

TNO PUBLIC



TNO report

TNO 2020 R11931

Wind turbine control strategies to reduce wind  
turbine blade rain droplet erosion  
(WINDCORE) - Public summary -

Westerduinweg 3  
1755 LE Petten  
P.O. Box 15  
1755 ZG Petten  
The Netherlands

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

T +31 88 866 50 65

Date	28 December 2020
Author(s)	Harald van der Mijle Meijer, Marco Caboni, Novita Saraswati, Hans Verhoef, Henk Slot, Iratxe Gonzalez Aparicio - TNO Julie Teuwen, Amrit Verma - TU Delft Sandro di Noi - Suzlon Arne Junike - RWE Jasper Kreeft - Shell Chris Hendriks - GROW
Copy no	
No. of copies	
Number of pages	9 (incl. appendices)
Number of appendices	
Sponsor	RVO Hernieuwbare Energie Regeling (HER)
Project name	WINDCORE
Project number	TEHE118013

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced and/or published by print, photoprint, microfilm or any other means without the previous written consent of TNO.

In case this report was drafted on instructions, the rights and obligations of contracting parties are subject to either the General Terms and Conditions for commissions to TNO, or the relevant agreement concluded between the contracting parties. Submitting the report for inspection to parties who have a direct interest is permitted.

© 2020 TNO

TNO PUBLIC

# Contents

<b>1</b>	<b>Samenvatting</b> .....	<b>3</b>
1.1	Inleiding .....	3
1.2	Doelstelling .....	3
1.3	Conclusies .....	3
<b>2</b>	<b>Summary</b> .....	<b>5</b>
2.1	Introduction .....	5
2.2	Project objective .....	5
2.3	Conclusions .....	5
<b>3</b>	<b>List of publications</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Project data</b> .....	<b>9</b>

# 1 Samenvatting

## 1.1 Inleiding

WINDCORE staat voor "Wind turbine control strategies to reduce wind turbine blade rain droplet erosion". De afname van de energieopbrengst gedurende de gebruiksduur van windturbines wordt mede veroorzaakt door het optreden van schade aan de windturbinebladen als gevolg van druppelslagerosie. Dit schademechanisme aan het neusprofiel van een windturbineblad wordt leading edge erosion (LEE) genoemd en treedt op door een combinatie van hoge snelheid van de bladtip (tot 90 m/s) en inslag van neerslag in de vorm van regen en hagel op het kunststof composiet bladoppervlak. Verslechtering van de aerodynamische eigenschappen van het beschadigde bladprofiel en ongepland onderhoud (O&M) aan het blad resulteren in afname van de jaarlijkse energieproductie (AEP) en toename van de totale kosten van het windpark (LCoE).

Het WINDCORE-project is uitgevoerd met de partners Shell, RWE, Suzlon, TUD gecoördineerd door TNO en is gefinancierd door RVO, RVO Hernieuwbare Energie Regeling (HER) onder subsidieovereenkomst TEHE118013. Het GROW office heeft ondersteuning gegeven in disseminatie en communicatie.

## 1.2 Doelstelling

De doelstelling van het WINDCORE project is om de AEP en LCoE van de windturbine te optimaliseren door toepassing van een controle-strategie voor de windturbine gebaseerd op het aanpassen van de draaisnelheid van de windturbinerotor met relevante neerslagcondities ter voorkoming van LEE schade. Om dit doel te bereiken zijn correlaties ontwikkeld tussen:

- 1) gemonitorde weerdata met karakterisering van de neerslag,
- 2) voorspelling van het schadegedrag op materiaalniveau aan de hand van LEE modellen met validatie op laboratoriumschaal,
- 3) aerodynamisch gedrag van een beschadigd bladprofiel en
- 4) modellen voor planning en kostenanalyse van het onderhoud aan de bladen in een offshore windpark.

## 1.3 Conclusies

De belangrijkste conclusies van het project:

- 1) Toepassing van de windturbine controle-strategie voor het verminderen van LEE schade resulteert in een reductie van 1,38% O&M kosten en een jaarlijkse toename van 0,16% AEP wanneer de controlestrategie resulteert in 4-jaarlijkse kleine reparatiewerkzaamheden in plaats van een jaarlijkse reparatie. Dit resulteert in een verlaging van de LCoE met 0,57%.
- 2) Om de mate van erosieschade op korte termijn op laboratoriumschaal te evalueren is voor dit raamwerk het oppervlakte-vermoeiings-model van Springer voor homogeen materiaal toepasbaar.
- 3) Het voorgestelde erosiekader voor de lange termijn, voor het gebruikte coatingsysteem 3M W4600, blijkt de effecten van ruimtelijke en orografische kenmerken van de windturbinelocaties (op kustlocaties treedt erosie drie keer sneller op dan in het binnenland) en de specificatie van de windturbine (snellere

erosie voor windturbines met hogere tip-snelheden) goed te beschrijven voor de berekening van LEE. Verder blijkt de vereiste minimale lengte van het leading edge beschermingssysteem (LEP) het grootst te zijn voor turbines die op kustlocaties zijn geïnstalleerd en voor turbines met hogere vermogens.

- 4) Er is zeer beperkte informatie beschikbaar over neerslagkarakteristieken voor offshore locaties in Nederland (MetMast IJmuiden is gemonitord met een disdrometer, maar de verzamelde informatie is niet goed genoeg voor de toepassing van LEE modellen)
- 5) Druppelgrootte en intensiteitsverdeling hangen samen met variabiliteit van de seizoenen: kleinere druppels in herfst en winter (piek tussen 0,2 mm en 0,4 mm), terwijl grotere druppelgroottes in zomer en lente (piek tussen 0,2 mm en 0,6 mm). Een relevante parameter is het type neerslag: regen, sneeuw en hagel. Elk type wordt gekenmerkt door verschillende distributiepatronen. Dit is gebaseerd op de gegevens van de KNMI-disdrometer in het binnenland. De correlatie tussen deeltjesgrootte en diameter is sterk plaatsafhankelijk.

## 2 Summary

### 2.1 Introduction

WINDCORE stands for "Wind turbine control strategies to reduce erosion of wind turbine blades by raindrop erosion". Limitation of the energy production during the service life of wind turbines is partly caused by the occurrence of damage to the wind turbine blade (WTB), called leading-edge erosion (LEE), as a result of rain droplet impacting the blade surface. LEE happens due to combination of the high tip speeds (up to 90 m/s) and impact of precipitation in the form of rain and hail on the polymer composite blade surface. Disturbance of the aerodynamic characteristics of the damaged blade profile and unplanned blade maintenance result in reduction of the annual energy production (AEP) and the levelized cost of energy (LCoE) of the wind farm.

The WINDCORE project is carried out with partners Shell, RWE, Suzlon, TUD coordinated by TNO. The project is funded by RVO, RVO Hernieuwbare Energieregeling (HER) under subsidy agreement TEHE118013. The GROW office has provided support in dissemination and communication.

### 2.2 Project objective

The objective is to optimize the AEP and LCoE of the wind turbine by reducing LEE damage by applying strategies for controlling the rotational speed of the wind turbine with relevant precipitation conditions. To achieve this goal, correlations were developed between

- 1) monitored weather data with precipitation characterization,
- 2) prediction of damage behaviour at material level using LEE models with laboratory scale validation,
- 3) aerodynamic behaviour of a damaged blade profile and
- 4) models for planning and cost analysis of blade maintenance within an offshore wind farm.

### 2.3 Conclusions

The main conclusions of the project:

- 1) Application of the control strategy for mitigating LEE results in 1.38% O&M costs reduction and a 0.16% annual energy yield increase due to the control strategy resulting in 4-yearly minor repair instead of annual repair. This improvement translates to a 0.57% LCoE improvement.
- 2) For this framework, Springer's surface fatigue model for homogeneous material is applicable to evaluate the extent of erosion damage in the short term on a laboratory scale.
- 3) The proposed long-term erosion framework for the LEP coating under investigation, 3M W4600, is found to efficiently capture the effects of spatial and orographic features of the wind turbine sites (coastal sites erodes three times faster than inland sites) and wind turbine specifications (faster erosion for wind turbines with higher tip speeds) on LEE calculations. Further, LEP application length requirements are found to be the highest for turbines installed at coastal sites as well as for turbines with higher power ratings.

- 4) There is very limited information available on precipitation characteristics for offshore locations in the Netherlands (Met Mast IJmuiden contains disdrometer measurements the quality of which, unfortunately, is insufficient for LEE)
- 5) Droplet size and intensity distribution is correlated with seasonal variability: smaller drops in fall and winter (peak between 0.2 mm and 0.4 mm) while larger droplet sizes in summer and spring (peak between 0.2 mm and 0.6 mm). Relevant parameter is the type of precipitation: rain, snow and hail. Each precipitation type is characterised by different distribution patterns. This is based on the KNMI-disdrometer data located inland. The correlation of particle size and diameter is strongly site dependent.

### 3 List of publications

#### Publications

- A probabilistic long-term framework for site-specific erosion analysis of wind turbine blades: A case study of 31 Dutch sites, Amrit Shankar Verma, Zhiyu Jiang, Zhengru Ren, Marco Caboni, Hans Verhoef, Harald van der Mijle Meijer, Saullo G.P. Castro, Julie J.E. Teuwen
- A probabilistic rainfall statistics model to estimate the leading-edge lifetime of the wind turbine blade coating system, Amrit Shankar Verma, Zhiyu Jiang, Marco Caboni, Harald van der Mijle Meijer, Hans Verhoef, Saullo G.P. Castro, Julie J.E. Teuwen
- A. Verda, S. Noi and J. Teuwen, "Determination of minimum leading edge protection (LEP) application length for a wind turbine blade to combat rain-induced erosion (under REVIEW)," in *2nd International Symposium on Leading Edge Erosion of Wind Turbine Blades, DTU, Riso, 2021*
- Numerical investigation of rain droplet impact on offshore wind turbine blades under different rainfall conditions: A parametric study, Amrit Shankar Verma, Saullo G.P. Castro, Zhiyu Jiang and Julie J.E. Teuwen, *Composite Structures Vol.241 (2020): 112096. 10.1016/j.compstruct.2020.112096*
- Leading edge erosion of wind turbine blades: Effects of environmental parameters on impact velocities and erosion damage rate, Amrit Verma, Zhiyu Jiang, Zhengru Ren and Julie J.E. Teuwen, Accepted in JOMAE2020 (*Journal of Offshore Mechanics*), ASME Journals
- Leading edge erosion of wind turbine blades: Effects of blade surface curvature on rain droplet impingement kinematics, Amrit Verma, Saullo G.P. Castro, Zhiyu Jiang, Weifei Hu and Julie J.E. Teuwen, *Journal of Physics: Conference Series, Volume 1618, Turbine Technology, (2020). (IOP journal Physics series)*
- A. S. Verma, Z. Jiang, Z. Ren, Weifei and J. J. Teuwen, "Effects of onshore and offshore environmental parameters on the leading edge erosion of wind turbine blades: A comparative study," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vols. Accepted manuscript posted November 10, 2020. doi:10.1115/1.4049248, 2020*

#### Conferences

- H. Verhoef, "Presentation WINDCORE Project," in *Meteorological Technology World Expo 2019, Geneva, 2019*
- A summary of recent work on leading edge erosion of wind turbine blades at the WINDCORE project, DTU International Symposium on Leading Edge Erosion of Wind Turbine Blades, Risø, Amrit Verma, TU Delft, 2020
- Leading edge erosion of wind turbine blades: Effects of blade surface curvature on rain droplet impingement kinematics, Amrit Verma, Saullo G.P. Castro, Zhiyu Jiang, Weifei Hu and Julie J.E. Teuwen, TORQUE, Delft, The Netherlands, 2020
- Leading edge erosion of wind turbine blades: Effects of environmental parameters on impact velocities and erosion damage rate, Amrit Verma, Zhiyu Jiang, Zhengru Ren and Julie J.E. Teuwen, 39<sup>th</sup> international conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE), 2020

Confidential internal project reports

- I. Gonzalez Aparicio, H. Verhoef, D. Wouters and M. Caboni, “Estimation of relevant precipitation statistics from historical data (WINDCORE)”, TNO 2019 R11742 | 2, TNO, Petten, 2019.
- M. Caboni. RFOIL-based leading edge roughness model to determine the aerodynamic performance of wind turbine blades affected by leading edge erosion. TNO-2019-R11751. TNO, 2019.
- M. Caboni. Evaluation of wind turbines’ control strategies to reduce rain-induced erosion (WINDCORE), TNO 2020 R11927. TNO, 2020.
- N. Saraswati, Assessment of the LCoE reduction related to control and measurement strategies (WINDCORE), TNO 2020 R11928, TNO, 2020








## 4 Project data

The project WIND turbine COntrol strategies to reduce wind turbine blade Rain droplet Erosion (WINDCORE) is supported by the Dutch Enterprise Agency of the ministry of Economic Affairs and Environment.

Project reference : TEHE118013  
 Project title : WIND turbine COntrol strategies to reduce wind turbine blade Rain droplet Erosion (WINDCORE)  
 Coordinator : TNO  
 Partners : Delft University of Technology (TU Delft)  
 Shell Global Solutions International  
 SE Blades Technology  
 RWE  
 Co-partner : GROW Office  
 Project period : 1 January 2019 – 31 December 2020

The project consortium is listed below:

Consortium partner	Role	Company logo
TNO	Coordinator	
Delft University of Technology	Partner	
Shell Global Solutions International	Partner	
SE Blades Technology B.V.	Partner	
RWE	Partner	
GROW Office	Co-partner	