

UNIVERSITEIT TWENTE.



## WIND TURBINE MAINTENANCE AND OPERATION DECISION SUPPORT (WIMOS)

Openbaar eindrapport

29 maart 2019



# INHOUD

<b>1</b>	<b>ACHTERGROND EN DOELSTELIING</b>	<b>3</b>
1.1	Achtergrond	3
1.2	Samenstelling consortium	3
1.3	Subsidieregeling	3
1.4	Doelstelling	3
<b>2</b>	<b>RESULTATEN</b>	<b>5</b>
2.1	Voorspellingsmodellen	5
2.2	Gebruik SCADA data	7
2.3	Decision support tools	8
2.4	Toepassing en validatie	9
<b>3</b>	<b>IMPACT</b>	<b>11</b>
3.1	Bijdrage aan programma duurzame energie	11
3.2	Spin offs	11
<b>4</b>	<b>PUBLICATIES EN VERDERE INFO</b>	<b>12</b>
4.1	Publicaties	12
4.2	Verdere info	12
<b>5</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>14</b>

# 1 ACHTERGROND EN DOELSTELLING

## 1.1 Achtergrond

Een consortium bestaande uit Independent Experts (IX Wind), Joulz en de Universiteit Twente (UT) heeft in 2015 het projectvoorstel “Wind Turbine Maintenance and Operation Decision Support” (WiMOS) ingediend voor het TKI Wind op Zee Onderzoeksprogramma. Dit voorstel is beoordeeld, en vervolgens gehonoreerd in juli 2015. Het project is nu afgerond en dit rapport presenteert de belangrijkste resultaten die zijn behaald.

## 1.2 Samenstelling consortium

Het consortium van WiMOS bestaat uit de volgende partijen:

- **Independent eXperts (IX Wind)**

*IX Wind is een consultancy & engineering bedrijf, dat haar klanten ondersteunt met expertise in alle fasen van de wind power plant levenscyclus: ontwikkeling, bouw en exploitatie, zowel on- als offshore. IX heeft meer dan 14 jaar expertise op het gebied van wind energie investeringen en technologie.*

*Website: [www.ixwind.com](http://www.ixwind.com).*

- **Joulz Energy Solutions (JES)**

*JES is dé hoogwaardige specialist op het gebied van het verduurzamen van elektriciteitsnetten en –stations. Ze ontwerpen, realiseren, beheren, onderhouden en voegen intelligentie aan het net toe. Om dit te kunnen, hebben ze een totaalpakket aan producten en diensten op het gebied van en in de aangrenzende gebieden van complexe midden- en hoogspanning. Joulz Energy Solutions is een dochterbedrijf van Visser & Smit Hanab, onderdeel van de Koninklijke VolkerWessels Groep.*

*Website: [www.jes.nl](http://www.jes.nl)*

- **Universiteit Twente (UT)**

*De UT is een ondernemende universiteit in Enschede. Maintenance is een van de speerpunten in het onderwijs en onderzoek, m.n. binnen de faculteit Engineering Technology. De onderzoeksgroep Dynamics based Maintenance richt haar onderzoek op het voorspellen van storingen in systemen, zowel door het monitoren van de juiste parameters als door ontwikkeling van modellen die het fysisch faalgedrag beschrijven.*

*Website: [www.utwente.nl/en/et/ms3/research-chairs/dbm](http://www.utwente.nl/en/et/ms3/research-chairs/dbm).*

In het WiMOS project heeft de UT het onderzoek uitgevoerd, en hebben IX en Joulz de link gelegd met de praktijk, o.a. door implementatie van de ontwikkelde kennis in eigen software tools.

## 1.3 Subsidieregeling

Dit project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

## 1.4 Doelstelling

Een van de grootste uitdagingen in offshore windenergie is het verlagen van de kosten. Voor offshore windturbines (WT) is een groot deel van de levenscycluskosten gerelateerd aan *operation and maintenance*. Om deze kosten te kunnen verlagen is het voldoende ver van tevoren kunnen voorspellen van storingen erg belangrijk. Dat maakt namelijk het efficiënt inplannen van onderhoud gebaseerd op de conditie mogelijk (*Condition Based Maintenance*), en voorkomt tegelijkertijd ongeplande stilstand. Het voorspellen van WT storingen staat echter nog redelijk in de kinderschoenen, ondanks het feit dat er de afgelopen jaren al veel effort in is gestoken.

De primaire **doelstelling** van WiMOS is daarom ***het reduceren van de O&M kosten van offshore windparken door het ontwikkelen van decision support tools en methoden (beslissingsondersteunende software) die optimalisatie van de onderhoudsstrategie mogelijk maken.***

Dit wordt bereikt door enerzijds een betere voorspelling van storingen, gebaseerd op fysische modellen in plaats van of in combinatie met *data analytics*. Anderzijds door variaties in kostenfactoren zoals tarieven van schepen, personeel, reservedelen en stilstand mee te nemen, zowel voor de korte als lange termijn. Door het integreren van deze aspecten in één *decision support tool* kunnen strategische, tactische en operationele beslissingen met betrekking tot het onderhoud van een windpark worden geoptimaliseerd. Dit zal resulteren in een aanzienlijke reductie in de *Levelised Costs of Energy (LCoE)*, oftewel kosten per productie-eenheid energie, van een windpark.

## 2 RESULTATEN

De onderzoeksactiviteiten in WiMOS hebben zich gericht op een viertal aspecten:

- Ontwikkeling van modellen voor het voorspellen van storingen in diverse componenten van de aandrijflijn (lagers, tandwielkasten, koppelingen), die gezamenlijk het functioneren van de gehele WTG bepalen (*bottom-up* aanpak);
- Het gebruik van SCADA data voor het voorspellen van storingen / niet-functioneren van een windturbine (*top-down* aanpak);
- Het ontwikkelen van software tools waarmee, o.a. door bovenstaande modellen en methoden te integreren, het onderhoud aan windparken optimaal kan worden gepland;
- Testen en valideren van bovenstaande activiteiten op een echte windturbine;

Voor elk van deze activiteiten zullen de resultaten kort worden gepresenteerd. Details kunnen worden gevonden in andere publicaties en rapporten (zie H4).

### 2.1 Voorspellingsmodellen

Voordat de ontwikkeling van voorspellingsmodellen kan starten, moet worden vastgesteld welke subsystemen of onderdelen kritiek zijn voor het functioneren van de gehele windturbine. Op basis van een literatuurstudie blijkt daar binnen de sector geen consensus over te zijn, maar na verdere analyse van de belastingen (en variaties daarin) is besloten om de focus in WiMOS op de power train te leggen. Dit betekent dat de gehele keten van rotor via shafts, gearbox en koppeling naar generator, frequency converter en transformator als kritiek wordt beschouwd. In de figuren 1 en 2 hieronder wordt getoond hoe deze subsystemen en componenten elkaar beïnvloeden, zowel op mechanisch als elektrisch vlak, en hoe ze daarmee effect hebben op elkaars levensduur.

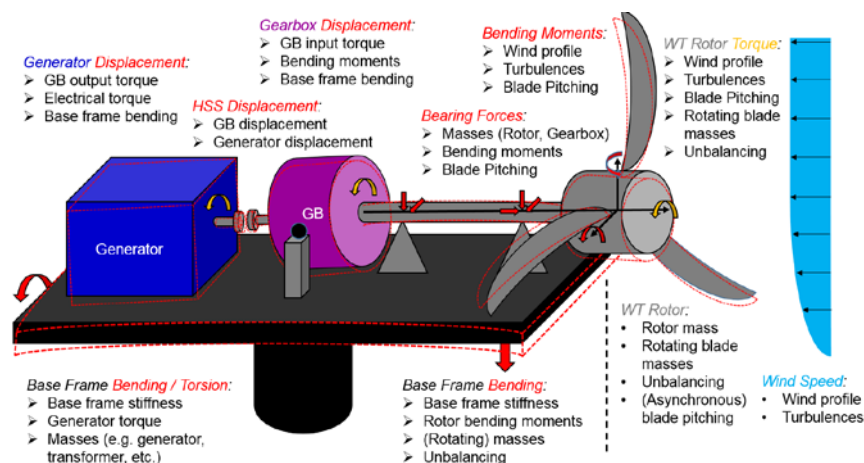


FIGURE 1: OVERZICHT VAN DE BELASTINGEN IN MECHANISCHE SUBSYSTEMEN VAN EEN WT DRIVE TRAIN.

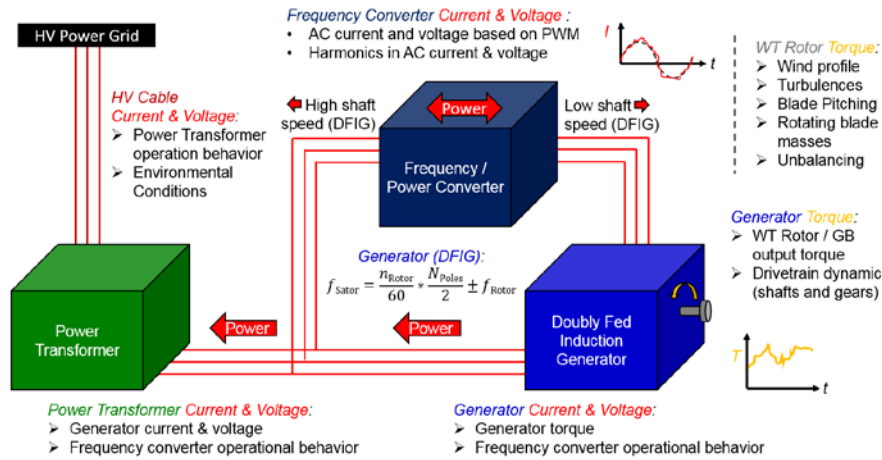


FIGURE 2: BELASTINGEN IN ELECTRISCHE SUBSYSTEMEN VAN EEN WT DRIVE TRAIN.

Om de variaties in belastingen tijdens gebruik te kunnen berekenen zijn modellen ontwikkeld voor diverse componenten. Eén daarvan zal hier worden uitgelicht, het rotor model, omdat het illustratief is voor de aanpak. De overige modellen zijn nog in ontwikkeling, maar zullen op korte termijn worden afgerond en gepubliceerd.

**Wind turbine rotor model [1]:** gebaseerd op een simpele methode uit de literatuur voor het berekenen van belastingen (spanningen, krachten) in een rotor blad, zijn de belastingen op drie verschillende plekken (bladwortel, rotor hub (hoofdlager) en toren) berekend voor verschillende scenario's (bijv. turbulentie, pitch misalignment, etc.), zie Figure 3. Voor het hoofdlager is ook de levensduur berekend voor deze scenario's (Figure 4), gebruik makend van een levensduurmodel uit de ISO standaard. Deze uitkomsten tonen aan dat slechts kleine variaties in operationele condities kunnen leiden tot grote reducties (tot wel 20%) in levensduur. De in WiMOS ontwikkelde modellen kunnen deze reducties kwantificeren.

Scenario	Surface roughness	Yaw angle $\epsilon$	Pitch angle $\beta$	Tilt / cone angle $\gamma / \delta$	Turbulences
$h-10^\circ$	0.03	$0^\circ$	$0^\circ$	$6^\circ$	no
$y-3^\circ$	0.03	$-3^\circ$	$0^\circ$	$6^\circ$	no
$y+3^\circ$	0.03	$+3^\circ$	$0^\circ$	$6^\circ$	no
$p-1.5^\circ$	0.03	$0^\circ$	$-1.5^\circ$	$6^\circ$	no
$p+1.5^\circ$	0.03	$0^\circ$	$+1.5^\circ$	$6^\circ$	no
$turb. 5\%$	0.03	$0^\circ$	$0^\circ$	$6^\circ$	$\pm 2.5\%$

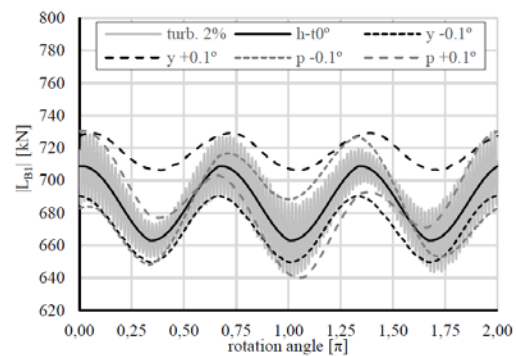


FIGURE 3: VERSCHILLENDE SCENARIO'S (LINKS) VOOR HET BEPALEN VAN DE HOOFDLAGER BELASTING (RECHTS).

Parameter setting	$L_{eq}$ at $v_{wind} = 8.5 m/s$	$L_{eq}$ at $v_{wind} = 12.0 m/s$	$(1/L_{eq})^3$ at $v_{wind} = 12m/s$	$\Delta$ life time [%]
$h-10^\circ$	1.000	1.000	1.000	0.00
$y-3.0^\circ$	1.027	1.082	0.790	-21.02
$y+3.0^\circ$	0.983	0.952	1.158	15.81
$p-1.5^\circ$	1.013	1.050	0.865	-13.52
$p+1.5^\circ$	0.989	0.975	1.079	7.93
$turb. 5\%$	1.001	1.003	0.0991	-0.94

FIGURE 4: BEREKENDE EQUIVALENTE LAGERBELASTING EN LEVENSDUUR VOOR VERSCHILLENDE SCENARIO'S BIJ WINDSNELHEID  $V_{WIND} = 12M/S$ .

Verder is voor het bepalen van de te meten grootheden in een afstudeerproject [2] een laboratoriumschaal testopstelling van een windturbine power train gebouwd, zie Figure 5.

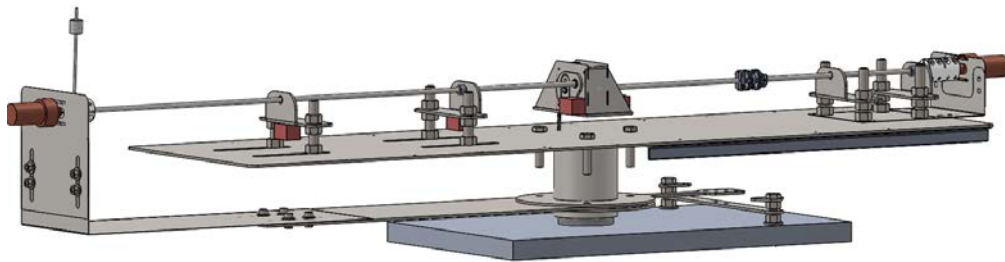


FIGURE 5: LAB SCHAAL TEST BENCH VOOR HET DEMONSTREREN VAN HET ONTWIKKELDE CONCEPT.

### *Samenvatting model-ontwikkeling*

Er is gewerkt aan de ontwikkeling van modellen voor een reeks aan power train componenten:

- Het model voor de belastingen gegenereerd door de **rotor** (met de aanname dat info over gebeurtenissen als pitch / yaw misalignment en turbulentie beschikbaar is) is volledig afgerond;
- Het model dat de **asbelastingen** relateert aan de **gemeten versnellingen**, bijv. uit het condition monitoring system (CMS) (zie testbench in Fig. 5) is compleet, maar moet nog worden gevalideerd en getuned;
- Modellen om de belastingen in de **connecting coupling** en **tandwielkast** te berekenen zullen binnenkort worden afgerond;
- Een beschrijving van de relatie tussen **grid stability** en power converters / generators is bijna gereed;
- Modellen voor het berekenen van de belastingen gegenereerd door de **generator**, **transformator** en **omvormer** zijn opgesteld, maar moeten nog worden geïmplementeerd;
- Levensduurmodellen zijn beschikbaar in de standaarden (ISO, DIN, IEC) voor een reeks aan componenten, zowel mechanisch als elektrisch. Ze kunnen vrij eenvoudig worden gekoppeld aan de modellen voor de belastingen zoals hiervoor beschreven.

## 2.2 Gebruik SCADA data

De top-down aanpak, waarbij niet per component een model wordt gemaakt, maar direct voor de gehele windturbine naar de functionaliteit wordt gekeken, is onderzocht in een afstudeerproject door Nikita Roepal [3]. Startend vanaf de functionele afhankelijkheden in een WTG is bekeken of SCADA data gebruikt kan worden om korte termijn voorspellingen voor storingen te doen. Dat is gedaan mbv de volgende stappen:

- De complete windturbine is beschreven volgens drie breakdowns:
  - Fysieke breakdown: welke onderdelen zijn er en hoe zijn ze fysiek gekoppeld ?
  - Functionele breakdown: wat is de functionele relatie tussen de onderdelen ?
  - Belastingpad: Hoe worden belastingen doorgegeven van de ene naar de andere component ?
- Op basis van deze drie representaties kunnen specifieke storingen worden verklaard, en kan worden vastgesteld met welke monitoring parameters (uit SCADA) ze mogelijk voorspeld kunnen worden;
- Voor een specifieke case study, nl. pitch en generator bearing failure in een windpark in Frankrijk, is de methode gevalideerd;

De functionele en belastingrepresentaties voor een generieke windturbine staan in Figuur 6 en 7 hieronder.

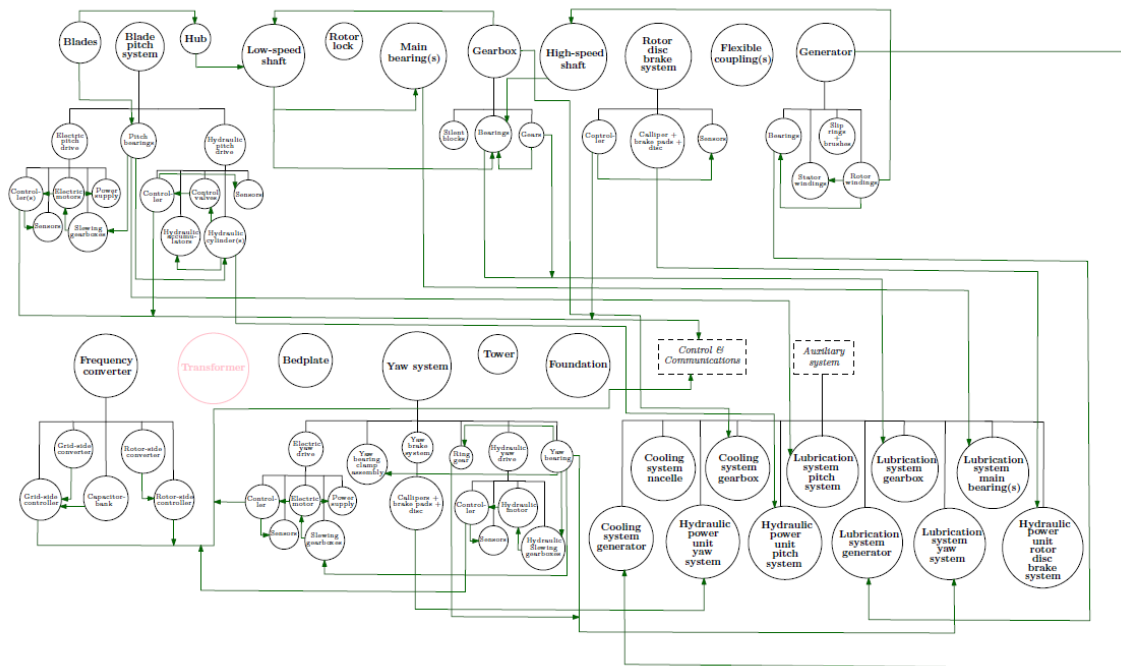


FIGURE 6: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE FUNCTIONELE AFHANKELIJKHEDEN IN EEN WINDTURBINE

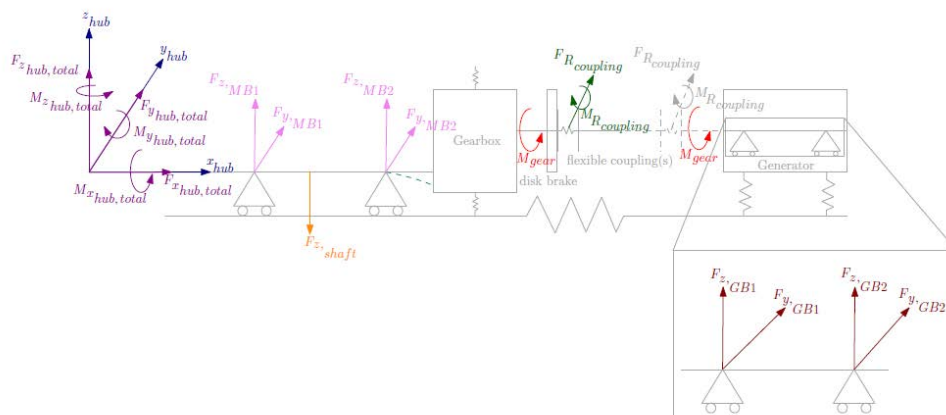


FIGURE 7: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET DOORGEVEN VAN DE BELASTINGEN VAN HUB NAAR GENERATOR BEARING.

### 2.3 Decision support tools

Het O&M simulatie model SOMOS is door IX Wind herontworpen om de tool flexibeler en sneller te maken, nieuwe modules te kunnen toevoegen en de software service beschikbaar te kunnen stellen aan derden.

Onder andere zijn relevante (failure modes van) componenten toegevoegd. Het grootste deel van de toegevoegde componenten bevindt zich in de module WTG (wind turbine generator), maar er zijn ook modules opgezet voor *offshore high voltage station* (OHVS), *inter-array cables* en *foundations*. Een reeks aan factoren die de kosten, logistiek en potentiële downtime van een windpark bepalen, is nu ook beschikbaar in het model en verdere uitbreidingen zijn in ontwikkeling.



Vervolgens is gewerkt aan het integreren van de hiervoor genoemde modules (en de bijbehorende faalmodi) in het model, met name de WTG en OHVS. In de oorspronkelijke architectuur van de software was dat niet mogelijk, dus er is besloten om naar meer robuuste softwarecode en interface. Deze overgang is ondertussen grotendeels afgerond en binnenkort zal SOMOS7 in gebruik worden genomen.

Daarnaast is aan de integratie van de Matlab code van het (hiervoor beschreven) rotormodel in SOMOS. Het volledig testen en valideren van de code met behulp van input (meetdata) vanuit een operationele windturbine is gepland voor 2019.

Tevens zijn extra randvoorwaarden aan het model toegevoegd die effect hebben op de onderhoudsactiviteiten, zowel qua kosten als qua planning (toegankelijkheid, beschikbaarheid). Onderstaande tabel geeft een overzicht van de geïmplementeerde randvoorwaarden.

Input parameter	Description
<b>Weather/metocean limitation</b>	
Wind speed	The wind speed is a limitation for the hoisting of spare parts and vessel capabilities.
Wave height	The wave height has an effect on the vessels capabilities to transport crew to the WTG
Crew shift	The crew shift is a limitation for the maintenance flexibility
Daylight	The daylight is a limitation on the time that is available for the crew to perform maintenance activities
Tide in O&M harbor/port	The tide in the harbor/port is a limitation for the vessels (draught/hull clearance)
Sea current at WTG	The current at the WTG will limit the accessibility of the boat landing for the vessel (angle and current speed)
<b>Vessel limitations</b>	
Crew transfer vessel (CTV)	Wind speed, wave height, tide in O&M harbor/port, sea current at WTG and number of CTVs and amount of PAX
Jack-up vessel /SEP	Mobilization time, wave height and wind speed (also for positioning)
Helicopter	Wind speed, amount of PAX

Met deze in WiMOS aangebrachte aanvullingen is de SOMOS7 software veel completer en flexibeler geworden en kunnen meer realistische simulaties worden uitgevoerd.

## 2.4 Toepassing en validatie

De laatste beoogde activiteit in het project was het toepassen van de ontwikkelde methoden in een echte windturbine om de aanpak te demonstreren en valideren. Daarbij zijn echter een aantal uitdagingen naar voren gekomen.

- De modelontwikkeling bleek nogal wat effort te kosten, waardoor slechts een beperkt aantal modellen volledig afgerond zijn. Dit betekent dat alleen het rotor model getest kon worden, maar veel andere subsystemen niet. Dit was overigens een voorzien risico van de gevolgde bottom-up aanpak;
- Het afleiden van een top-down model was succesvol, maar de beschikbare SCADA data bleek te beperkt om er korte termijn voorspellingen van storingen mee te doen. Ook dit was overigens als een risico voor de top-down aanpak voorzien;
- Omdat het aantal afgeronde modellen beperkt is, bleek de integratie met de IX software tools ook lastig. Daardoor is volledige demonstratie nog steeds een uitdaging;
- Toegang krijgen tot echte windturbine data is een uitdaging. Eigenaren van windturbines zijn over het algemeen terughoudend in het delen van data. Met name toegang krijgen tot een WT om additionele sensoren te plaatsen is lastig, omdat eigenaren hun productie niet in gevaar willen brengen (down-time voor installatie of door onverwachte gebeurtenissen);

Ondanks deze uitdagingen zijn er in WiMOS toch belangrijke stappen gezet in het demonstreren van de ontwikkelde modellen en tools:

- Een deel van de modellen en het concept van load monitoring is gevalideerd / gedemonstreerd aan de hand van een laboratoriumschaal test-bench (zie Figure 5 en [2]);
- Voor de functionele aanpak kon een historische data set van een geanonimiseerd windpark gebruikt worden, die beschikbaar kwam via IX;
- Een feasibility check voor de integratie van de modellen in de IX software is uitgevoerd voor het rotor model;
- IX heeft een windturbine eigenaar bereid gevonden om de installatie van additionele sensoren toe te staan en metingen uit te voeren voor een bepaalde periode. Dit maakt demonstratie van de WiMOS aanpak op een echte WT (Vestas V80) mogelijk. UT, IX and Joulz hebben een meetplan voor deze activiteit opgezet [4], zie Figure 8;

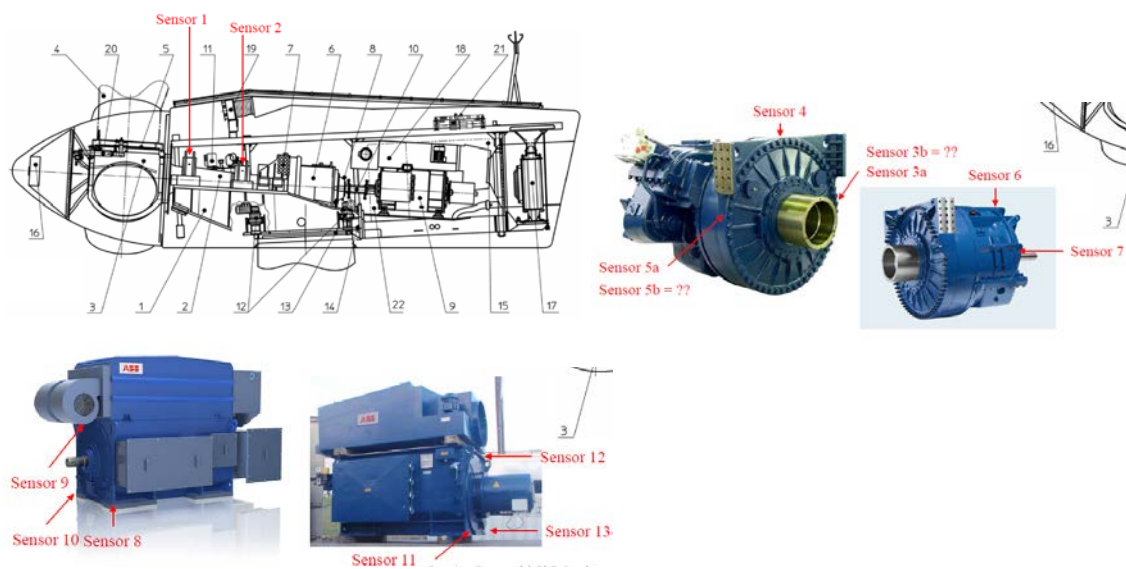


FIGURE 8: OVERZICHT VAN BENODIGDE SENSOREN + LOCATIES: HOOFDLAGER, GEARBOX EN GENERATOR

## 3 IMPACT

### 3.1 Bijdrage aan programma duurzame energie

Het WiMOS project heeft een belangrijke bijdrage geleverd aan de doelstellingen van de subsidieregeling, die beoogde de duurzame energiehuishouding in Nederland te verbeteren en de kennispositie van Nederland in deze sector te versterken.

Op het eerste vlak kunnen de ontwikkelde modellen en tools een grote rol gaan spelen in het verbeteren van (de planbaarheid) van onderhoud aan off-shore windparken en het voorkomen van ongeplande stilstand van windturbines. Beide aspecten zullen leiden tot een verlaging van de kostprijs van windenergie.

Op het vlak van de kennispositie van Nederland in off-shore wind heeft WiMOS ook een belangrijke bijdrage geleverd. Enerzijds zijn er op wetenschappelijk gebied een aantal nieuwe inzichten en methoden ontwikkeld. Een deel daarvan is reeds ter publicatie in de wetenschappelijke literatuur aangeboden, voor de rest zal dat in 2019 worden gedaan. Maar daarnaast is deze wetenschappelijk kennis ook direct opgepakt door de bij WiMOS betrokken bedrijven, waardoor zij er hun voordeel mee kunnen doen op commercieel vlak.

### 3.2 Spin offs

De resultaten die zijn behaald binnen WiMOS hebben ook spin off resultaten opgeleverd, zowel binnen als buiten de off-shore windsector.

Binnen de sector is de belangrijkste spin-off van de ontwikkelde modellen voor het voorspellen van storingen in componenten van de power train dat ze niet alleen toepasbaar zijn voor onderhoudsdoeleinden. Het verbeterde inzicht in optreden belastingen (en variaties) en het effect daarvan op de levensduur van componenten blijkt ook erg nuttig te zijn voor het ontwerpen van verbeterde componenten. Daarmee is een belangrijke spin-off dat de WiMOS tools niet alleen nuttig zijn voor de huidige generatie windturbines, maar wellicht nog meer impact zullen hebben op nog te ontwikkelen componenten en windturbines.

Daarnaast is er spin-off buiten de sector, doordat de ontwikkelde modellen generiek zijn. Dit betekent dat voor een reeks aan andere toepassingen waar aandrijflijnen worden gebruikt (bijv. maritiem / dieselmotoren, gasturbines, compressoren in energieopwekking, voortstuwing, procesindustrie) de modellen voor lagers, tandwielkasten, koppelingen, etc. ook kunnen worden toegepast. Daarmee kan ook in die sectoren het onderhoud worden verbeterd, maar kunnen de modellen ook worden ingezet om ontwerpen te verbeteren.

## 4 PUBLICATIES EN VERDERE INFO

### 4.1 Publicaties

De in dit project ontwikkelde kennis is voor een groot deel gepubliceerd in wetenschappelijke artikelen, afstudeerverslagen en in presentaties op congressen en symposia:

- **Wetenschappelijke publicaties**

(zie <https://www.utwente.nl/en/et/ms3/research-chairs/dbm/publications> voor actuele status)

- D. Rommel, D. Di Maio and T. Tinga, *Calculating Wind Turbine Component Loads for Improved Life Prediction*, Renewable Energy, pp. 1-22, 2018 (submitted)
  - D. Rommel, D. Di Maio and T. Tinga, *Stabilization of Renewable Energy Grids by Wind Turbine Generators*, 2019, working paper.
  - D. Rommel, R.P.J. van Dassel, D. Di Maio and T. Tinga, *Real Time Calculation of Wind Turbine Rotor Hub Loads*, 2019, working paper.
- **MSc theses** (beschikbaar via UT repository - [essay.utwente.nl](http://essay.utwente.nl)):
    - R. Van Dassel, *Experimental and structural load assessment in wind turbine drive trains*, MSc thesis, University of Twente, Enschede, 2019.
    - N. Roelpl, *A functional approach to evaluate wind turbine conditions in order to predict mid-term maintenance events*, MSc thesis, University of Twente, Enschede, 2019.
- **Presentaties op conferenties en symposia:**
    - Loendersloot, R., *WIMOS: Physics of Failure based Prediction Methods*, Wind Days, 6 June 2016, Rotterdam;
    - Kamphues, E.V., *Offshore Wind O&M*, Japan Wind Power Association, September 2017;
    - Rommel, D.P., *Predictive Maintenance in Wind Turbine Main Power Train based on Physical Models*, Maintenance Research Day, 8 March 2018, Utrecht;
    - Kamphues, E.V., *Offshore Wind O&M*, Asia-Pacific Wind Energy Expo, March 13, 2019;

### Andere PR activiteiten

- Website TKI Wind op Zee:  
<https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/wind-turbine-maintenance-operation-decision-support-00023446>
- Project flyer (zie ook de TKI WoZ website)

### 4.2 Verdere info

Voor meer info over het WIMOS project en de resultaten kunt u contact opnemen met de onderstaande personen.

#### **Projectleider en wetenschappelijke output**

Prof. dr. ir. T. Tinga  
Universiteit Twente  
[t.tinga@utwente.nl](mailto:t.tinga@utwente.nl)

UNIVERSITEIT TWENTE.

***Toepassing in off-shore wind***

Dhr. E.V. Kamphues M.Sc.  
IX Wind  
eric.kamphues@ixwind.com

of

Dhr. K. Kaplan  
Joulz Energy Solutions  
Kerem.Kaplan@jes.nl

## 5 REFERENCES

- [1] D. Rommel, D. Di Maio and T. Tinga, "Calculating Wind Turbine Component Loads for Improved Life Prediction," *Renewable Energy*, pp. 1-22, 2018 (submitted).
- [2] R. Van Dasselaar, "Experimental and structural load assessment in wind turbine drive trains," MSc thesis, University of Twente, Enschede, 2019.
- [3] N. Roeplal, "A functional approach to evaluate wind turbine conditions in order to predict mid-term maintenance events," MSc thesis, University of Twente, Enschede, 2019.
- [4] D. Rommel, "Field Test - Measurements," University of Twente, Enschede, 2018.