

Onderwerp Context bij wetenschappelijke publicatie
Van Prof.dr. Simon Watson en Prof.dr. Dominic von Terzi
Aan Ministerie van Klimaat en Groene Groei

Contactpersoon
Simon Watson
S.J.Watson@tudelft.nl
Datum
19-12-2025

Inleiding

De recente wetenschappelijke publicatie 'A theoretical upper limit for offshore wind energy extraction' van Simão Ferreira, Larsen and Sørensen¹ en de daaropvolgende aandacht in de media hebben geleid tot vragen van het ministerie van Klimaat en Groene Groei. We willen graag van de gelegenheid gebruikmaken om context te geven bij de bevindingen van deze publicatie.

Efficiëntie van windmolenparken

De efficiëntie van een windmolenpark en dus de hoeveelheid energie die het in een jaar kan opwekken, is een zeer gevoelige functie van een groot aantal factoren die ook sterk met elkaar verband houden. Dit roept belangrijke vragen op:

- Hoe moeten energieopbrengst, energiekosten, beschikbare oppervlakte, netwerkaansluitingskosten en milieu-impact voor een windmolenpark met elkaar in evenwicht worden gebracht, d.w.z. welke modellen en meetmethoden zijn redelijk om volledig geïnformeerde conclusies te kunnen trekken?
- Wat is de energieopbrengst van offshore windmolenparken als er meer parken in de buurt worden gebouwd, rekening houdend met de impact van interacties tussen de parken onderling?
- Welke turbineafmetingen moeten we gebruiken en waarom, bijvoorbeeld moet er een 'Noordzeenorm' komen?
- Wat is het potentieel van nieuwe technologieën om de opbrengst van windparken te verhogen, waaronder het gebruik van nieuwe regelingssystemen voor windparken en nieuwe turbineontwerpen?
- Hoe dicht staan de turbines bij elkaar, hoe wordt de turbine bediend bij variaties in windsnelheid en de heersende atmosferische omstandigheden, waaronder de gemiddelde windsnelheid op de locatie en hoe deze in de loop van de tijd varieert?

Het is belangrijk om te begrijpen dat bovenstaande kwesties onderling verband houden. De capaciteitsfactor, de omvang van het park, de dichtheid van het park en de keuze van de windturbine zijn dus met elkaar verbonden en moeten verstandig worden gekozen.

Het artikel en het debat

In het peer-reviewed artikel, gepubliceerd in het tijdschrift Cell Reports Sustainability, stellen de auteurs een eenvoudig model voor om een limiet vast te stellen voor de energieopbrengst van zeer grote windparken. Op basis van dit model en enkele restrictieve aannames concluderen zij dat de voorspelde waarde van de capaciteitsfactor van windparken na verliezen 34,6% bedraagt, terwijl de auteurs het Nederlandse beleid op 51,5% schatten.

Hoewel dit een groot verschil lijkt, vertegenwoordigt de studie van Simão Ferreira et al. Een pessimistisch scenario op basis van één zeer groot hypothetisch windpark (10 GW, vergeleken met de huidige parkgrootte van ca. 1 GW) waar de turbines dicht bij elkaar staan (10 MW/km², vergeleken met de huidige gemiddelde vermogensdichtheid van Nederlandse windparken van ca. 6,5 MW/km²). Bovendien is de conclusie gebaseerd op een suboptimale turbinekeuze² voor een dergelijk park, waarbij wordt aangenomen dat er vóór 2050 geen nieuwe technologieën zullen worden toegepast om de efficiëntie van turbines of parken te verbeteren.

Ander onderzoek

Er wordt nationaal en internationaal veel onderzoek gedaan naar de verschillende hierboven genoemde kwesties. Dit omvat de lopende onderzoeksprojecten MERIDIONAL (EU)³, EuroWindWakes (Dutch-German), SUDOCO (EU)⁴, Crosswind Wake Mixing (Dutch) and ClusterWake (Dutch). Referenties, waaronder het werk van Kosović et al., hebben aangetoond dat interacties tussen windparken onderling en interacties met de atmosferische grenslaag veel complexer zijn dan in het vereenvoudigde model van Simão Ferreira et al. wordt voorgesteld, en dat optimale turbineafmetingen en nieuwe technologieën kunnen helpen om meer energie uit een bepaald windpark te halen. Bovendien is het belangrijk op te merken dat de capaciteitsfactor misschien geen goede prestatie maatstaf is om windparken te beoordelen en dat het gebruik ervan nog steeds actief wordt bediscussieerd in de wetenschappelijke gemeenschap.

Er zijn verschillende studies uitgevoerd naar scenario's voor de bouw van offshore windparken, waarbij gebruik is gemaakt van geavanceerdere en nauwkeurigere modellen die een groter aantal factoren kunnen meenemen dan het artikel van Simão Ferreira et al. Zo rapporteert Whiffle een capaciteitsfactor van 45,2%⁵ zonder extra verliezen op basis van de Nederlandse 21 GW-route kaart (voor 2030) met een turbinedichtheid van ~10 MW/km², en het Fraunhofer-instituut voor windenergieonderzoek rapporteert een capaciteitsfactor voor het Nederlandse windmolenpark van 46,1% voor hetzelfde 21 GW-scenario⁶ op basis van turbinedichtheden tussen 4 en 10 MW/km², afhankelijk van het ontwikkelingsgebied. Toepassing van het eenvoudige model dat wordt gebruikt in Simão Ferreira et al, gebaseerd op alle bestaande en toekomstige Nederlandse offshore windparkzones in de 21 GW-roadmap, levert een theoretische capaciteitsfactor op van 47,7% zonder extra verliezen. Dit staat in contrast met een capaciteitsfactor van 39,1% zonder verliezen voor een enkel windpark van 10 GW met een turbineafstand van 10 MW/km².

Uit deze bevindingen blijkt dat er, afhankelijk van de gemaakte aannames, verschillende capaciteitsfactoren te verwachten zijn en dat voorzichtigheid geboden is bij de interpretatie van de verkregen waarden. Er wordt voortdurend onderzoek gedaan om meer inzicht te krijgen in de onzekerheden en om de ontwikkeling van windparken te optimaliseren, zodat deze zo efficiënt mogelijk worden en tegelijkertijd hun fysieke en ecologische voetafdruk wordt verkleind.

Vooruitgang in de wetenschap

Windenergie heeft de afgelopen 40 jaar een enorme ontwikkeling doorgemaakt, van een relatief nichevorm van energieopwekking tot een belangrijke bijdrage aan ons huidige en toekomstige energiesysteem, tegen kosten die vergelijkbaar zijn met die van fossiele brandstoffen, maar met veel minder impact op het milieu. Het feit dat we nu op grote schaal offshore windparken kunnen ontwikkelen, is een bewijs van het onderzoek en de industriële ontwikkeling die in die periode hebben plaatsgevonden. Uit verschillende studies blijkt duidelijk dat deze parken de energie kunnen leveren

die we nodig hebben, maar dit vereist verdere innovaties op het gebied van het ontwerp en de besturing van windparken, betere kennis over de interactie tussen windparken en de atmosfeer, en een beter begrip van de interactie tussen clusters van windparken om de onzekerheid voor ontwikkelaars en overheden te verminderen.

Conclusies

De efficiëntie van een windpark en dus de hoeveelheid energie die het in een jaar kan opwekken, is erg gevoelig voor een reeks parameterkeuzes. De resultaten van vereenvoudigde modellen moeten met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd en er moet rekening worden gehouden met de beperkingen van de onderliggende aannames.

Wetenschappelijk debat is essentieel om te leren en te innoveren. Wat ook nodig is om offshore windenergie vooruit te helpen, is een politiek en maatschappelijk debat over de afwegingen die de samenleving moet maken tussen de gewenste energieopbrengst, de beschikbare ruimte en aanvaardbare kosten.

Tot slot is het goed om te bedenken hoe snel windenergie zich in slechts enkele jaren tijd heeft ontwikkeld. We kunnen er gerust vanuit gaan dat er in de komende decennia nieuwe fysische inzichten en innovatieve technologieën zullen ontstaan die windenergie nog aantrekkelijker maken voor de Nederlandse en Europese energietransitie.

Verdere discussie

Met deze memo hopen we u een wetenschappelijke context te hebben geboden die een antwoord biedt op enkele van uw vragen over dit onderwerp. We gaan hier graag met u over in gesprek tijdens een geplande vergadering op 9 januari 2026.

Prof. Dr. Simon Watson

Director of the TU Delft Wind Energy Institute (DUWIND), Professor of Wind Energy Systems, TU Delft

S.J.Watson@tudelft.nl

Prof. Dr. Dominic von Terzi

Head of Section Wind Energy, Professor of Wind Energy Technology, TU Delft

D.A.vonTerzi@tudelft.nl

References:

- [1] Simão Ferreira et al., A theoretical upper limit for offshore wind energy extraction, Cell Reports Sustainability (2025), <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2025.100573>
- [2] Mehta, M. K., Zaaier, M. B. & von Terzi, D. A., Drivers for optimum sizing of wind turbines for offshore wind farms, 2024, In: Wind Energy Science. 9 <https://doi.org/10.5194/wes-9-141-2024>
- [3] www.meridional.eu
- [4] www.sudoco.eu

- [5] Baas, 21GW Roadmap Wake Study – Final Report (2025).
https://offshorewind.rvo.nl/file/download/52757701-13a5-4c0f-8dff-b7ef7304ebed/rvo_wakestudy_final_report_version4_20250606_linkviewer.pdf
- [6] Dörenkämper et al., Simulating the Impact of Offshore Wind Expansion on Yield and Efficiency in the North Sea by 2050. Project number: 10-11790 (2025),
https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/_Anlagen/Downloads/IWES_Bericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Verder lezen:

- Kosović B, Basu S, Berg, J Berg LK, Haupt SE, Larsén XG, Peinke J, Stevens RJAM, Veers P, and Watson S (2025) 'Impact of atmospheric turbulence on performance and loads of wind turbines: Knowledge gaps and research challenges'. Wind Energ. Sci. Discuss., <https://doi.org/10.5194/wes-2025-42> (preprint in review)
- Khan M A, Allaerts D., Watson S J, and Churchfield M J (2025) 'Investigating the Relationship between Simulation Parameters and Flow Variables in Simulating Atmospheric Gravity Waves for Wind Energy Applications', Wind Energ. Sci. 10, 1167–1185, <https://wes.copernicus.org/articles/10/1167/2025/>
- Cheneka B R, Watson S J and Basu S (2023) 'Quantifying the impacts of synoptic weather patterns on offshore wind power production and ramp events under a changing climate'. Energy and Climate Change 4 100113. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100113>
- Cheneka B, Watson S J and Basu S (2021) 'Associating synoptic-scale weather patterns with aggregated offshore wind power production and ramps'. Energies 14(13), 3903
- Li B, Basu S, Watson S J and Russchenberg H W J (2021). 'Mesoscale modeling of a "Dunkelflaute" event'. Wind Energy 24, 5-23
- Cheneka B, Watson S J and Basu S (2020) 'A simple methodology to detect and quantify wind power ramps'. Wind Energ. Sci. 5, 1731–1741, <https://doi.org/10.5194/wes-5-1731-2020>
- Mehta M, Zaayer M and von Terzi D, 2024. 'Designing wind turbines for profitability in the day-ahead markets'. Wind Energ. Sci. 9, 2283-2024. <https://doi.org/10.5194/wes-9-2283-2024>
- Mehta M, Zaayer M and von Terzi D, 2024. 'Drivers for optimum sizing of wind turbines for offshore wind farms'. Wind Energ. Sci. 9, 141-2024, <https://doi.org/10.5194/wes-9-141-2024>
- Joshi R, von Terzi D and Schmehl R, 2025. 'System design and scaling trends in Airborne Wind Energy'. Wind Energ. Sci. 10, 695–718, <https://doi.org/10.5194/wes-10-695-2025>
- Viré A, de Tavernier D and von Terzi D, 2025. 'Floating wind energy: challenges and opportunities in fluid mechanics'. Flow, Turbulence and Combustion.
- Li C, Mogollón J , Tukker A, Dong J, von Terzi D, Zhang C and Steubing B, 2022. 'Future material requirements for global offshore wind energy development'. Renewable and Sustainable Energy Reviews 164, 112603
- Watson S, Moro A, Reis V, Baniotopoulos C, Barth S, Bartoli G, Bauer F, Boelman E, Bosse D, Cherubini A, Croce A, Fagiano L, Fontana M, Gambier A, Gkoumas K, Golightly C, Iribas M, Jamieson P, Kaldellis J, Macdonald A, Murphy J, Muskulus M, Petrini F, Pigolotti L, Rasmussen F, Schild P, Schmehl R, Stavridou N, Tande J, Taylor N, Telsnig T and Wiser R (2019) 'Future emerging technologies in the wind power sector: A European perspective'. Renewable and Sustainable Energy Reviews 113, 109270