

**RESULTATEN VAN HET TKI-WOZ LOADWATCH; EEN NIEUWE WERKWIJZE
VOOR DE BEPALING VAN MECHANISCHE BELASTINGEN OP WINDTURBINES**

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
Postbus 15
1755 ZG Petten

www.tno.nl

T +31 88 866 50 65

TNO-rapport

TNO 2019 R11657

**Resultaten van het TKI-WoZ
onderzoeksproject LoadWatch; een nieuwe
werkwijze voor de bepaling van mechanische
belastingen op windturbines**

Datum	30 oktober 2019
Auteur(s)	A.C. Veltkamp
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	14 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	
Projectnaam	
Projectnummer	

Alle rechten voorbehouden.

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.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2019 TNO

Inhoudsopgave

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

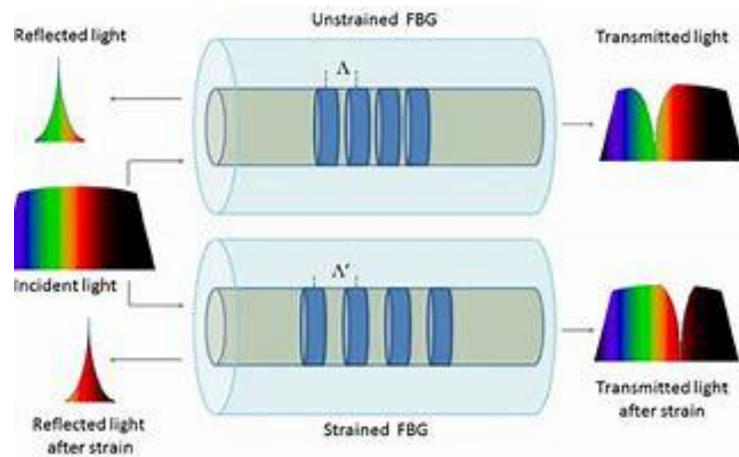
1 Doelstellingen en partners LoadWatch

De doelstelling van het LoadWatch project is het uitontwikkelen en demonstreren van een innovatieve, competitieve sensortechnologie voor het langdurig nauwkeurig meten van mechanische belastingen op rotorbladen van windturbines. Naast noodzakelijk voor certificeringsdoeleinden van de windturbine zijn belasting metingen van belang voor de monitoring van de resterende levensduur van de rotorbladen en voor de uitvoering van momentane regeling van de optimale stand van individuele rotorbladen als reactie op snelle variaties van het inkomend windveld, de zogenaamde *Individual Pitch Control* (IPC). Met behulp van IPC wordt het opgewekte elektrisch vermogen van de turbine continu geoptimaliseerd terwijl de belastingen op de rotorbladen en de turbine zo klein mogelijk worden gehouden. Naar verwachting zullen nauwkeurige rekmetingen ook een grote rol gaan spelen in de bepaling en beheersing van de vervorming (zoals torsie) van zeer grote en flexibele rotorbladen onder aerodynamische condities.

Hoewel de kennis van de LoadWatch sensortechnologie specifiek voor composiet-gebaseerde rotorbladen wordt ontwikkeld, kan de sensor ook relatief eenvoudig op andere componenten van de windturbine worden toegepast voor het bepalen van mechanische belastingen, zoals in de toren¹ en in de fundaties. In het LoadWatch project is de focus gelegd op belastingen op de windturbinebladen.

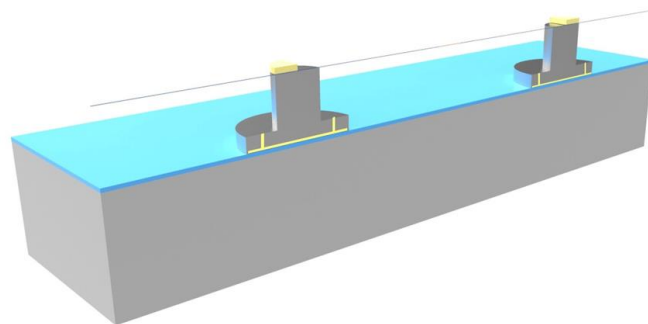
De LoadWatch sensor is gebaseerd op de toepassing van *Fiber-Bragg Grating* (FBG) optische sensing technologie. Het werkingsprincipe van een FBG in een optische fiber voor het bepalen van compressie/rek is in figuur 1 schematisch weergegeven. Belasting bepalen op basis van FBG technologie is gelegen in het meten van een (zeer kleine) golflengte verschuiving van een gereflecteerde lichtpuls als gevolg van een compressie of uitrekken van de FBG-fiber die op het testspecimen is bevestigd. De mate van compressie/rek van het testspecimen (de mechanische belasting op het test specimen) bepaalt de mate van compressie/rek van de FBG-fiber. De grootte van de golflengte verschuiving tussen de inkomende en de gereflecteerde lichtpuls is hierbij lineair afhankelijk van compressie/rek van de FBG-fiber. Als lichtbron kan een laser of SLED worden toegepast. Een interrogator verzorgt de nauwkeurige analyse van de golflengteverschuiving van het uitgezonden en het gereflecteerde licht. De FBG in een optische fiber is daarmee ook gevoelig voor fluctuaties in vibratie, temperatuur en luchtvochtigheid. In het LoadWatch project is daarom veel aandacht gegeven aan reductie en correctie voor deze kruisgevoeligheden, via technische innovaties en via data-analyse software.

¹ Zie voor een overzicht van vereiste belastingmetingen aan windturbines ten behoeve van certificering, de internationale norm IEC 61400_13 (2015) (Engelse titel).



Figuur 1. Werkingsprincipe van een Fiber-Bragg Grating optische fiber, de verschuiving van de golflengte van het gereflecteerd licht ten gevolge van rek (of compressie) van de fiber.

Het werkingsprincipe van de gepatenteerde LoadWatch sensor is in Figuur 2 weergegeven. Het is gebaseerd op de bevestiging van 2 permanente studs (nauwkeurig gezeekerde ankerpunten) op het test specimen waartussen het meetgevoelige deel van de LoadWatch sensor (met FBG-fiber en optische connectoren) wordt geklikt. Een LoadWatch sensor heeft 2 opgespannen FBG-fibers, een voor de meting van compressie/rek en een voor de meting van temperatuur. Op deze wijze wordt continu gecorrigeerd voor temperatuurgevoeligheid van de FBG-fiber.



Figuur 2. Schematische weergave LoadWatch FBG-sensor voor belasting metingen: 2 studs bevestigd op het oppervlak van het rotorblad met daartussen de FBG-rekfiber (de FBG-temperatuursensor is niet getoond).

In het LoadWatch project is een interrogator doorontwikkeld op basis van SLED-lichtbron die zeer compact is, geschikt voor een strenge windturbine omgeving en potentieel veel goedkoper zal zijn dan bestaande interrogators. De LoadWatch partners waren:

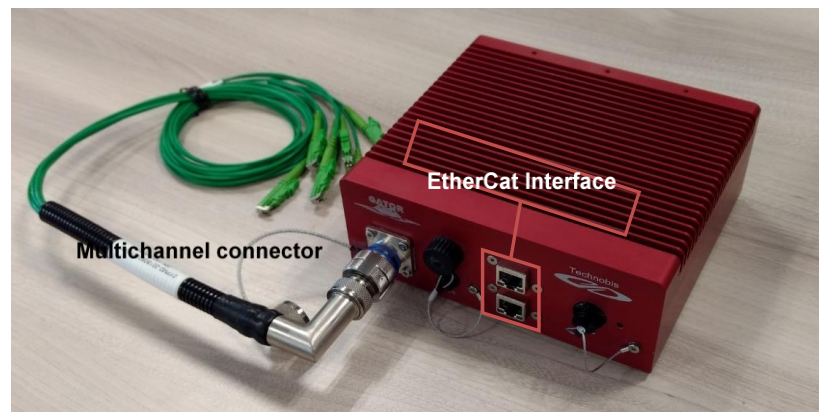
- Energy research Centre of the Netherlands (ECN), sinds 1 april 2018 overgegaan in ECN part of TNO (penvoerder, patent houder LoadWatch sensor, ontwikkeling en demonstratie Loadwatch sensortechnologie);
- Technobis Fibre Technologies (ontwikkeling & commercialisatie interrogator technologie);
- Voestalpine SIGNALING Siershahn GmbH (doorontwikkeling & commercialisatie Loadwatch sensor);
- Railstress Consultancy B.V.; (vermarkting van de technologie in wind- en andere sectoren)

- Adwen Offshore S.L. (sensor/interrogator specificaties & demonstratie in de 5 MW-windturbine op Tenerife. Adwen moest zich kort na start van het project terugtrekken in verband met overname door Siemens GmbH).

VanderHoekPhotonics is gecontracteerd voor advies werkzaamheden op gebied van optische fibers.

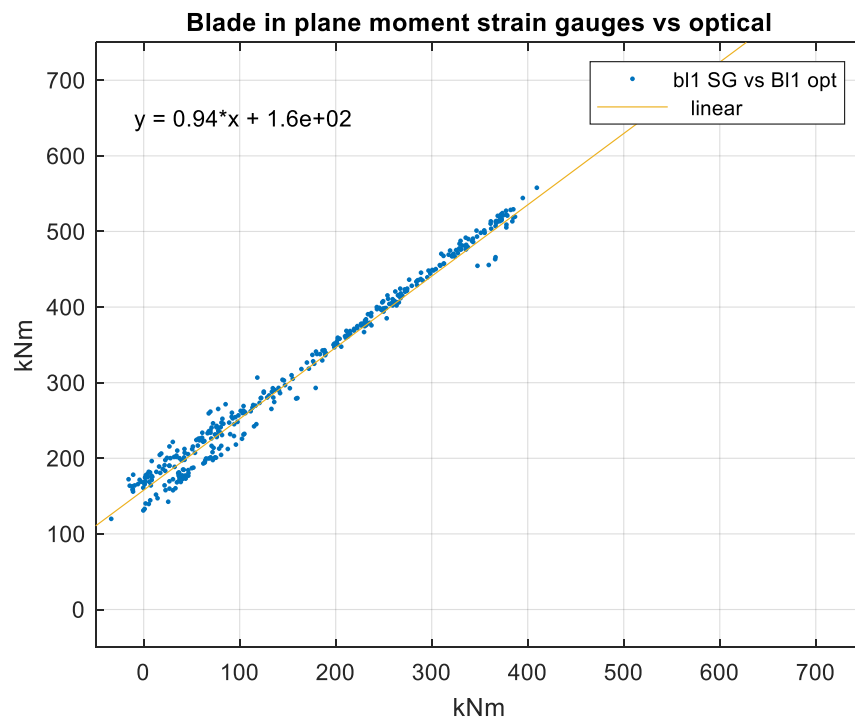
2 Resultaten en toepassingen

Op basis van de vereiste specificaties, aangeleverd door wind turbine fabrikant Adwen voor de sensortoepassing in offshore windturbines, werden de FBG-gebaseerde sensor en de interrogator doorontwikkeld en in vele iteratieve laboratoriumtesten beproefd (waaronder klimaatkamers). De interrogator werd succesvol doorontwikkeld tot de SwitchedRefGator volgens de kritische (offshore) specificaties van Adwen (Figuur 3). Daarnaast werden de maakbaarheid (kosten) van de sensor *body* en de temperatuurgevoeligheid van de FBG sensoren in de optische fiber significant verbeterd t.o.v. eerdere prototypes. De laatste versies van de LoadWatch sensor werden uiteindelijk toegepast in langdurende (2-3 maanden) veldcampagnes op de ECN Wind Turbine-testlocatie te Wieringerwerf. Voor de veldcampagnes werd gebruik gemaakt van de ECN 2.5 MW R&D turbine en de 5 MW Darwind XEMC XD-115 turbine.



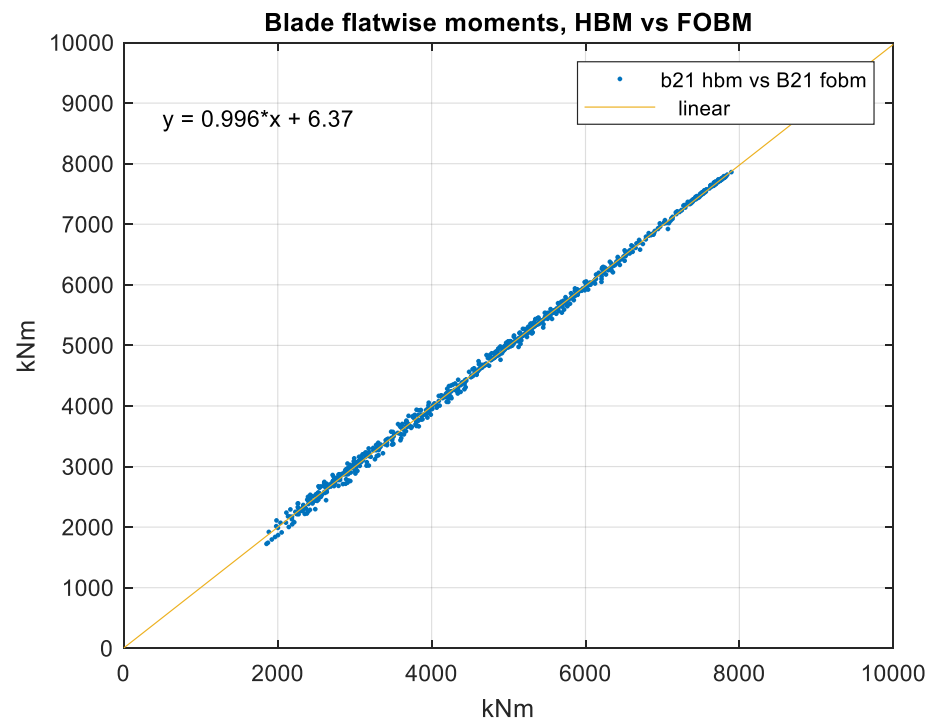
Figuur 3. SwitchedRefGator, ontwikkeld in het LoadWatch project (Technobis).

De prestaties van de LoadWatch sensor werden in de veldcampagnes vergeleken met de traditionele methode voor belasting metingen, namelijk koperen rekstroken ("Cu-rekstroken"). In de Darwind turbine werd daarnaast ook een vergelijk gemaakt met een meer recent ontwikkelde methode voor belasting metingen, namelijk de commercieel verkrijgbare FBG-type pads. Anders dan de LoadWatch sensor, die door middel van 2 studs aan het testoppervlak wordt bevestigd, worden Cu-rekstroken en de fiber pads volledig aan het testoppervlak verlijmd. Zoals verderop in dit rapport zal blijken heeft deze verlijming een negatieve invloed op de nauwkeurigheid van de rek/compressie metingen. Alle sensoren werden geïnstalleerd in de bladwortels: het zware gedeelte van het blad waarmee dit wordt gebout aan de "spinner" die de rotor verbindt met de hoofdas van de wind turbine.



Figuur 4. Vergelijking van in-plane moment tussen Cu-rekstrook (verticale as) en LoadWatch FBG-sensor (horizontale as). Gebruik werd gemaakt van rotorblad no. 1 van de ECN 2.5 MW R&D turbine, EWTW, Wieringerwerf, (14 maart – 1 juni 2018).

Figuur 4 geeft het vergelijk tussen de LoadWatch sensor met Cu-rekstroken gedurende de ECN 2.5 MW R&D turbine meetcampagne voor bepaling van de *blade-in-plane* moment. De relatie is zeer bevredigend, wat ook is bevestigd in de vele andere veldmetingen. Figuur 5 geeft het vergelijk tussen de LoadWatch sensor en de commercieel verkrijgbare fiber-pad, in dit geval voor de gemeten *flat-wise* momenten van de Darwind rotorbladen. Ook in dit geval is een goede correlatie tussen beide sensoren te vast te stellen.



Figuur 5. Vergelijking van flat-wise moment tussen FBG-fiber pad (verticale as) en LoadWatch FBG-sensor (horizontale as). Gebruik werd gemaakt van rotorblad no. 2 van de Darwind XEMC XD-115 turbine, EWTW, Wieringerwerf, (18 december 2018 – 1 juli 2019).

Naast het experimentele vergelyk in veldcampagnes werden 3 sensortypes ook theoretisch vergeleken op basis van *Finite Element Analyse* (FEA). Onderzocht werd de invloed van lijm- en andere elastische lagen die worden toegepast in direct verlijmd FBG-fibers en fiber-pads. Uit de FEA-berekeningen blijkt dat de afwijking die in de rekmeting wordt geïntroduceerd door (overigens perfect veronderstelde) elastische lagen minimaal 1% bedraagt. De berekende afwijking van de LoadWatch sensor is maximaal 0.1%, dat wil zeggen een factor 10x beter dan de fiber-pad. Uiteraard spelen in de praktische toepassing ook andere onzekerheden een rol, zoals bij de vertaling van gemeten rekken naar momenten. Dit zal de hoge nauwkeurigheid van de LoadWatch sensor ten dele maskeren.

In vergelijking met alternatieve methoden voor bepaling van mechanische belastingen heeft de LoadWatch sensor de volgende voordelen:

- hogere nauwkeurigheid (op basis van vergelijkende FEA-analyses);
- gemakkelijk te installeren;
- uitwisselbare FBG-sensor body, dit betekent ook dat de LoadWatch sensor relatief goedkoop is omdat hij op meervoudig kan worden toegepast op allerlei locaties waar studs (blijvend) zijn bevestigd;
- door gebruik van de studs wordt de sensor toepasbaar op oneffen oppervlaktes en op inhomogeen belaste oppervlaktes;
- ongevoelig voor elektrische beïnvloeding (EMC). Dit betekent o.a. dat de LoadWatch sensor kan worden toegepast op locaties die gevoelig zijn voor blikseminslag, zoals in de uiteinden van (carbon-houdende) rotorbladen van (grote) windturbines.

3 Bijdrage LoadWatch aan kostenverlaging van Wind Energie en versterking van de kennispositie

Schaalvergroting is de meest belangrijke factor in kostenverlaging van offshore wind. Om deze schaalvergroting te faciliteren zijn continu nieuwe meetmethoden noodzakelijk. Zo is het voor de certificering van grote windturbines inmiddels vereist om de belastingen van de rotorbladen tijdens het in bedrijf zijn ook op *mid-span* locaties van de bladen te meten. Vanwege de grote lengte van de nieuwe generatie rotorbladen, kunnen deze *mid-span* belastingen niet meer worden gemeten met de klassieke Cu-rekstroken vanwege verhoogde risico's voor blikseminslag en zijn nieuwe meetmethoden nodig die geen elektrische interferentie kennen. Dit is het geval bij fiber optische metingen. Dit maakt de LoadWatch sensor een *enabler* voor dergelijke essentiële metingen voor de zeer grote windturbines. Naast deze indirecte bijdrage van LoadWatch aan kostenverlaging van wind is de sensor, door zijn specifieke voordelen, beter en breder toepasbaar voor belasting metingen aan windturbines en andere constructie onderdelen. Door de berekende hoge nauwkeurigheid zal de LoadWatch sensor zich naar verwachting bewijzen in meer nauwkeurige (individual) pitch control en een meer betrouwbare afschatting van de totale belasting over de levensduur van de turbine componenten. Op grond van dit laatste is een meer efficiënte en effectieve *Operations & Maintenance* werkwijze te verwachten. Tenslotte zullen nauwkeurige rekmetingen een rol gaan spelen bij de monitoring van vervorming van zeer grote (flexibele) rotorbladen tijdens de operationele levensduur.

4 Spin-off mogelijkheden

Op basis van de specifieke voordelen van de LoadWatch sensor, zoals in paragraaf 2 is samengevat, zijn er buiten de wind industrie vele andere mogelijke toepassingen, zoals in infrastructuur, transport en weg- en waterbouw. Zo heeft partner Voestalpine de LoadWatch sensor succesvol getest voor onderzoek naar belasting door treinen op het spoor.



Figuur 6. Toepassing van een LoadWatch sensor bij het onderzoek naar de belasting van treinen op railverbindingen (Voestalpine).

5 Publicaties

Er zijn tijdens de looptijd van het project geen publicaties verschenen. De voortgang van LoadWatch is gepresenteerd op de WindEurope offshore Wind conferentie in Londen (2017). De FEA-studie naar het gedrag van de diverse belasting sensoren zal in 2020 als openbare publicatie verschijnen. Een abstract over dit onderwerp is ingezonden voor de Deepwind 2020 conferentie te Trondheim (Noorwegen).

6 Verkrijgbaarheid rapporten

Het LoadWatch project heeft vertrouwelijke rapportages opgeleverd, waaronder het Adwen specificatie rapport, testrapporten voor de LoadWatch sensor en de Technobis interrogator, instrumentatierapporten voor de ECN 2.5 MW R&D turbine en de Darwind XEMC-XD-115 windturbine, maandrapportages en 2 gedetailleerde finding rapportages van de veldcampagnes van de 2 genoemde windturbines. Daarnaast ontwerptekeningen voor de sensor en de industrial interrogator (Gator) en een QA-document voor de fabricage van de sensor.

7 Contactpersoon

De contactpersoon voor LoadWatch is Dr. A.C. Veltkamp, ton.veltkamp@tno.nl, +31 6 224 68 497.

8 Verantwoording

Het LoadWatch project is uitgevoerd in kader van TKI-WoZ programma onder nummer TEHE115081, met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.