wetenschappelijke papers en presentaties op conferenties [2] [3] [4].

Verbeteringen zijn aangebracht aan de *dynamic inflow* correctie in het BEM (*Blade Element Momentum theory*) ontwerpmodel van TNO's AeroModule programma. Hierbij is gebruik gemaakt van het vrije wervelzogmodel AWSM in AeroModule, dat *dynamic inflow* effecten correct modelleert. Een model met twee constanten bleek nauwkeuriger dan het tot nu gebruikelijke model met één tijdsconstante. De verbetering geldt niet alleen voor de nauwkeurige modellering van *dynamic inflow*, maar zorgt er ook voor dat software-implementatie gemakkelijker wordt, omdat convergentieproblemen bij niet-uniforme instroming worden vermeden. Het belang van een correcte modellering van *dynamic inflow* effecten bleek uit ontwerp simulaties

met de STRETCH 12 MW Reference Turbine waarbij uit een vergelijking tussen verschillende *dynamic inflow* modellen een significant effect van de *dynamic inflow* op de vermoeiingsbelastingen kon worden opgemaakt.

Het gebruik van een bayesiaans model met onzekerheidsbepaling in het computerprogramma UQWIND leverde suggesties op voor het verbeteren van de parameters voor scheefstandscondities in AeroModule. Met UQWIND worden de meest waarschijnlijke parameterwaarden voor het model bepaald met een onzekerheidsmarge. Ook voor dit model is bij de kalibratie gebruik gemaakt van de vrije wervelzogmethode AWSM die scheefstandscondities realistisch kan modelleren. Verschillende uitdagingen, vooral met betrekking tot het reduceren van de rekentijd, moesten worden overwonnen en hoewel er na kalibratie een betere overeenkomst was in resultaten tussen het BEM-model en AWM, was de tijd te kort om al te komen tot een aanbeveling voor nieuwe modelparameters met onzekerheidsmarge. Het werk op dit vlak is beschreven in afstudeerverslag [5].

Een tweedimensionale wervelzog panelenmethode met twee zogwervels (*2D double vortex wake panel method*) is ontwikkeld, gekoppeld aan TNO's AeroModule en voor een aantal gevallen succesvol gevalideerd met metingen. De toegevoegde waarde van het model is het direct en nauwkeurig modelleren van de tweedimensionale profielvorm zonder de noodzaak tabellen met minder nauwkeurige profielcoëfficiënten te gebruiken. Een ander belangrijk voordeel is dat het model te gebruiken is voor invalshoeken van  $-90^\circ$  tot  $+90^\circ$ , waardoor het model, in tegenstelling tot de meeste simulatiemodellen voor *dynamic stall*, in staat is *self-induced vortex shedding* (zelfgeïnduceerde vortex-afscheiding) te voorspellen. De *double vortex wake panel* methode is overgedragen aan LM Wind Power, dat het model met goed resultaat gebruikt heeft om belastinggevallen bij stilstand/vrijloop (met kans op *self-induced vortex shedding*) te simuleren. De lange rekentijd is nog een beperkende factor voor een meer algemene toepassing.

De bestaande 3D panelenmethode *Vortexje* is geschikt gemaakt voor toepassing bij windturbine-condities. Hierdoor kan het aerodynamisch gedrag inclusief rotatie-effecten nauwkeurig worden gemodelleerd met de driedimensionale vorm van het blad als invoer, waardoor ook hier geen tabellen met minder nauwkeurige profielcoëfficiënten gebruikt hoeven te worden. Dit model is succesvol met metingen gevalideerd. De mogelijkheid tpt tot modelleren van de aerodynamische respons van niet-conventionale bladvormen met *Vortexje* is aangetoond door de stroming rond *swept blades*. De ervaringen die zijn opgedaan met *Vortexje* hebben het mogelijk gemaakt om tegelijkertijd een eerste versie van een 3D panelenmethode te ontwikkelen die gekoppeld kan worden aan AeroModule.

Er is tevens gewerkt aan modellering van het mechanisch gedrag van windturbinebladen. Als gevolg van dit werk kan een 2D Eindige Elementen programma gebruikt worden in de berekening van torsie-eigenschappen van windturbinebladen. Dit is een belangrijke stap om de koppeling tussen buiging en torsie van het blad in het bladontwerp te gebruiken om belastingen te verlagen. Componenttesten samen met Eindige Elementenmodellering en materiaaltesten hebben bijgedragen aan het begrip van torsie-effecten in grote, slanke turbinebladen. De Eindige Elementen-analyse is beschreven in afstudeerverslag [6].

### 2.3 Rotorontwerp

Tijdens het project is een 12 MW referentieturbine (de STRETCH 12 MW Reference Turbine) ontworpen, die representatief is voor de huidige state-of-the-art in offshore windturbine-ontwerp. Hiervoor is een rotordiameter van 220 m gekozen omdat dit de diameter was van de grootste commercieel beschikbare windturbine bij de start van het project. De turbine is ontworpen voor IEC offshore windklasse 1B. Het is een turbine met *direct-drive* overbrenging, variabel toerental en bladhoekverstelling. Er is gebruik gemaakt van LM Wind Powers standaard tools en processen voor bladontwerp om een robuust en representatief rotorontwerp te garanderen. TNO heeft specifiek voor deze turbine een regelaar ontworpen en de meest geschikte openbaar beschikbare aerodynamische profielen geselecteerd [7]. De 12 MW Reference Turbine is binnen het project veel gebruikt in de ontwikkeling van aerodynamische modellen en diende als basis voor een 14 MW verlengd rotorontwerp.

Eerst is het 12 MW bladontwerp opgeschaald naar een 240 m rotor, de 14 MW Baseline. Verschillende ontwerpitaties met berekeningen van ontwerpbelastingen zijn vervolgens uitgevoerd. Op deze manier is het blad met een lengte van 107 m opgeschaald naar een lengte van 117 m. Dit 14 MW rotorontwerp is verder geoptimaliseerd met innovatieve ontwerptechnieken (Zie Figuur 4 voor een 3D-weergave van het rotorblad). Helaas kon binnen het bestek van het project geen belastingverlaging worden aangetoond voor de veelbelovende door TNO ontwikkelde regelmethode op basis van LIDAR-metingen.



**Figuur 4 3D-weergave van het opgeschaalde blad**

Analyses toonden aan dat een belastingverlaging kan worden bereikt door het optimaliseren van de hoofdstijfheidsrichting middels het variëren van de hoek waaronder de lijfplaten in het blad worden geplaatst (ontwerpvariant 14MW WA10v2). Deze belastingverlaging leidt tot een kostenreductie. De effectiefste techniek om een belastingverlaging op de 14 MW rotor te bereiken was het gebruik in het bladontwerp van een koppeling tussen buiging en torsie van het blad. Dit kan door het toepassen van unidirectionele vezels in de gording (*spar cap*), die onder een hoek liggen ten opzichte van de gordingsrichting (ontwerpvariant 14MW N3BT).

Gebruik makend van de innovaties in bladontwerp zoals onderzocht in dit project, rekening houdend met vernieuwingen in bescherming van de voorrand om hogere tipsnelheden mogelijk te maken, de verwachte beschikbaarheid van nieuwe lagers met een hoger draaggetal en geavanceerde tests op innovatieve testopstellingen als de Stretch rotortestopstelling, is de verwachte Levelized Cost of Energy voor het gunstigste 14 MW verlengde rotorontwerp 5% lager dan voor de STRETCH 12 MW Reference Turbine.

## 2.4 Kostenmodellering en overzicht

Om de opbrengst van de in het STRETCH project ontwikkelde innovaties te evalueren, heeft TNO de rotorkosten en opbrengst gemodelleerd in haar BLADECOST model. Om de waarde van de innovatieve rotorontwerpen te bepalen, zijn twee referentieturbines ontworpen op basis van de state-of-the-art bij het begin van het STRETCH project. De opbrengst van STRETCH rotor / project is het verschil in *Levelized cost of Energy* (LCoE) bij het begin en einde van het project.

In het STRETCH project lag de focus vooral op de kosten (massa) van de rotor en kosten die direct worden beïnvloed door een nieuwe, innovatieve rotor. De kosten voor alle onderdelen van de windturbine, als elektrische systemen etc, zijn berekend voor de 12 MW Reference en 14 MW Baseline en voor veel onderdelen is aangenomen dat de kosten niet worden beïnvloed door de innovatieve rotor. De kosten van de dragende delen zoals de ondersteuningsconstructie worden wel beïnvloed door de innovatieve rotor, omdat de rotor de belasting op de ondersteuning veroorzaakt en daardoor een verlaging van de belastingen door verbeterd aerodynamisch gedrag of verbeterde regeltechniek ook doorwerken op de ondersteuning.

De operationele kosten zijn gebaseerd op de kosten voor exploitatie en onderhoud, en andere kosten zoals verzekeringen. In het kostenmodel is aangenomen dat een deel van deze kosten vaststaat per turbine, en dus onafhankelijk is van het vermogen van de turbine, en het resterende deel zich lineair verhoudt tot het turbinevermogen.

De twee gemodelleerde innovatieve ontwerpvarianten, 14MW N3BT en 14MW WA10v2, laten beide een verlaging van LCoE zien. De kostenverschillen door massaverschillen van rotor en toren zijn net als de energie-opbrengst rechtstreeks meegenomen in het model. De reductie in maximale buigmomenten en het statisch moment aan de bladwortel resulteren in een verlaging van de kosten van de naaf.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de ontwerpen in werkpakketten 2.2 en 2.3. Het positieve effect van opschalen van 12 MW naar 14 MW waarbij van hetzelfde turbine-platform gebruik gemaakt kan worden blijkt duidelijk uit de LCoE-afname van 4%. Met de innovatieve bladontwerpen uit dit project kan een verdere verlaging worden bereikt, omdat lichtere bladen leiden tot lagere belastingen en daarmee lagere kosten, met slechts een kleine vermindering van de energie-opbrengst. De beste 14 MW ontwerpvariant geeft een 5.2% afname van LCoE vergeleken met de 12 MW Reference.

	Eenheid	STRETCH 12 MW Reference	STRETCH 14 MW Baseline Rev 2		STRETCH 14MW WA10v2		STRETCH 14 MW N3BT	
				rel. tot 12MW		rel. tot 12MW		rel. tot 12MW
Nominaal vermogen	MW	12	14	1.17	14	1.17	14	1.17
Nominaal toerental	rpm	7.8	7.8	1.00	7.8	1.00	7.8	1.00
Rotordiameter	m	220	240	1.09	240	1.09	240	1.09
LCoE	€/MWh	51.99	49.74	0.96	49.47	0.95	49.27	0.95

## 3 Conclusies en aanbevelingen

### 3.1 Conclusies

Als onderdeel van het STRETCH project is in LM's WMC Technology Center Netherlands een innovatieve rotortestopstelling gebouwd. Ondanks externe uitdagingen als gevolg van de COVID-19 pandemie, die vertraging veroorzaakten, is de bouw afgerond en kon tijdens het project worden vastgesteld dat de Rotor Rig functioneert en aan de gestelde specificaties voldoet. De unieke mogelijkheden van de rotortestopstelling zijn belangrijk voor de versnelde verificatie van de eigenschappen van een nieuw type lager met een hogere belastingscapaciteit (draaggetal) dan andere lagers met vergelijkbare afmetingen. Dit nieuwe type lager zal gebruikt worden in de volgende generatie van grote windturbines op zee. Door de opzet van de rotortestopstelling was het mogelijk een test uit te voeren waarbij gezamenlijk het gedrag van de hoofdasverbinding, vervormingen in de naaf en de wisselwerking tussen diverse rotoronderdelen werd geverifieerd. Deze test leverde waardevolle informatie op over het gedrag bij realistische belastingen.

Een uitgebreide studie is gedaan naar de mogelijkheden van het gebruik van *Digital Twin* technologie in combinatie met de rotortestopstelling. De eerste resultaten met een Digital Twin van de testopstelling inclusief testartikelen zijn bemoedigend, maar zoals beschreven in het TNO-rapport over de Digital Twin is meer werk nodig om de nauwkeurigheid en praktische bruikbaarheid van het model te verbeteren. Bij het valideren van de aanpak voor het maken van een Digital Twin was de rotortestopstelling een waardevol hulpmiddel.

In het project zijn verschillende aerodynamische modellen voor windturbine-ontwerp verbeterd of ontwikkeld. Deze verbeterde en nieuw ontwikkelde modellen zijn direct geschikt voor het gebruik door de projectpartners in toekomstige ontwerp- en onderzoeksprojecten. De modellen moeten nog verder gevalideerd worden voor gebruik in windturbine-ontwerp voor certificering, maar stappen zijn al gedefinieerd voor het verder ontwikkelen van de aerodynamische modellen uit het STRETCH project.

Een 12 MW referentieturbine (de STRETCH 12 MW Reference Turbine) is ontworpen met LM Wind Powers standaard tools en processen voor bladontwerp om een robuust rotorontwerp te garanderen dat representatief is voor de huidige state-of-the-art in offshore windturbine-ontwerp. Deze referentieturbine is binnen het project veel gebruikt in de ontwikkeling van aerodynamische modellen en diende als basis voor een 14 MW verlengd rotorontwerp.

Dit 14 MW rotorontwerp is verder geoptimaliseerd met innovatieve ontwerptechnieken. Hiermee werd aangetoond dat een belastingverlaging kan worden bereikt door het optimaliseren van de hoofdstijfheidsrichting middels het variëren van de hoek waaronder de lijfplaten in het blad worden geplaatst. Deze belastingverlaging leidt tot een kostenreductie. De effectiefste techniek om een belastingverlaging op de 14 MW rotor te bereiken was het gebruik in het bladontwerp van een koppeling tussen buiging en torsie van het blad. Dit kan door het toepassen van unidirectionele vezels in de gording (*spar cap*), die onder een hoek liggen ten opzichte van de gordingsrichting.

Gebruik makend van de innovaties in bladontwerp zoals onderzocht in dit project, rekening houdend met vernieuwingen in bescherming van de voorrand om hogere tipsnelheden mogelijk te maken, de verwachte beschikbaarheid van nieuwe lagers met een hoger draaggetal en geavanceerde tests op innovatieve testopstellingen als de Stretch rotortestopstelling, is de verwachte Levelized Cost of Energy voor het gunstigste 14 MW verlengde rotorontwerp 5% lager dan voor de STRETCH 12 MW Reference Turbine.

### 3.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

De eerste resultaten van het maken van een *Digital Twin* van de rotortestopstelling zijn bemoedigend, maar meer werk is nodig om de nauwkeurigheid en prestaties van het model te verbeteren. De rekentijd kan worden verlaagd door het gebruik van meer rekenkracht of door verdere deelmodelleringstechnieken te gebruiken om het model te optimaliseren.

Tijdens het project zijn innovatieve testmethoden ontwikkeld die de unieke mogelijkheden van de Rotor Rig gebruiken. Omdat de test van de hoofasverbinding en naafvorming niet afgerond kon worden tijdens de projectperiode, kan meer inzicht worden verkregen door de test te voltooien. Een andere manier om de mogelijkheden van de opstelling te benutten kan het testen van de interactie tussen bladwortel, lager en naaf zijn. Het gezamenlijk gedrag van deze onderdelen is belangrijk voor het turbinegedrag, maar nog niet volledig begrepen of te vatten in de huidige ontwerpmodellen. Daarnaast is de relatie tussen het gedrag van de bladhoekverstelling en bladbelastingen niet te vangen met andere opstellingen, aangezien de lagervormingen in andere bestaande testopstellingen niet overeenkomen met de werkelijke situatie in het veld.

In het STRETCH project zijn verschillende aerodynamische modellen voor windturbine-ontwerp verbeterd of ontwikkeld. Stappen zijn gemaakt om deze modellen te valideren met windtunnelmetingen en *high-fidelity* simulaties. Betrouwbare metingen in het veld voor de condities waarvoor deze modellen toegepast worden zijn zeldzaam, maar metingen gedaan in het TIADE project (ook een project met GE, LM Wind Power en TNO, ondersteund door RVO, projectnummer TEHE119018) zijn bruikbaar voor verdere modelvalidatie.

In het project is aangetoond dat het mogelijk is belastingen op de turbine te verlagen door het gebruik in het bladontwerp van een koppeling tussen buiging en torsie van het blad. Tijdens het project zijn ontwerpprogramma's verbeterd om deze koppeling correct te voorspellen. Verdere validatie is nodig om zeker te zijn dat deze programma's nauwkeurig genoeg zijn om mechanisch gedrag accuraat te voorspellen.

## 4 Publicaties

- [1] C. Liu, „A Detailed Study of Digital Twin for Wind Energy Applications,” TNO Report, 2022.
- [2] S. Mancini, K. Boorsma, G. Schepers en F. Savenije, „A comparison of dynamic inflow models for the Blade Element Momentum method,” *Wind Energ. Sci. Discuss*, 2022.
- [3] A. K. Ravishankara en K. Boorsma, „Application of an unsteady double wake panel method for aeroelastic rotor analysis,” in *AIAA SciTech Forum*, 2023.
- [4] G. Schepers, K. Boorsma, H. Özdemir en S. Mancini, „Aerodynamic modelling of large wind turbine rotors,” in *Wind Energy Science Conference*, 2021.
- [5] M. Bouwmeesters, „Wind turbine yaw modelling at TNO,” MSc. thesis, TUDelft Faculty of Aerospace, 2022.
- [6] P. Aggarwal, „Modelling Strategies for the Torsional Stiffness of Wind Turbine Rotor Blades,” MSc. thesis, Nanyang Technological University, Singapore, 2020.
- [7] G. Schepers, F. Savenije, T. van der Zee, M. Kloosterman, G. de Winkel en C. Lindenburg, „Public description of STRETCH 12 MW Reference Turbine,” TNO Report, 2023.