



Arkom Windpower B.V.

TULYP Wind

P.J Oudstraat 54
3354 VB Papendrecht

T +31(0)88 -515 5155

E info@arkom.nl

W www.arkom.nl
www.tulypwind.nl

KvK 70980012

BTW NL858533157B01

IBAN NL39 ABNA 0814 3679 17

BIC ABNANL2A


TULIP WIND

Openbaar eindverslag subsidie RVO

Project: **TULIP WIND, a Dutch IMBY approach to renewable energy**

Referentie: **TEHE117057**



Document Titel:	RVO-Eindverslag	
Publicatiedatum:	9 februari 2022	
Revisie Nummer:	2.0	
Opgesteld door:	T.G.A.M. Buijsrogge	
Gecontroleerd door:	H.M.D. Lever	
Vrijgegeven door:	H.M.D. Lever/ J.C. de Pagter	



Management
System
ISO 9001:2015

www.tuv.com
ID 900000516



Inhoudsopgave

1	Samenvatting	3
2	Inleiding	4
2.1	<i>Partners.....</i>	4
2.2	<i>Subsidie.....</i>	5
3	Doelstelling en werkwijze.....	6
4	Uitvoering van het project	8
4.1	<i>Algemeen.....</i>	8
4.2	<i>Problemen en oplossingen.....</i>	9
4.3	<i>Wijzigingen t.o.v. het projectplan.....</i>	10
4.4	<i>PR, Spin off en kennisverspreiding</i>	11
4.5	<i>Inhoudelijke resultaten</i>	12
4.6	<i>Financiële resultaten.....</i>	13
5	Conclusie en aanbevelingen.....	14
Bijlage 1.	Eindrapporten Pontis, TNO en TU Delft.....	16



1 Samenvatting

In 2018 zijn zeven samenwerkende partijen onder leiding van Arkomp Windpower gestart met de ontwikkeling van TULIP WIND, een middelgrote Verticale As WindTurbine (VAWT) met eigenschappen die niet de weerstand opleveren van de huidige generatie windturbines. De ontwikkelde windturbine is esthetisch afgeleid van een tulp, heeft een beperkte hoogte, een beperkte slagschaduw en een lage geluidsproductie.

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. Het project bestond uit het ontwerp, de ontwikkeling van een prototype, testen van het prototype en communicatie van het concept.

Oorspronkelijk was het plan om een 300kW windturbine (TULYP genaamd) te ontwikkelen. In 2018 is besloten om de aandacht te verleggen naar een 75kW turbine als noodzakelijke tussenstap om voldoende kennis te vergaren voor de doorontwikkeling naar een 300kW versie

Er blijkt grote interesse in de markt en men ziet dat het TULYP-concept een belangrijke bijdrage kan leveren aan de energietransitie. Met name in situaties waar een grote windturbine te veel weerstand in de omgeving oproept en bij lokale energieafnemers op locaties waar knelpunten in het huidige energienet aanwezig zijn heeft de TULYP de grootste toegevoegde waarde.

Het project bleek aanzienlijk complexer dan oorspronkelijk gedacht. Het projectteam is met diverse technische problemen geconfronteerd. Uiteindelijk zijn alle uitdagingen opgelost. Dit heeft veel inzicht, nieuwe dynamische modellen, unieke ideeën en technologie voor toepassing in VAWT's opgeleverd. Deze inzichten zijn gedeeld op symposia, congressen en een groot aantal technische publicaties. Zo heeft dit project een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de uitbreiding en verspreiding van het kennisniveau op het gebied van toepassing van verticale as windturbines.

Het ontwerp en de voorbereiding, inclusief de vergunningverlening voor de bouw van een prototype op een pilotlocatie zijn gereed. Ook is het meetprogramma voor de uit te voeren veldtesten opgezet. Er is in de periode van het subsidieproject echter niet gelukt om investeerders te vinden om de feitelijke bouw van het prototype daadwerkelijk te kunnen starten.

Dit ondanks de grote interesse in de markt en de belangrijke bijdrage die deze windturbine aan de energietransitie kan leveren. Het verdient daarom aanbeveling om te blijven zoeken naar subsidie- en/of investeringsmogelijkheden om het prototype te kunnen bouwen.

Dit betekent dat de werkpakketten die betrekking hebben op engineering, ontwerp en modelstudie volledig zijn uitgevoerd, en daar ook meer werk heeft plaatsgevonden dan oorspronkelijk begroot. Werkpakket 5, de bouw van het prototype, is niet gerealiseerd, evenmin als de uitvoering van het bijbehorende Meetprogramma (werkpakket 6) door TNO. De voorbereidende activiteiten in beide werkpakketten, zoals vergunningaanvraag en opzet meetprogramma zijn wel gerealiseerd. Ook heeft TU Delft haar meetprogramma met behulp van windtunnel testen wel volledig uit kunnen voeren.



2 Inleiding

Dit is het eindrapport van het subsidieproject met de titel: *TULIP WIND, a Dutch IMBY approach to renewable energy.*

2.1 Partners

Het project is uitgevoerd in een samenwerking tussen zeven partners, onder leiding van door Arkom Windpower B.V. Deze samenwerking is op 1 april 2018 vastgelegd in een Consortium Agreement.

Partner	Bijdrage
Arkom Windpower B.V.	Initiator en leidende partner Algemeen projectmanagement, ontwerpmanagement en promotie
Archimaat Holding B.V.	Projectmanagement, systeemontwerp-management en relatiebeheer
Kompas Managementdiensten B.V.	Projectmanagement, systeemontwerp-management en relatiebeheer
BDB Greenpower	Communicatie, promotie en omgevingsmanagement
TU Delft	Ontwerp, analyse, modelontwikkeling en -validatie, wetenschappelijke publicatie en verspreiding
TNO/ECN*	Controller ontwerp, aero-elastische model ontwikkeling, analyse en validatie
Pontis Engineering	Productontwikkeling

* Op 1 April 2018 is de duurzame energie tak van ECN onderdeel geworden van TNO, eerst onder de naam 'ECN part of TNO' en na 1 Januari 2020 als de unit 'Energy Transition' (hierna te noemen TNO).

Voor meer informatie over de beschreven activiteiten en de genoemde publicaties kunt u contact opnemen met de volgende contactpersonen:

Partner	Contactpersonen
Arkom Windpower B.V.	H. Lever Harold.Lever@arkom.nl
TU Delft	C.J. Simao Ferreira C.J.SimaoFerreira@tudelft.nl
TNO	F.J. Savenije feike.savenije@tno.nl
Pontis Engineering	Matthijs Bosboom mab@pontis-engineering.com



2.2 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.

Op 16 maart 2018 is via Vindsubsidies.nl een subsidieaanvraag ingediend bij de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. Op 22 mei 2018 heeft RVO bevestigd dat de subsidie is toegekend. De looptijd is vastgesteld op 1 april 2018 tot en met 31 maart 2021.

Op 27 september 2018 is via Vindsubsidies.nl een verzoek tot wijziging ingediend. De wijziging betrof de focus op het ontwikkelen van een 75kW windturbine als tussenstap naar de te ontwikkelen 300kW windturbine.

Op 5 december 2018 heeft RVO bevestigd hiermee akkoord te gaan.

Als gevolg van deze wijziging is er ook een verschuiving geweest van experimentele ontwikkeling naar industrieel onderzoek en op 17 juni 2020 heeft RVO bevestigd dat zij ook akkoord gaat met deze wijziging.

Op 14 september 2021 is er overleg geweest tussen Arkom Windpower B.V. en RVO over de einddatum van het project, waarna RVO de gelegenheid bood tot 6 oktober 2021 een wijzigingsverzoek in te dienen of anders uiterlijk 31 december 2021 de aanvraag tot subsidievaststelling in te dienen.



3 Doelstelling en werkwijze

De doelstelling van het project is het ontwikkelen van een verticale-as windturbine die efficiënt is en de toestemming krijgt van de lokale gemeenschap. Dus geen oplossing die resulteert in 'not in my backyard' (NIMBY), maar juist een oplossing die 'in my backyard' (IMBY) reacties oproept.

Specifiek gaat het om de ontwikkeling en validatie van een prototype 300 kW midrange VAWT in een relevante en operationele omgeving (TRL6-7) die zowel in een voor- als achter de meteroplossingen kan worden gebruikt, om een bredere pasvorm voor wind op land, verbeterde sociale acceptatie en minder beperkingen te bieden met een goede businesscase.

Oorspronkelijk was het plan om een 300kW windturbine te ontwikkelen. In 2018 is besloten om de aandacht te verleggen naar een 75kW turbine als noodzakelijke tussenstap om voldoende kennis te vergaren voor de doorontwikkeling naar een 300kW versie. In 2021 heeft het management moeten concluderen dat de kosten voor de ontwikkeling hoger zijn uitgevallen dan oorspronkelijk begroot wegens de technische uitdagingen en leveranciers-problemen die in dit rapport zijn beschreven. De middelen waren daarmee niet meer toereikend voor de realisatie van het prototype. Het management heeft zich intensief ingespannen om aanvullende middelen / investeerders te vinden, maar is daar tot op heden niet in geslaagd. Omdat de subsidie-termijn ook niet langer verlengd kon worden is het subsidieproject afgerond.

Het project bestaat in hoofdlijnen uit vier onderdelen:

- **Ontwerp**
De ontwerpactiviteiten zijn gericht op het rotor-/aerodynamisch ontwerp, het ontwerp van de aandrijflijn en het constructief ontwerp.
Het ontwerp levert input voor de ontwikkeling van het prototype, het computationeel ontwerp en het testen (zowel windtunneltesten als open veldtesten).
De meeste innovatieve onderdelen zijn gericht op het aero-elastische modellering en -ontwerp, het drivetrainontwerp en het strut- en bladontwerp.
- **Ontwikkeling van het prototype**
Op basis van de ontwerpanalyses van de verschillende onderdelen wordt een totaalontwerp voor het prototype gemaakt. De prestaties zullen in verschillende configuraties worden geanalyseerd, wat zal leiden tot een verbeterd prototype
- **Testen**
De verschillende ontwerpen worden aan diverse tests onderworpen om het ontwerp te optimaliseren. Uiteindelijk zullen met het gerealiseerde prototype veldtesten worden uitgevoerd, waarmee de ontwikkelde datamodellen kunnen worden gevalideerd.
- **Communicatie**
Om deze nieuwe, innovatieve aanpak als alternatieve energieoplossing breder bekend te maken zijn diverse promotie en communicatie-activiteiten uitgevoerd. Daarnaast is onderzoek gedaan naar diverse locaties voor het prototype en de optimale inpassing hiervan.



Het werk is verdeeld in 9 werkpakketten:

WP	Titel	Cat.	WP leider
1	Project management	EO	Arkomp
2	Rotor/aerodynamic design	IO	TUD
3	Drive train design	IO	Arkomp
4	Structural design	IO	Arkomp
5	(Re)development/assembly of prototype	EO	Arkomp
6	Open field testing	IO	TNO
7	Data analysis field vs. Wind tunnel	IO	TUD
8	Data analysis array design VAWT/HAWT	IO	TUD
9	Communication, Dissemination and IPR	EO	BDB



4 Uitvoering van het project

4.1 Algemeen

Het project bleek technisch complexer dan in 2018 gedacht. Ontwerp en analyse van machines van het VAWT-type is een veel minder gestandaardiseerd proces dan met betrekking tot HAWT-machines die de markt domineren. Vanuit een structureel en mechanisch ontwerp punt zijn typische problemen, vereisten en richtlijnen minder begrepen of beschikbaar. Dit resulteerde in meerdere uitgebreide iteraties tussen modellering en ontwerp. Daarbij is besloten in de ontwikkeling van een 300kW TULYP een tussenstap te maken en eerst een 75kW TULYP te ontwikkelen.

Inmiddels zijn alle ontwerpuitdagingen en innovatieve issues opgelost en is het ontwerp van de 75kW TULYP geheel compleet. Naast het constructieve-, mechanische- en elektrische ontwerp, zijn de composiet onderdelen (rotorbladen, innovatieve struts en verbinding tussen rotorbladen en struts) ontworpen en composietproefdelen zijn fysiek getest. Daarbij is een volledig 3D model opgebouwd met alle structurele elementen. Deze is middels eindige elementen analyse doorgerekend, waarmee de statische en dynamische krachten en issues zijn uitgewerkt en opgelost.

Naast een definitief ontwerp voor de windturbine hebben het onderzoek en de validatie door TNO en TU Delft, onder andere door windtunneltesten, waardevolle inzichten opgeleverd die ook zijn gepubliceerd en openbaar gemaakt.

Door middel van presentaties op beurzen en congressen, infographics en promotiefilmpjes heeft Arkorn Windpower haar concept bekendheid gegeven. Daarnaast zijn er verschillende wetenschappelijke publicaties geschreven om de opgedane inzichten in het ontwerp van verticale as windturbines te delen.

Er blijkt grote interesse in de markt en men ziet dat het TULYP-concept een belangrijke bijdrage kan leveren aan de energietransitie. Het kan een goede oplossing zijn in situaties waar een grote windturbine te veel weerstand in de omgeving oproept, of de netcapaciteit beperkend is voor een grotere turbine. Daarnaast is het een goede oplossing bij lokale energieafnemers, met name als er een continue bedrijfsvoering plaatsvindt op deze locaties. Een 'achter-de-meter' oplossing zorgt dan voor ontlasting van het overbelaste energienet en voorkomt juist extra belasting van het energienet, wat op veel plaatsen in het land al tegen de limiet aanzit.

Op basis van een onderzoek naar risicozonering/effectafstand van een windturbine zijn de randvoorwaarden voor succesvolle inpassing van de TULYP in stedelijk gebied vastgesteld, i.s.m. Bosch & van Rijn.

Voor een groot aantal locaties is onderzoek gedaan naar windsnelheden op locatie, wet- en regelgeving, business case etc. en zijn trade-off-matrices gemaakt voor een locatiekeuze.

Er zijn verschillende intentieverklaringen getekend voor potentiële locaties en met gebruikers. Voor een locatie in Groningen is een omgevingsvergunning verleend voor de daadwerkelijke bouw van een TULYP windturbine.

Op basis van het definitieve ontwerp zijn leveranciers benaderd om offertes uit te brengen. Hiermee is een gedetailleerde begroting gemaakt en de business case uitgewerkt.

In Groningen is een Pilot-locatie vastgesteld en hiervoor is het hele vergunning traject doorlopen, resulterend in een Omgevingsvergunning die door de gemeente Groningen is verleend. Ter voorbereiding van de veldtesten is een meetprogramma opgezet en gedocumenteerd.

Hiermee zijn de haalbaarheids- en ontwerpfasen afgerond en kan, zodra een investeringsbeslissing is genomen, de realisatie van een prototype verticale-as windturbine starten.



We hebben geparticipeerd in meerdere werkconferenties van de Topsector energie. Onze uitgangspunten van lokale inpasbaarheid met onderhoudsarme technologie zijn daar ook consequent bevestigd. In een van de matchmaking sessies is het contact gelegd met Fibersail, die een innovatieve meetmethode hadden ontwikkeld voor het real-time monitoren van de conditie van vleugels.

Het is echter niet gelukt in de doorlooptijd van het subsidieproject ook investeerders te vinden om de bouw daadwerkelijk te kunnen starten. Hierdoor heeft de prototype meetcampagne in het veld voor validatie van de numerieke modellen en het TULYP-concept door TNO niet kunnen plaatsvinden. TUD heeft de veldmetingen echter vervangen door windtunneltesten, zodat al haar geplande werkzaamheden volledig afgerond konden worden.

De toegevoegde waarde van het TULYP-concept wordt door velen gezien, echter investeerders willen meer zekerheid in de vorm van een reeds gerealiseerd exemplaar.

Het projectteam blijft daarom op zoek naar een 'launching customer' die samen een eerste exemplaar wil realiseren.

4.2 Problemen en oplossingen

In de ontwikkeling van de TULYP zijn we tegen een aantal problemen aangelopen. Ontwerp en analyse van machines van het VAWT-type is een veel minder gestandaardiseerd proces dan met betrekking tot HAWT-machines die de markt domineren. Vanuit een structureel en mechanisch ontwerp punt zijn typische problemen, vereisten en richtlijnen minder begrepen of beschikbaar.

Ook de numerieke modellen waarmee het dynamische gedrag voorspeld kan worden waren in het begin van dit project nog onderontwikkeld. Een van de deliverables is juist de ontwikkeling van dergelijke modellen. Gedurende het project is deze ontwikkeling ver gevorderd, en wacht alleen nog de validatie aan de hand van een proef in het veld.

Uiteindelijk zijn voor al deze problemen ook oplossingen gevonden, die nieuwe inzichten hebben opgeleverd en waardoor unieke ideeën en technologie is ontwikkeld. Dit is echter wel ten koste gegaan van tijd en geld.

Hierna volgt een overzicht van enkele specifieke uitdagingen en oplossingen:

WP	Uitdaging	Omschrijving	Oplossingsrichting	Status
3	Drive train	De innovatieve Magnax 300 kW ring-generator bleek ondanks een uitgebrachte offerte niet leverbaar	Commercieel verkrijgbaar was wel een 75 kW generator Later is bij een andere leverancier wel een 300 kW ringgenerator gevonden	75 kW generator is aangekocht 300 kW generator is beschikbaar voor opschaling



WP	Uitdaging	Omschrijving	Oplossingsrichting	Status
2	Rotor design De levensduur van de verbindingen tussen strut en vleugel kon bij het eerste ontwerp niet vanuit de modellering aangetoond worden	Er zijn veel verschillende varianten ontworpen van de strut-vleugelverbinding. Door onzekerheden over het totale dynamische gedrag, in combinatie met hoge belastingen op deze verbindingen en een slank ontwerp, is het tot medio 2020 niet gelukt dit probleem bevredigend op te lossen	Verschillende staal en composiet-oplossingen zijn bedacht, ook met steun van de TU, en met inzet van specialisten van Mechdes en Pontis. Uiteindelijk is met een nieuwe partner Solico een oplossing ontworpen en op kleine schaal beproefd die voldoet	Ontwerp en met kleinschalige test bewezen oplossing beschikbaar
2	Rotor design Het effect van het dynamisch gedrag van de turbine was groter dan bij de aanvraag voorzien en lastiger te modelleren (toetsing op eigen frequentie)	Onderdeel van het project was de ontwikkeling van een dynamisch model voor verticale as windturbine. In de eerste berekeningen met dit model bleek een hoog risico op hoge belastingen als gevolg van eigenfrequentie. Omdat dit een bekend risico is bij windturbines in het algemeen en VAWT's in het bijzonder, is het team hier heel zorgvuldig mee omgegaan.	Ontwerp optimaliseren in een aantal ontwerp iteraties voor wat betreft sterkte, stijfheid en gewicht en vorm. Model blijven optimaliseren, zodat goed onderscheid gemaakt kan worden tussen te verwachten reële effecten en modelleringseffecten.	Een ontwerp dat voldoet aan de dynamische eisen is nu beschikbaar. Een numeriek stabiel model is ontwikkeld. Gewenst is validatie aan de hand van een test-turbine
2/4	Structural design Staalconstructie en as-strut verbindingen	In de staalconstructie spelen vermoeiingsrisico's een rol als gevolg van dynamische belasting, in het bijzonder bij lasverbindingen die onderdeel zijn van de as-strutverbinding	Verschillende ontwerpoptimalisaties zijn ontworpen en (numeriek) geëvalueerd middels FEM modellering. In samenhang met het rotor-ontwerp is gewerkt aan de overall stabiliteit en de levensduur	Huidig ontwerp voldoet aan de criteria voor levensduur
2/9	Rotor design Energy generation	Verschillende modellen kwamen tot een verschillende te verwachten opbrengst van de turbine. Uiteindelijk bleek de meest voorzichtige inschatting de meest correcte	Rekenen met en communiceren van de reële te verwachten opbrengst van de 75 en 300 kW turbine	Robuuste schatting van de te verwachten opbrengst Gewenst is validatie aan de hand van een test-turbine

4.3 Wijzigingen t.o.v. het projectplan

Oorspronkelijk was beoogd om een 300kW TULYP te ontwikkelen. De innovatieve Magnax 300 kW ring-generator die hierin toegepast zou worden bleek ondanks een uitgebrachte offerte echter niet leverbaar. Mede hierdoor is de ontwikkeling vervolgens gericht op een 75kW TULYP en is ook een 75kW generator aangekocht.



Omdat dit een (belangrijke) tussenstap is naar de uiteindelijke 300kW TULYP is het ontwerp van de 300kW versie ook uitgewerkt. Uiteindelijk is de focus volledig gericht op de 75kW versie van de TULYP.

Daarnaast heeft alleen nog een verschuiving in type werkzaamheden plaatsgevonden en is voor TNO een wijziging doorgevoerd in de BTW vanwege Europese regelgeving. Het maximale subsidiebedrag bleef echter ongewijzigd.

4.4 PR, Spin off en kennisverspreiding

Het projectteam heeft haar concept op diverse plaatsen uitgedragen, zoals middels stands en presentaties op beurzen en congressen, zoals bij Springtij Forum in Terschelling en de Vakbeurs Energie, tijdens diverse bijeenkomsten van de Nederlandse WindEnergie Associatie (NWEA) en deelname aan de PortXL roadshows als Start Up Accelerator.

Technische inzichten en resultaten zijn door Arkomp, TNO en TU Delft gepresenteerd op verschillende conferenties en publicaties, zoals het Wind Energy Symposium in 2018 van het American Institute of Aeronautics and Astronautics, de Wind Energy Science Conference in 2019 in Cork, Ierland en Wind Energy en Renewable Energy.

Daarnaast zijn er diverse bilaterale contacten geweest met potentiële gebruikers en partners zoals de WindUnie. Met lokale partijen zijn de locatieonderzoeken gedeeld en besproken.

Ter ondersteuning is gebruik gemaakt van infographics en visualisaties. Ook is in het kader van het innovatieprogramma van PortXL een promotiefilm gemaakt.

De verkregen bekendheid resulteerde in de opname van TULYP Wind in het boek *Startup Solutions* van StartupDelta, in samenwerking met de Postcode Loterij en Green Challenge. Dit boek bevat boeiende en innovatieve oplossingen van startups voor de energietransitie. Ook is de Tulyop opgenomen in de Stowa publicatie 'Kansen voor kleine windturbines bij waterschappen'

De gedeelde inzichten, ideeën en technologie zijn toepasbaar voor alle VAWT's. Niet alleen op het land zoals voor de TULYP beoogd, maar zeker ook voor offshore toepassingen. Met name de toepassing hiervan op de diepe Noordzeegebieden heeft potentie, omdat de VAWT technologie goed geschikt is voor drijvende platforms. De verticale opstelling geeft een stabielere constructie. (Zie bijvoorbeeld deze publicatie voor meer informatie: <https://www.tno.nl/en/focus-areas/energy-transition/roadmaps/renewable-electricity/wind-energy/support-structure-wind-turbine/optimization-of-a-floating-support-structure-for-a-vawt/>)

De technische onderzoeken hebben geresulteerd in een groot aantal openbare publicaties:

Publicaties

LeBlanc, B. P., & Ferreira, C. S. (2018). Experimental Determination of Thrust Loading of a 2-Bladed Vertical Axis Wind Turbine. *Journal of Physics: Conference Series*, 1037, 022043. [<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1037/2/022043>]

LeBlanc, B., & Ferreira, C. S. (2018). Overview and Design of PitchVAWT: Vertical Axis Wind Turbine with Active Variable Pitch for Experimental and Numerical Comparison. In 2018 Wind Energy Symposium. American Institute of Aeronautics and Astronautics. [<https://doi.org/10.2514/6.2018-1243>]

Brandetti, L., Tavernier, D. D., Leblanc, B., & Ferreira, C. (2020). Experimental test of variable loads on a vertical-axis wind turbine. *Journal of Physics: Conference Series*, 1618(3), 032037. [<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1618/3/032037>]



De Tavernier, D., & Ferreira, C. S. (2020). A new dynamic inflow model for vertical-axis wind turbines. *Wind Energy*, 23(5), 1196–1209.

[<https://doi.org/10.1002/we.2480>]

De Tavernier, D., Ferreira, C., Viré, A., LeBlanc, B., & Bernardy, S. (2021). Controlling dynamic stall using vortex generators on a wind turbine airfoil. *Renewable Energy*, 172, 1194–1211.

[<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.019>]

Huang, M., Ferreira, C., Sciacchitano, A., & Scarano, F. (2020). Experimental Comparison of the Wake of a Vertical Axis Wind Turbine and Planar Actuator Surfaces. *Journal of Physics: Conference Series*, 1618(5), 052063. [<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1618/5/052063>]

LeBlanc, B., & Ferreira, C. (2020). Experimental characterization of H-VAWT turbine for development of a digital twin. *Journal of Physics: Conference Series*, 1452, 012057.

[<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1452/1/012057>]

LeBlanc, B. P., & Ferreira, C. S. (2018). Experimental Determination of Thrust Loading of a 2-Bladed Vertical Axis Wind Turbine. *Journal of Physics: Conference Series*, 1037, 022043.

[<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1037/2/022043>]

Msc thesis: Lu, W. (2020). *Aerodynamic modelling of vertical axis wind turbine struts: Using the lifting line method CACTUS* [Delft University of Technology].

[<http://resolver.tudelft.nl/uuid:89411fc9-e31f-44cf-a62c-70268d1af2ad>]

Patil, Y. V. (2021). PIV Experimental Comparison of Vertical Axis Wind Turbine Wake with Theoretical Models [Delft University of Technology].

[<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A2ead2b5e-6157-4fda-8fcb-942d5feaf41b>]

Nikhilesh, K. V., & V, N. K. (2021). Simulation and validation of wake deflection in vertical-axis wind turbines [Delft University of Technology].

[<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A7434c2a8-83cb-4442-b555-4b7d491fb9fc>]

Project reports: Kiiru, Beatrice M. (2020) Design of the Blade-Strut Joint for the Tulyp75 Wind VAWT, TUDelft

Brandetti, L. (2020) LTT experiment of the DU17DBD25 airfoil

Feike Savenije, Bruce LeBlanc, Eric Pieterse and Harold Lever; 'Aero-elastic analysis of a VAWT with Δ -wing'. Presented at the Wind Energy Science Conference 2019, Cork, Ireland, 2019.

Msc thesis: Bose Sumantraa; 'Aeroelastic Analysis of a 300kW H-type Vertical axis Wind Turbine'. Master thesis, TUE, 2020.

4.5 Inhoudelijke resultaten

Samengevat zijn met het project onder andere de volgende resultaten bereikt:

- Inzicht, dynamische modellen, unieke ideeën en technologie voor toepassing in VAWT's. Gedeeld en openbaar gemaakt middels congressen, symposia en een groot aantal technische artikelen.
- Basisontwerp van een 300kW TULYP
- Definitief Ontwerp van een 75kW TULYP
- Volledig 3D model van alle structurele elementen
- Inzicht in de relevante landelijke, regionale en lokale (vergunning-)regelingen, wet- en regelgeving.



- Geluidanalyses die aantonen dat het TULYP-concept weinig overlast veroorzaakt
- Locatieonderzoek en Business cases voor ruim 30 locaties
- Verschillende intentieverklaringen getekend voor potentiële locaties en met gebruikers
- Op basis van een onderzoek naar risicozonering/effectafstand van een windturbine zijn de randvoorwaarden voor succesvolle inpassing van de TULYP in stedelijk gebied vastgesteld, i.s.m. Bosch & van Rijn.
- Voor een pilotlocatie in Groningen is het vergunningetraject volledig doorlopen en is een omgevingsvergunning voor bouw van een TULYP 75 verleend door de gemeente Groningen.
- Meetprogramma voor de veldtesten is opgezet en gedocumenteerd
- Opname in het PortXL Start Up Accelerator-programma
- Opname van TULYP Wind in het boek *Startup Solutions* van StartupDelta

4.6 Financiële resultaten

De voorschotten van de subsidie zijn alleen gebruikt voor de beoogde werkzaamheden en daarnaast is door de initiatiefnemers en diverse partners aanvullend geïnvesteerd om het project te realiseren.

De financiële resultaten zijn in detail weergegeven in de financiële rapportage.



5 Conclusie en aanbevelingen

Markt is enthousiast en ziet potentie

Het TULYP-concept is door marktpartijen enthousiast ontvangen. Men ziet veel toegevoegde waarde in het concept. Deze toegevoegde waarde bestaat uit de toepasbaarheid van dit concept in de stedelijke bebouwde omgeving. Vooral rondom industrie-/bedrijfsterreinen blijkt de interesse hoog. Zeker ook als er continue bedrijfsvoering plaatsvindt op deze locaties. Hierbij kan een 'achter-de-meter' oplossing gerealiseerd worden die het overbelaste energienet niet zal belasten. De voordelen van de beperkte hoogte, de sterk verminderde slagschaduw werking van de molen en de lage geluidsproductie zijn grote voordelen die gewaardeerd worden.

Vernieuwend ontwerp levert veel nieuwe inzichten, ideeën en oplossingen

Het project bleek aanzienlijk complexer dan oorspronkelijk gedacht. Het projectteam is met diverse technische problemen geconfronteerd. Het ontwerp en de analyse van machines van het VAWT-type is een veel minder gestandaardiseerd proces dan met betrekking tot HAWT-machines die de markt domineren. Vanuit een aerodynamisch-, structureel en mechanisch ontwerppunt zijn typische problemen, vereisten, rekenmodellen en richtlijnen minder begrepen of beschikbaar. Uiteindelijk zijn alle uitdagingen waarvoor het projectteam kwam te staan opgelost. Dit heeft veel inzicht, nieuwe dynamische modellen, unieke ideeën en technologie voor toepassing in VAWT's opgeleverd. De aerodynamica en aero-elasticiteit zijn ook experimenteel bestudeerd en gedemonstreerd. Deze inzichten zijn gedeeld op symposia, congressen en een groot aantal technische publicaties. Zo heeft dit project een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de uitbreiding en verspreiding van het kennisniveau op het gebied van toepassing van verticale as windturbines.

De gedeelde inzichten, ideeën en technologie zijn toepasbaar voor alle VAWT's. Niet alleen op het land zoals voor de TULYP beoogd, maar zeker ook voor offshore toepassingen. Veel van de ontwikkelingen van het TULIP-WIND-project worden gebruikt voor de ontwikkeling van offshore technologie, zoals blijkt uit de publicatielijst. Met name de toepassing hiervan op de diepe Noordzeegebieden heeft potentie.

Gereed voor bouw en testen prototype

Het ontwerp van de 75kW TULYP is geheel op uitvoeringsniveau uitgewerkt en compleet. Op basis van offertes van gerenommeerde partijen is de business case uitgewerkt. Voor de daadwerkelijke bouw op een locatie in Groningen is een omgevingsvergunning verleend. Technisch gesproken kan de bouw dus beginnen.

Daarnaast is ter voorbereiding van de veldtesten een meetprogramma opgezet en gedocumenteerd.

Investeerder niet tijdig gevonden

De oplossing van genoemde problemen heeft naast nieuwe inzichten ook geleid tot een langere doorlooptijd. Het is niet gelukt in de doorlooptijd van het subsidieproject ook investeerders te vinden om de laatste stap, de feitelijke bouw van het prototype daadwerkelijk te kunnen starten.

Dit ondanks de grote interesse in de markt en de belangrijke bijdrage die deze windturbine aan de energietransitie kan leveren. De TULYP75 en de TULYP300 kwalificeren als mid-size windturbines en kunnen een goede oplossing zijn in situaties waar een grote windturbine te veel weerstand in de omgeving oproept. Immers de hoogte is beperkt, de slagschaduw zal door het ontwerp rustig zijn en bovenal de geluidsproductie zal minimaal zijn, door TNO momenteel geschat op 42dBA, dat is vergelijkbaar met de "normale" achtergrondruis in Nederland.

Daarnaast is de TULYP een goede oplossing bij lokale energieafnemers, waardoor geen grotere capaciteit voor het openbare net gevraagd wordt, wat in grote delen van het land, zoals bekend, een



knelpunt is. Met andere woorden, de TULYP kan op bijna iedere locatie op het bestaande netwerk worden aangesloten en biedt dus een veelzijdige oplossing voor een duurzame energiehuishouding.

Deze waarden worden door velen gezien, echter investeerders willen meer zekerheid in de vorm van een reeds gerealiseerd exemplaar, beter gezegd een gevalideerd prototype. De subsidie is echter gebonden aan termijnen en deze zijn verlopen. Het verdient daarom aanbeveling om te blijven zoeken naar subsidie- en/of investeringsmogelijkheden om het prototype te kunnen bouwen.

Met zo'n gevalideerd prototype zal de toekomstige toepassing van deze Verticale As Wind Turbine technologie mogelijk worden. Niet alleen de midsize onshore variant, maar ook als drijvende windturbine op de diepe Noordzeegebieden heeft VAWT technologie potentie.



Bijlage 1. Eindrapporten Pontis, TNO en TU Delft

De specifieke beschrijvingen van de werkzaamheden door Pontis engineering, TNO en TU Delft, die is verwerkt in deze eindrapportage, is hier als bijlage bijgevoegd.

Tulyp Wind project

Contributions by Pontis Engineering.

The contributions are listed per WP.

WP1 – Project Management / Introduction

Design and analysis of VAWT type machines is much less standardised process then with respect to HAWT machines which dominate the market place. From a structural and mechanical design point, typical issues, requirements and guidelines are less understood or available. This challenge is one reason Pontis Engineering (Pontis) wanted to be a part of the Tulip Wind project. In this regard, we Pontis, are pleased with the learning and knowledge gained throughout. Unique ideas and technology were also developed within this project. All of these aforementioned benefits have helped to widen Pontis capabilities in the composite wind energy business.

WP2 – Rotor/aerodynamic design

300 kW and 75 kW turbines

As Pontis we supported to project to estimate the performance effects of the Tulyp geometry, including the rotor, struts, and connections.

The original intent was to develop a 300 kW turbine. Later it become necessary to develop a smaller 75 kW prototype version. The consequence of this was additional design work for the internal structural concepts and connection types would not directly translate between the different sized blades. As well as different internal structures, different blade joint methods were also needed.

Throughout changes to the original scope occurred. In most cases, these were to be expected as part of the development process and working with various partners. However, the two different sized machines did contribute to more work been done.

Global Dynamic Turbine Model

Though not originally in scope, to help validate the TNO model which was used to generate loads, we provided a global beam model of the rotor that helped validate the basic unloaded responses. Thereafter the TNO model could be used to generate more detailed output with confidence.

Certification Documentation

The requirements and certification guidelines were studied and determined for VAWT blades. This included the TUV certification workshop With regards to IEC 61400 guidelines. We provide input for “design basis” documentation which included DFMA.

Lightening Protection Systems (LPS)

Not originally in our scope, but we were well placed to investigate this topic, study and finding suitable solutions for LPS. We talked to different supplier about the “standard” solutions they could provide and also talked about new LPS developments. Here we learned the different challenges for VAWT.

WP4 – Structural design

Blade Structure and design

For the rotors and thus blades the required composite internal structure was given much attention and was the primary scope for Pontis. The choices here affect performance, through mass and blade quality, and overall turbine economics, through material and production choices. Various concepts were explored, both for the 75 kW and 300 kW variants.

One key aspect of proposed blade design was to use recent low cost carbon UD pultrusion technology as part of the main load carrying structure. The benefits of included, quality and control (pre-made by machine), low cost (due to machine volume and fibre choices), best in class specific properties (high FVF). Together with low cost one shot vacuum infusion, to minimise bonding, we strongly believe this would give strong competitive advantage in the VAWT market.

Blade connections & joints

On a turbine level we helped the project investigate what type joints (fixed, pinned or both) best suited the design. Thereafter, for the different sized turbines, different joint methods were analysed and designed to meet the detailed requirements. The connection designed especially was not a standard solution, therefore this required a great portion of Pontis's effort. From the rotor design perspective the joints were the most difficult part. On the connections much project interaction was required as this was also the interface with the tower and specific masses of which influenced the global turbine model.

Connection Testing

For testing of the 75 kW prototype connection we supported finding a suitable test institute and defined a test method.

WP5 – (Re)development/assembly of prototype

75 kW Prototyping

For the 75 kW, which was a small chord blade, a novel concept was developed using a no mould production approach. This bi-passed the need for expensive tooling by forming around a foam core. Though intended only for prototype, depending on success the method could be developed for serial production if so needed. Lab scale testing was performed to validate this production method, 3D printing of lab scale moulds was used.

Cost calculations

Blade cost was an important part of overall business case. Pontis supported the cost calculations for the 75kW prototype and also for a 300kW serial product.

WP6 – Open field testing

Preparations measurement campaign

Various meetings in preparation of the measurement campaign are supported by Pontis, with input on for example measurement locations for the blades and connections/joints.

TULIPWIND, a Dutch IMBY approach to renewable energy

This document summarizes the TNO contribution to the TULIPWIND project (TEHE117057). It has been provided as input for the final report of the project assembled by coordinator Arkom.

The TULIPWIND project started on April 1st 2018. Before that, the consortium agreement was discussed and signed by all participants. ECN part of TNO started active participation in the project after the HER subsidy was granted in June 2018. About two years after ECN joined forces with TNO, ECN part of TNO (hereafter called TNO) changed name to TNO Energy Transition as of January 1st 2020.

The main objective of TULIPWIND was to develop a midsize Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) with properties that make it an 'in my backyard' solution: less noise, shading and visibility. The main objectives for TNO were to perform aero-elastic modelling and analysis of a VAWT and to execute a field measurement campaign to validate the modelling tools and the TULYP concept.

Project changes

In the first year of the project, the intended prototype design was changed to a 75kW VAWT (75kWv1), primarily due to difficulty finding a suitable 300kW generator. This design has been developed up to prototype manufacturing level and a field measurement campaign has been prepared for it. Early 2019 however, Arkom decided not to continue with the 75kW prototype, but to start with the design and development of the 300kW TULYP. In 2020, it was decided to shift the focus for the prototype design back to a 75kW version of the TULYP (75kWv2). This design has also been completed up to a level ready for prototype development. Due to the severe delay and time constraints, Arkom has not been able to realize the prototype within the project (WP5). These changes clearly impacted the activities of TNO; the measurement campaign (WP6) has not been performed nor the related analysis (WP7&8) and additional activities to support the design (WP4) were required.

TNO has communicated on the delay with the measurement campaign and related activities through the yearly progress reports for RVO prepared by Arkom. The decision with respect to the prototype development by Arkom has been pending until project stop and as a result the TNO scope for the field measurement campaign and related activities has been unchanged. On 2021/03/01, TNO asked Arkom to submit a project change related to accounting of 'forfaitaire BTW'. This has been submitted to RVO on May 14th, and accepted on June 17th (referenced as 'revised BTW').

The sections below contain a brief summary of activities for each of the work packages. Annex I contains a condensed overview of achieved results, planned and used resources, and explanation of deviation.

WP1 Project management

To align the closely interlinked activities of the different parties on the TULYP design, frequent progress meetings were organized by the coordinator and attended by TNO project team members during the project. A selection of the TNO progress updates have been added to the document list. TNO contributed to workshops for the 75kW and 300kW designs. During the second year, input and feedback has been provided to the (future) certification process of the TULYP.

WP2 Rotor / aerodynamic design

For a first indication of the aerodynamic noise of the TULYP design, the source noise has been analyzed by TNO and reported in [1]. The report has been valuable support to the permit request for the prototype location at EnTranCe Groningen.

The airfoils of a VAWT, especially the inboard sections of the TULYP design, are subjected to large angle of attack variations. The implementation of the dynamic stall model has been modified to account for these large variations.

WP3 Drive train design

The wind turbine operational curve (relation between wind speed, generator speed and power) has been iterated by TNO along with design modifications in WP2/4. A first version of the controller has been developed for use in the load calculations. Due to the absence of blade pitch actuators, the normal production controller is based on stall regulation: reducing the rotor speed to limit power above rated wind speed. To improve the operational curve, the rotor speed setpoint is derived based on a detailed set of aerodynamic rotor characteristics. The controller also contains options for resonance bridging and drive train damping. Figure 1 shows the resulting power curve of the wind turbine from quasi-static analysis and dynamic time domain simulations.

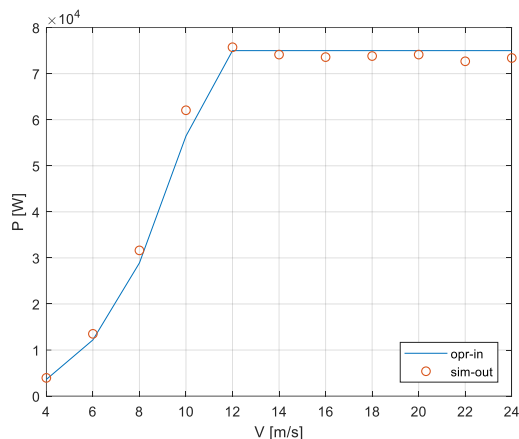


Figure 1: Power curve from quasi-static design ('opr-in') and dynamic time domain simulations ('sim-out')

TNO provided input related to the implementation of the normal production controller of the TULYP to the electrical system developer and PLC programmer. The control design tasks in this work package have been repeated for the 300kW design and the second 75kW design.

WP4 Structural design

As first input for the wind turbine (rotor, nacelle/tower and foundation) designers, TNO provided aerodynamic loads from AeroModule standalone simulations.

After the preliminary aerodynamic analysis, the AeroModule has been coupled to a multi-body-simulation package to allow aero-elastic simulations of the TULYP VAWT. The developed parametric

model has been used to analyze the dynamic behavior and loads for a set of simplified conditions. Several design iterations have been modelled in the tool, to support the turbine (component) designers in the consortium. The iterations were mainly required to improve the dynamic behavior (such as natural frequency placement) and to optimize the rotor layout.

The aero-elastic load analysis and measurement plan of the TULYP 75kWv1 has been presented at the Wind Energy Science Conference 2019 (WESC2019) in Cork [2]. The aero-elastic modelling and analysis of the different TULYP VAWT design configurations and iteration has been reported in [3]. Figure 2 shows the 75kWv2 design drawing and aeroelastic model.

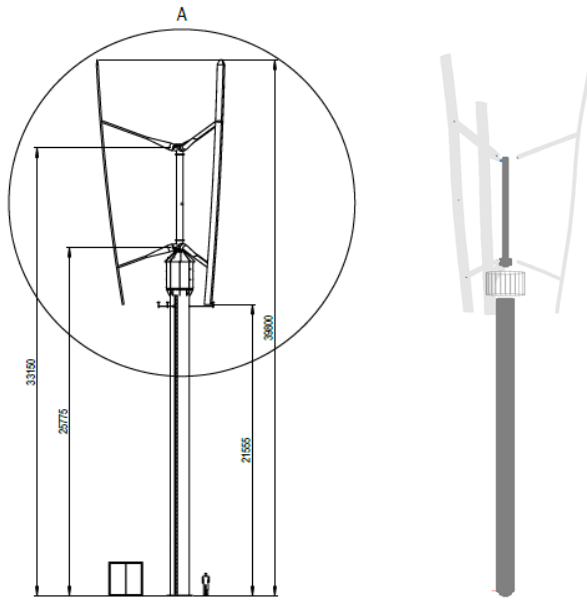


Figure 2: Drawing (left) and aeroelastic model (right) of the TULYP 75kWv2.

TNO co-supervised MSc-student Bose Sumantraa, who developed a method to account for aerodynamic damping in modal analysis of a VAWT [4]. The developed linearized model of sectional aero-dynamic loading allows to improve and accelerate the modal analysis and to increase understanding of the dynamic behavior of a VAWT across the operating range.

WP5 (Re)development/assembly of prototype

No activities for TNO.

WP6 Open field testing

TNO gathered input from all the participants on the required measurements for design and model validation. A site visit (EnTranCe Groningen) has been conducted to assess the inflow conditions and check the required infrastructure. Based on the input and observations, a measurement layout has been established (see figure 3) and documented in the concept measurement plan [5]. Due to the discussed changes in the project, the field measurement campaign was put on hold and the installation and execution phase of the campaign have not been performed.

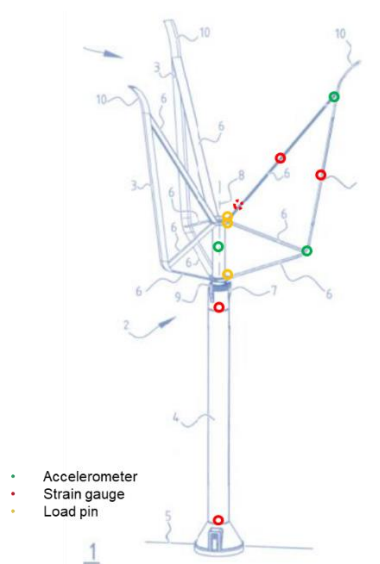


Figure 3: Layout for field measurement campaign

WP7 Data analysis field vs wind tunnel

Besides minor effort for preparation of data storage and analysis, the TNO activities in this work package were not started.

WP8 Data analysis array design

Not started for TNO.

WP9 Communication, dissemination, IPR

No activities for TNO.

References

- [1] Koen Boorsma; 'Aero-acoustic noise modeling TULIPWIND'. Technical report TNO 2018 R10946, Petten, The Netherlands, 2018.
- [2] Feike Savenije, Bruce LeBlanc, Eric Pieterse and Harold Lever; 'Aero-elastic analysis of a VAWT with Δ -wing'. Presented at the Wind Energy Science Conference 2019, Cork, Ireland, 2019.
- [3] Feike Savenije; 'Aero-elastic modelling and analysis of the TULYP midsize vertical axis wind turbine'. Technical report TNO 2021 R12189, Petten, The Netherlands, 2021.
- [4] Bose Sumantraa; 'Aeroelastic Analysis of a 300kW H-type Vertical axis Wind Turbine'. Master thesis, TUE, 2020.
- [5] Gerben Bergman; 'TULIPWIND 75 concept measurement plan'. Technical report TNO 2019 R10018, Petten, The Netherlands, 2021.

Annex I

The table below contains an overview of the resources as initially planned, revised budgets and finally used resources.

Cost type	Planned budget [€]	Revised - BTW [€]	Revised - BTW* [€]	Used [€]
A1	373456.00	406704.00	373456.00	180701.74
A2	60000.00	60000.00	60000.00	0.00
A3	16000.00	16000.00	16000.00	16608.55
A4	0.00	7683.00	40931.00	9643.28
Total	449456.00	490387.00	490387.00	206953.57

* The 'forfaitaire BTW' should be allocated in cost type A4, not distributed over A1 and A4 as indicated with the project change request (dd 2021/06/17).

The table below contains an overview per WP of achieved results, originally planned and used resources, and explanation of deviation.

WP	Results [%]	Planned [€]	Used [€]	Short explanation of deviation
1	70	23358.00	13773.04	Project stopped before end of the TNO activities.
2	70	22961.00	13160.25	Not complete due to the pending final aero-acoustic re-analysis of the as-built prototype (that was not available yet).
3	100	39029.00	37257.64	
4	100	78818.00	92745.07	Additional effort needed to support the additional versions of the TULYP design and the many iterations involved.
6	20	231690.00	39686.93	Preparation of the field measurement campaign performed for TULYP75kWv1. Measurement campaign installation and execution not performed due to unavailable prototype.
7	5	23450.00	687.36	Only minor effort for preparation of data storage. Data analysis not performed due to unavailable prototype.
8	0	30150.00	0.00	Not started.
Total WPs	55	449456.00	197310.29	-
BTW	-	0.00	9643.28	Change for accounting BTW.
Total	55	449456.00	206953.57	-

Tulyp Wind project

Contributions by TU Delft

The activities are listed per task as defined in the project proposal.

Prepared by: Prof. Carlos Ferreira, TU Delft

Date: 2021-12-21

WP1 – Project management

The TU Delft team members took part in the project meetings, discussing planning, progress and technical developments. We also contributed to the team reports and management deliverables.

WP2 – Rotor/aerodynamic design

T2.1. Design of the 3D blade.

The aerodynamic design of the 3D blade and rotor was developed. This included the study of 2D and 3D effects of VAWTs, developing new theories. A journal publication has been in review, currently in rewriting. An MSc thesis on the topic of 3D effects was developed in parallel to this project and an open source report is available. The results have been published (see publications, WP9).

A dedicated airfoil was designed by TU Delft for the Tulyp wind turbine and was tested in the LTT Wind tunnel, including the effect of unsteady aerodynamics and vortex generators. The data is published in an open source repository and the publication is open access (see publications, WP9).

An additional test for the airfoil designed by TUDelft for the Tulyp wind turbine was carried out in the LTT Wind tunnel, this time focusing on 360 degree polar of the airfoil to evaluate stand-still loads. The report of the test was shared in the project (see publications, WP9).

T2.2. Design of the strut-blades.

The impact of struts on a VAWT was evaluated by simulations. New models have been proposed. An MSc thesis project was developed and an open source report is available (see publications, WP9).

T2.3. Design of fairing

An engineering approach was used in the discussion for the design of the fairing. The structural design was the driver of the process.

T2.4. Aerodynamic study of the 3D rotor, performance and loads

Several rotor configurations were studied for the scaled prototype (75 kW) and full scale rotor (300 kW). This process was interactive with the other partners, evaluating power, performance and loads, and control strategies. Theoretical and numerical studies of the 3D unsteady aerodynamics of

VAWTs. The findings have been published in project reports shared with the partners, open access publications or its publication is in preparation (see publications, WP9).

T2.5. Experimental study of the 3D rotor

Several wind tunnel tests with H-VAWT model (PitchVAWT), including aeroelastic identification, load measurements, wake measurements and dynamic inflow effects, aiming at capturing dynamic effects due to turbulence. The findings have been published in open access or its publication is in preparation (see publications, WP9). New experiments will continue beyond the timeline of the project. The effect of roughness and unsteady motions (pitching), including dynamic stall, was also tested in 3D, complementing the experiments described in T2.1.

T2.6. Aeroacoustics design and tests (including open field)

A high fidelity aerodynamic and aeroacoustic simulation was conducted of the wind tunnel VAWT scaled test model. A new aero-acoustic model for the VAWT was developed, coupling an engineering noise model with an actuator cylinder model of the VAWT aerodynamics. The aerodynamic simulation was validated against the wind tunnel data. The two noise models showed excellent agreement. An open source journal paper has been produced and submitted for publication (see publications, WP9). Task 2.6 was modified, where the open field tests were replaced by high-fidelity simulation and validations and additional effort in tasks 2.1, 2.4 and 2.5. The task was then 100% completed.

WP4 – Structural design

T4.1. Load analysis of the initial TULIP wind turbine design to determine the design load envelope

Several iterations of the design were evaluated, supporting the structural design process (see also Task 2).

T4.2. Design and calculation of rotors, blades and struts

The Tulyp VAWT is equipped with an upper and lower strut, that connects the vertical blade structure to the rotor hub. The principle idea is to bond a connection flange (web) to the blade, that can thereafter be bolted to the struts via bolts and bushings. The study in this task evaluated the available joining techniques and sizing of the joint that would withstand static loading conditions provided by the project load engineer. The mechanical response to

applied loads as well as a simple topology optimization of the joint design was then evaluated by means of FEM. Recommended design measures that should be considered were highlighted. The results were presented in a project report (see publications, WP9)

WP6 – Open field testing

T6.1. Preparation of the measurement campaign.

See task T7.1

WP7 – Data analysis Field vs. Windtunnel

T7.1. Experimental wind tunnel study of the scaled VAWT.

Several wind tunnel tests were carried out of the scaled VAWT model in unsteady inflow conditions and forced unsteady loads generated by blade pitch control. These were carried out to evaluate models and phenomena (see publications, WP9).

T7.2. Validation of the aerodynamic models and design performance.

Several models with multiple level of fidelity have been used to simulate the scaled VAWT model. The comparison of the models with experiments have been published and a new benchmark paper is in preparation.

T7.3. Comparison of open field measurements and wind tunnel measurements.

For task 7.3 the open field was not performed. Therefore, the task was modified into the wind tunnel experimental study of different configurations, including multi VAWT interaction, to support task 8. The task was then 100% completed.

WP8 – Data analysis array design VAWT/HAWT

T8.1. Wake rotor interaction, impact on performance and loads and T8.2. Wake models and wind farm design of VAWT

This research has been conducted with CFD models of two VAWT in several configurations of interaction. A MSc student and a PhD student are continuing the research on this topic. Some results are already published and additional results will be published in open access.

T8.3. VAWT wind farm in HAWT wind farm

This configuration has been only preliminary explored, using engineering models. The other tasks of the WP have been prioritized as the results have been more promising. A MSc student and a PhD student are continuing the research on this topic (see T8.1).

T8.4. Experimental study of VAWT wake and wake VAWT interaction

This work started in this last year of the project. We have developed new small scale VAWT models for wind tunnel test and have tested in single VAWT configuration. Due to delays in this last year, the experiments of multiple VAWT in wind farm configurations will occur in May 2021. The results will be published in open access.

T8.5. Experimental study of HAWT VAWT interaction

Task 8.5 was modified to further develop task 8.4. The task was then 100% completed.

WP9 – communication, dissemination and IPR

Journal and conference publications already published during the period:

LeBlanc, B. P., & Ferreira, C. S. (2018). Experimental Determination of Thrust Loading of a 2-Bladed Vertical Axis Wind Turbine. *Journal of Physics: Conference Series*, 1037, 022043.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1037/2/022043>

LeBlanc, B., & Ferreira, C. S. (2018). Overview and Design of PitchVAWT: Vertical Axis Wind Turbine with Active Variable Pitch for Experimental and Numerical Comparison. In *2018 Wind Energy Symposium*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2018-1243>

Brandetti, L., Tavernier, D. D., Leblanc, B., & Ferreira, C. (2020). Experimental test of variable loads on a vertical-axis wind turbine. *Journal of Physics: Conference Series*, 1618(3), 032037.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1618/3/032037>

De Tavernier, D., & Ferreira, C. S. (2020). A new dynamic inflow model for vertical-axis wind turbines. *Wind Energy*, 23(5), 1196–1209. <https://doi.org/10.1002/we.2480>

De Tavernier, D., Ferreira, C., Viré, A., LeBlanc, B., & Bernardy, S. (2021). Controlling dynamic stall using vortex generators on a wind turbine airfoil. *Renewable Energy*, 172, 1194–1211.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.019>

Huang, M., Ferreira, C., Sciacchitano, A., & Scarano, F. (2020). Experimental Comparison of the Wake of a Vertical Axis Wind Turbine and Planar Actuator Surfaces. *Journal of Physics: Conference Series*, 1618(5), 052063. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1618/5/052063>

LeBlanc, B., & Ferreira, C. (2020). Experimental characterization of H-VAWT turbine for development of a digital twin. *Journal of Physics: Conference Series*, 1452, 012057. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1452/1/012057>

LeBlanc, B. P., & Ferreira, C. S. (2018). Experimental Determination of Thrust Loading of a 2-Bladed Vertical Axis Wind Turbine. *Journal of Physics: Conference Series*, 1037, 022043.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1037/2/022043>

Msc thesis

Lu, W. (2020). Aerodynamic modelling of vertical axis wind turbine struts: Using the lifting line method CACTUS, Delft University of Technology.
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A89411fc9-e31f-44cf-a62c-70268d1af2ad>

Patil, Y. V. (2021). PIV Experimental Comparison of Vertical Axis Wind Turbine Wake with Theoretical Models, Delft University of Technology
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A2ead2b5e-6157-4fda-8fcb-942d5feaf41b>

Nikhilesh, K. V., & V, N. K. (2021). Simulation and validation of wake deflection in vertical-axis wind turbines, Delft University of Technology
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A7434c2a8-83cb-4442-b555-4b7d491fb9fc>

Project reports:

Kiiru, Beatrice M. (2020) Design of the Blade-Strut Joint for the Tulyp75 Wind VAWT, TUDelft

Brandetti, L. (2020) LTT experiment of the DU17DBD25 airfoil

Thesis and papers submitted and in preparation:

1. In preparation:

1. PhD thesis by Bruce LeBlanc, part of the work developed in the project for tasks T2.1, 2.2,2.4,2.5, 7.1, 7.2
2. PhD thesis by Livia Brandetti, part of the work developed in the project for tasks 2.5,2.6, 6.1, 7.1, 7.2
3. PhD thesis by Ming Huang, part of the part of the work developed in the project for tasks 8.1, 8.2, 8.4
4. Journal paper on the benchmark of model simulations vs the experimental tests, output of task 7.2.

2. Journal papers submitted/on revision :

1. on aeroacoustic modeling and aerodynamic model comparison of the VAWT including experimental validation, output of task T2.6
2. on experimental VAWT testing and measurements, output tasks 7.1 and 7.2
3. on PIV measurements of the VAWT in wind tunnel conditions, output tasks 7.1 and 7.2
4. on 3D effects of the 3D actuator cylinder, output tasks 2.1, 2.2, 2.4