

**TNO-rapport**

**TNO 2021 R124303**

**Resultaten van het TKI-WoZ  
onderzoeksproject VaStBlades naar  
torsiegedrag van rotorbladen van windturbines**

**EnergieTransitie**

Westerduinweg 3

1755 LE Petten

Postbus 15

1755 ZG Petten

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 50 65

Datum 31 december 2021

Auteur(s) A.C. Veltkamp

Exemplaarnummer

Oplage

Aantal pagina's 14 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen

Opdrachtgever

Projectnaam

Projectnummer

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, RVO, heeft toestemming van TNO voor publicatie van dit rapport op de RVO website.

© 2021 TNO

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Doelstellingen VaStBlades en partners.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Resultaten en toepassingen.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Bijdrage VaStBlades aan kostenverlaging van Wind Energie en versterking van de kennispositie .....</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Spin-off mogelijkheden .....</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Publicaties .....</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>Verkrijgbaarheid rapporten .....</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>Contactpersoon .....</b>	<b>13</b>
<b>8</b>	<b>Verantwoording .....</b>	<b>14</b>

# 1 Doelstellingen VaStBlades en partners

Het startpunt voor het VaStBlades onderzoeksproject was de hoge mate van onzekerheid omtrent het torsie gedrag van de rotorbladen van windturbines. Deze onzekerheid betrof zowel de modellen die worden gebruikt om nieuwe generatie rotorbladen te ontwerpen (resultierend in 17% onzekerheid in berekende torsiestijfheden), alsook de feitelijke meting van het torsiegedrag tijdens de operationele fase van windturbines. Deze omstandigheden hebben geleid tot een conservatief ontwerp van rotorbladen. Dit betekent dat rotorbladen in de praktijk stijver en zwaarder zijn dan nodig zou zijn om torsiekrachten gedurende de operationele levensfase van de bladen te doorstaan. Dit op zijn beurt resulteert uiteraard in hogere (te hoge) kosten voor het ontwerp en de productie van de bladen.

Hoe schadelijk aero-elastische instabiliteiten kunnen zijn werd wel duidelijk uit de beroemde opnames van de ineenstorting van de Tacoma Narrows Bridge op 7 november 1940 (zie foto). Zulke incidenten komen in de windsector gelukkig niet (meer) voor, de effecten zijn vele malen kleiner, maar toch verdient het onderwerp van torsiegedrag van rotorbladen meer aandacht naarmate de bladen langer en slanker worden. Flutter is een voorbeeld van een torsie-gerelateerde instabiliteit. Voor korte en stijve bladen is flutter onbelangrijk, maar voor bladen in de buurt van honderd meter lengte begint deze instabiliteit relevant te worden.



*Figuur 1. Foto van de Tacoma Narrows Bridge ("galloping Gertie") genomen tijdens de ineenstorting op 7 november 1940 als gevolg van aero-elastische instabiliteit.*

Daarnaast heeft een verkeerde voorspelling van de torsievorming invloed op de aerodynamische prestaties van een rotorblad. Het profiel staat dan anders in de wind en dat heeft direct effect op de elektrische opbrengst.

Om de onzekerheden in bladontwerp en torsiemetingen te verminderen hebben de partners van VaStBlades zich op 3 hoofdonderwerpen gericht:

-LM Wind Power heeft als rotorblad-ontwerper verbeteringen aangebracht in hun structurele bladontwerp tool FRBEX, zodat de bladvervorming beter kan worden gemodelleerd. Dit onderzoek werd uitgevoerd in het Kenniscentrum Windturbine Materialen en Constructies WMC, sinds 2019 onderdeel van LM Wind Power.

-TRES4 B.V. heeft de verbeterde FRBEX toegepast ten behoeve van het ontwerp van een 14 MW rotorblad voor een 2-blad rotor.

-TNO Wind Energy heeft zich vooral toegelegd op de evaluatie en ontwikkeling van meetmethodes voor het nauwkeurig kunnen meten van bladvervorming tijdens operationeel bedrijf (onder actuele aero-dynamische condities van een testturbine, TIADE). Behalve het onderzoek naar geschikte sensoren en lay-out van de sensoren op of in het rotorblad, is hiervoor ook een algoritme ontworpen die de signalen van de sensoren vertaald in actuele bladvervorming.

De overkoepelende doelstelling van het VaStBlades project was om een meer nauwkeurige berekeningen mogelijk te maken van het torsiegedrag van zeer grote, flexibele rotorbladen. Hierdoor kunnen mechanische belastingen op de rotorbladen tijdens bedrijf worden gereduceerd en kan het aero-elastisch ontwerp van rotorbladen verder worden geoptimaliseerd voor verhoogde stroomopwekking.

Voor het bereiken van de doelstelling zijn in het VaStBlades project de volgende activiteiten uitgevoerd:

- Verbetering van de structurele bladontwerptool FRBEX op het gebied van torsie
- Testen van 2 rotorbladen bij de WMC testfaciliteit te Wieringerwerf.
- Onderzoek naar een geschikte sensor technologie voor het dynamisch meten van het torsiegedrag van rotorbladen onder veldcondities. Hiervoor is de TIADE onderzoek windturbine gebruikt op het EWEF wind testveld te Wieringerwerf, en is een “shape sensing” algoritme ontwikkeld en getest.
- Validatie van de verbeterde ontwerptool op basis van de WMC testgegevens en de meetgegevens van het TIADE veldexperiment.
- Ontwerp van de 14 MW windturbine rotorblad voor een 2-blad windturbine op basis van de opgedane kennis van het torsiegedrag en de gevalideerde ontwerptool.

De VaStBlades partners waren:

- Energy research Centre of the Netherlands (ECN). In 2018 is ECN overgegaan in TNO.
- Stichting Kenniscentrum windturbine materialen en constructies (WMC). WMC is in 2019 overgenomen door LM Wind Power R&D (Holland) B.V..
- GE Global Research GmbH. Alle taken van GE Global Research in het VaStBlades project zijn sinds 2019 overgenomen door LM Wind Power R&D (Holland) B.V.
- TRES4 B.V.

## 2 Resultaten en toepassingen

VaStBlades heeft op een 4-tal fronten belangrijke resultaten opgeleverd voor de windsector. (1) Meer nauwkeurige modellering van de vervorming van rotorbladen, (2) verbeterde statische testen van rotorbladen, (3) ontwerp van een 14 MW rotorblad met verminderde belastingen onder veldcondities en (4) het dynamisch kunnen meten en interpreteren van vervorming van zeer grote rotorbladen onder praktijkomstandigheden.

### *(1) Optimalisatie in het structureel ontwerp van zeer grote rotorbladen*

In samenwerking met het voormalige ECN heeft WMC (inmiddels LM Wind Power) het software programma FOCUS6 ontwikkeld. FOCUS6 is een geïntegreerd modulair software pakket dat is bestemd voor het ontwerpen van windturbines en windturbine-componenten, zoals rotorbladen. FOCUS6 wordt al meer dan 20 jaar toegepast door windturbinefabrikanten, ingenieursbureaus gespecialiseerd in ontwerp van rotorbladen en andere windturbine componenten, onderzoeksinstituten, certificerende instanties en universiteiten. In een van de FOCUS6 modules (FAROB) worden de stijfheid, buiging en de massa-eigenschappen van rotorbladen berekend. Binnen het VaStBlades project heeft LM Wind Power de FAROB module verbeterd, uitgebreid en gevalideerd. De naam werd omgedoopt in FRBEX. In FRBEX is de Kooijman-theorie (1996) geïmplementeerd voor berekening van de 6x6 stijfheidsmatrix van het rotorblad (een Timoshenko balk). Hierdoor is het voor het eerst mogelijk om de vervorming van de **balk** van het rotorblad met hoge nauwkeurigheid te berekenen, zowel voor ontwerp en verificatie van statische bladtesten zoals in de WMC testhal voor VaStBlades zijn uitgevoerd, alsook voor simulatiestudies naar de dynamische aero-elastische belastingen tijdens het operationeel bedrijf van windturbines. Duidelijk werd o.a. dat de koppeling tussen buiging en torsie van het rotorblad een aanzienlijke invloed heeft op de mechanische belastingen van rotorbladen. Deze nieuwe informatie is door TRES4 toegepast in aero-elastische belasting simulatiestudies voor een 108 m lang, 14 MW bladontwerp (zie verder onderstaand onder (3)).

### *(2) Statische bladtesten bij het kenniscentrum WMC, Wieringerwerf*

In het testlaboratorium WMC zijn 2 rotorbladen getest, een 29 M EWT blad en een LM 56.9P2 rotorblad. Het EWT blad diende vooral om de sensortechnologie te ontwikkelen om torsiegedrag (later) onder veldomstandigheden te kunnen meten. Goede resultaten konden worden verkregen met fiber-optische meetsystemen, waarbij discrete fibers op nauwkeurig geselecteerde locaties d.m.v. een zig-zag patroon op het oppervlak van het blad waren verlijmd. Deze resultaten waren ook aanleiding voor TNO om een *shape sensing* algoritme te ontwikkelen op basis van gemeten rekken op geselecteerde plaatsen van het rotorblad. Het algoritme berekent de blad-torsie en -buiging in 2 richtingen (klap & zwaai). Het *shape sensing* algoritme gaat er vanuit dat de bladvorm (en dus ook vervorming) kan worden berekend uit een aantal mode shapes. De bijdrage van iedere modus tot de berekende buiging of vervorming wordt bepaald door een modale fit van de gemeten rekken.



*Figure 2. Het LM 56.9P2 rotorblad in de WMC test hal voor de eigenfrequentie test*

Het LM 56.9P2 blad is door TNO gebruikt om de eigenfrequenties van het blad vast te stellen, in samenwerking met de Deense firma Hottinger Brüel & Kjær. De eigenfrequenties van het blad zijn noodzakelijke inputgegevens voor het maken van torsie berekeningen met het door ontwikkelde *shape sensing* algoritme.

WMC heeft de testresultaten van het 56.9P2 blad verwerkt in de FOCUS6 bladtest module, waardoor bladtesten meer nauwkeurig kunnen worden ontworpen, en interpretatie van resultaten van torsie is verbeterd.

### *(3) Verbeterd ontwerp van een 14 MW rotorblad*

Vrijwel alle resultaten van het TRES4 14 MW bladontwerp zijn om commerciële redenen strikt vertrouwelijk. Voor een samenvatting van het belang van de resultaten van dit werkpakket wordt daarom verwezen naar hoofdstuk 3.

### *(4) TIADÉ torsie veldexperiment op het EWEF testveld, Wieringerwerf*

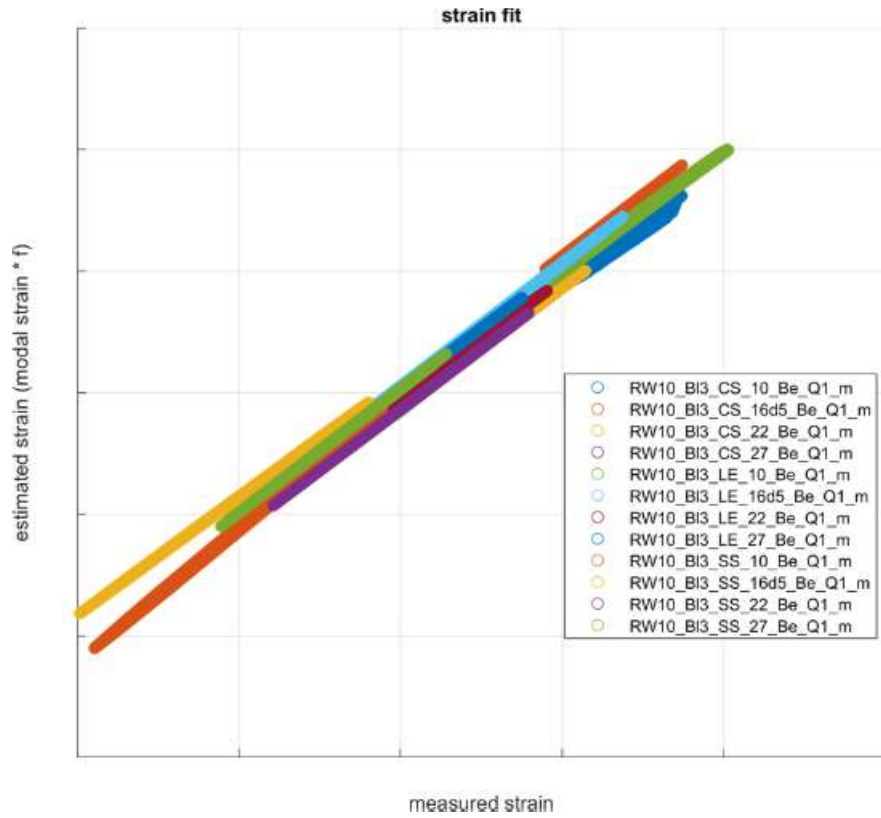
Omdat gebruik moest worden gemaakt van een bestaande windturbine (dus ook van reeds gesloten rotorbladen), was de bereikbaarheid in de rotorbladen voor het installeren van de reksensoren beperkt tot circa 27 m van de bladingang. Hierdoor was de plaatsing van de fiber-optische sensoren voor de dynamisch metingen van torsiegedrag tijdens het veldexperiment helaas niet optimaal. Basisgegevens van de TIADÉ turbine en instrumentatie zijn verzameld in onderstaande tabel.

Tabel: De TIADE windturbine met posities van de reksensoren voor dynamisch torsiemetingen

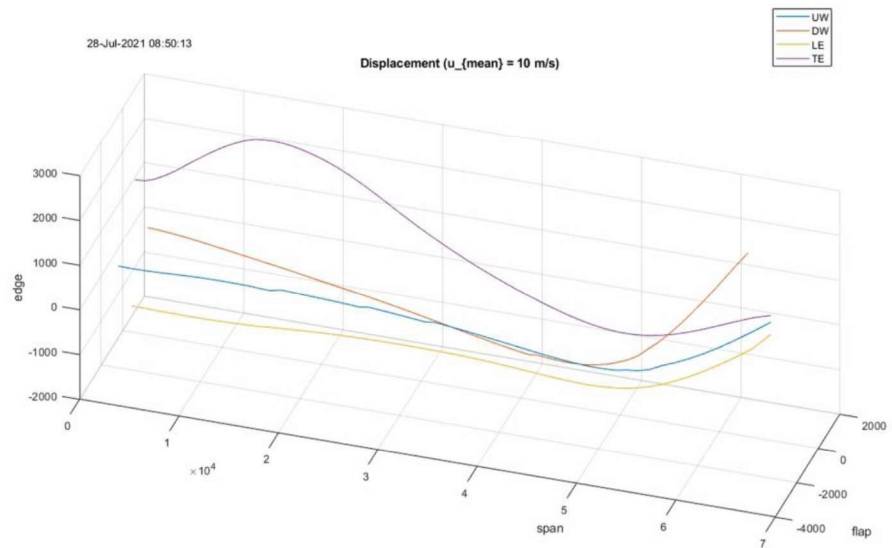
<b>Turbine fabrikant</b>	<b>GE onshore</b>
<b>Turbine nominaal vermogen</b>	3.8 MW
<b>Bladlengte</b>	63.7 m
<b>Rotor diameter</b>	130 m
<b>Radiale positie van de reksensoren</b>	10, 16.5, 22, 27 m
<b>Locatie van de fiber-optische reksensoren</b>	Leading edge Sparcap upwind Sparcap downwind

Alle meetresultaten zijn verzameld in de periode mei 2020 tot oktober 2021. Individuele 10-minute tijdseries zijn geselecteerd uit de database; voor ieder 10 minuten tijdsinterval werden de modale bijdragen van het rotorblad bepaald op basis waarvan de rek, buiging en torsie kan worden berekend. De modale karakteristieken van het blad werden van LM Wind Power verkregen vanuit het FEM bladmodel, en toegepast is het nieuwe *shape sensing* algoritme. Figuur 4 toont voor verschillende bladposities en de daar geplaatste fiber-optische reksensoren de zeer goede overeenkomst tussen berekende en gemeten rekken.

Figuur 5 toont de posities van de leading edge, trailing edge, upwind and downwind spar cap lines van het LM rotorblad. Een voorlopige, zeer voorzichtige conclusie van het TIADE torsie veldexperiment is dat shape sensing goed in staat is om de rekken tussen de meetposities te berekenen, maar dat het (nog) niet in staat is om de bladvervorming (en daardoor ook de torsie) met voldoende nauwkeurigheid te berekenen.



Figuur 4. Berekende (y-as) en gemeten (x-as) rekken voor verschillende fiberoptische reksensoren in de TIADE windturbine. De schaal van x- en y-as zijn identiek.



Figuur 5. Berekende rotorbladvorm (na vermenigvuldiging van de mode shapes met de modal bijdrage)



### 3 Bijdrage VaStBlades aan kostenverlaging van Wind Energie en versterking van de kennispositie

In essentie leiden de resultaten van VaStBlades tot lagere vermoeingsbelasting van lange, flexibele rotorbladen en toren. Dit is bereikt door implementatie van de buig/twist-koppeling van het rotorblad in de FRBEX ontwerptool, zoals door TRES4 werd gedemonstreerd bij het ontwerp van een 14 MW equivalent rotorblad voor een 2-blad windturbine.

De reductie in vermoeingsbelasting van rotorbladen en toren kan op verschillende manieren leiden tot lagere kosten van windenergie:

Via een slimmer bladontwerp waarbij minder materialen nodig zijn voor een even lang blad van de windturbine. Dit resulteert in verminderde materiaalkosten. De materiaalkosten van de rotor maken typisch 20% uit van de CAPEX kosten van de windturbine, dus het potentieel voor kostenreductie is hier aanzienlijk. VaStBlades resultaten maken het mogelijk om windturbines minder conservatief te ontwerpen. Voor het 14 MW rotorblad is op basis van de blad ontwerptool een grove indicatie verkregen voor de reductie in materiaalverbruik. Het gewicht van het blad kan met 5% worden gereduceerd door introductie van de buig/twist koppeling. Afhankelijk van de aard van materialen die dan worden toegepast in de productie van het rotorblad (carbon fiber) resulteert dit in een kostenverlaging van ongeveer 10%. Door de lagere vermoeingsbelasting op de turbinetoren kan volgens berekeningen ongeveer 3% bespaard worden aan materiaalkosten.

Meer accurate kennis over de vermoeingsbelasting van rotorbladen, en de invloed hiervan op de toren, kan ook worden gebruikt om de windturbine onder meer extreme windcondities in te zetten. In VaStBlades heeft TRES4 een grove schatting gemaakt van de verruiming van de windklasse waarin de turbine stroom kan produceren. Dit effect lijkt vooral te worden bepaald door de toren, en de verruiming van toegestane windcondities blijkt in de orde grootte van een halve windklasse te zijn. Dit resulteert in een 5% hogere stroomopbrengst over de levensduur van de windturbine.

Door de aard van materiaal waarop rotorbladen worden gemaakt (voornamelijk composiet) zal een kleine verbetering (verlaging) van de vermoeingsbelasting snel resulteren in een sterke verlenging van de levensduur. Dit kan ook in retrospectief op bestaande turbines worden toegepast. Hierdoor zal de elektrische opbrengst van de turbine over zijn levensduur kunnen worden verhoogd, wat ook resulteert in lagere opwekkingskosten. Als indicatie werd een verhoogde levensduur van de rotorbladen van 15% berekend, wat resulteert in een 15% hogere stroomopbrengst gedurende de levensduur van de windturbine (en dus ook in minder afval).

## 4 Spin-off mogelijkheden

De resultaten van VaStBlades zijn zeer specifiek ontwikkeld voor de toepassing bij de ontwikkeling van nieuwe generatie windturbines. Directe spin-off buiten dit werkgebied valt daarom niet eenvoudig te verwachten. Voor de langere termijn kunnen we ons voorstellen dat de verbeterde tools (FRBEX) en nieuwe kennis ook in andere sectoren waar torsiegedrag een rol speelt (rotorbladen van helikopters, ventilatoren, aandrijfschroeven van zeeschepen) zullen worden toegepast. Ook het *shape sensing* algoritme op basis van gemeten rekken kan in andere vakgebieden zijn toepassing vinden.

## 5 Publicaties

Er zijn tijdens de looptijd van het VaStBlades project geen publicaties verschenen. De voortgang op gebied van rotorblad *shape sensing* is gerapporteerd tijdens de internationale jaarbijeenkomst van EERA JP WIND & SET Wind (K. Hermans, *Blade shape sensing and the joint use of multiple measurement facilities*, 16 september 2020). Daarnaast zullen de behaalde resultaten worden gepresenteerd in de EERA DeepWind conferentie 19-21 januari 2022.

## 6 Verkrijgbaarheid rapporten

Het VaStBlades project heeft naast dit rapport geen andere openbare rapporten opgeleverd. In de nabije toekomst zullen resultaten van het project op diverse internationale conferenties worden gepresenteerd, waaronder EERA DeepWind (19-21 Januari 2022). Voor overige informatie, zie hoofdstuk 7 (contactpersoon).

## 7 Contactpersoon

De contactpersoon voor VaStBlades is Ir. K. Hermans, [koen.hermans@tno.nl](mailto:koen.hermans@tno.nl), 088-8663147

## 8 Verantwoording

Het VaStBlades project is uitgevoerd in kader van TKI-WoZ programma onder nummer TEWZ 116042 met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.