

TEWZ115010/IWAUC

# Inspection with automated UAV's using computer vision

Openbaar eindrapport

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

## COLOFON

<b>Penvoerder</b>	NHL Stenden Hogeschool
<b>Deelnemers</b>	NHL Stenden Hogeschool epoMAT Dutch Drone Company Droneview
<b>Projectnummer</b>	TEWZ115010
<b>Projectperiode</b>	1 september 2015 tot 1 maart 2020
<b>Contactpersoon</b>	Dhr. Cornelis Wartena cornelis.wartena@nhlstenden.com

## INHOUDSOPGAVE

COLOFON.....	1
LIJST MET AFKORTINGEN .....	4
INHOUDELIJK EINDRAPPORT .....	5
SAMENVATTING.....	5
INLEIDING .....	6
De aanleiding .....	6
Korte omschrijving van de activiteiten .....	6
Doelstelling .....	6
Probleemstelling .....	6
Hoe groot is het probleem? .....	6
Welke oplossingen zijn er op dit moment voor inspectie en reparatie van windturbinebladen? ....	8
Uitdagingen windturbinebladen die van invloed zijn op O&M .....	9
Ontwerp en validatie .....	9
Produceren en installatie .....	9
Productie (inbedrijf) en onderhoud op locatie.....	9
Werkwijze.....	10
Onderzoeksmethode .....	10
Ad. 1 Vliegen op zee en land .....	10
Kerngegevens Prinses Amaliawindpark.....	12
Gevaren/risico's.....	12
Criteria .....	12
Communicatie .....	12
YOUTUBE .....	14
AMALIAWINDPARK .....	14
ALGEMENE IMPRESSIE .....	14
Rotorblad schadebeeld en oorzaken .....	15
Ad. 2 Automatiseren visuele inspecties.....	16
Ad. 3 Automatiseren vliegproces .....	16
Kan de beoordeling van de beelden worden geautomatiseerd? .....	17
Autonoom vliegen.....	18
Ad. 4 Integratie prototype .....	18
Ad. 5 Impact van vervuiling en beschadiging (erosie) op de prestatie van offshore windturbines	18
RESULTATEN en KNELPUNTEN.....	20
Ad. 1 Vliegen op zee en land .....	20
Knelpunten .....	20
Ad. 2 Automatiseren visuele inspecties.....	20

Resultaten .....	20
Knelpunten .....	21
Ad. 3 Automatiseren vliegproces .....	21
RESULTATEN.....	21
Ad. 4 Integratie prototype .....	22
Ad. 5 Impact van vervuiling en beschadiging (erosie) op de prestatie van offshore windturbines	22
resultaten .....	22
knelpunten .....	23
SPINN OFF en BIJDRAGE VERSTERKING KENNISPOSITIE .....	24
Lector Computer Vision & Data Science (NHL Stenden Hogeschool).....	24
epoMAT .....	24
Dutch Drone Company .....	24
Droneview .....	24
CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN .....	25
Kan een UAV opnamen maken die kwalitatief voldoende zijn?.....	25
KAN DE BEOORDELING VAN DE BEELDEN WORDEN GEAUTOMATISEERD? .....	25
Kan het vliegproces geautomatiseerd worden? .....	25
OVERZICHT OPENBARE PUBLICATIES & PRESENTATIES .....	26
EXTRA EXEMPLAREN .....	27
INFORMATIE.....	27
SUBSIDIE.....	27
BRON VERMELDING.....	27

## LIJST MET AFKORTINGEN

Afkorting	Voluit
DDC	Dutch Drone Company
DV	Droneview
NHL	NHL Stenden Hogeschool
EP	epoMAT
WP	Werkpakket
PM	Project Management

## INHOUDELIJK EINDRAPPORT

Deze onderstaande samenvatting is eveneens bedoeld als openbare eindrapport, zoals vereist door de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

## SAMENVATTING

### **Kan met behulp van gebruik van computer vision technologie op Unmanned Aerial Vehicles (UAV's) de inspectie van windturbine bladen geautomatiseerd worden uitgevoerd?**

*IWAUC publiek private samenwerking  
Versie 11 maart 2020*

Het doel van dit project was het aantonen van meerwaarde door geautomatiseerd, waar nodig on-board, intelligent gebruik van computer vision technologie op Unmanned Aerial Vehicles (UAV's) voor de inspectie van windturbine bladen. Een drone die automatisch opstijgt vanuit een dockingstation, een inspectieronde vliegt langs een windturbine rotorblad en op gevalideerde plekken beelden maakt, na afloop zelfstandig landt en de beelden automatisch upload. De ge-uploade beelden worden door middel van Deep Learning systemen geanalyseerd op schade met een automatisch gegenereerd schadeherstel advies.

Naast het vliegen met een drone (onshore en offshore), heeft het project ook onderzoek gedaan naar de diverse schadebeelden die kunnen optreden bij windturbine rotorbladen. Daarnaast is er uitgebreid onderzoek gedaan naar Deep Learning systemen waarmee de beelden volledig autonoom worden geanalyseerd. Binnen het project waren twee dronebedrijven betrokken: Dutch Drone Company en Droneview. Voor de analyse van de schade aan de windturbine rotorbladen en kennis van compositiematerialen was epoMAT als partner betrokken. Het integrale deep learning systeem incl. het bouwen van software en het verwerken van data is uitgevoerd door het lectoraat Computer Vision van NHL Stenden Hogeschool en al zodanig partner van het project.

Er zijn meerdere testen uitgevoerd op on- en offshore locaties met drones. Om de beelden te kunnen valideren en tegelijkertijd een kostenvergelijk te kunnen maken zijn er tevens foto's gemaakt door middel van de inzet van een Rope access team. Er is veel tijd, veel meer dan vooraf ingeschat, nodig geweest voor het samenstellen van de juiste drone configuratie; camera, gewicht, lens, accu, etc. Dit heeft het beschikbaar krijgen van kwalitatief goede 'Ground truth' aanzienlijk vertraagd. Daarnaast was het verkrijgen van commerciële testobjecten - operationele windturbines op land en op zee- vrijwel onmogelijk. Er is getest bij windparken te Marrum en bij ECN te Wieringerwerf. ENECO heeft onder voorwaarden van een evenwichtige tegenprestatie- het om niet opstellen van inspectierapportages, zowel op land als op zee windturbines beschikbaar gesteld. Uiteindelijk zijn er ruim 8.000 foto's gemaakt. Vervolgens zijn alle 8.000 foto's handmatig geannoteerd en door het lectoraat Computer Vision gebruikt ten behoeve van het door ontwikkelen van het deep learning systeem.

Een belangrijke vaststelling die uit het onderzoek is gebleken, is dat de asset owner maar in zeer geringe mate interesse heeft in het inspecteren van windturbine rotorbladen omwille van contractuele afspraken die vaak all-in zijn gemaakt. Het aangetoonde verlies van rendement door schade en dus een-op-een verlies van opbrengst is een moeilijk onderwerp gebleken. Daarnaast is vastgesteld, dat de kwaliteitseisen die aan de foto's worden gesteld door het onderzoeksteam substantieel hoger liggen dan de eisen die door de klanten worden gesteld.

Een demonstrator die het vliegproces automatiseert is ontwikkeld en getest onder indoor condities. Ingegeven door de verwachting dat autonoom vliegen de komende jaren niet juridisch toegestaan zal worden in Nederland, is de aanbeveling verder onderzoek naar autonoom vliegen vooralsnog te staken.

## INLEIDING

### DE AANLEIDING

Windmolenbladen worden periodiek geïnspecteerd door mensen die daarvoor in de windmolen moeten klimmen en handmatig de bladen inspecteren en foto's maken. Deze foto's worden vervolgens door een expert geïnclassificeerd naar de aard van de beschadiging en op basis van deze classificatie worden herstelwerkzaamheden uitgevoerd. Het maken en inspecteren van de foto's is een gevaarlijk, arbeidsintensief en o.a. daardoor duur proces.

### KORTE OMSCHRIJVING VAN DE ACTIVITEITEN

Doordat het Lectoraat Windenergie tijdens de looptijd van het project is overgegaan van NHL Stenden Hogeschool te Leeuwarden naar de Hanze Hogeschool te Groningen, is het zwaartepunt van dit project bij de onderzoekers van het lectoraat Computer Vision van NHL Stenden Hogeschool komen te liggen. Zij gaan zich binnen dit project bezighouden met de ontwikkeling van software.

epoMAT brengt zijn expertise in op het gebied van windturbine inspectie bij de beoordeling van de beelden. Deze expertise wordt ondersteund door expertise van het lectoraat windenergie van NHL Stenden Hogeschool. Dit is vooral van belang bij de grove scheiding van significante beelden. Het snel en trefzeker onderscheiden van beelden met schade bepaalt voor een groot deel de snelheid van automatiseren. Dutch Drone Company en Droneview dragen bij met hun kennis en ervaring met UAV's en hun apparatuur voor testvluchten.

### DOELSTELLING

De focus in dit project ligt op het toevoegen van meerwaarde door geautomatiseerd, waar nodig on-board, intelligent gebruik van computer vision technologie op Unmanned Aerial Vehicles (UAV's) voor de inspectie van windturbine bladen.

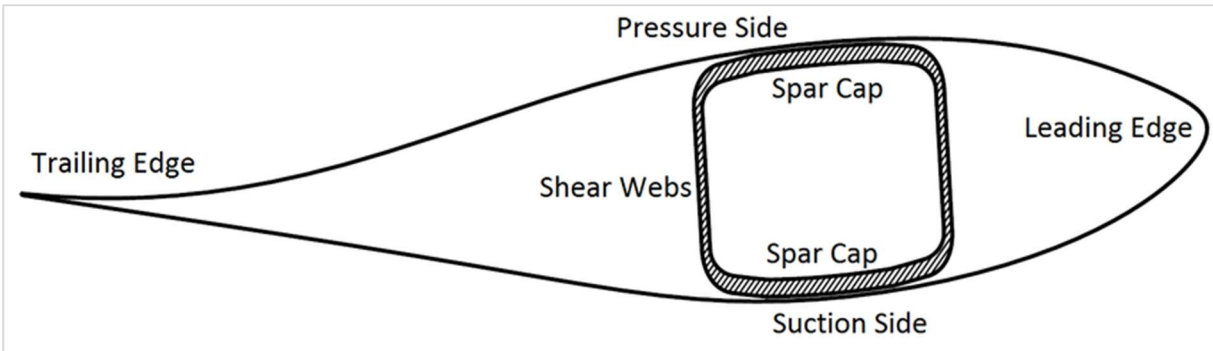
### PROBLEEMSTELLING

Waar de doelstelling het eindproduct van het onderzoek beschrijft, geeft de probleemstelling invulling aan de wijze waarop tot dat eindproduct zal worden gekomen. Het beschrijft de centrale vraag in dit onderzoek en luidt:

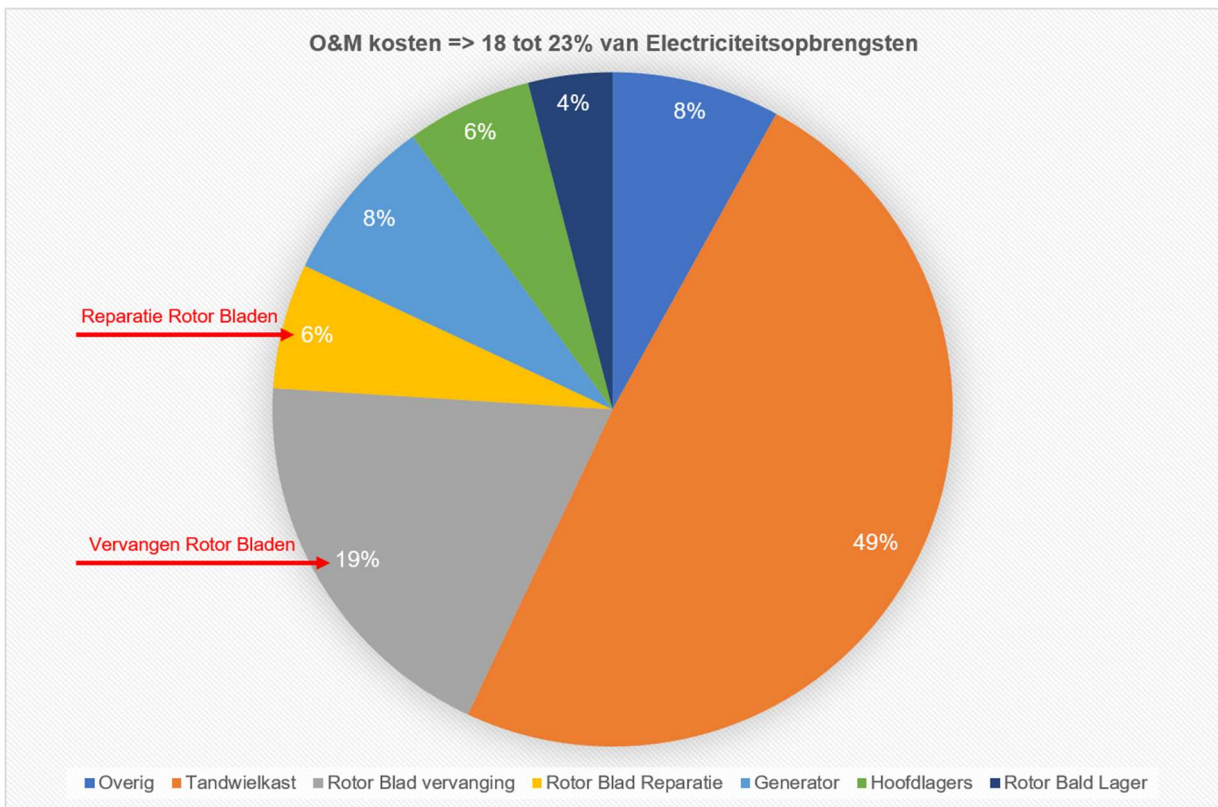
Kan met behulp van gebruik van computer vision technologie op Unmanned Aerial Vehicles (UAV's) de inspectie van windturbine bladen geautomatiseerd worden uitgevoerd?

### HOE GROOT IS HET PROBLEEM?

Marktonderzoek heeft aangetoond, dat windturbinebladen een essentieel deel zijn van de totale O&M kosten (Operations & Maintenance Cost) De totale O&M kosten liggen grofweg tussen de 18 en 23 procent van de elektriciteitsopbrengsten van een windturbine. Uit veldonderzoek is bekend, dat windturbinebladen al na een paar jaar gerepareerd of vervangen moeten worden door ernstige beschadigen aan de voorrand (leadind edge) van het Windturbineblad.



Figuur 1 Doorsnede windturbine rotorblad incl. internationale benamingen. (Bron: epoMAT / BZEE - GWO)



Figuur 2 Verdeling O&M kosten windturbine



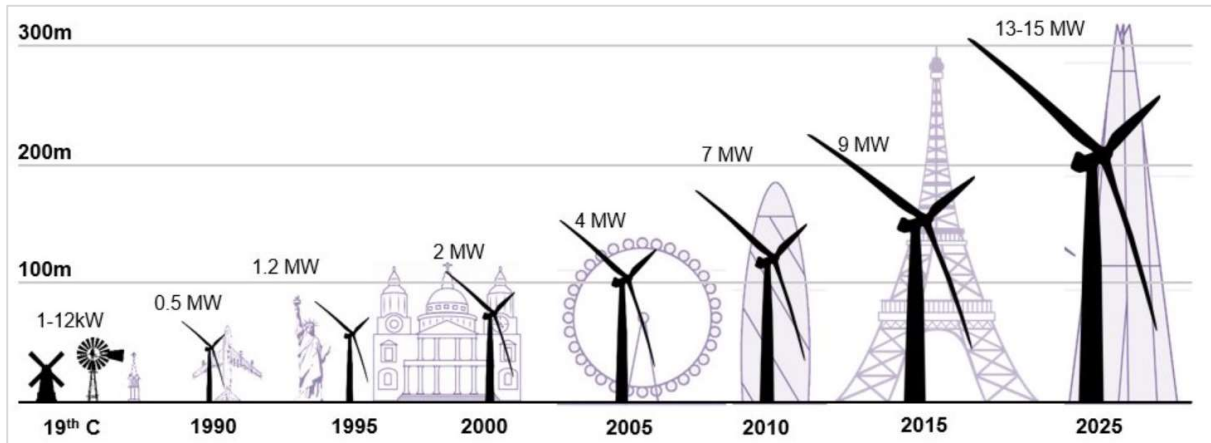
## WELKE OPLOSSINGEN ZIJN ER OP DIT MOMENT VOOR INSPECTIE EN REPARATIE VAN WINDTURBINEBLADEN?

*Tabel 1* Overzicht diverse methodes (TRL) Technology Readiness Level - fasen van technologieontwikkeling  
 (AI) Artificiële Intelligentie  
 (SCADA) Supervisory control and data acquisition - Een SCADA systeem wordt gebruikt voor de bediening en visualisatie van een fabriek of van een proces.  
 (Bron: sirris.be)

	<u>Voordelen</u>	<u>Nadelen</u>	<u>Kosten</u>	<u>TRL</u>
<u>SCADA toezicht</u>	- Er zijn geen inspanningen vereist	- Te veel onzekerheden	€	6 - 7
<u>Vaste camera's</u>	- Bedieningsgemak	- Windturbine stoppen - Personeel nodig - Tijd en inspanningen nodig om de beelden te verwerken	€ €	9
<u>Drones</u>	- Nauwkeurige foto's van goede kwaliteit - Bruikbaar voor schade herkenning	- Windturbine stoppen - Personeel nodig - Tijd en inspanningen nodig om de beelden te verwerken	€ €	9
<u>Akoestisch</u>	- Bedieningsgemak - Inzetbaar als monitoringtool	- Lage TRL	€	3 - 4
<u>Foto's + AI</u>	- Bruikbaar voor schade herkenning - Eenvoudige analyse	- Windturbine stoppen - Nieuwe techniek en heeft meer validatie	€ €	6 - 7
<u>SCADA + AI</u>	- Er zijn geen inspanningen vereist	- Erg lage TRL	€	1 - 2
<u>Robots</u>	- Uitgebreide inspecties en multifunctioneel - Semi geautomatiseerd	- In ontwikkeling	-	5 - 6

## UITDAGINGEN WINDTURBINEBLADEN DIE VAN INVLOED ZIJN OP O&M

Door de enorme ontwikkeling van windturbines o.a. in geleverd vermogen per eenheid, en daarmee de toename in lengte van windturbine rotorbladen, zijn de uitdagingen en effecten op de operationele- & onderhoudskosten groot. Zo ook het onderhoud aan de windturbine rotorbladen.



Figuur 3 Evolutie van windturbine hoogte en output  
(Bron: Bloomberg New Energy Finance)

## ONTWERP EN VALIDATIE

- Bladen worden groter, maar de materiaaleigenschappen blijven hetzelfde
- Nieuwe offshore windmarkten kunnen leiden tot off-design laadomstandigheden
- Ontwerpvalidatie en -certificering blijven achter bij de evolutie van het bladontwerp en kan niet onder alle veld belasting condities gemeten worden
  - testprogramma's en het ontwerp van windturbine rotorbladen zijn gericht op materiaal vermoeidheid. Testen op piekbelastingen, die cruciaal zijn voor composietmateriaal zijn (nog) beperkt. => Inzicht in belasting van Windturbine rotorbladen in het veld is noodzakelijk
  - Lichtere en slankere bladen vertonen meer bladvervorming bij hogere belasting
  - scheuren in achter rand gebieden
  - Hogere vervormingen leiden tot belangrijkere spanningen in de hechting

## PRODUCEREN EN INSTALLATIE

- De kwaliteit van produceren is kritisch voor de levensduur van de windturbine rotorbladen
- Het risico van transport en installatie van lange windturbine rotorbladen is hoog

## PRODUCTIE (INBEDRIJF) EN ONDERHOUD OP LOCATIE

- Betere identificatie van werkelijke belasting omstandigheden om onderhoud beter te kunnen prioriteren en onderhoudsteams beter uit te rusten en op te leiden

## WERKWIJZE

### ONDERZOEKSMETHODE

De onderzoeksmethode die binnen dit project wordt gehanteerd, is gebaseerd op co-innovatie. Het ontwikkelen van toepassingen in de vorm van prototypes wordt gedaan volgens de rapid prototyping ontwikkelmethode.

De essentie van co-innovatie is dat alle stakeholders tegelijkertijd aan een stukje van het ontwerp- en ontwikkelproces werken om zo te komen tot innovatie. Zo ontstaan nieuwe marktkansen en nieuw ondernemerschap op basis van een gedegen haalbaarheidsonderzoek. Er ontstaan innovaties die een partij niet alleen kan ontwikkelen, ze hebben elkaar nodig, de combinatie van expertise leidt tot nieuwe ontwikkelingen en innovatie.

Dit project was verdeeld in een vijftal werkpakketten:

1. Vliegen op zee en land
2. Automatiseren visuele inspecties
3. Automatiseren van het vliegproces
4. Integratie prototype
5. Impact van vervuiling en beschadiging (erosie) op de prestatie van offshore windturbines

### AD. 1 VLIEGEN OP ZEE EN LAND

Om algoritmen te kunnen ontwikkelen en testen die het beoordelen van de beelden automatiseert



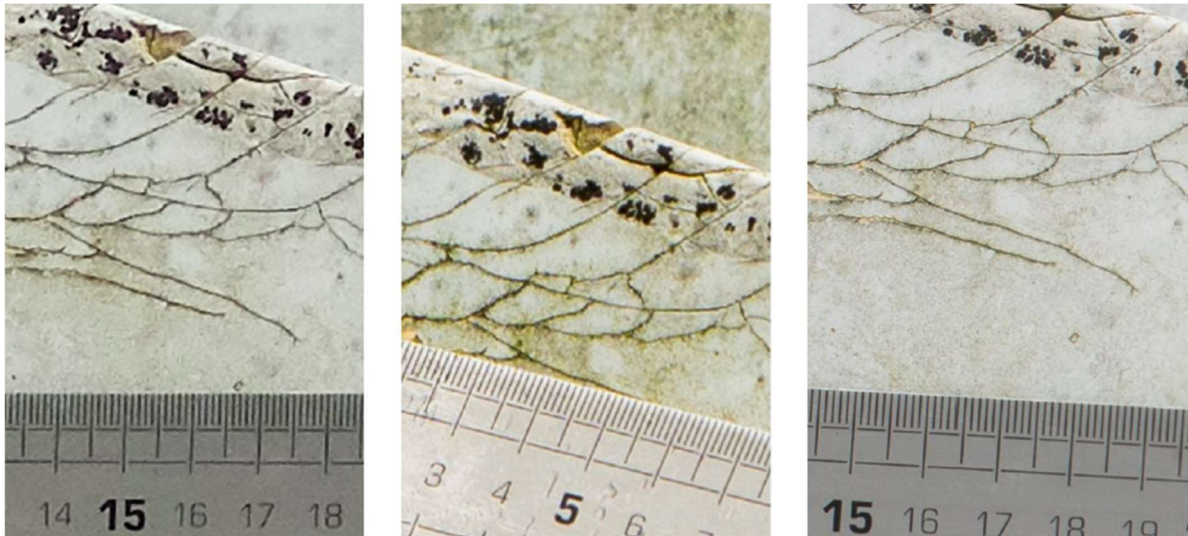
**Figuur 4** Afstellen drone en lens in het veld

is een ground truth dataset nodig. Deze dataset bevat opnamen van een deel windturbineblad met daarop per defect een annotatie van de positie en type fout. De ground truth dataset wordt gebruikt om de algoritmen te trainen, evalueren en te testen. Essentieel is dat deze dataset veel voorbeelden bevat van alle type defecten (en hun variaties) onder alle representatieve licht- en weersomstandigheden waaronder op operationele omstandigheden opnamen kunnen worden gemaakt. Binnen werkpakket ad. 1 vliegen op zee en land zijn diverse testvluchten met verschillende drones van uitgevoerd op o.a. windparken te Marrum en bij ECN - nu TNO te Wieringerwerf. Tijdens de testvluchten zijn verschillende camera's en lenzen getest ten einde een juiste *real time* beoordeling te kunnen maken. Parallel zijn er foto's gemaakt door inzet van een Rope Access team. Dit om een solide vergelijking te kunnen maken tussen beide manieren van opnamen maken. Na validatie

van de resultaten is vastgesteld, dat de projectdrone en lens, aangeschaft in het vierde kwartaal 2015 en toen een van de modernste drones, niet het gewenste resultaat opleveren en de beschikbare beelden onvoldoende zijn voor een betrouwbare *Ground Truth*. Om de functionaliteit te kunnen blijven waarborgen was een nieuwe drone noodzakelijk.

Hierbij dient te worden opgemerkt, dat de aandacht voor *Rotor Blade Inspections and Repair* wereldwijd (nog) beperkt is.

Na grondig onderzoek, er zijn namelijk tal van ontwikkelingen op het gebied van drones, is met een nieuw type drone gevlogen en zijn er foto's gemaakt met een 200mm lens. De beelden die gemaakt zijn voldeden aan de gestelde eisen. Hiervoor zijn testopstellingen gemaakt.



Figuur 5 Analyse meerdere lenzen en vaststellen validatieproces

De praktijk heeft uitgewezen, dat het erg moeilijk is om voldoende testlocaties beschikbaar te krijgen. Hetgeen belangrijk is om alle schadebeelden goed te kunnen monitoren. Er is een matrix gemaakt met daarin alle schadebeelden en geografische verdeling waar deze schade het meest voorkomt om zodoende gericht te zoeken naar testlocaties. Ook heeft er een intensieve lobby plaatsgevonden bij o.a. TKI Wind op Zee, brancheorganisaties en het bedrijfsleven. Er is o.a. gevlogen op locatie te Marrum.

Om het project (nog) meer onder de aandacht te brengen met als voornaamste doel het verkrijgen van testlocaties en relevante marktinformatie, zijn er meerdere congressen en beurzen bezocht. Er heeft overleg plaatsgevonden met TKI Wind op Zee en het project is uitgebreid gepresenteerd op de WindDays2018 te Rotterdam. Diverse contacten hebben ervoor gezorgd, dat alle projectleden in een gezamenlijke presentatie bij ENECO te IJmuiden hun bijdrage hebben kunnen uitleggen. ENECO heeft o.a. op basis van de presentatie en gesprekken nadien, onshore en offshore windmolens beschikbaar gesteld. Om ervaring op te doen zijn eerst de onshore windmolens getest en in een later stadium van het project offshore windmolens van het Prinses Amaliawindpark op zee.



Figuur 6 Vlucht met drone door Droneview en Dutch Drone Company Amaliawindpark ENECO

## KERNGEGEVENS PRINSES AMALIAWINDPARK

1		Aantal windmolens 60 windmolens	5		Wat is de bladlengte? 40 meter
2		Vermogen per windmolen 2 MegaWatt	6		Huishoudens 125.000
3		Windmolentype Vestas V80	7		CO2-besparing 225.000 ton per jaar
4		Wat is de ashoogte? 60 meter	8		Jaarlijkse opbrengst 422.000.000 kWh

Figuur 7 Gegevens Amaliawindpark op Zee

## GEVAREN/RISICO'S

- Windstilte betekent niet of nauwelijks kunnen bedienen bladposities om naar het volgende blad te draaien
- Magnetische interference van schip
- Zeeziekte
- Sterke stroming waardoor positionering van de boot problemen oplevert
- Foto's van edges richting de tip zijn erg lastig te focussen. Te smal t.o.v. achtergrond. Drone hier lager laten vliegen en de camera omhoog pitchen
- Schone bladen lastig om focuspunt te vinden. Focus op vuil en schade ideaal.
- Reserveonderdelen moeten van de wal komen. Noodzakelijk om alles in tweevoud beschikbaar te hebben.

## CRITERIA

- Afstand drone <> blad rond de 10 mtr
- Wind < 10 m/s
- Golven < 0.8 - 1 mtr
- Inspecties gedurende zomerperiode
- Team 3(4) personen. Idealiter 2 piloten waarvan 1 de payload bedient en een dataprocesing lid. Helpende hand voor drone vangen, nieuwe batterijen klaarzetten, contact met brug voor positionering etc is zeer gewenst. Bemanningslid is hiervoor de beste optie.
- Livedownload om tijdens vlucht al kwaliteit van de foto's te beoordelen
- Verrekijker
- Multifocus op blad
- Idealiter bladen uitgerust met focus en referentiepunten

## COMMUNICATIE

- Communicatie met windturbine operator voor bedienen molen
- Communicatie met brug voor positionering schip

Offshore is er getest met een DJI M600 drone vanaf een 46m lang schip, in eerste instantie is er opgestegen en geland vanaf het helideck van het schip. Tijdens deze testen werd duidelijk, omdat het schip van staal is, dit interferentie veroorzaakte op het kompas van de drone. Dit type drone gebruikt zijn interne kompas met GPS voor navigatie, zonder de juiste kompas informatie wordt het 'vliegpadd' van de drone onstabiel. Andere type drones (zonder kompas) konden niet de camera setup meenemen die vereist was voor de te behalen nauwkeurigheid van de inspecties (1cm/pixel) omdat dit te zwaar werd.

Besloten is om een aluminium platform op de monkeyhead (stuurhut) te bouwen, deze constructie zorgde ervoor dat de interferentie van het stalen schip werd beperkt tot een werkbare situatie. Omdat er nog steeds kleine storingen waren is besloten om tijdens de landing de drone uit de lucht te vangen.

De eis voor vliegen in het windpark was dat als de iets mis zou gaan en de drone valt in het water dat deze opgeruimd zou worden. Om deze reden was er op de bovenkant van de drone een floating device aangebracht. Dit was relatief zwaar wat ten koste ging van de vliegtijd van de drone.

Enmaal in het windpark is geprobeerd om met RTK navigatie te werken, dit is belangrijk om nauwkeurige meta data aan de foto's toe te kennen. Een vereiste voor dit RTK systeem is dat het basis station om vaste grond staat. Op zee is gekeken of dit werkt als het basis station om een wind turbine staat. Helaas bleek dit niet te werken ook kon de drone tijdens de inspecties niet in line of sight blijven met het basis station wat onder andere een vereiste is voor een goede werking.

Het Eneco project is uitgevoerd in de overgangperiode van lente naar zomer, deze wisseling van seizoenen had veel dagen waarbij er in de ochtend mistvorming was waardoor de camera moeite had om focus te vinden op een blad. Het contrast tussen lucht, het blad, en de zee was te klein waardoor het lang duurde voordat de camera in focus was. Ook waren er veel dagen dat de wind over de limieten van de drone was waardoor er niet gevlogen kon worden. Omdat het onderhoudsseizoen in de zomer is moet er in het voorjaar geïnspecteerd worden, dit is voor de vliegomstandigheden niet altijd de beste periode.

Conclusie voor offshore windturbine bladen m.b.t. vlieg proces.

- Inspecties met een camera op manual focus waarbij d.m.v. lidar een vaste afstand tot het blad heeft geeft een enorme tijds winst voor het in focus krijgen van het blad
- Inspecties in het midden van het seizoen lente en/of zomer geeft de beste weerscondities
- Een aluminiumboot in plaats van een stalenschip voorkomt interferentie.



Figuur 8 Vlucht met drone door Droneview en Dutch Drone Company



**Figuur 9** Vlucht met drone door Droneview en Dutch Drone Company  
Amaliawindpark op Zee

Op land is er nu ervaring met een combinatie van lidar en rtk navigatie waarbij een volledige inspectie autonoom met een hoge nauwkeurigheid (0,4cm/pixel) gerealiseerd kan worden binnen 40 minuten.

Als tegenprestatie heeft IWAUC Inspectierapportages van windmolenbladen volgens BZEE-standaarden geleverd. Het ging hier om nieuwe (eerste) inspecties als ook om audits op eerder door externe partijen uitgevoerde reparatiewerkzaamheden. Het tekenen van een Non-Disclosure Agreement (NDA) is was hiervoor noodzakelijk.

In nauw overleg met ENECO is de beeldkwaliteit afgestemd en geoptimaliseerd. Hierbij moet opgemerkt worden, dat de opgestelde kwaliteitseisen -fotokwaliteit, nauwkeurigheid van vaststellen schade beelden en het daaruit voortkomende reparatieadvies- door het projectteam vele malen hoger liggen dan door de eindgebruiker (klant), op dit moment althans, gevraagd wordt.

De beperking in regelgeving t.a.v. UAV's en kosten van vliegen op zee blijft ingewikkeld en duur.

#### YOUTUBE

Van het onderzoek zijn een tweetal korte films gemaakt. Door de volgende link te kopiëren naar uw browser kan de film worden bekeken:

---

#### AMALIAWINDPARK

<https://vimeo.com/362306040>

---

#### ALGEMENE IMPRESSIE

<https://youtu.be/WuXFEGx6vhQ>

## ROTORBLAD SCHADEBEELD EN OORZAKEN

Tijdens het maken van opnames in het veld zijn de onderstaande schade het meest typisch:

1. Scheuren
2. Delaminatie
3. Erosie
4. Onthechting (loslaten)
5. Effecten van bliksem, zon, zand, etc.

De oorzaken van deze typische schadebeelden zijn divers. Hierbij kan gedacht worden aan:

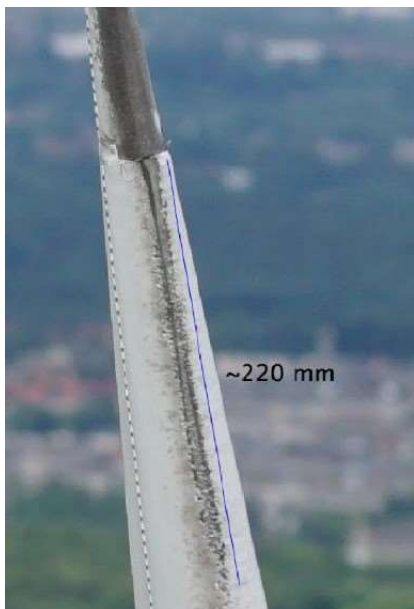
1. Ontwerp
2. Fabriceren
3. Gebruiksslijtage
4. Veroudering



*Scheuren (rimpels) in bladen (slechte productie)*

*Loslaten achterrand (plastic folie)*

*Scheuren (slechte productie)*



*Windmolen (2 jaar)*

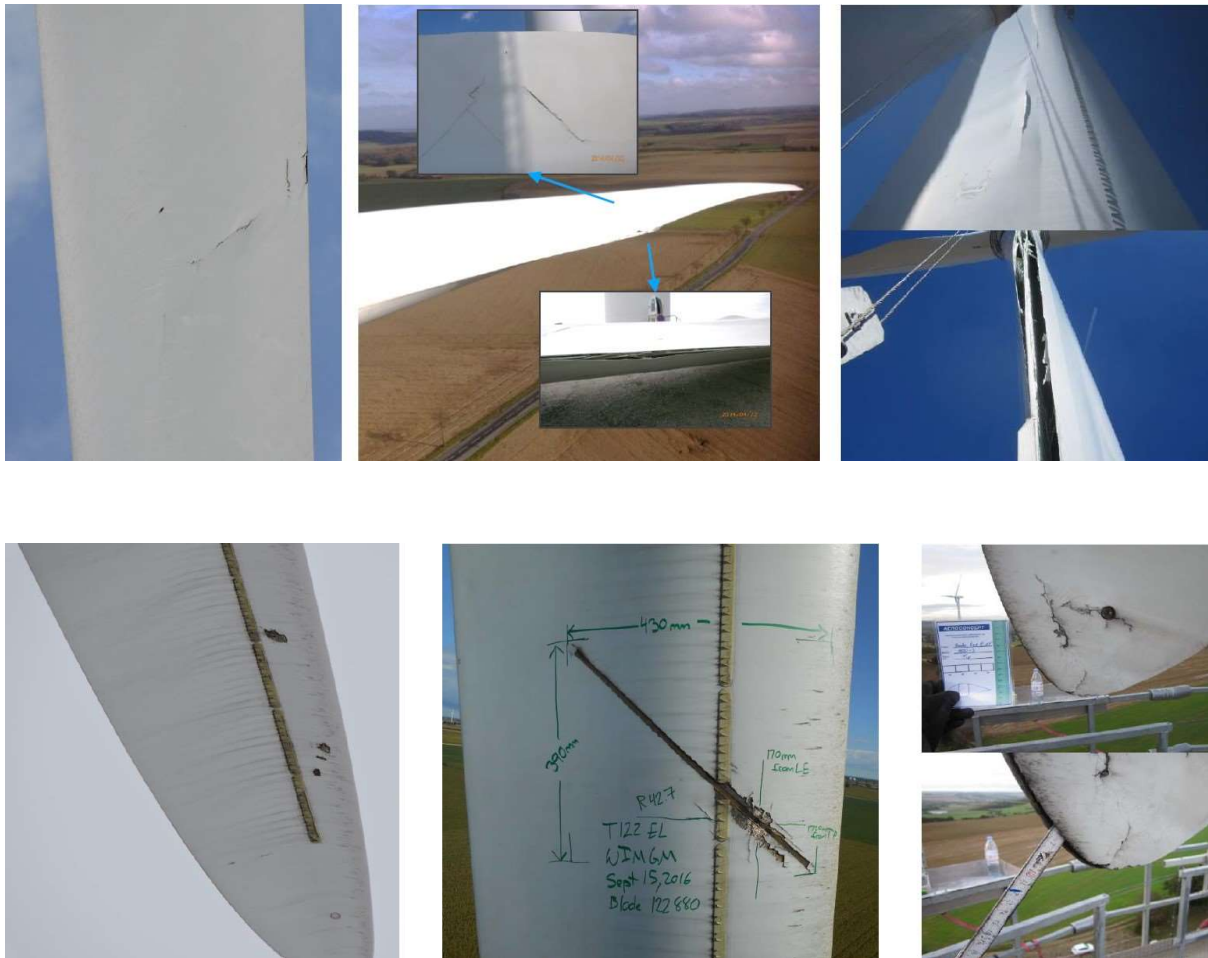


*Windmolen (2 jaar)*



*Windmolen (1,5 jaar)*





Figuur 10 Diverse schadebeelden

## AD. 2 AUTOMATISEREN VISUELE INSPECTIES

In verband met het onderzoek naar een geschikte drone zijn gedurende een korte periode de werkzaamheden met betrekking tot werkpakket ad. 2 automatiseren visuele inspecties on-hold gezet. Na deze korte pauze zijn de werkzaamheden maximaal opgestart en zijn er 8.000 beelden een-voor-een door de te ontwikkelen software gehaald en visueel beoordeeld.

Binnen werkpakket ad. 3 automatiseren vliegproces is prioriteit gegeven aan het beschikbaar krijgen van nieuwe 'Ground Truth' data op basis van opnamen drones en Rope Access gemaakt tijdens de eerste testvlucht. Daarbij is geprobeerd rekening te houden met voldoende dekking in nieuwe 'Ground Truth' data van alle type fouten en onder representatieve licht- en weersomstandigheden

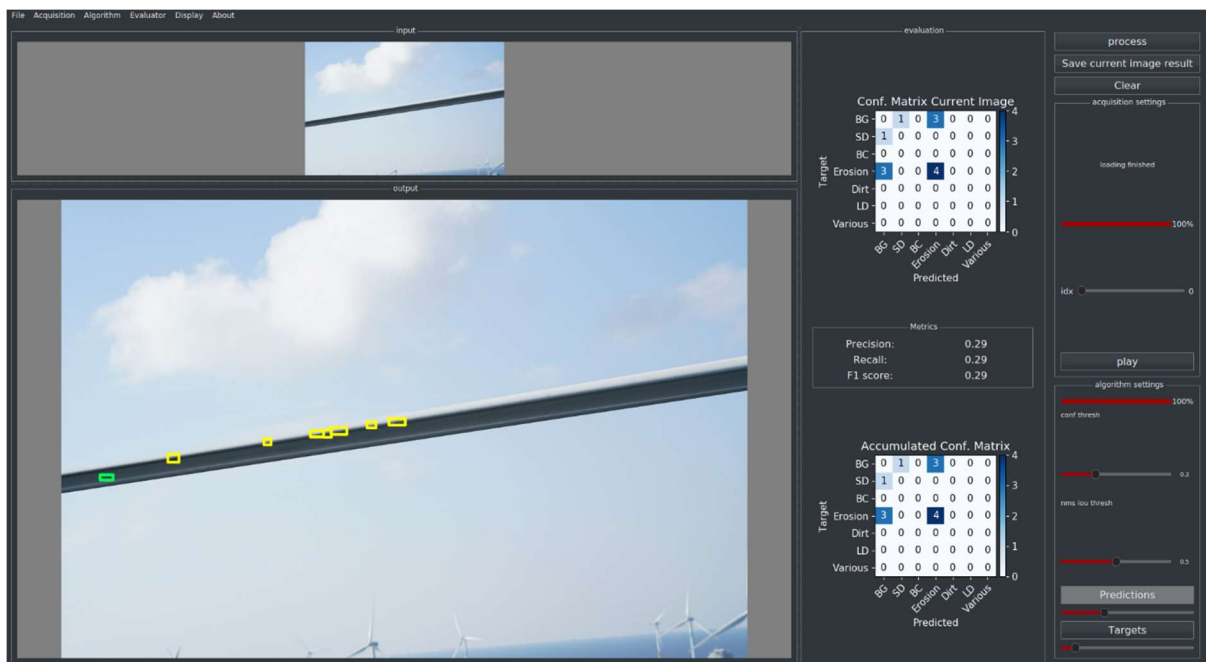
## AD. 3 AUTOMATISEREN VLEGPROCES

Ook is er uitgebreid onderzoek gedaan naar autonoom vliegen naar windmolentestbladen. Ook heeft er nadere integratie plaatsgevonden met tests 'Twirre V2' voor indoor demo met windmolentestbladen.

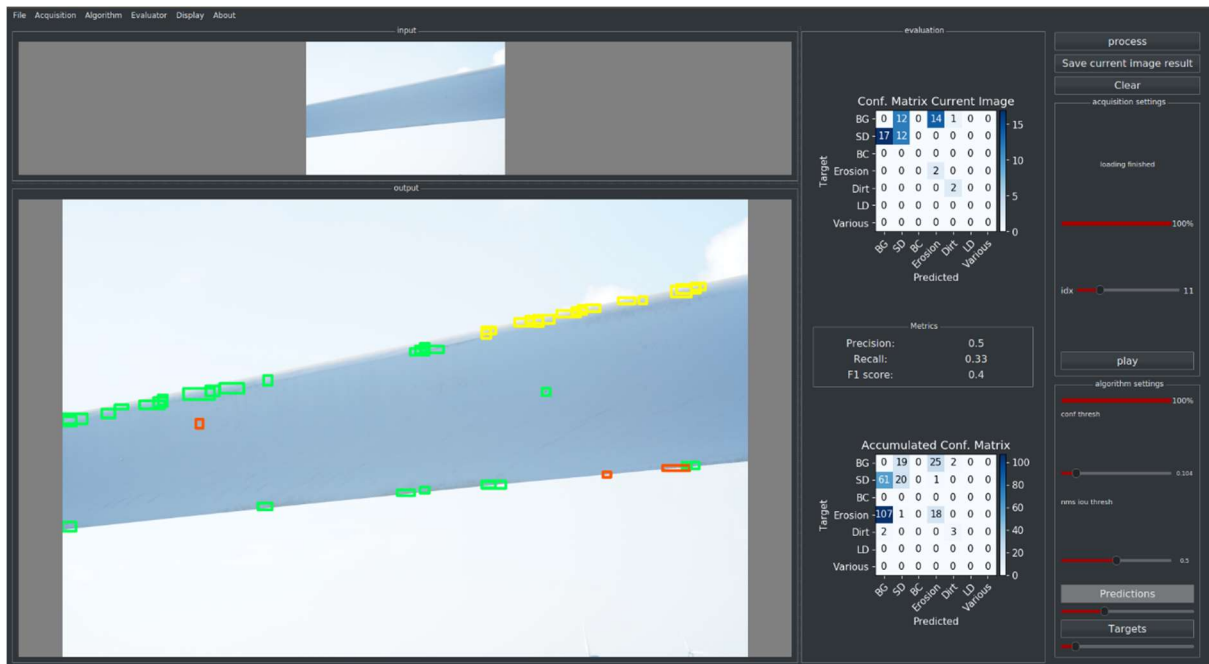
## KAN DE BEOORDELING VAN DE BEELDEN WORDEN GEAUTOMATISEERD?

Er is onderzoek verricht naar het offline beoordelen van de door de UAVs gemaakte opnamen. Er is een deep learning verwerkingspijplijn opzet om beelden te annoteren, te trainen met diverse deep learning architecturen, de architecturen te evalueren en te testen. Verder is er een demonstrator ontwikkeld voor deep learning inference waar keuzes kunnen gemaakt voor gemaakte data sets en deep learning architecturen. Resultaten kunnen per opname afzonderlijk bekeken worden of geaggregeerd over de gekozen data set.

- Algoritmen op basis van deep learning geven betere resultaten dan algoritmen gebaseerd op traditionele machine learning. Deep learning heeft echter wel een steile leercurve.
- Om deep learning te kunnen inzetten zijn krachtige computers nodig. Het projectteam heeft hiervoor o.a. gebruik gemaakt van Deep Frisian, de supercomputer van NHL Stenden.
- Meerdere deep learning architecturen zijn getuned en gebenchmarked op de beschikbare data sets. In de eindfase van het project is een grotere geannoteerde dataset beschikbaar gesteld waarop de ontwikkelde methoden zijn getest. Deze testresultaten laten zien dat er meer onderzoek nodig is om te komen tot een operationeel systeem en dat de kwaliteit van de dataset verder verbeterd moet worden.
- Om een definitieve uitspraak te kunnen doen over de kwaliteit van de foutdetectie en classificatie software is een nauwkeurig geannoteerde dataset van hoge kwaliteit nodig. Om te komen tot een dergelijke set is verder onderzoek nodig.



Figuur 11 Screenshot Demonstrator  
(Bron: NHL Stenden Hogeschool - Lectoraat Computer Vision)



Figuur 12 Screenshot Demonstrator  
(Bron: NHL Stenden Hogeschool - Lectoraat Computer Vision)

## AUTONOOM VLIEGEN

De Twirre architectuur voor het autonoom vliegen met UAVs, die ontwikkeld was in het RAAK project “Smart Vision for UAVs” is verder doorontwikkeld binnen dit project. Er is een demonstrator ontwikkeld die onder indoor condities een model van een windturbineblad opzoekt, ernaartoe vliegt en het inscaneert. Verder zijn de eerste testen uitgevoerd met een drone op basis van de Twirre architectuur onder outdoor condities.

De oorspronkelijke mijlpalen en doelstellingen t.a.v. werkpakket ad.3 zijn niet gerealiseerd binnen de looptijd van dit project. Na solide marktonderzoek en diverse congres- en beursbezoeken is de verwachting, dat een dergelijke innovatie -volledig autonoom- binnen de windbranche nog geruime tijd zal duren. Een belangrijke reden hiervoor is de ontbrekende juridische regelgeving. Om deze reden is gestopt met het verdere onderzoek naar het autonoom vliegen van drones.

## AD. 4 INTEGRATIE PROTOTYPE

Aangezien besloten is om met werkpakket 3 ‘Automatiseren vliegproces’ te stoppen is bijgevolg de uitvoering van werkpakket 4 niet binnen de projectperiode gestart.

## AD. 5 IMPACT VAN VERVUILING EN BESCHADIGING (EROSIE) OP DE PRESTATIE VAN OFFSHORE WINDTURBINES

Het effect van blad erosie op de opbrengst is vooral bepaald door middel van een literatuuronderzoek en door een analyse van meetdata van derden.

The tijde van het huidige onderzoek bleken vooral de resultaten uit een project uitgevoerd door Sandia in de VS [1] erg bruikbaar.

(Refereer en acknowledge D. Maniaci Leading Edge Erosion: Measurement and modelling campaigns, Presented at Sandia Blade Workshop, August 2016)

De studie van Sandia Laboratories bestond uit verschillende deelstudies, deels experimenteel, deels modelmatig. Een belangrijk onderdeel was het karakteriseren van erosie op wind turbine bladen.

Daartoe is de geometrie gescand van geërodeerde bladen die gedurende een bepaalde periode in bedrijf zijn geweest. Op basis van deze scans is een representatieve karakterisering van erosie opgesteld. Deze karakterisering is gebruikt om erosie aan schone profielen toe te voegen die vervolgens aerodynamisch zijn doorgemeten in de wind tunnel. De windtunnel metingen zijn uitgevoerd voor verschillende mate van erosie (variërend van licht tot ernstig) en de prestaties zijn vergeleken met de prestaties van schone profielen. Het Reynolds getal varieerde van 1.6 Miljoen tot 4 Miljoen. Erosie leidt dan tot een toename van de profielweerstand ( $D$ ) een afname van de profiel lift ( $L$ ) en aldus een afname in  $L/D$ . Met een wind turbine ontwerp code is vervolgens deze liftafname en weerstandstoename omgezet naar een opbrengstverlies.

De goede verhouding tussen de lector windenergie bij NHL en de project leider bij Sandia (David Maniaci) heeft er toe geleid dat de gehele database van windtunnel metingen aan NHL geleverd is, reeds voordat deze database (en dan nog slechts deels) publiek is gemaakt.

De metingen van Sandia zijn door een gaststudent van het Franse Ensiame bij NHL geanalyseerd waarbij in het bijzonder is gekeken naar het effect van het Reynoldsgetal op de aerodynamische profielprestaties. Refereer naar N. Vauchon Impact of erosion on airfoils, Student thesis report, NHL, 2017

De meeste windtunnel metingen (ook die van Sandia) zijn namelijk uitgevoerd bij relatief lage Reynoldsgetallen, zeg tot 4 Miljoen. Het Reynoldsgetal op moderne (ca 12 MW) off-shore turbines is aanmerkelijk hoger, zeg 15 Miljoen. Omdat het Reynoldsgetal grote invloed heeft op de lift en weerstand mag verwacht worden dat het aerodynamisch effect van erosie sterk Reynoldsafhankelijk zal zijn.

## RESULTATEN EN KNELPUNTEN

### AD. 1 VLIEGEN OP ZEE EN LAND

#### KNELPUNTEN

- Windstilte betekent niet of nauwelijks kunnen bedienen bladposities om naar het volgende blad te draaien
- Magnetische *interference* van schip op de kompas van de UAV
- Zeeziekte
- Sterke stroming waardoor positionering van de boot problemen oplevert
- Foto's van *edges* richting de tip zijn erg lastig te focussen. Te smal t.o.v. achtergrond. Drone hier lager laten vliegen en de camera omhoog pitchen.
- Schone bladen lastig om focuspunt te vinden. Focus op vuil en schade ideaal.
- Reserveonderdelen moeten van de wal komen. Noodzakelijk om alles minimaal in tweevoud beschikbaar te hebben
- Gedurende het project is gebleken dat het toegang krijgen tot windturbineparken voor het maken van opnamen lastiger en tijdrovender is dan aanvankelijk gedacht. Bovendien was in de beschikbare parken geen representatieve hoeveelheid van defecten aanwezig op de turbines die nodig is voor een grondige validatie van de algoritmen. Na het opstellen van een zo volledig mogelijke taxonomie van defecten en omgevingsvariaties is duidelijk geworden dat er een zeer groot aantal resources nodig is om een dataset met afbeeldingen compleet te maken. Het is daarom het projectteam niet gelukt om de dataset compleet te maken.
- De UAV moet in verband met veiligheid op minimale afstand blijven van het windturbineblad. De gebruikte UAVs kunnen een maximaal gewicht aan payload meenemen. Dit beperkt het maximale gewicht voor accu, gimbal, camera en lens. De beperkingen van de gimbal limiteren de maximale brandpuntsafstand van de lens ivm bewegingsonscherpte. Deze beperkingen zijn bepalend voor het kleinste detail dat zichtbaar is op de opnamen.

### AD. 2 AUTOMATISEREN VISUELE INSPECTIES

#### RESULTATEN

Binnen het lectoraat Computer Vision van NHL Stenden Hogeschool is veel relevante ervaring opgedaan met Computer Vision en Deep Learning. In het bijzonder is er kennis en ervaring opgedaan met een veel belovende AI-techniek Deep Learning binnen complexe toepassingen. Verder is binnen de looptijd van het project uitvoerig gewerkt aan de verdere ontwikkeling van Twirre architectuur ten behoeve van autonoom vliegen met drones. Er is gepubliceerd over de Twirre architectuur onder de MIT open source licentie (op GitHub).

- 9 onderzoeksprojecten van een semester door staf KCCV&DS samen met studenten.
- Nieuwe kennis op het gebied van CV&DS, met name op het gebied van de veel belovende kunstmatige intelligentie techniek deep learning.
- De kennis om de transitie van de traditionele machine learning naar deep learning te kunnen maken.
- Deep Learning verwerkingspijplijn : beelden annoteren en trainen diverse deep learning architecturen, evalueren architecturen en testen architecturen.
- Meerdere deep learning architecturen getuned en gebenchmarked op de beschikbare data sets. Zowel object detectie als segmentatie aanpak.

- Demonstrator ontwikkelt voor deep learning inference voor de gemaakte data sets en deep learning architectures. Resultaten kunnen per opname afzonderlijk bekeken worden of geaggregeerd over de gekozen data set.
- Verankeren opgedane kennis op het gebied van CV&DS in minor CV&DS, die landelijk wordt aangeboden via KiesOpMaat.
- Verankeren opgedane kennis op het gebied van CV&DS in de in ontwikkeling zijnde professionele master CV&DS.
- Opedane kennis wordt hergebruikt in andere toegepaste onderzoeksprojecten van het KCCV&DS.
- De rapid prototype aanpak is volledig geïntegreerd in de Design Based Education (DBE) en Design Based Research (DBR) aanpak die het KCCV&DS nu gebruikt in zijn onderwijs en projecten.
- Leren beheren van de complexe hardware en software die nodig is om deep learning efficiënt en effectief te kunnen inzetten in onderzoek en onderwijs.
- Participatie in de Nederlandse AI Coalitie (NLAIC).

---

## KNELPUNTEN

- Beschikbaar zijn van een dataset met opnames en annotatie van alle type fouten en onder representatieve licht- en weersomstandigheden
- Tijdens het annotatieproces door de domeinexpert is gebleken dat het nauwkeurig annoteren van opnames van windturbinebladen voor diverse typen defecten moeilijk is. De voornaamste reden hiervoor is dat de kwaliteit van de afbeeldingen, die door de drones gemaakt zijn, nog niet voldoende details bevat.
- Het annoteren van de beelden kost veel tijd. Door een net op de markt zijnde state-of-the-art softwarepakket te gebruiken kon de annotatietijd per opnamen flink worden teruggebracht in de laatste fase van het project.

## AD. 3 AUTOMATISEREN Vliegproces

Na uitvoerig marktonderzoek en diverse congres- en beursbezoeken en de algemene verwachting, dat een dergelijke innovatie -volledig autonoom- binnen de windbranche nog minimaal 10 jaar duurt en samen met de complexiteit van het beschikbaar krijgen van windturbines en de vertraging die dit heeft gehad op werkpakket 1 en werkpakket 2, is binnen de looptijd van dit project geen tijd beschikbaar geweest voor verder onderzoek.

---

## RESULTATEN

- Kennis op het gebied van UAVs en regelgeving.
- Twirre architectuur voor het autonoom vliegen met UAVs.
- Demonstrator van autonoom vliegende UAV gebaseerd op de Twirre architectuur die onder indoor condities een model van een windmolen blad opzoekt, ernaartoe vliegt en het inscant.
- Eerste testen met UAV op basis van Twirre architectuur onder outdoor condities.
- Samenwerking met Saxion hogeschool binnen meerdere RAAK SIA projecten m.b.t. UAVs.

## AD. 4 INTEGRATIE PROTOTYPE

De uitvoering van werkpakket 4 is niet binnen de projectperiode gestart.

## AD. 5 IMPACT VAN VERVUILING EN BESCHADIGING (EROSIE) OP DE PRESTATIE VAN OFFSHORE WINDTURBINES

### RESULTATEN

- Een database van wind tunnel metingen geleverd door Sandia Laboratories aan verschillende profielen (Naca 63418 en SERI S814). Het Reynoldsgetal varieert tussen 1.6 Miljoen en 4 Miljoen. Refereer en acknowledge naar D. Maniaci Leading Edge Erosion: Measurement and modelling campaigns, Presented at Sandia Blade Workshop, August 2016).
- Inzicht in de afname van L/D (de belangrijkste aerodynamische performance indicator voor profielen) door erosie. De afname in L/D door erosie blijkt 50% te kunnen zijn. Refereer naar N. Vauchon Impact of erosion on airfoils, Student thesis report, NHL, 2017
- Inzicht in de Reynoldsafhankelijkheid van de aerodynamische erosie-effecten. De range van Reynoldsgetallen bleek echter te beperkt om de afhankelijkheid met zekerheid te kunnen vaststellen. Wel heeft het betere begrip van de fysica geleid tot een verwachting mbt het Reynolds effect. Er wordt nu verwacht dat 2 fenomenen een tegengestelde rol spelen: Bij een hoger Reynoldsgetal verplaatst het z.g. transitiepunt naar voren waardoor erosie een minder sterk aerodynamisch effect zal hebben. Aan de andere kant leidt een hoger Reynoldsgetal tot een dunnere grenslaag waardoor een bepaalde mate van erosie relatief gezien belangrijker is en dat leidt dus tot een sterker aerodynamisch effect Refereer naar N. Vauchon Impact of erosion on airfoils, Student thesis report, NHL, 2017
- Inzicht in de afname van jaarproductie door erosie. Sandia heeft de lift en weerstand die is gemeten bij representatieve erosie, ingevoerd in een wind turbine ontwerp code. Voor de NREL 5MW referentie turbine wordt dan een afname in jaarproductie gevonden van ca 2.5% bij een windklimaat met jaargemiddelde windsnelheid van 8 m/s. Voor een windklimaat met een jaargemiddelde windsnelheid van 5 m/s is het verlies 4.5%. Opgemerkt moet worden dat deze resultaten erg afhankelijk zijn van de mate van erosie, van de gebruikte profielen en van de wind turbine. Ook zijn de verliezen gebaseerd op een Reynoldsgetal van 4 Miljoen terwijl hierboven is gemeld dat een moderne windturbine een veel hoger Reynoldsgetal heeft.

---

## KNELPUNTEN

- Gebrek aan goede meetdata zowel in de wind tunnel als in het veld waarmee de aerodynamica van geërodeerde bladsecties kan worden bepaald. Recent zijn er verschillende nationale projecten gestart (bijv WindCore en Airtub) die deze lacune pogen te vullen. Het zal echter moeilijk blijven om in de wind tunnel de effecten van erosie bij Reynoldsgetallen representatief voor huidige off-shore wind turbines te kunnen bepalen. Dit is een gevolg van het feit dat windtunnelmetingen per definitie worden uitgevoerd aan schaalmodellen. De resulterende kleine schaal leidt dan tot een laag Reynoldsgetal (zeg tot 4 Miljoen). Een alternatief zou kunnen zijn om metingen uit te voeren in een pressurized tunnel zoals het door de NHL lector windenergie gecoördineerde EU project AVATAR <https://www.eera-avatar.eu/> In deze tunnel zijn metingen zijn verricht tot een Reynoldsgetal van wel 15 Miljoen. Deze metingen zijn echter alleen aan schone profielen uitgevoerd en blijken erg duur. Een ander alternatief zou kunnen zijn om het Reynoldseffect te bepalen met geavanceerde C(omputational) F(luid)D(ynamics) berekeningen. In het AVATAR project bleken echter zelfs de meest geavanceerde CFD tools problemen te hebben met het correct berekenen van de profielprestatie bij hoger Reynoldsgetallen.



## SPINN OFF EN BIJDRAGE VERSTERKING KENNISPOSITIE

### LECTOR COMPUTER VISION & DATA SCIENCE (NHL STENDEN HOGESCHOOL)

Door deelname aan dit project heeft het lectoraat veel relevante ervaring opgedaan met Deep Learning systemen en heeft zijn netwerk internationaal kunnen uitbreiden.

### EPOMAT

Door deelname aan dit project heeft epoMAT contacten bij technologieleveranciers, asset owners, (potentiële) klanten en kennisinstituten kunnen uitbreiden. De kennis die epoMAT tijdens het project heeft opgedaan heeft er toe bijgedragen om bladinspectie en reparaties on hold te zetten. Desgevraagd (passief) acteert epoMAT als consultant en adviseur op het gebied van Windturbine rotorbladen. Door het project heeft epoMAT meerdere commerciële opdrachten uitgevoerd.

### DUTCH DRONE COMPANY

DDC heeft samen met Droneview voor Eneco het Princes Amalia Windmolen Park geïnspecteerd. Het ging hierbij om 60 windturbines welke elk vanaf een boot geïnspecteerd zijn. Daarnaast heeft DDC heeft samen met Droneview 6 Eneco windturbines onshore geïnspecteerd.

### DRONEVIEW

Gebleken is dat er offshore totaal andere uitdagingen zijn in het vliegen met drones dan er zijn voor onshore vliegen. Te denken valt onder andere aan een schip die meebeweegt op de golven van de zee waardoor opstijgen van de drone lastig is en veel ervaring vraagt van de drone operator. Door magnetische interferentie wordt de radio communicatie sterk verstoord. Het oplossen van deze problemen is een bijzonder leerzame bezigheid gebleken, waardoor Droneview vele male efficiënter werkt dan voorheen. Hetgeen de concurrentiepositie van Droneview sterk verbeterd heeft.

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### KAN EEN UAV OPNAMEN MAKEN DIE KWALITATIEF VOLDOENDE ZIJN?

De opgenomen beelden door de UAVs waren van onvoldoende kwaliteit om door een menselijke expert met gewenste nauwkeurigheid geannoteerd te kunnen worden. Om kwalitatief betere beelden te krijgen zal er naar UAVs met een hogere payload kunnen worden gekeken die betere (en zwaardere) gimbals met high-end camera's met langere brandpuntafstanden aankunnen.

### KAN DE BEOORDELING VAN DE BEELDEN WORDEN GEAUTOMATISEERD?

Een deep learning verwerkingspijplijn om beelden te annoteren, te trainen en te testen is ontwikkeld en getest. Verder is er een demonstrator ontwikkeld voor deep learning inference.

Om een uitspraak te doen over de kwaliteit van de foutdetectie en classificatie software is een complete en nauwkeurig geannoteerde dataset nodig. Deze dataset is nu nog niet beschikbaar.

### KAN HET Vliegproces GEAUTOMATISEERD WORDEN?

Een demonstrator die het vliegproces automatiseert is ontwikkeld en getest onder indoor condities. Ingeveen door de verwachting dat autonoom vliegen de komende jaren niet juridisch toegestaan zal worden in Nederland, is deze onderzoekslijn gestaakt. De resultaten zijn open source gepubliceerd en worden door in gezamenlijk RAAK-project van NHL Stenden en Saxion Hogeschool verder ontwikkeld.

## OVERZICHT OPENBARE PUBLICATIES & PRESENTATIES

- Wind days Juni 2016
- Noord-Hollandse Materialenkring September 2016
- XConnect Oktober 2016
- Antea groep, Oktober 2016
- RoSF November 2016
- DroneHub GAE, November 2016
- The Potato Valley, November 2016
- Minor Olie en Gas en Windenergie, November 2016
- Wetterskip, December 2016
- Leeuwarden Courant, December 2016
- Dagblad van het Noorden, December 2016
- DroneHub GAE, Jan 2017
- Frisian Design Factory, Jan 2017
- RoSF, Jan 2017
- Innovatie Cluster Drachten, Jan 2017
- Hogeschool Arnhem Nijmegen, Maart 2017
- HZPC, maart 2017
- Vereniging Hogescholen, April 2017
- Vision & Robotics, Juni 2017
- Aerialtronics, Jul 2017
- NHL Studie Accountancy en Bedrijfseconomie, Sep 2017
- National Informatica en Onderwijs congres, Feb 2018
- Symposium CV&DS Juli 2018
- Space 53, Okt 2018
- Symposium CV&DS Februari 2018
- Eneco Januari 2019
- Symposium CV&DS Juli 2019

## EXTRA EXEMPLAREN

Er zijn geen extra kosten voor het aanvragen van een rapport in pdf-format. Wanneer u een e-mail stuurt aan [cornelis.wartena@nhlstenden.com](mailto:cornelis.wartena@nhlstenden.com) met daarin het aantal en e-mailadres, ontvangt u per omgaande digitaal een exemplaar van het rapport. Het is niet mogelijk een hard-copy aan te vragen.

## INFORMATIE

Voor extra informatie kunt u contact opnemen met Cornelis Wartena door een e-mail te sturen naar [cornelis.wartena@nhlstenden.com](mailto:cornelis.wartena@nhlstenden.com)

## SUBSIDIE

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

## BRON VERMELDING

<https://www.thegwpf.com/offshore-wind-fiasco-green-industry-faces-billions-in-compensation-for-early-repairs/>

[https://www.researchgate.net/figure/Cross-sections-of-different-wind-turbine-blade-constructions-a-with-one-shear-web-b\\_fig1\\_287316338](https://www.researchgate.net/figure/Cross-sections-of-different-wind-turbine-blade-constructions-a-with-one-shear-web-b_fig1_287316338)