

SAWOP publiek eindrapport

TNO 2023 P10689 – 17 Mei 2023

SAWOP publiek eindrapport

Auteurs	L.J. Laas, K.W. Hermans
Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Aantal kopieën	
Rapporttekst	TNO Publiek
Aantal pagina's	35 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	RVO
Programmanaam	TKI Wind op Zee – Hernieuwbare Energieregeling
Projectnaam	Sensor Assisted Windfarm Optimisation (SAWOP)
Projectnummer	TEHE118022

Onze partners



Verantwoording

Het SAWOP project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Nationale regelingen EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Alle rechten voorbehouden

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

© 2023 TNO

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	3
1 Doelstelling.....	4
2 Resultaten en toepassing.....	6
2.1 Inleiding.....	6
2.2 Overzicht van de projectwerkpakketten.....	6
2.3 Resultaten.....	8
2.3.1 Kalibratie van de meetsensoren.....	8
2.3.2 Uitvoering van de meetcampagne.....	13
2.3.3 Analyse van de efficiëntie van individuele windturbines (WP3).....	14
2.3.4 Methodes voor het monitoren en optimaliseren van hele windparken (WP4).....	20
3 Bijdrage Sawop aan kostenverlaging en versterking kennispositie.....	27
4 Spin off binnen en buiten de sector.....	30
5 Openbare publicaties.....	31
6 Geciteerde werken.....	33
7 Verkrijgbaarheid rapport en contact.....	35

1 Doelstelling

Offshore windpark exploitanten hebben beperkte middelen om de prestaties van windparken te monitoren.

Optimalisatie van de prestaties van offshore windparken is afhankelijk van monitoring van het windpark, zoals de vermogen opbrengst van de turbines. Exploitanten hebben beperkte mogelijkheden om de prestaties van hun offshore windparken efficiënt te monitoren, aangezien de toegepaste meetmethoden grote investeringen vergen en tevens gebaseerd zijn op beperkte informatie. Echter in de afgelopen jaren zijn nieuwe windmeting technologieën ontwikkeld die deze situatie kunnen verbeteren, zoals spinner sensoren (iSpin) en gondel lidar systemen (nacelle mounted lidar).

Doel van het project: ontwikkeling van windturbine vermogensmonitoring en windpark optimalisatie strategieën

Er zijn drie subdoelstellingen gedefinieerd om het doel van het project te bereiken:

1. Verdere ontwikkeling van objectieve methoden om de prestaties van windturbines te monitoren. Dit vraagt om accurate oplossingen die voor alle partijen acceptabel zijn. Aangezien de conventionele methode met gebruik van een (standaard) meteorologische mast met cup anemometers vanwege de hoge kosten niet geschikt is, zijn geavanceerdere opties nodig. Daarvoor moeten de spinner-sensor en nacelle lidar technologie verder worden ontwikkeld voor de individuele prestatiebeoordeling van windturbines. Deze meettechnieken dienen te worden gedemonstreerd en geïmplementeerd in normen in overeenstemming met de IEC 61400-12-1 [1], IEC 61400-12-2 [2] en IEC 61400-50-3 [3] ontwikkelingen. In dit project ligt de focus op herhaalbaarheid, uitwisselbaarheid en stabiliteit van de metingen inclusief een correcte onzekerheidsbeoordeling.
2. De tweede doelstelling is het ontwikkelen van strategieën voor het monitoren van de prestaties van volledige windturbineparken die nog ontbreken. Dit vereist nauwkeurige meetgegevens wat niet kan worden bereikt vanwege hun hoge meetonzekerheid van de gondel anemometer die op elke windturbine is geïnstalleerd. Daarom is het noodzakelijk om prestatiebeoordeling voor turbines in het zog te ontwikkelen op basis van spinner anemometer en nacelle lidar technologie. Hier ligt de focus op volledig zog, half zog en meervoudig zog situaties.
3. Voortbouwend op het bovenstaande, is de derde doelstelling het ontwikkelen en verder verfijnen van optimalisatiestrategieën voor windturbineparken, met name door gebruik te maken van de unieke en uitgebreide input van de nieuwe sensoren. Dit laatste is de sleutel in de optimalisatie-ontwikkeling. Het maakt het mogelijk om scheefstanden van de turbines tot een minimum te beperken en geavanceerde zog-controle toe te passen. Beide technologieën dragen bij aan het optimaliseren van de jaarlijkse energieproductie (AEP).

Deze doelstellingen kunnen worden behaald door het uitvoeren van een uitgebreide meetcampagne die de vereiste datasets zal opleveren voor het ontwikkelen van de technologie, het implementeren/toepassen van standaarden en het ontwikkelen van innovatieve prestatiebeoordelingsmethoden.

De SAWOP partners zijn:

- Vattenfall N.V.,
- Shell Global Solutions International B.V.,
- ROMO Wind A/S, per januari 2021 overgegaan in Nabla Wind Hub
- TNO
- Stichting GROW

2 Resultaten en toepassing

2.1 Inleiding

Het Sawop project is op 1 januari 2021 van start gegaan. Het oorspronkelijke voorstel was gebaseerd op een uitgebreide offshore meetcampagne in het windpark Egmond aan Zee (OWEZ). Door operationele problemen was het voor de toenmalige eigenaar niet mogelijk om het park beschikbaar te stellen en was genoodzaakt te stoppen als partner van het Sawop project. Na een intensieve zoektocht bleek het voor partner Vattenfall mogelijk om haar near shore windpark Klim Fjordeholme in Denemarken beschikbaar te stellen voor de Sawop meetcampagne. Het effect op meetresultaten t.o.v. een offshore meetcampagne werd ingeschat als aanwezig maar niet als onoverkomelijk. Voor het vinden van trends en het valideren van de meetresultaten en modellen werd het Klim Fjordeholme windpark als zeer goed alternatief beschouwd.

2.2 Overzicht van de projectwerkpakketten

De volgende werkpakketten (WP) zijn gedefinieerd en uitgevoerd:

WP1 Voorbereiding van de near-shore shore Meetcampagne

Activiteiten omvatten ontwikkeling en verbetering van kalibratietechnieken voor nacelle lidar en scanning lidar. Het voorbereiden van de installatie van iSpin systemen en nacelle lidars op de Siemens windturbines en het plaatsen van een profiling lidar en scanning lidar in het omringende gebied.

WP2 Meetcampagne op Klim Fjordeholme

De meetcampagne wordt uitgevoerd en er wordt een database met hoogwaardige meetgegevens opgebouwd en gedeeld tussen de partners. De campagne voorziet in een eerste referentiefase en een tweede fase waarin de nacelle lidars worden omgewisseld met als doel om inzicht te krijgen in de herhaalbaarheid en vergelijkbaarheid van de twee typen.

De volgende meetinstrumenten zijn gebruikt:

- acht ROMO iSpin spinner anemometers
- twee ROMO kompas systemen
- Leosphere WindCube Nacelle lidar (WCN)
- ZephIR Dual Mode Nacelle lidar (ZDM)
- ZX 300M ground based profiling lidar
- Leosphere WindCube 200S scanning lidar
- Twee sets relatieve luchtvochtigheidsmeters (RH meters), temperatuur en luchtdruk meters geïnstalleerd op dezelfde turbines als de nacelle lidar systemen (WKV D03 en WKV B02)

In [Figuur 2.1](#) is een overzicht gegeven van de positie van de meetsensoren tijdens de meetcampagne op Klim Fjordeholme.



Figuur 2.1: Overzicht van meetinstrumenten in Klim Fjordeholme

De meetcampagne op het Klim Fjordeholme windpark met de volledige set van meetinstrumenten heeft gelopen van augustus 2021 t/m juni 2022. De omwisseling van de nacelle lidars op de turbines D02 en B03 heeft plaatsgevonden in maart 2022.

WP3 Monitoring van de prestaties van individuele windturbines

Afgestemd op de meetcampagne wordt de binnenkomende data geanalyseerd en methoden verder ontwikkeld. De taken zijn gericht op het identificeren van prestatielacunes van individuele windturbines, mogelijke standaardisatie van prestatiebeoordelingen voor de gebruikte iSpin sensoren en nacelle Lidar's en het ontwikkelen van prestatie monitorstechnieken voor turbines die in het zog staan.

WP4 Verbeterde werking van windmolenparken

Dit werkpakket bouwt voort op het monitoren van de prestaties van individuele windturbines in free flow en in zog condities (WP3) en omvat het ontwikkelen van een methodologie voor het monitoren van de prestaties van volledige windmolenparken met behulp van de gebruikte sensoren. De data wordt gebruikt om inzicht te creëren in de zog in het windpark en het vinden van een optimalisatiestrategie bijv. door verdere ontwikkeling en verfijning van Active Wake Control.

WP5 Kennisoverdracht en verspreiding

De opgedane kennis en resultaten worden binnen het project gedeeld door middel van projectbijeenkomsten. Daarnaast worden informatie en resultaten over het project verspreid via openbaar beschikbare rapporten, publicatie in gerenommeerde tijdschriften en bijdragen aan internationaal erkende conferenties en samenwerkings- en normalisatiefora.

2.3 Resultaten

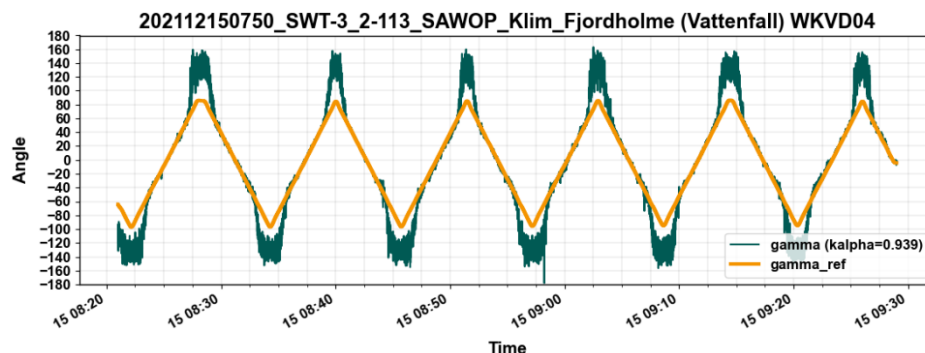
2.3.1 Kalibratie van de meetsensoren

Alle meetinstrumenten die zijn ingezet in de meetcampagne zijn vooraf gekalibreerd. De iSpin systemen van Nabla Windhub zijn door Deutsche WindGuard gekalibreerd in een windtunnel (Figuur 2.2). De ZX 300M ground-based profiling lidar is gekalibreerd door de fabrikant tegen een meteorologische mast.



Figuur 2.2: Windtunnel kalibratie van iSpin sensor

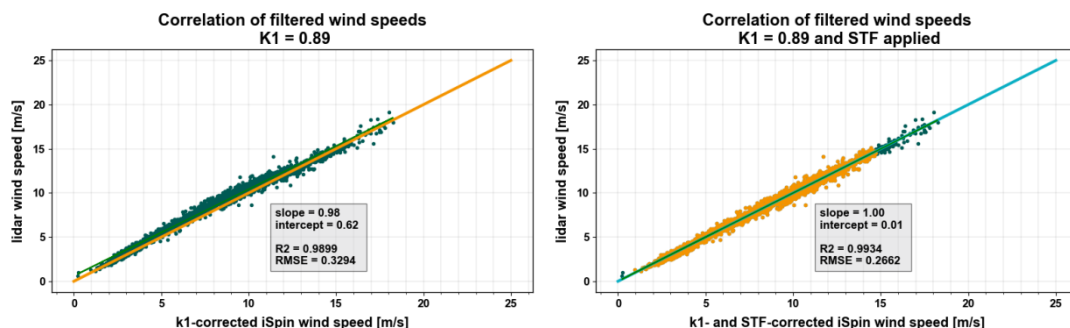
De kalibratie van de iSpin sensoren in het veld is uitgevoerd door de turbine een aantal maal $\pm 90^\circ$ te roteren ten opzichte van de windrichting, bij lage windsnelheid. Hieruit kan de $K\alpha$ relatie worden bepaald, waarmee de yaw misalignment van de iSpin is gekalibreerd. De metingen in het Klim Fjordeholme windpark zijn in Figuur 2.3 geplot.



Figuur 2.3: $K\alpha$ gecorrigeerde yaw misalignment γ in donkergroen en de referentie misalignment γ_{ref} in oranje

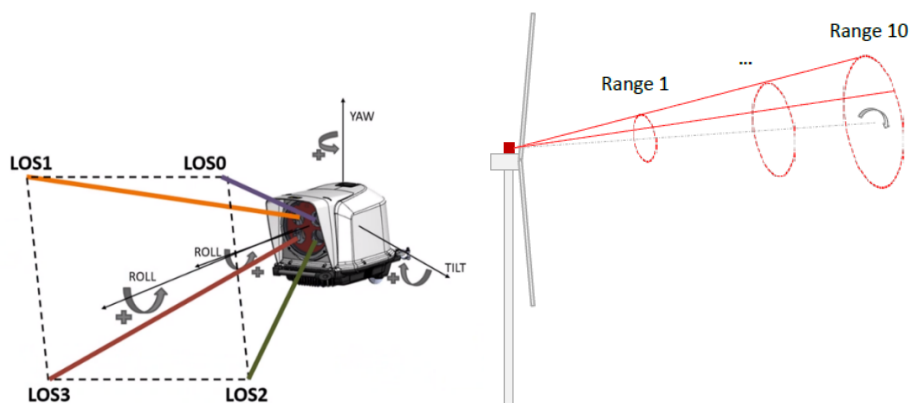
Daarnaast dient een overdrachtsfunctie bepaald te worden voor de windsnelheid van de iSpin naar een positie buiten de inductiezone. Dit wordt bereikt door middel van een k_1 factor en niet-lineaire

spinner overdrachtsfunctie (STF), bepaald door te vergelijken met de windsnelheid van de ZX300M profiling lidar (Figuur 2.4).



Figuur 2.4: Correlatie tussen iSpin windsnelheid, met k1 (links) en k1+STF (rechts) correctie, en referentie windsnelheid van ZX300M

Voor de nacelle lidars is een uitgebreide white box kalibratie uitgevoerd tegen de toenmalige norm in voorbereiding IEC 61400-50-3 [3]. Bij deze kalibratie worden niet alleen de windmetingen gekalibreerd maar worden ook de posities van de laserbundel(s) getest door verificatie van de hellingshoeken en op nauwkeurigheid van de meetafstand.



Figuur 2.5: Schema met locatie van de vier laser stralen van de WindCube nacelle lidar (links), en de roterende enkele straal van de ZDM (rechts)

De geometrische controle metingen zijn bij TNO in en buiten het laboratorium in Petten uitgevoerd. De controle van het scan patroon en de hellingshoeken is mede uitgevoerd m.b.v. infrarood camera's in een zwarte ruimte (Figuur 2.6). De onzekerheid berekening voor de hellingshoek met deze methode is vastgesteld op <0,3 graden. De meetafstand is bepaald door de lidar op een gebouw te richten.



Figuur 2.6: TNO medewerker neemt de cirkelvormige gescande laserpatroon van de ZDM lidar die via het IR camera beeld zichtbaar wordt over op de wand

Na deze verificatie van de positionering zijn de nacelle lidars op een afstand van 270 meter tegen een metrologische mast (meetmast) op de EWEF testfaciliteit in Wieringermeer geverifieerd ([Figuur 2.7](#) en [Figuur 2.8](#)).



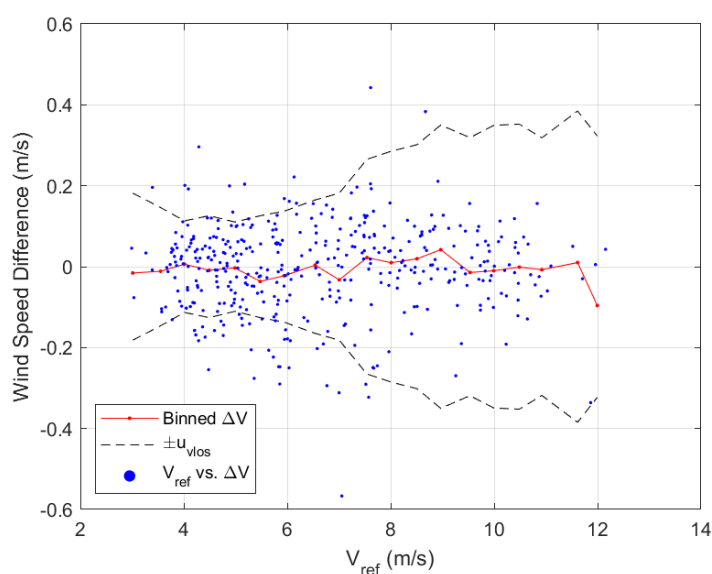
Figuur 2.7: Plaatsing van de twee nacelle lidars en scanning lidar in Wieringermeer



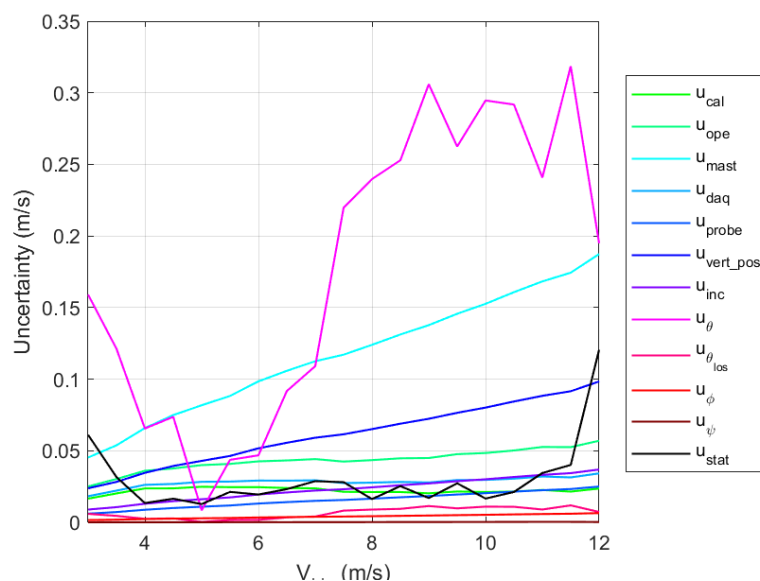
Figuur 2.8: Aanzicht van de meetmast vanaf de lidar positie tijdens de kalibratie

Ten slotte zijn alle onzekerheden opgesomd en gecombineerd tot een algemene lin of site (LOS) windsnelheidsonzekerheid per windsnelheidsklasse, die binnen $\pm 0,4$ m/s blijft.

Een voorbeeld van de kalibratieresultaten voor de zichtlijn van straal 3 (LOS 3) van de lidar van de Wind Cube Nacelle is te zien in een plot van de windsnelheidsfout ΔV vs. V_{ref} met bepaalde onzekerheidsgrenzen $\pm u_{vlos}$ (Figuur 2.9). In Figuur 2.10 zijn de individuele bijdrages aan de totale onzekerheid weergegeven voor een van de laser bundels van de WCN lidar.



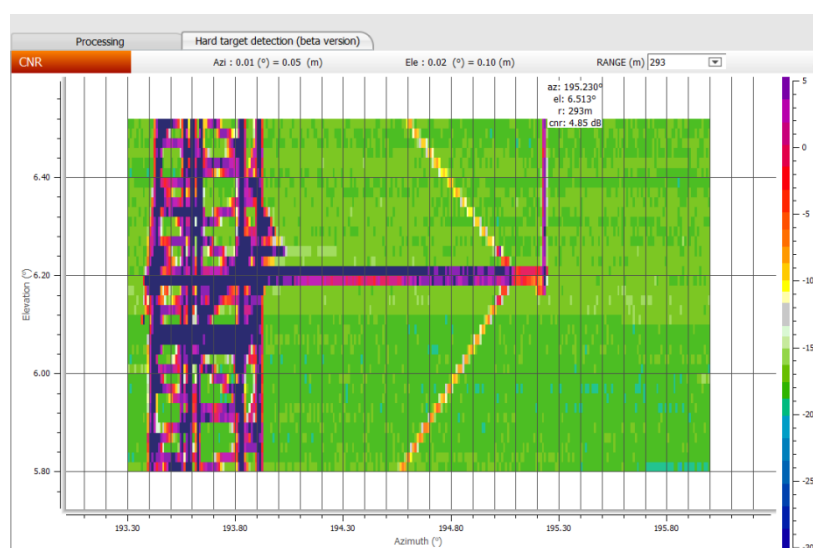
Figuur 2.9: ΔV en $\pm u_{vlos}$ vs. V_{ref} voor de WCN LOS 3 kalibratie



Figuur 2.10: Onzekerheidscomponenten van straal 3 van de WCN lidar geplot tegen gebinde windsnelheid

In **Figuur 2.10** is te zien dat de primaire componenten van de onzekerheid afhankelijk zijn van de nauwkeurigheid van de meteorologische mast (onzekerheid mastwindhoek, u_{θ} , en de onzekerheid van de stromingsvervorming, u_{mast}). Dit blijkt een belangrijke zwakte van de toegepaste methodologie te zijn: de onzekerheid van de lidar is sterk afhankelijk van de apparatuur die wordt gebruikt om deze te valideren.

Voor de positionering van de scanning lidar is de ruis op het meetsignaal (CNR) in kaart gebracht voor kleine stapjes in de hoogte en azimut hoek (**Figuur 2.11**). Hiermee is de laser bundel precies te richten op de referentiesensor van de meetmast. Ook voor de scanning lidar was de onzekerheid van de meetmast de grootste bijdrage in de totale meetonzekerheid van de 'line-of-sight' windsnelheid langs de laser bundel.



Figuur 2.11: Aanzicht van een bevestigingsarm van de meetmast, zichtbaar in een plot van de ruis op het meetsignaal (CNR)

2.3.2 Uitvoering van de meetcampagne

Na de kalibratie zijn de instrumenten getransporteerd en geïnstalleerd in het veld, en op de turbines. De volgende mijlpalen zijn bereikt in de meetcampagne:

- Installatie iSpin systemen (April 2021) en kalibratie in het veld
- Installatie van de profiling lidar en scanning lidar op de grond (Augustus 2021)
- Installatie lidars en luchtdruk, temperatuur en vochtmeters op de gondel (Augustus 2021)
- Uitwisseling van de nacelle lidars tussen turbines D03 en B02 (Maart 2022).
- Weghalen van lidars op de gondel en lidars op de grond (Augustus 2022)
- Weghalen van iSpin systemen (verwacht voor zomer 2023)



Figuur 2.12: Sensoren voor luchtdruk, temperatuur en luchtvochtigheid (links), ZDM lidar (midden), WCN lidar (rechts)



Figuur 2.13: Drie iSpin anemometers in de spinner, en de WCN lidar op de gondel



Figuur 2.14: Scanning lidar geplaatst 1100 meter ten zuidwesten van de wind turbines (zie [Figuur 2.1](#) voor de positionering ten opzichte van het windpark)

Tijdens de campagne is de kruihoeck van enkele turbines geverifieerd door de turbines naar een vast referentiepunt te richten. Hier is een afwijking van het kruihoeck signaal gevonden tussen de 5.6 en 14.9° ([Tabel 2.1](#)). Dit betekent niet automatisch dat de turbines ook verkeerd uitgelijnd staan ten opzichte van de windrichting, maar het kan wel een verkeerde interpretatie van de kruihoeck tot gevolg hebben in analyses en simulaties (binnen de werkpakketten WP3 en WP4).

Tabel 2.1: Afwijking van kruihoeck signaal

Turbine	Afwijking kruihoeck signaal	Datum van bepalen
D03	14.9 °	16-3-2022 12:57
B02	8.1 °	16-3-2022 16:51
D02	13.4 °	24-5-2022 09:57
B01	5.9 °	24-5-2022 11:12

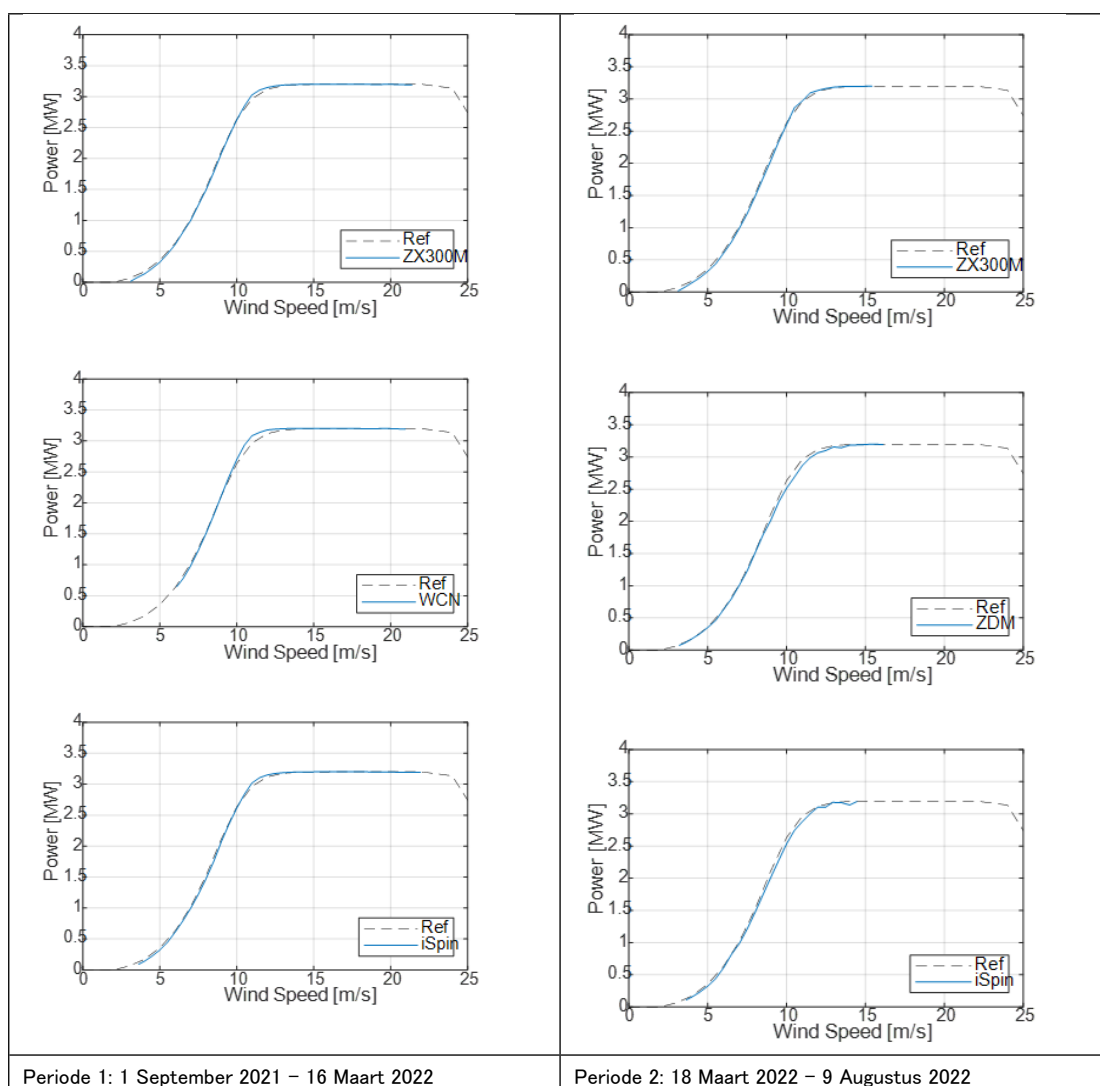
2.3.3 Analyse van de efficiëntie van individuele windturbines (WP3)

In werkpakket 3 ligt de focus op het ontwikkelen van methodes om de efficiëntie van individuele turbines te monitoren. Hiertoe worden nacelle lidars en iSpin spinner anemometer systemen ingezet om de inkomende windsnelheid te meten. Daarnaast wordt de uitlijning van de turbines ten opzichte van de windrichting bepaald. Als de turbines schuin op de wind staan wordt dit ‘yaw misalignment’ genoemd.

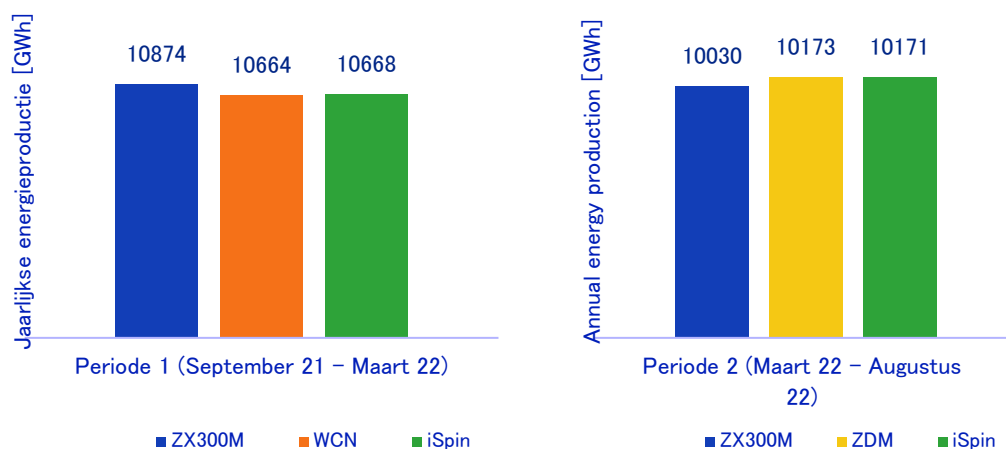
Een belangrijke graadmeter van wind turbine efficiëntie is de vermogenskromme waarin het opgewekte elektrisch vermogen wordt geplot tegen de (vrije) wind snelheid. Volgens de norm IEC 61400-12-1 [1] en IEC 61400-12-2 [2] kan de vermogenskromme worden bepaald door de windsnelheid van een meetmast, een profiling lidar, of een spinner anemometer. In de looptijd van het SAWOP project is norm IEC 61400-50-3 uitgekomen waarin het gebruik van nacelle lidars wordt beschreven voor het bepalen van de vermogenskromme.

Een typische afstand voor de rotor is twee en vier rotor diameters voor een meetmast of profiling lidar. In het Klim Fjordeholme windpark is de profiling lidar op een afstand van 260 meter, ofwel 2.3 rotor diameters, geplaatst van turbine D03. Dit bood de mogelijkheid om een vermogenskromme te bepalen voor beide merken nacelle lidar, en de windsnelheid van twee verschillende turbines te meten, één in de vrije aanstroom (D03) en één in het zog van de voorste rij turbines (B02) bij de meest voorkomende windrichting (zuidwesten).

Bij het vergelijken van de vermogenskrommes is enige discrepantie te zien tussen de vermogenskrommes van de profiling lidar, en de vermogenskromme van de nacelle lidar en iSpin systemen (Figuur 2.15). De verschillen tussen de iSpin en nacelle lidar zijn echter kleiner. Dit komt ook tot uiting in de jaarlijkse energieproductie (Figuur 2.16), die is berekend door de vermogenskromme te vermenigvuldigen met de jaarlijkse windsnelheid verdeling.

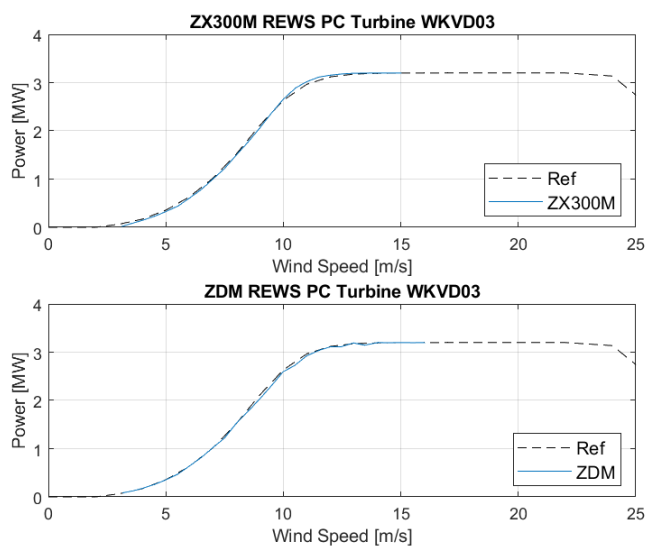


Figuur 2.15: Vermogenskrommes van turbine D03, genormaliseerd naar luchtdichtheid van 1.225 kg/m^3 en 10% referentie turbulentie intensiteit



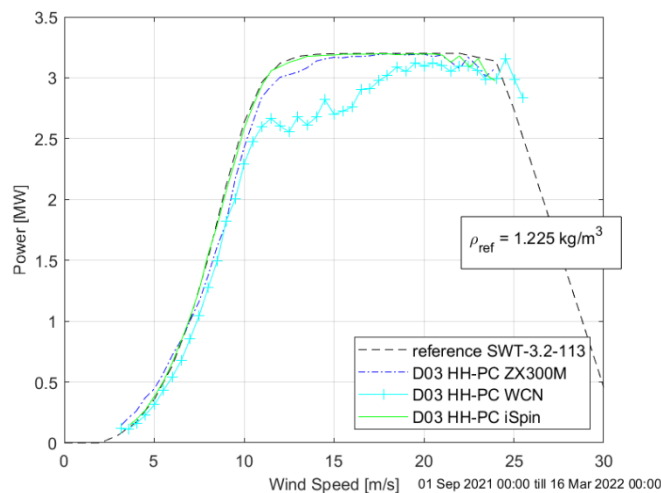
Figuur 2.16: Jaarlijkse energieproductie voor turbine D03

Naast het bepalen van de standaard vermogenskrommes volgens de normen op hub hoogte, is de rotor-equivalente windsnelheid bepaald voor de ZX300M profiling lidar, en ZDM.

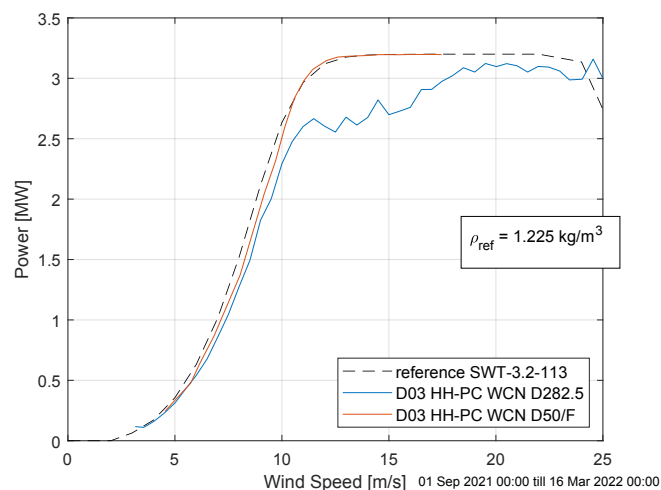


Figuur 2.17: Rotor equivalente windsnelheid voor de ZDM en ZX300M in een vermogenskromme van turbine D03

De bovenstaande vermogenskrommes zijn bepaald voor de sector vrij van zoggen en obstakels ($174 - 250^\circ$ voor wind turbine D03). Voor de volledige 360 graden sector worden de nacelle lidars verstoord door de zoggen van de omliggende turbines (**Figuur 2.18**). De vermogenskromme van de iSpin lijkt hier minder last van te hebben aangezien deze is gekalibreerd vanuit de meetpositie in de rotor naar een signaal dat de vrije aanstroming vertegenwoordigt ($k_1 + \text{STF}$ correcties, beschreven in sectie 2.3.1). Door een overdrachtsfunctie $F = V_{hor282.5}/V_{hor50}$ te bepalen in de vrije sector tussen de meetafstanden 50 en 282.5 m en deze toe te passen op de metingen van 50m voor de volledige 360 graden kan een betere vermogenskromme worden bepaald (**Figuur 2.19**).

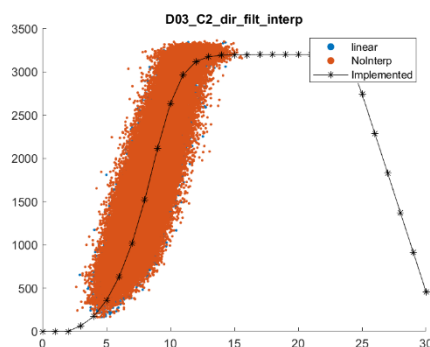


Figuur 2.18: Vermogenskromme voor turbine D03 voor de volledige 360° sector



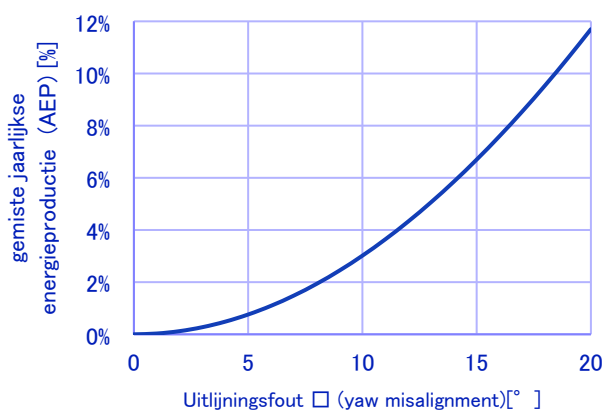
Figuur 2.19: Correctie op de nacelle lidar voor de 360° sector door de meetafstand van 50m (D50) te delen door de factor $F = V_{hor282.5}/V_{hor50}$ bepaald in de vrije sector

Er bestaan methodes om de vermogenskromme op een andere wijze in kaart te brengen. In de Langevin methode, ontwikkeld door de universiteit van Oldenburg [4], wordt het vermogen op een hogere frequentie uitgelezen (1Hz) en hieruit mathematische eigenschappen drift en diffusie bepaald. De meetpunten in [Figuur 2.20](#) zijn tijdstippen waarop de drift nul is. In een beperkte periode kunnen zo veel datapunten worden verzameld. Een voorwaarde is een aaneengesloten periode van hoogfrequentie scada data. In de praktijk is dit niet altijd haalbaar, maar de methode geeft wel de mogelijkheid om in kortere periodes een inzicht te krijgen in de efficiëntie van de turbine.



Figuur 2.20: Langevin meetpunten uit de periode 1–7–2022 11:30 tot 3–7–2022 02:00 (38,5 uur)

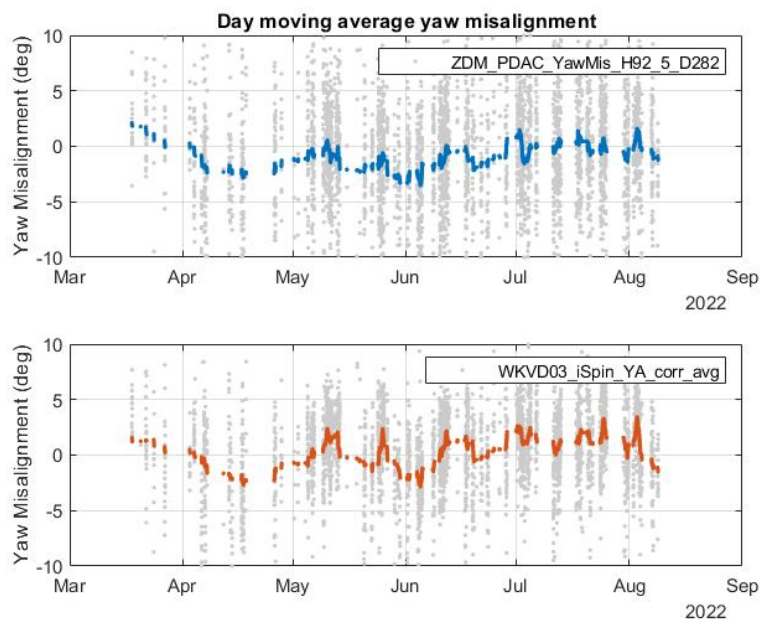
Naast de vermogenskrommes, is de uitlijning met de wind bepaald (yaw alignment). Een grote uitlijningsfout heeft een significante impact op de energieproductie (**Figuur 2.21**). In **Tabel 2.2** staat de uitlijningsfout weergegeven bepaald met de nacelle lidars en iSpin systemen. Het verbeteringspotentieel is beperkt omdat de uitlijningsfout niet veel groter dan 6 graden is. Het is de onderzoekers wel opgevallen dat de uitlijningsfout varieert over de tijd (**Figuur 2.22**) en omgevingscondities.



Figuur 2.21: Gemiste jaarlijkse energieproductie ($1 - \cos^2 \gamma$) door uitlijningsfout γ

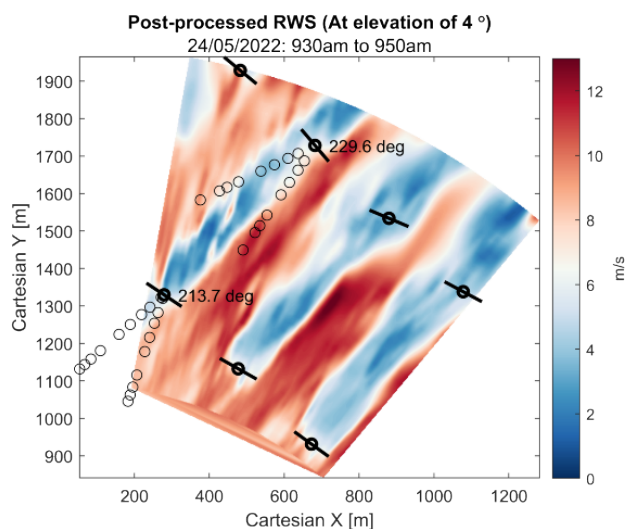
Tabel 2.2: Uitlijningsfout γ bepaald in periode 1 (September 2021 – Maart 2022) en periode 2 (Maart 2022 – Augustus 2022)

Meetinstrument	Turbine B02		Turbine D03	
	Periode 1	Periode 2	Periode 1	Periode 2
WCN lidar		-4.09°	0.78°	
ZDM lidar	-4.84°			-0.78°
iSpin	-3.28°	-6.19°	2.02°	0.62°



Figuur 2.22: Dag gemiddelde van uitlijningsfout voor turbine D03, bepaald met behulp van de ZDM nacelle lidar (blauw) en de iSpin (rood)

De zog condities zijn in kaart gebracht door de scanning lidar. Bij het instellen van het scan patroon moet een afweging gemaakt tussen de grootte van het meetvolume, meetresolutie en frequentie van de metingen op elk punt. Deze parameters zijn te beïnvloeden door het bereik en resolutie van de *range* (meetbereik), *azimuth* (horizontale hoek) en *elevation* (verticale hoek) in te stellen alsmede de snelheid waarmee de straal door de azimuth en elevation hoeken beweegt. In **Figuur 2.23** is de radiale windsnelheid (langs de straal van de lidar) geplot voor een periode van 20 minuten. In deze figuur zijn ook de kruihoeken van de turbines weergegeven van de scada data en de posities van de meetpunten van de nacelle lidars. Hier is zichtbaar dat afhankelijk van de meetafstand, de nacelle lidar straal in- of uit het zog kan meten. Dit is een belangrijke



Figuur 2.23: Radiale windsnelheid (gemeten langs de lidar straal)

De resultaten van dit werkpakket zijn uitgebreid beschreven in twee vertrouwelijke rapporten [5] [6]

2.3.4 Methodes voor het monitoren en optimaliseren van hele windparken (WP4)

De onderzoeksvragen die in het kader van WP4 worden onderzocht hebben een parallel met het werk in WP3. Het Sawop project richt zich op het onderzoeken van het gebruik van aanvullende sensoren om de prestaties van individuele turbines en het windpark als geheel te optimaliseren. Terwijl WP3 de prestaties van individuele turbines onderzocht met behulp van aanvullende sensoren die historisch en commercieel niet beschikbaar zijn, gaat WP4 een stap verder door zich te concentreren op het niveau van het windpark. In WP4, is het onderzoek opgesplitst over twee gebieden: monitoring en optimalisatie (projectplan taak 4.1 en taak 4.2). De volgende onderzoeksvragen zijn geformuleerd:

- Monitoring van de energieprestaties van windmolenparken:
 - Hoe kunnen de (vermogens)prestaties van het windpark worden gemonitord?
 - Hoe kunnen de extra sensoren worden gebruikt om te helpen bij dergelijke monitoring?
 - Kan een methode voor het monitoren van de prestaties van windparken worden ontwikkeld, die idealiter gebruikmaakt van informatie van aanvullende sensoren, om op betrouwbare wijze te worden gebruikt voor andere windparken?
 - Welke andere instrumenten waarover we beschikken kunnen worden gebruikt om de prestaties van het windpark te monitoren?
- Optimalisatie van de prestaties van windmolenparken met behulp van extra sensoren:
 - Wat is het potentieel om de jaarlijkse energieproductie van het windpark Klim Fjordeholme te optimaliseren door gebruik te maken van windpark regeling modellen? Is deze beoordeling consistent in de verschillende modellen en is deze realistisch?
 - Leveren de extra sensoren voordeel op voor de windpark regelingen? Leveren ze bijvoorbeeld lagere onzekerheidswaarden in vergelijking met standaard toegepaste sensoren?
 - Hoe varieert het de winst in prestatie als er bij de optimalisatie rekening wordt gehouden met deze onzekerheid? En is dit consistent voor de verschillende modellen?

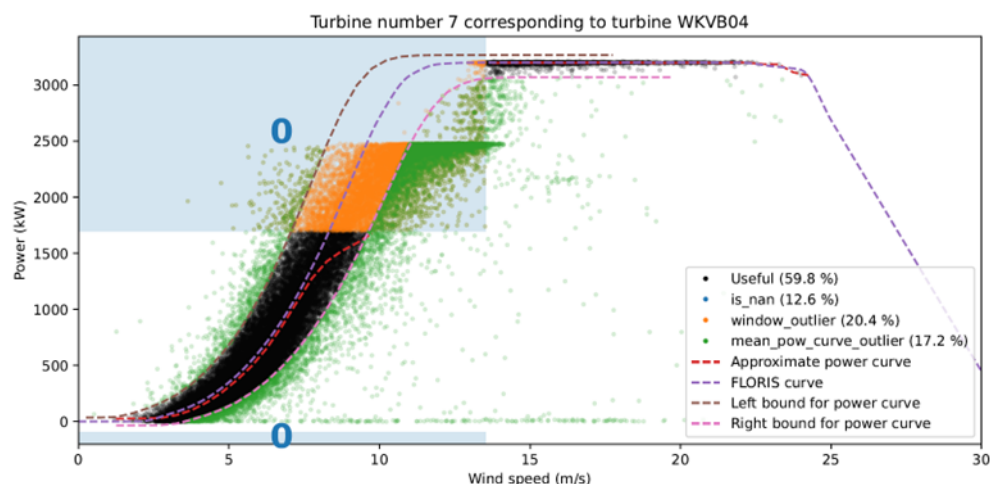
Specifieke analyses zijn uitgevoerd om de bovengenoemde onderzoeksvragen te beantwoorden. In de volgende paragrafen wordt dit kort uitgelegd. Het volledige werk van werkpakket 4 wordt gerapporteerd in [7] en [8]. In het projectplan werd een derde deliverable D4.3 genoemd over de resultaten van de optimalisatie van het windmolenpark. Deze resultaten zijn opgenomen in rapport [8].

De volgende analyse en methoden zijn gebruikt om de genoemde onderzoeksvragen te beantwoorden. Te beginnen met het monitoren van de efficiëntie van het windpark:

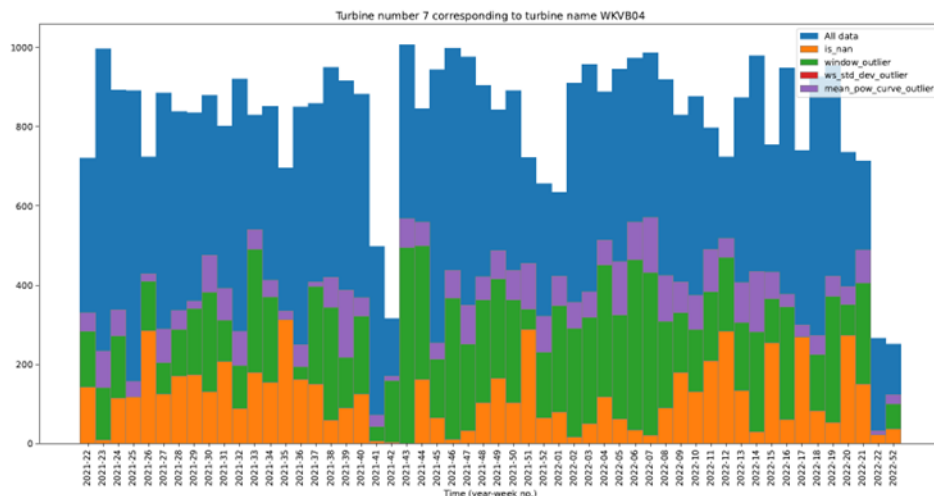
1. Hoe kunnen de (vermogens)prestaties van het windpark worden gemonitord?

Voorgesteld wordt om de prestaties van het windpark zowel intern als extern te beoordelen. Op intern niveau vertaalt zich dit in het filteren van windturbinevermogensmetingen voor analyse en op extern niveau in het kwantificeren van de wind instromingscondities. Om dit uit te voeren worden twee stappen doorlopen.

Eerst wordt geëxperimenteerd met de recent uitgebrachte tool FLASC (FLORIS-based Analysis for SCADA data). Deze tool wordt gebruikt om de vermogensmetingen te filteren op basis van een aantal voorwaarden. Negatieve vermogensmetingen worden verwijderd en meetpunten die worden beschouwd als uitschieters van de vermogenscurve worden eveneens verwijderd. Deze filtermethoden zijn ingebouwd in FLASC, wat de analyse vergemakkelijkt en het omslachtige proces van handmatige implementatie vermijdt. Verder zijn de uitschieter metingen van bijzonder belang voor deze campagne. De reden hiervoor is dat in dit windpark bij bepaalde turbines geluidsreductie is toegepast vanwege de nabijheid van een woongebied. Vensters in de vermogenscurve (d.w.z. gebieden in de vermogenscurve begrensd door minimale en maximale waarden van windsnelheid en -vermogen) kunnen eenvoudig in FLASC worden ingegeven zodat deze metingen (die overeenkomen met aangepaste vermogenscurven die niet overeenkomen met de andere turbines) niet worden meegenomen in de analyse. Bovendien worden afwijkingen in de windrichtingsmetingen (d.w.z. waarden die moeten worden verwijderd uit de windrichtingsignalen zodat de richting ten opzichte van het ware noorden wordt weergegeven) die beschikbaar zijn in het SCADA-systeem, gekwantificeerd en verwijderd. Dit wordt bereikt door de geschatte energieverhouding van het gefilterde SCADA-systeem te vergelijken met technische wake-modellen die direct beschikbaar zijn in FLASC. Een voorbeeld van de filtering op basis van de vermogenscurve en een voorbeeld van de resultaten gegenereerd door FLASC worden in onderstaande figuren getoond.

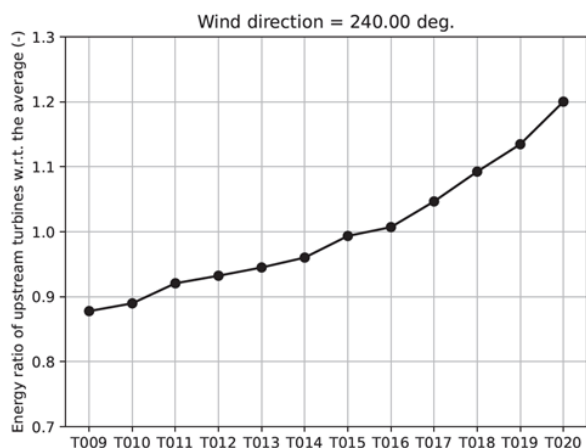


Figuur 2.24: Filter van de vermogenskromme bepaald door FLASC. Hier is een extra ‘window’ toegevoegd (in oranje) om te voorkomen dat de gereduceerde geluidsmodus wordt weg-gefilterd

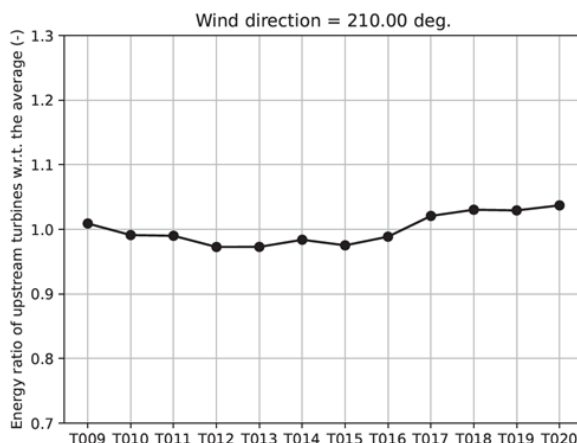


Figuur 2.25: Aantal datapunten gefilterd per week volgens verschillende criteria

Ten tweede, zodra de SCADA-gegevens correct zijn gefilterd, kunnen deze worden bewerkt om de instroomkenmerken te evalueren. Het is belangrijk om de nadruk van de SCADA-gegevens in deze analyse te verduidelijken omdat er in het project juist gebruik wordt gemaakt van iSpin systemen en nacelle lidars op een aantal turbines. De prestatie evaluatie van het gehele windpark vraagt om sensoren die bij elke turbine wordt gebruikt. De zogenaamde windpark als één sensor aanpak, d.w.z. SCADA-gegevens worden gecombineerd in één analyse en gebruikt om kenmerken van de instroom door het hele park te evalueren. Een analyse die in dit werk wordt uitgevoerd, is de evaluatie van de instroom door het gebruik van de energieverhouding, zoals ook geïllustreerd in de FLASC-toolset. De energieverhouding over de voorste rij turbines wordt bestudeerd en onthult interessante patronen voor bepaalde windrichtingsectoren. Dit wordt geïllustreerd in [Figuur 2.26](#) en [Figuur 2.27](#).



Figuur 2.26: Bepalen van de instroomcondities door de energie ratio van de voorste rij turbines te plotten voor windrichting 240 ± 15 graden



Figuur 2.27: Bepalen van de instroomcondities door de energie ratio van de voorste rij turbines te plotten voor windrichting 210 ± 15 graden

Zo is bijvoorbeeld te zien dat in de windsector op 240 graden de energieverhouding hoger is voor turbine T020 (WKVD06) die zich in het zuidwestelijke deel van het park bevindt dan turbine T009 (WKVC01) die zich in het noordwestelijke deel bevindt. Om precies te zijn, de energieverhouding in turbine T020 is 1,2 keer hoger dan de gemiddelde energieverhouding over de gehele voorste rij turbines, terwijl de turbine T009 met ca. 0,88 de gemiddelde waarde over de voorste rij vertegenwoordigt. Dit laatste patroon geeft een indicatie dat de windcondities over het windpark voor bepaalde sectoren behoorlijk kan verschillen. De windsector op 210 graden laat dit gedrag niet zien. Aangenomen wordt dat dit te wijten is aan het objecten in de buurt van het windpark op 240 graden, namelijk twee meren en een kleine boomrijke zone.

Dit type analyse helpt bij het monitoren van de energie prestaties van het windpark omdat het inzicht biedt die kunnen helpen bij de interpretatie van bijvoorbeeld patronen in de energie productie. Het kan verder worden gebruikt met andere toepassingen in gedachten, zoals simulatie van zog modellen om de prestaties van het windpark te voorspellen. Er kunnen daarbij realistische instroomprofielen worden gegenereerd, zodat ook de vermogensvoorspellingen van windparken realistischer zijn. Dit wordt onderzocht in de context van WP4 van Sawop, als zog modellen.

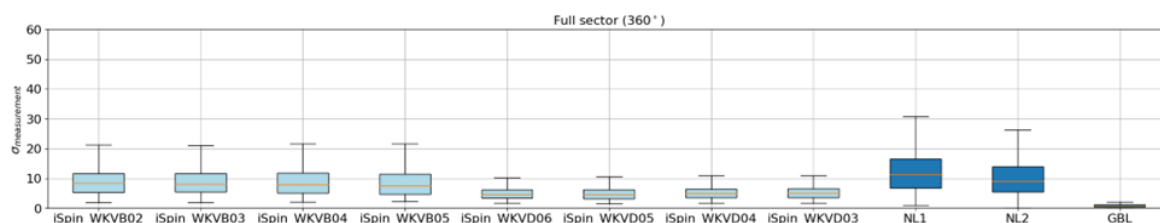
2. Active wake-control voor verbeterde prestaties van het landbouwvermogen.

Hoewel de lay-out van het Klim Fjordeholme windpark is geoptimaliseerd voor de belangrijkste windrichtingen van de locatie (N-O & en Z-W), blijft deze onderhevig aan zog-verliezen, zoals aangegeven in het vorige hoofdstuk. Daarom is het potentieel van actieve zog-sturing door het introduceren van bewust scheefstand van de voorste turbines, of Active Wake Control (AWC), voor dit park onderzocht.

In een eerste fase is een standaardoptimalisatie van de scheefstand van elke turbine uitgevoerd om het output vermogen van het park te verhogen. Deze analyse heeft het potentieel voor AWC op het Klim Fjordeholme windpark aangetoond (gerapporteerd door TNO [8] en Shell [9]). In een ideaal scenario zou een theoretische AEP-winst van 3 tot 5% kunnen worden verkregen, afhankelijk van het zogmodel dat voor de beoordeling is gebruikt. Opgemerkt moet worden dat deze schatting (samen met de onderstaande schattingen) een overschatting is van de mogelijke AEP stijging. Dit als gevolg van operationele verliezen, zoals fysieke beperkingen van de kruihoeke besturing (hysterese, foutieve instelpunten) en heterogeniteit van de wind instroming.

In een tweede fase is het potentieel van een robuuste AWC op basis van windrichtingsmeting geanalyseerd. Hiervoor is in de eerste plaats de onzekerheid van de windrichting tijdens de werking

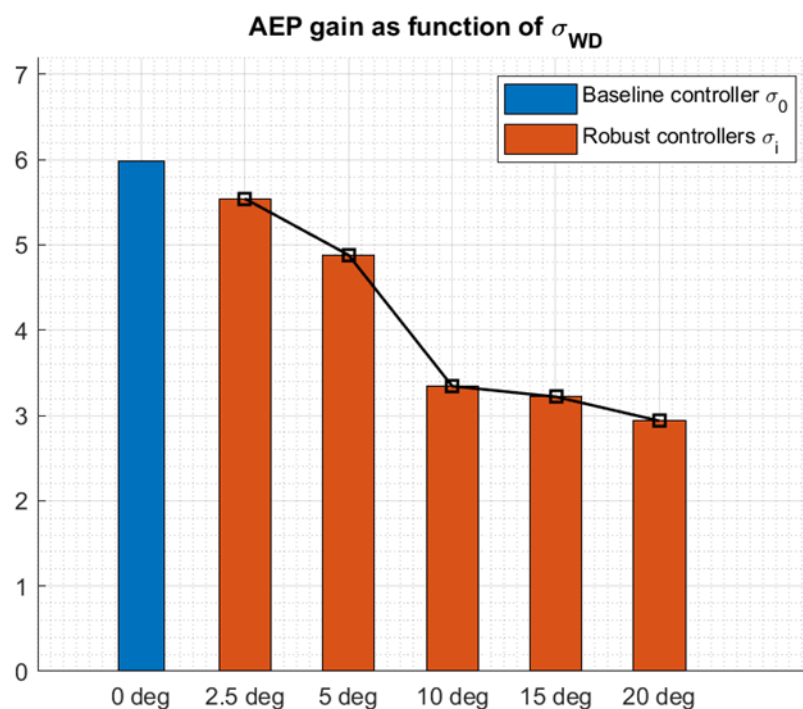
van het windpark geanalyseerd. Zowel de spinner-anemometers als de nacelle lidars zijn hierin meegenomen. In deze analyse is de onzekerheid van het windrichting signaal gekwantificeerd als standaarddeviatie (σ). De spinner-anemometers vertonen voor de gekozen periode (01-feb-2022 tot 15-feb-2022) een lagere mediaan standaarddeviatie ($3-5^\circ$) dan de nacelle lidars ($5-11^\circ$). De verticale profiling lidar op de grond (GBL) presteerde het beste met een standaarddeviatie minder dan 1° (zie [Figuur 2.28](#)). Deze waarden zijn echter niet via dezelfde methode verkregen en moeten daarom zorgvuldig worden vergeleken. Alleen de sensoren waarvoor hoogfrequente gegevens beschikbaar waren (alle 8-spinner-anemometers en de WCN lidar weergegeven als NL2 in [Figuur 2.28](#)), konden worden geanalyseerd met behulp van de methodologie die is uitgelegd in [8], terwijl de standaarddeviatie van de signalen van de ZDM nacelle lidar (NL1) en de profiling lidar (GBL) intern door het apparaat is berekend, waar geen details van beschikbaar zijn.



Figuur 2.28: Overzicht van meetonzekerheid per sensor (volledige windsector)

Op basis van de windrichtingonzekerheid zijn robuuste regel strategieën (controllers) ontworpen. Het doel van robuuste controllers is om een wiskundig optimale wisselwerking te krijgen tussen de kruihoeck-uitlijning instellingen die de hoogste vermogensstijging genereren en suboptimale instelpunten die het risico op vermogensverliezen beperken in geval van fouten in de metingen van de windrichting.

Vijf robuuste controllers (σ_i , $i=[2.5, 5, 10, 15, 20]^\circ$) zijn vergeleken met de baseline (niet-robuste) controller (σ_0). Het blijkt, zoals verwacht, dat de baseline controller σ_0 beter presteert dan de robuuste controllers in termen van AEP ($v=8\text{m/s}$) winst indien we aannemen dat er geen fouten zijn in de windrichtingmetingen. Het blijkt verder dat de AEP ($v=8\text{m/s}$) winst verkregen met de robuuste controllers σ_i afneemt naarmate de onzekerheidswaarde i toeneemt. (zie [Figuur 2.29](#)).

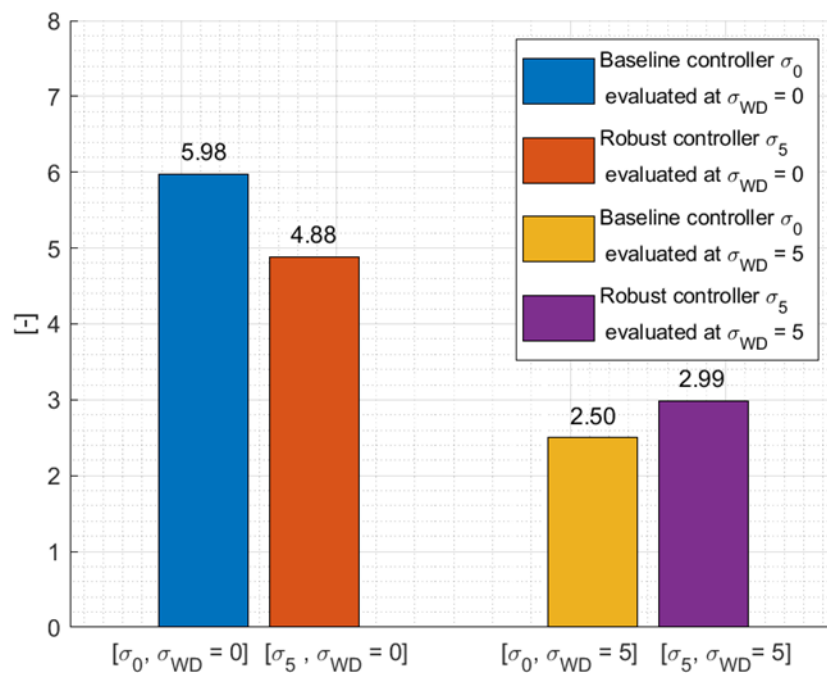


Figuur 2.29: AEP winst per ontworpen controller, bepaald voor $v = 8$ m/s (aangenomen dat de windrichting geen meetfout bevat)

Om het potentieel van de robuuste controllers aan te tonen, is de AEP ($v=8$ m/s) winst ook berekend waarbij fouten in de windrichting zijn gesimuleerd. Dit is gedaan door de windrichting rond de gemiddelde waarde te laten variëren, terwijl de kruihoeck vast bleef staan op de gemiddelde windrichtingswaarde. De resultaten zijn vervolgens samen gewogen met behulp van een probabilistische (Gaussiaanse) verdeling.

Dit heeft het mogelijk gemaakt om twee kenmerken te benadrukken:

- 1) de AEP ($v=8$ m/s) winst neemt voor alle controllers af als er fouten in de windrichtingsmetingen worden gesimuleerd,
- 2) robuuste controllers maken het mogelijk om een hogere AEP ($v=8$ m/s) winst te behalen t.o.v. niet-robuste controllers, wanneer er fouten in de meting van de windrichting worden gesimuleerd (zie [Figuur 2.30](#)).



Figuur 2.30: AEP winst per ontworpen controller, bepaald voor 8 m/s. De basislijncontroller σ_0 en de robuuste controller σ_5 zijn getest voor scenario's zonder meetfout in de windrichting ($\sigma_{WD} = 0^\circ$) (links), en voor scenario's waarin meetfouten zijn meegenomen ($\sigma_{WD} = 5^\circ$) (rechts)

3 Bijdrage Sawop aan kostenverlaging en versterking kennispositie

Met opgedane kennis van Sawop kunnen ontwikkelaars de effectiviteit van hun windparken monitoren volgens de laatste stand van techniek en uitgebrachte norm IEC 61400-12-1 [1], IEC 61400-12-2 [2] en IEC 61400-50-3 [3]. Hierdoor kunnen partijen die werkzaam zijn op dit gebied een betere afschatting maken welke techniek in welke situatie het best kan worden gebruikt. De volgende analyses hebben bijgedragen aan de kennis over de effectiviteit van het windpark Klim Fjordeholme:

Afwijking van kruihoek signaal (yaw offset)

Uit de resultaten van het Sawop project is gebleken dat de individuele windturbines waarop de iSpin systemen en de nacelle lidars waren geïnstalleerd een afwijking van de kruihoek ten opzichte van het noorden vertoonden. Deze afwijking was tussen de 6 en 15 graden bepaald voor de vier turbines waarvoor deze afwijking is bepaald. Het feit dat dit signaal afwijkt van de daadwerkelijke positie hoeft niet te betekenen dat de turbines ook schuin op de windrichting staat en daarmee minder stroom produceert.

Afwijking ten opzichte van de windrichting (yaw misalignment)

De afwijking ten opzichte van de windrichting wordt de 'yaw misalignment' genoemd. Een verbeterde uitlijning van de turbine op de wind leidt tot een hogere jaarlijkse elektriciteitsopbrengst. De yaw misalignment kan worden bepaald door middel van de iSpin sensoren en nacelle lidars. Een kleine afwijking ten opzichte van de windrichting is niet direct aanleiding om de controllers te corrigeren maar boven de ± 4 graden is dit wel interessant. De gemiste energieproductie schaalst met een factor $\cos^2(\gamma)$ waar γ de gemiddelde afwijking ten opzichte van de windrichting vertegenwoordigd. In het projectvoorstel is een historische verdeling van mogelijke energiewinst opgenomen bij een typische yaw misalignment (zie [Tabel 3.1](#)).

Tabel 3.1: Historische statistieken van gemeten yaw misalignment (in deze tabel weergegeven als Yaw error), kans van voorkomen, en de (gewogen) reductie in jaarlijkse energieproductie (AEP deficit) als gevolg van deze fout

Measured occurrence of yaw error (from 182 measurement campaigns covering >20 turbine types) [10]			
Yaw error	Occurrence	AEP deficit	Weighted AEP deficit (Occ*AEPdef)
< 4°	44%	0.52%	0.23%
4° - 8°	27%	1.13%	0.31%
8° - 12°	15%	3.00%	0.45%
12° - 16°	6%	5.82%	0.35%
>16°	8%	7.54%	0.60%
Sum of weighted AEP			1.96 %

Van de acht turbines in Klim Fjordeholme waar iSpin sensoren zijn toegepast (turbines D03 en B02 uit deze selectie waren daarnaast uitgerust met nacelle lidars), was de afwijking van turbine B02 het grootst. Deze afwijking voor turbine B02 betrof 4–6 graden, afhankelijk van de meetperiode. De relatief lage afwijking als vastgesteld in de meetcampagne was voor de eigenaar Vattenfall geen aanleiding om een correctie te laten uitvoeren. De methode om de yaw misalignment te bepalen kan goed worden geschaald en toegepast op bestaande en toekomstige windparken op land en op zee. De iSpin sensoren zijn goedkoper in aanschaf ten opzichte van de nacelle lidars, en zijn daarmee meer geschikt om voor een grotere groep turbines de afwijking met de windrichting te bepalen.

Vermogenskromme (power curve)

Het maken van een vermogenskromme, waarin vermogen tegen de windsnelheid wordt geplot, is een geaccepteerde methode om de efficiëntie van een wind turbine te karakteriseren. Wind turbine eigenaren zijn afhankelijk van de specificatie power curve van de wind turbine fabrikant, en zouden graag de resultaten willen controleren van de turbines in bedrijf. In dit project is aangetoond dat iSpin spinner anemometers en gondel lidars kunnen worden ingezet om een vermogenskromme te bepalen volgens de laatste normen.

Daarbij moet worden opgemerkt dat de iSpin per turbine type moet worden gekalibreerd met een plaatselijke meetmast of profiling lidar geplaatst op een afstand 2–4 rotor diameters voor de turbine.

Methode om efficiëntie van het wind park te monitoren

Naast de methodes om de efficiëntie van individuele wind turbines te monitoren, zijn in werkpakket 4 analyse methodes toegepast om de efficiëntie van het hele windpark te bepalen op basis van de scada data. In deze methodes worden de zoggen achter de windturbines gemodelleerd en de geschatte elektriciteitsproductie vergeleken met de gemeten waardes. De toegepaste modellen betreffen deels publieke modellen (Flasc en Floris) en deels een intern ontwikkeld model (TNO Farmflow). De uitgevoerde analyses voor Klim Fjordeholme hebben inzicht gegeven omtrent de geschiktheid van de modellen om de zoggen, en het effect op de elektriciteitsproductie van een windpark in kaart gebracht. De beperkingen in de huidige modellen betreffen onder andere de zog effecten dicht achter de rotor, en het onvoldoende volgen van dynamische veranderingen in windrichting.

Zog sturing om de energieproductie te optimaliseren

Middels het bewust schuin uitlijnen van de voorste windturbines kan de totale energieproductie van een windpark worden geoptimaliseerd omdat het zog weg wordt gestuurd van de achterliggende turbines. Het potentieel is afhankelijk van het ontwerp van het wind park en de tussenliggende afstanden van de turbines. Voor het offshore Prinses Amalia wind park was dit potentieel bepaald op 1.28% [10]. Uit de simulaties in het Sawop project is gebleken dat voor Klim Fjordeholme een verbetering van 2–3 procent op de jaarlijkse energieproductie kan worden gewonnen als zog-sturing wordt toegepast [9].

4 Spin off binnen en buiten de sector

De meetmethodes en analyses in het Sawop project zijn primair gefocust op windparken op land en op zee. Naast toepassing om de efficiëntie van windparken te monitoren, kan de informatie van de toegepaste sensoren ook worden ingezet om zog-sturing algoritmen te voeden met extra data, en de aannames van het verloop van de zog te valideren.

Buiten de windenergie-sector, zie we dat enkele van de instrumenten worden toegepast om het windveld in kaart te brengen, daar waar deze informatie tot extra inzichten kan leiden. Voorbeelden zijn:

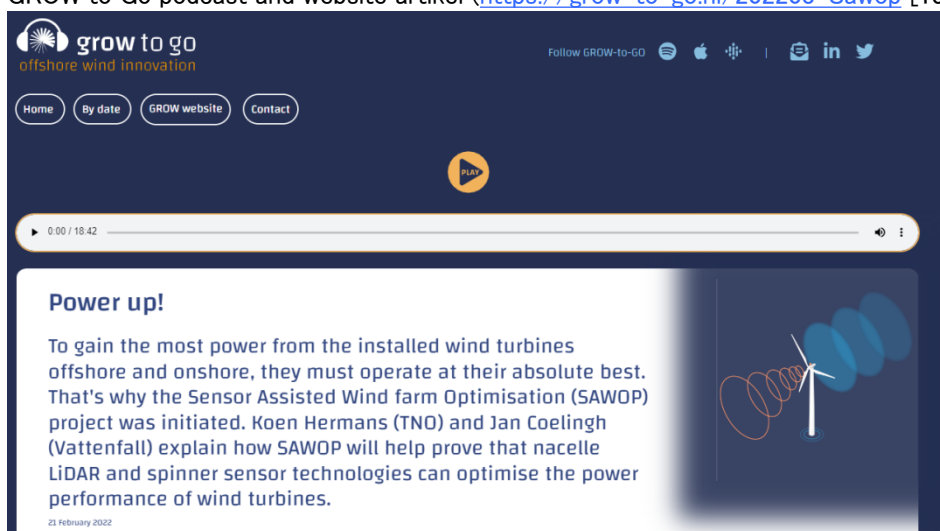
- Andere infrastructuur (bruggen, hoogbouw, maar ook energie infrastructuur zoals (drijvende) zonneparken)
- De defensie, lucht- en ruimtevaartsector
- Het voeden van klimaatmodellen.

Opgedane kennis en ervaring wordt uitgewisseld in het WindScanner.nl platform met instituten die werken aan deze sectoren buiten de windenergie (waaronder KNMI en MARIN).

5 Openbare publicaties

Tijdens de looptijd van het Sawop project zijn de volgende openbare publicaties verschenen vanuit het project:

- WindDay 2021 (poster presentatie), World Forum, Den Haag [11]
- GROW project website (<https://www.grow-offshorewind.nl/project/Sawop> [12])
- GROW nieuwsbrief
- GROW to Go podcast and website artikel (<https://grow-to-go.nl/202203-Sawop> [13])



Figuur 5.1: Website artikel bij Grow-to-Go podcast <https://grow-to-go.nl/202203-Sawop> [13]

- GROW Innovation Meeting – 11 Oktober 2022, Rijswijk [14]
- GROW clip met drone beelden van de lidar uitwisseling (<https://youtu.be/eIT6016qBug>) [15]

- TKI Wind op Zee – Project in the Spotlights, korte documentaire over het project op Youtube [16]



Figuur 5.2: Screenshot van TKI Wind op Zee Project documentaire (youtu.be/PCNVAK_LSLY) [16]

- WindEurope Technology Workshop 2021 (Poster en videopresentatie, online) [17]
- Conferentiepresentaties EERA DeepWind 2023 (Trondheim, Noorwegen), op de onderwerpen:
 - Wind park monitoring technieken [18]
 - Robuust zogsturing regeling [19]

Toekomstige publicaties:

- Conferentiepresentatie Wind Energy Science Conference, 23–26 May 2023 (Glasgow, Verenigd Koninkrijk)
- Een paper voor een wetenschappelijk tijdschrift is nog in voorbereiding.

De publicaties die bij conferenties of beurzen zijn gegeven zijn op te vragen bij TNO Wind Energie (windenergy@tno.nl).

6 Geciteerde werken

- [1] IEC 61400-12-1, *Power performance measurements of electricity producing wind turbines*, 2017.
- [2] IEC 61400-12-2, *Power performance of electricity producing wind turbines based on nacelle anemometry*, 2013.
- [3] IEC 61400-50-3 ed 1, *Use of nacelle mounted lidars for wind measurements*, 2022.
- [4] T. A. Mücke, M. Wächter, P. Milan en J. Peinke, „Langevin power curve analysis for numerical wind energy converter models with new insights on high frequency power performance,” *Wind Energy*, vol. 18, nr. 11, pp. 1953–1971, 2014.
- [5] K. Hermans, H. Links en E. Rose, „Individual WTG performance evaluation using nacelle lidars, a profiling lidar and iSpin anemometers at Klim Fjordeholme wind farm,” SAWOP D3.1, TNO 2022 R12128.
- [6] H. Links, „Power curves of wind turbine D03 at Klim Fjordeholme windfarm,” SAWOP D3.1, TNO 2022 R12095 v1.0.
- [7] N. Cassamo en M. Turrini, „Wind Farm performance monitoring through combined measurement data analysis and wake modelling,” SAWOP D4.1, TNO 2022 R12687.
- [8] M. Turrini en N. Cassamo, „Robust Active Wake Control on sensor assisted wind farm,” SAWOP D4.2, TNO 2022 R12687.
- [9] A. Garcia-Sagrado, B. Doekemeijer en J. Kreeft, „Wake model validation and wake steering upside analysis for Klim Fjordeholme onshore wind farm,” Shell report SRN-04158, 2023.
- [10] S. Kanev, F. Savenije en W. Engels, „Active wake control: an approach to optimize the lifetime operation of wind farms,” *Wind Energy*, February 2018.
- [11] K. Hermans, *Optimizing energy output using nacelle LiDARs & iSpin spinner anemometers*, 2021.
- [12] GROW, „Sensor Assisted Wind farm Optimisation (SAWOP),” 2022. [Online]. Available: <https://www.grow-offshorewind.nl/project/sawop>.
- [13] GROW to go, „Power up!,” <https://www.grow-to-go.nl/202203-sawop>, 2022.
- [14] N. Cassamo, „Sensor assisted wind farm optimisation,” 2022.
- [15] GROW, „Successful exchange of nacelle lidars halfway through the measurement campaign of SAWOP,” 2022. [Online]. Available: <https://youtu.be/eIT6016qBug>.
- [16] TKI Wind op Zee, „Project in the Spotlights – SAWOP,” youtu.be/PCNVAK_LSLY, 2022.
- [17] K. Hermans, C. Xavier, E. Rose, J. Coelingh, H. Hohlen en J. Kreeft, „PO026 – Power performance assessment and optimization using spinner anemometers and nacelle LiDAR systems,” in *Wind Europe Technology Workshop – Resource Assessment & Analysis of Operating Wind Farms*, 2021.
- [18] N. Cassamo en M. Turrini, „Sensor Assisted Wind Farm Optimisation (SAWOP). Towards generating more value out of measurement data using wind farm performance monitoring methodologies,” in *EERA Wind Deep Conference*, Trondheim, 2023.
- [19] M. Turrini, N. Cassamo, H. Links, K. Hermans en L. Laas, „Robust Active Wake Control. Wind direction measurement uncertainty driven analysis in a sensor-equipped wind farm,” in *EERA Deep Wind Conference*, Trondheim, 2023.

De gedetailleerde rapporten [5] [6], [7], [8] en [9] zijn vertrouwelijk en enkel toegankelijk voor de deelnemende partijen in het project consortium.

7 Verkrijgbaarheid rapport en contact

In hoofdstuk 5 is een lijst van openbare publicaties weergegeven die gerelateerd zijn aan het Sawop project. Daarbij staat vermeld waar deze zijn op te vragen.

Een digitale kopie van dit rapport is te verkrijgen bij TNO publicaties: <https://repository.tno.nl> onder registratie nummer TNO2023 P10689.

TNO is de penvoerder van het Sawop project en is het contactpunt voor toekomstige vragen over het project.

De contactpersonen zijn:

Onderzoeker,	Ir. Koen Hermans,	koen.hermans@tno.nl
Sr. Project manager,	Ing. Leon Laas,	leon.laas@tno.nl

Energy & Materials Transition

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
www.tno.nl